

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département Génie Civil
Laboratoire de technologie des matériaux et de Génie des procédés

THÈSE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT

Domaine : Science et Technologie Filière : Génie Civil
Spécialité : Génie Civil

Présentée par
SLIMANOU Houssam

Thème

**Gestion, caractérisation et valorisation des sédiments de dragage des
ports dans les matériaux de construction et leurs impacts sur
l'environnement (cas du port de Bejaia)**

Soutenue le : 19/06/2021

Devant le Jury composé de :

Nom et prénom

Grade

TAHAKOURT	Abdelkader	Professeur	Univ. de Bejaia	Président
BOUZIDI	Nedjima	Professeur	Univ. de Bejaia	Rapporteur
MOUSSACEB	Karim	Professeur	Univ. de Bejaia	Examineur
BENAMAR	Ahmed	MC-HDR	Univ. le Havre Normandie - France	Examineur
MERDAS	Abdelghani	MCA	Univ. de Setif	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens tenons à remercier en premier lieu, notre seigneur Dieu, le tout puissant qui m'a donné la patience, le courage et grâce auxquels j'ai pu achever ce mémoire.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Madame la Professeur BOUZIDI Nedjma, ma directrice de thèse d'avoir bien voulu diriger ce travail. C'est grâce à ses qualités humaines et scientifiques que j'ai pu mener à bien ce travail. J'ai apprécié beaucoup ses précieux conseils, son soutien permanent, ses encouragements et surtout la pertinence des jugements et le bien fondé de ses suggestions, qu'elle trouve ici le témoignage de ma sincère reconnaissance.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur le Professeur Tahakourt Abdekader du département de Génie Civil de l'université Abderrahmane mira de Béjaia d'avoir bien accepter de présider ce jury.

Ma profonde gratitude et vifs remerciements s'adressent à Monsieur Benamar Ahmed, Professeur à université le havre de France, d'avoir accepté d'examiner ce travail de thèse.

Je ne cesserai de remercier et d'exprimer ma profonde pensée à Monsieur Moussaceb karim le professeur du l'université de Bejaia, d'avoir accepté d'examiner ce travail de thèse, pour son soutien moral, sa disponibilité et ses critiques pertinentes qui m'ont servi afin de mener à bien la réalisation de cette thèse.

Mes sincères remerciements s'adressent aussi à Monsieur Merdas Abdelghani Maitre de conférences à l'université de setif d'avoir accepté d'examiner ce travail de thèse.

Un profond respect et ma plus grande pensée va vers le docteur Kherbache Attil Souad de l'université de Bejaia qui a guidé mes premiers pas dans le domaine de la recherche.

Mes sincères remerciements s'adressent aussi au professeur Dolores Eliche Quesada, pour m'avoir accueilli et encadré pendant une année au laboratoire de l'université de jaen, Espagne, et également pour sa disponibilité et ses conseils.

J'adresse mes remerciements les plus chaleureux à Luis Pérez Villarejo, pour tous les précieux conseils scientifiques, pour la confiance qu'il m'a témoignée, son aide et disponibilité sans limite.

Je souhaite remercier tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin pour la réalisation de ce travail. Je pense en particulier au personnel des laboratoires d'MDC et MDS du département de génie Civil et hall technologie de génie mécanique d'université de Bejaia.

Mes plus grands remerciements s'adressent à toute l'équipe du laboratoire LTP-Est, pour les essais qu'ils m'ont aidé à réaliser.

Je tiens aussi à remercier toutes mes collègues d'université de Bejaia et aux doctorants du laboratoire LTMGP et LGCA de l'université de Bejaia.

Je dédie cette thèse à mes parents et tous ma famille qui m'ont soutenu jusqu'au bout.

Merci à Tous

Table des matières

REMERCIEMENTS	I
TABLE DES FIGURES	IX
LISTE DES TABLEAUX	XII
INTRODUCTION GENERALE.....	1
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	4
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	6
INTRODUCTION	6
I.1 GENERALITES SUR LES SEDIMENTS DE DRAGAGE	6
I.2 DEFINITION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE	6
I.3 CONSTITUTION DES SEDIMENTS MARINS.....	7
I.3.1 Formation des sédiments	7
I.3.1.1 Phases inorganiques	8
I.3.1.2 Phases organiques	8
I.3.2 Interfaces du sédiment avec son milieu	9
I.3.2.1 Polluants des sédiments marins.....	9
I.4 EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES METAUX LOURDS	10
I.4.1 Tests de lixiviation.....	11
I.4.1.1 Les essais en batch	11
I.4.1.2 Essais en colonne	12
I.5 PROCEDE DE TRAITEMENT DES SEDIMENTS.....	13
I.5.1 Les prétraitements	13
I.5.2 Traitements physico-chimiques	13
I.5.2.1 Le traitement acide.....	14
I.5.2.2 Le lessivage.....	14
I.5.3 L'inertage thermique.....	14
I.5.4 La solidification/stabilisation à base de liants hydrauliques	15
I.5.5 Le traitement par ultrasons	15
I.6 ASPECT REGLEMENTAIRE ET GESTION DES SEDIMENTS	15
I.6.1 Réglementation internationale.....	16
I.6.1.1 La convention de Londres (1972)	16
I.6.1.2 La convention OSPAR (1992)	16
I.6.1.3 La convention de Barcelone.....	17
I.6.2 Réglementation nationale algérienne sur les sédiments de dragage	17
I.6.3 Destination des sédiments.....	17

I.7	VALORISATION DES SEDIMENTS.....	19
I.7.1	Valorisation des sédiments dans les mortiers	20
I.7.1.1	Les différents types de mortiers	21
I.7.1.2	Classe des mortiers.....	22
I.7.1.3	Composants du mortier	22
I.7.1.4	Préparation des mortiers.....	25
I.7.1.5	Caractéristiques des mortiers	26
I.8	VALORISATION DES SEDIMENTS DANS LES PRODUITS CERAMIQUES	27
I.8.1	Valorisation des sédiments de dragage marin dans le domaine des briques cuites .	27
I.8.1.1	Les principales matières premières	28
I.8.1.2	Procède de fabrication des briques cuites.....	29
I.8.1.3	Transformations physico-chimiques et minéralogiques au cours de la cuisson	31
I.8.1.4	Propriétés technologiques de durabilité des briques	33
I.8.2	Valorisation des sédiments de dragage marin dans le domaine des céramiques	35
I.8.2.1	La mise en œuvre des produits céramiques.....	36
I.8.2.2	Matières premières des carreaux des céramiques.....	36
I.8.2.3	Fabrication des matériaux céramiques	38
I.8.2.4	Transformation thermique des céramiques	39
I.8.2.5	Refroidissement	41
I.8.3	Le comportement environnemental.....	41
I.9	PRESENTATION DU PORT DE BEJAIA.....	43
I.9.1	Historique du port de Bejaia.....	43
I.9.2	Situation géographique du port de Bejaia	44
I.9.3	Constitutions du port de Bejaia	45
I.10	PLAN D'ECHANTILLONNAGE.....	46
I.10.1	Maillage des prélèvements.....	46
I.10.1.1	Plan d'échantillonnage déterministe ou ciblé.....	46
I.10.1.2	Plan d'échantillonnage aléatoire	46
I.10.1.3	Plan d'échantillonnage systématique	47
I.10.2	Typologie de dragage et nombre d'échantillon.....	47
I.10.2.1	Zones à échanges libres.....	47
I.10.2.2	Zones confinées (bassin portuaire).....	48
I.10.2.3	Ports de plaisance	48
I.10.3	Moyens de prélèvement	49
I.10.3.1	Prélèvement de sédiments superficiels.....	49
I.10.3.2	Prélèvement profond (carottage)	50
I.10.3.3	Conditions d'échantillonnage.....	51
I.10.3.4	Echantillonnage qualitatif	51
I.11	VOLUME DE DRAGAGE LORS DE L'ENTRETIEN DU PORT DE BEJAIA	52
I.12	SITE DE PRELEVEMENT DES SEDIMENTS DU PORT DE BEJAIA	53

I.13	CONCLUSION.....	55
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	56
CHAPITRE II : MATERIAUX ET METHODES D'INVESTIGATION		70
	INTRODUCTION	70
II.1	CARACTERISATION ENVIRONNEMENTALE	70
II.2	CARACTERISATIONS PHYSIQUES	70
II.2.1	Analyse granulométrique	71
II.2.2	Mesure de la teneur en eau (NF P 94-050)	71
II.3	ARGILOSITE	71
II.3.1	Les limites d'Atterberg (NF P 94-051) :	72
II.3.2	Valeur au bleu de méthylène (NF P 94-068)	75
II.3.3	Surface spécifique (EN 196-6)	77
II.3.4	Masse volumique absolue	77
II.3.5	Teneur en carbonate de calcium CaCO₃ (NF P 94-048)	78
II.4	CARACTERISATIONS CHIMIQUES ET MINERALOGIQUES.....	79
II.4.1	Analyse chimique	79
II.4.2	Analyse minéralogique	79
II.5	ANALYSE THERMIQUE.....	80
II.6	OBSERVATIONS MICROSCOPIQUES PAR MEB	81
II.7	CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES MATERIAUX	82
II.7.1	Retrait	82
II.7.2	Masse volumique apparente.....	82
II.7.3	L'absorption en eau	82
II.7.4	La porosité ouverte	82
II.7.5	La porosité totale.....	82
II.7.6	L'aspiration d'eau par capillarité.....	82
II.7.7	Capillarité	83
II.7.8	Resistance à la compression	83
II.7.9	La Flexion	83
II.7.10	La conductivité thermique	83
II.7.11	L'étalement	83
II.7.12	Consistance	83
II.7.13	Masse volumique fraîche	84
II.7.14	Évaluation environnementale	84
II.8	CONCLUSION.....	84
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	85
CHAPITRE III : CARACTERISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES DES		
SEDIMENTS DE DRAGAGE.		89

INTRODUCTION	89
III.1 PREPARATION DES ECHANTILLONS	89
III.2 CARACTERISATIONS PHYSIQUES	90
III.2.1 Analyse dimensionnelle	90
III.2.2 La teneur en eau	93
III.2.3 Les limites d'Atterberg	94
III.2.4 pH (potentiel Hydrogène) des suspensions des sédiments P1 et P2	94
III.2.5 Valeurs au bleu de méthylène.....	95
III.2.6 Masse volumique absolue.....	95
III.2.7 Teneur en carbonate de calcium	96
III.2.8 Composition chimique des différents sédiments	96
III.2.9 Analyses minéralogiques des sédiments.....	97
III.2.10 Comportement thermique des différents sédiments.....	99
III.3 CARACTERISATION ENVIRONNEMENTALE	100
III.4 CONCLUSION.....	101
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	103
 CHAPITRE IV : ETUDE DE LA VALORISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE DANS LES MORTIERS CIMENTAIRES.....	 104
INTRODUCTION	104
IV.1 PROTOCOLE EXPERIMENTAL DE LA VALORISATION.....	104
IV.2 PREPARATION DES ECHANTILLONS.....	105
IV.3 CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES	105
IV.3.1 Analyse dimensionnelle	106
IV.3.2 Masse volumique apparente	107
IV.3.3 Analyse chimique des différentes matières premières	107
IV.3.4 Analyse minéralogique	108
IV.4 ELABORATION DES MORTIERS A BASE DU SEDIMENT DE DRAGAGE.....	111
IV.5 CARACTERISTIQUES DES MORTIERS DE CIMENT A L'ETAT FRAIS.....	112
IV.5.1 L'étalement des différents mortiers	112
IV.5.2 Consistance (Eau/Ciment) des différents mortiers	113
IV.5.3 La masse volumique fraîche des différents mortiers	114
IV.6 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES MORTIERS A L'ETAT DURCI.....	115
IV.6.1 L'aspect visuel des mortiers.....	115
IV.6.2 Masses volumiques apparentes des différents mortiers.....	116
IV.6.3 La porosité ouverte des différents mortiers.....	117
IV.6.4 Absorption en eau des différents mortiers.....	118
IV.6.5 Absorption d'eau par capillarité des différents mortiers	119
IV.7 PROPRIETES MECANIQUES DES DIFFERENTS MORTIERS :	120

IV.7.1	Résistance à la flexion.....	120
IV.7.2	Résistance à la compression	121
IV.8	ANALYSE MINÉRALOGIQUE DES DIFFÉRENTS MORTIERS	123
IV.9	MICROSTRUCTURE DES DIFFÉRENTS MORTIERS	127
IV.10	CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DES DIFFÉRENTS MORTIERS	129
IV.11	ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE	130
IV.12	CONCLUSION	131
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	133
 CHAPITRE V : ETUDE DE LA VALORISATION DES SEDIMENTS DE		
DRAGAGE DANS LE DOMAINE DES BRIQUES CUITES ET DES CERAMIQUES		
..... 136		
	INTRODUCTION	136
V.1	ETUDE DE LA VALORISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE DANS LE DOMAINE	
	DES BRIQUES CUITES.....	136
V.1.1	Préparation des échantillons	136
V.1.2	Caractérisations physico-chimiques de l'argile de Remila et du sédiment P2	137
V.1.2.1	Analyse granulométrique.....	137
V.1.2.2	Limites d'Atterberg et indice de plasticité.....	138
V.1.2.3	Composition chimique.....	139
V.1.2.4	Composition minéralogique	139
V.1.2.5	Comportement thermique de l'argile de Remila.....	140
V.1.3	Elaboration des briques à base du sédiment P2	141
V.1.4	Caractéristiques physiques des briques cuites.....	142
V.1.4.1	L'aspect visuel après cuisson.....	142
V.1.4.2	Comportement des briques vis-à-vis du retrait (LFS %)	143
V.1.4.3	Masse volumique apparente des différentes briques	144
V.1.5	Absorption en eau des différentes briques	145
V.1.6	Porosité totale des différentes briques.....	146
V.1.7	Propriétés mécaniques des briques.....	147
V.1.8	Analyse minéralogique des briques cuites	149
V.1.9	Morphologie et microstructure	151
V.1.10	Propriétés thermiques des briques.....	153
V.1.11	Évaluation environnementale :	155
V.2	VALORISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE DANS LES CARREAUX	
	CERAMIQUES. 156	
V.2.1	Protocole expérimental des matières premières	156
V.2.2	Caractérisations physico chimiques des matières premières	157
V.2.2.1	Composition chimique des différentes matières premières	157

V.2.2.2	Analyse minéralogique des différentes matières premières.....	158
V.2.2.3	Analyse granulométrie.....	160
V.2.2.4	Comportement thermique des sédiments	161
V.2.3	Elaboration des céramiques à base des sédiments de dragage naturels et calcinés	162
V.2.3.1	Aspect visuel des différents échantillons (après cuisson).....	163
V.2.4	Caractéristiques physiques des différentes céramiques	164
V.2.4.1	V.5.1 Le retrait des différents échantillons (LFS %)	164
V.2.4.2	V.5.2 Masses volumiques apparentes	164
V.5.3	Taux d'absorption d'eau des différents échantillons.....	166
V.5.4	Taux d'absorption d'eau par capillarité	167
V.2.4.3	Porosité des céramiques cuites à 1100 et 1200 °C.....	167
V.2.5	Composition minéralogique des différentes céramiques	169
V.2.6	Microstructure des différentes céramiques	172
V.2.7	Propriétés mécaniques des différentes céramiques	174
V.2.8	Propriétés thermiques des différentes céramiques	175
V.2.9	Évaluation environnementale des différentes céramiques :	176
V.3	CONCLUSION	177
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	180
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	182
	ANNEXE A	XIV
	ANNEXES B	XVI

Table des figures

FIGURE I.1 : REPRESENTATION DES DIFFERENTES STRUCTURES D'ARGILES [4].	8
FIGURE I.2: SCHEMA DES PRINCIPALES ETAPES ET COMPOSANTES DE LA GESTION DES SEDIMENTS.	20
FIGURE I.3: COMPOSITION D'UN MORTIER [60].	23
FIGURE I.4: CARTE DE LA MEDITERRANEE SITUANT LA VILLE DE BEJAIA [137].	44
FIGURE I.5: VUE AERIEN PAR SATELLITE DONNANT LE PLAN DE PORT DE BEJAIA.	45
FIGURE I.6: ZONE DE DRAGAGE DU COTE DE PORT DE MARCHANDISE (POINT 1).	54
FIGURE I.7: ZONE DE DRAGAGE DU COTE DE PORT BOUGIE PLAGE (POINT 2).	54
FIGURE I.8: ZONE DE DRAGAGE MARINE DU COTE DU PORT PETROLIER (BRISE DE MER)(POINT 3).	54
FIGURE II.1: ETATS DE CONSISTANCE- LIMITES D'ATTERBERG.	72
FIGURE II.2: LIMITES D'ATTERBERG ET INDICE DE PLASTICITE.	73
FIGURE II.3: DIAGRAMME DE PLASTICITE [8].	74
FIGURE II.4: FERMETURE DE LA RAINURE (A) ET ROULEAU DE 3 MM (B).	75
FIGURE II.5: EXECUTION DE L'ESSAI AU BLEU METHYLENE (A) ET CONCLUSION DE L'ESSAI (B).	76
FIGURE II.6 : DIFFRACTOMETRE AUX RAYONS X DU SYSTEME XPERT-PRO.	80
FIGURE II.7: L'APPAREIL MEB COUPLE AVEC EDX.	81
FIGURE III.1: QUARTAGE DES ECHANTILLONS DE DRAGAGE P1 ET P2	90
FIGURE III.2: COURBES GRANULOMETRIQUE DES ECHANTILLONS (P1).	91
FIGURE III.3: COURBES GRANULOMETRIQUE DES ECHANTILLONS (P2).	91
FIGURE III.4: POSITIONNEMENT DES DEUX SEDIMENTS DANS LA CLASSIFICATION DES SOLS FINS.	92
FIGURE III.5: TENEUR EN EAU NATUREL DES SEDIMENTS (P1 ET (P2)).	93
FIGURE III.6: LIMITES D'ATTERBERG DES SEDIMENTS.	94
FIGURE III.7 : DIAGRAMME DE DRX DU SEDIMENT P1.	98
FIGURE III.8 : DIAGRAMME DE DRX DU SEDIMENT P2.	98
FIGURE III.9 : COURBE ATD/ATD DU SEDIMENT P1.	99
FIGURE III.10 : COURBE ATD/ATD DU SEDIMENT P2.	100
FIGURE IV.1: PHOTO DU SEDIMENT CALCINE (A) ET NON CALCINE (B).	105
FIGURE IV.2: ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES SEDIMENTS NATURELS ET CALCINES.	106
FIGURE IV.3 : ANALYSE GRANULOMETRIE DU CIMENT.	107
FIGURE IV.4: SPECTRE DE DRX DU SEDIMENT NATUREL ET CALCINE.	109
FIGURE IV.5: SPECTRE DU DRX DU CIMENT.	110
FIGURE IV.6: SPECTRE DE DRX DU SABLE NORMALISE.	110
FIGURE IV.7: SCHEMA DES ETAPES D'ELABORATION DES DIFFERENTS MORTIERS.	112
FIGURE IV.8: OUVRABILITE DES MORTIERS EN FONCTION DES TAUX D'AJOUTS DES SEDIMENTS NATURELS ET CALCINES.	113
FIGURE IV.9: CONSISTANCE NORMALE DE LA PATE DE CIMENT EN FONCTION DES TAUX D'AJOUTS DES SEDIMENTS NATURELS ET CALCINES.	114
FIGURE IV.10: MASSE VOLUMIQUE DU MORTIER A L'ETAT FRAIS EN FONCTION DES TAUX D'AJOUTS DES SEDIMENTS NATURELS ET CALCINES.	115

FIGURE IV.11: PHOTO DES ECHANTILLONS DE MORTIER A BASE DES SEDIMENTS NATURELS ET CALCINES.....	116
FIGURE IV.12: MASSES VOLUMIQUES APPARENTES DES MORTIERS A BASE DES TAUX D'AJOUTS DES SEDIMENTS NATURELS ET CALCINES.	117
FIGURE IV.13: TAUX DE POROSITE OUVERTE DES MORTIERS A BASE DES SEDIMENTS NATURELS ET CALCINES. .	118
FIGURE IV.14: ABSORPTION EN EAU DES MORTIERS EN FONCTION DES TAUX D'AJOUTS DES SEDIMENTS NATURELS ET CALCINES.....	119
FIGURE IV.15: ABSORPTION EN EAU PAR CAPILLARITE DES MORTIERS A BASE DES DIFFERENTS TAUX D'AJOUTS DES SEDIMENTS NATURELS ET CALCINES.	120
FIGURE IV.16: RESISTANCE A LA FLEXION DES MORTIERS A BASE DES TAUX D'AJOUTS DES SEDIMENTS NATURELS ET CALCINES.....	121
FIGURE IV.17: RESISTANCE A LA COMPRESSION DES MORTIERS A BASE DES DIFFERENTS TAUX D'AJOUTS DES SEDIMENTS NATURELS ET CALCINES.....	122
FIGURE IV.18: DIFFRACTOGRAMMES DES RAYONS X DES MORTIERS REFERMANT DES SEDIMENTS NATURELS A 7 JOURS DE CURE.....	123
FIGURE IV.19: DIFFRACTOGRAMMES DES RAYONS X DES MORTIERS RENFERMANT DES SEDIMENTS CALCINES A 7 JOURS DE CURE.....	124
FIGURE IV.20: DIFFRACTOGRAMMES DES RAYONS X DES MORTIERS A BASE DE SEDIMENT NATUREL A 28 JOURS DE CURE.	125
FIGURE IV.21: DIFFRACTOGRAMMES DES RAYONS X DES MORTIERS A BASE DE SEDIMENT CALCINE A 28 JOURS DE CURE.	125
FIGURE IV.22: DIFFRACTOGRAMMES DES RAYONS X DES MORTIERS A BASE DE SEDIMENT NATUREL A 90 JOURS DE CURE.	126
FIGURE IV.23: DIFFRACTOGRAMMES DE RAYONS X DES MORTIERS A BASE DE SEDIMENT CALCINE A 90 JOURS DE CURE.	126
FIGURE IV.24: MICROSTRUCTURE DES MORTIERS (A) 7 JOURS, (B) 28 JOURS ET (C) 90 JOURS DE CURE.	128
FIGURE IV.25: CONDUCTIVITES THERMIQUES DES MORTIERS EN FONCTION DES TAUX D'AJOUTS DES SEDIMENTS NATURELS ET CALCINES	129
FIGURE V.1: ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE L'ARGILE DE REMILA ET DU SEDIMENT (P2).....	137
FIGURE V.2: LES LIMITES D'ATTERBERG DE L' ARGILE ET DU SEDIMENT.	138
FIGURE V.3: DIAGRAMME DE DRX DE L'ARGILE DE REMILA ET SEDIMENT P2.....	140
FIGURE V.4: ANALYSE THERMIQUE ATD DE L' ARGILE ET DU SEDIMENT P2.	141
FIGURE V.5: SCHEMA TECHNOLOGIQUE DES ETAPES D'ELABORATION DES BRIQUES.	142
FIGURE V.6: PHOTO DES ECHANTILLONS DE BRIQUES CUITES A 950 °C.....	143
FIGURE V.7: RETRAIT DES BRIQUES CUITES A 850 ET 950°C.	144
FIGURE V.8: MASSES VOLUMIQUES APPARENTES DES BRIQUES CUITES A 850 ET 950°C.....	145
FIGURE V.9: ABSORPTION EN EAU DES BRIQUES CUITES A 850 ET 950 °C.....	146
FIGURE V.10: POROSITES DES BRIQUES CUITES A 850 ET 950°C.....	147
FIGURE V.11: RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BRIQUES CUITES A 850 ET 950 °C.....	148
FIGURE V.12: RESISTANCE A LA FLEXION DES BRIQUES CUITES A 850 ET 950 °C.	149
FIGURE V.13: DIAGRAMME DE DIFFRACTION DES RAYONS X DES BRIQUES CUITES A 850 °C.....	150

FIGURE V.14: DIAGRAMME DE DIFFRACTION DES RAYONS X DES BRIQUES CUITES A 950 °C.....	151
FIGURE V.15: PHOTOS MEB DES ECHANTILLONS SB00.	152
FIGURE V.16: PHOTOS MEB DES ECHANTILLONS SB15.	152
FIGURE V.17: PHOTOS MEB DES ECHANTILLONS SB20.	153
FIGURE V.18: PHOTOS MEB DES ECHANTILLONS SB100.	153
FIGURE V.19: CONDUCTIVITE THERMIQUE DES BRIQUES CUITES A 850 ET 950 °C.	154
FIGURE V.20: DIAGRAMME DRX DES SEDIMENTS NATURELS ET CALCINES.	158
FIGURE V.21: DIAGRAMME DRX DU KAOLIN.	159
FIGURE V.22: DIAGRAMME DE DRX DE SABLE	159
FIGURE V.23: DIAGRAMME DE DRX DU FELDSPATH.	160
FIGURE V.24: ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES SEDIMENTS NATURELS ET CALCINES.	161
FIGURE V.25: ANALYSE THERMIQUE ATD DES SEDIMENTS NATURELS ET CALCINES.	162
FIGURE V.26: SCHEMA DES ETAPES D'ELABORATION DES DIFFERENTES CERAMIQUES.	163
FIGURE V.27: PHOTOS DES DIFFERENTES CERAMIQUES A BASE DES SEDIMENTS NATURELS ET CALCINES.	163
FIGURE V.28: MASSES VOLUMIQUES APPARENTES DES CERAMIQUES CUITES A 1100 ET 1200°C.	165
FIGURE V.29: ABSORPTION D'EAU DES CERAMIQUES CUITES A 1100 ET 1200 °C.	166
FIGURE V.30: ABSORPTION D'EAU PAR CAPILLARITE DES CERAMIQUES CUITES A 1100 ET 1200 °C.	167
FIGURE V.31: POROSITE OUVERTE DES CERAMIQUES CUITES A 1100 ET 1200 °C.	168
FIGURE V.32: DIAGRAMME DE DRX DES CERAMIQUES CUITES A 1100 °C, A BASE DE SEDIMENTS NATURELS. ..	169
FIGURE V.033: DIAGRAMME DE DRX DES CERAMIQUES CUITES A 1200 °C, A BASE DE SEDIMENTS NATURELS.	170
FIGURE V.034: DIAGRAMME DE DRX DES CERAMIQUES CUITES A 1100 °C, A BASE DE SEDIMENTS CALCINES. .	171
FIGURE V.35: DIAGRAMME DE DRX DES CERAMIQUES CUITES A 1200 °C, A BASE DE SEDIMENTS NATURELS ...	171
FIGURE V.36: MICROGRAPHIES MEB DES CERAMIQUES : (A ET B) P0, (C ET D) PS30 ET PSC30, (E, F) PSC20 (G).	173
FIGURE V.37: RESISTANCES A LA COMPRESSION (MPa) DES CERAMIQUES CUITES A 1100 ET 1200 °C.	175
FIGURE V.38: CONDUCTIVITE THERMIQUE DES ECHANTILLONS CUITES A 1100 ET 1200 °C.	176
FIGURE B.1: PHASE MINERALOGIQUE DE LA PORTLANDITE DANS LES MORTIERS.	XVI
FIGURE B.2: PHASE MINERALOGIQUE DE LA CALCITE DANS LES MORTIERS.	XVII
FIGURE B.3: PHASE MINERALOGIQUE DE L'ETTRINGITE DANS LES MORTIERS.	XVIII
FIGURE B.4: PHASE MINERALOGIQUE DU DIOPSIDE DANS LES BRIQUES CUITES.	XIX
FIGURE B.5: PHASE MINERALOGIQUE DE L'ALBITE DANS LES BRIQUES CUITES.	XX
FIGURE B.6: PHASE MINERALOGIQUE DE LA CALCITE DANS LES BRIQUES CUITES.	XXI
FIGURE B.7: PHASE MINERALOGIQUE DE L'ANATASE DANS LES CARREAUX CERAMIQUES.	XXII
FIGURE B.8: PHASE MINERALOGIQUE DE L'ANORTHITE DANS LES CARREAUX CERAMIQUES.	XXIII
FIGURE B.9: PHASE MINERALOGIQUE DE LA MULLITE DANS LES CARREAUX CERAMIQUES.	XXIV
FIGURE B.10: PHASE MINERALOGIQUE DU QUARTZ DANS LES CARREAUX CERAMIQUE	XXV

Liste des tableaux

TABLEAU I.1: CRITERES NEERLANDAIS POUR L'EVALUATION DE LA QUALITE DES SEDIMENTS [1].....	18
TABLEAU I.2: VALEURS LIMITES DES POLLUANTS POUR LES DIFFERENTES CLASSES DE DECHETS [25].	19
TABLEAU I.3: DOSAGES DES MORTIERS[60].....	25
TABLEAU I.4 : LES DEFAUTS DES BRIQUES PENDANT LE SECHAGE [99].....	31
TABLEAU I.5: NOMBRE DE STATIONS A PRELEVER ET D'ECHANTILLONS A ANALYSER EN FONCTION DU VOLUME A DRAGUER EN ZONE A ECHANGES LIBRES [140].	48
TABLEAU I.6 : NOMBRE D'ECHANTILLONS A ANALYSER EN FONCTION DU VOLUME A DRAGUER EN ZONE CONFINEE [140].	48
TABLEAU I.7: NOMBRE D'ECHANTILLONS A ANALYSER EN FONCTION DE LA CAPACITE D'ACCUEIL DU PORT [140].	49
TABLEAU I.8: TABLEAU RECAPITULATIF DES TAUX D'ENVASEMENT DU PORT DE BEJAIA (EPB)	53
TABLEAU II.1: DEGRE DE PLASTICITE DES SOLS [6].	73
TABLEAU II.2: INDICE DE CONSISTANCE IC DES LIMONS ET DES ARGILES [7].....	73
TABLEAU II.3: RELATION ENTRE L'INDICE DE PLASTICITE ET LE POTENTIEL DE GONFLEMENT [8].....	74
TABLEAU II.4: CLASSIFICATION DES SOLS EN FONCTION DE LA VALEUR AU BLEU DE METHYLENE (NF, P. P 11- 300) [13].	76
TABLEAU II.5: SURFACE SPECIFIQUE TOTALE DES MINERAUX ARGILEUX EN M ² /G [19].	77
TABLEAU II.6: CLASSIFICATION DES MATERIAUX EN FONCTION DU POURCENTAGE MASSIQUE EN CARBONATE (NF P 94-048) [22].	78
TABLEAU III.1 : RESULTATS DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR COULTER DONNANT LE NOMBRE DE DIAMETRES CORRESPONDANTS.....	92
TABLEAU III.2: TENEURS EN ARGILE, EN LIMON ET EN SABLE DES SEDIMENTS (P1) ET (P2).....	93
TABLEAU III.3: PH DES SEDIMENTS DE DRAGAGE (P1) ET (P2).....	95
TABLEAU III.4: TENEURS EN OXYDES DES SEDIMENTS DU PORT DE BEJAIA (P1) ET (P2).....	97
TABLEAU III.5: ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DES SEDIMENTS DE DRAGAGE DU PORT DE BEJAIA P1 ET P2. ..	101
TABLEAU IV.1: PROPORTION DES MATIERES PREMIERES DANS LE MORTIER.	105
TABLEAU IV.2 : ANALYSE GRANULOMETRIE DU SABLE NORMALISE.	106
TABLEAU IV.3 : ANALYSE CHIMIQUE DES MATIERES PREMIERES.....	108
TABLEAU IV.4: RESULTATS DES TESTS TCLP (PPM) DE M0, MS40, MSC40 A 7, 28 ET 90 JOURS.	131
TABLEAU V.1: PROPORTIONS DES MATIERES PREMIERES UTILISEES POUR LA PREPARATION DES BRIQUES (% DE MATIERE SECHE).....	137
TABLEAU V.2: COMPOSITIONS CHIMIQUES DES MATIERES PREMIERES.....	139
TABLEAU V.3: RESULTATS DES TESTS US EPA TCLP (PPM) DES BRIQUES CUITES A 850 ET 950 °C.	155
TABLEAU V.4: PROPORTIONS DES DIFFERENTES MATIERES PREMIERES.	156
TABLEAU V.5: COMPOSITIONS CHIMIQUES DES MATIERES PREMIERES.....	157
TABLEAU V.6: RETRAIT DES CERAMIQUES CUITES A 1100 ET 1200 °C.	164
TABLEAU V.7: RESULTATS DES TESTS TCLP (PPB) DES CERAMIQUES CUITES A 1100 ET 1200 °C.	177
TABLEAU A.1: PROFONDEURS DE DRAGAGES	XIV

TABLEAU A.2: VOLUME DES SEDIMENTS	XV
------------------------------------------------	----

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le dragage est une activité nécessaire pour contrôler l'accumulation naturelle des sédiments au fond des ports, chenaux de navigation et des voies navigables pour le maintien des profondeurs d'eau permettant la navigation. Les quantités de sédiments dragués annuellement sont très importantes : plus d'un milliard de mètres cube à l'échelle mondiale, dont 300 millions m³ aux États-Unis [1], environ 400 millions m³ en Chine, et 400 millions m³ en Europe [2, 3].

La gestion des sédiments de dragage est une problématique complexe, la principale réponse à la question du devenir des sédiments pollués dragués était le relargage en mer. Mais les mentalités ont changé et le respect de l'environnement prend une place de plus en plus importante dans les processus décisionnels. Cette solution d'élimination des sédiments est soumise à la réglementation nationale n° 03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement et internationale (convention OSPAR, ...).

Les sédiments sont des particules fines (argiles, limons) et grossières (sables), déplacées et transportées grâce, notamment aux actions climatiques (vent, marées, ...) et humaines (travaux d'aménagement, exploitation du sol, ...). Dans les ports, les chenaux d'accès, les estuaires, les canaux, les fleuves et les rivières, leur accumulation gêne voire empêche la circulation des navires, des petits bateaux de plaisance aux supertankers. Cette accumulation augmente le risque de crues. Les gestionnaires doivent entreprendre des opérations de dragage. En effet, ce matériau n'est plus stocké ou mis en décharge mais peut être ainsi utilisé comme matériau commercial. Des filières de valorisation en génie civil ont été recherchées, ils ont été utilisés dans l'étude de formulation en technique routière et étudiées par plusieurs chercheurs [4, 5, 6] par incorporation de liants hydrauliques (ciment, chaux, cendres volantes) pour la fabrication de briques qui est étudiée depuis quelques années [7, 8, 9, 10], par l'ajout des sédiments comme substitution d'argile ou sable. La valorisation des sédiments dans les matériaux cimentaires [3, 11, 12] et les granulats légers [13, 14]. Ces derniers peuvent réduire le recours aux matériaux standards. La démarche de valorisation permet de répondre à de multiples enjeux de développement durable: enjeux environnementaux et enjeux socio-économiques.

Ce projet de recherche est lancé dans le but de trouver une nouvelle alternative de gestion de sédiments dragués des ports Algérien, à savoir leurs réutilisations comme matière premières dans les matériaux dans le domaine de génie civil. Le port de Béjaia a été choisi pour cette étude, car il présente le plus grand volume des sédiments marins dragués en raison de l'état actuel des ouvrages d'infrastructure et notamment les tirants d'eau insuffisants pour recevoir les grands tonnages utilisés pour le trafic de marchandise. La capacité de plusieurs postes sont réduites au trafic, enregistré en 1999, à cause des profondeurs. Nous avons constaté, que le trafic a diminué, et que le tonnage a augmenté. Le tirant d'eau à bord des quais les plus utilisés (Quai de la gare et Nouveau Quai) sont aussi insuffisants, ce qui engendre des pertes de trafic pour le port et ainsi un manque à gagner important, entraînant automatiquement des pertes financières et physiques pour le réceptionnaire et l'armateur qui sont contraints à payer des surcoûts en déroutant leurs navires vers d'autres ports loin de l'hinterland de Béjaia. La capacité de déchargement reste faible par rapport aux nouvelles données du trafic escompté à long terme. Afin de permettre au port de Béjaia de recevoir les grands navires, l'Entreprise Portuaire de Béjaia a organisé l'exécution d'un dragage d'entretien. En outre, une nouvelle étude s'intéresse à l'impact environnemental des sédiments marins des ports algérien par les gestionnaires du port (Entreprise Portuaire de Bejaia) [15, 16, 17].

La première étape de ce travail consiste à caractériser physiquement et chimiquement les différents sédiments de dragage prélevés sur toute la zone du port ; Cette zone est partagée en trois points distincts :

- Le premier point d'échantillonnage concerne la zone du port où se déroule les échanges commerciaux ;
- Le deuxième point d'échantillonnage concerne la zone du port où débouche la rivière de la Soummam et les rejets d'usines tels que Cevital, Alcost, COGB, etc... ;
- Le troisième point d'échantillonnage concerne la zone du port de la zone d'accostage des navires pétroliers près des bassins de stockage des hydrocarbures. Dans cette zone, l'entretien se fait une fois chaque tous les cinq ans ; les sédiments ne sont pas fournis par l'Entreprise Portuaire de Bejaia.

Dans ce travail, Nous proposons des méthodologies de gestion des sédiments de dragage dans les matériaux de construction: on trouve, en premier lieu leurs réutilisations (sans et avec traitement thermique) en tant qu'ajout dans les mortiers cimentaire ; La deuxième

valorisation consiste en la réutilisation des sédiments naturels (sans traitement) et calcinés par substitution de l'argile de Remila (matériau utilisé pour la fabrication des briques cuites) et du kaolin (matériau utilisé pour la fabrication des céramiques type dalle de sol) pour confection des matériaux céramiques (briques cuites et carreaux céramiques). L'étude environnemental des matériaux élaborés par la méthode TCLP est inévitable, ce afin de voir l'évolution et le comportement des métaux lourds immobilisés et stabilisés dans les matrices des différents matériaux élaborés à base de ces sédiments.

Ce mémoire est scindé en 5 chapitres

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur la problématique de dragage des ports, les techniques de dragage, la gestion des sédiments de dragage des ports dans le monde en général et en Algérie en particulier ainsi que les règlements actuels qui gèrent la gestion actuelle des sédiments dragués et les différentes procédures de traitement des projets de valorisation.

Le second chapitre concerne l'identification les matériaux et les méthodes d'investigations utilisés dans ce travail.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse des résultats des essais de caractérisations physiques, chimiques, minéralogique et environnementale des deux types de sédiments du port de Bejaia et les matériaux associés à la valorisation.

Le quatrième chapitre étudie la caractérisation et la valorisation des sédiments de dragage dans des matrices cimentaires (mortier). La microstructure, les propriétés mécaniques, thermiques et environnementales sont aussi présentées dans ce chapitre.

Le cinquième chapitre consiste à étudier la valorisation des sédiments dans le domaine des céramiques (type brique cuites et carreaux de sol). Ce travail vise à déterminer l'effet des sédiments sur la brique et carreaux de céramique. Le premier travail porte sur une étude de faisabilité sur l'utilisation de sédiments naturels dans la pâte en tant que substitution de l'argile dans la brique cuite à deux températures de cuisson (850 et 950 °C). Le deuxième travail concerne le développement des carreaux de céramiques à base des sédiments naturels et calcinés (différents taux d'ajout) à des températures de cuisson de 1100 et 1200 °C. Nous avons réalisé une étude détaillée sur la caractérisation physique, mécanique, thermique et environnementale des deux types de matériaux élaborés.

Nous terminerons cette thèse par une analyse approfondie et une conclusion générale synthétisant les principaux résultats trouvés et exposés avec des recommandations et suggestions.

Références bibliographiques

[1]Çevikbilen, G., Başar, H. M., Karadoğan, Ü., Teymur, B., Dağlı, S., Tolun, L. (2020). Assessment of the use of dredged marine materials in sanitarylandfills: A case studyfrom the Marmara sea. *Waste Management*, 113, 70-79.

[2]Balkaya, M. (2019). Beneficial use of dredged materials in geotechnical engineering. In *Recycling and reuse approaches for better sustainability* (pp. 21-38). Springer, Cham.

[3]el Mahdi Safhi, A., Benzerzour, M., Rivard, P., Abriak, N. E. (2019). Faisabilité de l'utilisation de sédiments marins dans les pâisseries csc comme matériaux cimentaires supplémentaires. *PowderTechnology*, 344, 730-740.

[4]Slama, A. B., Feki, N., Levacher, D., Zairi, M. (2021). Valorization of harbor dredged sediment activated with blast furnaceslag in road layers. *International Journal of Sediment Research*, 36(1), 127-135.

[5]Banoune, B., Melbouci, B., Rosquoët, F., Langlet, T. (2016). Treatment of river sediments by hydraulic binders for valorization in road construction. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(4), 1505-1517.

[6]Loudini, A., Ibnoussina, M., Witam, O., Limam, A., Turchanina, O. (2020). Valorisation of dredged marine sediments for use as road material. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00455.

[7] Zeraoui, A., Benzerzour, M., Maherzi, W., Mansi, R., Abriak, N. E. (2020). New software for the optimization of the formulation and the treatment of dredged sediments for utilization in civil engineering. *Journal of Soils and Sediments*, 20(6), 2709-2716.

[8] Frar, I., Bakkali, H., Ammari, M., Allal, L. B. (2019). Integration of Port Dredged Sediments Into the Production of Fired Clay Bricks. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 45(4), 428-440..

[9] Mesrar, L., Benamar, A., Duchemin, B., Brasselet, S., Bourdin, F., Jabrane, R. (2021). Engineering properties of dredged sediments as a raw resource for fired bricks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1-16.

[10] Gueffaf, N., Rabehi, B., Boumchedda, K. (2020). Recycling Dam Sediments for the Elaboration of Stabilized Blocks. In *International Journal of Engineering Research in Africa* (Vol. 50, pp. 131-144). Trans Tech Publications Ltd.

[11] Amar, M., Benzerzour, M., Kleib, J., Abriak, N. E. (2020). From dredged sediment to supplementary cementitious material: characterization, treatment, and reuse. *International Journal of Sediment Research*.

[12] Beddaa, H., Ouazi, I., Fraj, A. B., Lavergne, F., Torrenti, J. M. (2020). Reuse potential of dredged river sediments in concrete: Effect of sediment variability. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121665..

[13] Peng, Y., Peng, X., Yang, M., Shi, H., Wang, W., Tang, X., Wu, Y. (2020). The performances of the baking-free bricks of non-sintered wrap-shell light weight aggregates from dredged sediments. *Construction and Building Materials*, 238, 117587.

[14] Brakni, S., Abriak, N. E., Grégoire, P., Zentar, R. (2007). Valorisation de boues de dragage maritime en granulats artificiels en vue de stabiliser l'érosion littorale. *Ecole des mines de Douai, département de génie civil et environnemental*, 8p.

[15] Boudjenane, N., Benyerou, D., Belhadri, M. (2017, November). Design of the bricks based on the marine sediments of Bethioua port. In *Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration* (pp. 1341-1343). Springer, Cham.

[16] Houma, F., Bachari, N. E. I., Bachouche, S., Kassar, A., Belkessa, R. Contribution à l'évaluation de la pollution des eaux marines sur la côte Ouest d'Alger en utilisant l'imagerie satellitale.

[17] Benyerou, D., Boudjenane, N., Belhadri, M. (2015). Physicochemical characteristics of port dredging sediments and of the brick slip used in the manufacture of bricks: a comparative study. *Coastal Cities and their Sustainable Future*, 148, 289..

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Introduction

La présence des sédiments de dragage des ports engendre des problèmes environnementaux de par la présence organique et inorganiques nocives. La problématique de l'envasement des retenues dans les sédiments conduit à l'accroissement du degré de contamination posant un problème environnemental par la présence de métaux lourds.

L'étude bibliographique est menée avec un but d'orienter nos recherches et à comprendre les mécanismes physico-chimiques des sédiments de dragage des ports en générale et du port de Bejaia en particulier vu que les quantités de sédiments dragués annuellement sont très importantes. Dans ce chapitre, on expliquera l'origine de l'envasement massif dans les ports et la genèse et la constitution des sédiments marins. Par la suite on définira les opérations de dragage, les méthodes et les moyennes d'échantillonnage, les différentes réglementations internationales et nationales qui gèrent la décision de ces types de déchets.

L'historique des travaux déjà réalisés, les différentes filières de valorisation de ces sédiments de dragage à savoir les matériaux cimentaires, les briques, les céramiques ainsi que les traitements pouvant fixer et éliminer les métaux lourds sont présentés dans ce chapitre.

I.1 Généralités sur les sédiments de dragage

Les opérations d'entretien des ports engendrent des millions de tonnes de sédiments chaque année. De ce fait, la gestion de ces boues de dragage est une question environnementale primordiale pour les gestionnaires des ports.

I.2 Définition des sédiments de dragage

Le dragage des ports est une opération de terrassements effectué sous l'eau avec des engins flottants au moyen de procédés mécaniques et d'aspiration hydraulique [1]. Nous pouvons trouver trois types de dragages :

- Le dragage d'entretien ;
- Le dragage d'approfondissement ;

- Le dragage d'aménagement de nouvelles aires portuaires.

Cette opération doit se répéter de façon régulière afin de faciliter la navigation des bateaux et d'éviter qu'ils talonnent le fond de mer. Mais la gestion des sédiments doit se faire de façon rationnelle et mesurée et prendre en considération le coût socio-économique et environnementale à cause des grands volumes qui s'y déposent.

I.3 Constitution des sédiments marins

I.3.1 Formation des sédiments

Un sédiment est constitué par l'assemblage de particules plus ou moins grosses qui ont subi un transport de matières ayant précipité au fond des cours d'eau et des océans. Ils s'accumulent dans des bassins de sédimentation naturels et par la suite subissent une transformation diagenétique pour devenir une roche sédimentaire [2]. L'origine des particules est divisée en quatre grands groupes :

- Une source terrigène, c'est-à-dire dont les particules proviennent de l'érosion des surfaces émergées, et qui peuvent être transportées par ruissellement, par voie aérienne, ou dans les eaux fluviales ;
- Une source endogène, soit des particules issues du milieu où s'effectue la sédimentation, principalement constituées de matières organiques, généralement des organismes aquatiques animaux ou végétaux ;
- Les particules issues de la néoformation, venant de l'érosion éolienne ou hydrique des sols. Ils peuvent aussi être de caractère organique comme les abris et les feuilles d'arbres ;
- Une source anthropique, pouvant être de nature organique ou minérale, provenant essentiellement de l'activité humaine (industrielle, urbaine, et agricole).

Ces matériaux sont très hétérogènes qui dépendent en grande partie, du bassin versant, des contributions autochtones et de l'hydrodynamisme local, pouvant brasser ou ramener des particules d'un bassin proche. Les sédiments sont généralement classés en trois grands groupes : Une phase solide inorganique et organique, une phase liquide composée des eaux interstitielles et une phase gazeuse [2].

I.3.1.1 Phases inorganiques

Les phases inorganiques consistent majoritairement (80 %) d'oxydes métalliques tels que (SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , ... etc.), 20 % des composés carbonatés tels que CaCO_3 , MgCO_3 , des ions mobiles Mn^{2+} , Fe^{2+} , SO_3^- , Cl^- , ...etc., et enfin des métaux lourds tels que Hg, Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Ag, etc. qui représentent moins de 0,1 % [3]. Les sédiments se composent principalement d'argiles dont les quatre principaux constituants sont la kaolinite, l'illite, le chlorite et la smectite (figure I.1).

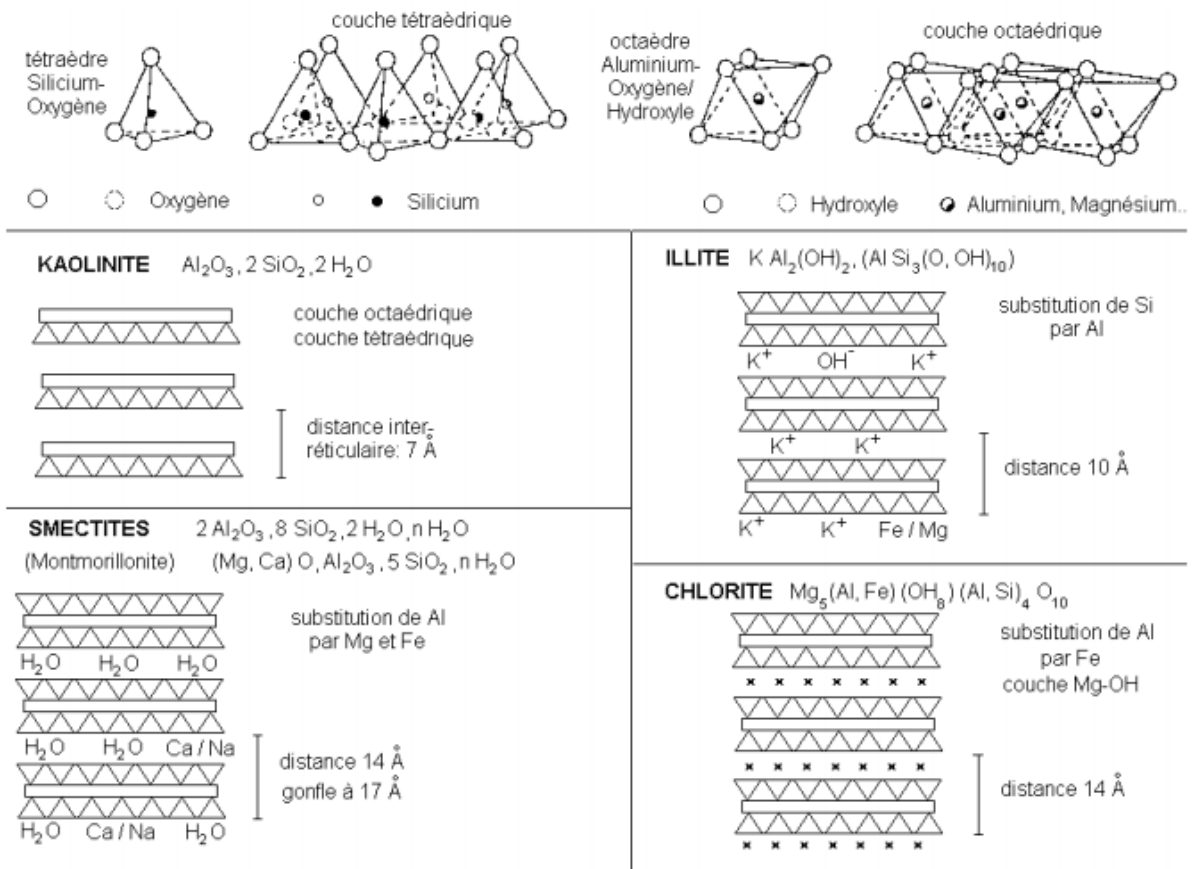


Figure I.1 : Représentation des différentes structures d'argiles [4].

I.3.1.2 Phases organiques

Les composés organiques rencontrés dans les sédiments sont généralement d'origines naturelles [5]. Les matières organiques (MO), peuvent se regrouper en quatre catégories :

- Matières organiques vivants (des biomasses actives) ;
- Matières organiques frais (les débris végétaux) ;
- Matières composées en cours d'évolution ;
- Matières humus qui représentent 60 % de matière organique dans les sédiments [2].

Les matières organiques peuvent avoir une origine tant autochtone, produite par les organismes vivants ou en décomposition, ou allochtone, provenant des apports fluviaux, des eaux de ruissellement ou des rejets anthropiques [5]. Elles proviennent en grande partie du transfert des débris animaux et végétaux depuis la colonne qui s'accumulent dans les sédiments anaérobies du fait de l'activité microbienne oxydante réduite en présence d'O₂ [6].

I.3.2 Interfaces du sédiment avec son milieu

L'étude d'un sédiment marin est rendue complexe par la présence de nombreuses phases en interactions, tant minérales qu'organiques, liquides ou gazeuses. Le siège principal des réactions est la porosité inter- et intra particulaire. Sous l'eau, ces pores et interstices sont majoritairement remplis d'eau, à divers degrés de saturation en composés dissous. En revanche, hors de l'eau, la saturation du sédiment va diminuer. La phase gaz va ainsi prendre une place importante dans les porosités. Jusque-là, seules les réactions de fermentation, productrice de méthane (CH₄), ou de réduction intense formant du dihydrogène H₂, pouvait former des bulles de gaz importantes. A l'air libre, la porosité va être en contact avec le dioxygène de l'air, principal oxydant en milieu aérobie [7].

I.3.2.1 Polluants des sédiments marins

Les polluants provenant de diverses sources (industrielles, commerciales, eaux, activités agricoles et autres) s'accumulent dans les sédiments qui deviennent une source de pollution [8]. La croissance des activités industrielles, génère des rejets d'un grand nombre de substances toxiques. Les principaux polluants sont les métaux lourds (Cd, Cr, Cu, Hg, N, Pb, Zn) et/ou des composés organiques (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques, (HAP)). La concentration des métaux lourds dans les sédiments peut être 1 à 3 fois plus élevée qu'à la surface de l'eau.

La grande majorité des polluants dans les sédiments est peu soluble dans l'eau et se localise principalement dans les matières en suspension et les particules fines des sédiments en raison de leur surface spécifique élevée [9]

a. Les polluants organiques

La nature de ces polluants organique est très variable, ils proviennent généralement des rejets des eaux usées et des effluents agricoles et industriels. Les principaux polluants organiques rencontrés dans les sédiments sont :

- Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) (exemple : le naphthalène et le phénanthrène) ;
- Les Composés Phénoliques (exemple : le phénol) ;
- Les Dérivés Chlorés (les polychlorobiphényles (PCB)).

Ils sont très toxiques, solubles ou adsorbés sur les matières en suspension et peuvent présenter des risques lors de l'extraction des matériaux de décaissement. Leur dangerosité dépend de leur toxicité ou de leur nature, du degré et des voies d'exposition et des caractéristiques des cibles exposées. La présence de ces polluants organiques affecte dangereusement l'équilibre de la faune marine [10].

b. Les métaux lourds

Les métaux lourds sont présents dans les sédiments marins à partir du moment où ils sont absorbés par les fines particules des sédiments. Les principaux métaux lourds présents dans les sédiments sont le Cadmium (Cd), le Chrome (Cr), le Cuivre (Cu), le Plomb (Pb), le Mercure (Hg) et l'Arsenic (As), Fer (Fe), Zinc (Zn), Nickel (Ni).

Ces métaux ne sont pas biodégradables [11] et deviennent toxiques lorsqu'ils dépassent un seuil de tolérance. Les concentrations en métaux lourds sont élevées à cause de certaines activités anthropiques [12] notamment industrielles. Les métaux piégés dans les sédiments sont en général en équilibre avec l'eau interstitielle. Cet équilibre est déstabilisé par la moindre perturbation des conditions environnementales engendrée par des réactions d'oxydo-réduction, d'activités biologiques ou des perturbations physico-chimiques [13].

I.4 Evaluation environnementale des métaux lourds

Pour pouvoir contrôler, gérer et avoir une prédiction sur la concentration des polluants contenus dans les sédiments, de leur effet néfaste sur l'écosystème, suite à leur mobilisation, il est nécessaire d'adapter une méthodologie pour évaluer l'émission des polluants dans un scénario de valorisation et de traitement.

La réalisation de tests expérimentaux sur les propriétés physico-chimiques, l'influence des facteurs environnementaux tels que la capacité d'adsorption d'eau, de neutralisation acide base et la dépendance de la solubilisation des espèces polluantes en fonction du pH est une étape incontournable. La modélisation du comportement à la lixiviation fait partie de cette

norme afin de prévoir le comportement des polluants à long terme. Une évaluation environnementale permet d'établir le comportement et la capacité de rétention de polluants dans une matrice cimentaire, céramique, etc.

I.4.1 Tests de lixiviation

Les tests de lixiviation sont actuellement un outil indispensable pour la prédiction et l'évaluation environnementale du comportement à long terme d'une matrice contenant des polluants. Le but de ce test est d'évaluer la stabilité des polluants dans la matrice des sédiments [14]. L'hétérogénéité des déchets induit la difficulté de décrire un protocole de lixiviation unique pour étudier le comportement de toutes les espèces constitutives d'un résidu quelconque. Les essais sont, de ce fait, simplifiés et plus généralement adaptés à un type d'application. Il y a plusieurs mécanismes physiques ou biologiques pour mettre en œuvre le test de lixiviation. On distingue deux grandes classes de tests de lixiviation :

I.4.1.1 Les essais en batch

Ces essais consistent à la mise en contact d'une phase solide et une phase liquide dans un réacteur sous agitation et pendant un temps suffisamment long pour que l'équilibre soit atteint. On utilise ses tests pour étudier les cinétiques de mise en solution des composés à partir d'une phase solide et déterminer des isothermes d'adsorption et de désorption [15]. Ils sont aussi utilisés pour évaluer l'influence spécifique de certains phénomènes sur le relargage [16]. On utilise ces tests au laboratoire sur les sols artificiellement pollués. Les essais en batch internationaux se rapprochent de l'essai X31-210 français [17] avec des variantes dans la préparation des 50 à 150 g d'échantillon brut ou sec qui peuvent être lixiviés en état ou broyés à une granulométrie généralement fine. Ils sont mis en contact en bécher ou en bouteille de 10 à 100 fois leur poids en liquide. Les essais durent généralement de 18 h (norme américaine TCLP) à 48 h, mais peuvent s'étaler sur plusieurs semaines avec des renouvellements de solution [18]. Un des essais des pays bas est beaucoup plus court (6 h). Il est réalisé sur un échantillon de 8 g broyé à 125 μm [19]. En France, les normes de lixiviation en batch X31-210 et 211 sont couramment. L'essai consiste à mettre en contact 100 g de déchet, réduit à une granulométrie $< 4\text{ mm}$, et un litre d'eau déminéralisée dont le rapport liquide/solide=10), sous agitation permanente à 20 °C pendant trois fois 16 h ou une fois 24 h. [17]. Les essais batch peuvent être classés en deux sous-groupes :

a. Les tests d'extraction à l'équilibre

Ces tests permettent de caractériser l'intensité de rétention d'un polluant par un sol ou une matrice. Leur point commun est la mise en œuvre d'une phase solide et liquide dans un réacteur fermé, avec une agitation et un contact suffisamment long pour atteindre l'équilibre thermodynamique. On distingue :

➤ Les tests spécifiques

Ils permettent de déterminer la partition géochimique des métaux lourds dans les matériaux terrestres (sols, sédiments, boues, etc.). La méthode de Tessier est la plus souvent utilisée. Elle consiste à la mise en œuvre d'une série de réactifs pour solubiliser successivement différentes fractions minéralogiques [20].

➤ Les extractions simples

Les protocoles utilisés sont divers. Ils utilisent une large variété d'extractions, depuis les acides forts (eau régale, acide chloridrique ou acide nitrique) jusqu'aux solutions salines neutres non tamponnées (CaCl_2 ou NaNO_3). Les quatre types de solution d'extraction principalement utilisées sont : les sels dilués, les complexant organiques, les solutions salines et l'eau pure. Cette méthode est avantageuse par la facilité de sa mise en place, par sa rapidité et son moindre coût [21].

b. Les tests de lixiviation dynamiques

Ils sont basés sur l'étude de la stabilité chimique des polluants à long terme. On distingue :

- L'extraction multiple : Elle permet de caractériser la cinétique de relargage des polluants.
- Le test de lixiviation sur bloc : Elle est mise en œuvre sur bloc massif, ou matériaux granulaires compactés sans débit de fluide, ni agitation.

I.4.1.2 Essais en colonne

Cette méthode permet d'évaluer le comportement des polluants dans les sols par l'écoulement d'une solution lixiviant à travers un système structuré, en fonction de plusieurs variables du système [22] :

- La nature et la granulométrie de l'échantillon solide ;
- La nature et le pH (ajuste ou non) de la solution ;
- Le débit, la température, le temps de contact, la direction du flux.

Il permet de simuler les conditions réelles du terrain [23]. La colonne est dimensionnée en fonction de la taille des particules étudiées :

- Diamètre $d = 10 \times$ granulométrie maximale ;
- Hauteur $h = 4 \times d$.

A titre d'indication, les conditions de quelques essais sont résumées dans les normes NEN 7343 [19], NT ENVIR 002 [24] et CEN/TC 292xxx/WG6 [25].

I.5 Procède de traitement des sédiments

Les procédés de traitement utilisés pour les sédiments sont similaires à ceux utilisés pour les sols. Néanmoins, ces derniers ne sont pas tous appliqués ou efficaces pour les sédiments. Ceci doit être dû à la complexité des mélanges des sédiments, leur forte teneur en argile et en matières organiques. L'ensemble des procédés et techniques existants sont :

I.5.1 Les prétraitements

Les prétraitements sont des procédés peu coûteux et faciles à mettre en œuvre pour préparer les sédiments en vue de leur stockage, traitement ou valorisation. Généralement, la première étape consiste en une déshydratation en vue de diminuer la teneur en eau élevée des sédiments. La déshydratation peut être réalisée par des bassins de décantation avec ou sans coagulants et floculats ou par l'utilisation de presses ou de centrifuges ou par gravitation [26]. Un prétraitement consiste à séparer la phase fine porteuse de polluants de la phase grossière par un tri granulométrique, car Les polluants étant généralement piégés dans la fraction inférieure à $63 \mu\text{m}$ [27]. Ce prétraitement permet de réduire le volume des sédiments à traiter par un procédé biologique, physico-chimique ou thermique afin de diminuer le coût du traitement [28].

I.5.2 Traitements physico-chimiques

Ces traitements utilisent des techniques qui sont basées sur des principes physiques ou chimiques, comme l'absorption/ l'oxydoréduction et échanges ioniques afin de détruire, transformer ou immobiliser les polluants.

I.5.2.1 Le traitement acide

Il consiste des agents chélatants (qui ont le potentiel de se fixer aux ions positifs) pour encapsuler les métaux lourds. Dans le cas des sédiments ce procédé est plus efficace lorsque on ajoute un autre traitement qui consiste à la solidification par un liant à base de chaux [29].

I.5.2.2 Le lessivage

Il consiste à ajouter une eau lavante qui permet de mobiliser les métaux lourds vers une solution lavante. Mais pour une meilleure performance de ce procédé on ajoute une solution d'acide lavante par exemple $5\text{H}_2\text{SO}_4$ et HNO_3 [26]. Le lavage est efficace pour les métaux à faibles liaisons qui est plus adapté aux sables et graviers. Les fins (les argiles et limons) sont difficiles à dépolluer en utilisant cette méthode [30].

I.5.3 L'inertage thermique

L'inertage thermique consiste à chauffer les sédiments à hautes températures en vue de détruire les matières organiques et certains métaux lourds :

Entre 100°C et 600°C , la matière organique disparaît, cette étape s'appelle Désorption thermiques.

Entre 800°C et 1200°C (Incineration), les métaux lourds sont volatilisés. Le mercure, l'Arsenic, le Cadmium s'évaporent à partir de 800°C

Plus que 1200°C (Vitrification), les sédiments ont une nouvelle structure qui fixe les métaux lourds [26].

Les traitements thermiques sont particulièrement efficaces mais ils ont besoins de grande ressource énergétiques, ce qui ne va pas dans le sens des politiques actuelles du développement durable. Les polluants sont en plus transférés du déchet vers l'air causant de grands problèmes écologiques [29].

Le procédé Novosol développé par Laperche [32], et qui été prouvé par plusieurs chercheurs [33, 34]. C'est un système qu'ils ont développé pour permettre le traitement de grands volumes des sédiments. Il combine un traitement chimique qui consiste à injecter de 2 à 3,5% d'acide phosphorique, plus un traitement thermique qui consiste en la calcination à une température comprise entre 650 et 800°C . Le premier traitement (chimique) permet

d'encapsuler les métaux lourds dans une matrice minérale, et le deuxième traitement (thermique) permettant la destruction des composés organiques (HAP, PCB, etc.).

I.5.4 La solidification/stabilisation à base de liants hydrauliques

Depuis 1950 la technique de solidification/stabilisation est utilisée pour le traitement des déchets nucléaires et depuis 1970, ils l'ont utilisé dans le domaine du traitement des boues industrielles et des stations d'épuration [35]. Elle s'effectue par l'addition d'un liant (ciment portland ou un ciment composé) qui fait prise et durcit au contact de l'eau de gâchage issue du produit [36]. Cette technique est considérée parmi les plus efficaces, économiquement et rapides [36], alors que la stabilisation se rapporte au piégeage des éléments toxiques, notamment les métaux lourds et à la réduction de leur mobilité grâce à la matrice solide formée [37].

Cette technique consiste à appliquer un faible champ électrique ou un faible gradient de potentiel à des électrodes immergées dans des sédiments pollués [38]. Ce procédé peut être donc appliqué pour les sols perméables ou non, son efficacité doit être testée [30]. Ceci provoque une migration des ions : les cations sont attirés par la cathode et les anions par l'anode. Une fois les polluants accumulés au niveau des électrodes, ils sont extraits par un pompage d'eau [39].

I.5.5 Le traitement par ultrasons

Le traitement par ultrasons se fait en trois étapes, la première consiste à extraire sous vide les particules fines et l'eau polluée et à immerger des sondes à ultrasons dans les sédiments de granulométrie grossières. Au cours de la deuxième étape, les particules fines récupérées sont traitées par les ondes soniques et l'eau polluée est extraite sous vide. La troisième étape consiste à éliminer les éléments toxiques de l'eau. Selon les études, ce traitement assure l'élimination de 92% du Chrome présent dans la fraction grossière et 82% du chrome présent dans la fraction silteuse ($> 2 \mu\text{m}$). Néanmoins, cette étude a montré que le traitement par ultrasons n'est pas efficace pour la fraction argileuse [40].

I.6 Aspect réglementaire et gestion des sédiments

Dans un contexte de développement durable, les opérations de dragage et la gestion des sédiments dragués sont soumises à des réglementations de plus en plus strictes. Plusieurs lois à

l'échelle internationale et nationales relatives aux déchets s'appliquent également aux sédiments de dragages.

I.6.1 Réglementation internationale

Les sédiments sont considérés comme des déchets à partir du moment où ils sont extraits de leur milieu naturel et issus du processus de dragage [41]. Plusieurs conventions dans le monde présentent des guides pour la réglementation de gestion des déchets. Dans certains cas, les sédiments sont si fortement pollués, qu'ils sont considérés comme des déchets dangereux. Toutes les conventions internationales de gestion des sédiments et la directive relative aux déchets dangereux, ne fixent pas des seuils qui permettent de définir le degré de pollution des sédiments et le choix de la solution la plus adaptée à leur gestion. Parmi ces règlements internationaux on trouve [42] :

I.6.1.1 La convention de Londres (1972)

C'est l'une des premières conventions mondiales visant la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion des déchets. Elle a pour objet de contrôler toutes les sources de pollution résultant de l'immersion des déchets. La réglementation de l'immersion en mer est devenue plus stricte en introduisant des méthodes rationnelles de gestion des déchets et interdisant l'immersion des déchets industriels et radioactifs et des boues d'épuration. Cette convention interdit l'immersion de certaines matières (le Mercure et ses composés, le Cadmium et ses composés, les plastiques non destructibles, le pétrole brut et ses déchets, les déchets radioactifs.), les substances et les matières dont l'immersion nécessite des précautions spéciales, énumère les dispositions qui doivent être prises en considération pour établir les critères régissant la délivrance des autorisations d'immersion.

I.6.1.2 La convention OSPAR (1992)

Signée par 15 membres de l'Union européenne dans le but est la protection d'espaces maritimes dans l'Atlantique du Nord-Est. Née de la fusion de la convention d'Oslo (1972) et de la Convention de Paris (1974). OPSAR traite à la fois les rejets et la pollution marine. L'OSPAR a publié plusieurs guides et circulaires à propos des sédiments, la dernière publication est datée de 2016 sur les métaux dans les sédiments et le Biote.

I.6.1.3 La convention de Barcelone

C'est une convention pour la protection de la mer Méditerranée contre la pollution et le développement durable, adaptés une première fois en 1976, puis renforcée et amendée en 10 juin 1995 et entrée en vigueur le 9 juillet 2004, vise à réduire voire éliminer la pollution. Les parties signataires de cette convention, sont tenues à contrôler les rejets des polluants d'origine tellurique et des polluants des navires, résultants de l'exploitation et de l'exploration du plateau continental et des fonds marins. Les pays de l'union européenne et plusieurs autres pays, parmi lesquels l'Algérie, sont signataires de la convention de Barcelone [43].

I.6.2 Réglementation nationale algérienne sur les sédiments de dragage

La réglementation nationale algérienne sur les sédiments de dragage se repose sur la loi n° 03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement (Vu la loi n° 83-03 du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement). La loi n° 04-20 du 13 Dhou El Kaada 1425 correspondant au 25 décembre 2004 est relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable, Vu le décret n° 80-14 du 26 Janvier 1980 portant adhésion de l'Algérie à la convention pour la protection de la mer méditerranée contre la pollution, faite à Barcelone le 16 février 1976 [43].

I.6.3 Destination des sédiments

La destination des sédiments de dragage se fait dans l'eau et hors de l'eau. Les filières de destination des sédiments après leur dragage dépendent fortement de la pollution. L'immersion en mer dépend des niveaux de référence fixée par la convention de Barcelone qui reprend la même catégorie qu'OSPAR. Cette convention définit les valeurs de référence prise en compte lorsque l'analyse des sédiments marins présente en milieu naturel des contaminants organiques et inorganiques.

Les valeurs seuils fixées pour l'immersion en mer des sédiments marins ou estuariens sont présentées dans le Tableau I.1.

En dessous du niveau N1 l'immersion est susceptible d'être autorisée tandis qu'au-dessus de ces seuils une étude plus approfondie pourrait être nécessaire.

Au-delà du niveau N2 l'immersion est interdite sauf si elle présente la solution la moins dommageable pour l'environnement.

Tableau I.1: Critères Néerlandais pour l'évaluation de la qualité des sédiments [1].

Eléments chimiques	Concentration N1 (ppm)	Concentration maximale N2 (ppm)	Concentration seuil d'acceptabilité pour un rejet en mer (ppm)
As	29	55	29
Cd	0,8	12	4
Cr	100	380	120
Cu	36	73	60
Hg	0,3	1,4	1,2
Ni	35	44	45
Pd	85	530	110
Zn	140	520	365
PCB	50	1000	1250

Hors de l'eau, le sédiment est considéré comme déchet selon règlement algérien, le détenteur du déchet doit caractériser la dangerosité des matériaux. Cela se fait par des tests de lixiviation à l'eau déminéralisée selon la norme NF EN 12457-2[44]. L'avenir du sédiment dépend alors des résultats de cet essai qui permettront de définir l'admissibilité des produits en décharge de catégorie 1 (déchets dangereux), 2 (déchets non dangereuse) ou 3 (déchet inertes). Les sédiments classés dangereux sont stockés dans des sites d'enfouissement technique. Pour ceux qui sont classés non dangereux plusieurs voies de valorisation à terre possible. Le Tableau I.2 présente les seuils des polluants pour la mise en décharge des déchets[45].

Tableau I.2: Valeurs limites des polluants pour les différentes classes de déchets [25].

Éléments chimiques	Déchets inertes (ppm)	Déchets non dangereux (ppm)	Déchets dangereux (ppm)
As	0,5	2	25
Ba	20	100	300
Cd	0,04	1	5
Cr	0,5	10	70
Cu	2	50	100
Hg	0,01	0,2	2
Mo	0,5	10	30
Ni	0,4	10	40
Pd	0,5	10	50
Sd	0,06	0,7	5
Se	0,1	0,5	7
Zn	4	50	200
Chlorures	800	15000	25000
Fluorures	10	150	500
Sulfates	1000	20000	50000

I.7 Valorisation des sédiments

Le dragage de sédiments pollués est mis en dépôt terrestre ou en mer sans aucune protection du site, menace l'environnement initialement. D'autre part, les solutions qui prévoient de protéger le site de dépôt des sédiments, par un confinement, sont assez coûteuses. Ainsi, la gestion des opérations de dragage a été amenée, depuis l'administration des conventions et des critères réglementant la gestion des sédiments (considérés comme des déchets), à trouver des nouvelles solutions écologiques. Ainsi la dépollution de sédiments par des procédés de traitement se présente comme une alternative écologique prometteuse.

Plusieurs chercheurs ont étudié la faisabilité d'incorporer les sédiments marins ou fluviaux dans différents matériaux de construction : brique cuite et crue, matériaux routiers, matériaux cimentaires (mortier, béton) ou même dans la composition du ciment. Ce nouveau matériau doit être résistant et sans impact négatif sur l'environnement. Le schéma de la figure I.2 synthétise les composantes et les étapes possibles de la gestion des sédiments marins.

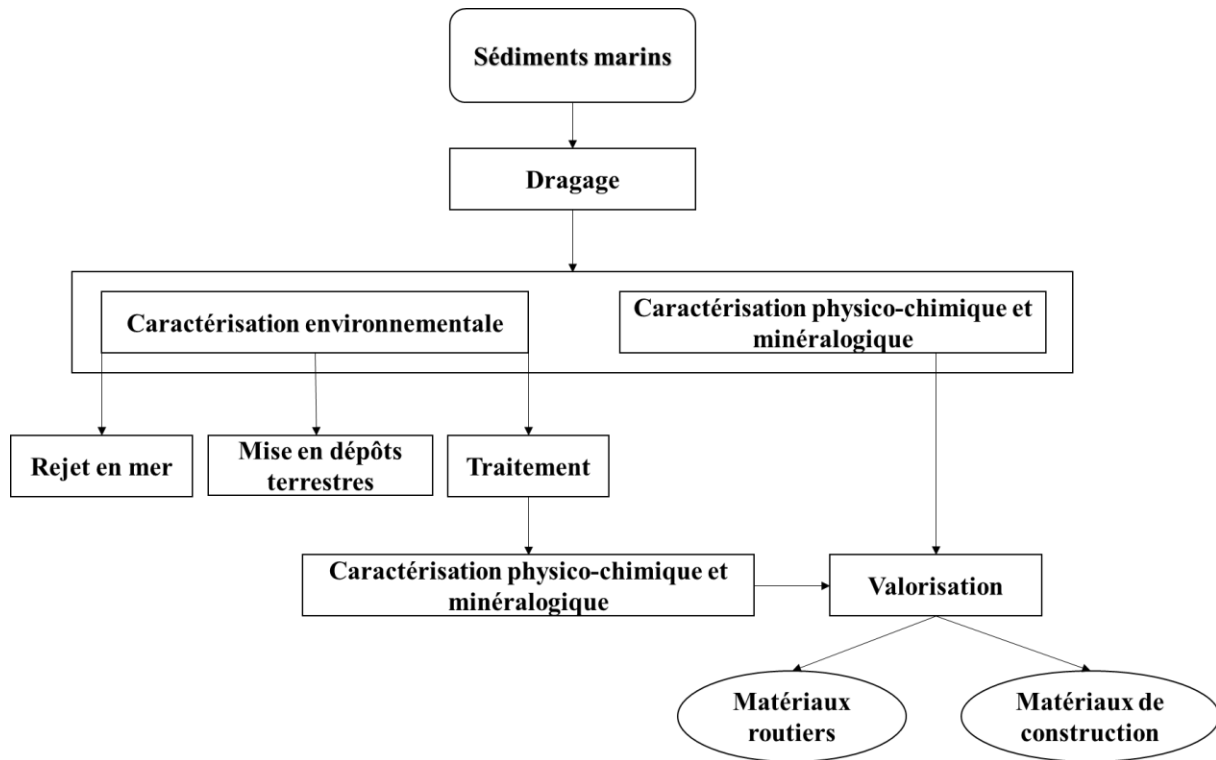


Figure I.2: Schéma des principales étapes et composantes de la gestion des sédiments.

I.7.1 Valorisation des sédiments dans les mortiers

De nos jours, de nombreux ajouts de minéraux sont utilisés dans les matériaux à base de ciment pour réduire les coûts ou entraîner des performances (métakaolin, fumée de silice, cendres volantes, etc.) [46, 47]. Des études menées ces dernières années ont montré que ce matériau pouvait être utilisé comme matériaux cimentaires supplémentaires soit en substitution, soit en complément du ciment ainsi que dans le squelette granulaire [48, 49, 50].

Les sédiments, en raison de leur constitution minéralogique et chimique (siliceuse, argileuse, calcaire, etc.), peuvent être utilisés en mélange cimentaire. Cependant, l'utilisation efficace de ce produit nécessite souvent un processus de traitement adéquat visant notamment à éliminer la fraction organique et certains polluants. Les sédiments contiennent généralement des quantités importantes de kaolinite qui sont transformées en métakaolinite lors de la calcination de 600–800 °C [51]. Les réactions plus rapides entre la silice amorphe et l'alumine du métakaolin avec la chaux libérée du ciment conduisent à la formation de plus grandes quantités de CSH et de C_4AH_{13} , qui favorisent plusieurs propriétés du mortier [52].

L'utilisation du sédiment calcinée comme substitut partiel au ciment Portland a été étudiée en détail en raison de ses avantages techniques, économiques et environnementaux.

Benzerzour et al. [53] ont développé une nouvelle approche pour la réutilisation de ces sédiments dragués dans une matrice cimentaire s'appuyant sur des traitements physiques et thermiques. Leur approche repose sur quatre paramètres : propriétés des sédiments, température de cuisson, durée de la chaleur et taille des grains. Les auteurs ont conclu que le traitement optimal consiste à tamiser les sédiments bruts à travers des tamis de 120 μm et une calcination à 850 ° C pendant une heure. Des études menées par Amar et al. [54] et El Mahdi Safhi [55] sur la durabilité de la matrice cimentaire basée sur les sédiments traités ont amélioré ce processus de traitement. Une autre étude selon Rozière et al. [56] a examiné l'utilisation potentielle des sédiments traités dans le béton auto-consolidant. Plusieurs chercheurs ont attesté la viabilité de l'utilisation de boues non traitées comme substitution partielle d'agréats fins ou de ciment [56].

I.7.1.1 Les différents types de mortiers

Dans les travaux publics on utilise différents types de mortier :

a. Les mortiers de ciment Portland

Les mortiers de ciments sont très résistants, prennent et durcissent rapidement. Les mortiers de ciment portland manquent de plasticité, ont un faible pouvoir de rétention d'eau et sont difficiles à travailler. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1/3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 1/2. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables. En revanche, il est davantage sujet au retrait [57].

b. Les mortiers de chaux

Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment (gras et onctueux). La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments, la cure des mortiers de chaux s'effectue lentement par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air ; ce processus peut être fortement ralenti par un temps froid et humide [58].

c. Mortier à base de ciment de maçonnerie

C'est un produit déposé contenant du ciment portland et un filler minéral inerte (calcaire) et des adjuvants tels que des agents mouillants, des agents hydrofuges et des entraîneurs d'air, les adjuvants donnent la plasticité et le pouvoir de rétention d'eau que confère

la chaux aux mortiers de ciment. Certains ciments de maçonnerie sont des mélanges de ciment portland et de chaux hydratée, avec des adjuvants [59].

d. Les mortiers fabriqués sur chantier

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant CPA ou CPJ et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu. On emploie également des chaux hydrauliques et parfois des liants à maçonner. Le sable est le plus souvent roulé (nature silico-calcaires) parfois concassé et le gâchage s'effectue à la pelle ou à l'aide d'une petite bétonnière [60].

e. Mortier industriel

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Les mortiers peuvent contenir des liants et des sables variés ainsi que certains adjuvants et éventuellement des colorants. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins [60].

I.7.1.2 Classe des mortiers

On trouve plusieurs classes dont :

- Classe 1 : Adjuvant modifiant les caractéristiques des mortiers, bétons et coulis à l'état frais.
- Classe 2 : Adjuvant modifiant les caractéristiques des mortiers, bétons et coulis pendant la prise et le durcissement.
- Classe 3 : Adjuvant modifiant la teneur en air ou en autre gaz.
- Classe 4 : Adjuvant modifiant la résistance des mortiers, bétons et coulis.
- Classe 5 : Adjuvant améliorant la durabilité des mortiers, bétons et coulis.
- Classe 6 : Adjuvant modifiant des propriétés spéciales.

I.7.1.3 Composants du mortier

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux (figure I.3).

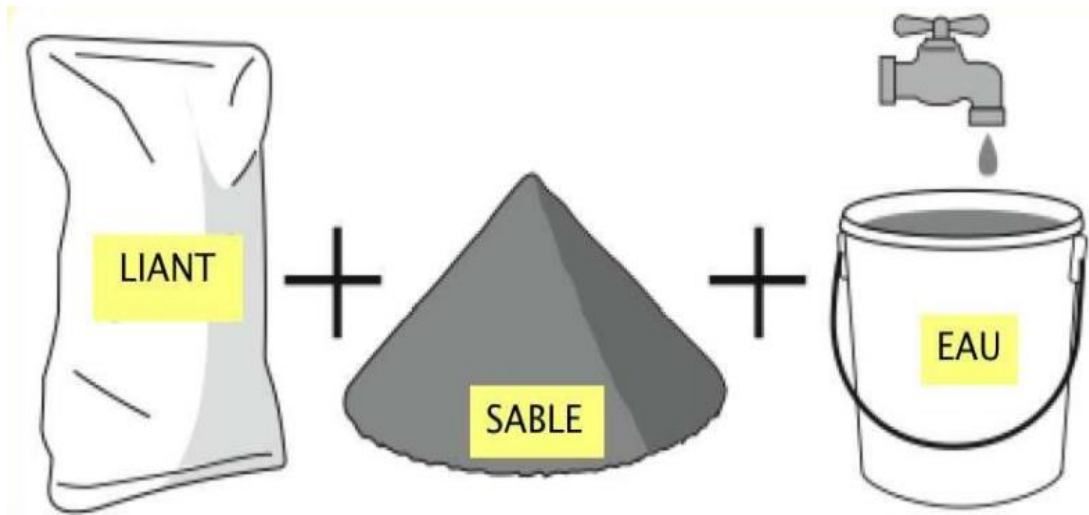


Figure I.3: Composition d'un mortier [60].

a. Le ciment

Le ciment est un matériau sous forme de poudre fabriqué à partir du clinker qui est obtenu par la combinaison chimique du calcaire et de l'argile. C'est un liant hydraulique, ce qui signifie qu'au contact de l'eau et par réaction chimique avec cette dernière, il se durcit pour devenir solide et résistant [61]. Le ciment est constitué de 4 phases minérales majoritaires :

- L'alite C_3S : $(CaO)_3(SiO_2)$: 40 à 70 %;
- La bélite C_2S : $(CaO)_2(SiO_2)$: 0 à 30 %;
- de calcium C_3A : $(CaO)_3(Al_2O_3)$:2 à 15 %;
- Le ferro-aluminate de calcium C_4AF : $(CaO)_3(Al_2O_3) (Fe_2O_3)$: 0 à 15 %.

Les matières premières, les roches calcaires et les argiles, sont extraites des carrières naturelles, contenant des éléments couramment exprimé en oxydes CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Néanmoins, pour des raisons économiques, le nombre de ces matières est en fait strictement limité. Les matières calcaires utilisables sont : le calcaire, la pierre à ciment, la marne et les coquillages marins. Les calcaires riches en carbonate de magnésium ne conviennent pas en général parce que, dans le ciment portland, une teneur en magnésie supérieure à 5% est considérée comme nuisible (risque d'expansion). La craie contient souvent des galets de silex qu'il faut éliminer. Quant à la marne, elle peut contenir une quantité excessive de sable siliceux. Il faut noter aussi que le calcaire pur est dur et son broyage nécessite une forte consommation d'énergie, De toute manière le calcaire doit renfermer une forte teneur en $CaCO_3$. L'argile doit

contenir plus de 40% de SiO_2 et des pourcentages plus au moins importants en Al_2O_3 et Fe_2O_3 . Ces 4 oxydes constituent la base de la structure des minéraux du clinker. Le cru est finement broyé et homogénéisé afin de favoriser les réactions chimiques entre les différents constituants. Il existe 4 voies de synthèse d'un clinker à ce jour [62].

b. Le sable

C'est une matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. L'introduction des sables permet de diminuer le retrait du liant (ossature mortier) en augmentant les résistances mécaniques, ajoutant à cela, sa disponibilité et son aspect esthétiques (couleur). Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important : Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide [63].

c. L'eau

L'eau sert à activer le liant lors de la fabrication du mortier. L'excès d'eau altérera la qualité du mortier et devient poreux, moins résistant, durcira plus lentement et enfin sera sujet au retrait [64].

d. Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés dans les mortiers lors de leur malaxage ou avant la mise en œuvre à des doses inférieures à 5% du poids de ciment, provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci. Généralement le mortier n'est pas forcément satisfaisant, même si sa composition a été déterminée suivant les règles connues fixant les proportions respectives de liant, de sable, et d'eau. Bien des facteurs interviennent au stade de sa fabrication, de son transport, de sa mise en place dans les coffrages, de sa prise et de sa montée en résistance.

La raison de l'utilisation croissante des adjuvants est qu'elle confère physiquement et économiquement au mortier des avantages considérables. Ces avantages comprennent, entre autres, l'utilisation de mortier dans des conditions qui présentaient auparavant des difficultés considérables. On retrouve des adjuvants plastifiant et superplastifiant.

e. Les ajouts

Les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé, la fumée de silice et les pouzzolanes naturelles, telles que le schiste calciné, l'argile calcinée ou le métakaolin sont des matériaux qui, combinés au ciment portland, contribuent aux propriétés du béton et mortiers durci par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois [65]. Les réactions d'hydratation du ciment et des pouzzolanes donnent :

- $C_3S + H_2O \longrightarrow C - S - H + CH$ (réaction rapide)
- Pouzzolane + CH $\longrightarrow C - S - H + C - A - H$ (réaction lente)

Les réactions qui se déroulent sont :

- $SiO_2 + Ca(OH)_2 + H_2O \longrightarrow C - S - H$ (Silicate calcique hydraté)
- $Al_2O_3 + Ca(OH)_2 + H_2O \longrightarrow C - A - H$ (Aluminate calcique hydraté)

f. Les liants

Généralement, on peut utiliser :

- Les ciments normalisés (gris ou blanc).
- Les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, etc.).
- Les liants à maçonner.
- Les chaux hydrauliques naturelles.
- Les chaux éteintes [59]

I.7.1.4 Préparation des mortiers

Les quantités nécessaires en fonction des dosages et des travaux à faire sont résumés dans le tableau 1.3 suit:

Tableau I.3: Dosages des mortiers[60].

Sable (g)	Ciment (g)	Eau (g)
1350	450	225

Pour le malaxage des constituants, un malaxeur à mortier, introduction dans un premier temps de tous les composants solides et secs dans le malaxeur (ciment, sable) puis malaxage pendant trois minutes à vitesse lente, afin d'assurer une bonne dispersion des matériaux parmi les éléments traditionnels du mortier, le mélange doit être de couleur homogène. Introduction

dans un second temps du mélange contenant 80% d'eau, du stabilisant et des autres composants liquide (adjuvant), puis malaxage pendant deux minutes à vitesse lente. Couper le dessus du tas de mortier avec la pelle. S'il ne se forme pas de boudins, introduction dans un troisième temps éventuellement les 20% restant d'eau puis malaxage pendant 2 minutes à vitesse lente. Dans un quatrième temps malaxage de tout le mélange pendant trois à quatre (3-4) minutes à vitesse rapide. Le mortier est correctement humidifié lorsqu'on passe le plat de la pelle dessus, il se lisse et l'eau remonte en surface.

I.7.1.5 Caractéristiques des mortiers

Les caractéristiques principales des mortiers sont :

a. Prise

Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat). Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains de sable) et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur.

b. Résistances mécaniques

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ conservés dans l'eau à 20°C. Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

c. Retraits et gonflements

Les retraits et le gonflement des mortiers se mesurent sur des prismes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20°C et à 50% d'humidité relative. Le rapport du retrait de la pâte pure sur le retrait du mortier croît avec le temps. Il est de l'ordre de 1,5 à 2,5 mm, les premiers jours, puis augmente pour atteindre 2,5 à 3,5 mm en un an. En moyenne, le retrait sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment). Les retraits sont en général assez faibles (cas de ciment stable ayant une expansion aux aiguilles de le Chatelier inférieure sur pâte pure à 10 mm) [66].

d. Masse volumique apparente et absolue

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent à l'état naturel (y compris les vides et les capillaires). C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule sans tenir compte des vides et des pores). Elle est exprimée en (g/cm^3 , kg/m^3 ou t/m^3) [67, 68].

I.8 Valorisation des sédiments dans les produits céramiques

Les produits céramiques prennent une part importante dans le domaine de génie civil, car, suivant leur mode de fabrication, ils ont des propriétés variées, bien différentes les uns des autres. A la base de tous les procédés de fabrication, l'argile, le sable, les feldspaths sont mélangés avec l'eau pour donner une pâte dont la propriété est consolidée lors de sa mise à feu ($1100\text{-}1200\text{ }^\circ\text{C}$). En faisant varier les différents composants de la pâte, la quantité d'eau et le degré de cuisson, on modifie les caractéristiques du matériau, qui devient dur et plus ou moins poreux.

I.8.1 Valorisation des sédiments de dragage marin dans le domaine des briques cuites

De nos jours, la plupart des recherches se concentrent sur la détermination d'une stratégie de réutilisation ou recyclage des résidus de matériaux dans le secteur de la construction. Il peut être utilisé comme matériau alternatif dans les applications du génie civil et industriel comme les géopolymères [69]. De nombreux chercheurs ont traité les matériaux recyclés pour être utilisés dans la production de briques cuites. Ainsi, l'utilisation d'autres matériaux tels que des additifs de déchets inorganiques provenant de diverses activités industrielles traitant des pierres naturelles telles que la perlite [70], le marbre [71, 72, 73], la pouzzolane [74], les roches volcaniques [75], les cendres volantes [76, 77, 78], les boues d'épuration [79] et les déchets céramiques [80], peuvent être une bonne alternative pour la gestion de ces déchets. D'autre part, les déchets organiques tels que le papier [81, 82], le coton [83], le riz [84], les déchets de fabrication du vin [85, 86], la sciure de bois [87] la biomasse agricole [88, 89] et le biodiesel [90] ont été testés comme additifs dans la production des briques.

L'amélioration des niveaux de production durable implique une exploitation réduite des géo-ressources primaires, ainsi qu'une meilleure gestion et élimination des déchets par une réévaluation des matières résiduelles des ressources secondaires à utiliser dans la production de

nouveaux matériaux. L'introduction de déchets dans la production de briques peut représenter une solution durable au problème de l'élimination de grands volumes de substances résultant de diverses activités industrielles, qui constituent désormais des risques environnementaux dans le monde entier [91]. La nécessité de se débarrasser de ces matériaux et la demande croissante de développer des alternatives durables aux matériaux de construction traditionnels a attiré l'attention des industriels et des chercheurs sur la production de nouvelles briques respectueuses de l'environnement [92, 93], optimisant la qualité des produits finis et réduisant leur coût [94].

Dans cette perspective, le choix de considérer les sédiments de dragage portuaires dans la conception d'un nouveau type de briques découle des considérations suivantes :

- Lors de la cuisson, le comportement des métaux lourds pourrait être stabilisé par sa solidification dans la matrice vitreuse des briques.
- Le recyclage des déchets des activités de dragage réduit les problèmes des éliminations, ainsi que les coûts des matières premières et de l'approvisionnement.

Il a été conclu que le processus de fabrication des briques qui se fait par calcination à très hautes températures (900 à 1200°C), contribue à la valorisation de la majorité des polluants organiques et à la fixation des métaux lourds, et l'efficacité de l'incorporation de déchets dans la formulation des briques avec différents taux de déchets.

I.8.1.1 Les principales matières premières

Les matières premières utilisées dans la fabrication des produits de terre cuite sont principalement :

a. Les argiles

L'argiles permettent de faciliter le façonnage grâce à leur plasticité. Dans les ouvrages de référence il existe plusieurs définitions du terme "argile ". Eslinger et Peaver[95] proposent de définir les argiles comme un minéral qui domine dans la fraction fine $< 2 \mu\text{m}$ des roches et des sols. Par contre, Weaver [96] regroupe tous les minéraux phyllosilicatés sans aucune connotation de taille. En pratique, on distingue les argiles selon leur plasticité (grasses ou maigres), leur couleur (rouges, verdâtres, colorées), leur comportement à la cuisson (grésantes ou réfractaires). Ces propriétés dépendent essentiellement de la composition chimique et minéralogique des argiles utilisées.

b. Les matériaux de charge

Ils sont généralement utilisés pour diminuer la plasticité excessive de certaines argiles. Une plasticité importante provoque souvent des difficultés de fabrication (quantité importante d'eau de façonnage, séchage lent et retrait de séchage important). Ils comprennent le sable, la chamotte, les cendres volantes, les dures roches broyées, etc. Ils permettent de donner une structure moins compacte et de favoriser l'évacuation des gaz au cours des procédés de séchage et de cuisson. Ils permettent aussi de baisser la plasticité des briques, de baisser la quantité d'eau de façonnage et de réduire le retrait de séchage.

c. Les agents formateurs de pores

Pour certains types des briques, afin d'améliorer leur résistance thermique et par conséquent leur pouvoir d'isolation thermique et phonique, des agents formateurs de pores sont utilisés pour augmenter la porosité des produits de cuisson. Les calcaires et les carbonates naturels sont le plus souvent utilisés [97]. Par contre, l'ajout des agents formateurs des pores (déches organique) est accompagné souvent par l'augmentation de la porosité et donc automatiquement la chute des résistances mécaniques [98]. C'est dans ce sens qu'il est très important de bien de définir la concentration maximale en agents formateurs de pores pour obtenir la qualité désirée de briques.

I.8.1.2 Procède de fabrication des briques cuites

Les matières premières sont extraites généralement des carrières subissant une préparation préliminaire avant l'incorporation dans le mélange (concassage, broyage, tamisage et dosage).

a. Mélange

Après l'étape de préparation, les ingrédients sont mélangés dans un procédé sec, semi-humide ou humide selon la qualité du produit recherché. La préparation humide est souvent la plus utilisée. L'eau est ajoutée dans le but d'obtenir une pâte homogène et facile à modeler.

b. Façonnage

Le façonnage donne à la pâte une cohésion suffisante, grâce à l'élimination de l'air occlus dans l'argile (désaération) et à l'amélioration de l'état plastique de la pâte. Deux

procédés sont principalement utilisés dans l'industrie de terre cuite : le filage (moulage ou extrusion) et le pressage.

c. Séchage

Le séchage a pour but d'éliminer la plus grande partie de l'eau qui se trouve dans les produits après façonnage. C'est une phase délicate et importante de la fabrication qui doit être minutieusement contrôlée pour éviter des fissurations, des retraits différentiels importants et des distorsions des produits en terre cuite. Le tableau I.4 présente quelques défauts qui sont liés au processus de séchage.

d. Cuisson

La cuisson donne aux produits séchés leurs caractéristiques finales adaptées à leur utilisation pour la construction. Cette phase doit répondre à des impératifs techniques et économiques et doit être conduite de façon à obtenir des produits avec des caractéristiques fonctionnelles satisfaisantes. Il s'agit donc de contrôler plusieurs paramètres qui influencent la phase de cuisson tels que la température, la durée de cuisson et l'atmosphère à l'intérieur du four. Les briques sont cuites à des températures variantes entre 800 et 1200 °C [99].

Tableau I.4 : Les défauts des briques pendant le séchage [99].

Manifestations	Causes probables	Remèdes
Déformation du produit à l'entrée par absorption	Condensation de l'air humide sur les produits	Filage à chaux changement des paramètres de l'air
Microfissures	Vitesse de séchage non adaptée	Diminution de vitesse de séchage. Augmentation de la longueur du séchoir. Amélioration du mélange
Baisse des performances mécaniques du produit cuit	Séchage trop rapide. Microfissures	Séchage. Augmentation de la longueur du séchoir. Amélioration du mélange
Efflorescence : taches blanches en sortie de séchoir	Présence de sels solubles comme CaSO_4 dans la matière Première, drains en surface au séchage.	Ajout de carbonate de baryum BaCO_3
Fentes en long ouvertes d'épaisseurs décroissantes, apparaissant n'importe où à partir de la périphérie	Vitesse de séchage trop importante. Prise de retrait trop rapide en première phase	Diminution de la vitesse de séchage. Augmentation de la longueur du séchoir. Amélioration du mélange
Fentes diverses obliques et transverses sur toute la périphérie	Trop fort gradient d'humidité dans le produit. Superposition des zones de séchage	Retarder la zone de séchage rapide. Améliorer l'homogénéité
Produits sortant trop sec, formation de microfissures sur certaines argiles	Reprise d'humidité créant des variations dimensionnelles	Diminution de la température et du pouvoir séchant en fin de séchage

I.8.1.3 Transformations physico-chimiques et minéralogiques au cours de la cuisson

Différentes réactions chimiques et physiques complexes se produisent dans le mélange avec la montée de température pendant la cuisson, ce qui provoque la création de modifications de la porosité, de masse volumique, de dimensions et de propriétés mécaniques du produit final. Les transformations minéralogiques jouent un rôle important et affectent amplement les propriétés finales des briques cuites. La nature des phases minérales se formant après la cuisson dépend essentiellement de la composition chimique, la minéralogie, la température de cuisson, la durée de cuisson et l'atmosphère de cuisson. Un total de cinq transformations est à différencier au cours de la cuisson [100].

- Jusqu'à 200 °C environ : Dégagement de l'eau résiduelle de séchage et de l'eau d'hydratation. Le gypse se décompose et perd son eau aux alentours de 150 °C [101].
- Entre 400 et 700 °C : les minéraux argileux se déshydratent et perdent leur eau structurale [102]. La déshydratation des minéraux argileux change d'une argile à une autre ; la kaolinite perd son eau de structure aux alentours de 500 °C, alors que les chlorites perdent leur eau aux environs de 750 °C. À ce stade, des composés très fin et désordonnés (métakaolin) se forment et un début de retrait de cuisson est observé. Vers 573 °C, le quartz change de forme cristallographique en allant de la forme α vers la forme β . Cette transformation allotropique, appelée point de quartz, est susceptible de créer des fissures liées à des changements de volume. À partir de 650 °C, la calcite commence à se décomposer et générer du CO_2 , et les sulfures s'oxydent et provoquent des dégagements de SO_3 entre la température 400-450 °C.
- De 700 jusqu'au 850 °C : Décomposition des carbonates [CaCO_3] en chaux vive [CaO] accompagnée par le dégagement du CO_2 . Ce dégagement gazeux est un facteur parmi d'autres qui est responsable de la porosité au sein de la matrice cuite des briques. La température exacte de décomposition des carbonates n'est pas fixe. Elle change en fonction de plusieurs facteurs : la taille des grains du minéral, la vitesse de cuisson et le degré de facilité de dégagements de gaz [100].
- Au-delà de 850 °C : Deux phénomènes sont observés [103] selon la minéralogie du mélange.
 - 1) Les argiles non calcaires, développent un frittage liquide qui coule entre les particules non fondues donnant aux produits finaux une structure liée par un procédé de vitrification partielle.
 - 2) Les argiles calcaires (teneur élevée en calcite CaCO_3 , et dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ne développent pratiquement pas de phase vitreuse et la cristallisation des produits céramique s'effectue en phase solide. Le CaO disparaît et de nouvelles phases commencent à se former comme : les silicates de calcium (wollastonite : CaSiO_3), les aluminosilicates de calcium (anorthite : $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$; géhlenite : $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$). La dolomie entraîne la formation de silicates de calcium/magnésium

(diopside). Le fer n'apparaît plus comme hématite, mais se combine aux aluminosilicates.

Au cours du refroidissement, la phase fondue formée au cours de la cuisson se durcit et forme la phase vitreuse. Cette dernière se comporte comme un liant et donne une résistance mécanique importante à la brique. Une partie de la phase fondue se cristallise et donne naissance à de nouvelles phases comme la mullite, l'hématite, le pyroxène, la melilite, l'anorthite et les feldspaths. Aussi, la transformation allotropique du quartz beta en alpha prend lieu aux environs de 573°C [104].

I.8.1.4 Propriétés technologiques de durabilité des briques

La détermination de ces propriétés est évaluée selon les normes de construction en vigueur dans chaque pays. La plupart des études rencontrées dans la littérature ont utilisé des normes européennes (CEN), américaines (ASTM) [105]. Lors de la valorisation des déchets industriels dans la brique cuite, certaines propriétés apparaissent :

a. Résistance mécanique

Elle est parmi les indicateurs de qualité exigés par les normes de construction. La caractérisation mécanique comprend les essais de compression uni-axiale et de flexion sur les éprouvettes fabriquées. On le considère comme un bon indicateur de qualité. Pour évaluer une brique cuite, les limites des normes algériennes [106] et de norme européenne EN-772-1 [107] attestent que les valeurs de la résistance à la compression sont supérieures à 10 MPa [107].

b. Absorption d'eau

Elle est également une caractéristique primordiale qui renseigne sur la résistance de la brique à l'eau et sur sa durabilité. Une forte absorption d'eau pourra conduire à une pénétration d'eau à l'intérieur de la brique et donc à une accélération des dommages par les cycles de gel-dégel. Selon ASTM C 67-03 [108], la valeur maximale autorisée pour les briques céramiques résistantes aux intempéries pour la construction est de 22%.

c. Porosité

Elle est le paramètre le plus important pour toutes les propriétés de la brique car elle influence la résistance mécanique, l'absorption en eau et la perméabilité de la brique cuite [92]. La porosité peut être ouverte ou fermée. Selon les produits, on cherche à obtenir différentes

porosités, de faibles porosités ($< 20\%$) pour les tuiles et les briques apparentes et de fortes porosités ($>40\%$) pour certains types de briques à faible conductivité thermique. La porosité de la brique est principalement ouverte et seules les températures de cuisson élevées permettent d'obtenir des porosités fermées dues au dégagement gazeux. Plusieurs facteurs influencent la porosité de la brique. Durant le phénomène de frittage à des températures élevées ($>950^{\circ}\text{C}$), les produits sont plus vitreux et subissent de grands changements de volume conduisant à la formation de pores. Ainsi, les particules d'argile disparaissent en raison de la vitrification et de la coalescence des particules ce qui engendre une diminution de porosité. La combustion des matières organiques produit des briques de faible porosité, alors que la décomposition du calcaire produit des briques de porosité élevée [109].

d. Retrait de cuisson

Il est un paramètre important qui influence les dimensions et la résistance mécanique de la brique. Un retrait important provoque une déformation facile de la brique et une grande variation de volume de produit fini. Le retrait des briques est inférieur à 8% qui est la valeur donnée pour les briques d'argile standard [110].

e. Masse volumique

Elle est un paramètre important caractérisant les briques, elle est liée à la composition chimique des matières premières utilisées. La masse volumique absolue de la terre cuite est dans la gamme de $2,5$ à $2,8\text{ g/cm}^3$ par contre la masse volumique apparente des briques en terre cuite sont plus faible ($1,8$ et 2 g/cm^3), ceci est directement et liée à leur porosité [111].

f. Durabilité des briques

Cette propriété est évaluée pour prédire leur comportement à long terme. Le défi majeur de durabilité des briques est évalué par des tests d'efflorescence et de quantification des sels solubles. La présence des sels dans la structure des briques provoque, une fois en contact avec l'eau, une migration des sulfates à la surface des briques ou ils se déposent et forment un précipité blanc qui influence négativement sur la durabilité des briques et pourrait provoquer la fragilisation de la brique [112].

I.8.2 Valorisation des sédiments de dragage marin dans le domaine des céramiques

Plusieurs recherches se sont concentrées sur l'utilisation des sédiments de dragage portuaires riches en oxydes SiO_2 et Al_2O_3 , dans le domaine des céramiques [33, 113, 114] (porcelaine, carreaux de sol, etc.). Comme le domaine des céramiques est très vaste et que le principe de fabrication est basé sur des minéraux naturels, il est nécessaire de trouver des sources alternatives qui peuvent remplacer ces matériaux. Les matériaux céramiques ont été étudiés de manière approfondie en raison de leurs propriétés uniques, telles que leurs microstructures, le comportement au frittage, la résistance mécanique à la flexion et à la compression, la dilatation thermique et la faible conductivité électrique (isolants électriques) [115]. On sait que les teneurs élevées en fer sont le signe qui identifie les matériaux argileux (kaolin) qui ont un impact sur la résistance mécanique des matériaux de construction. Les argiles sont associées à des agents de fusion tels que les éléments alcalins et alcalino-terreux conduisant à la formation d'un flux vitreux en abaissant la température de cuisson [116]. De plus, lors du frittage, l'utilisation des feldspaths facilite la densification de la céramique pour des températures inférieures à celles requises pour les céramiques traditionnelles, améliorant ainsi la fiabilité des emballages et des emballages céramiques [117]. Wu et al. [118], en utilisant le feldspath potassique comme matière première, a montré que la meilleure température de frittage est de 1370°C , qui pour elle modifie la microstructure et l'absorption en eau, le retrait à la cuisson et résistance à la flexion. D'autres auteurs ont étudié l'utilisation d'autres matières premières dans la fabrication de céramiques. Ainsi, Pinheiro et al. 2008 [119] a évalué en détail le pouvoir d'utiliser des boues provenant d'huiles usagées pour la fabrication de céramiques rouges. L'ajout du résidu a modifié la microstructure des carreaux de céramique. Wu et al., 2017 [120], ont préparé des céramiques à base de mullite à faible densité et à haute résistance à partir de cendres volantes de déchets industriels. Tous les minéraux présents dans les cendres volantes ont joué un rôle important dans le processus de cuisson de la céramique. Ji et coll. 2013 [121] et Lü et al. 2014 [122], ont proposé une approche alternative pour remplacer l'abondance de la gangue de charbon pour fournir des matériaux de construction à base de mullite. Wang et al. 2018 [123] a recyclé la boue rouge, issue du traitement de la bauxite, en remplacement au kaolin avec incorporation du catalyseur $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ pour produire des carreaux de sol céramiques. Les auteurs ont conclu qu'en optimisant la teneur en matière première et la température de frittage, une performance admirable des carreaux de céramique (densité apparente et résistance à la flexion) pouvait être obtenue. A l'heure actuelle, Les sédiments de dragage n'ont jamais

été utilisés comme matière première pour produire des céramique types dalle de sol, faïence ou porcelaine.

I.8.2.1 La mise en œuvre des produits céramiques

Les produits céramiques destinés aux revêtements des surfaces forment un assemblage désigné par le terme classique de "carrelage". Il faut tout de suite distinguer deux utilisations distinctes : le carrelage des sols, le carrelage des murs. L'un et l'autre proviennent d'un assemblage de carreaux ou d'éléments similaires, mais les matériaux et les produits utilisés sont parfois très différents on retrouve :

a. Le carrelage des sols

L'assemblage s'exécute traditionnellement à l'aide de mortier et de ciment. Chaque carreau est scellé au support ainsi qu'au carreau suivant. Un carrelage de sol doit être résistant et parfaitement plan. Cette planéité est obtenue en exécutant au préalable un support rigide sous toute la surface à carreler : une chape de béton parfaitement dressée est, en général, la meilleure solution. Ensuite, les carreaux sont disposés un à un sur le sol et scellés à l'aide d'un mortier de pose[124].

b. Le carrelage des murs (faïence)

Comme pour le carrelage d'un sol, la pose s'effectue sur un support plan et lisse, mais il n'est pas impératif de réaliser un enduit au mortier. On peut poser ce carrelage sur un mur de plâtre ou sur une cloison en briques dont la surface a été préalablement enduite et lissée comme pour recevoir de la peinture ou du papier peint. Il peut tenir également sur une cloison en aggloméré de bois ou même sur le plateau d'une table, pourvu que les matériaux servant de supports ne soient pas trop sensibles aux variations atmosphériques[125].

I.8.2.2 Matières premières des carreaux des céramiques

Le principe de fabrication des céramiques est fondé sur la propriété que possède l'argile avec l'eau, dans des proportions convenables, une pâte liante et ductile que l'on peut modeler et cuire afin d'obtenir sans déformation des produits finaux durs et sonores. Les matières premières se subdivisent en deux groupes :

a. Matières premières plastiques

Ce sont les matières premières les plus importantes pour la fabrication des produits céramiques, sont les argiles. Les argiles ne constituent pas une matière définie et unique mais elles sont composées d'associations complexes des minéraux, ce sont des silicates d'alumines hydratés d'une structure feuilletée que l'on appelle phyllosilicates [126].

➤ La kaolinite (Argile kaolin)

La kaolinite, de formule chimique $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, grasse au toucher, savonneuse, plastique. La kaolinite reste l'un des plus fréquemment utilisé et souhaité pour la fabrication des céramiques de grande diffusion. Au niveau microscopique, le kaolin est composé de cristaux qui ont une forme feuilletée, ce type de structure cristalline est à l'origine des propriétés du kaolin, qui en font un minéral utile à usages multiples. Le kaolin fond à des températures élevées ; par conséquent, on l'utilise comme isolant thermique[126].

➤ Montmorillonite (bentonite)

Ce sont des phyllosilicates de formule chimique : $4\text{SiO}_2 \text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, plus riches en silice que la kaolinite. La bentonite a la propriété de gonfler au contact de l'eau en donnant un gel plus ou moins épais. De très nombreux gisements ont été découverts dans le monde. Selon leur origine les bentonites présentent des propriétés différentes par rapport aux kaolins [127].

b. Matières premières non plastiques

Elles sont également appelées matières dégraissantes, car leur adjonction aux argiles diminue la plasticité de celles-ci, les rendant moins onctueux au toucher, les principales sont :

➤ Les matières dégraissantes

Ces matières ont pour rôle de réduire le retrait dû à la plasticité de l'argile, on les distingue aussi par le terme dégraissant. Elles ont outre pour but d'améliorer certaines propriétés lors de la cuisson. Les ajouts de dégraissant aux argiles ont en généralement pour effet d'augmenter la propriété de la pâte crue, de faciliter le séchage des produits en facilitant la diffusion de l'eau au cours de séchage et donner un squelette à la pâte crue ou cuite[128]. On cite parmi les dégraissants

- Sable : de préférence siliceux riche en silice (Quartz) ;
- La charlotte : c'est une argile cuite à de hautes températures (1000-1400°C).

➤ Les matières fondantes

Ces matières en général assurent l'augmentation de l'intervalle de frittage et la diminution de la température de cuisson. La fonction principale du fondant c'est de former une phase vitreuse. De cette façon, la cohésion en cuit et la densification sont facilitées pour que la température de cuisson soit réduite. Les meilleurs fondants sont ceux qui permettent d'abaisser le point de vitrification sans abaisser le point de fusion. Parmi les fondants, on peut citer :

- Les feldspaths : Ce trouve les feldspaths potassiques (orthose) ($6 \text{ SiO}_2 \cdot \text{Al}_2 \text{O}_3 \cdot \text{K}_2\text{O}$), feldspath sodique (Albite) ($6 \text{ SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Na}_2\text{O}$) et les feldspaths mixtes (potassique et sodique); feldspaths calcique (Anortite) ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$).
- Le talc : Il donne avec les argiles des cristallisations qui confèrent au tesson une bonne résistance au choc thermique et une dilatation peu élevée, dans la formule développée est : $4 \text{ SiO}_2, 3\text{MgO} \cdot \text{H}_2\text{O}$ [129].

I.8.2.3 Fabrication des matériaux céramiques

Les céramiques sont obtenues souvent par frittage, généralement entre 1000 et 1400°C selon la composition du mélange utilisé et les propriétés physico-chimiques de ses composés. Cette étape, essentielle au procédé de fabrication des céramiques s'accompagne d'une transformation des minéraux pendant la cuisson. Deux procédés de fabrication sont mis en évidence :

➤ Pressage

Le pressage mécanique s'emploie encore dans la briqueterie et la fabrication des produits réfractaires céramiques (On charge les moules avec un volume prédéfini de granulés d'argile et l'on applique une pression généralement par le haut et par le bas, les pistons étant entraînés par l'action des cames et aidés par de lourds volant). Les presses hydrauliques actuelles disposent d'une force de compactage élevée, d'une forte productivité, de cohérence et sont faciles à régler.

➤ Extrusion

Ce procédé sert également à fabriquer des dalles semi-finies qui seront ensuite pressées pour former des tuiles, des réfractaires etc. l'extrusion exige une matière première plastique, donc une teneur en argile généralement importante. On malaxe la pâte plastique avec de l'eau jusqu'à obtenir la consistance souhaitée, puis on la force à travers la filière de l'extrudeuse, une phase de désaéragage sous vide est généralement prévue avant l'étireuse, pour améliorer la consolidation du boudin d'argile. On découpe enfin ce dernier en unités d'une longueur requise, en poussant des sections du boudin à travers plusieurs fils verticaux fortement tendus [130].

I.8.2.4 Transformation thermique des céramiques

a. Le séchage

Le séchage est une étape de transition très délicate consistant à extraire l'eau des produits. La difficulté majeure rencontrée lors du séchage est la contraction que subissent les produits, qui peut entraîner des déformations voir des fissurations. Pour ne pas déformer le produit, il est indispensable d'opérer lentement et progressivement. Ainsi, le début du séchage est réalisé à l'aide d'air humide et basse température ; la fin du séchage présentant moins de risques est réalisée à l'aide d'air sec et chaud.

b. La cuisson

Le quartz constitue le squelette granulaire qui maintient la pièce pendant le développement de la phase vitreuse. Si le quartz devrait être totalement fondu, il faut trouver un autre minéral susceptible de maintenir la pièce lors du développement de la phase vitreuse [131]. Selon leurs tailles et la température, les grains de quartz ne disparaissent pas en totalité pendant la cuisson. A 573°C, le quartz se transforme structuralement de la phase α à la phase β ou inversement si la température décroît. La première phase a une structure trigonale et une densité de 2,65 g/cm³ alors que la seconde est hexagonale avec une densité de 2,53g/cm³. Cette modification s'accompagne d'une absorption de la chaleur et d'une augmentation de volume de 0,8% à la montée en température. Symétriquement, le quartz se contracte au cours du refroidissement de 0,8% au moment de la transformation β à α .

Le métakaolin de formule chimique $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$, c'est le résultat de la déshydroxylation de la kaolinite. Selon les auteurs, elle se forme entre 400°C et 650°C d'après l'interprétation des courbes thermiques [132].

Entre ~650°C et ~980°C, le métakaolin est converti en « $2\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{SiO}_2$ ». Cette phase néoformée peut être décrite comme étant un spinelle de silicium, un γ alumine + mullite, et un spinelle silico-alumineux. Le spinelle magnésien (MgAl_2O_4) peut aussi apparaître à partir de 800°C si la smectite est présente dans une argile non calcaire [133].

La mullite est un minéral céramique essentiel mais rare à l'état naturel, sa composition se situe entre les extrêmes $3\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$, $2\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$, et $3(\text{Al}_{0,9}\text{Fe}_{0,1})_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$. Au cours de la cuisson des pâtes céramiques, la mullite se forme entre 900 et 1300°C. Elle présente une température de fusion très élevée, entre 1590 et 1850°C selon la pureté. Sa forme aciculaire est très prisée par les céramistes. En effet, l'enchevêtrement d'aiguilles ou de lattes offrent une résistance supérieure au produit cuit à haute température comme c'est le cas de la porcelaine où la température se situe autour de 1400°C [134]. Cette structure en aiguilles est similaire à celle de la sillimanite mais avec plusieurs postes vacants d'oxygène et plus d'alumine.

Il existe deux sortes de mullite. Une mullite dite primaire qui cristallise à partir des produits de déshydroxylation et de décomposition des argiles, elle est très fine et se présente sous forme de blocs lamellaires, elle apparaît vers 1000°C. Une mullite dite secondaire qui cristallise dans la phase fondue. Cette phase occupe les emplacements des fondants, d'où l'idée fréquente que la mullite se forme à partir des feldspaths. C'est cette mullite qui constitue un enchevêtrement d'aiguilles qui renforce la phase vitreuse, comme dans un composite. Lors de la cristallisation de la mullite secondaire, la prise de retrait de la céramique se stabilise et la déformation pyroplastique se restreint [135].

La plus importante phase du tesson cuit est la phase vitreuse, elle constitue le ciment de l'ensemble. Le verre peut renfermer le quartz résiduel, la mullite et les pores. Ses éléments constitutifs sont principalement Na, K, Al, Si et O. Il possède une structure désordonnée. L'ordre créé par l'arrangement des tétraèdres SiO_4 dans le quartz est détruit par la chaleur et les alcalins [136]. Ce sont donc les réseaux des silicates et du quartz qui sont défaits pour former le verre.

I.8.2.5 Refroidissement

En fin de cuisson et début de refroidissement, il faut veiller à ce que la pièce ne subisse ni chocs thermiques ni gradients thermiques élevés afin d'éviter des fractures ou les cassures dans les pièces.

La phase vitreuse est solidaire des grains de quartz. Pendant le refroidissement, des microfissures se créent autour des grains de quartz quand le tesson n'est pas entièrement vitrifié. Ces microfissures proviennent de la perte de volume des grains de quartz lors de son passage de la forme β à α . La matrice vitreuse ne supporte pas la contrainte ainsi générée, et par manque d'élasticité, la limite de rupture est vite atteinte, le verre se désolidarise du quartz et se fissure. Ces fissurations induisent une fragilité faible mais décelable. Si la fissure se propage dans toute la matière, la pièce se casse. Ainsi l'attention pendant le refroidissement doit être surtout portée sur la zone de température où le quartz change de phase et par suite de volume. Cette perte de volume de 0,8% brise la pièce si elle n'est pas ménagée. La chute de température entre 600 et 540°C doit donc être limitée à 1°C/min [114].

Pour augmenter la résistance mécanique du tesson, il faut que la fusion du quartz soit la plus complète possible avant le début du refroidissement à condition d'avoir un autre minéral susceptible de maintenir la pièce lors du développement de la phase vitreuse [131]. Toutefois, pour une terre cuite, les températures maximales atteintes ne permettent pas une fusion complète du quartz même en présence de fondants.

I.8.3 Le comportement environnemental

La majorité des cas les déchets industriels peuvent contenir des contaminations (métaux..., etc.) et leur utilisation dans des matériaux de construction peut engendrer des risques de relargage de polluants vers le milieu naturel, la santé et la sécurité des leurs utilisateurs. Le comportement environnemental des matériaux de construction est évalué en analysant les facteurs qui peuvent influencer la lixiviation de contaminants. Tels que : la granulométrie du produit, la solution de lixiviation, le ratio solide-liquide, la masse du produit analysée et le pH de la solution de lixiviation [68]. Ces tests sont classifiés en deux catégories

Des tests de lixiviation sur des blocs monolithiques : ce test est souvent utilisé pour évaluer la lixiviation des contaminants durant la durée de vie du produit de construction étudié selon NEN-7375(2004). Ce test est basé sur le transfert de masse du bloc étudié vers la solution de lixiviation dans laquelle est imprégné le produit étudié. Il permet également de donner des

informations sur la cinétique de relargage de contaminants avant d'arriver aux conditions de stabilité du bloc monolithique. Les résultats de ce test sont comparés avec les limites fixées par « the Building Material Decree ».

Des tests de lixiviation sur des produits concassés ou broyés : ce test sont utilisés pour simuler la lixiviation des contaminants à la fin de vie du matériau étudié. Ces tests sont généralement réalisés sur des produits concassés ou broyés. Les tests TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) et UNE-EN 12457 (Equilibrium batch leaching tests) sont les plus utilisés. Les résultats de ces tests sont comparés avec les limites fixées respectivement par l'agence de protection de l'environnement (US-EPA) et le conseil de décision européen (2003/03/EC).

D'autres tests ont pour but de simuler la lixiviation de contaminants dans des solutions ayant des valeurs de pH différentes comme le cas de la méthode 1313 (EPA-1313, 2012) et de la capacité de neutralisation acido-basique (EN 14997).

I.9 Présentation du port de Bejaia

Le port de Bejaia a toujours su capitaliser ses atouts pour en faire des instruments de développement. Sa position géographique stratégique en méditerranée, son environnement économique dans une région entreprenante et ses ressources humaines hautement formées et impliquées ont été les socles sur lesquels a été bâti un processus de développement harmonieux qui ont fait du port de Bejaia, une des premières infrastructures du transport maritime du pays. Doté d'infrastructures et d'équipements répondant aux normes universelles et aux exigences du trafic de plus en plus denses, de ressources humaines hautement qualifiées et d'une vision claire du développement, le port de Bejaia enregistre, au fil des années, des performances en progression continue.

I.9.1 Historique du port de Bejaia

Bejaia a tout au long de son histoire multimillénaire, rayonné tant sur le bassin méditerranéen que sur l'ensemble du Maghreb. Les Phéniciens longeant la côte nord-africaine installèrent un comptoir commercial à proximité du port actuel, ville romaine construite en 26-27 ap. J.-C., qui servit de port d'embarquement vers Rome au blé venant des hauts-plateaux

L'activité portuaire reprit de la vigueur au début du millénaire avec les Hammadides, dont la civilisation florissante permit l'ouverture sur le monde européen : plusieurs traités de paix et de commerce ont été signés, les échanges entre le prince hammadite et le pape Grégoire VII prouvent le niveau des échanges avec l'Europe. Les relations commerciales se développèrent avec les ports tels que Marseille, Gênes ou Majorque.

Les premiers ouvrages furent réalisés en 1834. Les ouvrages de protection furent commencés en 1870, et en 1879 ceux d'accostage, le port marchand fut achevé en 1911. En 1922, on traça physiquement les configurations de l'avant-port et l'arrière-port. C'est entre 1958 et 1960 que furent construites les installations nécessaires à la réception des pétroliers dans l'avant-port les premiers travaux de conduite du pétrole de Hassi -Messaoud au port de Bejaïa ont été débutés en août 1958, cette conduite de 650 km a été achevée le 25 août 1959, le premier décembre 1959 est parti le premier bateau-citerne de Bejaïa vers la France.

Après l'indépendance, les pouvoirs publics ont posé les premières stratégies de développement et d'investissement, ainsi, des études ont été engagées pour le développement des ports algériens, c'est dans cette dynamique que le port de Bejaia a bénéficié du soutien de

l'état pour la construction d'un grand nouveau quai de 750 ml. La modernisation et l'élargissement des infrastructures constituent depuis, des décennies, les principaux chantiers du port. Elles connaissent leur point d'orgue avec la réalisation d'une gare maritime ultra moderne et la création de zones extra-portuaires.

I.9.2 Situation géographique du port de Bejaia

Le port de Bejaia est situé à une latitude Nord 36°45'24'' et une longitude Est 05°05'50''. Son positionnement au cœur de la méditerranée occidentale et au centre de la côte algérienne (Figure I.4) lui confère d'importants atouts sur le plan économique et une place privilégiée sur les routes maritimes, où il a su y capter un important trafic. La ville et le port de Béjaïa disposent de dessertes routières reliant l'ensemble des villes du pays, de voies ferroviaires et d'un aéroport international. La réalisation de la bretelle autoroutière reliant le port à l'autoroute Est-ouest est un atout supplémentaire qui lui permettra de mieux fluidifier l'acheminement des marchandises sur son hinterland qui, lui aussi, s'élargit progressivement



Figure I.4: Carte de la Méditerranée situant la ville de Bejaia [137].

L'hinterland du port de Bejaia compte comme de grands bassins industriels des hauts plateaux, notamment les zones industrielles de Setif, El- Eulma, M'sila et Borj Bou Arréridj, qui connaissent un dynamisme sans pareil. Il s'étend également sur la région de la Soummam, traditionnellement dynamique en commerce et en industrie dans ses zones industrielles d'Akbou, d'EL Kseur, et de Béjaïa.

I.9.3 Constitutions du port de Bejaia

Le Port de Bejaia est accessible par un chenal extérieur large de 320 m et draguée à 13,50 m. Le port est composé de trois bassins (figure I.5) :

Bassin de l'Avant-Port : sa superficie est de 75 hectares et ses profondeurs varient entre 10,5 m et 13,5 m. Disposant d'installations spécialisées, l'avant-port est destiné à traiter les navires pétroliers.

Bassin du Vieux Port : sa superficie est de 26 hectares et ses profondeurs de quai varient entre 6 et 8 m.

Bassin de l'Arrière Port : Sa superficie est de 55 hectares et ses profondeurs varient entre 10,5 m et 12 m.

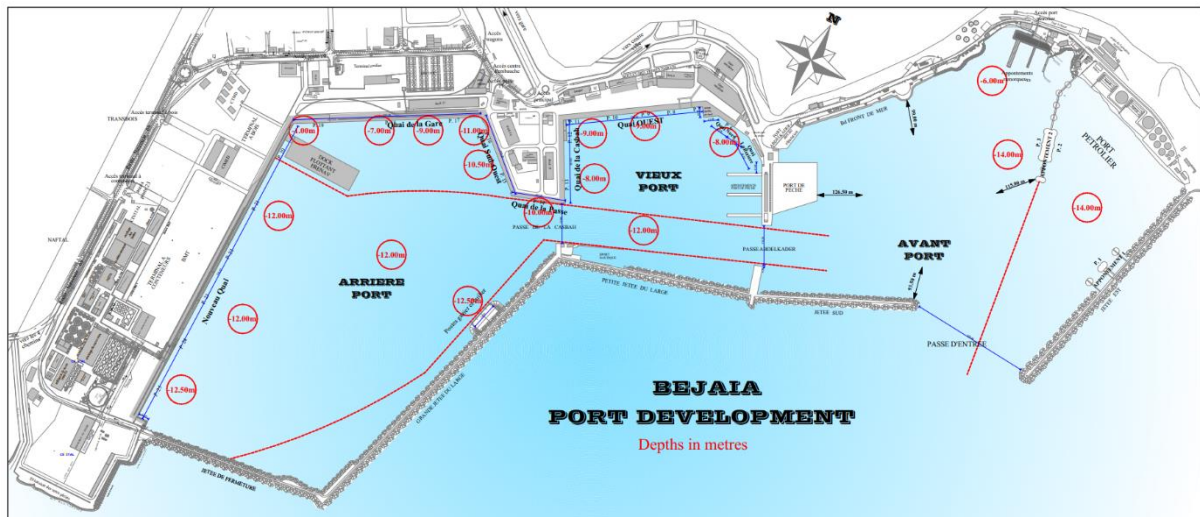


Figure I.5: Vue aérienne par satellite donnant le plan de port de Bejaia.

Les navires de marchandises générales accèdent aux bassins du vieux port et de l'arrière port par le biais de deux passes, respectivement : la passe Abdelkader, large de 110 m et draguée à 12 m et la passe de la Casbah (entre le vieux port et l'arrière port), large de 125 m et draguée à 12 m. Le port s'étale sur une superficie totale de 79 hectares. Sa surface d'entreposage s'étale sur 422,000 m² dont 17,500 m² couverts. Il dispose de plus de 3.000 m² de quai, dont 16 postes à quai pour navires de marchandises générales, 03 postes à quai pour navires pétroliers, un poste RO/RO et 01 poste gazier.

I.10 Plan d'échantillonnage

Le plan d'échantillonnage consiste à déterminer l'emplacement des points de prélèvement des sédiments ou points d'échantillonnage, destinés afin d'avoir des échantillons représentatifs pour fins d'analyses. Ces points de prélèvement sont couramment appelés stations.

I.10.1 Maillage des prélèvements

Le maillage et la fréquence des prélèvements doivent répondre à un compromis entre acquisition de connaissances satisfaisantes des matériaux et contraintes financière et logistique raisonnable [138]. Trois types fondamentaux d'échantillonnage peuvent être utilisés selon les circonstances :

I.10.1.1 Plan d'échantillonnage déterministe ou ciblé

Le plan d'échantillonnage est déterminé par l'opérateur lorsqu'il dispose d'informations suffisantes pour justifier l'emplacement des stations. L'emplacement des stations est choisi en fonction de critères de sélection comme :

- Un type de sédiment particulier (secteur de forte sédimentation de matériaux fins)
- La proximité d'un rejet connu ou d'une source de contamination potentielle

Le plan déterministe vise souvent l'évaluation des secteurs plus contaminés et dans ce contexte, l'information recueillie est généralement insuffisante pour caractériser l'ensemble de la zone qui fera l'objet d'un dragage. Ce type de plan d'échantillonnage n'est également pas adapté à l'inférence statistique qui consiste à attribuer à toute la zone, les propriétés trouvées dans les échantillons prélevés[139].

I.10.1.2 Plan d'échantillonnage aléatoire

L'emplacement des stations est déterminé au hasard ce qui permet l'application de statistiques pour le traitement des données. Ce plan n'est pas recommandé car les techniques aléatoires pour déterminer la position des stations conduisent presque inévitablement à une distribution non uniforme des stations sur l'ensemble du site. En conséquence, certains secteurs peuvent être sur échantillonnés quand d'autres sont à l'inverse sous-échantillonnés. Le plan d'échantillonnage aléatoire peut cependant être optimisé en découpant la zone d'étude en sous-

zones homogènes et en répartissant les stations d'échantillonnage de manière aléatoire, à l'intérieur de ces sous-unités. On s'assure ainsi d'avoir un certain nombre de stations dans chacune des sous-zones homogènes et de caractériser l'ensemble du gradient de contamination dans la zone d'étude [139].

I.10.1.3 Plan d'échantillonnage systématique

Les stations d'échantillonnage sont réparties de manière régulière et équidistantes généralement à partir d'une grille à maille carrée ou rectangulaire qui est orientée selon un axe donné correspondant aux caractéristiques géomorphologiques ou hydrodynamiques du site :

- Gradient bathymétrique ou sédimentologique,
- Direction d'un courant dominant.

Ce type de plan d'échantillonnage présente l'avantage de couvrir toute la superficie intéressée, par contre l'effort d'échantillonnage est le même partout de sorte que l'information fournie par les stations dans certains secteurs homogènes est rapidement redondante. Cela conduit le plus souvent à un effort d'échantillonnage inutile. Le plan d'échantillonnage peut toutefois être optimisé en divisant la zone d'étude en unités homogènes selon les caractéristiques supposées ou connues des sédiments. On applique ensuite un pas d'échantillonnage variable en s'assurant d'un pas plus serré dans les secteurs concentrant les matériaux fins et donc susceptibles d'être plus contaminés [139].

I.10.2 Typologie de dragage et nombre d'échantillon

Le degré de confinement de la zone ainsi que son taux de fréquentation influent sur le plan d'échantillonnage à réaliser.

I.10.2.1 Zones à échanges libres

Elles sont caractérisées par des échanges importants de masses d'eau dus à de forts courants et/ou à une agitation importante du plan d'eau (houle). Le nombre d'échantillons à prélever et à analyser est fonction du volume à draguer (Tableau I.5).

Tableau I.5: Nombre de stations à prélever et d'échantillons à analyser en fonction du volume à draguer en zone à échanges libres [140].

Volumes dragués en place (m ³)	Nombre de stations à prélever	Nombre d'échantillons à analyser (matériaux hétérogènes)	Nombre d'échantillons à analyser (matériaux homogènes)
< 25 000 m ³	3	3	1
25 000 - 100 000 m ³	4-6	4-6	2-3
100 000 – 500 000 m ³	7-15	7-15	3-5
500 000 – 2 000 000 m ³	16-30	16-30	6-10
≥ 2 000 000 m ³	+ 10 / million de m ³ supplémentaire	+ 10 / million de m ³ supplémentaire	+ 4 / million de m ³ supplémentaire

I.10.2.2 Zones confinées (bassin portuaire)

Elles sont caractérisées par un faible renouvellement des masses d'eau, le nombre d'échantillons est fonction du volume à draguer (Tableau I.6).

Tableau I.6 : Nombre d'échantillons à analyser en fonction du volume à draguer en zone confinée [140].

Volume à draguer	Nombre d'échantillons à analyser
< 5 000 m ³	1
5 000 – 25 000 m ³	1 par 5000 m ³
25 000 – 100 000 m ³	5 plus 1 par 25 000 m ³
>100 000 m ³	8 plus 1 par 50 000 m ³

I.10.2.3 Ports de plaisance

Le nombre d'échantillons à analyser doit tenir compte soit du volume à draguer (Tableau I.6), soit de la capacité d'accueil du port (Tableau I.7), en retenant le critère le plus contraignant des deux.

Tableau I.7: Nombre d'échantillons à analyser en fonction de la capacité d'accueil du port [140].

Capacité d'accueil	Nombre d'échantillons à analyser
< 100 bateaux	1
100 – 500 bateaux	2
500 – 1 000 bateaux	3
500 – 1 000 bateaux	4
>1 000 m ³	5

I.10.3 Moyens de prélèvement

Les moyens nautiques (bateau équipé d'un treuil et d'une potence de levage) doivent être adaptés aux conditions météorologiques (stabilité du navire pour permettre des prélèvements précis en toute sécurité pour le personnel à bord). Le matériel de prélèvement doit être adapté au type de sédiment à prélever variant selon la granulométrie concernée et la profondeur d'échantillonnage : couches superficielles de 0 à 20 cm ou plus profondes (20 cm à plusieurs mètres). On peut distinguer en conséquence les prélèvements du sédiment superficiel et des couches plus profondes par carottage [1].

I.10.3.1 Prélèvement de sédiments superficiels

Le prélèvement des sédiments superficiels peut se faire moyennant :

a. Les bennes de type Eckman

C'est une sorte de carottier-boîte adapté au prélèvement des sédiments cohésifs (vases, vases sableuses). La boîte de section carrée (15 cm à 20 cm de côté, 20 cm à 40 cm de hauteur), fermée sur le dessus par deux couvercles, peut pénétrer assez profondément dans le sédiment meuble. Les deux mâchoires qui constituent le fond se referment sous la tension des ressorts libérés par un messenger. L'accès au sédiment se fait aisément par le dessus. Certains modèles sont modifiés pour pouvoir découper le sédiment en tranches horizontales (Eckman-Lenz). D'un poids de 5 à 8 kg, ces bennes peuvent être alourdies par des lests plats, fixés sur les côtés, mais ne conviennent de toute façon qu'à des sédiments vaseux. La benne Eckman est recommandée dans les zones où la profondeur n'excède pas 3 m.

b. Les bennes Shipeck

Il convient aux prélèvements de sédiments non cohésifs (sableux à graveleux). Elle comporte un godet semi-cylindrique d'axe horizontal qui pivote sous la tension de deux puissants ressorts axiaux ; le déclenchement se fait lorsque la benne se pose sur le fond. Les bords du godet doivent être suffisamment coupants pour pénétrer dans le sédiment. Pesant environ 60 kg, cette benne nécessite l'utilisation d'un treuil mécanique. Ce type de benne perturbe fortement l'échantillon (stratification du sédiment non conservée) et sa manipulation nécessite des précautions du fait de son poids et de la puissance des ressorts.

c. Les bennes Van Veen

Il est approprié dans les sédiments vaseux peu profonds et permet des prélèvements sur 10 à 30 cm d'épaisseurs selon sa taille. Au contact du fond, un loquet se désengage et libère les mâchoires qui se referment par rapprochement des bras de leviers. Il convient de signaler que l'onde de choc à la descente peut perturber les sédiments fins (crème de vase) et qu'à la fermeture, le prélèvement déstructure les horizons de dépôt des sédiments. Les teneurs en eau du sédiment prélevé restent proches des matériaux en place [1].

I.10.3.2 Prélèvement profond (carottage)

a. Carottier à main

L'enfoncé (à la main, à l'aide d'une poignée ou à masse, pour un carottier métallique) plus ou moins rapidement dans le sédiment, permettant ainsi de limiter le tassement. Par contre cet outil doit être mis en œuvre par des plongeurs expérimentés et son utilisation est limitée par la profondeur, la turbidité de l'eau et les courants. Dans des sédiments non cohésifs, il est limité à la prise de carottes ne dépassant pas 50 cm de hauteur.

b. Carottier-tube de type Kullenberg

Le carottier-tube est un long tube métallique qui s'enfonce par gravité dans le sédiment. Il est constitué intérieurement d'une chemise amovible qui contiendra la carotte de sédiment, et d'un système d'obturation dans la partie inférieure [1].

I.10.3.3 Conditions d'échantillonnage

L'échantillonnage annuel doit être réalisé en fin d'été, à la fin de l'été (août-septembre) pour les cours d'eau à régime pluvial ou à la fin de l'hiver (février-mars) pour les cours d'eau à régime nival. Cela permet de maximiser les chances d'obtenir des sédiments fins. Il est recommandé de :

- S'assurer qu'il y ait bien un écoulement normal : il sera demandé de ne pas procéder à l'échantillonnage lorsque augmentation du débit, à partir de vitesse de l'ordre de 50 cm/s
- Pour des raisons de sécurité : les risques de contamination des échantillons par le préleveur et du préleveur par le milieu sont ainsi réduits. Chaque opération de terrain doit être assurée, entre le lever et le coucher du soleil, cette disposition permet également d'assurer une bonne qualité des opérations. [141].

I.10.3.4 Echantillonnage qualitatif

Le mélange des échantillons élémentaires sera fait à volumes ou à poids identiques. Ces deux manières de procéder présentent des avantages et des inconvénients :

a. Le mélange par volumes identiques

Il est pratiqué en mer sur de petites embarcations et ne nécessite pas d'appareil de pesés. Le cas le plus simple pour lequel ce type de mélange peut être effectué sans problème est celui où les prélèvements sont effectués par carottage et avec des carottes de même diamètre. Dans ce cas, l'échantillon moyen sera fait avec des volumes déterminés par la longueur de carotte. Par contre, les prélèvements à l'aide d'une benne ne permettent pas ce type de mélange car il est impossible de déterminer avec exactitude que les volumes prélevés soient identiques ;

b. Le mélange à poids identiques

Ce type de mélange est assurément le moyen le plus efficace. Pour obtenir un échantillon moyen représentatif. Dans ce type de mélange, l'analyste mélange un poids identique de chacun des échantillons élémentaires. Plus le poids de chaque échantillon élémentaire est important, plus l'échantillon moyen sera représentatif. Les poids mélangés sont généralement compris entre 200 g et 300 g de chaque échantillon élémentaire.

Lorsque les échantillons élémentaires ont été mis ensemble, la présence d'éléments grossiers, minéraux de tailles supérieures à 2 mm, coquillages, algues et phanérogame, peut être un facteur limitant l'homogénéisation d'échantillon. Le volume ou le poids des échantillons élémentaires mélangés doit être suffisante pour avoir disposé de suffisamment de matériaux de taille inférieure à 2 mm pour les analyses ultérieures. L'homogénéisation du mélange peut être faite à l'aide d'appareillages (malaxeur électrique ou manuel) [139].

L'échantillon est séché suivant les pratiques du laboratoire, les normes analytiques en vigueur et les composés analysés : séchage à l'étuve à 40°C [142]. Le broyage de l'échantillon est ensuite réalisé. Cette étape doit être effectuée avec un outil non contaminant vis à vis des polluants analysés.

I.11 Volume de dragage lors de l'entretien du port de Béjaia

Le projet consiste en la réalisation des travaux de dragage des trois (03) bassins et ce conformément aux résultats obtenus par le laboratoire (L.E.M) sur le volume des apports en matériaux (envasement ou retour de sédiments) enregistrés durant la période comprise entre 2005 (réalisation du dragage) et 2011 (levé bathymétrique).

Le dragage des bassins, jusqu'à la cote nominale comprise entre -12,00 et -1300 m, conduit à des rejets de matériaux déposés dans la zone d'immersion (Fosse de Béjaia). La fosse de Bejaia se situe à l'est du port de Béjaia à une distance de 05 Km. Elle est caractérisée par des profondeurs allant de 50 à 70 mètres. Les coordonnées géographiques de la tête de la fosse sont

- 36° 44' 25 '' latitude Nord
- 5° 09' 25'' longitude Est

Le volume d'envasement des trois bassins depuis 2005 est environ $V = 800\,000\text{ m}^3$. Soit une perte d'une moyenne de 1,2 mètre de tirant d'eau (tableau I.8).

Tableau I.8: Tableau récapitulatif des taux d'envasement du port de Bejaia (EPB)

Zone de dragage	Cote nominale	Volume D'envasement	Surface totale de la zone à draguer (m²)	Taux d'envasement de la zone à draguer (m)
Passe d'entrée	- 12.00	56 517,33	75 793,30	0,75
Chenal d'accès	- 12.00	52 680,33	55 038,80	0,96
Arrière port	- 12.00	338 385,33	190 111,90	1,78
Quai de la gare et sud-ouest	- 10.50	150 523,33	80 112,30	1,88
Vieux port	- 8.50	84 437,33	128 939,40	0,65
Appontement Pétrolier	- 13.50	117 456,33	176 720,40	0,66
Total		800 000, 00	706 716,10	

I.12 Site de prélèvement des sédiments du port de Bejaia

Le prélèvement des échantillons de sédiments du port de Béjaia a nécessité le dragage des différents quais à l'aide d'une drague à benne. Le projet de dragage a été entamé en 2016 et 2017, le volume total des sédiments à draguer sur l'ensemble des bassins a été estimé à 130.000 m³. La solution la plus judicieuse était en ce temps le relargage au fond des mers.

Ce travail de recherche porte sur l'étude de trois différents sédiments du port de Bejaia, le première prélèvement est effectué sur le côté du port commercial où les marchandises sont stockés (nommé P1) ; le deuxième prélèvement est effectué dans la zone nommée Bougie plage où différents rejets industriels (Cevital, SONATRACH, COGB, ALCOST) sont déversés à travers les égouts (nommé P2) ; le troisième prélèvement est du côté du port pétrolier où les navires pétroliers stationnent pour remplir les réservoirs (bassins) de pétrole. Malheureusement, le sédiment nommé P3 n'est pas prélevé, vu la non disponibilité de la matière. Les figures I.6, I.7 et I.8 illustrent les lieux des différentes zones de dragage des trois groupes d'échantillons (P1, P2 et P3).

Les points de prélèvement ont été choisis de façon à recueillir un sédiment contenant des concentrations importantes en polluants 'organiques et inorganiques). Les prélèvements ont été réalisés en janvier 2016 sur le point 1 et 2 à l'aide d'une pelle et les échantillons (environ 100 kg) ont été stockés dans des bidons en plastiques puis conservés à 4°C.



Figure I.6: Zone de Dragage du coté de port de marchandise (Point 1).



Figure I.7: Zone de Dragage du coté de port Bougie plage (point 2).



Figure I.8: Zone de Dragage Marine du côté du port pétrolier (Brise de mer)(point 3).

I.13 Conclusion

Dans la 1^{ère} partie de ce chapitre, un état des connaissances sur la problématique de dragage des sédiments et ses composants, principalement les polluants et les moyens de dragage ont été recensés. Les données de solutions classiques (rejet en mer et mise en dépôts terrestres) et innovantes (traitement et valorisation) de leur gestion ont été présentés. La problématique émane de la nécessité de draguer des grands volumes de sédiments généralement pollués. La gestion des matériaux de dragage, considérés comme des déchets, se base sur des conventions internationales et des critères réglementaires nationaux. Ces textes réglementaires ont été présentés et commentés. Une synthèse des principaux procédés de traitement et des exemples d'études de valorisation des sédiments dans des matériaux de construction et des matériaux routiers est donnée dans ce chapitre. La 2^{ème} partie de ce chapitre a été consacrée à faire le point sur les travaux déjà réalisés dans le cadre du traitement et la valorisation de sédiments de dragage dans le domaine du génie civil. La présentation du port de Bejaia, a été réalisé dans ce chapitre et ce dans le but de mettre le point sur les principaux points d'échantillonnage des matériaux à étudier dans cette thèse.

Références bibliographiques

- [1] Alzieu, C. (1999). Dragages et environnement marin : état des connaissances=Dredging and marine environment : state of the art.
- [2] Schneider, A. R., Stapleton, H. M., Cornwell, J., Baker, J. E. (2001). Recent declines in PAH, PCB, and toxaphene levels in the northern Great Lakes as determined from high resolution sediment cores. *Environmental science & technology*, 35(19), 3809-3815.
- [3] Lesven, L., Gao, Y., Billon, G., Leermakers, M., Ouddane, B., Fischer, J. C., Baeyens, W. (2008). Early diagenetic processes aspects controlling the mobility of dissolved trace metals in three riverine sediment columns. *Science of the total environment*, 407(1), 447-459.
- [4] Van der Oost, R., Beyer, J., Vermeulen, N. P. (2003). Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental riskassessment: areview. *Environmental toxicology and pharmacology*, 13(2), 57-149.
- [5] Pernet-Coudrier, B. (2008). Influence de la matière organique dissoute sur la spéciation et la biodisponibilité des métaux: cas de la Seine, un milieu sous forte pression urbaine (Doctoral dissertation).
- [6] Caille, N., Tiffreau, C., Leyval, C., Morel, J. L. (2003). Solubility of metals in an anoxic sediment during prolonged aeration. *Science of the Total Environment*, 301(1-3), 239-250.
- [7] Yarlagadda, P. S., Matsumoto, M. R., Van Benschoten, J. E., Kathuria, A. (1995). Characteristics of heavy metals in contaminated soils. *Journal of environmental engineering*, 121(4), 276-286.
- [8] Fisher, J. A., Scarlett, M. J., Stott, A. D. (1997). Accelerated solvent extraction: an evaluation for screening of soils for selected US EPA semi volatile organic priority pollutants. *Environmental science & technology*, 31(4), 1120-1127.
- [9] Babut, M., Miege, C., Villeneuve, B., Abarnou, A., Duchemin, J., Marchand, P., & Narbonne, J. F.(2009). Correlations between dioxin-like and indicators PCBs: potential consequences for environmental studies involving fish or sediment. *Environmental Pollution*, 157(12), 3451-3456.

- [10] Bubb, J. M., Lester, J. N. (1991). The impact of heavy metals on lowland rivers and the implications for man and the environment. *Science of the total environment*, 100, 207-233.
- [11] Villada, H. S., Acosta, H. A., Velasco, R. J. (2008). Investigación de almidones termoplásticos, precursores de productos biodegradables. *Información tecnológica*, 19(2), 3-14.
- [12] Bontidean, I., Ahlqvist, J., Mulchandani, A., Chen, W., Bae, W., Mehra, R. K., ... & Csöregi, E. (2003). Novel synthetic phytochelatin-based capacitive biosensor for heavy metal ion detection. *Biosensors and Bioelectronics*, 18(5-6), 547-553.
- [13] Yan, J., Wang, L., Fu, P. P., Yu, H. (2004). Photomutagenicity of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons from the US EPA priority pollutant list. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 557(1), 99-108.
- [14] Bonnard, M. B. (2010). Relations " biodisponibilité-génotoxicité-écotoxicité" des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans les sols de friches industrielles (Doctoral dissertation, Université Paul Verlaine-Metz).
- [15] PERRODIN, Y. (2004). Etude de la mobilité des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) contenus dans un sol industriel pollué (Doctoral dissertation, INSA de LYON).
- [16] Brusseau, M. L., Jessup, R. E., Rao, P. S. C. (1989). Modeling the transport of solutes influenced by multiprocess nonequilibrium. *Water Resources Research*, 25(9), 1971-1988.
- [17] AFNOR, N. X31-210 (1992) Déchets: essais de lixiviation. Association Française de Normalisation.
- [18] Subcommittee, A. S. T. M. D34. 02. Physical and Chemical Characterization, "Standard test method for sequential batch extraction of waste with water D, 4793.
- [19] NORMALIZATION, N. (1995). NEN 7343: Leaching characteristics of solid earth and stony building and waste materials. Leaching tests. Determination of the leaching of inorganic components from granular materials with the column test. Netherlands.
- [20] Tessier, A., Campbell, P. G., Bisson, M. J. A. C. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical chemistry*, 51(7), 844-851.

[21] Raksasataya, M., Langdon, A. G., Kim, N. D. (1996). Assessment of the extent of lead redistribution using sequential extraction by two different methods. *Analytica Chimica Acta*, 332(1), 1-14.

[22] Berra, M., Ippolito, N. M., Mangialardi, T., Paolini, A. E., Piga, L. (2019). Leaching test procedure for assessing the compliance of the chemical and environmental requirements of hardened woody biomass fly ash cement mixtures. *Waste Management*, 90, 10-16.

[23] Guyonnet, D., Bodéan, F., Brons-Laot, G., Burnol, A., Chateau, L., Crest, M., Piantone, P. (2006). Lixiviation multi-échelles de cendres d'incinération d'ordures ménagères. *Déchets sciences & techniques*, (43), 10-20.

[24] ENVIR, N. (1995). 002. Solid waste, granular inorganic material: column test. Espoo (Finland): Nord test.

[25] Grathwohl, P., Susset, B. (2009). Comparison of percolation to batch and sequential leaching tests: theory and data. *Waste Management*, 29(10), 2681-2688.

[26] Mulligan, C. N., Yong, R. N., Gibbs, B. F. (2001). Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Engineering geology*, 60(1-4), 193-207.

[27] Kribi, S. (2005). Décomposition des matières organiques et stabilisation des métaux lourds dans les sédiments de dragage. Thèse de doctorat, Ecole des Mines d'Albi.

[28] Abriak, N. E., Wang, D., Zentar, R. (2013). Estimation des propriétés mécaniques à long terme des sédiments de Dunkerque traités à la chaux ou au ciment. *Revue Française de Géotechnique*, (142), 39-47.

[29] Bel Hadj Ali, I. (2013). Contribution à l'étude des sédiments marins tunisiens: cas des ports de Radès et de Gabès (Doctoral dissertation, Ecole centrale de Lille).

[30] Peng, J. F., Song, Y. H., Yuan, P., Cui, X. Y., Qiu, G. L. (2009). The remediation of heavy metals contaminated sediment. *Journal of hazardous materials*, 161(2-3), 633-640.

[31] Murphy, T. P., Lawson, A., Kumagai, M., Babin, J. (1999). Review of emerging issues in sediment treatment. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2(4), 41

[32] Zhibo, D. U. A. N., Lafhaj, Z., Ducellier, S. (2013). Valorisation des sédiments fluviaux traités en vue d'une utilisation en génie civil. *Revue Paralia*, 6, 5-1.

[33] Lafhaj, Z., Samara, M., Agostini, F., Boucard, L., Skoczylas, F., Depelsenaire, G. (2008). Polluted river sediments from the North region of France: Treatment with Novosol® process and valorization in clay bricks. *Construction and Building Materials*, 22(5), 755-762.

[34] Scordia, P. Y., Lafhaj, Z., Skoczylas, F., Mongeois, F. (2008). Caractérisation et valorization en technique routière de sédiments fluviaux pollués et traités. *European journal of environmental and civil engineering*, 12(9-10), 1087-1104.

[35] Conner, J. R. (1990). Chemical fixation and solidification of hazardous wastes (p. 692). New York: Van Nostrand Reinhold.

[36] Boutouil, M., Levacher, D. (2000). Traitement et valorisation des vases de dragages par solidification/stabilisation: état de l'art. VIèmes Journées Nationales Génie Civil–Génie Côtier, Caen, France, 367-375.

[37] Opfer, S. E., Farver, J. R., Miner, J. G., Krieger, K. (2011). Heavy metals in sediments and uptake by burrowing mayflies in western Lake Erie basin. *Journal of Great Lakes Research*, 37(1), 1-8.

[38] Virkutyte, J., Sillanpää, M., Latostenmaa, P. (2002). Electrokinetic Soil Remediation—critical overview. *Science of the Total Environment*, 289(1-3), 97-121.

[39] Reddy, K. R., Urbanek, A., Khodadoust, A. P. (2006). Electroosmotic Dewatering of dredged sediments: Bench-scale investigation. *Journal of Environmental Management*, 78(2), 200-208.

[40] Meegoda, J. N., Perera, R. (2001). Ultrasound to decontaminate heavy metals in dredged sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 85(1-2), 73-89.

[41] Karius, V., Hamer, K. (2001). pH and grain-size variation in leaching tests with bricks made of harbour sediments compared to commercial bricks. *Science of the total environment*, 278(1-3), 73-85.

[42] De Orte, M. R., Lombardi, A. T., Sarmiento, A. M., Basallote, M. D., Rodriguez-Romero, A., Riba, I., & Del Valls, A. (2014). Metal mobility and toxicity to microalgae

associated with acidification of sediments: CO₂ and acid comparison. *Marine environmental research*, 96, 136-144.

[43] Marouf, H. Valorisation des sédiments issus du Barrage de Bouhanifia et du Port d'Oran (Doctoral dissertation, Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis).

[44] EN, N. 12457-2. Caractérisation des déchets–Lixiviation 6 Essai de conformité pour la lixiviation des déchets fragmentés et des boues–Partie 2: essai en bâchée unique avec un rapport liquide-solide de 10 L/Kg et une granularité inférieure à 4 mm. Characterization of waste–Leaching–Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges–Part, 2.

[45] Bodart, A. (2016). La protection intégrée des eaux souterraines en droit de l'Union Européenne (Doctoral dissertation, Rennes 1).

[46] Ghrici, Mr, Kenai, S., Said-Mansour, Mr. Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 2007, vol. 29, no 7, p. 542-549.

[47] Al-obaidey, S. J. (2021). The Synergic Effects of Mineral Admixtures in Ternary Blended Cement: A Review. *Journal of Engineering*, 27(2), 83-105.

[48] Benkaddour, M., Aoual, F. K., Semcha, A. (2009). Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle. *Nature & Technology*, (1), 63.

[49] Dang, T. A., Kamali-Bernard, S., Prince, W. A. (2013). Design of new blended cement based on marine dredged sediment. *Construction and Building Materials*, 41, 602-611.

[50] Gastaldini, A. L. G., Hengen, M. F., Gastaldini, M. C. C., Do Amaral, F. D., Antolini, M. B., Coletto, T. (2015). The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. *Construction and building materials*, 94, 513-520.

[51] Ambroise, J., Murat, M., Pera, J. (1985). Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals V. Extension of the research and general conclusions. *Cement and Concrete Research*, 15(2), 261-268.

[52] Schackow, A., Stringari, D., Senff, L., Correia, S. L., Segadães, A. M. (2015). Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars. *Cement and concrete composites*, 62, 82-89.

[53] Benzerzour, M., Amar, M., Abriak, N. E. (2017). New experimental approach of the reuse of dredged sediments in a cement matrix by physical and heat treatment. *Construction and Building Materials*, 140, 432-444.

[54] Amar, M., Benzerzour, M., Safhi, A. E. M., Abriak, N. E. (2018). Durability of a cementitious matrix based on treated sediments. *Case studies in construction materials*, 8, 258-276.

[55] el Mahdi Safhi, A., Benzerzour, M., Rivard, P., Abriak, NE et Ennahal, I. (2019). Développement de mortiers auto-compactants à base de sédiments marins traités. *Journal of Building Engineering*, 22 , 252-261.

[56] Rozière, E., Samara, M., Loukili, A., Damidot, D. (2015). Valorisation of sediments in self-consolidating concrete: Mix-design and microstructure. *Construction and Building Materials*, 81, 1-10.

[57] Delaldja, D. (2018). Valorisation des déchets industriels dans la formulation des mortiers soumis à des températures élevées (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'sila).

[58] Lamis Rabiaa, C. H. A. D. I. (2017). Etude de l'influence d'un adjuvant entraîneur d'air sur la rhéologie des mortiers (Doctoral dissertation, UNIVERSITE Mohamed Boudiaf-M'SILA).

[59] Fouzia, H., Imane, K. (2019). L'utilisation de la brique recyclée et de la céramique dans la formulation des mortiers (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).

[60] Zhao, Z. (2014). Valorisation des sables de béton recyclé pour la fabrication de mortiers (Doctoral dissertation, Lille 1).

[61] Gineys, N. (2011). Influence de la teneur en éléments métalliques du clinker sur les propriétés techniques et environnementales du ciment Portland—thèse. Université Lille Nord de France.

[62] Mosbahi, M., Khlifi, M., Jamoussi, F., Tlili, A. (2017). Valorization of Coniacian-middle Campanian clay minerals of the Meknassy- Mezzouna region (center western Tunisia) in the clinker manufacturing. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(16), 349.

[63] Zeghichi, L., Lahmadi, A., Benghazi, Z. (2012). Contribution à l'étude des caractéristiques du sable de dune et de son effet sur le comportement des bétons autoplaçants.

[64] Benard, P. (2005). Etude de l'action des phosphates présents dans l'eau de gâchage sur l'hydratation d'un ciment Portland (Doctoral dissertation, Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne).

[65] Messaoudene, I., Molez, L., Rangeard, D., Jauberthie, R., Naceri, A. (2012). Mortiers à base de sable pliocène et de ciments aux ajouts: fillers de déchets industriels et cendres volcaniques. *Matériaux & Techniques*, 100(5), 377-386.

[66] Mesbah, H. A., Buyle-bodin, F., Siwak, J. M. (1996). Influence de l'ajout des fibres sur le retrait des mortiers à base de granulats recyclés. In 2e colloque international francophone sur les bétons renforcés de fibres métalliques (Toulouse, 4-5 juillet 1996) (pp. 163-172).

[67] Siad, H. (2005). Comportements physico-mécaniques des mortiers et briques à base de liant (pouzzolane-chaux).

[68] Tansengco, M., Tejano, J., Coronado, F., Gacho, C., Barcelo, J. (2018). Heavy metal tolerance and removal capacity of *Trichoderma* Species Isolated From mine tailings in Itogon, Benguet. *Environment and Natural Resources Journal*, 16(1), 39-57.

[69] Slimanou, H., Bouguermouh, K., Bouzidi, N. (2019). Synthesis of geopolymers based on dredged sediment in calcined and uncalcined states. *Materials Letters*, 251, 188-191.

[70] Topçu, İ. B., Işıkdag, B. (2007). Manufacture of high heat conductivity resistant clay bricks containing perlite. *Building and Environment*, 42(10), 3540-3546.

[71] Ercikdi, B., Külekci, G., Yılmaz, T. (2015). Utilization of granulated marble wastes and waste bricks as mineralad mixture in cemented paste backfill of sulphide-rich tailings. *Construction and Building Materials*, 93, 573-583.

[72] Al-Fakih, A., Mohammed, B. S., Liew, M. S., Nikbakht, E. (2019). Incorporation of waste materials in the manufacture of masonry bricks: An update review. *Journal of Building Engineering*, 21, 37-54.

[73] Sutcu, M., Alptekin, H., Erdogmus, E., Er, Y., Gencel, O. (2015). Characteristics of fired clay bricks with waste marble powder addition as building materials. *Construction and Building Materials*, 82, 1-8.

[74] Coletti, C., Maritan, L., Cultrone, G., Dalconi, M. C., Hein, A., Molina, E., Mazzoli, C. (2018). Recycling trachyte waste from the quarry to the brick industry: Effects on physical and mechanical properties, and durability of new bricks. *Construction and Building Materials*, 166, 792-807.

[75] Leiva, C., Arenas, C., Alonso-Fariñas, B., Vilches, L. F., Peceño, B., Rodriguez-Galán, M., Baena, F. (2016). Characteristics of fired bricks with co-combustion flyashes. *Journal of Building Engineering*, 5, 114-118.

[76] Eliche-Quesada, D., Sandalio-Pérez, J. A., Martínez-Martínez, S., Pérez-Villarejo, L., Sánchez-Soto, P. J. (2018). Investigation of use of coal fly ash in eco- friendly construction materials: fired clay bricks and silica-calcareous non fired bricks. *Ceramics International*, 44(4), 4400-4412.

[77] Abbas, S., Saleem, M. A., Kazmi, S. M., Munir, M. J. (2017). Production of Sustainable Clay Bricks Using Waste Fly Ash: mechanical and durability properties. *Journal of Building Engineering*, 14, 7-14.

[78] Cusidó, J. A., Cremades, L. V. (2012). Environmental effects of using clay bricks produced with sewage sludge: Leachability and toxicity studies. *Waste management*, 32(6), 1202-1208.

[79] Manca, P. P., Orru, G., Desogus, P. (2015). Recycling of sludge from ornamental stone processing as resource in civil constructions. *International journal of mining, Reclamation and environment*, 29(2), 141-155.

[80] Coletti, C., Maritan, L., Cultrone, G., Mazzoli, C. (2016). Use of industrial ceramic sludge in brick production: Effect on aesthetic quality and physical properties. *Construction and Building Materials*, 124, 219-227.

[81] Demir, I., Baspınar, M. S., Orhan, M. (2005). Utilization of kraft pulp production residues in clay brick production. *Building and environment*, 40(11), 1533-1537.

[82] Sutcu, M., Akkurt, S. (2009). The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity. *Ceramics international*, 35(7), 2625-2631.

- [83] Rajput, D., Bhagade, S. S., Raut, S. P., Ralegaonkar, R. V., Mandavgane, S. A. (2012). Reuse of cotton and recycle papermill waste as building material. *Construction and Building Materials*, 34, 470-475.
- [84] Chiang, K. Y., Chou, P. H., Hua, C. R., Chien, K. L., Cheeseman, C. (2009). Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and ricehusks. *Journal of hazardous materials*, 171(1-3), 76-82.
- [85] Velasco, P. M., Ortiz, M. P. M., Giró, M. A. M., Melia, D. M., Rehbein, J. H. (2015). Development of sustainable fired clay bricks by adding kindling from vine shoot: Study of thermal and mechanical properties. *Applied Clay Science*, 107, 156-164.
- [86] Taurino, R., Ferretti, D., Cattani, L., Bozzoli, F., Bondioli, F. (2019). Light weight clay bricks manufactured by using locally available wine industry waste. *Journal of Building Engineering*, 26, 100892.
- [87] Eliche-Quesada, D., Corpas-Iglesias, F. A., Pérez-Villarejo, L., Iglesias-Godino, F. J. (2012). Recycling of sawdust, spent earth from oil filtration, compost and marble residues for brick manufacturing. *Construction and Building Materials*, 34, 275-284.
- [88] Barbieri, L., Andreola, F., Lancellotti, I., Taurino, R. (2013). Management of agricultural biomass wastes: Preliminary study on characterization and valorisation in clay matrix bricks. *Waste Management*, 33(11), 2307-2315.
- [89] Nkayem, D. N., Mbey, J. A., Dikko, B. K., Njopwouo, D. (2016). Preliminary study on the use of corn cob as pore forming agent in light weight clay bricks: physical and mechanical features. *Journal of Building Engineering*, 5, 254-259.
- [90] Eliche-Quesada, D., Martínez-Martínez, S., Pérez-Villarejo, L., Iglesias-Godino, F. J., Martínez-García, C., Corpas-Iglesias, F. A. (2012). Valorization of biodiesel production residues in making porous clay brick. *Fuel processing technology*, 103, 166-173.
- [91] Ortiz, O., Castells, F., Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and building materials*, 23(1), 28-39.
- [92] Koroneos, C., Dompros, A. (2007). Environmental assessment of brick production in Greece. *Building and Environment*, 42(5), 2114-2123.

- [93] Mora, E. P. (2007). Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials. *Building and Environment*, 42(3), 1329-1334.
- [94] Asiedu, Y., Gu, P. (1998). Product life cycle cost analysis: state of the art review. *International journal of production research*, 36(4), 883-908.
- [95] Karpiński, B., Szkodo, M. (2015). Clay minerals—mineralogy and phenomenon of clays welling in oil & gas industry. *Advances in Materials Science*, 15(1), 37-55.
- [96] Weaver, C. E. (1989). Chapter VI "Authigenic Marine" Physils: Developments in Sedimentology. *Clays, Muds, and Shales*, CE Weaver, 44, 345-414.
- [97] Moropoulou, A., Bakolas, A., Aggelakopoulou, E. (2001). The effects of limestone characteristics and calcination temperature to the reactivity of the quicklime. *Cement and Concrete Research*, 31(4), 633-639.
- [98] Elert, K., Cultrone, G., Navarro, C. R., Pardo, E. S. (2003). Durability of bricks used in the conservation of historic buildings—influence of composition and microstructure. *Journal of Cultural Heritage*, 4(2), 91-99.
- [99] MCA, M. S. A. (2018). Valorisation des sédiments issus du dragage du barrage de Bouhanifia et du port d'Oran (Doctoral dissertation, Université de Mostaganem).
- [100] Dunham, A. C. (1992). Developments in industrial mineralogy: I. The mineralogy of brick-making. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, 49(2), 95-104.
- [101] Kontogeorgos, D. A., Founti, M. A. (2012). Gypsum board reaction kinetics at elevated temperatures. *Thermochimica Acta*, 529, 6-13.
- [102] Cultrone, G. (2013). Estudio mineralógico-petrográfico y físico-mecánico de ladrillos macizos para su aplicación en intervenciones del patrimonio histórico. Universidad de Granada.
- [103] Dondi, M., Guarini, G., Raimondo, M. (1999). Trends in the formation of crystalline and amorphous phases during the firing of clay bricks. *Tile & brick international*, 15(3), 176-178.

- [104] Cultrone, G., Rodriguez-Navarro, C., Sebastian, E., Cazalla, O., De La Torre, M. J. (2001). Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing. *European Journal of Mineralogy*, 13(3), 621-634.
- [105] Velasco, P. M., Ortíz, M. M., Giró, M. M., Velasco, L. M. (2014). Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material—A review. *Construction and Building materials*, 63, 97-107.
- [106] NA 5023, Algerian norms. Firing Clay bricks Determination of compressive strength of bricks. 1995
- [107] SIST, E. (2002). 772-1: 2002: Methods of test for masonry units-part 1: determination of compressive strength. Slovenian Institute for Standardization, Ljubljana.
- [108] American Society for Testing and Material (ASTM). Standards Tests Method for Sampling and Testing Bricks and Structural Clay Tile; ASTM C67-03; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2003.
- [109] Yedri, A. B., Ammari, M., Ayadi, H. E. L. (2016). Contribution à l'élaboration des briques en terre cuite à base d'une boue industrielle (Contribution to the development of fired bricks made of industrial sludge). *J. Mater. Environ. Sci*, 7(2), 497-504.
- [110] BIA, The Brick Industry Association, Technical Notes on Brick Construction 9-Manufacturing of Brick. Reston, VA, 2006.
- [111] Frar, I., Allal, L. B., Ammari, M., Lamrani, S. (2014). Intégration des matériaux en terre cuite dans la valorisation des sédiments marins. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 11, p. 01025). EDP Sciences.
- [112] Samara, M. (2007). Valorisation des sédiments fluviaux pollués après inertage dans la brique cuite (Doctoral dissertation).
- [113] Cappuyns, V., Deweirt, V., Rousseau, S. (2015). Dredged sediments as a resource for brick production: Possibilities and barriers from a consumers' perspective. *Waste Management*, 38, 372-380.
- [114] Slimanou, H., Eliche-Quesada, D., Kherbach, S., Bouzidi, N., 2020. Harbor Dredged Sediment as raw material in fired clay brick production: Characterization and properties. *Journal of Building Engineering*, 28, 101085

[115] Travitzky, N. A. (1998). Mechanical properties and microstructure of mullite whisker-reinforced magnesium aluminosilicate glass with cordierite composition. *Journal of materials science letters*, 17(19), 1609-1611.

[116] Nguetnkam, J. P., Kamga, R., Villiéras, F., Ekodeck, G. E., Yvon, J. (2008). Altération différentielle du granite en zone tropicale. Exemple de deux séquences étudiées au Cameroun (Afrique Centrale). *Comptes Rendus Géoscience*, 340(7), 451-461.

[117] Jean, J. H., & Gupta, T. K. (1994). Design of low dielectric glass+ ceramics for multilayer ceramic substrate. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part B*, 17(2), 228-233.

[118] Wu, J., Li, Z., Huang, Y., Li, F., Yang, Q. (2014). Fabrication and characterization of low temperature co-fired cordierite glass–ceramics from potassium feldspar. *Journal of alloys and compounds*, 583, 248-253.

[119] Pinheiro, B. C., Holanda, J. N. F. (2008). Microstructural analysis of petroleum waste containing ceramic tile. In *Materials Science Forum* (Vol. 591, pp. 845-848). Trans Tech Publications Ltd.

[120] Wu, X., Huo, Z., Ren, Q., Li, H., Lin, F., Wei, T. (2017). Preparation and characterization of ceramic proppants with low density and high strength using fly ash. *Journal of Alloys and Compounds*, 702, 442-448.

[121] Ji, H., Fang, M., Huang, Z., Chen, K., Xu, Y., Liu, Y. G., Huang, J. (2013). Effect of La_2O_3 additives on the strength and microstructure of mullite ceramic sobtained from coal gangue and $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. *Ceramics International*, 39(6), 6841-6846.

[122] Lü, Q., Dong, X., Zhu, Z., Dong, Y. (2014). Environment-oriented low-cost porous mullite ceramic membrane supports fabricated from coal gangue and bauxite. *Journal of hazardous materials*, 273, 136-145.

[123] Wang, H., Sun, Y., Liu, L., Ji, R., Wang, X. (2018). Integrated utilization of fly ash and waste glass for synthesis of foam/dense bi-layered insulation ceramic tile. *Energy and Buildings*, 168, 67-75.

[124] Van Dooselaere, B. (2005). Perception stylistique et technologie céramique: reconstitution et interprétation des techniques de façonnage des poteries archéologiques de

Koumbi Saleh (Mauritanie, IXème-XVème siècles). Pottery Manufacturing Processes: Reconstructions and Interpretations, edited by A. Livingstone Smith, D. Bosquet and R. Martineau, 179Á, 199.

[125] Djouadi, L., Khalaf, H., Boukhatem, H., Boutoumi, H., Kezzime, A., Santaballa, J. A., Canle, M. (2018). Degradation of aqueous ketoprofen by heterogeneous photocatalysis using Bi₂S₃/TiO₂–Montmorillonite nanocomposites under simulated solar irradiation. *Applied Clay Science*, 166, 27-37.

[126] Bouzidi, N. (2012). Influence des impuretés des kaolins sur les propriétés des produits de cuisson (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne).

[127] Kouloughli, S., Lehocine, M. B. (2007). Etude des mélanges sable-bentonite utilisés dans la construction de barrières de confinement de déchets solides. *Sciences & Technologie. B, Sciences de l'ingénieur*, 34-42.

[128] Murray, N. H., Millett, J. C. F., Proud, W. G., Rosenberg, Z. (2000, April). Issues surrounding lateral stress measurements in alumina ceramics. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 505, No. 1, pp. 581-584). American Institute of Physics.

[129] Sabirov, B. T., Kadyrova, Z. R., Tairov, S. S. (2019). Development of Optimal Compositions of Ceramic Tiles Using Dune Sand. *Glass and Ceramics*, 75(9-10), 363-365.

[130] Boussak, H., Chemani, H., Serier, A. (2015). Characterization of porcelain tableware formulation containing bentonite clay. *International Journal of Physical Sciences*, 10(1), 38-45.

[131] Frechette, V. D., Varner, J. R. (1991). *Fractography of glasses and ceramics II*.

[132] El Boudour El Idrissi, H. (2017). Caractérisation des argiles utilisées dans le secteur de la terre cuite de la région de Marrakech en vue d'améliorer la qualité des produits (Doctoral dissertation, Université de Liège, Liège, Belgique).

[133] Kornmann, M. (2007). Clay bricks and rooftiles, manufacturing and properties. *lasim*.

[134] Ferrari, F., Rossi, S., Martini, A., Muggetti, L., De Ponti, R., & Caramella, C. (1997). Technological induction of mucoadhesive properties on waxy starches by grinding. *European journal of pharmaceutical sciences*, 5(5), 277-285.

[135] Restrepo, J. J., Dinger, D. R. (1995). Control of pyro plastics formation in triaxial porcelain bodies using thermal dilatometry. *Interceram*, 44(6), 391-398.

[136] Zarzycki, J. (1982). *Les verres et l'éclat vitreux (serie)*. Masson.

[137] Image google earth

[138] Lochu, S., Duval, M., Cassai, C., Talec, P. (2017). *Guide méthodologique des diagnostics à mettre en œuvre au préalable des opérations de dragage de sédiments marins à La Réunion*.

[139] Lecomte, T. (2018). *Évaluation environnementale des sédiments de dragage et de curage dans la perspective de leur valorisation dans le domaine du génie civil (Doctoral dissertation, Lille 1)*.

[140] Amouroux, I., Claisse, D. (2016). *AQUAREF-Opérations d'échantillonnage en milieu marin dans le cadre des programmes de surveillance DCE (matrices: eau, sédiment et biote)-Recommandations techniques*—Edition 2015.

[141] Achour, R. (2013). *Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiments de dragage (Doctoral dissertation, Université de Sherbrooke)*.

[142] ISO, N. (2006). *Qualité des sols, prétraitement pour analyses physico-chimiques*. NF X31-412/NF ISO 11464 décembre 2006. Ed (01/12/2006)

CHAPITRE II

MATERIAUX ET METHODES D'INVESTIGATIONS

Chapitre II : Matériaux et Méthodes d'investigation

Introduction

Les sédiments de dragage peuvent être valorisés avec ou sans traitement dans des mortiers, des briques et les céramiques. Plusieurs méthodes de caractérisation physiques, chimiques, minéralogiques et environnementales sont réalisées afin de comprendre le comportement des sédiments et d'évaluer leur impact sur l'environnement. Dans cette thèse, les sédiments collectés et étudiés proviennent du port de Bejaïa dans deux zones (P1 et P2).

- Le premier point (P1), qui est du côté du port commercial où les échanges commerciaux à travers des égouts se font ;
- Le deuxième point (P2), principale point de déversement des rejets industriels, venant des usines installées à côté du port.

Les différentes techniques d'analyses et de caractérisations que nous avons utilisés au cours de notre travail sont présentées.

II.1 Caractérisation environnementale

Les sédiments marins sont issus d'une zone fortement polluée, d'où la nécessité d'une caractérisation environnementale. L'étude environnementale a été faite en respectant les seuils recommandés par le ministère algérien de l'environnement (décret algérien N°88-228 du 05 novembre 1988 concernant l'immersion des déchets en mer et le décret algérien N°90-78 du 27 février 1990 concernant les études d'impact sur l'environnement). Les sédiments sont caractérisés chimiquement afin de déterminer leurs suppositions en métaux lourds.

II.2 Caractérisations physiques

La caractérisation physique des sédiments est une étape primordiale dans le cadre valorisation dans le domaine génie civil car elle est en relation directe avec la formulation des matériaux de construction. Ainsi plusieurs caractéristiques telles que la teneur en eau, la masse volumique, la surface spécifique, la distribution granulométrique, la valeur au bleu de méthylène ainsi que les limites d'Atterberg ont été déterminées. Cette étape nous permettra aussi de comprendre l'évolution des propriétés physiques des matériaux valorisés.

II.2.1 Analyse granulométrique

La granulométrie laser permet de déterminer la distribution granulométrique des fines composant les sédiments. L'appareil utilisé est un granulomètre MASTERSIZER 2000-HYDRO 2000 de Malvern instrument qui utilise une technique basée sur la diffraction de la lumière. La gamme des tailles analysables sur cet appareil est de 0,02 μm à 2000 μm . Les particules de sédiments en suspension sont introduites par voie humide dans une cuve d'analyse. elles sont ensuite éclairées par un faisceau laser avant d'être projetées sur des photodiodes de mesure suite à l'interaction entre le laser et les particules. La distribution de taille est calculée en appliquant la théorie de Mie en assimilant les particules à des sphères. Le problème de ce type d'analyse est la possibilité du masquage des particules fines par les plus grosses ainsi que l'hypothèse des particules sphériques.

II.2.2 Mesure de la teneur en eau (NF P 94-050)

La teneur en eau naturelle des sédiments dépend du mode de dragage et du mode de séchage de ces dernières. La teneur en eau initiale des sédiments dragués est réduite par la mise en dépôt sur un lit de séchage naturel à l'aire. Sa détermination est nécessaire pour évaluer la quantité d'eau à éliminer afin de pouvoir réutiliser les sédiments.

La détermination de la teneur en eau des sédiments selon la norme française NF P 94-050 (1995)[1] se fait par séchage en étuve. Le principe consiste à sécher une masse de 1 kg de sédiments dans une étuve réglée à 50 et 105°C jusqu'à ce que la différence de masse reste constante (généralement 24 heures). La différence entre le poids avant et après séchage exprime la teneur en eau de l'échantillon initial cette mesure est exprimée en (%).

$$W (\%) = \frac{\text{Masse échantillon humide} - \text{masse échantillon sec}}{\text{masse échantillon sec}} * 100 \quad (1)$$

II.3 Argilosité

Les sédiments contiennent généralement un pourcentage d'argile plus au moins important et varie d'un sédiment à un autre. Les sols argileux ont posé des problèmes dans le domaine du génie civil, car ils entraînent dans certains cas un gonflement ou un retrait très important provoquant des fissures importantes, des chutes de résistance dans des bétons et des mortiers [2]. Les minéraux argileux sont classés en 4 groupes : kaolinite, smectite, illite et

chlorite. L'argile est gonflante, elle dépend de son pouvoir d'échange cationique faible telle que la kaolinite. En revanche, l'argile est gonflante et son pouvoir d'échange cationique est important dans le cas d'une smectite. Les illites constituent un cas intermédiaire [3]. Le chlorite est caractérisé par une activité argileuse plus faible que celle de la smectite et par un échange cationique similaire à celui de l'illite [4]. Dans cette étude, l'argilosité, le potentiel de gonflement et la capacité d'échange cationique sont évalués par des propriétés physiques couramment utilisées dans la littérature : les limites d'Atterberg, la valeur au bleu de méthylène et la surface spécifique.

II.3.1 Les limites d'Atterberg (NF P 94-051) :

Les teneurs en eau qui délimitent les états de consistance d'un sol, sont appelés les limites d'Atterberg ou limites de consistance. Les limites d'Atterberg sont indicatrices de plusieurs propriétés physiques, outre la plasticité du sol, sa résistance, sa perméabilité, sa compressibilité, son potentiel de retrait/gonflement [5]. Les limites d'Atterberg sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol, Un matériau fin pourra passer d'un état solide à état liquide (W_L), quand sa teneur en eau augmente, le comportement intermédiaire aura des propriétés plastique (W_P). Des limites arbitraires ont été définies pour qualifier ces différents états. Ces limites arbitraires ont été définies pour qualifier ces différents états. Ces limites sont pour des teneurs en eau croissantes (figure II.1) :

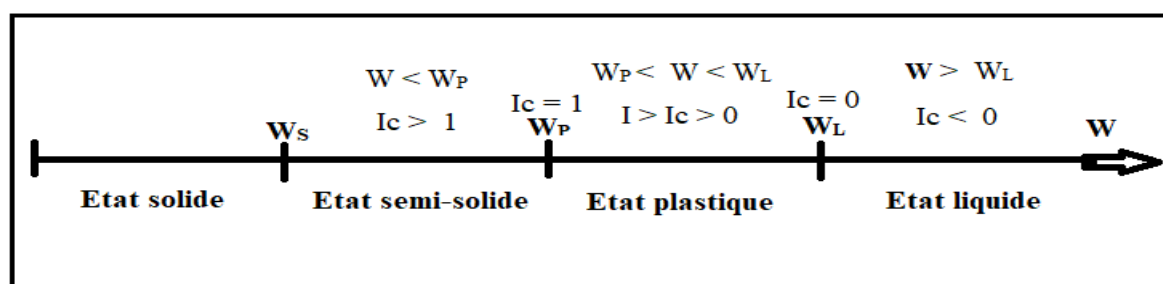


Figure II.1: Etats de consistance- limites d'Atterberg.

Le domaine situé entre les deux limites citées précédemment détermine l'indice de plasticité (Figure II.2) :

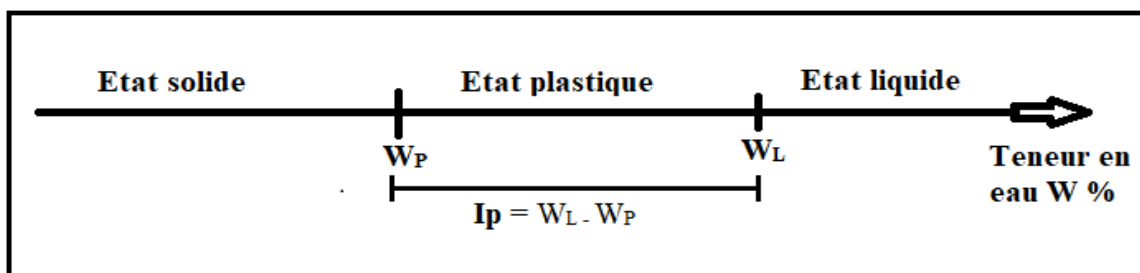


Figure II.2: Limites d'Atterberg et indice de plasticité.

Suivant les valeurs de cet indice, les sols peuvent être classés comme suit (Tableau II.1) :

Tableau II.1: Degré de plasticité des sols [6].

Indice de plasticité (I_p)	Etat du Sol
$0 < I_p < 5$	Sol non plastique
$5 < I_p < 30$	Sol peu plastique
$30 < I_p < 50$	Sol plastique
$0 < I_p < 50$	Sol très plastique

La comparaison de la teneur en eau naturelle d'un échantillon et les limites d'Atterbeg permettent d'avoir une idée sur l'état du matériau, il peut aussi être, caractériser par son indice de consistance I_c (Tableau II.2). Il est calculé par la relation suivante (équation 2) :

$$I_c = \frac{W_l - W}{I_p} \quad (2)$$

W_l : Teneur en eau w % d'état liquide.

W_p : Teneur en eau w % d'état plastique.

I_p : indic de plasticité.

Tableau II.2: Indice de consistance I_c des limons et des argiles [7]

Indice de consistance (I_c)	Etat du sol
$I_c < 0,25$	Liquide
$0,25 < I_c < 0,5$	Moue
$0,5 < I_c < 0,75$	Ferme
$0,75 < I_c < 1$	Très Ferme
$I_c > 1$	Très dure

Casagrande (1948) [8] a établi une carte pour faire une classification des sols fins en fonction de leur limite de liquidité et leur indice de plasticité présente dans un diagramme dit de plasticité (Figure II.3). Ce graphique distingue les sols fins « très plastiques » lorsque $W_L > 50\%$ des sols fins « peu plastiques » pour $W_L < 50\%$.

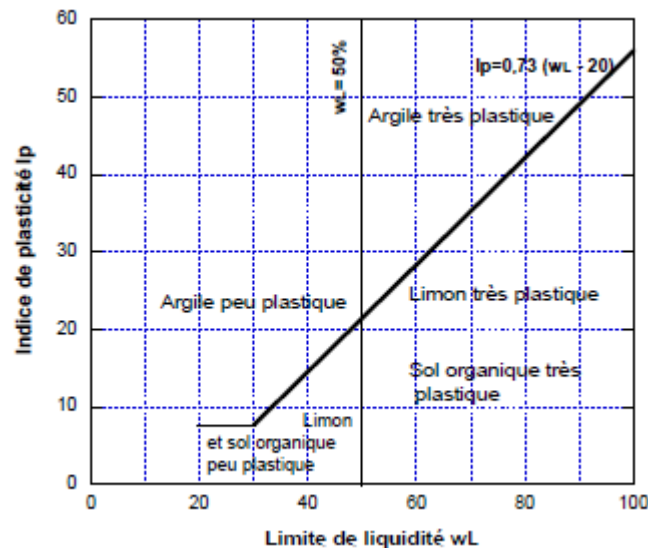


Figure II.3: Diagramme de plasticité [8].

Certains auteurs ont proposé des corrélations entre l'indice de plasticité I_p et le potentiel de gonflement des argiles. Comme présentés dans le Tableau II.3.

Tableau II.3: Relation entre l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement [8].

Potentiel de gonflement	I_p d'après Snethen (1980) [9]	I_p d'après Chen (1988) [10]
Faible	< 18	0 – 15
Moyen	22 – 32	10 – 35
Elevé	25 – 48	20 – 55
Très élevé	> 35	> 35

La détermination des limites d'Atterberg se fait sur la fraction de sol passant à travers un tamis de 400 μm . L'appareil de Casagrande est utilisé pour déterminer la limite de liquidité. La teneur en eau pour laquelle une rainure effectuée à l'aide d'un outil normalisé sur le matériau placé dans une coupelle Casagrande se ferme sur une longueur de 1cm, lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à une répétition de choc. La teneur en eau qui correspond à la fermeture de la rainure sur 1 cm de longueur en 25 chocs, correspond à la limite de liquidité (Figure II.4a).



Figure II.4: Fermeture de la rainure (a) et rouleau de 3 mm (b).

La limite de liquidité W_L est calculée à partir de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales de la teneur en eau et le logarithme du nombre de coups. La relation n'est validée que si l'écart de teneur en eau entre la valeur mesurée et la valeur calculée pour le même nombre de coup n'excède pas 3 %. La limite de plasticité est la moyenne des teneurs en eau obtenues à partir de deux essais pour laquelle un rouleau de 3 mm de diamètre confectionné manuellement se brise (figure II.4b).

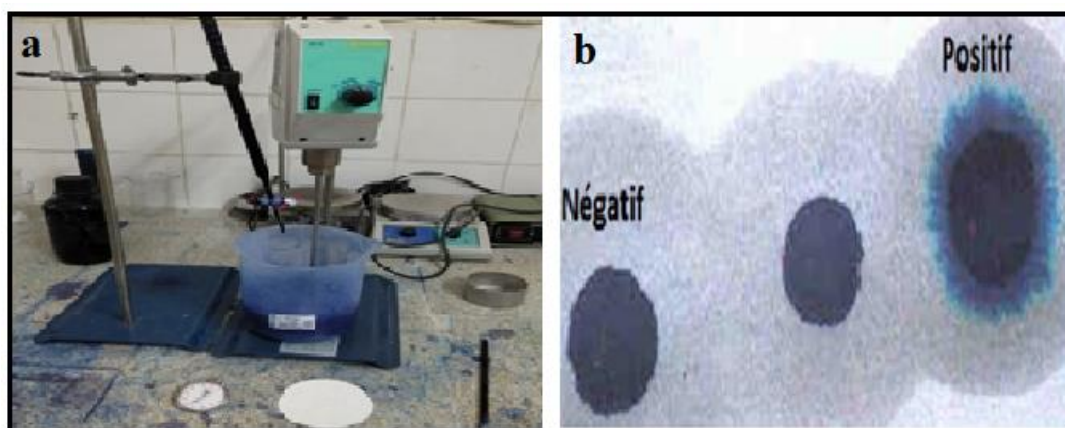
II.3.2 Valeur au bleu de méthylène (NF P 94-068)

La valeur au bleu de méthylène permet une estimation précise de la surface spécifique, du potentiel de gonflement et de la capacité d'échange cationique des sols argileux. "Plus la valeur au bleu de méthylène est élevée, plus le potentiel de gonflement et la capacité d'échange cationique des sédiments sont élevés" [11]. Le guide des terrassements routiers (GTR, 2000)[12] donne une classification du sol en fonction de sa valeur au bleu de méthylène (Tableau II.4).

Tableau II.4: Classification des sols en fonction de la valeur au bleu de méthylène (NF, P. P 11-300) [13].

VBS (g/100 g)	Appréciation du sol/type de sol
0,1	Le sol est insensible à l'eau
0,2	Seuil à partir duquel apparait la sensibilité à l'eau
1,5	Seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux
2,5	Seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne
6	Seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux
8	Seuil distinguant les sols limoneux des sols très argileux

La procédure est décrite dans la norme française NF P 94-068 (1998)[14]. Un échantillon du sol étudié sec de masse $m=200$ (g), dans la fraction inférieure à 2 mm du sol étudié, est introduit dans 500 ml d'eau déminéralisée puis dispersé à l'aide d'un agitateur à ailettes tournant à 700 ± 100 tr/min pendant au moins 5 minutes. La vitesse de rotation est ensuite maintenue à 400 ± 100 tr/min. il est alors injecté successivement 5 cm³ de bleu de méthylène dans la suspension jusqu'à atteindre la saturation des particules d'argile (figure II-5a). L'instant de cette saturation est repéré à travers le test à la tâche qui consiste à prélever une goutte dans la solution que l'on dépose sur un filtre. Le test est considéré positif et l'essai est terminé lorsque l'auréole, entourant la tache centrale bleue, est colorée (figure II.5b).

**Figure II.0.5:** Exécution de l'essai au bleu méthylène (a) et conclusion de l'essai (b).

Autrement (auréole incolore), l'essai se poursuit par ajout supplémentaire de bleu de méthylène. La valeur de bleu de méthylène est définie par l'équation suivante (équation 3).

$$VBS = \frac{\text{volume de bleu de méthylène (cm}^3\text{)}}{\text{masse sèche de la prise d'essai(g)}} * 10 \quad (3)$$

II.3.3 Surface spécifique (EN 196-6)

La détermination de la surface spécifique permet d'évaluer la capacité des sédiments à retenir l'eau [15] et à adsorber les polluants [16]. La surface spécifique d'un minéral est liée à sa composition minéralogique [17]. Plus le nombre de feuillets est grand, plus la surface spécifique est importante. Elle est en plus affectée par la présence de la matière organique et par la granulométrie du matériau [18]. Le Tableau II.5 donne des valeurs des surfaces spécifiques de différents minéraux argileux.

Tableau II.5: Surface spécifique totale des minéraux argileux en m²/g [19].

	Smectite	Illite	Chlorite	Kaolinite
Surface spécifique (m ² /g)	800	80	80	15

II.3.4 Masse volumique absolue

La masse volumique absolue ou la masse volumique des particules solides d'un sol est en général comprise entre 2,6 g/cm³ et 2,8 g/cm³. Une valeur plus faible que 2,6 g/cm³ peut indiquer la présence de matière organique [20]. La masse volumique est définie par le rapport entre la masse d'un échantillon séché en étuve et le volume qu'il occupe dans l'eau, y compris les pores fermés. Les masses volumiques absolues des sédiments P1 et P2 sont déterminées par la méthode du pycnomètre à hélium.

La méthode du pycnomètre à hélium de type Micromeritics ACCUPYS 1330, permet d'éviter tout gonflement du matériau possible dans le cas de l'utilisation des pycnomètres à liquides. En plus, l'hélium pénètre très bien dans de très petites cavités en raison de son faible diamètre atomique. Le principe de cet essai est basé sur la loi de Mariotte (PV = constante). En effet, l'échantillon est introduit dans une cellule du pycnomètre. Le gaz hélium est injecté à une pression connue P_c dans une enceinte de référence de volume V_c. Il est ensuite libéré dans un volume de détente V contenant l'échantillon de volume V_e. La pression initiale d'injection du gaz d'hélium diminue et se stabilise à une pression P tel que l'équilibre donné par la formule suivant est respecté (équations 4) :

$$P_c \times V_c = P \times (V + V_c - V_e) \quad (4)$$

Ainsi, le volume absolu V_e de l'échantillon est donné par l'expression suivant (équation 5)

$$V_e = V + V_c \times \left(1 - \frac{P_c}{P}\right) \quad (5)$$

II.3.5 Teneur en carbonate de calcium CaCO_3 (NF P 94-048)

En raison de sa faible solubilité, le carbonate de calcium présent dans l'environnement, se dépose sur les sédiments. C'est un composant naturel des sols qui n'est pas toxique. Selon le tableau II.6 la teneur en CaCO_3 d'un sol, son comportement évolue comme celui d'une argile ou celui d'une roche. Une roche calcaire, se caractérise par une hydratation rapide. Ainsi, la teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) donne une indication sur la capacité des sédiments à retenir les métaux lourds [15], Il a été prouvé que le cuivre (Cu) et le Zinc (Zn) sont principalement présents dans ces phases [21].

Tableau II.6: Classification des matériaux en fonction du pourcentage massique en carbonate (NF P 94-048) [22].

Teneur en carbonate (%)	Classification	Exemple
<10	Non calcaire	Argile, sable siliceux
10 à 29	Peu calcaire	Argile mameuse
29 à 69	Moyennement calcaire	Mame
70 à 89	Calcaire	Calcaire marneux
90	Fortement calcaire	Calcaire

Le carbonate de calcium CaCO_3 , réagit dans l'acide suivant la réaction chimique ci-dessous :



II.4 Caractérisations chimiques et minéralogiques

La valorisation des sédiments nécessite une connaissance de leurs compositions chimique et minéralogique pour comprendre et voir les réactions qui peuvent avoir lieu au sein du produit valorisé. La composition chimique est déterminée par la fluorescence aux rayons X (FRX) qui permet d'évaluer les répartitions massiques des différents oxydes. L'analyse minéralogique définit la nature des minéraux cristallisés à l'aide d'un appareil de diffraction aux rayons (DRX).

II.4.1 Analyse chimique

Elle permet de quantifier (en pourcentage massique) les oxydes majeurs et mineurs. A partir de ces résultats et en considérant les masses molaires, les pourcentages en oxydes (SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O et K_2O et etc...) sont déduits.

Dans cette étude, l'analyse chimique des sédiments a été réalisée par Fluorescence aux Rayons X (FRX) sur un appareil Bruker. La fluorescence X est une émission de rayons X, caractéristique des éléments atomiques qui composent l'échantillon. Les rayons X sont envoyés par un tube cathodique sur l'échantillon. Ces rayons X 'primaires' excitent les atomes, qui en retour émettent un rayonnement X 'secondaire', dont le spectre, caractéristique de l'atome, est analysé par un spectromètre. Le spectromètre est, suivant les appareils, à 'dispersion d'énergie' ou à 'dispersion de longueur d'onde'. L'analyse de ce spectre permet de déduire la composition élémentaire, c'est-à-dire les concentrations massiques en éléments.

II.4.2 Analyse minéralogique

La composition minéralogique nous renseigne sur les phases minérales présentes dans les sédiments étudiés et permet de déterminer la structure des constituants (s'ils sont amorphes ou cristallisés) et la nature des phases cristallines. L'identification se fait manuellement (en indexant les pics) ou automatiquement en utilisant des logiciels d'identification et les banques de données de références ASTM. Les différents anneaux correspondent aux pics obtenus avec le diffractomètre. Ils indiquent une valeur de distance réticulaire.

Cette analyse a été réalisée par une diffraction aux rayons X (DRX) qui fait ressortir la nature des minéraux cristallisés présents dans un échantillon préalablement séché et broyé en poudre jusqu'à ce que l'ensemble passe au travers d'un tamis d'ouverture $\Phi=63\text{ }\mu\text{m}$. L'analyse

minéralogique des argiles a été faite par diffraction de rayons X (DRX). Cette analyse a été effectuée sur un diffractomètre du type BRUKER D8 destiné à la caractérisation d'échantillons plans polycristallins. Sa configuration est dérivée de celle de Debye-Scherrer. Le diffractomètre est schématisé sur la Figure II.6. Le domaine angulaire balayé est compris entre 5 et 120° en 2θ (angle d'incidence). Le temps de pose est de 20 mn. La radiation $K\alpha_1$ du cuivre (de longueur d'onde=1,5406 Å) utilisée a été produite sous une tension de 40 kV et une intensité de 30 mA. Toutes les caractérisations par DRX ont été réalisées sur des poudres non orientées.



Figure II.6 : Diffractomètre aux Rayons X du système XPERT-PRO.

II.5 Analyse thermique

L'analyse thermique nous permet de suivre le comportement durant la calcination de nos échantillons. Nous avons utilisé deux techniques : l'Analyse Thermique Gravimétrique (ATG) et l'Analyse Thermique Différentielle (l'ATD).

L'analyse thermogravimétrique donne la perte de masse de l'échantillon en fonction de la température. La représentation de la perte de masse sous la forme de sa dérivée en fonction du temps (DTG) qui permet de mieux calculer les divers gains ou pertes de masse. Avec l'analyse calorimétrique différentielle, on cherche à mesurer le flux de chaleur entre l'échantillon et le four. On distingue les phénomènes endothermiques et exothermiques qui absorbent ou dégagent respectivement de la chaleur. Par convention, sur toutes les courbes d'

ATD, les phénomènes exothermiques seront représentés vers le haut. Ces deux méthodes permettent d'obtenir des données soit quantitatives (ATG) soit qualitatives (ATD).

L'appareil utilisé est un TG-DSC 111 de Setaram ; il permet de mesurer simultanément les variations de masse de l'échantillon test et le flux thermique entre ce dernier et un creuset de référence. Nous allons utiliser une méthode dite dynamique, c'est-à-dire que l'on va suivre en continu l'évolution de la perte de masse de l'échantillon pendant son chauffage entre deux températures fixées et à une vitesse de température constante entre ces températures. Il faut au préalable fixer un certain nombre de paramètres : nature et débit du gaz de balayage, plage de températures et vitesse de montée en températures.

II.6 Observations microscopiques par MEB

Les microstructures des échantillons ont été observées avec le dispositif SEM JEOL SM 840 haute résolution et la spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie. (EDX) logiciel d'analyse chimique (20 KV). Les échantillons ont été placés sur un support en aluminium et recouverts de carbone JEOL JFC 1100 pour la pulvérisation ionique. La préparation des échantillons est sous forme solide ou sous forme poudre qui est directement versée sur un porte échantillon préalablement enduit de laque de carbone. L'échantillon ainsi préparé est ensuite métallisé puis introduit dans la chambre du MEB (Figure II.7).



Figure II.7: L'appareil MEB couplé avec EDX.

II.7 Caractéristiques physiques des matériaux

Les produits confectionnés ont subi une série d'essais tels que le retrait, la détermination de la densité apparente, la porosité, etc.

II.7.1 Retrait

Le retrait (LFS %) a été déterminé à partir de la longueur des échantillons avant et après cuisson en utilisant un pied à coulisse avec une précision de $\pm 0,01$ mm conformément à la norme ASTM C326 - 09, 2018[23].

II.7.2 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente a été déterminée par la méthode d'Archimède (ASTM C373, 1994a) [24].

II.7.3 L'absorption en eau

Les valeurs d'absorption en eau ont été déterminées à partir de différences de poids entre les échantillons cuits et un échantillon saturé d'eau (immergés dans l'eau bouillante pendant 24 h), selon la norme ASTM C373 [24].

II.7.4 La porosité ouverte

La porosité ouverte (en volume, %) a été calculée à partir des valeurs déterminées de la densité apparente et de la capacité d'absorption d'eau [24].

II.7.5 La porosité totale

La porosité totale de la céramique a été obtenue à partir de la densité apparente au rapport de densité réelle (les valeurs de densité réelle ont été déterminées par pycnomètre) (Jaya et al., 2020) [25].

II.7.6 L'aspiration d'eau par capillarité

L'aspiration d'eau par capillarité fait référence à la quantité d'eau absorbée en 1 minute à travers la surface des échantillons de céramique, selon la procédure standard UNE 67-031[26].

II.7.7 Capillarité

À partir du placement des échantillons en contact avec l'eau, la masse a été mesurée à 10 et 90 min, et plus tard, des corrélations au coefficient de capillarité ont été obtenues par la différence entre m_{90} (masse à 90 min) et m_{10} (masse à 10 min) (EN 1015-18: 2002) [27].

II.7.8 Résistance à la compression

La résistance à la compression a été obtenue selon la procédure standard UNE-EN-772-1, 2011 [28], en utilisant une presse de laboratoire MTS 810 Material Testing Systems. La résistance à la compression est obtenue en divisant la charge maximale par la surface moyenne des deux surfaces d'appui avec une précision de 0,1 MPa.

II.7.9 La Flexion

Des essais de flexion ont été effectués sur des éprouvettes selon la norme ASTM C348[29].

II.7.10 La conductivité thermique

La conductivité thermique des briques cuites a été déterminée à 10 et 20 ° C à l'aide d'un débitmètre thermique FOX 50 (instruments TA) conformément à la norme ISO 8302 : 1991[30].

II.7.11 L'étalement

C'est un essai essentiel qui permet de caractériser l'état frais des mortiers et de déterminer sa maniabilité. Cet essai est réalisé à l'aide d'un mini cône posé sur une table à secousses. On utilise cette dernière afin d'assurer un seul régime de vibration et éliminer les bulles d'air dans le but d'obtenir une bonne compacité [31].

II.7.12 Consistance

C'est la détermination de la consistance normalisée de la pâte de ciment selon les spécifications de la norme européenne EN 196-3 [32]. Principe de l'essai : dans cet essai, la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet de la vibration.

II.7.13 Masse volumique fraîche

On a déterminé la masse volumique à l'état frais par la différence des pesées des moules vides et remplis sur le volume du moule [31].

II.7.14 Évaluation environnementale

L'évaluation environnementale consiste à déterminer la mobilité des polluants sur la base de la procédure de lixiviation caractéristique de toxicité (TCLP) établie par l'EPA (Environmental Protection Agency)[33] dans sa méthode 1311 : 1992. Les concentrations dans le filtrat ont été mesurées avec un spectromètre d'émission plasma-atomique à couplage inductif (ICP-AES Agilent 7500).

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les principaux matériaux et méthodes d'investigations utilisés afin de pouvoir caractériser et valoriser les sédiments dans des matériaux écologiques sans nuire à l'environnement.

Références bibliographiques

- [1] NF, P. (1991). 94-050. 'Sols : Reconnaissance et essais-détermination de la teneur en eau pondérale des sols-méthode par étuvage, Association Française de Normalisation.
- [2] Lautrin, D. (1989). Essai au bleu de methylene-utilisation pratique des parametres derives de l'essai au bleu de methylene dans les projets de genie civil. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, (160).
- [3] Hassine, H. B. (2006). Nature minéralogique et rôle nutritionnel des argiles de sols céréaliers en région subhumide à semi-aride (Tunisie). Comptes Rendus Geoscience, 338(5), 329-340.
- [4] Duchaufour, P., Faivre, P., Poulenard, J., Houot, S., Gury, M. (2018). Introduction à la science du sol-7e éd.: Sol, végétation, environnement. Dunod.
- [5] Khemakhem, M., Benjeddou, O. (2020). Diagnostic, entretien et réparation des ouvrages en béton armé: en 44 fiches pratiques. Le Moniteur.
- [6] Magnan, J. P. (1997). Description, identification et classification des sols. Ed. Techniques Ingénieur.
- [7] Dueñas, J. P., Poblete, M. (2014). Utilización del penetrómetro de cono en la determinación del límite líquido en suelos de baja plasticidad. In VIII Congreso Chileno De Ingeniería Geotécnica, Sociedad Chilena de Geotecnia, Chile.
- [8] Casagrande, A. (1948). Classification and identification of soils. Transactions, Asce, 113, 901-991.
- [9] Snethen, D. R. (1980). Characterization of expansive soils using soil suction data. In Expansive Soils (pp. 54-75). ASCE.
- [10] Chen, L. B. (1988). Mitochondrial membrane potential in living cells. Annual review of cell biology, 4(1), 155-181.
- [11] Bouaziz, N., Melbouci, B. (2019). Characterization of the Illiltén earth flow (Algeria). Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78(1), 669-689.

[12] GTR (guide des terrassements routiers, réalisation des remblais et des couches de formes, LCPC SETRA 2000), NF P 11 300.

[13] NF, P. P 11-300, 1992. Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières, Exécution des terrassements.

[14] NF, P. (1998). 94-068, 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 tâche. Association Française de Normalisation, France (in French).

[15] Bel Hadj Ali, I. (2013). Contribution à l'étude des sédiments marins tunisiens: cas des ports de Radès et de Gabès (Doctoral dissertation, Ecole centrale de Lille).

[16] Hao, R., Wang, G., Jiang, C., Tang, H., Xu, Q. (2017). In situ hydrothermal synthesis of g-C₃N₄/TiO₂ heterojunction photocatalysts with high specific surface area for Rhodamine B degradation. *Applied Surface Science*, 411, 400-410.

[17] Uroz, S., Kelly, L. C., Turpault, M. P., Lepleux, C., Frey-Klett, P. (2015). The mineralosphere concept: mineralogical control of the distribution and function of mineral-associated bacterial communities. *Trends in microbiology*, 23(12), 751-762.

[18] Adams, R. S., Bustin, R. M. (2001). The effects of surface area, grain size and mineralogy on organic matter sedimentation and preservation across the modern Squamish Delta, British Columbia: the potential role of sediment surface area in the formation of petroleum source rocks. *International Journal of Coal Geology*, 46(2-4), 93-112.

[19] Maison, T. (2011). Analyse à l'échelle microscopique des phénomènes d'humectation et de dessiccation des argiles (Doctoral dissertation).

[20] Hamouche, F., Zentar, R. (2016). Influence des matières organiques sur les propriétés physiques des sédiments de dragage. *Academic Journal of Civil Engineering*, 34(1), 908-914.

[21] Walaszek, M., Del Nero, M., Bois, P., Ribstein, L., Courson, O., Wanko, A., Laurent, J. (2018). Sorption behavior of copper, lead and zinc by a constructed wetland treating urban stormwater. *Applied Geochemistry*, 97, 167-180.

[22] Standard, N. F. P 94-048 (2003) Sols: Reconnaissance et Essais–Détermination de la teneur en calcite–Méthode du calcimètre. January, AFNOR.

[23] ASTM C326-09. (2009). Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic White ware Clays. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials.

[24] ASTM, A. C373-14 Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired White ware Products, Astm C373-88. 88 (1999) 1–2.

[25] Jaya, N. A., Yun-Ming, L., Cheng-Yong, H., Abdullah, M. M. A. B., Hussin, K. (2020). Correlation between pore structure, compressive strength and thermal conductivity of porous metakaolin geopolymer. *Construction and Building Materials*, 247, 118641.

[26] UNE 67031: 1986, Burned clay bricks. Suction test.

[27] EN 1015-18: 2002. (2002). EN Methods of test for mortar for masonry-Determination of water absorption coefficient due to capillarity action of hardened mortar.

[28] UNE EN 772-1:2002, Methods of test for masonry units – Part 1: Determination of compressive strength.

[29] ASTM C348. (1997). Test method for flexural strength of hydraulic mortar. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials.

[30] ISO. (1991). Norma ISO 8302: 1991 Thermal insulation-Determination of steady state thermal resistance and related properties. Guarded hot plate apparatus.

[31] Bouali, K. (2015). Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires (Doctoral dissertation).

[32] EN, N. (2006). 196-3 : Méthodes d'essais des ciments–Partie 3: Détermination du temps de prise et de la stabilité (March). Comité Européen de Normalisation (CEN), AFNOR, Paris, France.

[33] US EPA, (United States Environmental Protection Agency (US EPA). 2000. In: Jackson, L.E., Kurtz, J.C., Fisher, W.S. (Eds.), *Evaluation Guidelines for Ecological Indicators*.

EPA/620/R-99/005, US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Research Triangle Park, NC.

CHAPITRE III

CARACTERISATIONS PHYSICO- CHIMIQUES DES SEDIMENTS DE DRAGAGE

Chapitre III : Caractérisations physico-chimiques des sédiments de dragage.

Introduction

L'étape de caractérisation est une étape indispensable pour connaître les caractéristiques et le niveau de pollution des sédiments, aussi bien d'un point de vue physique, chimique ou minéralogique. Ce n'est qu'à partir de cette connaissance qu'on pourra envisager une voie de valorisation, en prenant compte de la réactivité potentielle des sédiments lorsqu'ils seront introduits dans un matériau de construction.

Dans ce chapitre nous présenterons, la préparation des sédiments de dragage pour les analyses ainsi que la détermination des compositions minéralogiques, chimiques et leurs distributions granulométriques. A cela s'ajoutera la connaissance des caractéristiques physiques de ces sédiments.

III.1 Préparation des échantillons

Afin de conserver les propriétés chimiques des sédiments prélevés, les échantillons ont été stockés dans des récipients hermétiques à 4°C, comme recommandé par l'Agence de l'Eau[1].

Après séchage et concassage, les sédiments ressemblent à un granulat qui montre une granulométrie allant de fines à cailloux (plusieurs millimètres). Les deux sédiments sont relativement fragiles : une pression modérée entre les doigts suffit pour en briser la plupart. On a donc choisi pour la suite de notre travail de préparer les matériaux selon la norme NF X 31-101[2], en réduisant les mottes après séchage à 40° C jusqu'à ce que la masse soit constante, suivit d'un broyage puis d'un tamisage jusqu'à obtention d'un diamètre inférieur à 2 mm, cette fraction est considérée représentative des sédiments bruts.

Le schéma de quartage des différents sédiments de dragage est représenté par la figure III.1 qui suit.

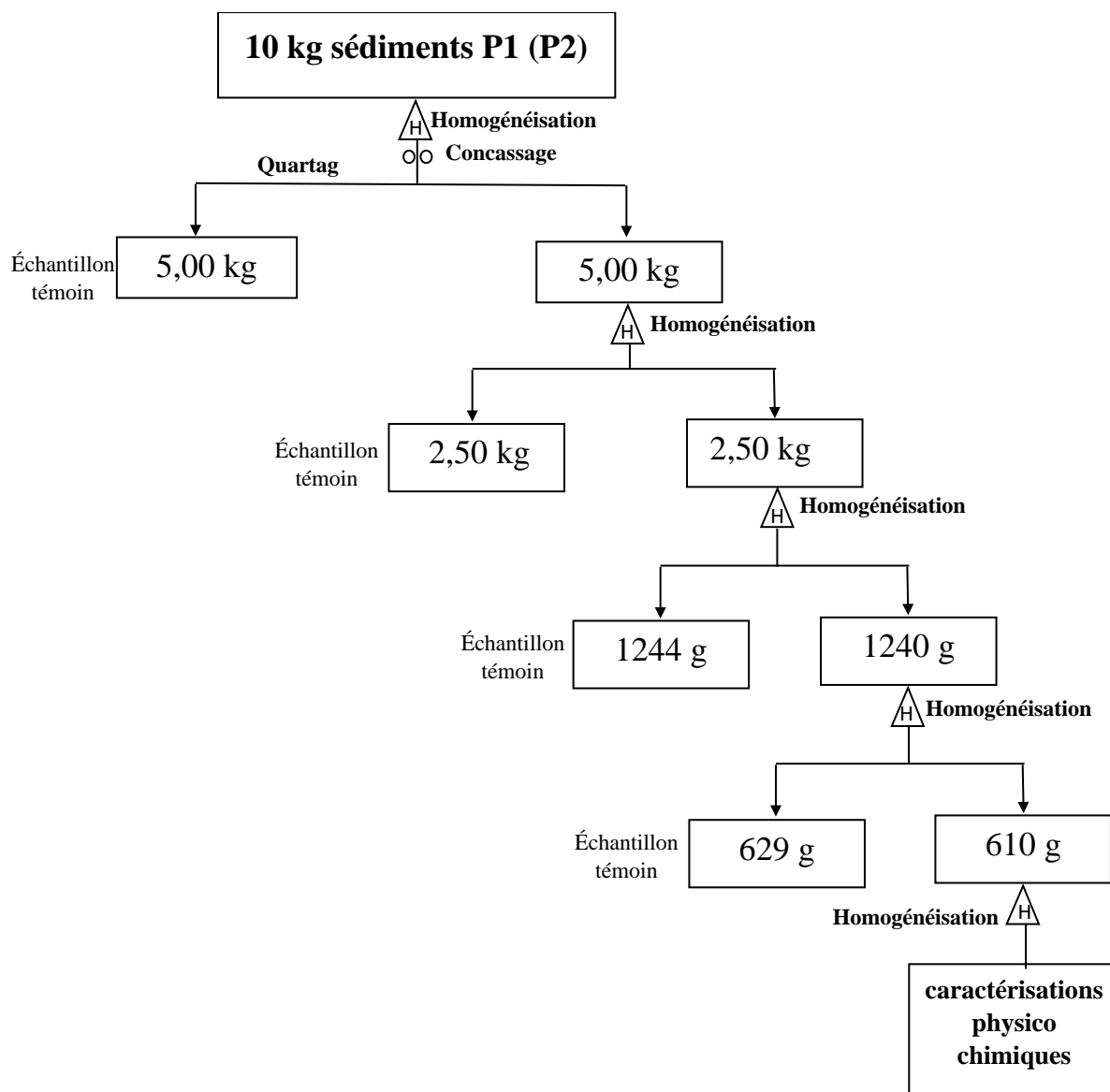


Figure III.1: Quartage des échantillons de dragage P1 et P2

III.2 Caractérisations physiques

III.2.1 Analyse dimensionnelle

D'après les résultats d'analyse granulométrique (Figure III.2 et III.3), la granulométrie des sédiments est très variable. À partir de la répartition granulométrique des deux sédiments.

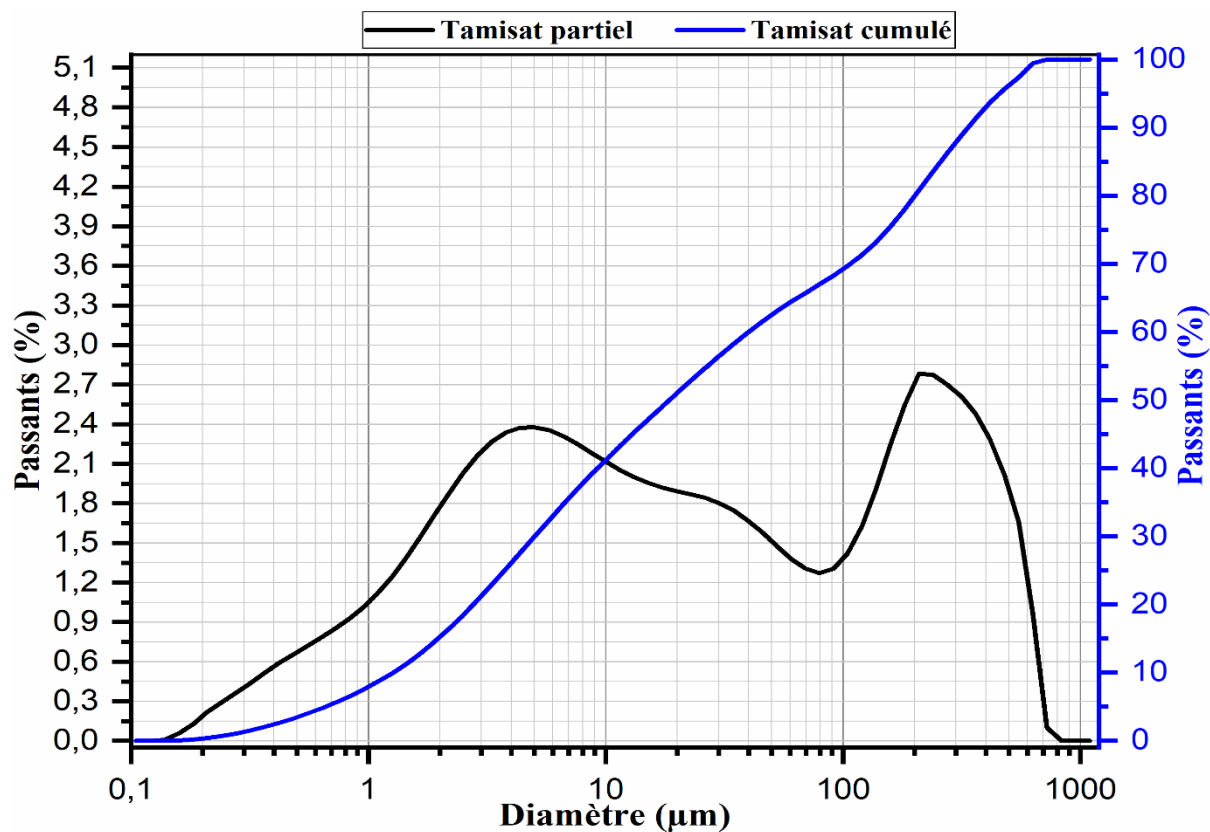


Figure III.2: Courbes granulométrique des échantillons (P1).

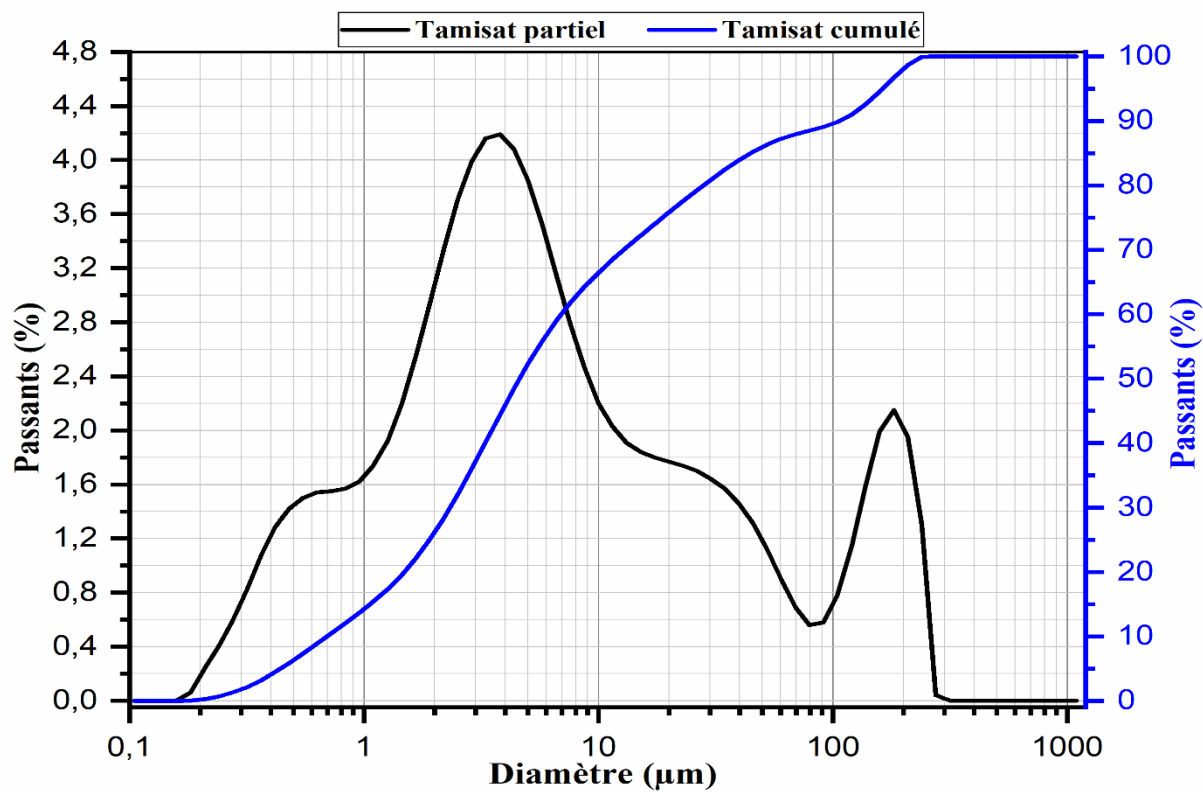


Figure III.3: Courbes granulométrique des échantillons (P2).

Les Figures III.2 et III.3 présentent les distributions des tailles des particules des sédiments P1 et P2. La distribution est trimodale pour échantillon P1 et quadri modale pour l'échantillon P2. P1 est plus grossier que P2, justifié par les quartiles (Tableau III.1), dont le D_{90} qui correspond aux particules de 316,23 et 120,27 μm pour P1 et P2, respectivement. Avec la taille médiane des particules (D_{50}) des sédiments portuaires dragués brute P1 et P2 qui sont de 17,38 et 3,85 μm , respectivement.

Tableau III.1 : Résultats de l'analyse granulométrique par Coulter donnant le nombre de diamètres correspondants.

Paramètres	Sédiment (P1)	Sédiment (P2)
D_{10}	1,26	1,55
D_{50}	17,38	3,85
D_{90}	316,23	120,27

Sur la base des résultats du tableau III.2 et le positionnement des sédiments étudiés dans la classification triangulaire des sols fins (Figure III.4) à la base des résultats du tableau III 2, le sédiment P1 est classé limon et le sédiment P2 est classé limon fin. Néanmoins, en prenant en compte les résultats de la granulométrie laser, le sédiment P1 est classé sable-limoneux et P2 est classé limon fin.

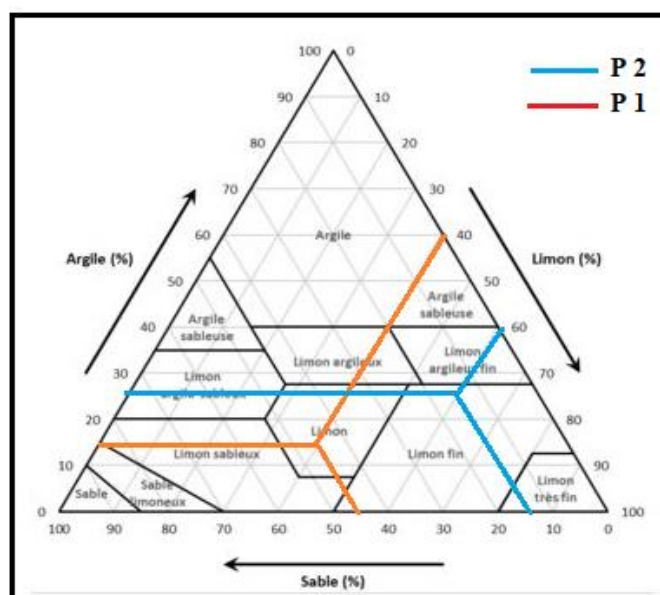


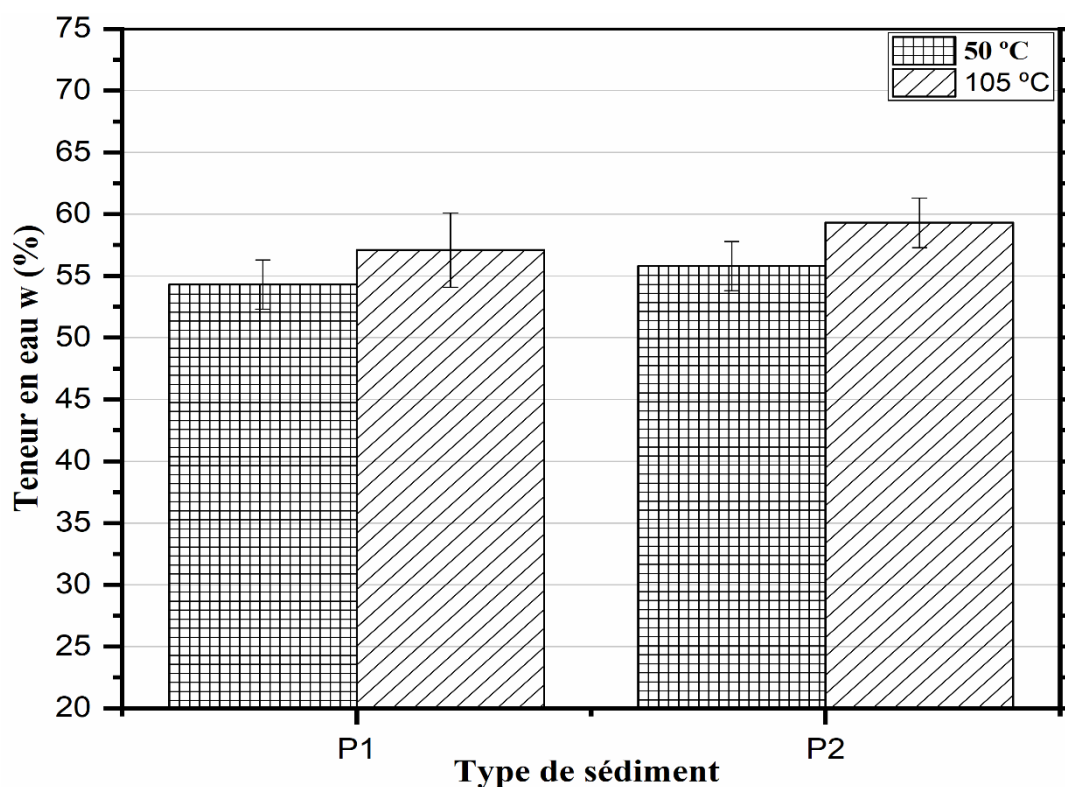
Figure III.4: Positionnement des deux sédiments dans la classification des sols fins.

Tableau III.2: Teneurs en argile, en limon et en sable des sédiments (P1) et (P2).

Paramètres	Sédiment (P1)	Sédiment (P2)
% < 2 μm (Argile) (%)	14,13	24,98
2 μm < % < 63 μm (Limon) (%)	40,98	62,24
63 μm < % (Sable fin) (%)	45,89	13,78

III.2.2 La teneur en eau

La valeur moyenne de la teneur en eau (Figure III.5) est respectivement de 57,1 et 59,3% après séchage à 105°C, par contre la teneur en eau à 50 °C donne des valeurs 54,3 et 55,4 %, respectivement. La différence entre les valeurs de 50 et 105 °C est très peu significative, surtout en tenant compte de l'écart-type. Ce qui implique qu'il y a très peu ou presque pas de matière organique dégradable entre 50°C et 105°C[3].

**Figure III.5:** Teneur en eau naturelle des sédiments (P1 et P2).

III.2.3 Les limites d'Atterberg

La Figure III.6 représente les valeurs de la limite de liquidité (W_L), la limite de plasticité (W_P) ainsi que les indices de plasticités (I_P) pour les sédiments P1 et P2

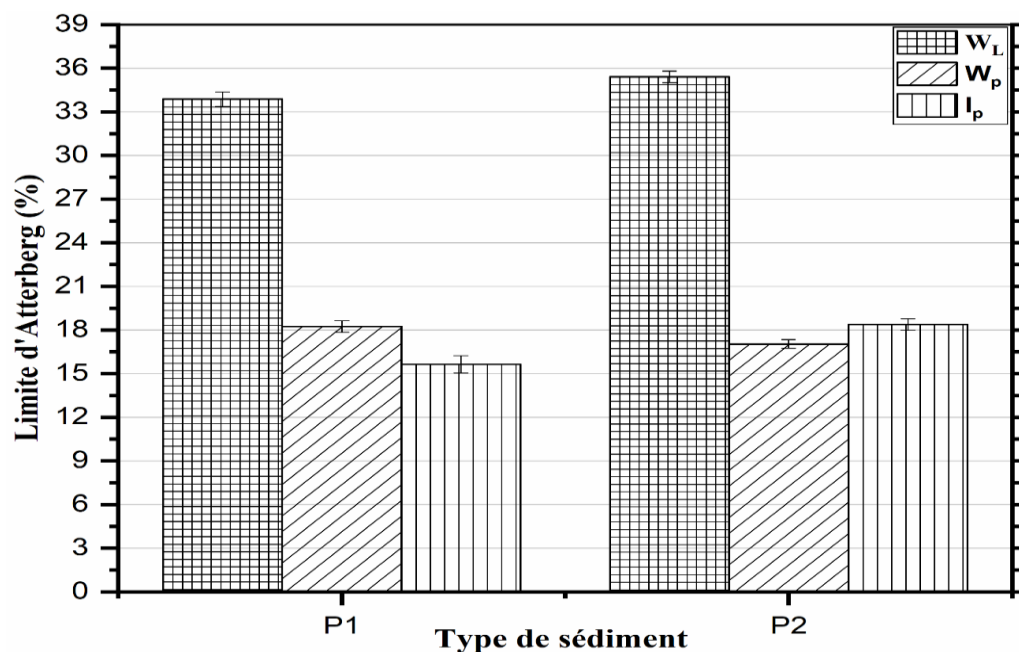


Figure III.6: Limites d'Atterberg des sédiments.

Les limites de liquidité (W_L) sont de 33,87 % et de 18,23 % et la limite de plasticité (W_P). Ceci induit un indice de plasticité de 15,64 %. Ces valeurs sont très proches de celles obtenues sur le sédiment P2 ($W_L = 35,4$ %, $W_P = 17,03$ % et $I_P = 18,37$ %). La classification sur le diagramme de Casagrande révèle que les sédiments P1 et P2 sont des argiles peu plastiques. La consistance très molle des sédiments P1 et P2 du port de Béjaia est causée par leurs fortes teneurs en eau. La fraction argileuse des sédiments P1 et P2 est caractérisée par un faible potentiel de gonflement [4].

III.2.4 pH (potentiel Hydrogène) des suspensions des sédiments P1 et P2

Le pH des sédiments de dragage est une détermination importante car elle joue un rôle sur la fixation des métaux en limitant leur mobilisation. Trois échantillons sont prélevés pour chaque type de sédiment puis ils sont placés sous agitation magnétique pendant 15 min dans 5 fois le volume d'eau déminéralisée. Les suspensions sont ensuite disposées dans une pièce climatisée à 20°C pendant 2 heures, délai au bout duquel l'équilibre est observé. L'opération est poursuivie jusqu'à la stabilisation des valeurs (Tableau III.3). Le pH-mètre utilisé est du type HACH Lange DR 2800 eco. Selon ces résultats, le pH varie entre 8,9 et 8,5 respectivement pour P1 et P2.

Ces valeurs de pH nous renseignent sur l'environnement des suspensions qui est basique, ce qui diminue la solubilité et la mobilité des métaux lourds qui sont beaucoup plus mobiles dans un milieu acide ($\text{pH} < 7$). Par ailleurs, il a été démontré qu'à pH basique à neutre, les métaux lourds existant dans les milieux aquatiques sont fixés par les carbonates [5].

Tableau III.3: pH des sédiments de dragage (P1) et (P2).

Temps (min)	pH (P1)	pH (P2)
30	8,82	8,80
60	8,83	8,84
90	8,83	8,84
120	8,83	8,84
150	8,84	8,86
180	8,81	8,85
210	8,79	8,85
240	8,76	8,84
270	8,75	8,80
300	8,71	8,78
330	8,69	8,76
360	8,67	8,70
390	8,67	8,70
420	8,67	8,70

III.2.5 Valeurs au bleu de méthylène

Les valeurs sont de 2,75 et 3,25 respectivement pour P1 et P2. Ces valeurs les classent dans la nature du sol limoneux peu plastique. D'après ces résultats, les sédiments contiennent une faible fraction argileuse. Ces résultats réaffirment ce qui avait été observé lors de la détermination de l'indice de plasticité, ils contiennent peu d'argiles et présentent donc un caractère peu plastique.

III.2.6 Masse volumique absolue

Les masses volumiques absolues des deux sédiments sont de 2,72 et 2,67 g/cm^3 respectivement pour P1 et P2, ces valeurs sont très proches. Cependant, elles restent dans la

gamme de celles des sols solides, ce résultat peut être expliqué par la présence de la matière organique ou de forte concentration en carbonate de calcium pour les sédiments P2[6].

III.2.7 Teneur en carbonate de calcium

Les teneurs en carbonate de calcium (CaCO_3) des sédiments P1 et P2 sont respectivement 31,89 et 34,05 %, ces valeurs classent les sédiments du port de Béjaia parmi les matériaux moyennement calcaires (NF P 94-048)[7], qui indiquent que le potentiel des sédiments du port de Béjaia à retenir les métaux lourds est assez important.

La présence de carbonate de calcium dans les sédiments du port de Béjaia donne la possibilité de leur valorisation dans la formulation d'un mortier et des bétons pour donner des résistances élevées. Car les carbonates de calcium sont des matières inertes et ne réagissent pas avec le ciment. Ces effets de fortes teneurs en CaCO_3 attribuent aux sédiments les caractéristiques d'une roche calcaire, à savoir l'aptitude à s'hydrater plus rapidement qu'un ciment [8].

III.2.8 Composition chimique des différents sédiments

Les analyses par fluorescence aux rayons X (FRX) ont montré selon le Tableau III.4, que les sédiments P1 et P2 contiennent respectivement 42,88% et 45,21% de dioxyde de silicium SiO_2 , respectivement. Ce composé caractérise la fraction sableuse et limoneuse, avec la composition respective de 38,95% et 40,48% d'oxydes alcalins et alcalino-terreux (Oxyde de Calcium CaO , Oxyde de Magnésium MgO , Alumine Al_2O_3 , Oxyde ferrique Fe_2O_3 , Oxyde de sodium Na_2O_3 et Oxyde de Potassium K_2O). Ces oxydes marquent la présence d'argile dans les sédiments, notons que les sédiments renferment des traces de SO_3 , caractérisant la présence de sulfures.

Les valeurs du rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sont plus élevé dans le sédiment P2 (3,04) par rapport à P1 (2,89). Les teneurs en alcalino-terreux (CaO et MgO) sont quantitativement et significativement élevés dans les deux sédiments, Les matériaux analysés sont donc riches en éléments carbonatés susceptibles d'occasionner des porosités élevées dans les produits de cuisson qui en découlent. Les teneurs en Fe_2O_3 et TiO_2 sont de 5,5, 5,58 % et 0,67, 0,68% respectivement pour P1 et P2. Ces oxydes sont responsables de la coloration rougeâtre des matériaux après cuisson. Les pertes au feu des deux sédiments sont de 17,10 et 16,05%, respectivement pour P1 et P2. Ces valeurs caractérisent le départ de l'eau d'hydratation, de

l'eau de constitution, la combustion des matières organiques et la décomposition des carbonates. Les pertes aux feux du sédiment P2 sont supérieures à P1.

Tableau III.4: Teneurs en oxydes des sédiments du port de Bejaia (P1) et (P2).

Les oxydes	Teneurs (mass%)	
	Sédiment P1	Sédiment P2
SiO₂	42,88	45,21
Al₂O₃	14,80	14,88
Fe₂O₃	5,50	5,58
MnO	0,04	0,03
MgO	2,00	2,04
CaO	13,52	13,34
Na₂O₃	1,40	1,31
K₂O	1,73	1,79
TiO₂	0,67	0,68
P₂O₅	0,16	0,23
SO₃	0,70	0,01
LOI	17,10	16,05

III.2.9 Analyses minéralogiques des sédiments

Les résultats de l'analyse minéralogique déterminées par DRX sont présentés dans les Figures III.7 et Figure III.8, respectivement pour P1 et P2. Selon ces résultats les sédiments P1 et P2 ont la même composition minéralogique, et mettent en évidence la prédominance du Quartz (SiO₂), de la calcite (CaCO₃), de l'albite (NaAlSi₃O₈), de la kaolinite (Al₂Si₂O₅(OH)₄, de la muscovite (KAl₂(AlSi₃O₁₀)(OH, F)₂) et de l'hématite (Fe₂O₃). Les pics les plus importants de ces phases sont de 21,95, 23,05, 25,95, 12,65, 8,45 et 32,65 °2θ respectivement pour de quartz, calcite, albite, kaolinite, muscovite et l'hématite.

Les phases sont distinguées par une notable différence dans les intensités des pics caractéristiques de différentes phases minéralogiques des sédiments P1 et P2.

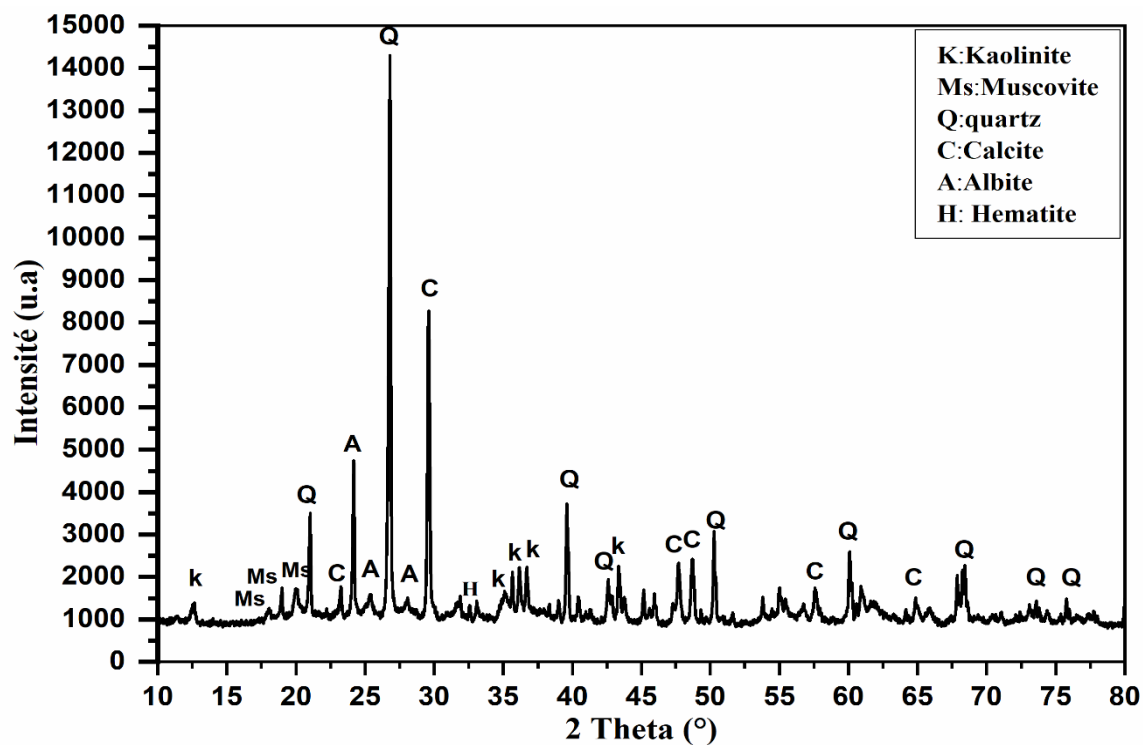


Figure III.7 : Diagramme de DRX du sédiment P1.

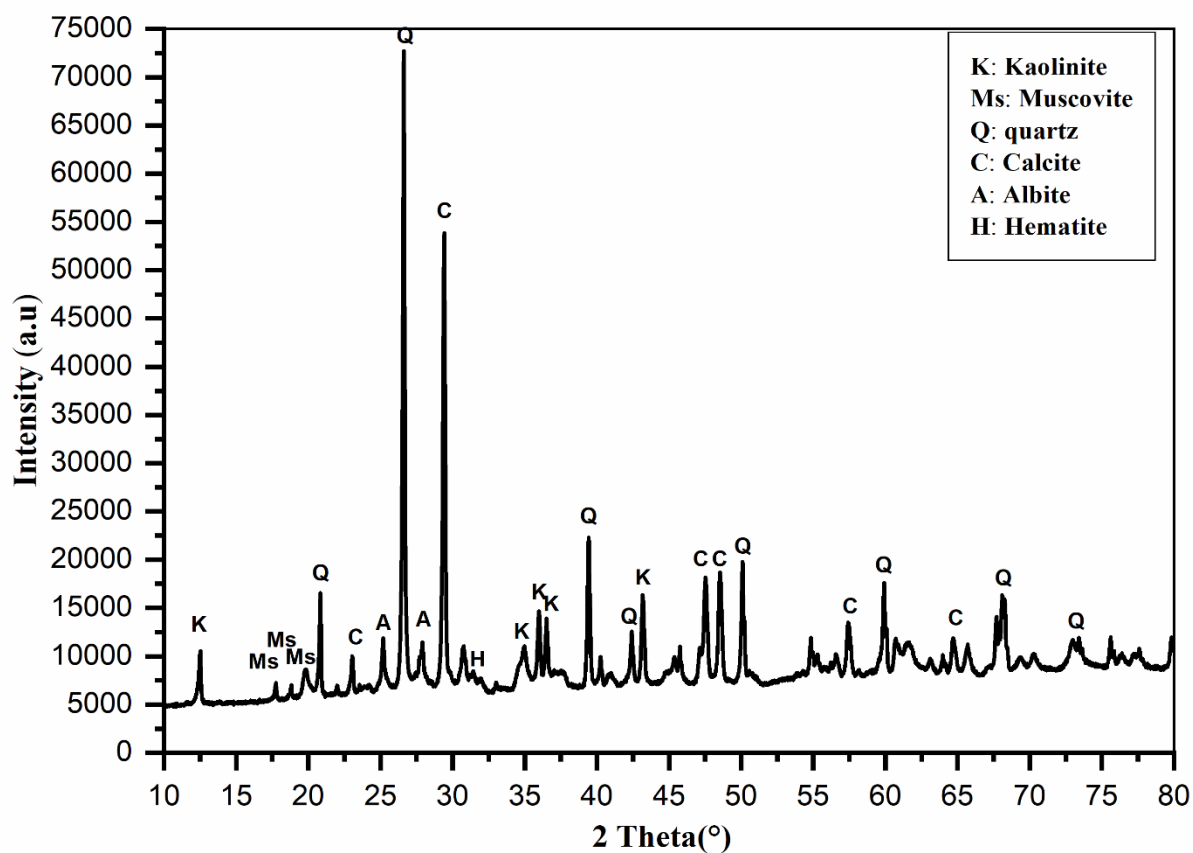


Figure III.8 : Diagramme de DRX du sédiment P2.

III.2.10 Comportement thermique des différents sédiments

Selon les résultats portés par les courbes ATD / ATG (Figure III.9 et III.10) des deux sédiments P1 et P2, on constate que trois principaux événements se sont produits. La perte de masse entre 30 et 200°C qui est de 1,51 et 2 % en poids pour les sédiments P1 et P2 respectivement qui sont attribuées au départ de l'eau physiquement absorbée, caractérisé par un pic endothermique se trouvant à environ 70°C. La perte de masse entre 200 et 600°C est de 5,22 et 6% pour les sédiments P1 et P2, respectivement. Dans cette gamme de températures, deux effets thermiques pourraient être observés. Le premier pic exothermique a été enregistré dans la gamme de température 200 – 380°C, attribué à la combustion des matières organiques. Le deuxième pic endothermique caractérisant la déshydroxylation de la kaolinite pour donner du métakaolin a été observé à 490 °C pour les deux sédiments P1 et P2[9].

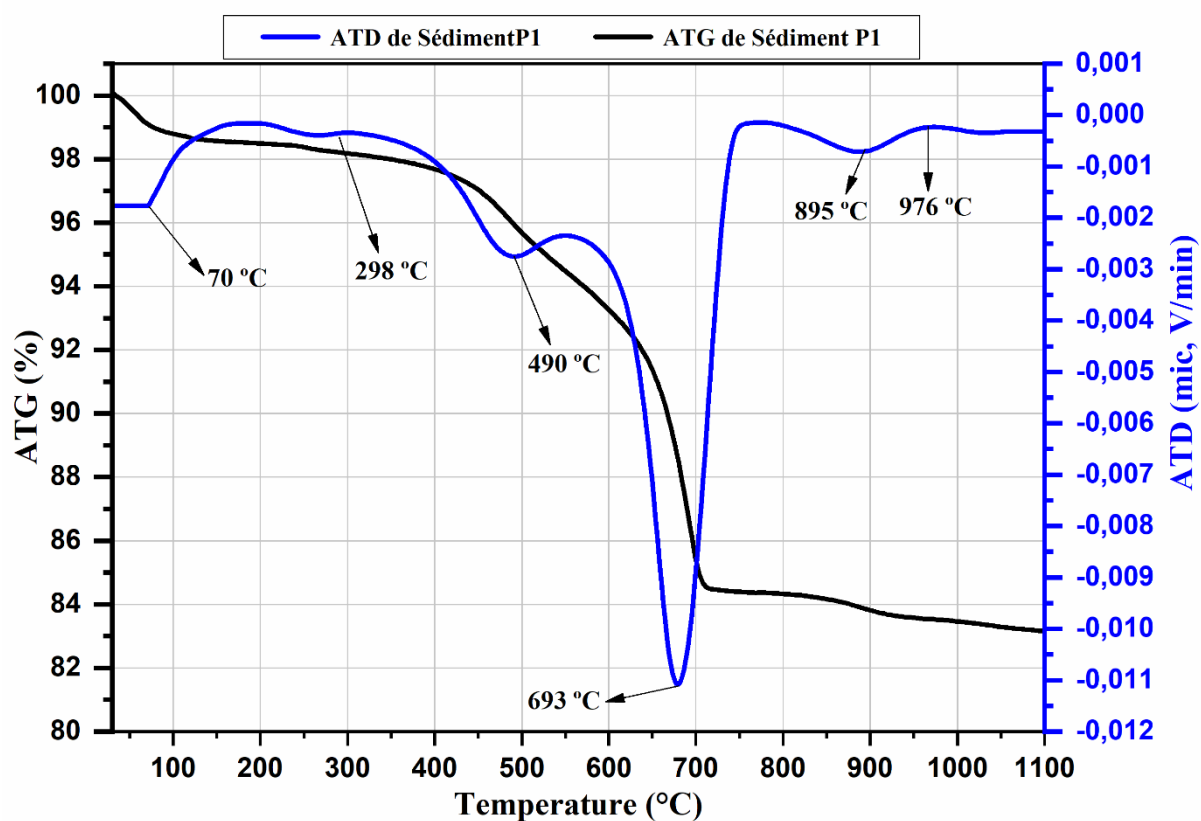


Figure III.9 : Courbe ATD/ATG du sédiment P1.

Dans la plage de température de 600 à 800°C, La perte de masse enregistrée est de 8,95 % pour le sédiment P1 et de 9,8% pour le sédiment P2. Cette perte est due à la décomposition des carbonates avec la libération du CO₂. Les sédiments P1 et P2 contiennent pratiquement le même taux de calcite, qui est caractérisé par la même température endothermique [9]. Enfin entre 800-1100°C, des pertes en masse enregistrées sont de 1,16% et 1,2% respectivement pour

P1 et P2 ont été observées. Cela pourrait être attribué à la recristallisation et à la réorganisation de métakaolinite pour donner des spinelles aluminium-silicium comme indiqué par de léger épaulement exothermique pour les deux sédiments.

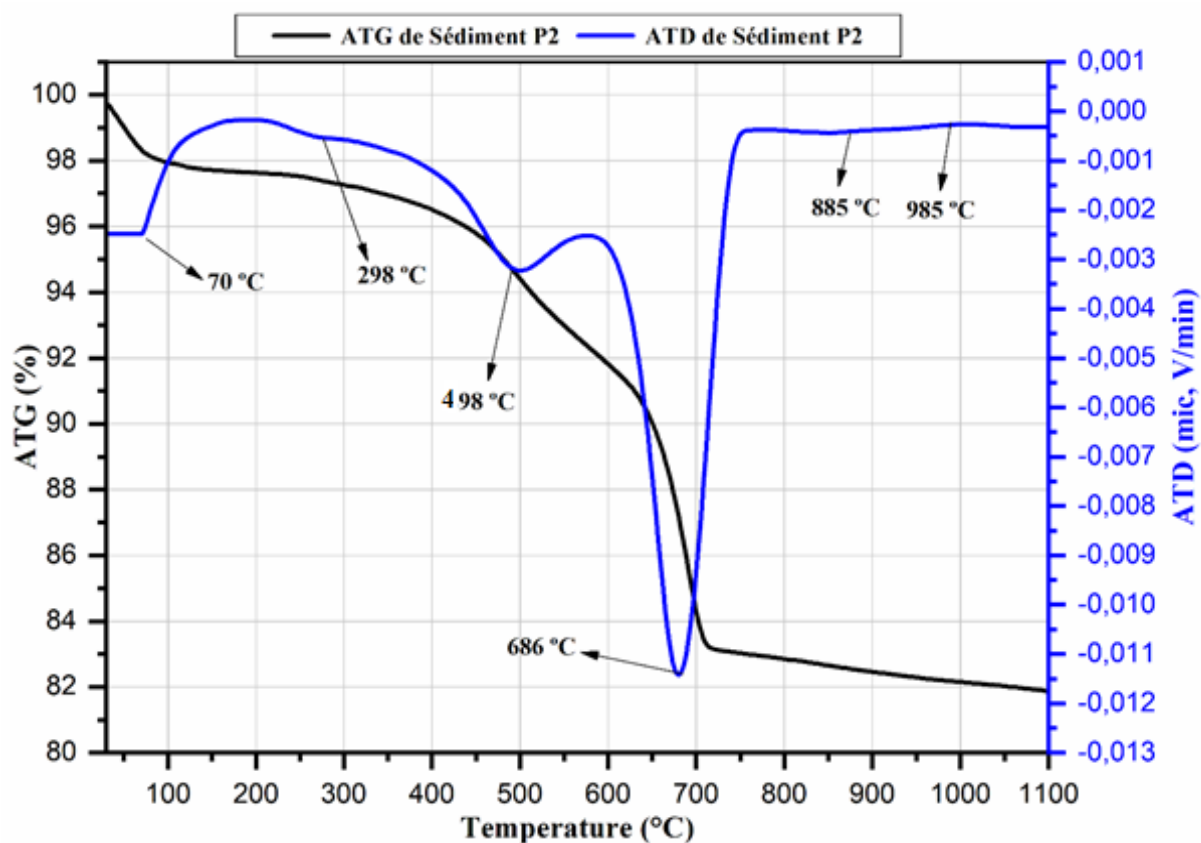


Figure III.10 : Courbe ATD/ATD du sédiment P2.

III.3 Caractérisation environnementale

Les résultats de ces analyses sont donnés et comparés aux seuils réglementaires donnés dans le tableau III.5. Cette étude indique de fortes concentrations en polluants inorganiques à savoir les métaux lourds tels que le Nickel (Ni), le Chrome (Cr) et Zinc (Zn). La plupart des métaux lourds, existant dans la fraction solide des sédiments P1 et P2, présentent des teneurs inférieures aux valeurs limites de concentration en éléments traces dans les sols qui fixent les seuils de l'acceptabilité de l'épandage des déchets. Un léger dépassement de la concentration limite du Ni est noté dans le sédiment P1.

Tableau III.5: Analyse environnementale des sédiments de dragage du port de Béjaia P1 et P2.

Contaminant (ppm)	Bassin de port de Béjaia		Seuils recommandés MATE (Algérie) (mg/kg de Sédiments Secs)
	Point 1	Point 2	
Ba	400	249	/
Co	/	61	/
Cr	200	138	250
Cu	100	44	/
Ni	100	56	75
Pb	100	33	250
Zn	200	117	500

III.4 Conclusion

Selon les résultats de caractérisation physique-chimique des sédiments P1 et P2 nous remarquons que :

La caractérisation physique a montré que les deux échantillons peuvent être considérés comme des sols fins, avec une fraction de sable plus important pour l'échantillon P1(40,78%) et P2 (13,78%). On voit aussi que ces propriétés ont permis de classer les deux échantillons parmi les limons et le limon fin respectivement et que ce sont des sols peu plastiques, avec des indices de plasticité égale à 16,87% pour P1 et 16,26% pour P2.

Les masses volumiques absolues sont de 2,72 et 2,67 g.cm⁻¹, respectivement pour P1 et P2 respectivement, cette différence due à la présence de calcite qui est plus élevée pour P2 (34,05%) que pour P1 (31,89%).

Les résultats obtenus pour l'essai VBS au bleu de méthylène montre que l'échantillon P1 est plus propre que l'échantillon P2.

L'analyse minéralogique des deux sédiments P1 et P2 a montré la présence majoritaire de Quartz et Calcite. La présence de muscovite et de kaolinite est aussi remarquée à des intensités des pics relativement faibles.

Selon l'analyse environnementale des deux sédiments, il apparaît que les teneurs en métaux lourds sont toujours aux valeurs limites recommandées par MATE. Pour ailleurs, un léger dépassement de concentration en Ni est remarqué dans le sédiment P1.

Références bibliographiques

- [1] Life 2002, Méthodes de Gestion et de Réutilisation des Sédiments Pollués. Projet européen LIFE réalisé par IN VIVO, l'Agence de l'eau Artois Picardie, Le Pôle de Compétence des sites et sols pollués.
- [2] NF, X. (1992). X 31-101. Qualité des sols, Préparation d'un échantillon de sol pour l'analyse physicochimique, séchage, émottage et tamisage à 2.
- [3] Smidt, E., & Lechner, P. (2005). Study on the degradation and stabilization of organic matter in waste by means of thermal analyses. *Thermochimica acta*, 438(1-2), 22-28.
- [4] Snethen, D. (1980). Expansive soils in highway subgrades: summary. US Dept. Of Transportation, Federal Highway Administration, Offices of Research and Development, Implementation Division.
- [5] Scoullou, M.J., Pavlidou, A.S. Determination of the Lability Characteristics of Lead, Cadmium and Zinc in a Polluted Mediterranean Brackish-Marine Interface System. *Water, Air, & Soil Pollution* 147, 203–227 (2003).
- [6] Maritan, L., Nodari, L., Mazzoli, C., Milano, A., & Russo, U. (2006). Influence of firing conditions on ceramic products : experimental study on clay rich in organic matter. *Applied Clay Science*, 31(1-2), 1-15.
- [7] Standard, N. F. P 94-048 (2003) Sols : Reconnaissance et Essais–Détermination de la teneur en calcite–Méthode du calcimètre. January, AFNOR.
- [8] Zajac, M., Rossberg, A., Le Saout, G., & Lothenbach, B. (2014). Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Composites*, 46, 99-108.
- [9] Kłosek-Wawrzyn, E., Małolepszy, J., & Murzyn, P. (2013). Sintering behavior of kaolin with calcite. *Procedia Engineering*, 57, 572-582.

CHAPITRE IV

ETUDE DE LA VALORISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE DANS LES MORTIERS CIMENTAIRES

Chapitre IV : Etude de la valorisation des sédiments de dragage dans les mortiers cimentaires

Introduction

Le but de ce travail est d'étudier le comportement des mortiers à base de sédiments naturels et calcinés. Différents taux de sédiments naturels et calcinés sont utilisés pour confectionner des mortiers, avec substitution de ciment. Les échantillons sont nommés M0, MS10, MS20, MS30, MS40, MSC10, MSC20, MSC30 et MSC40, respectivement, pour les mortiers à base de sédiments naturels et calcinés. Les caractéristiques des mortiers ont été faites à l'état frais (la maniabilité et la masse volumique apparente) et à l'état durci (caractérisation physique, mécanique, minéralogique, microstructurale, thermique et environnementale) à 7, 28 et 90 jours. L'objectif de cette étude est d'avoir un mortier écologique de qualité comparable à un mortier témoin à base de sable et ciment.

IV.1 Protocole expérimental de la valorisation

Pour l'élaboration d'un mortier, plusieurs matériaux ont été utilisés tel que le ciment, le sable normalisé et les sédiments. Les caractéristiques des matières premières sont les suivantes :

- Le ciment Portland CEM I 52.5N utilisé est conforme à la norme européenne EN 197-1 (EN 197-1., 2012) [1]. Ce ciment est couramment utilisé dans les études du recyclage des sous-produits car il ne contient pas d'ajouts.
- Le sable utilisé pour la formulation du mortier est siliceux (ISO 679 : 2009) à grains arrondis, d'origine fluviale et à granulats, son diamètre maximum est 2 mm.
- Les sédiments de dragage portuaires (P2) utilisés dans cette étude ont été dragués depuis le port de Bejaia.
- Afin d'obtenir une pouzzolane artificielle, le sédiment a été calciné à 750 ° C (1 heure) avec une vitesse de chauffage de 10 °C / min. le sédiment calciné est ensuite broyer puis tamiser (Figure IV.1).

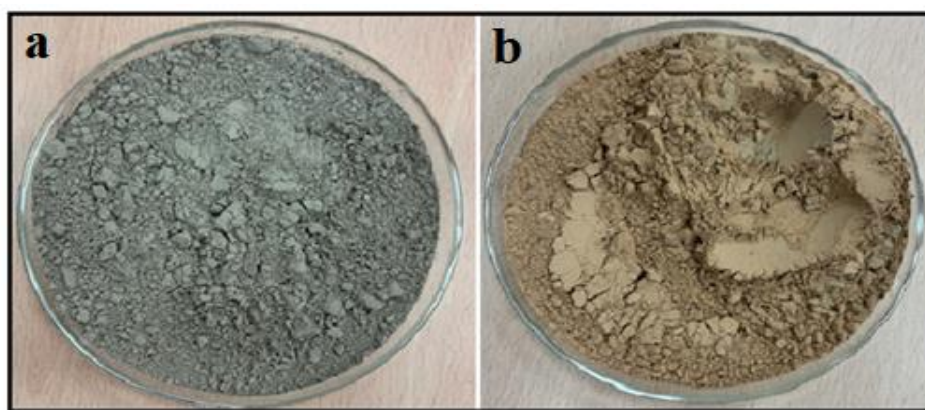


Figure IV.1: Photo du sédiment calciné (a) et non calciné (b).

IV.2 Préparation des échantillons

Les mortiers de référence (trois éprouvettes) sont constitués de (450 ± 2) g de ciment, (1350 ± 5) g de sable et (225 ± 1) g d'eau. Les sédiments naturels et calcinés sont tamisés à $63 \mu\text{m}$ [2]. Quatre substitutions de ciment ont été effectuées pour les sédiments naturels et calcinés (10, 20, 30 et 40 % de ciment). Neuf échantillons ont été élaborés, selon la norme ASTM C109 [3]. Les proportions des matières premières sont présentées dans le tableau IV.1 suivant :

Tableau IV.1: Proportion des matières premières dans le mortier.

Échantillon	Ciment (g)	Sable (g)	Sédiment naturel (g)	Sédiment calciné (g)
M0	450	1350	0	0
MS10	405	1350	45	0
NS20	360	1350	90	0
MS30	315	1350	135	0
MS40	270	1350	180	0
MSC10	405	1350	0	45
MSC20	360	1350	0	90
MSC30	315	1350	0	135
MSC40	270	1350	0	180

IV.3 Caractérisation des matières premières

Les compositions chimiques, minéralogiques et paramètres de caractérisation physico-chimiques et mécaniques des matériaux élaborés sont d'une importance primordiale afin de pouvoir, étudier leurs comportements antérieurs.

IV.3.1 Analyse dimensionnelle

a- Du sédiment naturel et calciné

La distribution granulométrique des sédiments naturels et calcinés est illustrée sur la figure VI.2. La différence entre les deux distributions est remarquable dans la quantité des fines, les sédiments naturels sont plus fins que les sédiments calcinés.

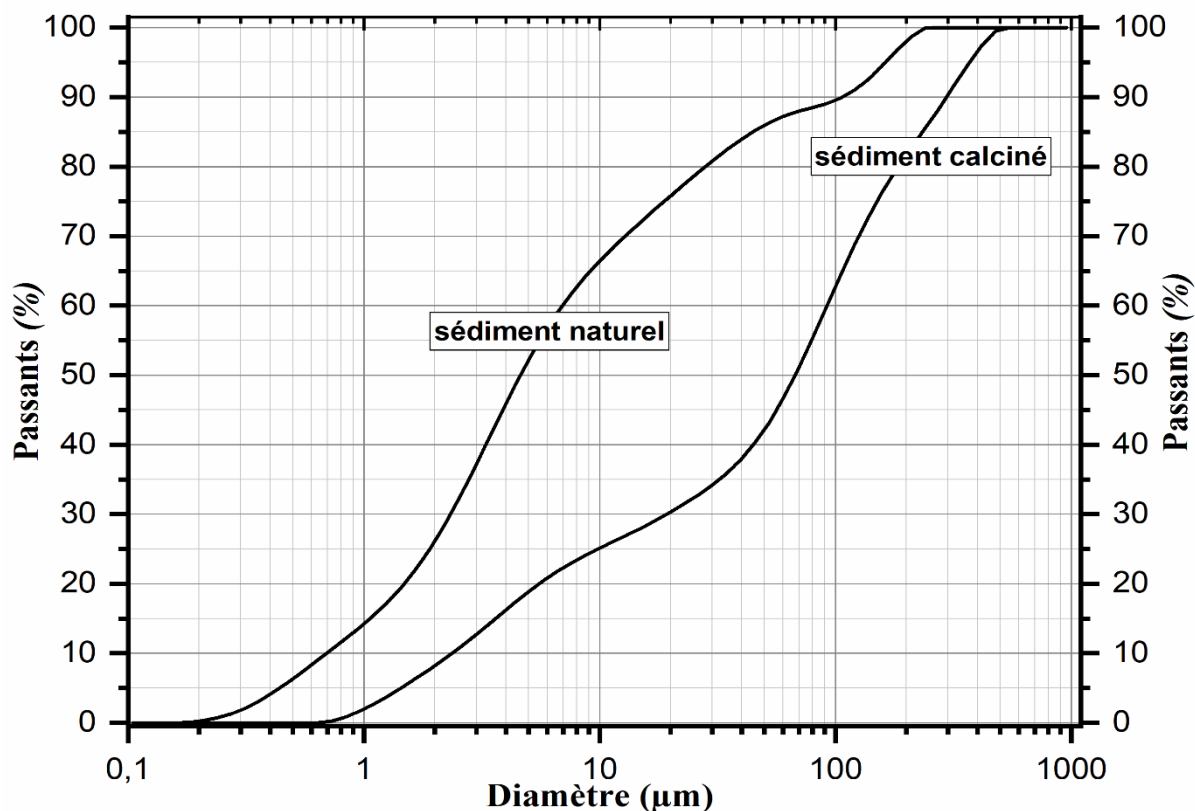


Figure IV.2: Analyse granulométrique des sédiments naturels et calcinés.

b- Du sable

La composition granulométrique déterminée par tamisage (tableau IV.2) est conforme aux exigences des normes ISO 679 : 2009 [4].

Tableau IV.2 : Analyse granulométrie du sable normalisé.

Ouverture des mailles (mm)	0,08	0,16	0,5	1,00	1,60	2,00
Refus cumulés (%)	99 + 1	87 + 5	67 + 5	33 + 5	7 + 5	0

c- Du ciment

Selon le graphe illustré à la figure IV.3, représentant la distribution granulométrique du la taille médiane est égale à 11,6 μm , une distribution bimodale (deux populations) est observée à 0,8 μm et 19,03 μm , signifiant que le ciment est finement constitué.

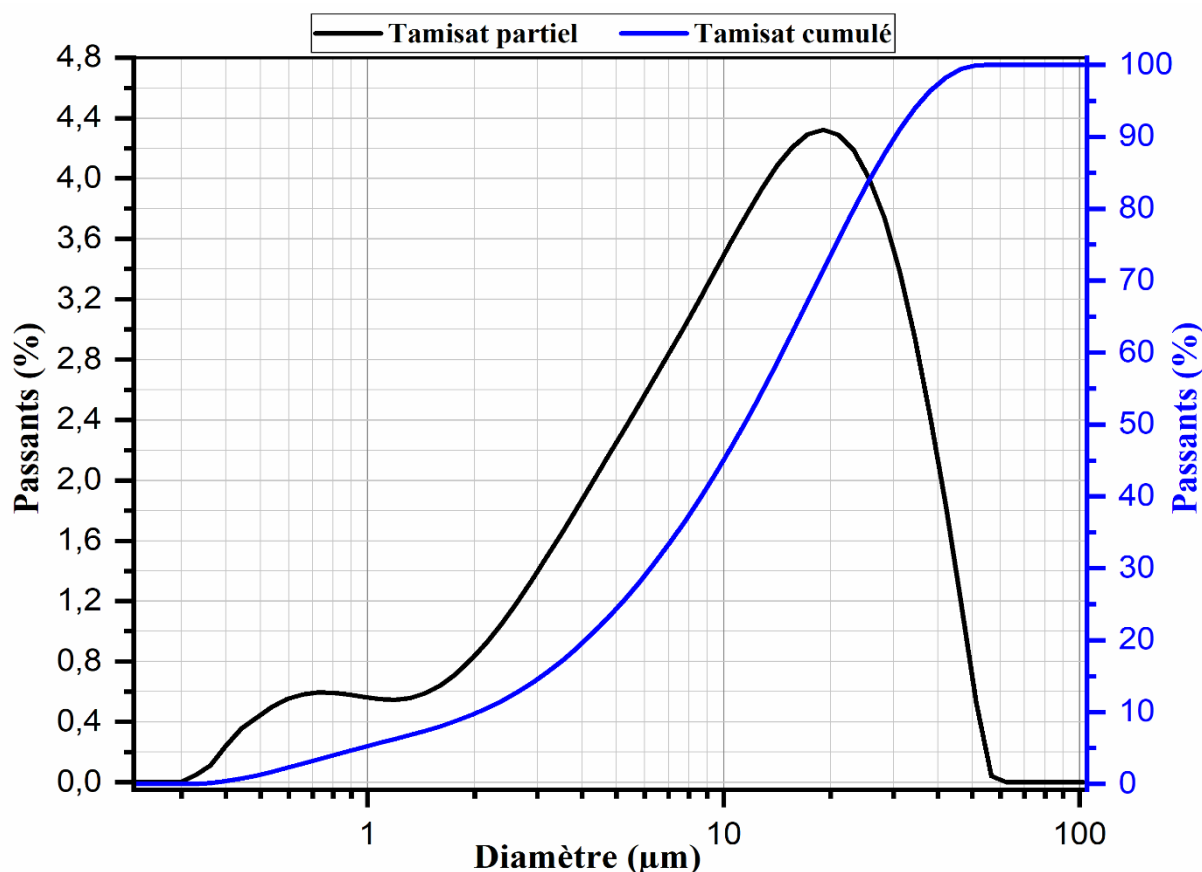


Figure IV.3 : Analyse granulométrique du ciment.

IV.3.2 Masse volumique apparente

Les masses volumiques apparentes des matières premières utilisées pour la formulation des différents mortiers. Lorsque le sédiment est calciné, sa masse volumique augmente (2822 kg/m^3) par rapport au sédiment naturel (2673 kg/m^3), ce qui pourrait être dû à la consolidation et la densification du sédiment au cours du processus de calcination. La masse volumique du ciment est de 3112 kg/m^3 , et celle du sable normalisé, elle est 2640 kg/m^3 .

IV.3.3 Analyse chimique des différentes matières premières

Les résultats de l'analyse chimique des différentes matières premières sont donnés dans le tableau ci-dessous (tableau IV.4). Nous remarquons que le sable est constitué de 90,50% de

silice (SiO_2) et de 4,62 % d'alumine. Le ciment contient des quantités relativement élevées en CaO 61,94%. Le changement de composition entre le sédiment naturel et calciné confirme l'impact du traitement thermique sur la composition chimique. En effet, le réarrangement cristallographique durant la calcination a augmenté sa teneur en silice et en alumine qui deviennent 46,57 % et 16,50%, respectivement. Une augmentation de CaO est enregistrée donnant une teneur de 16,58%. Les pertes au feu sont de 3,49% sont dues aux combustions des matières organiques et au début de décarbonatation des carbonates.

Tableau IV.3 : Analyse chimique des matières premières.

Oxides (wt%)	Sédiment (P2)	Sédiment calciné	Ciment	Sable
SiO_2	44,97	47,57	19,86	90,50
Al_2O_3	14,86	16,50	4,62	4,62
Fe_2O_3	4,86	7,82	3,05	3,05
MnO	0,03	0,03	0,10	0
MgO	2,15	2,36	1,3	0,3
CaO	15,26	16,58	61,94	0,12
Na_2O	1,11	1,79	0,23	0,02
K_2O	2,07	2,08	1,17	0,07
TiO_2	0,69	0,84	0,32	0,13
P_2O_5	0,19	0,25	0,13	0,01
SO_3	0,1	0,1	4,3	0,01
LOI	14,85	3,49	2,63	0,28

IV.3.4 Analyse minéralogique

Le spectre de DRX obtenu pour le sédiment naturel et calciné (Figure IV.4), indique que les principales phases cristallines sont : le quartz, la calcite la muscovite, la kaolinite, l'hématite et l'albite. Une fois soumis au traitement thermique de 750 °C, le sédiment calciné a montré des intensités plus faibles des pics de ces phase cristallines, le pic de diffraction correspondant à la kaolinite disparaît du fait de sa transformation en métakaolinite par phénomène d'hydroxylation de la kaolinite [7].

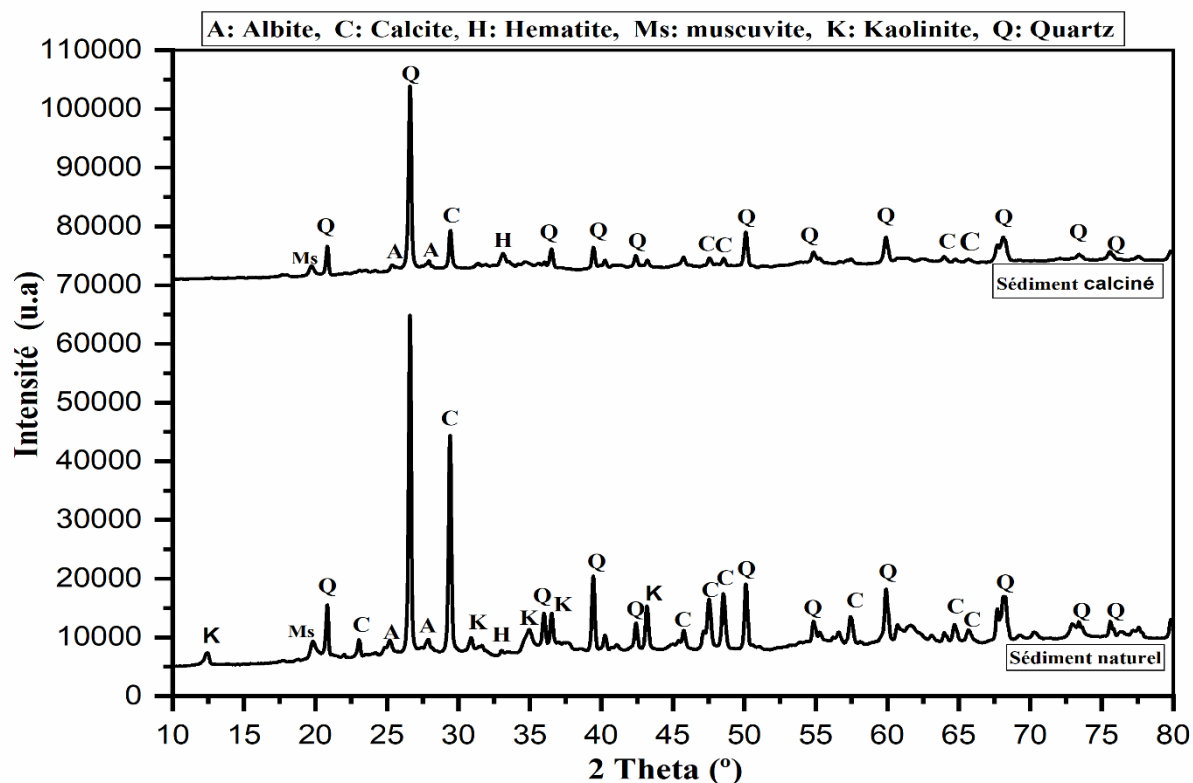


Figure IV.4: Spectre de DRX du sédiment naturel et calciné.

Le spectre de diffraction des rayons X (DRX) du ciment (figure IV.5) indique la présence des phases C_3S (29,4, 32,2 et 42,5 °2 θ) et C_2S (34,3 et 56,3 °2 θ), C_3A (37,8 °2 θ) et C_4AF (38,5 °2 θ). Ces phases correspondent à l'alite, bélite, aluminat tricalcique et ferro-aluminat tétracalcique, respectivement.

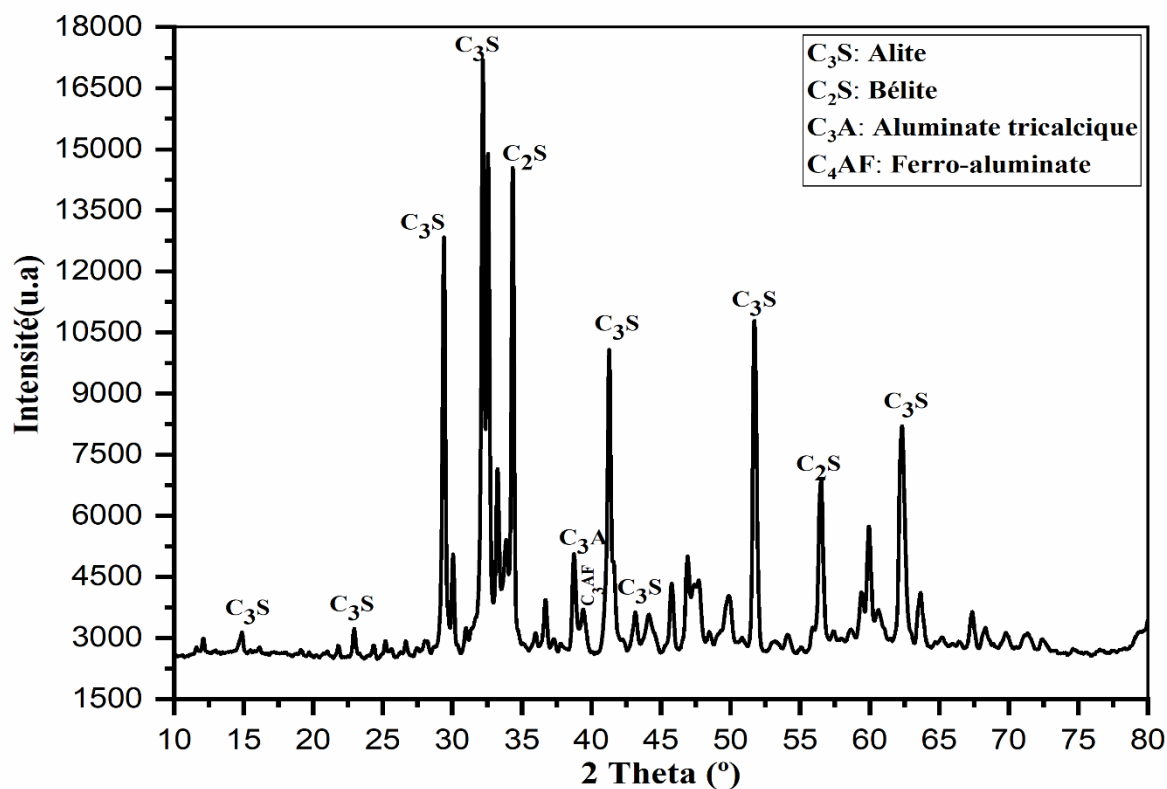


Figure IV.5: Spectre du DRX du ciment.

Selon les résultats de DRX du sable normalisé (Figure IV.6), la phase essentielle existante est le quartz, remarque a des intensités de 21,89, 25,95 et 51,92 °2θ.

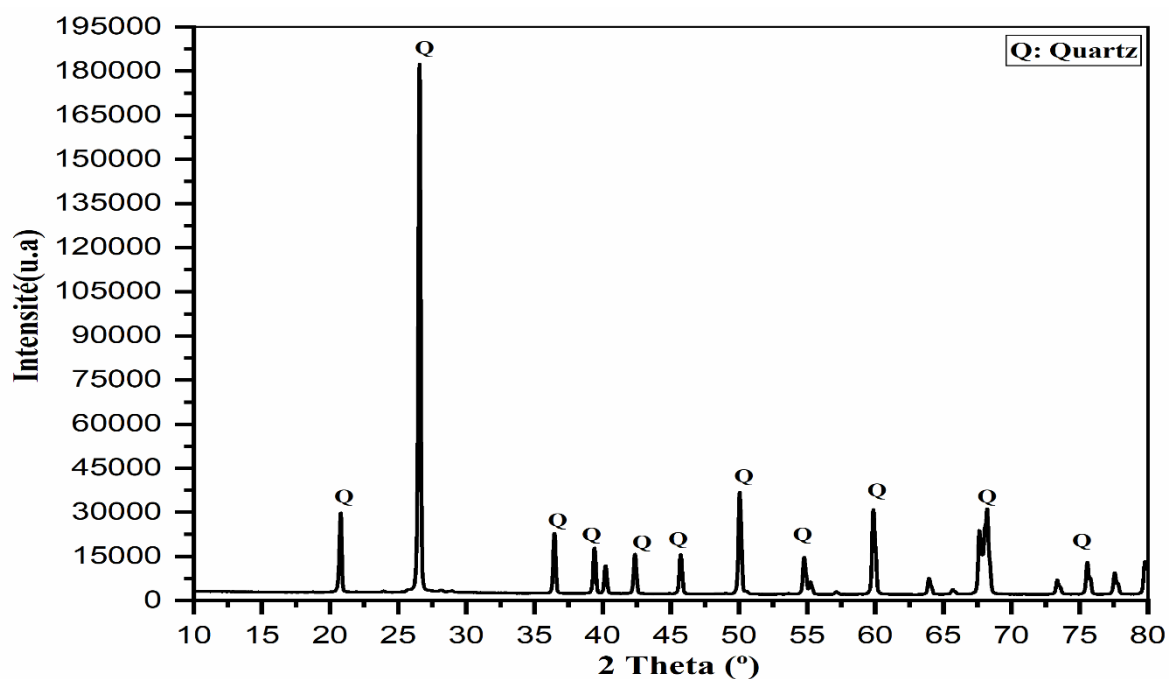


Figure IV.6: Spectre de DRX du sable normalisé.

IV.4 Elaboration des mortiers à base du sédiment de dragage

Les deux types de sédiments (naturel et calciné) sont tamisés à sec à 63 μm . Benezet et Benhassaine [8] ont démontré que les particules de quartz finement broyées (moins de 5 μm de diamètre) sont très actives. Le mortier de référence nommé M0 et les mortiers avec ajout de sédiment naturel MS10, MS20, MS30 et MS40 sont préparés avec ajout de sédiment naturel avec des taux de: 10%, 20%, 30% et 40%. Cependant, les mortiers à base de sédiment calciné, nommés MSC10, MSC20, MSC30 et MSC40 ont des taux de: 10%, 20%, 30% et 40%, respectivement.

Le mélange est composé de 225 ml d'eau (eau du robinet), de 450 g de ciment CMI et de 1350 g de sable standard, avec un rapport eau / liant de 0,5 et un rapport sable / ciment de 3%. La procédure de dosage consiste en une homogénéisation à sec des matériaux pendant 30s, et la quantité d'eau a été ajoutée progressivement. Par la suite, le mélange a été repris à une vitesse lente pendant 30s, et la vitesse du mélangeur est augmenté à un niveau moyen, finalement, la confection est terminée en poursuivant le procédé de malaxage pendant 60 s à une vitesse moyenne [9].

Les mortiers frais sont alors moulés dans des moules à prisme ($4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 16\text{ cm}^3$) pour les tests de résistance à la flexion et à la compression. Ils sont maintenus dans une pièce à 23 ° C pendant 24 heures, suivi d'un démoulage et d'un durcissement à l'eau jusqu'à l'âge des tests (7, 28 et 90 jours). Ceci est d'une grande importance pratique, car les conditions de durcissement réelles sont généralement entre l'air sec et l'immersion dans l'eau.

Les étapes d'élaboration des deux types de mortiers sont résumées dans le schéma technologique de la figure IV.7.

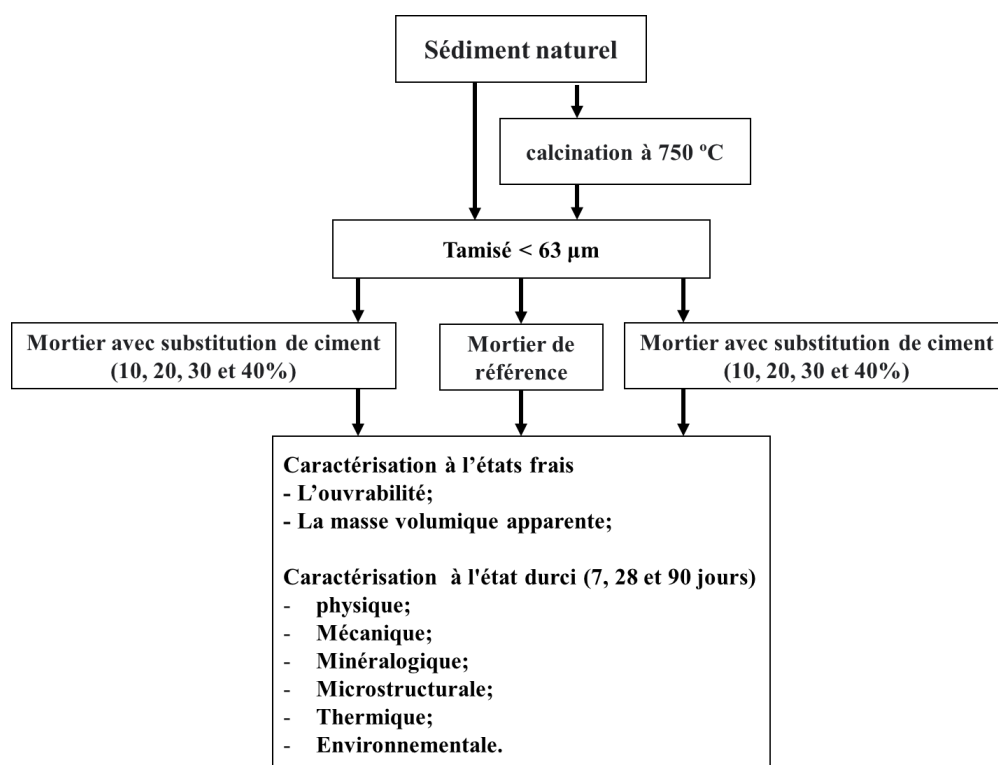


Figure IV.7: Schéma des étapes d'élaboration des différents mortiers.

IV.5 Caractéristiques des mortiers de ciment à l'état frais

L'objectif est d'évaluer l'influence des sédiments naturels et calcinés sur la maniabilité, la consistance et la masse volumique à l'état frais du mortier étudié.

IV.5.1 L'étalement des différents mortiers

Les résultats de l'étalement des différents mortiers sont représentés dans la figure IV.8. Pour le mortier témoin (M0), l'eau est suffisante pour fournir une consistance adéquate à l'état frais avec une valeur de consistance de 159,3 mm. En effet, l'ajout de sédiments naturels et calcinés a montré une diminution de l'étalement jusqu'à 128,8 et 140,2 mm pour les mortiers MS40 et MSC40. Cependant pour les mortiers avec ajout des sédiments naturel, l'eau n'est pas suffisante pour fournir une consistance adéquate, et peuvent réduire la zone de contact interfacial, en diminuant ainsi la force de liaison entre les particules des mortiers [10]. Cette différence est due à la quantité du sédiment utilisé ainsi qu'à sa capacité d'absorption d'eau.

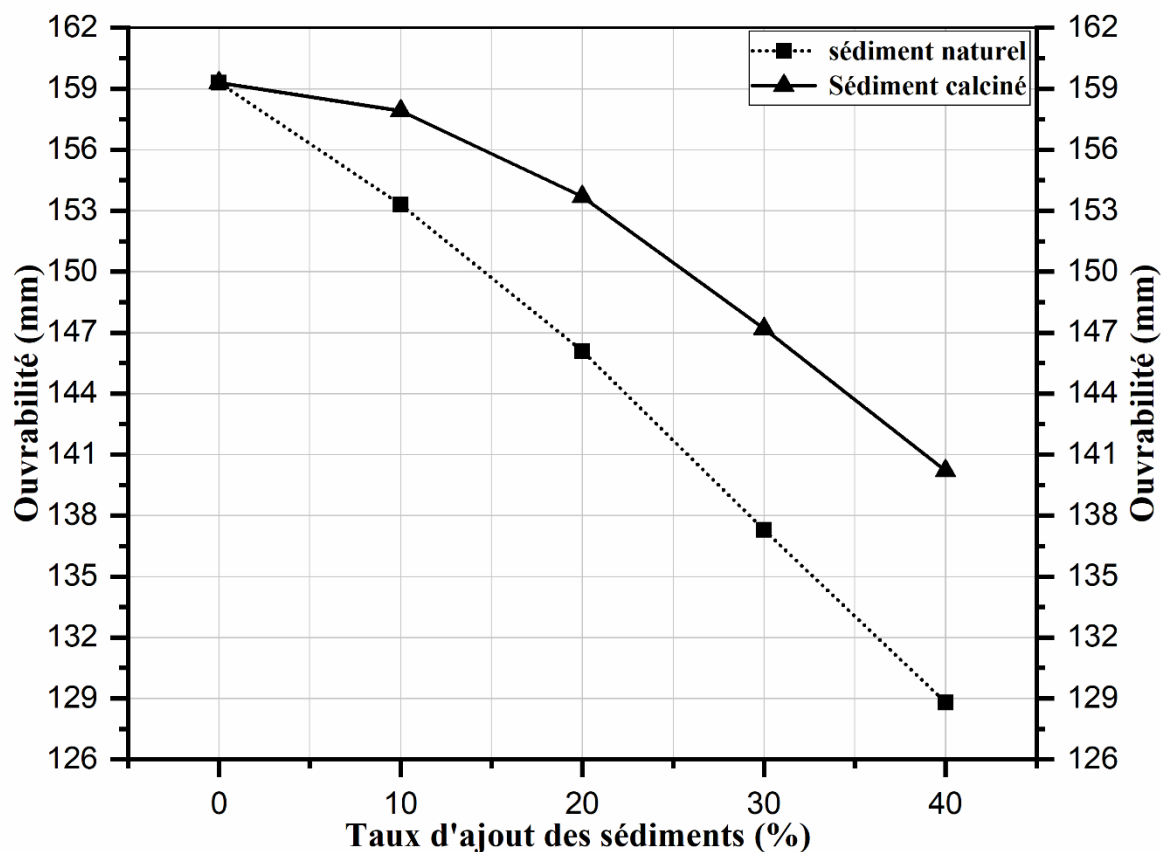


Figure IV.8: Ouvrabilité des mortiers en fonction des taux d'ajouts des sédiments naturels et calcinés.

IV.5.2 Consistance (Eau/Ciment) des différents mortiers

La variation des consistances de la pâte de ciment en fonction des taux d'ajout des sédiments naturels et calcinés est représentée dans la figure IV.9. Selon les résultats, on note que l'augmentation du taux de sédiments naturels et calcinés incorporés dans la pâte de ciment augmente la quantité d'eau requise pour avoir une consistance normale du mortier. La consistance de la pâte de référence est de 0,357, celle-ci augmente avec l'augmentation de la quantité de sédiments naturels et calcinés jusqu'à des valeurs de 0,381 et 0,371, respectivement, avec ajout de 40% de sédiment.

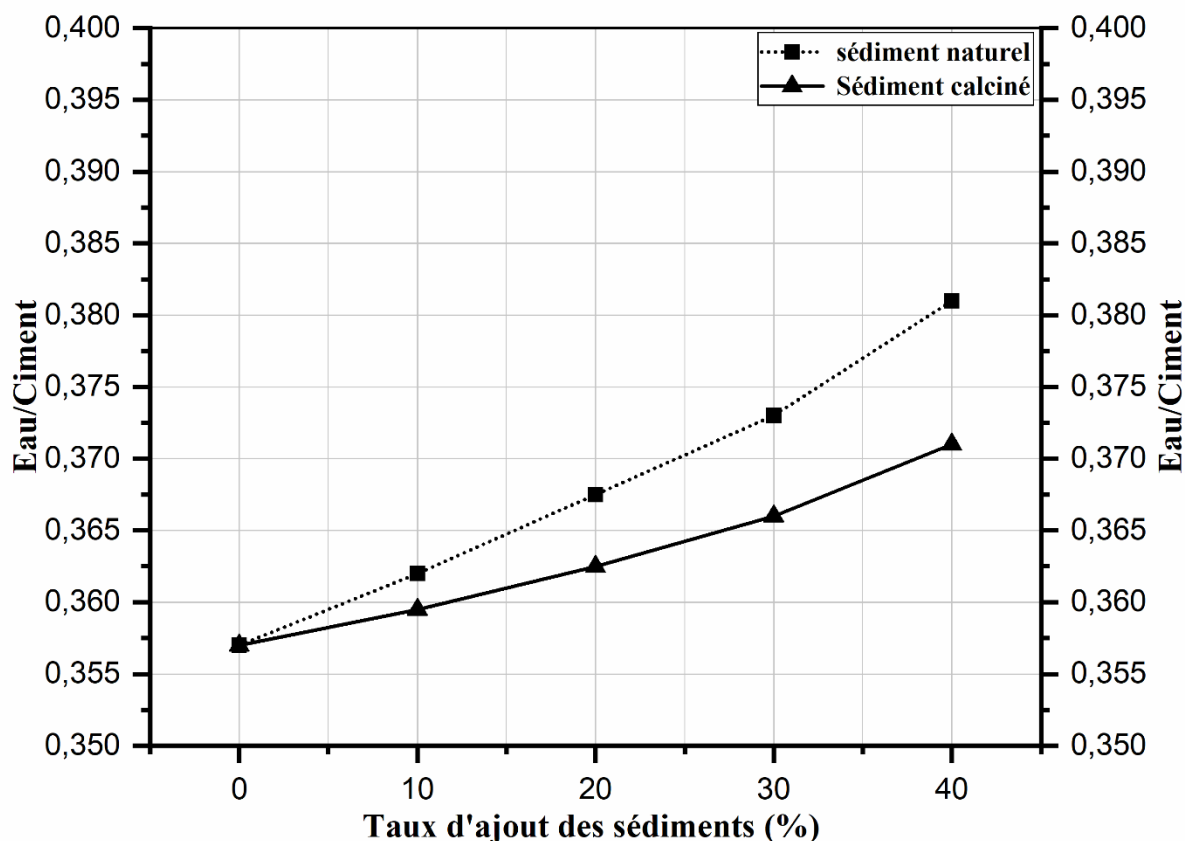


Figure IV.9: Consistance normale de la pâte de ciment en fonction des taux d'ajouts des sédiments naturels et calcinés.

IV.5.3 La masse volumique fraîche des différents mortiers

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure IV.10. Le mortier témoins (M0) frais à une masse volumique de $2,25 \text{ g/cm}^3$. La masse volumique fraîche diminue avec l'augmentation du pourcentage de sédiments naturels et calcinés jusqu'à 40% ; obtenant des valeurs de $2,16$ et $2,19 \text{ g/cm}^3$, pour les mortiers MS40 et MSC40, respectivement.

La masse volumique du mortier à l'état frais à base du sédiment calciné est plus grande que celle à base du sédiment naturel, ceci est due à la faible masse volumique du sédiment naturel.

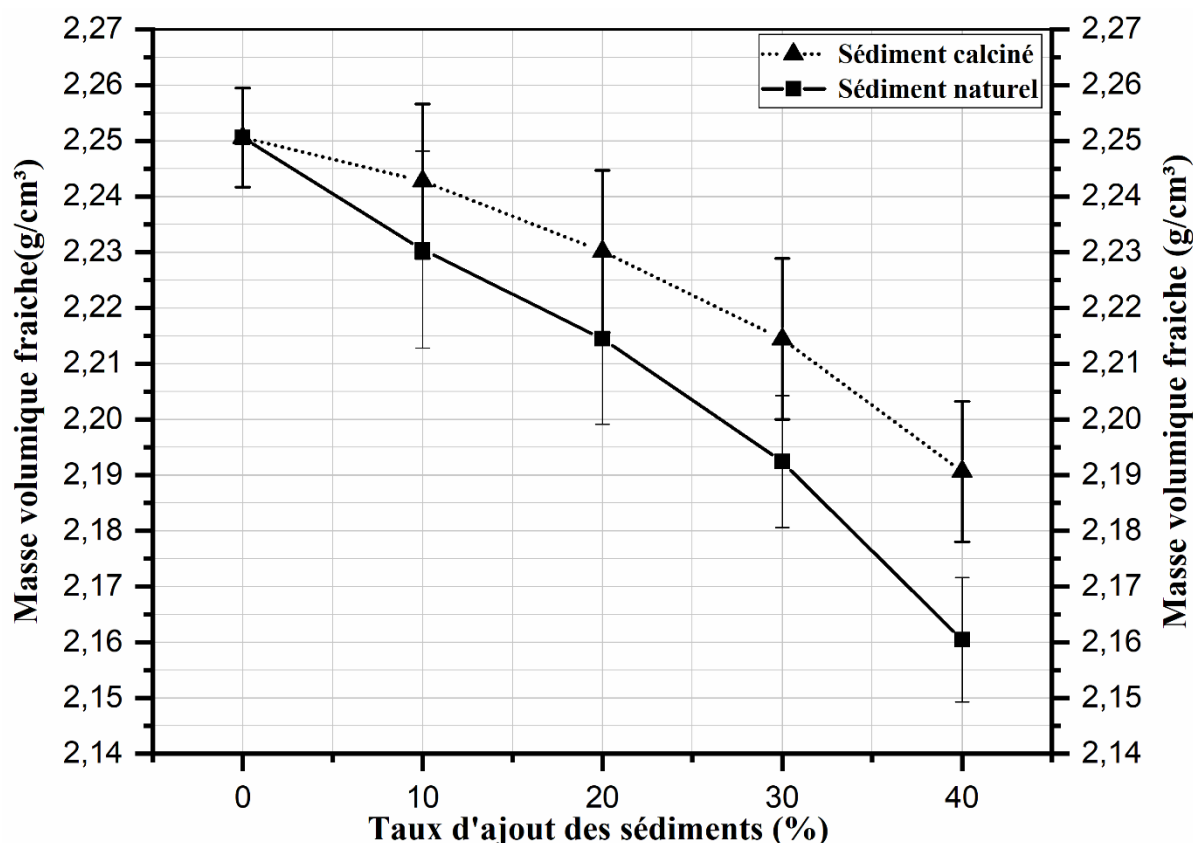


Figure IV.10: Masse volumique du mortier à l'état frais en fonction des taux d'ajouts des sédiments naturels et calcinés.

IV.6 Caractéristiques physiques des mortiers à l'état durci

Une série d'essais et d'inspections est réalisé pour déterminer les propriétés physiques des mortiers avec ajout des sédiments naturels et calcinés. Une composition par rapport aux mortiers de référence est réalisée.

IV.6.1 L'aspect visuel des mortiers

Aucun défaut tel que les fissures et ségrégation (figure IV.11) n'a été observé. Cependant, on remarque que la couleur de l'échantillon de mortier de référence (M0) est grise. Au lieu de cela, la substitution du ciment par des quantités croissantes de sédiments calciné à tendance à devenir des spécimens de couleurs orange rougeâtre. En revanche, l'ajout de quantités croissantes de sédiment naturel aux échantillons de mortier donne des échantillons de couleur grisâtre.

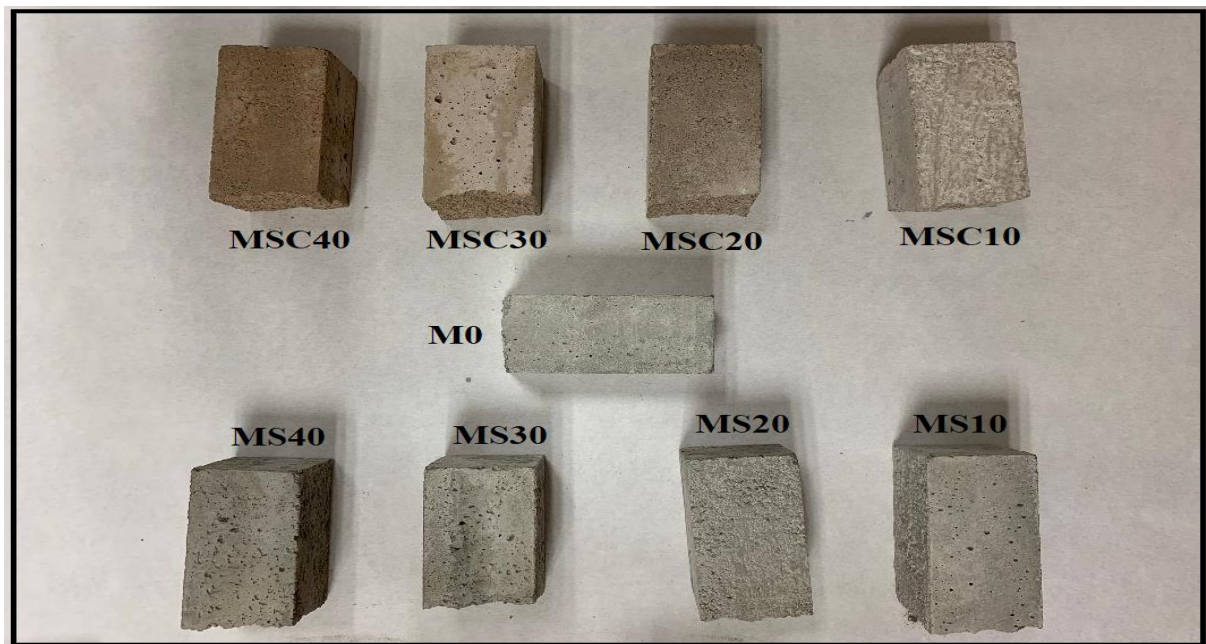


Figure IV.11: Photo des échantillons de mortier à base des sédiments naturels et calcinés.

IV.6.2 Masses volumiques apparentes des différents mortiers

La figure IV.12 montre les masses volumiques apparentes des mortiers à 7, 28 et 90 jours après durcissement dans l'eau. Les masses volumiques des mortiers de référence (M0) à 7, 28 et 90 jours sont respectivement de 2,13, 2,17 et 2,24 g/m³. D'un point, de vue générale, les masses volumiques apparentes des mortiers diminuent avec l'augmentation des taux de sédiments, les valeurs de 2,06, 2,09 et 2,15 g/m³ ont été obtenues pour les jours 7, 28 et 90 jours, respectivement pour les mortiers MS40. Cependant, l'augmentation de la quantité de sédiment calciné engendre une diminution des masses volumiques apparentes qui sont de : 2,05, 2,08 et 2,14 g/m³ respectivement après 7, 28 et 90 jours pour les mortiers MSC40.

Les masses volumiques apparentes obtenues lors de l'utilisation des sédiments naturels et calcinés sont moins importantes que le mortier de référence. Cette différence est due, d'une part au fait que la teneur en fine est plus élevée (<0,063 mm) dans le ciment, il permet de combler les vides, et d'autre part au fait que la masse volumique du ciment est plus grande par rapport à celle des sédiments naturels et calcinés [11]. Ces résultats concordent avec ceux de Neno et al [12] et Jiménez et coll (Jiménez et al., 2013) [13].

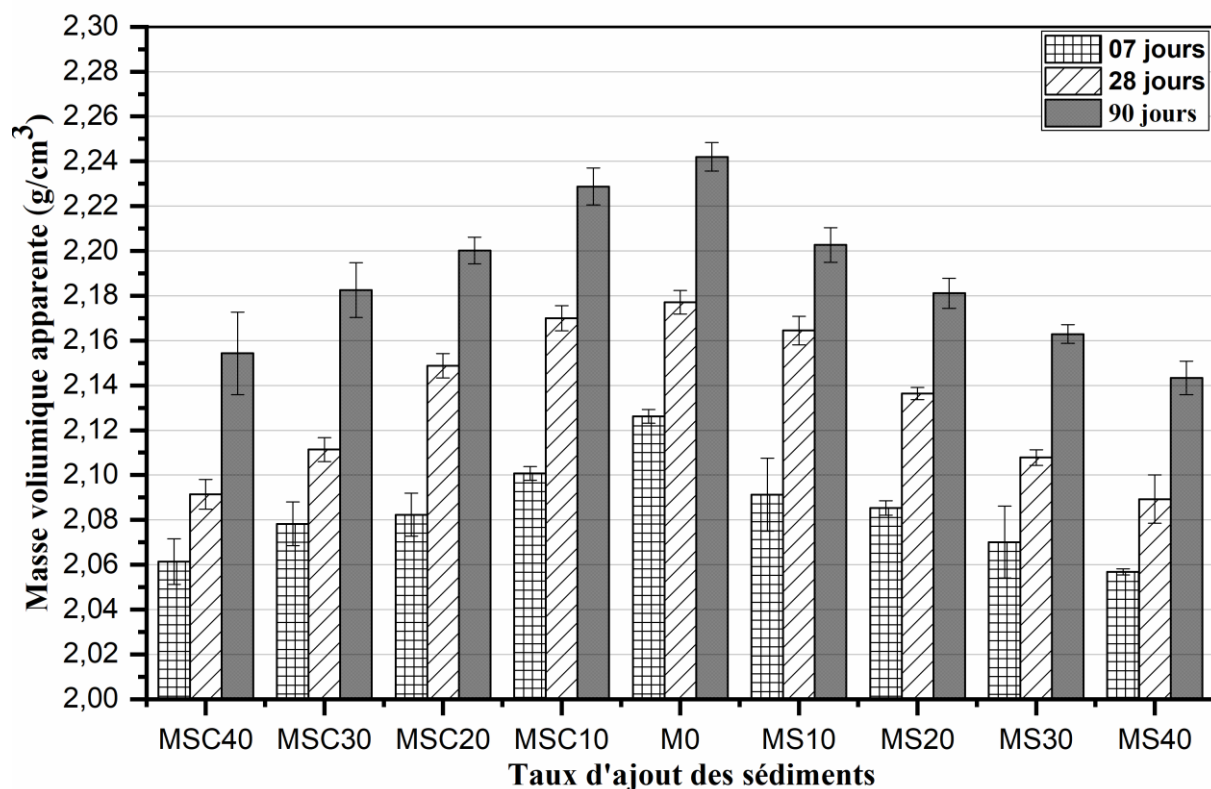


Figure IV.12: Masses volumiques apparentes des mortiers à base des taux d'ajouts des sédiments naturels et calcinés.

IV.6.3 La porosité ouverte des différents mortiers

Les résultats de porosité pour les différentes formulations de mortiers sont représentés sur la figure IV.13. Les porosités ouvertes des mortiers témoins (M0) à 7, 28 et 90 jours sont respectivement de 15,97, 6,60 et 5,51%. Les porosités ouvertes des mortiers à 7 jours augmentent avec l'augmentation de la quantité des sédiments naturels et calcinés jusqu'à des valeurs de 16,84 et 18,03 %, pour les mortiers MS40 et MSC40, respectivement. Dans le cas des mortiers à 28 jours, la porosité diminue avec l'ajout de 10% de sédiment calciné. Qui est de 6,10% pour les mortiers MSC10. Cependant, au-dessus de ce taux, la porosité a augmenté jusqu'à 10,91 % pour l'échantillon MSC40. Lors de l'ajout des sédiments naturels à 28 jours d'âge, la porosité ouverte est proportionnelle avec l'ajout de sédiment naturel jusqu'à 40%, avec une valeur de 7,68 % pour l'échantillon MS40. D'autre part, l'ajout de sédiment naturel et calciné à 90 jours a entraîné une augmentation de porosité ouverte de 7,68 et 11,03 % pour les mortiers MS40 et MSC40, respectivement.

L'augmentation de la porosité ouverte est proportionnelle, à l'augmentation du pourcentage des sédiments naturels et calcinés. Cela peut être lié à des volumes plus faibles d'hydrates générés par hydratation du ciment lorsque la quantité du ciment diminue [14]. L'effet

positif d'ajout des sédiments calcinés (10%) serait associé à l'augmentation du degré d'hydratation du ciment pour compenser en partie la perte de volume d'hydrates due à la diminution de la teneur en ciment.

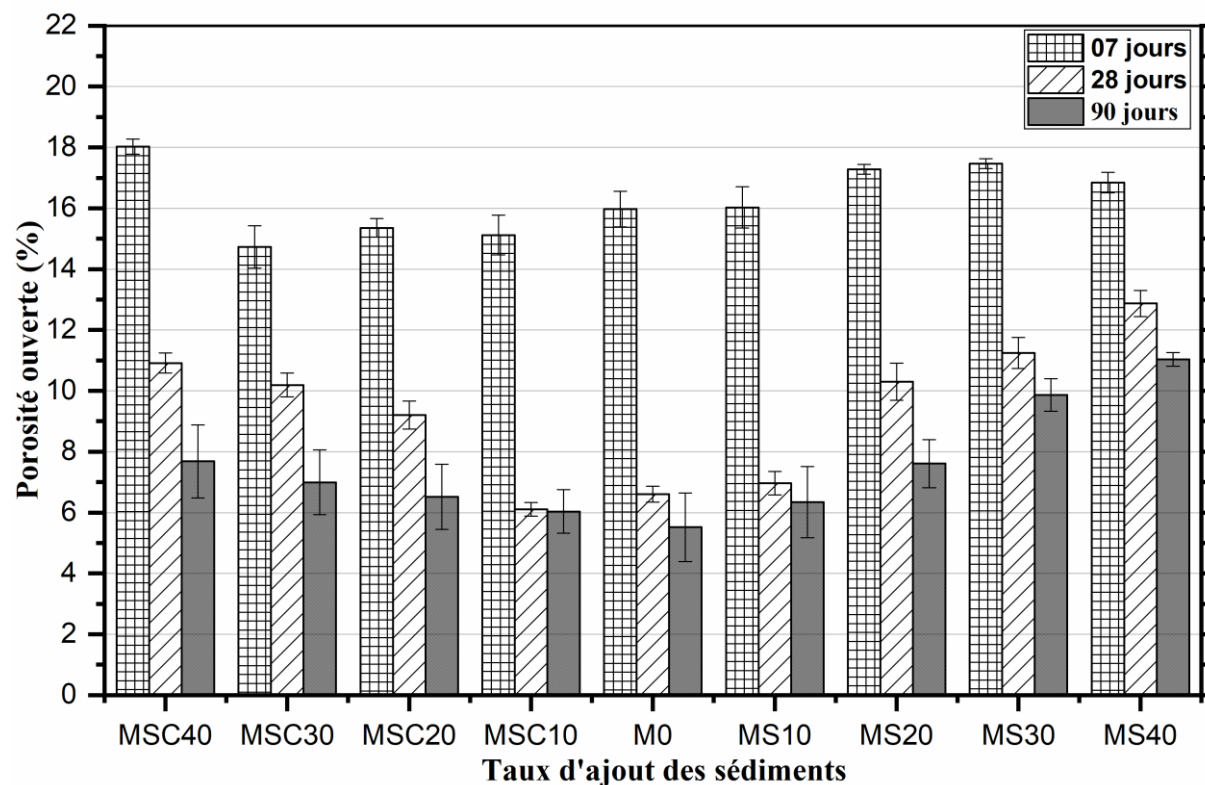


Figure IV.13: Taux de porosité ouverte des mortiers à base des sédiments naturels et calcinés.

IV.6.4 Absorption en eau des différents mortiers

Les essais d'absorption en eau des différents mortiers sont représentés dans la figure IV.14. L'absorption en eau des mortiers de référence (M0) à 7, 28 et 90 jours est de 7,51, 3,03 et 2,47%, respectivement. Les valeurs ont augmenté avec l'ajout de sédiments naturels et calcinés par les échantillons avec 40% de sédiment, elle est de 9,04 et 8,19 % pour les mortiers MS40 et MSC40, respectivement à 7 jours d'âge. D'autre part, l'ajout de sédiment calciné à 28 jours a donné à des mortiers avec une absorption en eau plus faible, le mortier contenant 10% de sédiment calciné présente les valeurs les plus faibles d'absorption en eau (2,81%). L'ajout de 40% en poids de sédiment naturel a produit une augmentation de l'absorption en eau, de 6,16% pour les mortiers à 28 jours. Les valeurs ont augmenté linéairement avec l'ajout des sédiments naturels et calcinés jusqu'à 40% pour les mortiers à 90 jours, on obtient des valeurs de 5,14 et 3,57 % pour les mortiers MS40 et MSC40, respectivement. Il existe une relation relativement linéaire entre l'absorption en eau des mortiers et la porosité ouverte avec l'ajout des sédiments

naturels et calcinés. Les résultats ont montré que l'absorption en eau augmente dès que la porosité augmente.

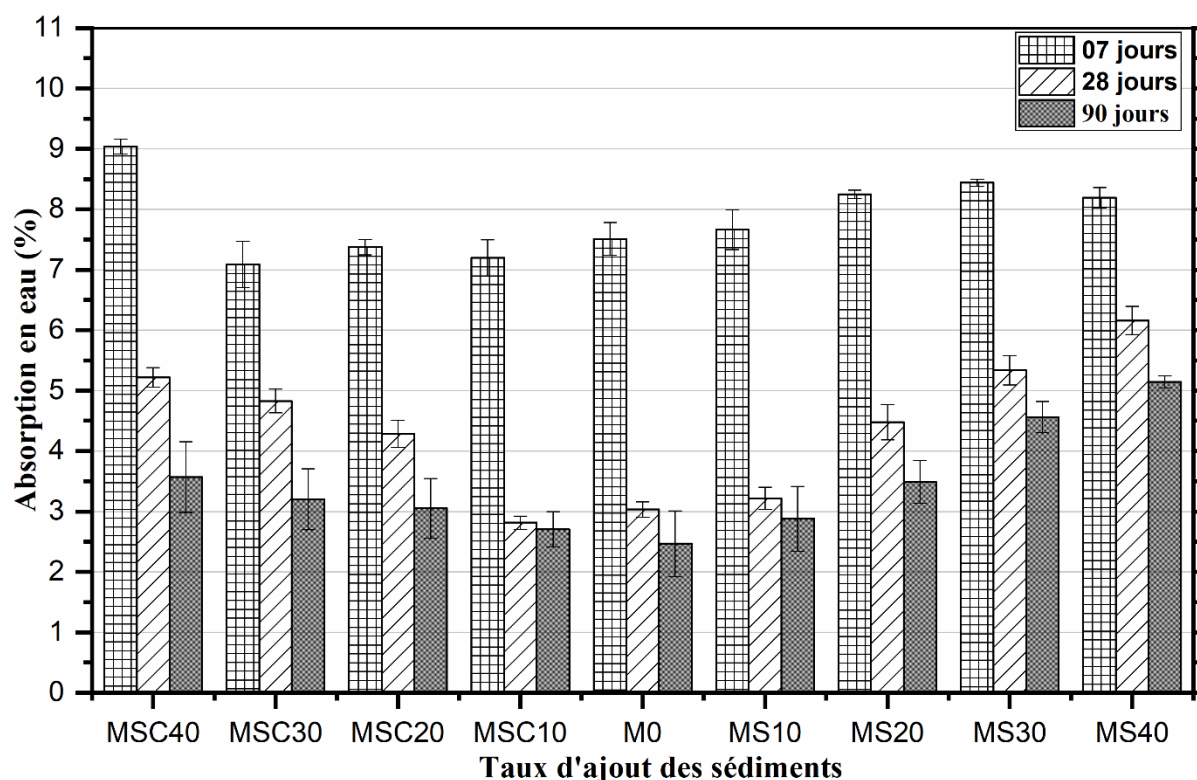


Figure IV.14: Absorption en eau des mortiers en fonction des taux d'ajouts des sédiments naturels et calcinés.

IV.6.5 Absorption d'eau par capillarité des différents mortiers

Selon les résultats de l'absorption en eau par capillarité (figure IV.15), le remplacement des sédiments naturels et calcinés provoque une augmentation de l'absorption en eau par action capillaire par rapport aux mortiers témoins (M0) ayant subi une cure de 7, 28 et 90 jours, qui ont une capillarité de 0,214 et 0,0819 et 0,027 $\text{Kg/m}^2 \text{ min}^{0.5}$. L'absorption en eau par action capillaire des mortiers MS40 augmente avec l'augmentation de la quantité des sédiments naturels jusqu'à des valeurs de 0,34 et 0,13 et 0,07 $\text{Kg/m}^2 \text{ min}^{0.5}$ pour les jours 7, 28 et 90 jours, respectivement, pour l'échantillons MSC40 (à base de 40 % de sédiment calciné) les mortiers obtenus observe une augmentation de l'absorption en eau par action capillaire donnant des valeurs 0,28 et 0,11 et 0,06 g/m^3 , à 7, 28 et 90 jours de cure. En fonction des types de sédiments, l'absorption en eau par capillarité est plus importante avec les sédiments naturels que calcinés. Alors on peut dire que l'effet pouzzolanique des sédiments calcinés donne un clouage du ciment collé aux agrégats et les pores qui sont occupés par la pâte de ciment [15], ce qui est confirmé

dans la littérature disponible par Rao et al [16] qui a signalé que l'ajout d'agrégats recyclés peut avoir une influence négative sur l'absorption en eau par capillarité.

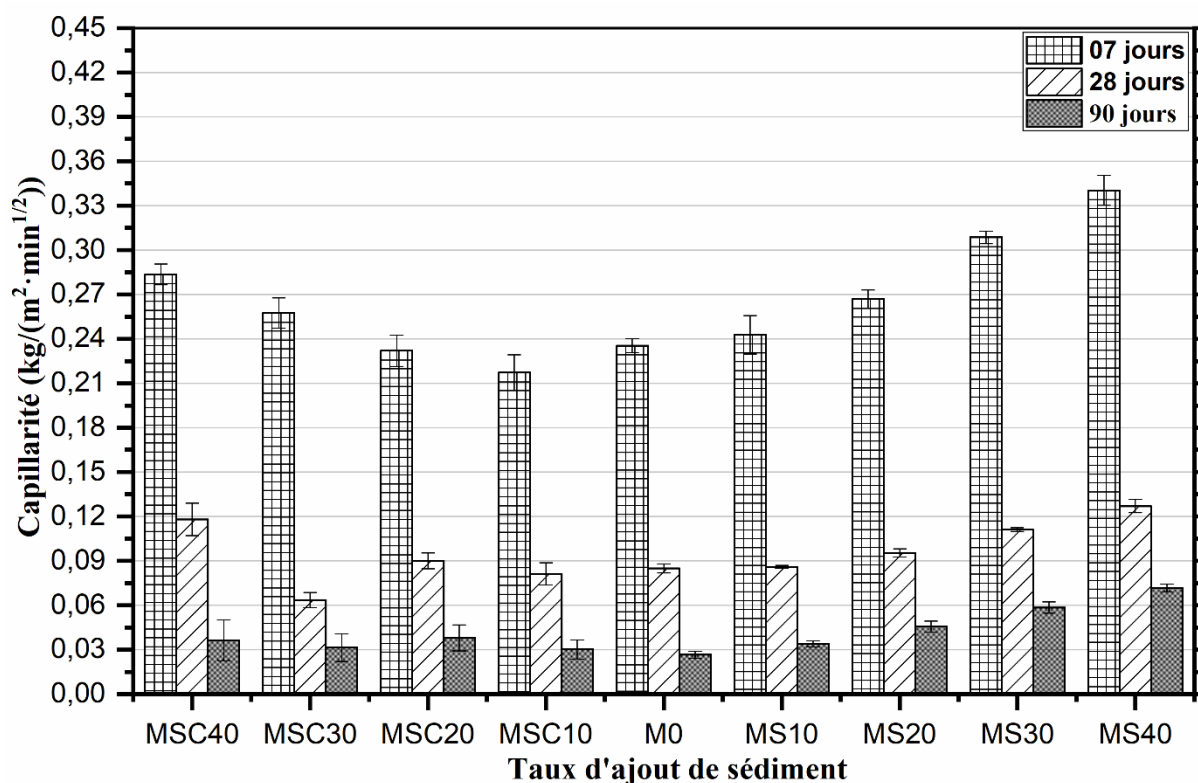


Figure IV.15: Absorption en eau par capillarité des mortiers à base des différents taux d'ajouts des sédiments naturels et calcinés.

IV.7 Propriétés mécaniques des différents mortiers :

IV.7.1 Résistance à la flexion

La variation de la résistance à flexion en fonction des taux d'ajouts des sédiments naturels et calcinés est représentée par la figure IV.16. Les résistances à la flexion des mortiers témoins (M0) à 7, 28 et 90 jours sont respectivement de 4,98, 5,25 et 9,14 MPa. On note que la résistance à la flexion des mortiers à 7 jours de cure augmente avec l'ajout de 10 % (MS10) de sédiment naturel, donnant une valeur de 5,83 MPa. Cependant, au-dessus de ce taux, la résistance à la flexion diminue jusqu'à 3,28 MPa pour le mortier MS40. Notons que la résistance à la flexion diminue au fur et à mesure on augmente le taux de sédiments calcinés.

Dans les cas des mortiers à 28 jours la résistance à la flexion augmente avec l'ajout de 10% de sédiments naturel et calciné, on obtient des valeurs de 6,14 et 6,01 MPa pour les mortiers MS10 et MSC10, respectivement. Cependant, au-dessus de ce taux, la résistance à la

flexion diminue jusqu'à des valeurs 4,31 et 4,69 MPa pour l'échantillon MS40 et MSC40, respectivement. Ainsi, addition de 10% de sédiment calciné augmente la résistance à la flexion des mortiers à 90 jours, obtenant des valeurs de 9,17 MPa pour les mortiers MSC10. Alors qu'au-dessus de ce taux, la résistance diminue de 5,39 MPa % pour le mortier MSC40. La résistance à la flexion des mortiers diminue avec l'augmentation de la quantité de sédiment naturel jusqu'à des valeurs de 4,55 MPa obtenus à 90 jours pour les mortiers MS40. Cependant, au-dessus de ce taux, la résistance à la flexion diminue.

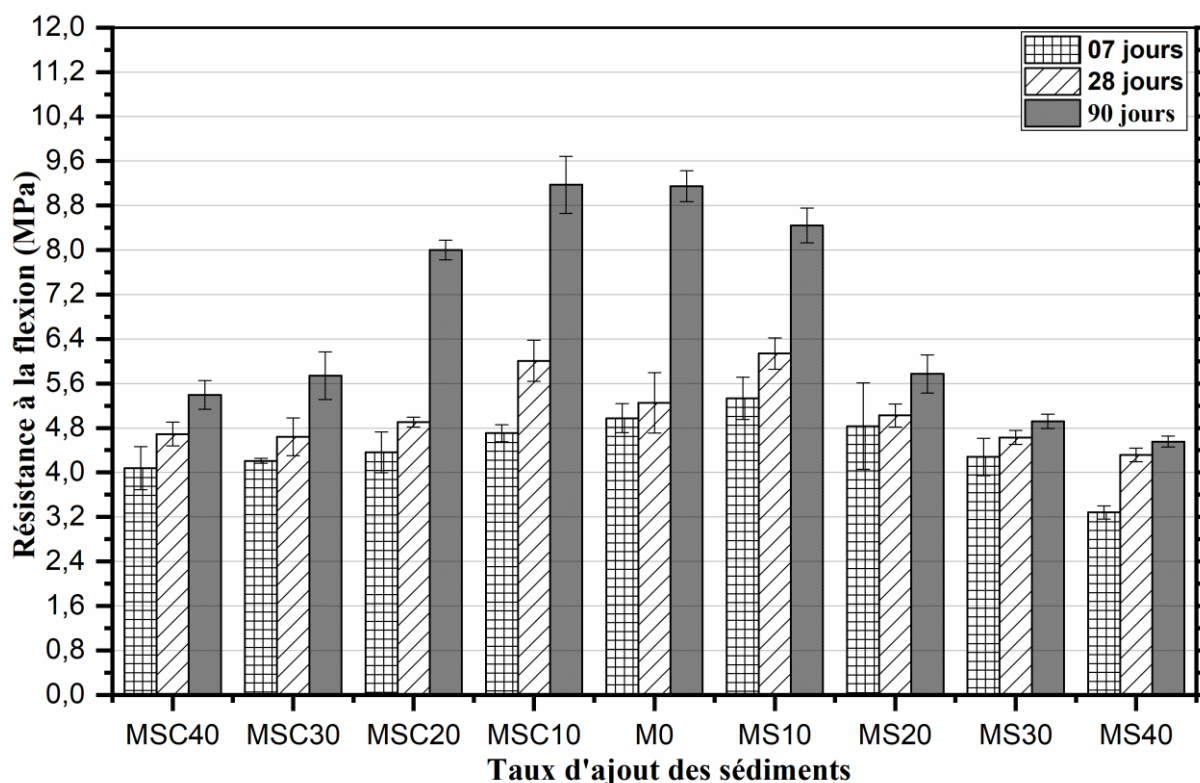


Figure IV.16: Résistance à la flexion des mortiers à base des taux d'ajouts des sédiments naturels et calcinés

L'ajout de 10% des sédiments naturels et calcinés engendre une augmentation de la résistance à la flexion, ceci pourrait être expliqué par le fait que le sédiment naturel est composé de grains fins qui pourrait combler les vides entre les grains composant le mortier. Des résultats similaires ont été obtenus par Jiménez et al [13], lorsque le ciment a été remplacé partiellement par des déchets céramiques finement broyés.

IV.7.2 Résistance à la compression

Les valeurs obtenues de la résistance à la compression (figure. IV.17) montrent que les mortiers ayant subi une cure de 7, 28 et 90 jours, ont légèrement augmenté avec les taux de

remplacement de 10%. Ces résistances diminuent avec des taux de remplacement de 40%. La résistance à la compression des mortiers de référence M0 à 7, 28 et 90 jours est de 34,85, 42,31 et 51,76 MPa, respectivement. Cependant la compression a augmenté linéairement avec l'ajout de 10 % de sédiments calcinés, pour les mortiers à 7 et 28 jours, qui donne des valeurs maximales de 35,14 et 47,99 MPa, respectivement. Au-delà de ce taux, les résistances à la compression des mortiers diminuent à 24,16 et 28,78 MPa pour les mortiers à 7 et 28 jours, respectivement. L'ajout de 40 % de sédiment calciné provoque une diminution de la résistance à la compression à 90 jours, donnant une valeur de 35,75 MPa. L'ajout 40 % de sédiment naturel engendre une diminution de la résistance à la compression, accasant des valeurs de 20,91, 22,02 et 25,16 MPa à 7, 28 et 90 jours, respectivement.

Tous les mortiers testés à base de 10% de sédiments calcinés ont présenté une tendance de l'augmentation considérables de la résistance à la compression et à la flexion, ceci peut être dû à hydratation du ciment [17]. En raison de l'activité pouzzolanique de sédiment calciné, produise une formation d'un gel (C-S-H) et réduction de la taille des pores capillaires ce qui rend la structure plus dense [18]. Dès lors que la quantité de C_3S diminue, la résistance à la compression diminue dans les mortiers à base de sédiments naturels et calcinés dépassant 10% d'ajouts [19].

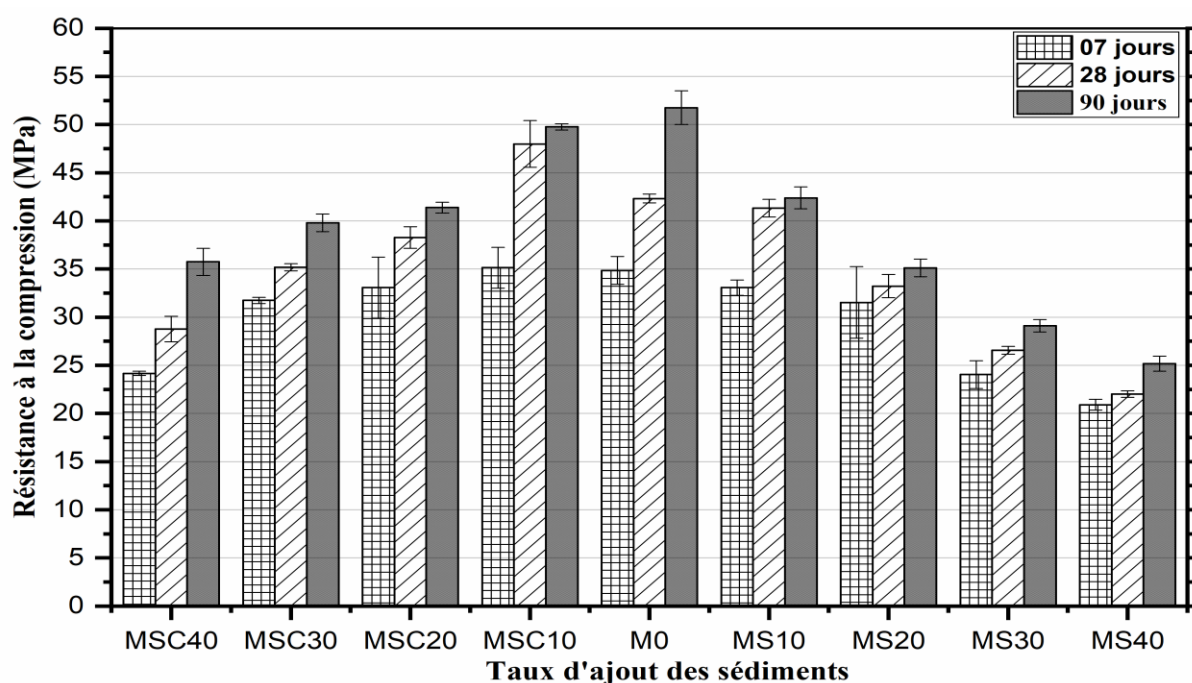


Figure IV.17: Résistance à la compression des mortiers à base des différents taux d'ajouts des sédiments naturels et calcinés.

IV.8 Analyse minéralogique des différents mortiers

Les figures IV.18, 19, 20, 21, 22 et 23 présentent les analyses minéralogiques des mortiers témoin et à base de 10, 20, 30 et 40% de sédiments naturels et calcinés, après conservation dans l'eau pendant 7, 28 et 90 jours. Les principales phases minéralogiques détectées sont le quartz, la portlandite, la calcite, l'alite non hydratée et l'ettringite qui est présente avec de faibles intensités des pics.

L'hydratation du C_3S et du C_2S conduit à la formation de portlandite et de gel C-S-H [20] qui est une phase amorphe montrant une faible réflexion de Bragg de cette phase dans les diagrammes DRX des échantillons hydratés. Cependant, la phase C_3S (silicates tricalciques) n'est que partiellement hydratée, sa présence peut être expliquée par la présence de grains de ciment non hydratés.

La portlandite est visible à $17.8^\circ 2\theta$ sur tous les diagrammes des mortiers dans les différents âges de cure. Cependant, ces spectres montrent aussi une augmentation de l'intensité de la portlandite des mortiers à base de sédiments naturels. De plus, quand le mortier est exposé à l'air ambiant, la portlandite ($Ca(OH)_2$) réagit avec le CO_2 pour former du carbonate de calcium qui est la phase indésirable menant à la dégradation du ciment [21].

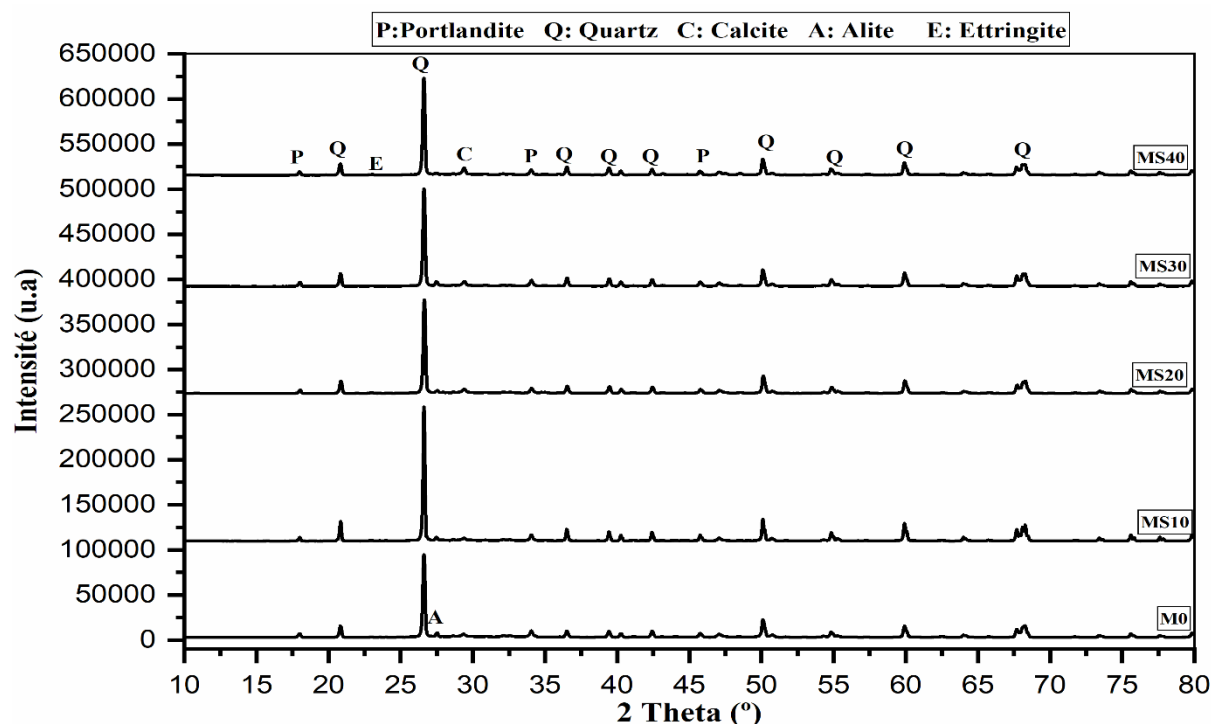


Figure IV.18: Diffractogrammes des rayons X des mortiers refermant des sédiments naturels à 7 jours de cure.

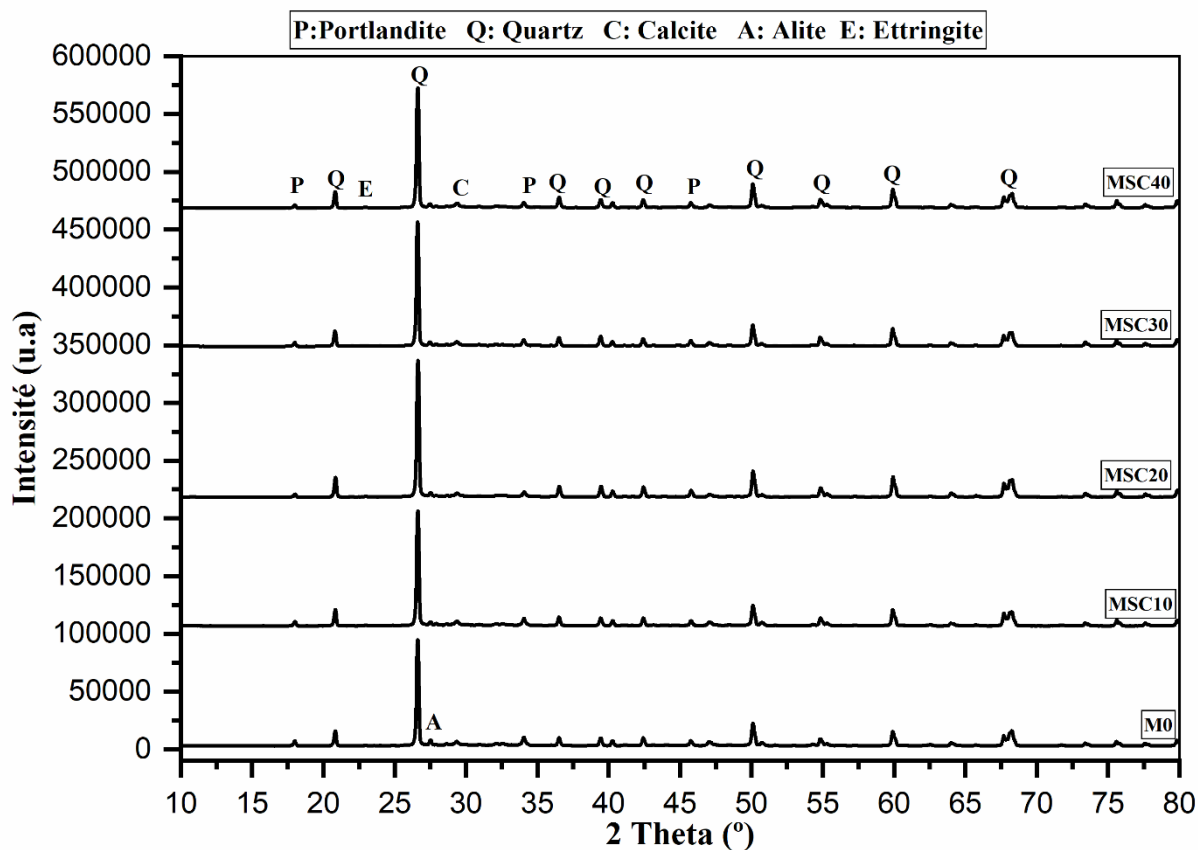


Figure IV.19: Diffractogrammes des rayons X des mortiers renfermant des sédiments calcinés à 7 jours de cure.

De plus, la céliste réagit avec le gypse en présence d'eau pour former une phase ettringite qui est également détecté dans les mortiers avec ajout de sédiments naturels et calcinés à 7, 28 et 90 jours.

Nous avons observé la présence de la phase cristalline de calcite (CaCO_3) dans tous les mortiers à base de sédiments naturels à 7, 28 et 90 jours de cure, puis l'intensité des pics augmentent avec l'augmentation des sédiments. L'intensité des pics de calcite sont réduits avec l'ajout des sédiments calcinés à 90 jours de cure (Figure IV.23).

Les intensités des pics caractéristique du quartz augmentent avec l'augmentation des sédiments, ceci est due à l'augmentation de la quantité de phases cristallines d'alite et de bélite, ainsi que la réduction de la formation de la phase amorphe C-S-H [22].

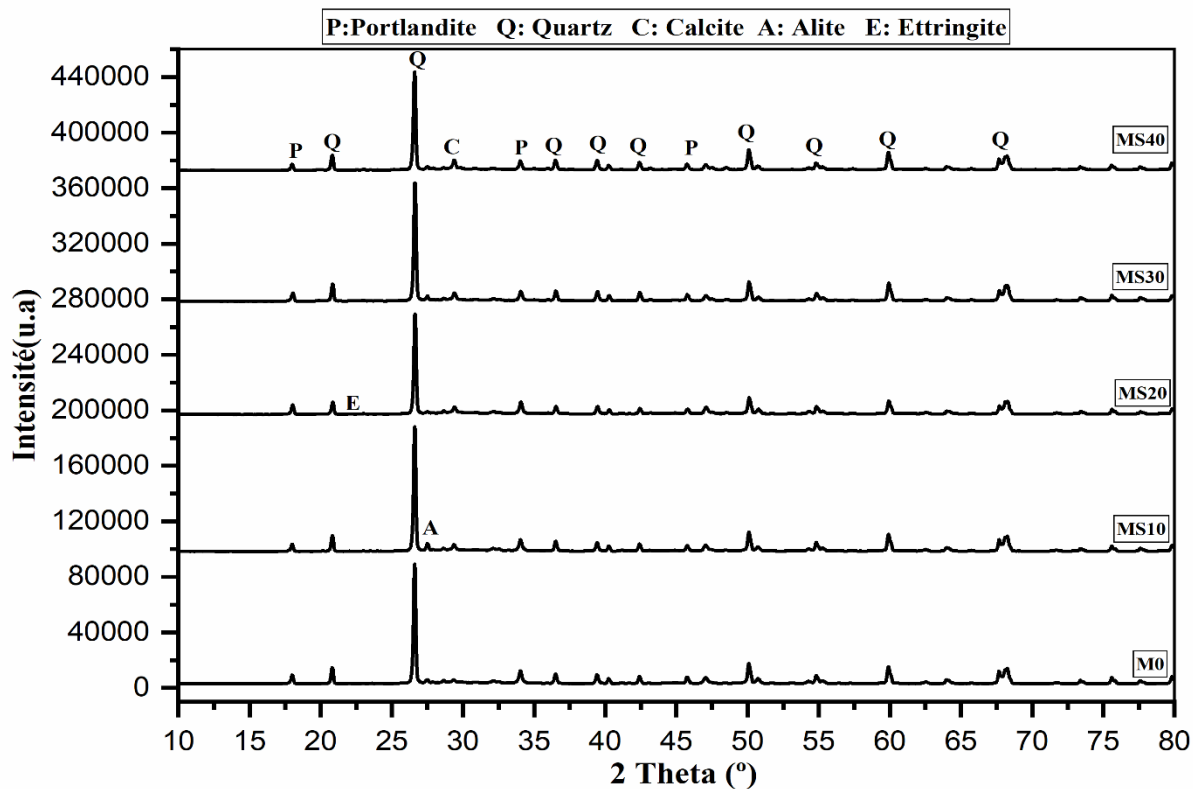


Figure IV.20: Diffractogrammes des rayons X des mortiers à base de sédiment naturel à 28 jours de cure.

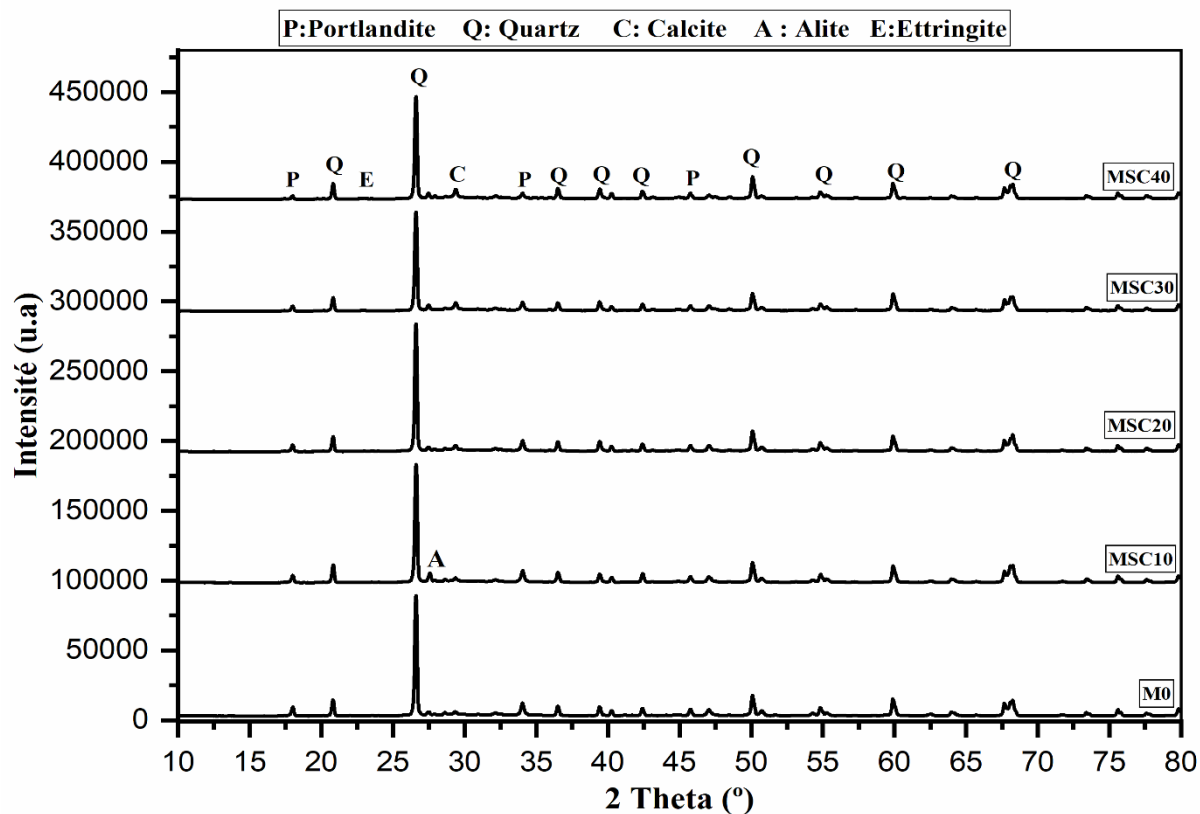


Figure IV.21: Diffractogrammes des rayons X des mortiers à base de sédiment calciné à 28 jours de cure.

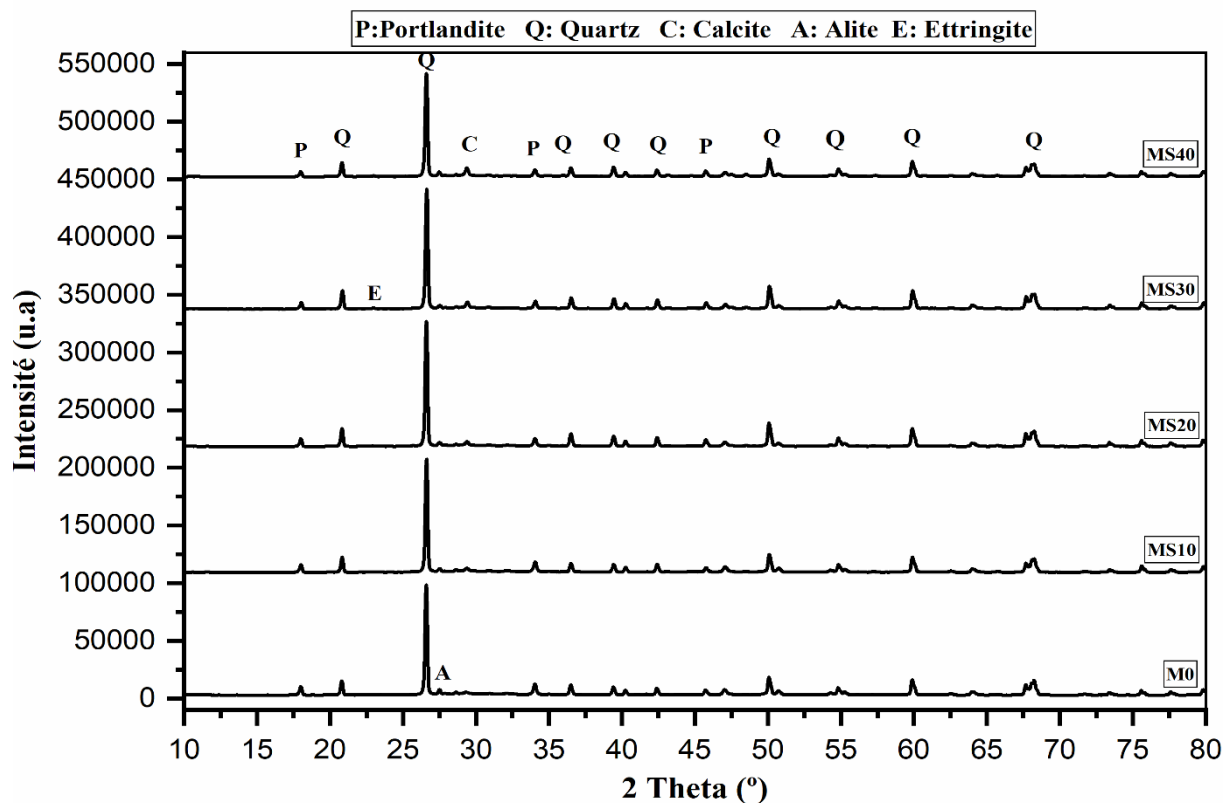


Figure IV.22: Diffractogrammes des rayons X des mortiers à base de sédiment naturel à 90 jours de cure.

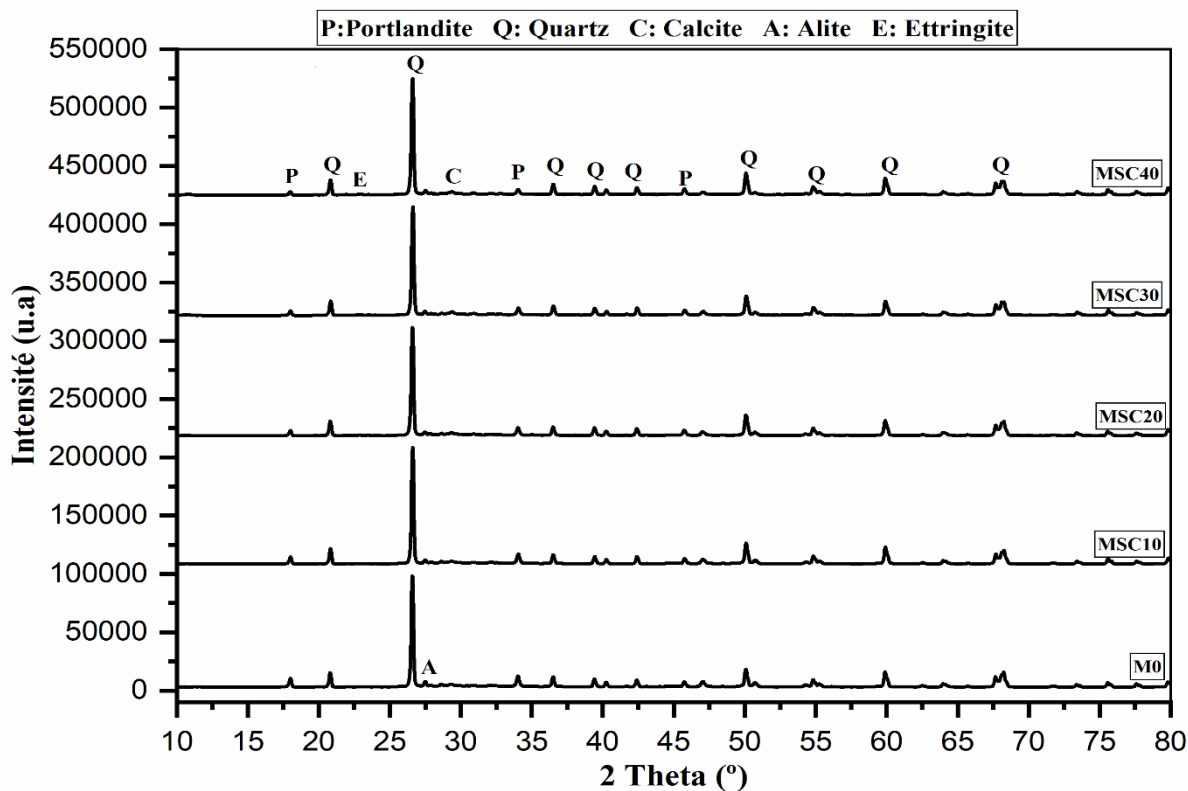


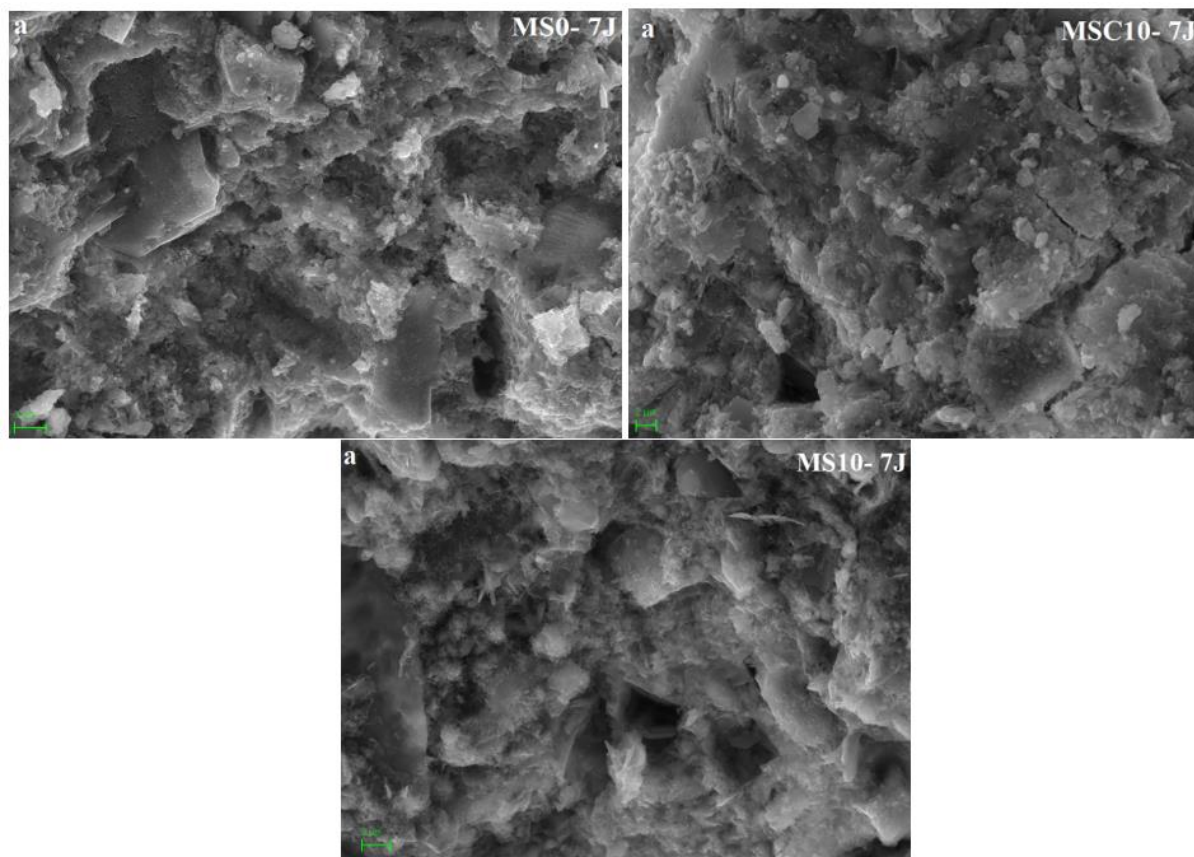
Figure IV.23: Diffractogrammes de rayons X des mortiers à base de sédiment calciné à 90 jours de cure.

IV.9 Microstructure des différents mortiers

La figure VI.24 montre la microstructure et la zone de transition interfaciale des mortiers de référence (M0) et les mortiers avec des taux de 10 % de sédiments naturels (MS10) et calcinés (MSC10) à différents âges de cure (7, 28 et 90 jours).

Selon la figure IV.24-a, la microstructure et la zone de transition interfaciale entre la pâte de ciment, l'agrégat de sable et sédiments naturels et calcinés à un âge précoce de 7 jours est dense, une faible adhérence entre l'agrégat et la pâte de ciment est observé. Ce fait influencera le comportement mécanique du mortier en termes de résistance à la compression. De plus, les cristaux d'aiguilles d'ettringite ont été observés.

L'ajout de sédiment calciné à 10% (figure IV.24-b) a augmenté la quantité du gel C-S-H formée pendant le processus de cure à 28 jours pour les mortiers MSC10. L'ajout de sédiment naturel a changé la formation de gel favorisant la formation des pores fins, interconnectés, de formes irrégulières et de pores fermés qui ont causé la diminution de la résistance à la compression. Nous remarquons aussi l'existence de portlandite sous forme de couches réunies [23]



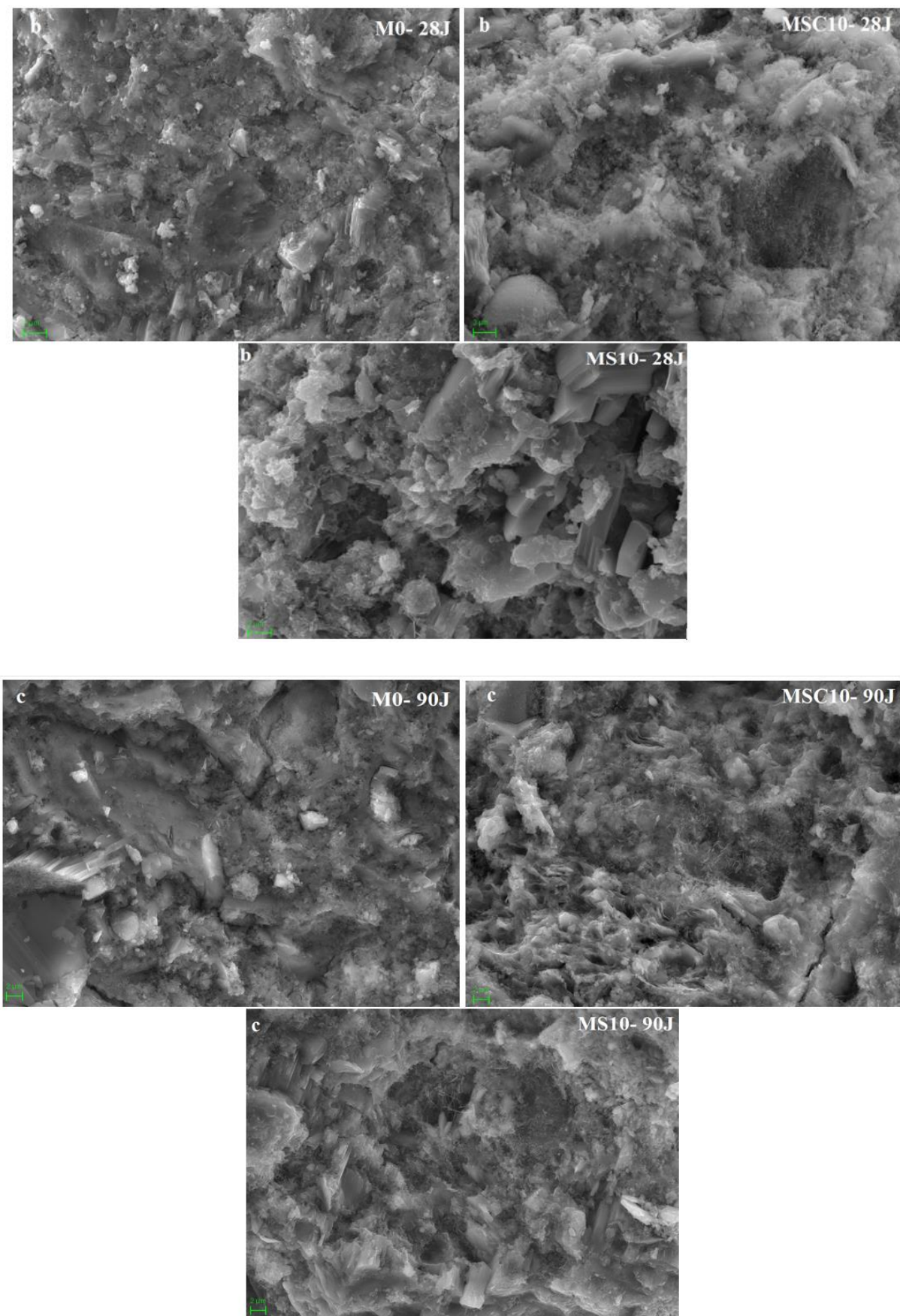


Figure IV.24: Microstructure des mortiers (a) 7 jours, (b) 28 jours et (c) 90 jours de cure.

La microstructure des mortiers à 90 jours de cure (figure IV.24-c) montre une structure massive et dense observée dans les mortiers de référence M0, L'ajout de sédiments naturels et calcinés a changé la porosité des mortiers MS10 et MSC10 qui est due à la carbonatation de la portlandith pour former le carbonate de calcium.

IV.10 Conductivité thermique des différents mortiers

Les résultats des différents tests de caractérisation thermique réalisés sur les mortiers à 7, 28 et 90 jours de cure en fonction de l'ajout de sédiments naturels des sédiments calcinés sont illustrés sur la figure IV.25. Les conductivités thermiques des mortiers varient entre 0,97, 1,08 et 1,78 W/mK, pour les échantillons de référence (M0) à 7, 28 et 90 jours, respectivement. L'ajout de 40% de sédiment naturel (MS40) a produit une diminution de la conductivité thermique jusqu'à 0,48, 0,75 et 0,77 W/mK pour les mortiers à 7, 28 et 90 respectivement. Cependant, l'ajout de 40% de sédiments calcinés (MSC40) a produit une diminution des mortiers avec des valeurs de conductivité thermique de 0,55, 0,82 et 0,94 W/mK à un âge de 7, 28 et 90 jours respectivement. L'incorporation de sédiment calciné a donné des valeurs de la conductivité thermique inférieure par rapport celles des mortiers à base de sédiments naturels.

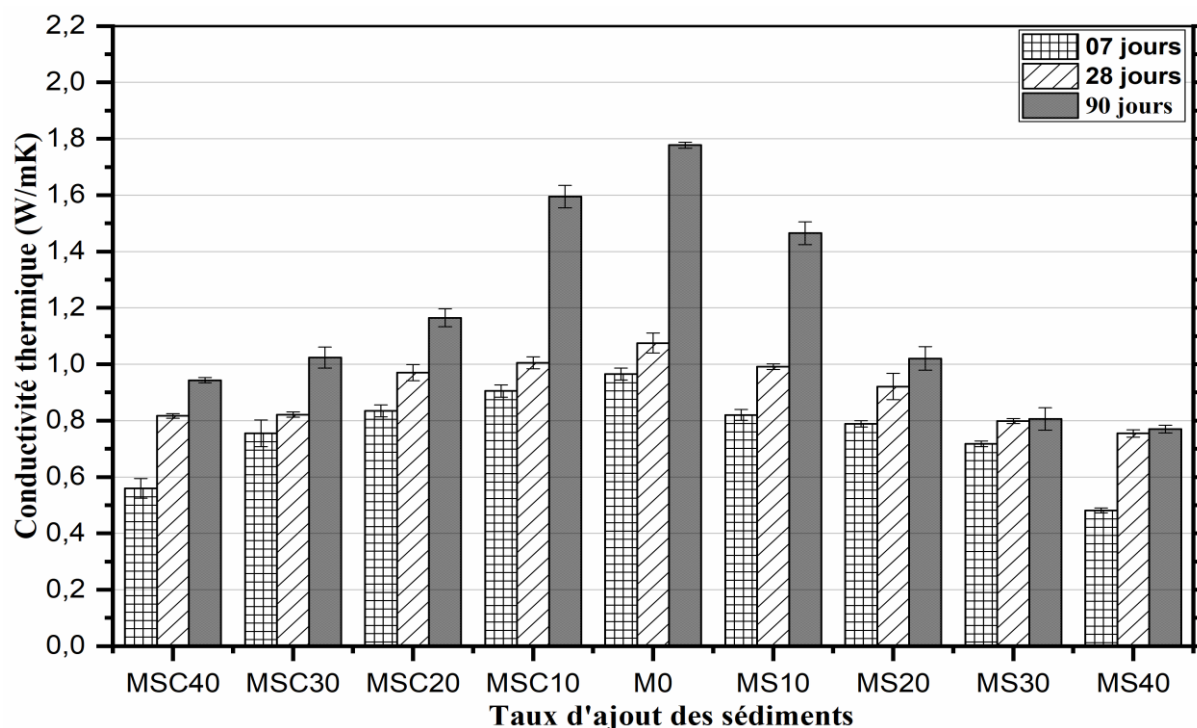


Figure IV.25: Conductivités thermiques des mortiers en fonction des taux d'ajouts des sédiments naturels et calcinés

Ces résultats confirment que dans le cas d'un mortier avec ajout des sédiments, la conductivité thermique effective dépend de la répartition en taille de pores. La conductivité thermique a diminué en fonction de la masse volumique apparente et de la porosité. L'ajout des sédiments rend la structure poreuse et la répartition des tailles de pores n'est pas homogène dans ces mortiers.

IV.11 Évaluation environnementale

Le tableau IV.4 montre les résultats des analyses chimiques des essais de test TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) sur les mortiers de référence (M0), les mortiers à base de 40% de sédiments naturels et calcinés MS40 et MSC40 respectivement. Cinq (05) métaux lourds sont analysés : le chrome (Cr), le fer (Fe), le Nickel (Ni), le cuivre (Cu) et le zinc (Zn). Tous les mortiers présentent des valeurs de métaux lourds bien inférieures à celles établies par les limites de l'Agence américaine de protection de l'environnement (US EPA) (2000) [24], indiquant un bon degré d'immobilisation dans la matrice cimentaire.

La mobilité des métaux lourds diminue avec l'augmentation d'âge de cure et avec l'incorporation des sédiments naturels. Dans les mortiers qui incorporent des sédiments calcinés, les métaux lourds sont plus fixés que dans les mortiers à base de sédiments naturels. Cela est dû au fait que les métaux lourds existant dans le sédiment sont d'abord fixés dans la matrice lors de sa calcination à 750 ° C [25], puis à nouveau fixés dans la matrice cimentaire par la méthode stabilisation/solidification [26]. Le comportement des métaux lourds dans la solution de lixiviat est différent, il dépend d'une part, de la concentration des métaux lourds dans les sédiments (à l'état calciné et non calciné) et d'autre part, du milieu de la solution de l'essai de lixiviation (pH ~ 4). Les métaux lourds tels que le nickel et le zinc sont influencés par le milieu acide. Le test de lixiviation a indiqué un degré d'immobilisation des métaux lourds suggérant que l'incorporation de 40% de sédiments (à l'état calciné et non calciné) dans les mortiers est une méthode d'inertisation efficace.

Tableau IV.4: Résultats des tests TCLP (ppm) de M0, MS40, MSC40 a 7, 28 et 90 jours.

	7 jours			28 jours			90 jours			US-EPA
	M0	MS40	MSC40	M0	MS40	MSC40	M0	MS40	MSC40	(Ppm)
Cr	0,41	0,55	0,50	0,66	0,21	0,20	0,44	0,13	0,10	5
Fe	0,02	0,0478	0,02	0,11	0,05	0,03	2,63	0,05	0,11	-
Ni	0,374	0,11	0,04	0,01	0,16	0,06	0,06	0,17	0,04	-
Cu	0,10	0,20	0,12	0,13	0,17	0,10	0,11	0,18	0,12	-
Pb	0,0	0,001	0,001	0,003	0,013	0,002	0,0	0,006	0,016	5
Zn	0,031	0,06	0,038	0,05	0,03	0,02	0,07	0,04	0,09	-

IV.12 Conclusion

Les sédiments de dragage marins (naturel et calciné) ont été séchés, broyés et tamisés puis utilisés en remplacement partiel du ciment dans la fabrication de mortiers avec des taux de substitution de 10, 20, 30 et 40%. Il ressort de cette étude les principaux points suivants :

- 1) Les sédiments naturels ont les mêmes compositions minéralogiques et chimiques que les sédiments calcinés qui sont le quartz, la muscovite, l'hématite, la calcite et l'albite. Il n'y a pas de kaolinite dans le sédiment calciné en raison de sa déshydroxylation pour donner du métakaolin ;
- 2) Les résultats des essais d'étalement au mini-cône sur les mortiers étudiés, ont montré qu'ils présentent un étalement qui varie entre 12 et 18 cm de diamètre.
- 3) L'augmentation de pourcentage des sédiments naturels et calcinés ajoutés dans la pâte de ciment augmente la quantité d'eau requise pour avoir une consistance normale de mortier ;
- 4) Les sédiments naturels ont un impact négatif sur la résistance à la compression. Cependant on a trouvé que l'utilisation de 10% de sédiments calcinés à 28 jours de cure produit une augmentation de la résistance à la compression et a donné une résistance maximale de 47,99 MPa.
- 5) L'addition jusqu'à 10% de sédiments calcinés augmente la résistance à la flexion des mortiers à 90 jours, obtenant des valeurs de 9,17 MPa, relativement proche de la résistance à la flexion du mortier témoin ;
- 6) La masse volumique apparente fraîche et durcie diminue avec l'ajout des sédiments naturels et calcinés ;

- 7) L'absorption en eau par action capillaire des mortiers est augmentée avec l'augmentation du taux des sédiments naturels et calcinés.
- 8) Les principaux pics de diffraction pour les mortiers sont marqués par la présence du quartz, la portlandite, la calcite, l'alite non hydrater et l'ettringite
- 9) La microstructure montre l'existence de gel C-S-H présenté par une structure massive et dense observée dans les deux mortiers avec sédiments (naturels et calcinés) et les mortiers de référence avec l'existence de portlandite et ettringite à 28 jours de cure.
- 10) L'incorporation du sédiment calciné montre des valeurs de la conductivité thermique inférieure à celle des mortiers avec l'addition des sédiments naturel et le mortier de référence.
- 11) L'essai de lixiviation a montré que l'incorporation de 40% de sédiment dans les mortiers n'affecte pas les performances de l'échantillon, ce qui explique l'immobilisation des métaux lourds. Par conséquent, cette étude révèle l'utilisation des sédiments, dans les états calcinés et non calcinés dans le domaine des matériaux cimentaire en préservant l'environnement.

Références bibliographiques

- [1] Norme, N. F. (2012). EN 197-1. Ciment-Part1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
- [2] Cyr, M., Aubert, J. E., Husson, B., Clastres, P. (2006). Management of mineral wastes in cement-based materials. *Revue européenne de génie civil*, 10(3), 323-337.
- [3] Mirza, J., Turenne, S., Masounave, J. (1990). Influence of structural parameters on abrasion-erosion resistance of various repairing mortars. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 17(1), 12-18.
- [4] Diop, M. B., Esteoule, J., Bouguerra, A., Lo, P. G. (2002). Essais systematiques de validation de formulations de sable senegalais pour l'elaboration d'un sable normalise. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61(1), 79-86.
- [5] EN, N. 1097-6. 2014. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Partie, 6.
- [6] Godoy, V., Prata, J. C., Blázquez, G., Almendros, A. I., Duarte, A. C., Rocha-Santos, T., & Martín-Lara, M. Á. (2020). Effects of distance to the sea and geomorphological characteristics on the quantity and distribution of microplastics in beach sediments of Granada (Spain). *Science of The Total Environment*, 746, 142023.
- [7] Siddique, R., Klaus, J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science*, 43(3-4), 392-400.
- [8] Benezet, J. C., Benhassaine, A. (1999). The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder. *Powder Technology*, 103(1), 26-29.
- [9] Standard, A. S. T. M. (2014). C305. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [10] Helson, O., Eslami, J., Beaucour, A. L., Noumowe, A., Gotteland, P. (2020). Étude parametrique de matériaux modèles: aide au dimensionnement des ouvrages souterrains issus de mélanges sol-ciment. *Revue Française de Géotechnique*, (162), 2.

- [11] Ledesma, E. F., Jiménez, J. R., Fernández, J. M., Galvín, A. P., Agrela, F., Barbudo, A. (2014). Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. *Construction and building materials*, 71, 289-298.
- [12] Neno, C., Brito, J. D., & Veiga, R. (2014). Using fine recycled concrete aggregate for mortar production. *Materials research*, 17(1), 168-177.
- [13] Jiménez, J. R., Ayuso, J., López, M., Fernández, J. M., De Brito, J. M. C. L. (2013). Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. *Construction and Building Materials*, 40, 679-690.
- [14] Zhao, Z., Benzerzour, M., Abriak, N. E., Damidot, D., Courard, L., Wang, D. (2018). Use of uncontaminated marine sediments in mortar and concrete by partial substitution of cement. *Cement and Concrete Composites*, 93, 155-162.
- [15] Silva, J., De Brito, J. M. C. L., Veiga, R. (2010). Recycled red-clay ceramic construction and demolition waste for mortars production. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(3), 236-244.
- [16] Rao, M. C., Bhattacharyya, S. K., Barai, S. V. (2019). Properties of Recycled Aggregate Concrete. In *Systematic Approach of Characterisation and Behaviour of Recycled Aggregate Concrete* (pp. 83-157). Springer, Singapore.
- [17] Shui, Z., Xuan, D., Wan, H., Cao, B. (2008). Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment. *Construction and Building materials*, 22(8), 1723-1729.
- [18] Kuroda, M., Watanabe, T., Terashi, N. (2000). Increase of bond strength at interfacial transition zone by the use of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 30(2), 253-258.
- [19] Ozer-Erdogan, P., Basar, H. M., Erden, I., Tolun, L. (2016). Beneficial use of marine dredged materials as a fine aggregate in ready-mixed concrete: Turkey example. *Construction and Building Materials*, 124, 690-704.
- [20] Lilkov, V., Petrov, O., Tzvetanova, Y., Savov, P., Kadiyski, M. (2013). Mössbauer, XRD, and complex thermal analysis of the hydration of cement with fly ash. *Journal of Spectroscopy*, 2013.

[21] Choudhary, H. K., Anupama, A. V., Kumar, R., Panzi, M. E., Matteppanavar, S., Sherikar, B. N., & Sahoo, B. (2015). Observation of phase transformations in cement during hydration. *Construction and Building Materials*, 101, 122-129.

[22] Johannesson, B., Utgenannt, P. (2001). Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar. *Cement and concrete Research*, 31(6), 925-931.

[23] Choudhary, H. K., Anupama, A. V., Kumar, R., Panzi, M. E., Matteppanavar, S., Sherikar, B. N., & Sahoo, B. (2015). Observation of phase transformations in cement during hydration. *Construction and Building Materials*, 101, 122-129.

[24] EPA 658/09, Guideline for solid waste: criteria for assessment, classification and disposal of waste, 2009.

[25] Kribi, S., Nzihou, A., Sharrock, P. (2004). Stabilisation of heavy metals from dredged sediment. In *PRO 40: International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures (Volume 2)* (Vol. 2, p. 824).

[26] Raj, D. S. S., Aparna, C., Rekha, P., Bindhu, V. H., Anjaneyulu, Y. (2005). Stabilisation and solidification technologies for the remediation of contaminated soils and sediments: an overview. *Land Contamination & Reclamation*, 13(1), 23-48.

CHAPITRE V

ETUDE DE LA VALORISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE DANS LE DOMAINE DES BRIQUES CUITES ET DES CERAMIQU

Chapitre V : Etude de la valorisation des sédiments de dragage dans le domaine des briques cuites et des céramiques

Introduction

Ce chapitre est divisé en deux parties, la première partie est consacrée à l'étude de la valorisation des sédiments de dragage naturels dans les briques cuites en substitution à l'argile, la deuxième partie est consacrée à l'étude de la valorisation des sédiments de dragage dans les carreaux céramiques en substitution à l'argile (kaolin).

V.1 Etude de la valorisation des sédiments de dragage dans le domaine des briques cuites

La première partie traite l'utilisation des sédiments de dragage comme matière première (à différents taux d'ajouts) dans la conception de briques cuites à différentes températures à savoir 850 et 950 °C. Les briques de référence sont à base d'argile de Remila (usuellement conçue pour la fabrication des briques rouges) sans ajout de sédiments dragués. Différents taux d'ajout de sédiments sont utilisés pour confectionner les briques : 5, 10, 15, 20, 50 et 100% nommées respectivement SB00, SB05, SB10, SB15, SB20, SB50 et SB100, les briques conçues sont cuites à 850 et 950 °C. Les caractérisations physico-chimiques ainsi que l'étude de la microstructure, des propriétés d'isolation et mécaniques, des différentes briques sont développés dans ce chapitre.

V.1.1 Préparation des échantillons

Sept briques crues nommées SB00, SB05, SB10, SB15, SB20, SB50 et SB100 sont préparées en fonction de différents taux d'ajouts de sédiments de dragage. Les proportions de matières premières sont données dans Tableau V.1. La granulométrie des matières premières est choisie de telle sorte à récupérer la fraction < 125 µm.

Tableau V.1: Proportions des matières premières utilisées pour la préparation des briques (% de matière sèche).

Mélange	Sédiment (P2)	Argile de Remila
SB00	0%	100%
SBO5	5%	95%
SB10	10%	90%
SB15	15%	85%
SB20	20%	80%
SB50	50%	50%
SB100	100%	0%

V.1.2 Caractérisations physico-chimiques de l'argile de Remila et du sédiment P2

V.1.2.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique de l'argile de Remila et sédiment de dragage P2 sont représentée sur la figure V.1.

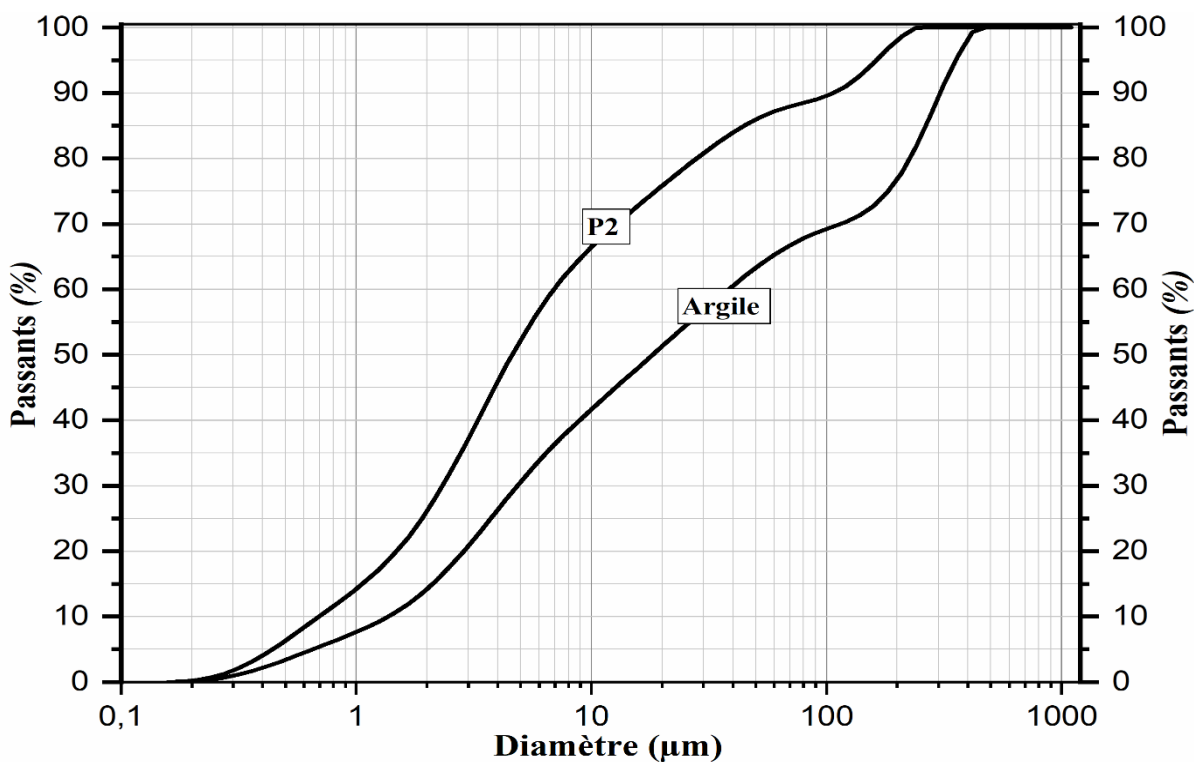


Figure V.1: Analyse granulométrique de l'argile de Remila et du sédiment (P2).

D'après cette figure nous constatons que la granulométrie de l'argile est divisée en trois catégories : la fraction argileuse ($< 2\mu\text{m}$) d'une valeur de 13,57%, la fraction limoneuse étalée entre 2 et $63\mu\text{m}$ d'une valeur de 49,74% et la fraction sableuse $> 63\mu\text{m}$, ayant une valeur de 34,69%. D'après cette figure, l'échantillon est caractérisé par une distribution granulométrique trimodale, le premier est généralement observé à $1,9\mu\text{m}$ qui définit la partie d'argile, deuxième est observé à $10,5\mu\text{m}$ ce qui signifie que l'argile contient des limons. Le troisième mode est de $316,29\mu\text{m}$ caractérisant la présence de la fraction sableuse. Le D_{10} , D_{50} et D_{90} déterminée par la courbe cumulative sont de 1,45, 17,38 et $316,28\mu\text{m}$, respectivement.

V.1.2.2 Limites d'Atterberg et indice de plasticité

Les résultats des limites d'Atterberg et les indices de plasticité des échantillons d'argile et des sédiments (Figure V.2) nous montre que les limites d'Atterberg et de plasticité sont beaucoup plus élevés dans l'argile que dans le sédiment (P2).

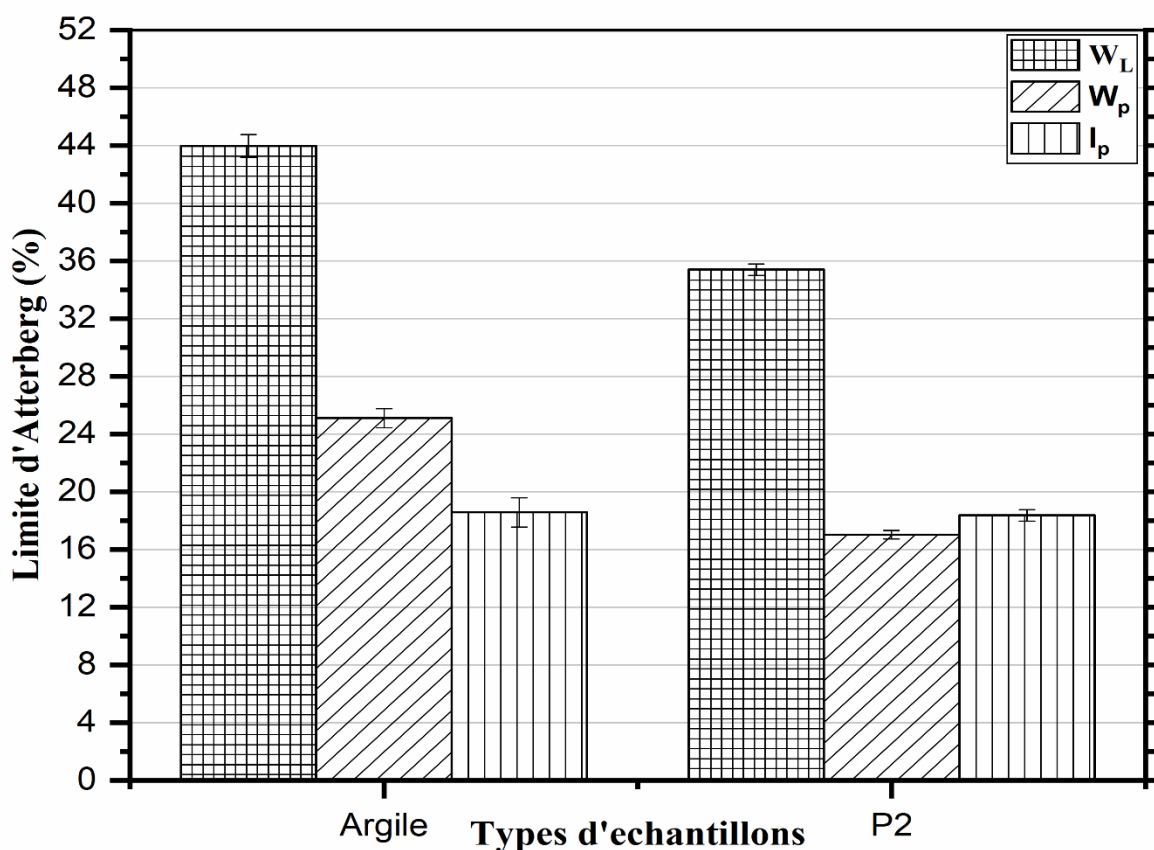


Figure V.2: Les limites d'Atterberg de l'argile et du sédiment.

En effet, les indices de liquidité et de plasticité sont de 43,97 % et de 25,1 % et sont de 35,4% et 17,03% respectivement pour l'argile et le sédiment P2. Cela pourrait être dû au fait

que les deux matériaux ont une distribution granulométrique différente et le sédiment de dragage du port contient plus de particules fines.

V.1.2.3 Composition chimique

La composition chimique des deux matériaux (Tableau V.2), révèle que les taux de SiO_2 et Al_2O_3 dans l'argile sont de 45,21% et 14,88%, respectivement. Une plus grande quantité de Fe_2O_3 (5,58%) a été observée dans l'argile et une teneur en alcalino-terreux (CaO et MgO) de 13,34 % et 2,04 %, respectivement. Les pertes aux feu (L.O.I) sont légèrement plus élevées dans l'argile que dans le sédiment (P2), elles sont de 15,5% et 14,85% respectivement.

Tableau V.2: Compositions chimiques des matières premières.

Les oxydes	Teneurs (% massique)	
	Argile	Sédiment P2
SiO_2	45,21	44,97
Al_2O_3	14,88	14,17
Fe_2O_3	5,58	4,86
MnO	0,03	0,03
MgO	2,04	2,15
CaO	13,34	15,26
Na_2O_3	1,31	1,11
K_2O	1,79	2,07
TiO_2	0,68	0,69
P_2O_5	0,23	0,19
SO_3	0,70	0,01
LOI	15,5	14,85
ΣTotal	100	100

V.1.2.4 Composition minéralogique

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) des deux matériaux (Figure V.3) montre que l'argile et le sédiment de dragage P2 sont majoritairement constituées de quartz (20,88,

26,70 et 39,62 ° 2 θ) de calcite (23,19 et 29,60 ° 2 θ) et de kaolinite (12,77 ° 2 θ) présentant des proportions plus faibles de muscovite (19,78 ° 2 θ), hematite (33,12 ° 2 θ) et d'albite (25,20 ° 2 θ).

En outre, nous remarquons que l'argile et les sédiments (P2) sont similaires dans leur nature minéralogique. Cependant, la kaolinite, l'albite, l'hématite et la muscovite sont légèrement plus élevés dans l'argile. A la base des analyses chimiques et minéralogiques, nous concluons que le sédiment P2 pourrait être utilisé comme matière première pour la fabrication de briques d'argile cuites.

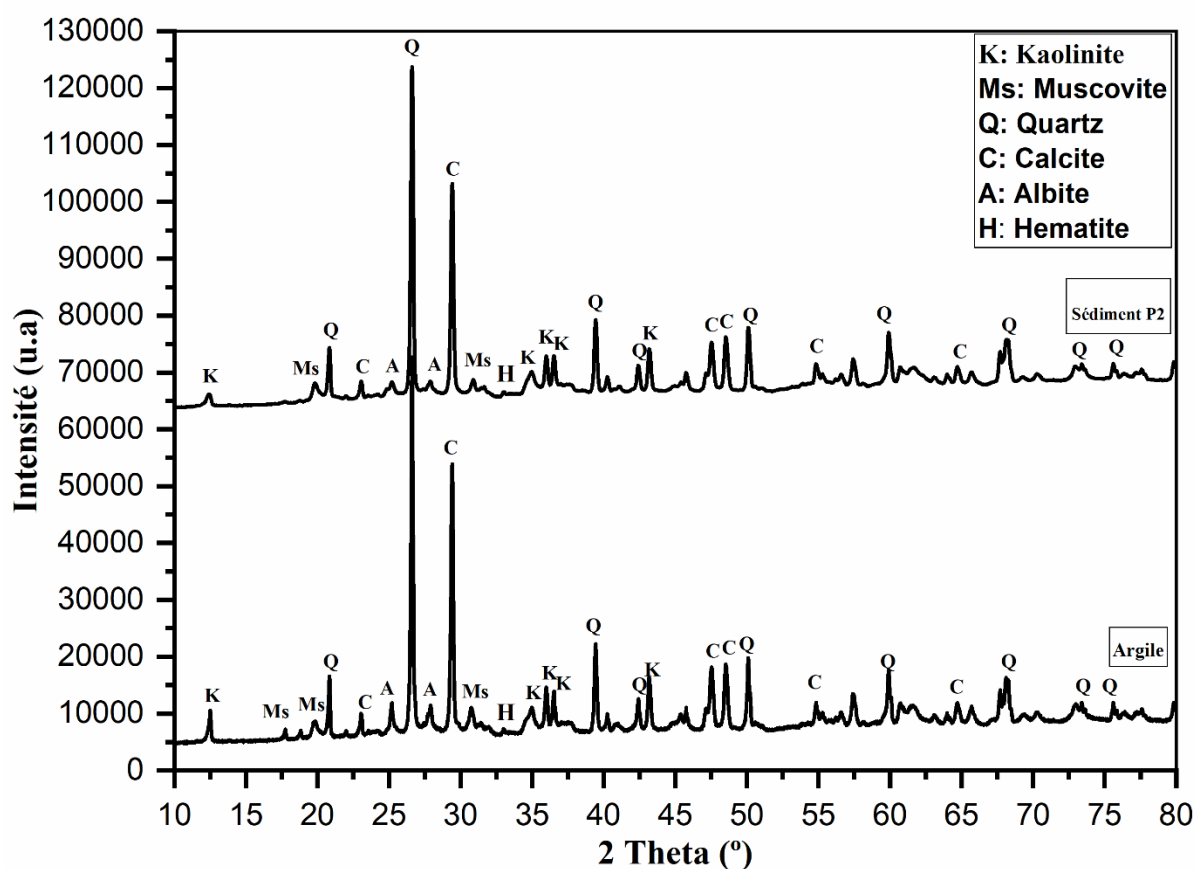


Figure V.3: Diagramme de DRX de l'argile de Remila et Sédiment P2

V.1.2.5 Comportement thermique de l'argile de Remila

Selon les résultats portés sur les courbes ATG-ATD (Figure V.4), l'argile présente trois événements thermiques. Le premier événement est entre 30 et 200°C, marqué par un pic endothermique centré à 70°C. A cette température une perte de masse de 1,7 % est enregistrée, elle est attribuée au départ de l'eau physisorbée. Le deuxième événement est observé entre 200 et 600°C, enregistrant une perte de masse de 4,2%. Dans cette gamme de températures, deux effets thermiques ont pu être observés, le premier pic est exothermique a été enregistré dans la

gamme de température 200-380°C attribué la combustion des matières organiques. Le deuxième pic endothermique caractérisant la déshydroxylation de la kaolinite pour donner du métakaolin a été observée vers 500°C. Dans la plage de température de 600 à 800°C, nous remarquons une perte de masse de 12,4% caractérisé par un pic endothermique à 700°C. Ces pertes sont attribuées à la décomposition des carbonates avec la libération du CO₂. Enfin entre 800-1100°C, une perte de poids de 1% en poids a été observée. Ceci pourrait être dû à la recristallisation et à la réorganisation de la métakaolinite pour donner le spinelle aluminium-silicium comme indiqué par un léger épaulement exothermique.

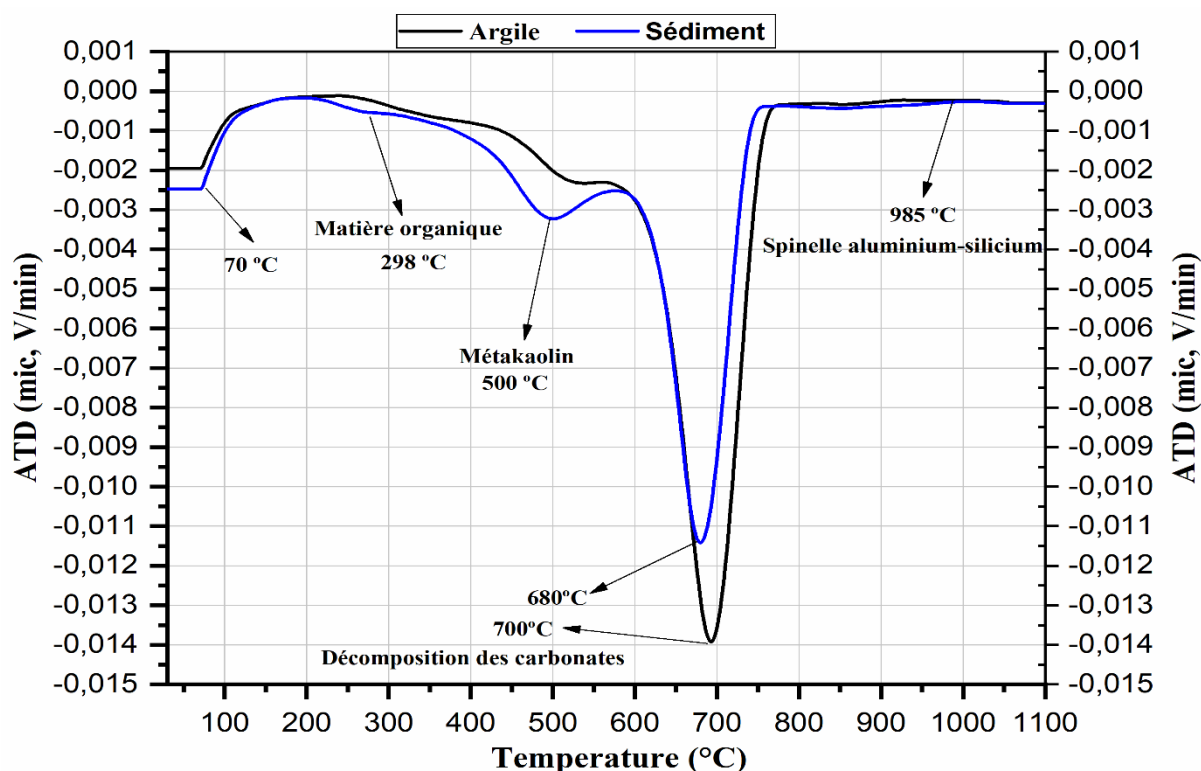


Figure V.4: Analyse thermique ATD de l'argile et du sédiment P2.

V.1.3 Elaboration des briques à base du sédiment P2

Les étapes d'élaboration des briques cuites sont résumées dans le schéma technologique de la figure V.5. Les matières premières composant les briques sont tamisées à sec à 125 µm. Après homogénéisation du mélange, des briques de calibre (60 × 30 × 10 mm³) sont pressées à 5 tonnes à l'aide d'une presse hydraulique uniaxiale (type Mega KCK-30).

Les échantillons ont d'abord été séchés à l'air pendant 24 heures puis séchés dans une étuve à 105 °C avant de subir une calcination à différentes températures 850 °C et 950 °C.

pendant 1 heure dans un four de type Carbolite CSF avec une vitesse de chauffe de 3 °C / min. Les échantillons sont refroidis selon l'inertie du four.

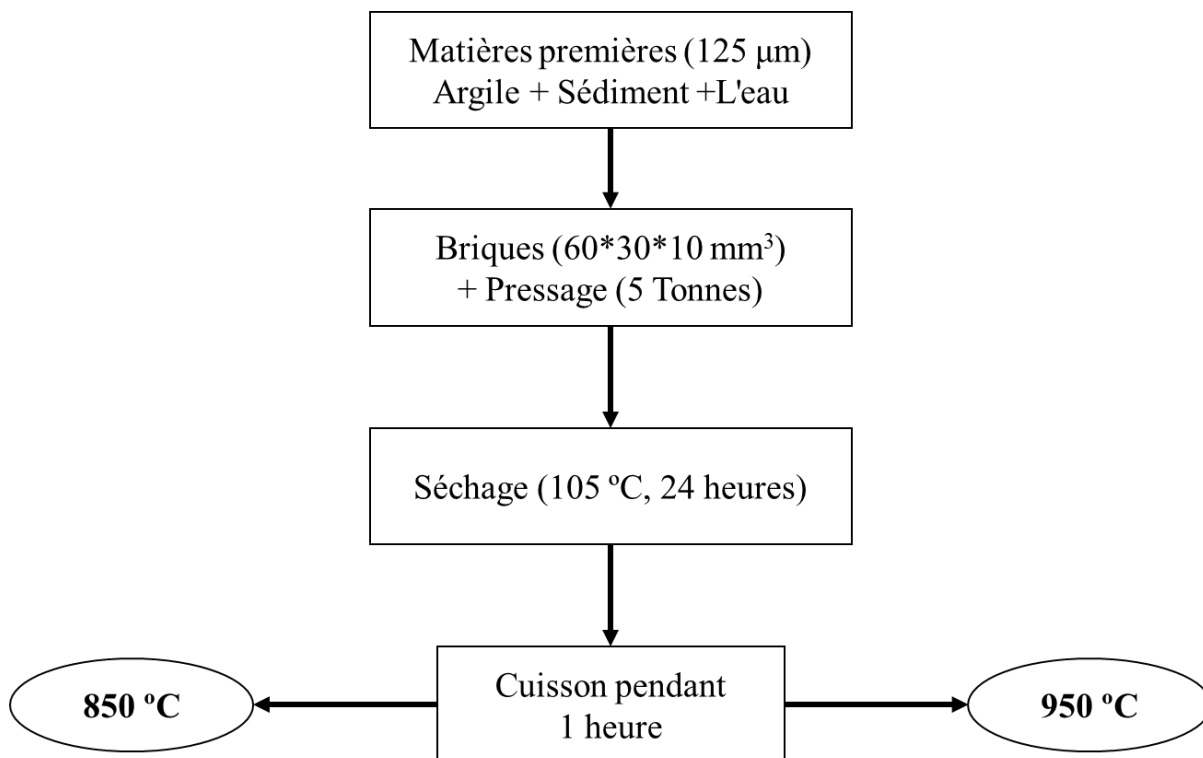


Figure V.5: Schéma technologique des étapes d'élaboration des briques.

V.1.4 Caractéristiques physiques des briques cuites

Les briques élaborées ont subi une série d'essais répondant aux normes internationales. Ces tests comprennent, le retrait, l'absorption en eau, la porosité, la masse volumique.

V.1.4.1 L'aspect visuel après cuisson

Après cuisson, aucuns défauts tels que les fissures et gonflement n'ont été observés sur les briques (Figure V.6). Malgré la quantité élevée d'oxyde de fer (Fe_2O_3), connue responsable de la coloration rouge des briques, elles sont moins colorées et présentent une coloration plus au moins jaune à marron claire. Ceci est probablement due à la présence des carbonates qui favorisent la formation de silicates de calcium, qui masque l'effet du Fe^{3+} en favorisant le développement de couleurs plus claires dans les briques [3, 4, 5].

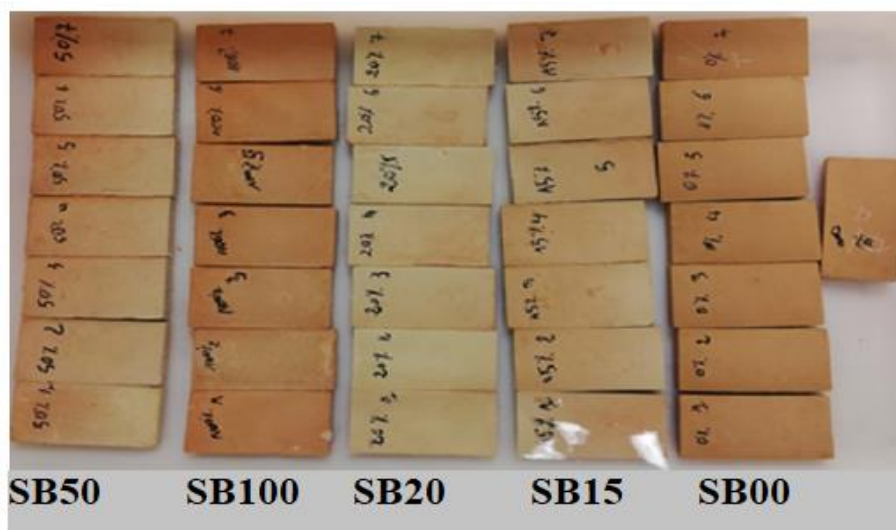


Figure V.6: Photo des échantillons de briques cuites à 950 ° C

V.1.4.2 Comportement des briques vis-à-vis du retrait (LFS %)

Selon les valeurs données dans la figure V.7, le retrait des briques est inférieur à 8%, ce qui concorde avec la valeur donnée pour les briques d'argile standard [6]. Ainsi, le retrait des échantillons à 850 ° C augmente avec l'augmentation de la quantité de sédiment P2 jusqu'à la valeur de 0,67% correspondant à l'échantillon renfermant 10% de sédiment (P2). Cependant, au-dessus de cette valeur, le retrait des échantillons passe de 0,55% à 0,19%, puis il diminue à 0,29% pour la brique renfermant 100% de sédiment. À 950 ° C, le retrait a diminué de 1,29% à 0,20% lorsque la quantité de sédiments varie de 0 à 50%, Au-delà de 50% le retrait des échantillons a augmenté. Ce comportement est directement lié au quartz qui compose le squelette des briques et réduit le possible de contraction du squelette des briques.

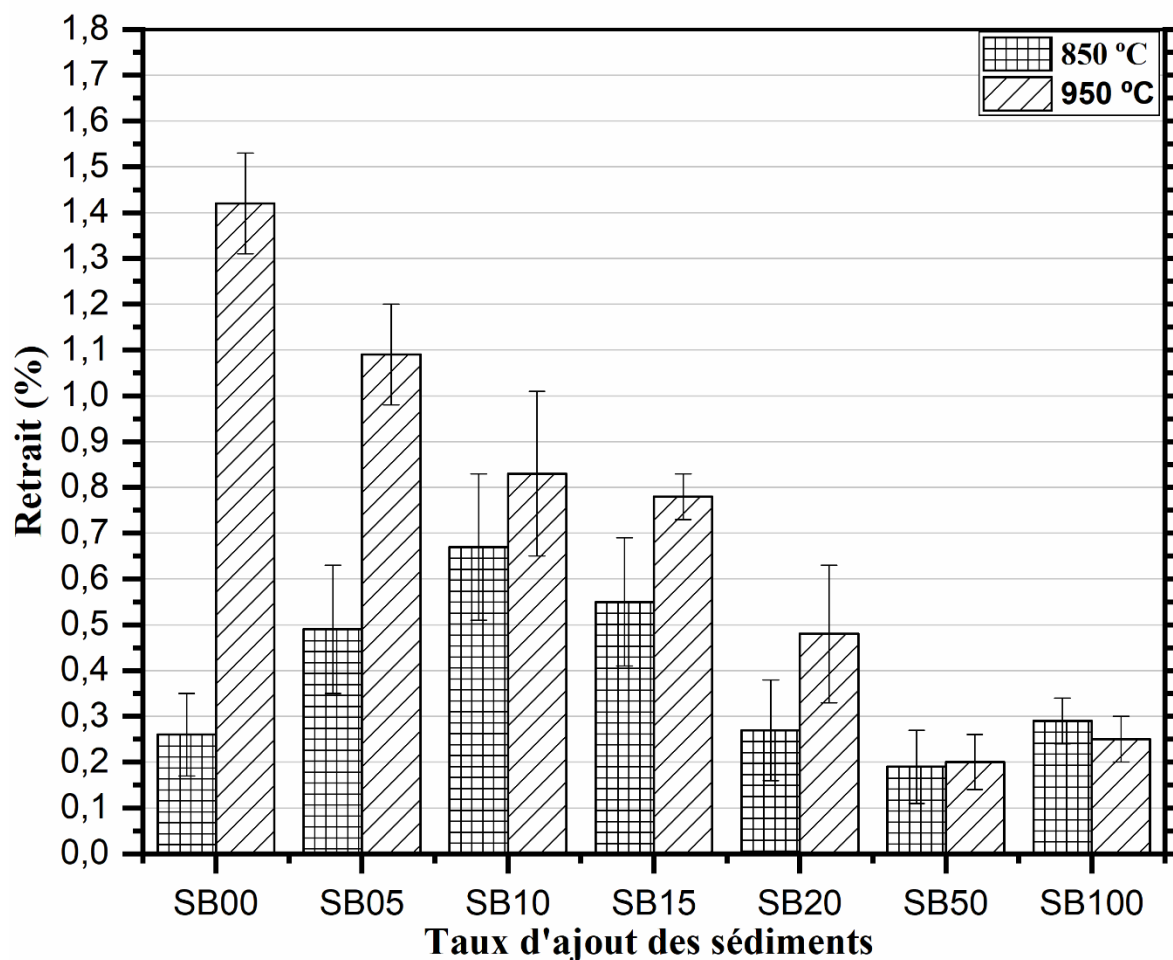


Figure V.7: Retrait des briques cuites à 850 et 950°C.

V.1.4.3 Masse volumique apparente des différentes briques

Selon la figure V.8, Les masses volumiques apparentes des briques cuites (850 et 950 °C) ont diminué avec l'incorporation du sédiment (P2). Les briques de référence (sans ajout de sédiment) présentent des masses volumiques apparentes de 1841 et 1854 kg/m³, respectivement à 850 et 950 °C. L'ajout de sédiment (P2) a produit une légère diminution de la masse volumique apparente, obtenant des valeurs de 1778 et 1771 kg/m³ pour les briques SB100 cuites à 850 et 950 °C respectivement. Cela est peut-être dû à la taille des grains et à la porosité excessive des différentes briques.

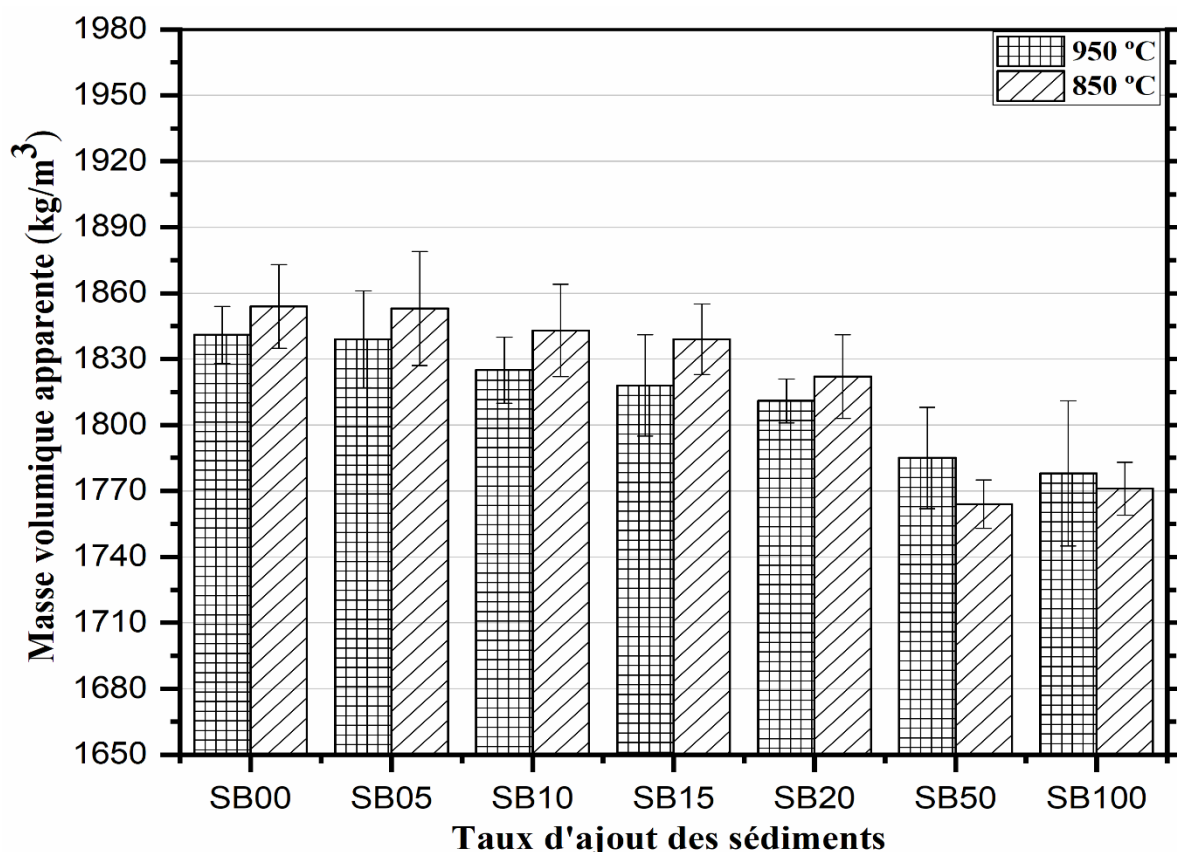


Figure V.8: Masses volumiques apparentes des briques cuites à 850 et 950°C.

V.1.5 Absorption en eau des différentes briques

L'absorption en eau des briques de référence cuites à 850 et 950 °C (Figure V.9) est de 16,8% et 15,4%, respectivement. L'absorption en eau des briques cuites à 850 °C diminue à mesure que le taux de sédiment (P2) augmente jusqu'à 20% en poids (14,37%). Au-delà de 20%, nous remarquons une légère augmentation de ce paramètre jusqu'à 16,32% pour les briques SB100. Dans le cas des briques cuites à 950 °C, l'absorption en eau diminue avec l'ajout de sédiment jusqu'à 15% de sédiment, avec une valeur de 14,48% pour les briques SB15. Cependant, au-delà de ce taux, ce paramètre augmente à 21,45% pour l'échantillon SB100. Par conséquent, l'ajout de 20% et 15% de sédiments dans les briques cuites à 850 et 950 °C, respectivement, entraîne une diminution de l'absorption en eau. La capacité d'absorption en eau des briques contenant plus de 15% en poids de sédiment (P2) est plus élevée lorsque la température de cuisson est de 950 °C. En effet, ceci est directement lié aux faits que la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) et la calcite perdent leurs carbonates (CO_3) au détriment de l'augmentation des espaces intergranulaires de ces types de briques.

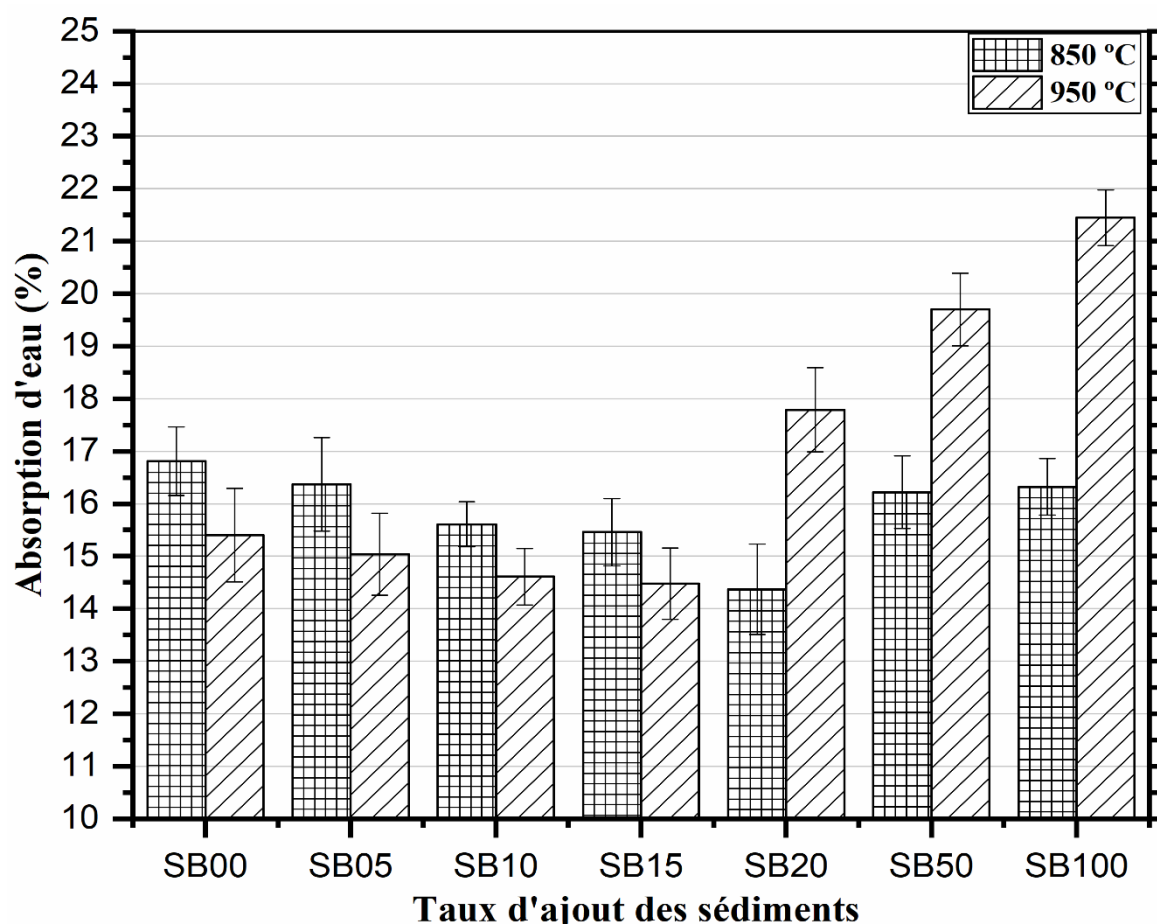


Figure V.9: Absorption en eau des briques cuites à 850 et 950 °C.

V.1.6 Porosité totale des différentes briques

La porosité totale (ouverte et fermée) des briques cuites à 850 °C (Figure V.10) diminue avec l'ajout du sédiment jusqu'à 20%, obtenant une valeur minimale de 27,3%. Cependant, des ajouts de 50 et 100% de sédiments produisent une augmentation de la porosité totale. Par ailleurs, toutes les briques ont une porosité totale plus basse que les briques de référence (sans ajout de sédiment). La porosité des briques cuites à 950 °C (Figure IV.10) diminue avec le taux d'ajout de sédiments jusqu'à 15%. D'autre part, des ajouts plus importants ont produit des briques avec des porosités plus importante que les briques de référence. L'argile et le sédiment contiennent 3,1% d'alcalins (Na_2O et K_2O), qui agissent comme fondants. Ces fondants forment une phase liquide pendant le processus de cuisson, en ce qui entraine la diminution de la porosité des briques cuites à 950 °C.

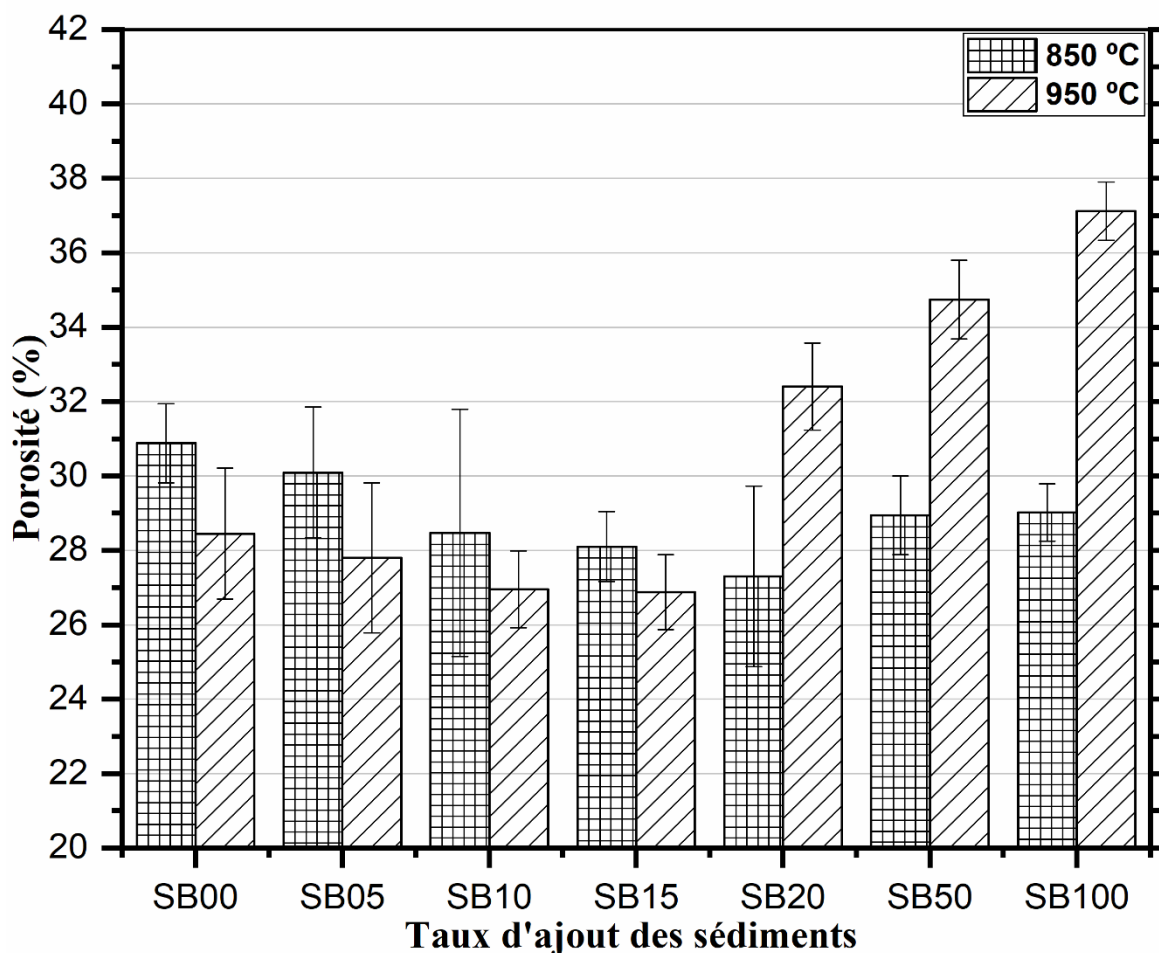


Figure V.10: Porosités des briques cuites à 850 et 950°C.

V.1.7 Propriétés mécaniques des briques

Les valeurs des résistances à la compression des briques (Figure V.11) augmentent avec l'augmentation des taux d'ajouts des sédiments aux températures de frittage (850 et 950 ° C). Les résistances à la compression des briques de référence cuites à 850 °C et 950 °C, sont de 84,3 et 105,8 MPa, respectivement. Les résistances à la compression des échantillons augmentent linéairement avec l'ajout des sédiments jusqu'à 20 et 15% pour les briques cuites à 850 et 950 ° C respectivement. Les valeurs maximales des compressions correspondantes sont de 108,2 et 127,7 MPa respectivement pour les briques cuites à 850 et 950 °C à base de 20 et 15% de sédiments puis celles-ci diminuent une fois qu'on dépassé ce seuil. Toutes les briques cuites à 850 et 950 °C ont des valeurs de résistance à la compression beaucoup plus élevée que la valeur des briques usuelles dont la valeur minimale est de 10 MPa, norme établie par les tests standards (ISO 8302 ,1991)[7].

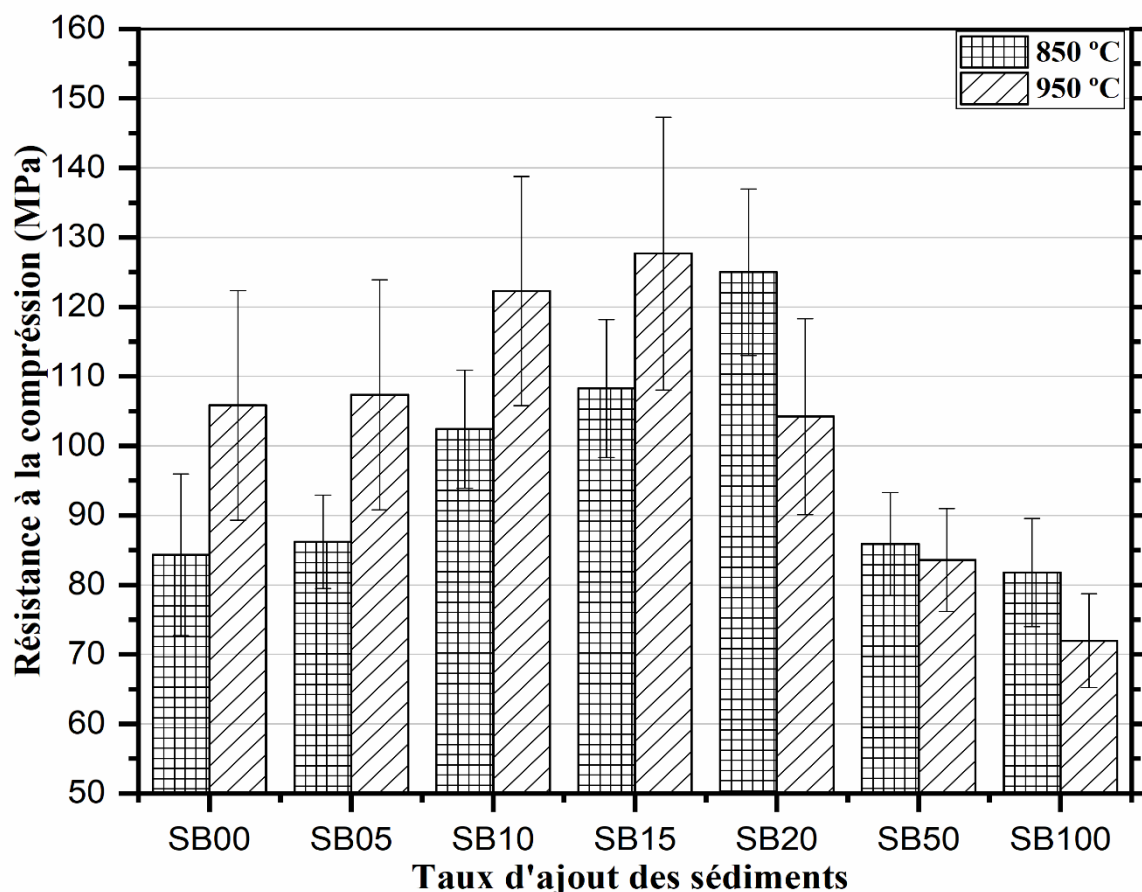


Figure V.11: Résistance à la compression des briques cuites à 850 et 950 °C.

Les valeurs des résistances à la flexion des briques illustrée dans la figure V.11. La résistance à la flexion des briques de référence cuites à 850 et 950 ° C est de 19,4 et 29,6 MPa, respectivement. La résistance à la flexion des briques cuites à 850 ° C augment à mesure que le taux de sédiment naturel (P2) augmente jusqu'à 20% en poids (30,3 MPa). Au-delà de 20%, nous remarquons une diminution de ce paramètre jusqu'à 17,16 MPa pour les briques SB100. Dans le cas des briques cuites à 950 ° C, la résistance à la flexion augmente avec l'ajout de sédiment jusqu'à 15% de sédiment, avec une valeur de 33,67 MPa pour les briques SB15. Cependant, au-delà de ce taux, ce paramètre diminue à 19,27 MPa pour l'échantillon SB100. Par conséquent, l'ajout de 20% et 15% de sédiments dans les briques cuites à 850 et 950 °C, respectivement, entraîne une augmentation des résistances à la compression et à la flexion. En effet, ceci est directement lié aux faites que la porosité diminue. La réduction des propriétés mécaniques est due à la structure poreuse enregistré pour les échantillons.

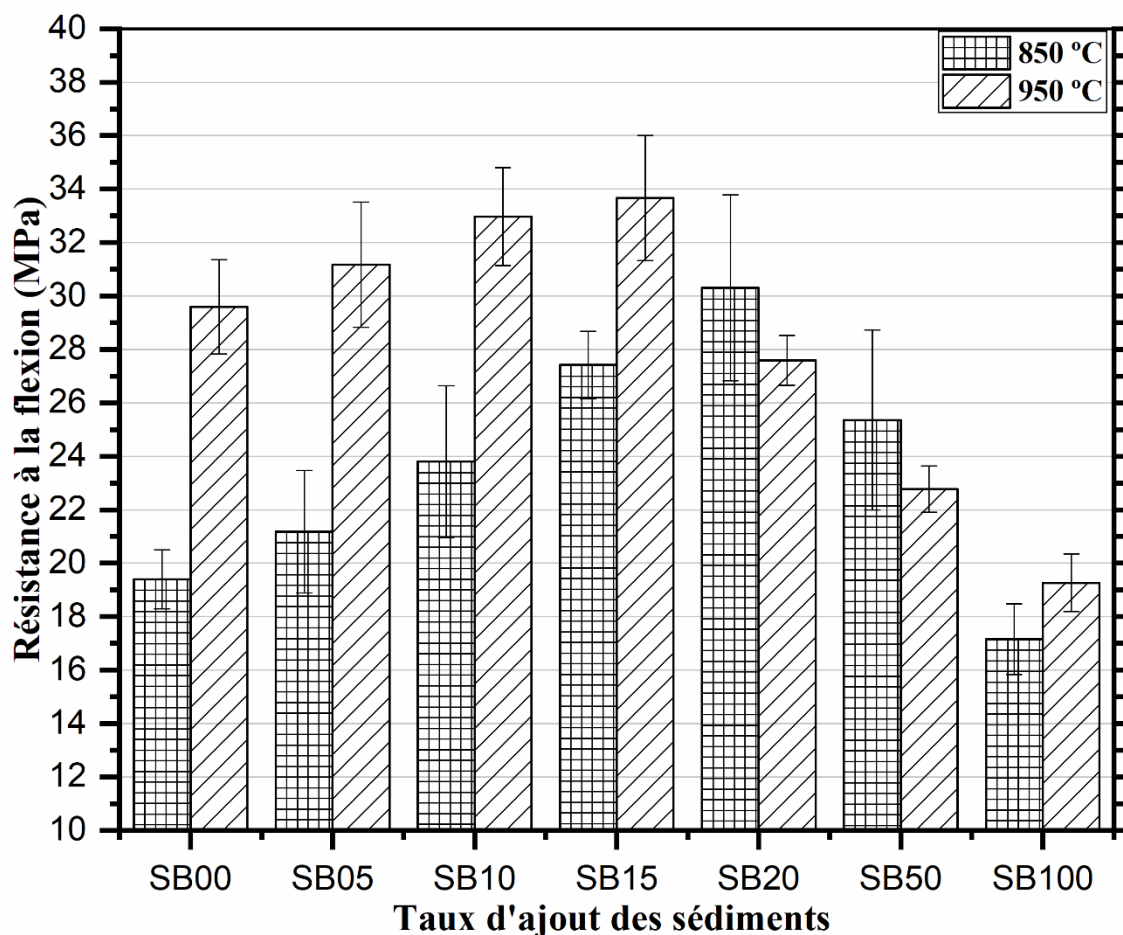


Figure V.12: Résistance à la flexion des briques cuites à 850 et 950 °C.

V.1.8 Analyse minéralogique des briques cuites

Les résultats de l'analyse minéralogique des briques cuites à 850 et 950 ° C sont représentés par les Figures V.13 et V.14, respectivement. Les principales phases minéralogiques obtenues sont le quartz (19,90 et 26,59 °2θ), la calcite (27,56 et 39,37 ° 2θ), l'albite (25,42 et 27,90 ° 2θ), la muscovite (19,90 ° 2θ), le silicate de calcium aluminium ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) (28,97 et 29,85 ° 2θ) et la diopside aluminium (CAMS) ($\text{Ca}(\text{Mg,Fe,Al}) (\text{Si, Al})_2\text{O}_6$) (33,13 et 35,71 ° 2θ) pour les deux groupes de briques cuites à 850 et 950 °C.

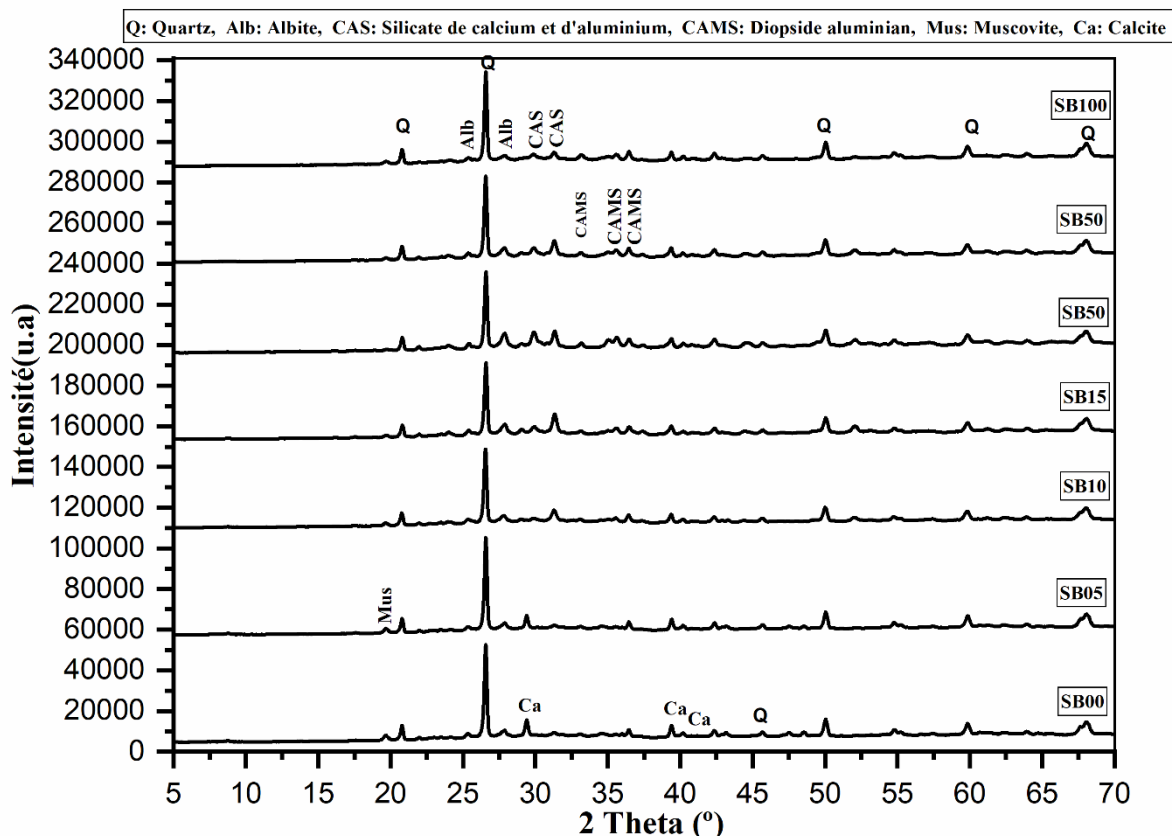


Figure V.13: Diagramme de diffraction des rayons X des briques cuites à 850 ° C.

La calcite a été détectée dans les briques cuites à 850 °C correspondant aux briques SB00 et SB05, Cela est probablement dû à des grains de calcite confinés dans la structure des briques. Cependant, des ajouts plus importants de sédiment entraînent la disparition de la calcite en faveur de l'apparition d'une autre phase minéralogique complexe telle que le diopside aluminium (CAMS) $(Ca(Mg,Fe,Al)(Si,Al)_2O_6)$. A 950 °C, la phase minéralogique de la calcite disparaît au profit d'apparition d'une autre phase sous forme de silicate de calcium aluminium CAS et de phases diopside d'aluminium (CAMS). Comme le montre l'analyse ATG-ATD (Figure IV.4), la décomposition de la calcite donnant du CaO et libérant du CO_2 se produit autour de 700 °C. Il a été constaté que la muscovite n'est détectée que dans les briques cuites à 850 °C et disparaît à 950 °C. Ce fait est généralement attribué au processus de déshydroxylation structurale qui se produit au-dessus de 800 °C [2,8,9].

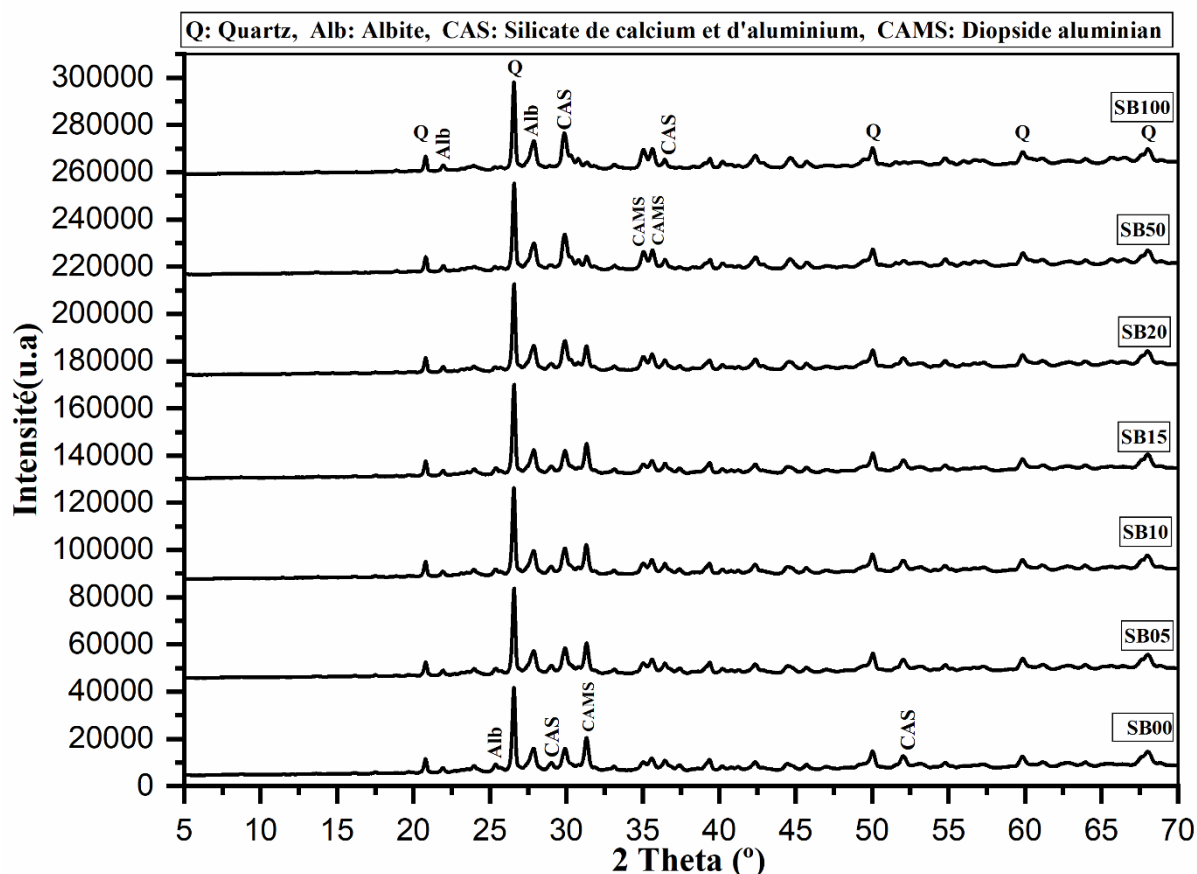


Figure V.14: Diagramme de diffraction des rayons X des briques cuites à 950 ° C.

V.1.9 Morphologie et microstructure

Selon les figures V.15, V.16 V.17 et V.18, montrant les images MEB des échantillons témoins et des échantillons contenant 15, 20 et 100% de sédiments, l'ajout des sédiments modifie à relativement la microstructure des briques remarqué par la porosité des échantillons montrant des pores interconnectés. Cependant, la présence de pores isolés de formes arrondies caractérisant la porosité fermée des briques sont observés sur les échantillons de référence.

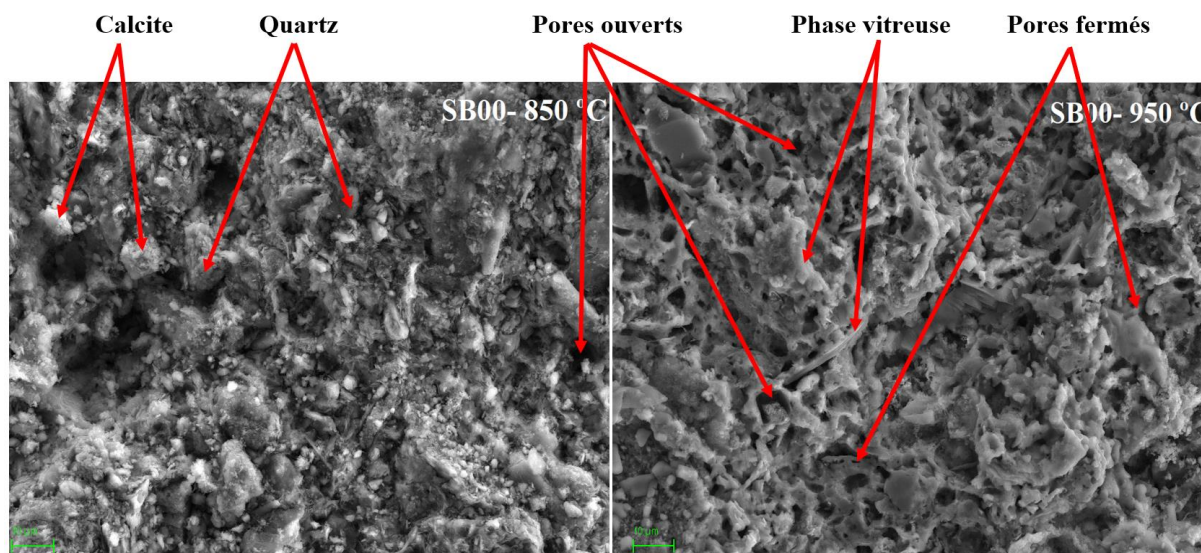


Figure V.15: Photos MEB des échantillons SB00.

La quantité de phase vitreuse augmente au fur et à mesure que la température de cuisson augmente, cela peut se remarquer sur la diminution de pores interconnectés comme le montre la micrographie de la figure V.16 de l'échantillon contenant 20% de sédiment

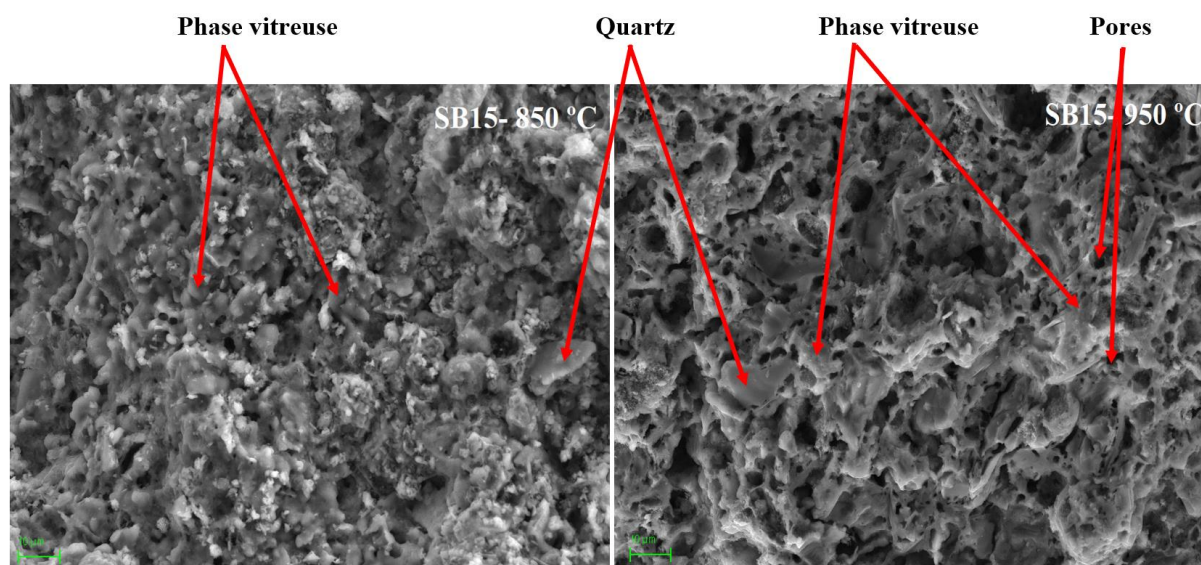


Figure V.16: Photos MEB des échantillons SB15.

Les briques cuites à 850 °C, avec ajout de 20% sédiment (Figure V.17) ont une microstructure légèrement plus dense que les échantillons à base de 15% de sédiment (Figure IV.16), en raison de la formation d'une plus grande quantité de phase vitreuse qui a été observée dans ces échantillons. Selon les masses volumiques apparentes et d'absorption en eau, l'incorporation de 15 à 20 % de sédiments dans les briques cuites à 850 et 950 °C, ont produit une augmentation de la porosité fermée.

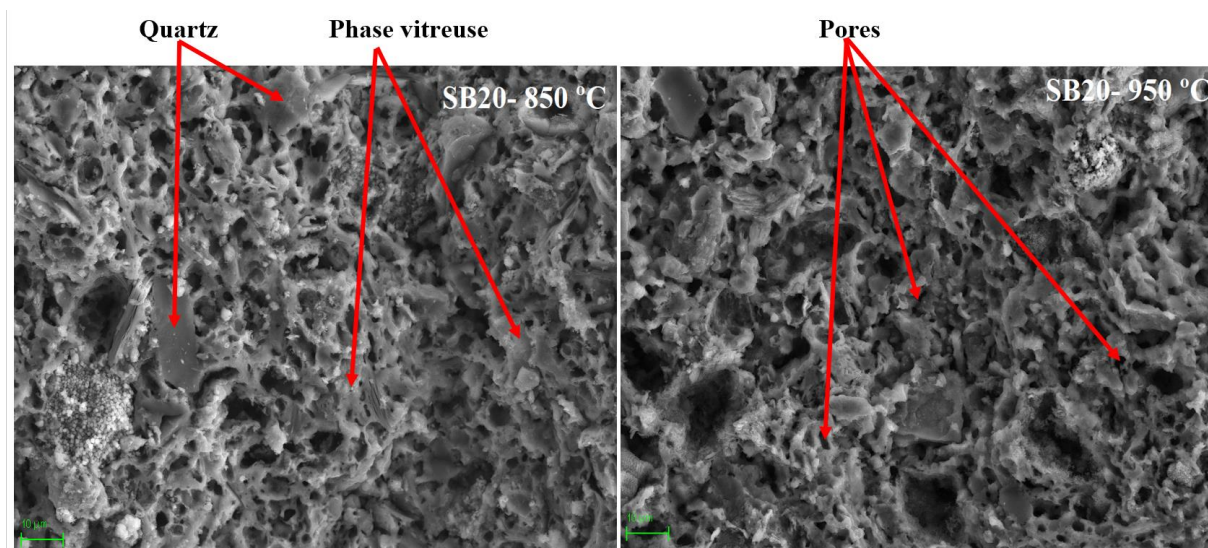


Figure V.17: Photos MEB des échantillons SB20.

D'autre part, les briques à 100 % de sédiment (figure V.18) ont une plus grande porosité ouverte. La quantité de phase vitreuse augmente au fur et à mesure que la température de cuisson augmente. L'incorporation de grandes quantités de sédiments augmente la fonction des pores interconnectés, ce qui nous laisse supposer que les températures de cuisson 850 et 950 °C sont insuffisantes.

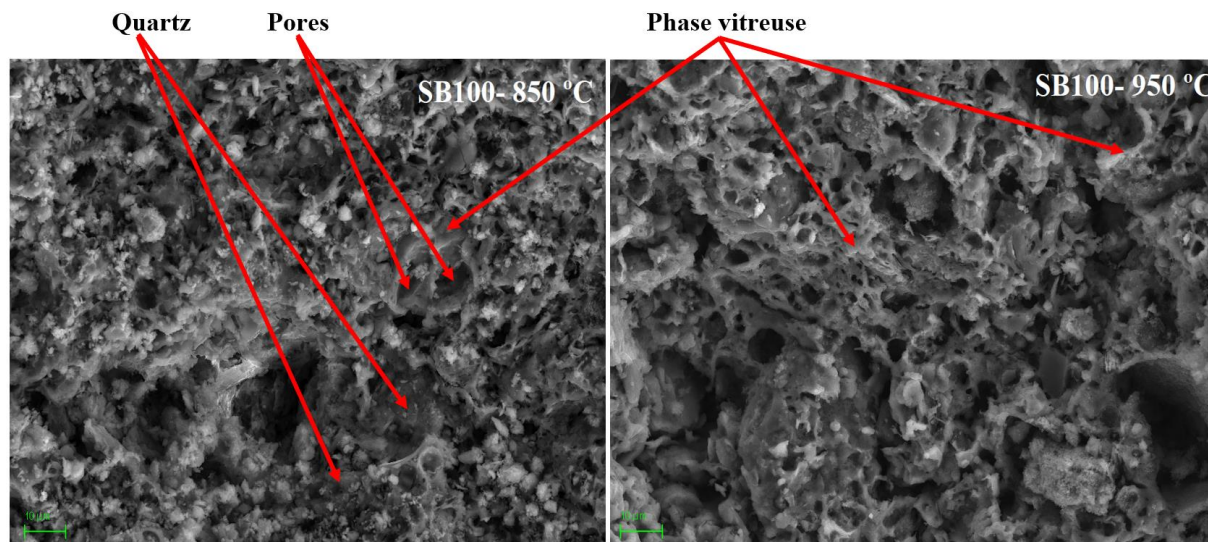


Figure V.18: Photos MEB des échantillons SB100.

V.1.10 Propriétés thermiques des briques

Les propriétés thermiques des différentes briques, caractérisées par les conductivités thermiques déterminées à 10 °C, à base de 0, 15, 20 et 100% de sédiments calcinés à 850 et 950 °C sont représentés sur la figure V.18.

La conductivité thermique de brique de référence SB0 cuite à 950 ° C est de 0,43 Wm⁻¹K⁻¹. L'incorporation de sédiment produit une diminution de la conductivité thermique, obtenant une valeur de 0,24 Wm⁻¹K⁻¹ avec l'ajout de 100% de sédiments. Cependant, pour les briques cuites à 850 ° C, la conductivité thermique est de 0,32 Wm⁻¹K⁻¹ dans les briques de référence, celle-ci a diminué jusqu'à 0,22 Wm⁻¹K⁻¹ correspondant aux briques contenant 15% de sédiments. A 950 °C, L'ajout de 20% de sédiment, produit des briques avec une conductivité thermique de 0,33 pratiquement similaire aux briques de références (0,35 Wm⁻¹K⁻¹). La capacité d'isolation thermique la plus élevée est obtenue pour les briques qui contiennent 15% de sédiments pour les briques cuites à 850 ° C, avec une valeur de conductivité thermique de 0,22 Wm⁻¹K⁻¹. Pour les briques cuites à 950 °C, la capacité d'isolation thermique est enregistré pour l'échantillon contenant de 100 % de sédiment dont la conductivité thermique est de 0,24 Wm⁻¹K⁻¹.

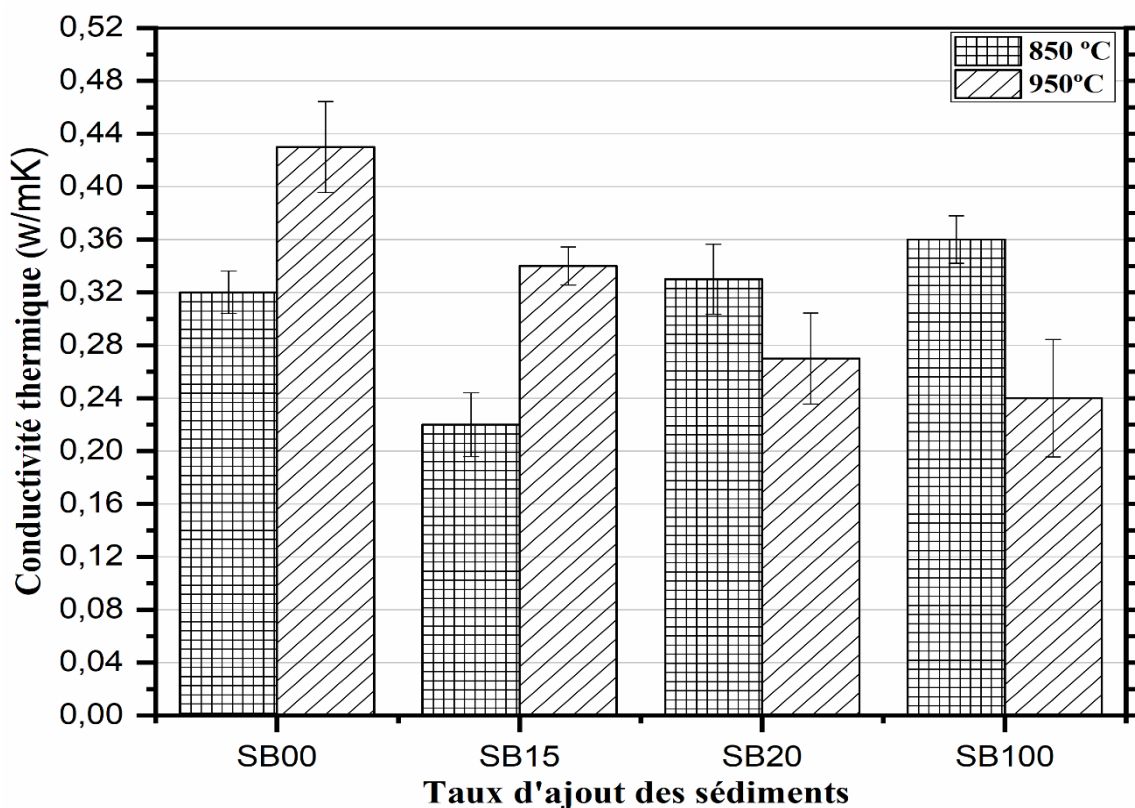


Figure V.19: Conductivité thermique des briques cuites à 850 et 950 °C.

La conductivité thermique des briques est influencée par plusieurs facteurs tels que le type, la taille et la distribution des pores, ce sont des facteurs importants qui contrôlent la propriété de l'isolation thermique des briques contenant des sédiments [10, 11, 12, 13].

V.1.11 Évaluation environnementale :

Comme le montre le tableau V.3, les concentrations des métaux lourds dans les briques cuites sont bien inférieures aux limites établies par l'EPA 658-09 (ISO 8302, 1991)[14]. Ces résultats indiquent que les briques contenant des sédiments peuvent être considérées comme des matières non toxiques et que les métaux lourds sont immobilisés efficacement aux deux températures de cuisson (850 et 950 °C).

Nous remarquons que la concentration du le Chrome (Cr) a diminué en fonction de l'augmentation de la température de cuisson. Cependant, la concentration en cuivre (Cu), Nickel (Ni), plomb(Pb) et zinc (Zn) augmente avec l'augmentation de la température et en fonction des taux d'ajout des sédiments. Néanmoins, ces concentrations restent plus basses par rapport à la limite recommandée par l'EPA 658-09 (ISO 8302, 1991) [14].

Tableau V.3: Résultats des tests US EPA TCLP (ppm) des briques cuites à 850 et 950 °C.

Elément (ppm)	Les briques cuites à 850 °C				Les briques cuites à 950 °C				Limits US-EPA (ppm)[14]
	SB00	SB15	SB20	SB100	SB00	SB15	SB20	SB100	
Cr	0,446	0,711	0,264	0,683	0,237	0,111	0,078	0,112	5
Cu	0,000	0,000	0,01	0,000	0,06	0,24	0,36	0,4	5
Ni	0,01	0,08	0,48	0,16	0,26	0,26	0,24	0,22	-
Pb	0,004	0,002	0,004	0,000	0,036	0,012	0,3	0,02	5
Zn	0,0012	0,026	0,18	0,000	0,193	6	6,6	4,2	-

V.2 Valorisation des sédiments de dragage dans les carreaux céramiques.

L'objectif de ce travail est de suivre le comportement thermique des carreaux céramiques obtenus à partir des mélanges des matières premières plastiques (kaolin) et non plastiques (feldspaths et quartz) et des sédiments de dragage des ports. Les sédiments de dragage à l'état naturels et calcinés (750 °C) sont utilisés en substitution au kaolin. L'étude se concentre sur l'effet de la température de frittage (1100 et 1200 °C) sur les comportements minéralogiques des différentes phases qui en découlent et les propriétés physiques, microstructurales, mécaniques et thermiques des différents types d'échantillons renfermant 0, 10, 20 et 30 % de sédiments (à l'état naturel et calciné). Une étude environnementale sur la lixiviation des métaux lourds contenus dans les différentes céramiques est aussi réalisée.

V.2.1 Protocole expérimental des matières premières

Les différentes matières premières de base sont respectivement le kaolin, le feldspath, le sable et les sédiments à l'état naturels et calcinés.

- Le kaolin utilisé est un kaolin alumineux français du bassin des Charentes.
- Le feldspath utilisé est un feldspath de Ain Barbar (Annaba, Algérie).
- Le sable utilisé est dunaire de Boussaâda (Algérie)
- Les sédiments de dragage portuaires naturels (P2) n'ont subi aucun traitement chimique. Les sédiments calcinés sont traités thermiquement à 750 °C pendant 1 heure, cela pour obtenir une pouzzolane.

Toutes les matières premières ont été broyées et tamisées à 125 µm. Les fractions < 125 µm ont été prises. Les proportions des matières premières sont présentées dans le tableau V.4 ci-dessous :

Tableau V.4: Proportions des différentes matières premières.

Matières Premières	P0	PNC10	PNC20	PNC30	PC10	PC20	PC30
Sédiment P2 (%)	0	10	20	30	0	0	0
Sédiment P2 calcinés (%)	0	0	0	0	10	20	20
Kaolin (%)	50	40	30	20	40	30	20
Feldspath (%)	30	30	30	30	30	30	30
Sable (%)	20	20	20	20	20	20	20

V.2.2 Caractérisations physico chimiques des matières premières

Les compositions chimiques, minéralogiques, dimensionnelles et les caractéristiques physiques des matériaux étudiés sont d'une importance primordiale afin de pouvoir obtenir des céramiques suffisamment denses avec des propriétés acceptables.

V.2.2.1 Composition chimique des différentes matières premières

Les résultats des analyses chimiques des différentes matières premières sont représentés dans le tableau V.5. Nous remarquons que le feldspath et le sable sont essentiellement constitués de silice (SiO_2) avec des quantités 74,72 et 80,98 %, respectivement et des quantités d'alumine (Al_2O_3) relativement importants > à 10%. Le kaolin de caractère alumineux contient des quantités de 42,40% et de 37,84% de SiO_2 et Al_2O_3 , respectivement. D'après ces résultats les compositions chimiques des sédiments naturels et calcinés sont relativement identiques sauf pour la silice, l'alumine, l'oxyde de fer et la chaux qui ont augmenté pratiquement de 2 % dans le sédiment calciné, ceci est due aux différentes pertes durant la cuisson (l'eau de constitution, les carbonates ainsi que les matières organiques) [1] conduisant à des transformations physico-chimiques telles que la déhydroxylation du kaolin en metakaolin (augmentation du SiO_2 et Al_2O_3) et la décarbonatation de la dolomite (augmentation du CaO).

Tableau V.5: Compositions chimiques des matières premières.

Oxides (wt%)	Sediment (P2)	Sediment calciné	Kaolin	feldspaths	Sable
SiO_2	44,97	46,57	42,40	74,72	80,98
Al_2O_3	14,86	16,50	37,84	13,87	11,93
Fe_2O_3	4,86	6,82	0,55	1,39	0,76
MnO	0,03	0,03	0,07	0	0
MgO	2,15	2,36	0,05	0,556	0,21
CaO	15,26	16,58	0,26	1,15	0,18
Na_2O	1,11	1,79	0,03	2,88	0,25
K_2O	2,07	2,08	0,02	2,68	3,02
TiO_2	0,69	0,84	1,99	0,3	0,26
P_2O_5	0,19	0,25	0,01	0,087	0,04
LOI	14,85	3,49	16,78	0,72	1,98

Les pertes au feu sont relativement les même pour les sédiments et le kaolin, elles sont de 14,85 et 16,78 %. Ses pertes caractérisent le départ des eaux de constitution, la combustion

des matières organiques et la décarbonatation des carbonates de calcium et de la dolomite. Par ailleurs, les pertes au feu des feldspaths et du sable sont avoisinantes, elles sont de 0,72 et 1,98 % respectivement.

V.2.2.2 Analyse minéralogique des différentes matières premières

Le spectre DRX obtenu pour les sédiments naturels (Figure V.20) indique que la présence du quartz (SiO_2), la calcite (CaCO_3) de muscovite ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$), d'hématite (Fe_2O_3) et d'albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Par ailleurs, une fois soumis au traitement thermique de 750 °C, le sédiment calciné montre des intensités plus faibles des pics de quartz, d'hématite, de calcite (sous forme de chaux), cependant, les phases cristallines caractérisant la kaolinite ont disparu du fait de leurs transformations en métakaolinite.

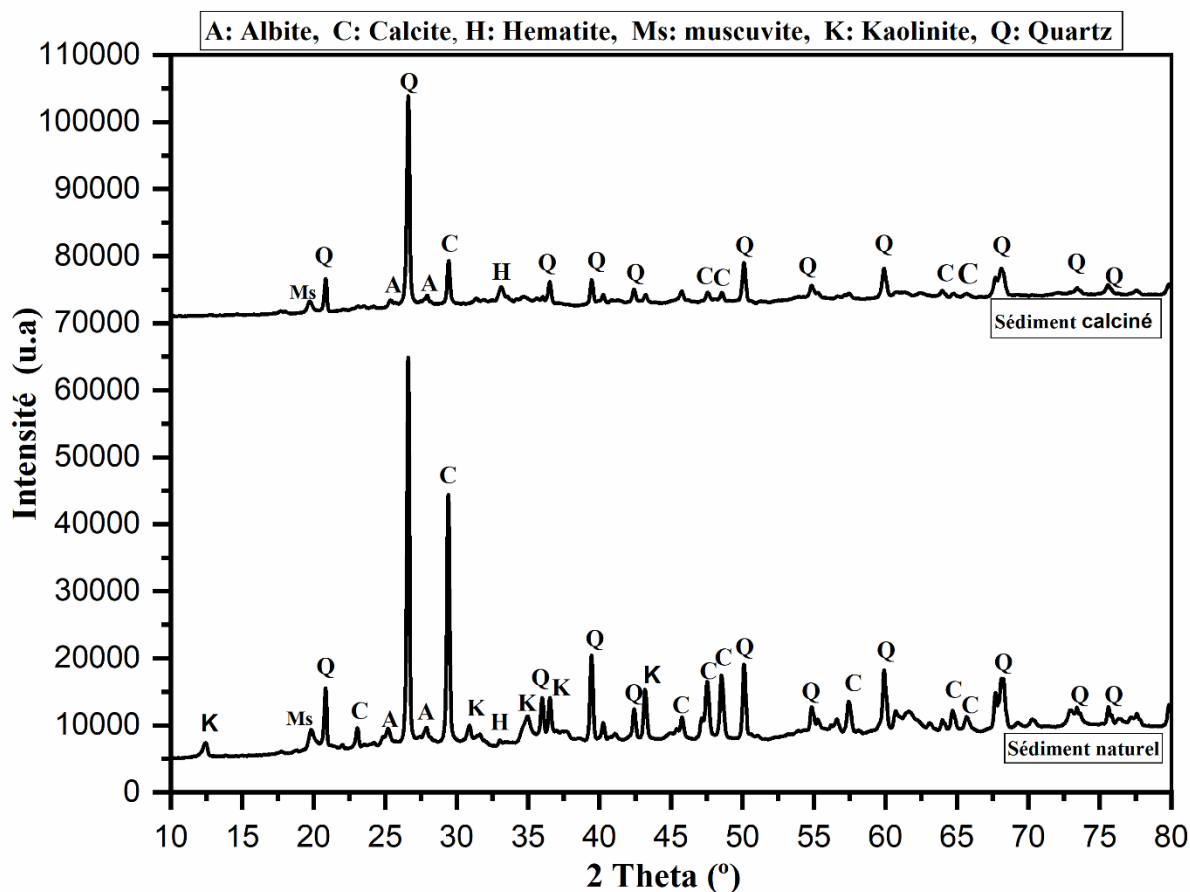


Figure V.20: Diagramme DRX des sédiments naturels et calcinés.

D'autre part, selon le diagramme de DRX du kaolin (Figure V.21), l'analyse montre la présence quasi-totale de kaolinite ; cependant, les présences des pics caractérisant la gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$) et le rutile (TiO_2) sont observées.

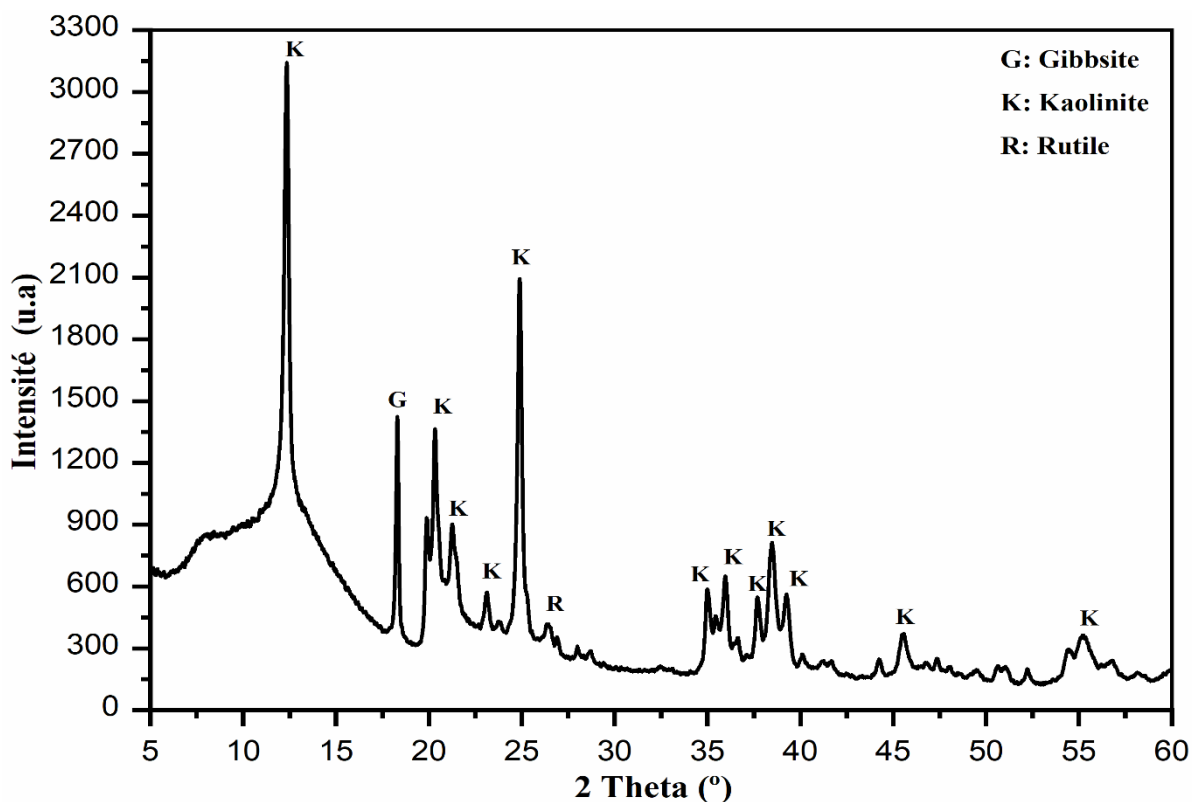


Figure V.21: Diagramme DRX du kaolin.

Selon la figure V.22, les raies des pics notés à des angles de 22.85, 26.65, 36.54 et 43.14 °2θ caractérisant le quartz (SiO₂) sont remarqués sur le diagramme de DRX du sable.

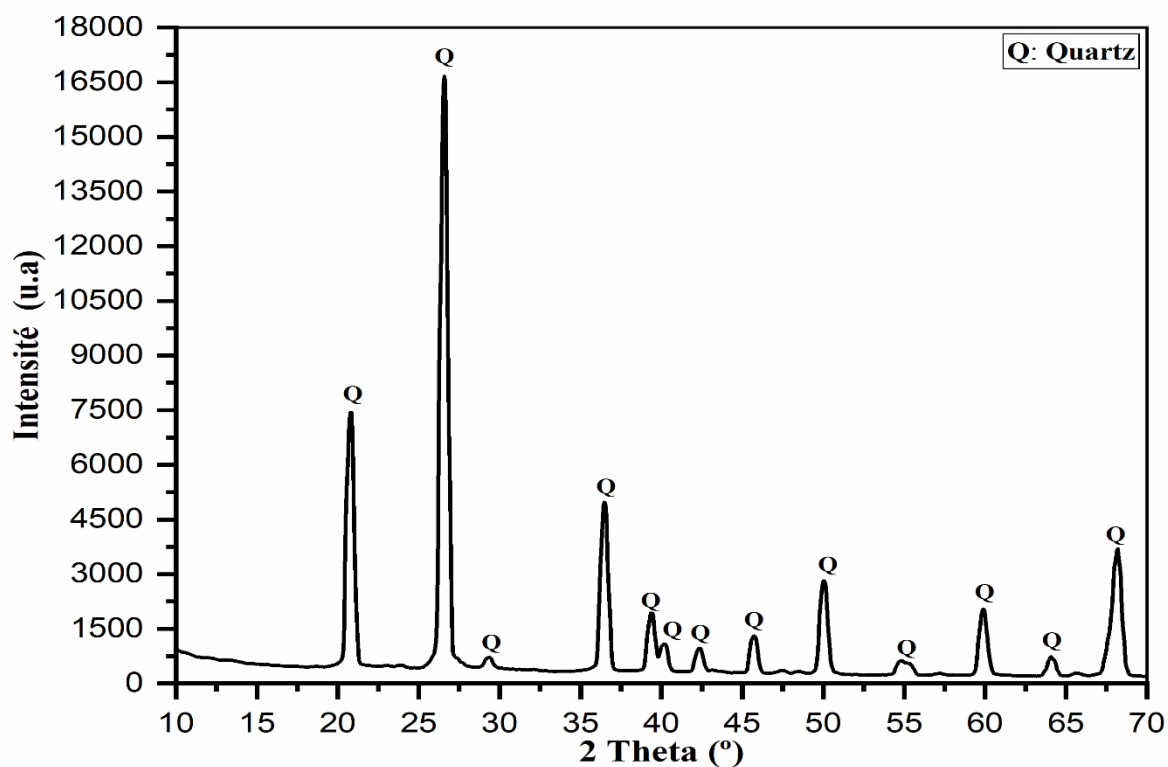


Figure V.22: Diagramme de DRX de sable

Les résultats de DRX des feldspaths (Figure V.23) montre la présence du quartz (SiO_2) ($2\theta=20,85, 26,65$ et $39,54$), d'albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) et d'orthose (KAlSi_3O_8), ceci laisse supposer que c'est un feldspath mixte.

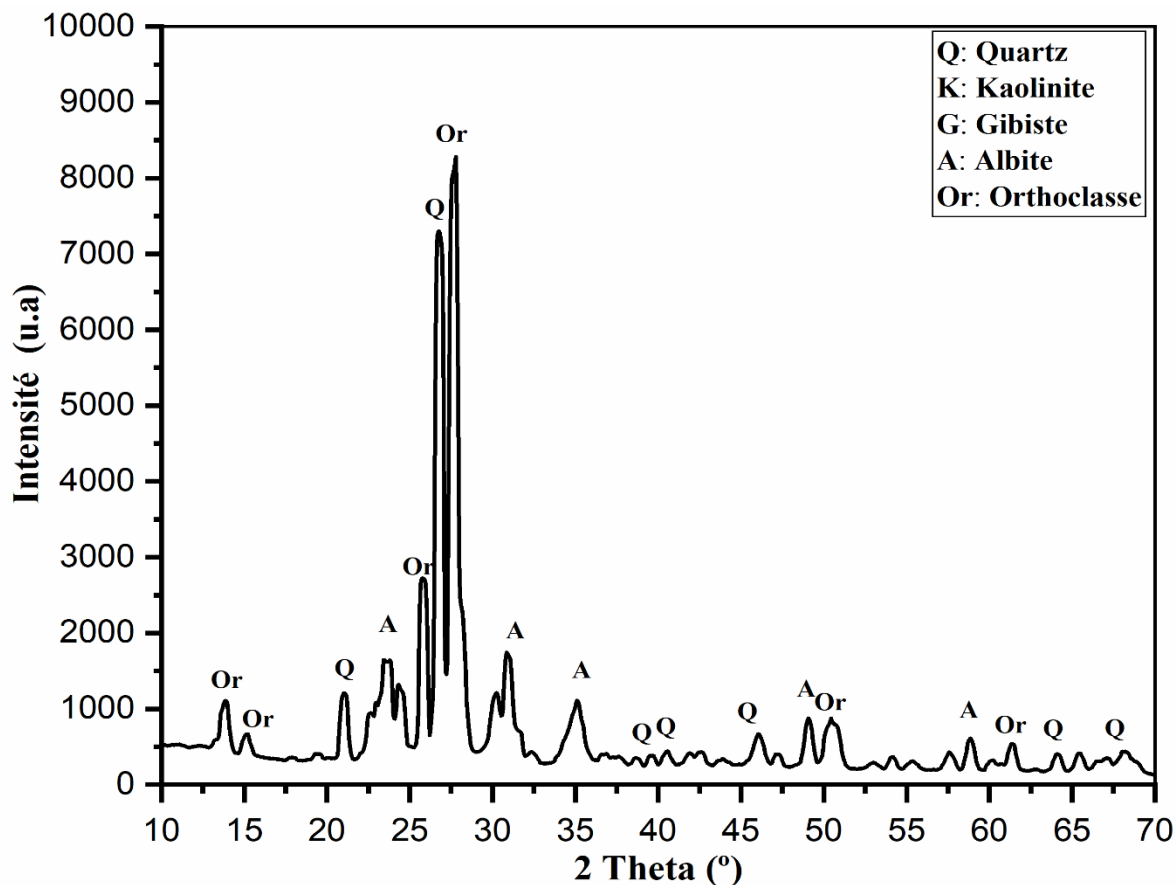


Figure V.23: Diagramme de DRX du feldspath.

V.2.2.3 Analyse granulométrie

La distribution granulométrique des sédiments naturels et calcinés est illustrée sur la figure V.24. La granulométrie médiane (D_{50}) du sédiment dragué calciné est de $67,59 \mu\text{m}$, présentant des valeurs très similaires par rapport au sédiment naturel. Une distribution trimodale est observée ; une distribution des grains de tailles $3,8$, $104,71$ et $363,078 \mu\text{m}$ sont remarqués dissimulant des agglomérats de grains. Le D_{10} et D_{90} déterminé par la courbe cumulative sont de $1,19$ et $316,22 \mu\text{m}$, respectivement.

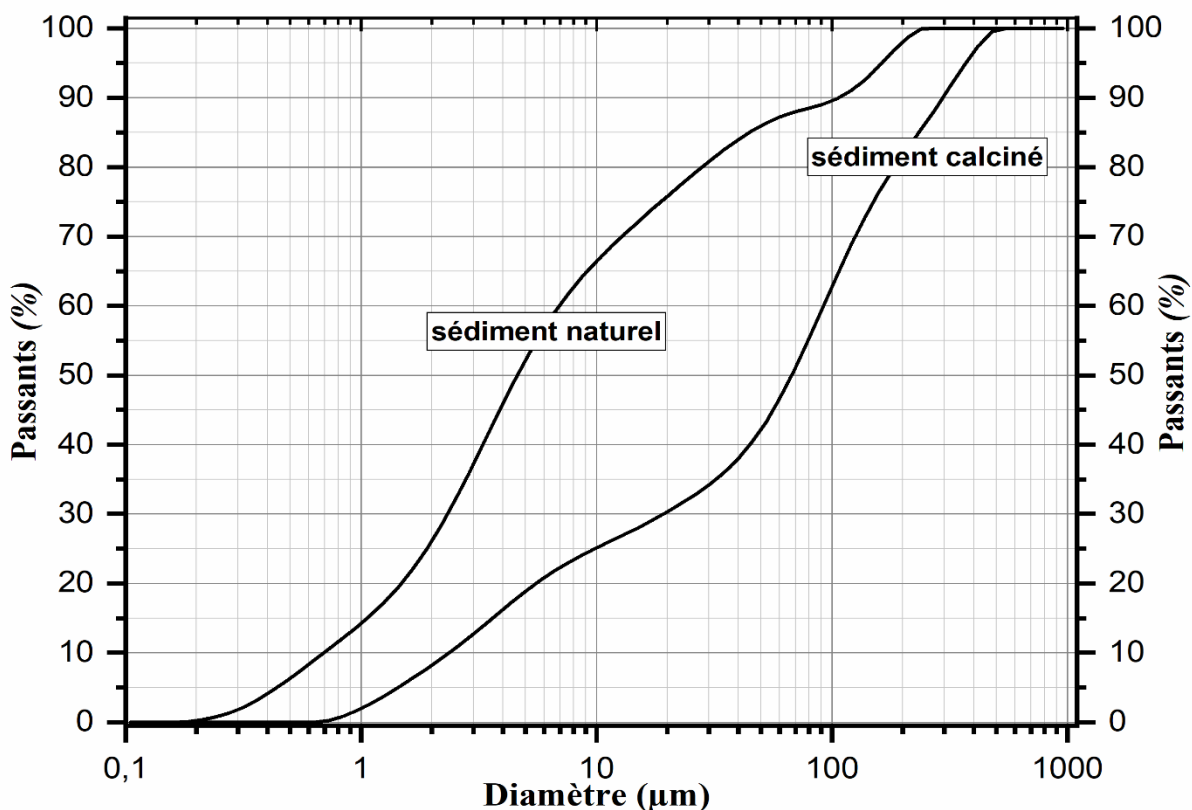


Figure V.24: Analyse granulométrique des sédiments naturels et calcinés.

V.2.2.4 Comportement thermique des sédiments

Selon les résultats de l'Analyse Thermique Différentielle (ATD) (Figure V.25) nous remarquons deux événements essentiels : le premier événement est enregistré entre 30 et 200°C, marqué par un pic endothermique centré à 70°C, caractérisant le départ de l'eau d'hydratation d'une quantité de 0,68 %. Le deuxième événement est enregistré entre 600 et 800°C, correspondant à une perte de masse de 8,08% qui est attribuée à la décomposition des carbonates avec la libération du CO₂ ; ce pic endothermique est enregistré à 693°C [15].

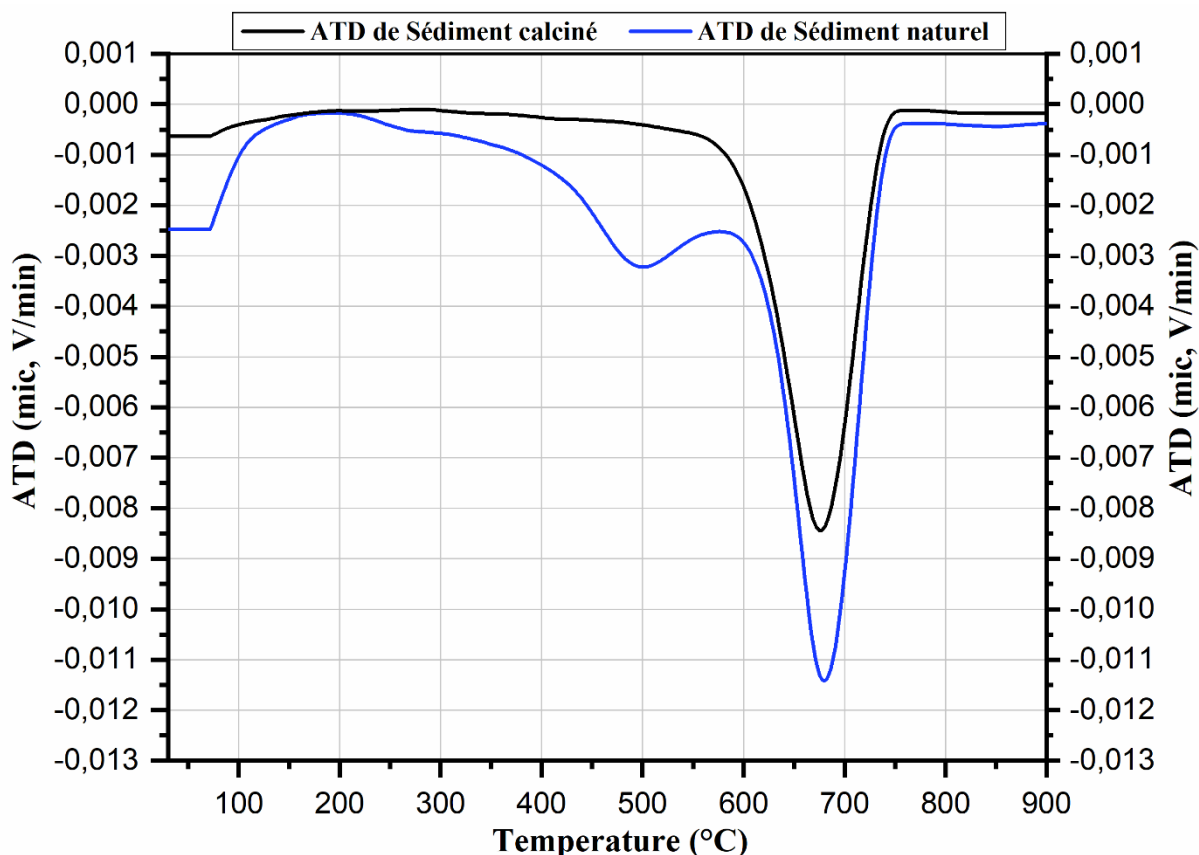


Figure V.25: Analyse thermique ATD des sédiments naturels et calcinés.

V.2.3 Elaboration des céramiques à base des sédiments de dragage naturels et calcinés

Les matières premières composant ces céramiques sont tamisées à sec à 125 μm . Après homogénéisation du mélange, des pastilles de calibres de 10 mm d'épaisseur et 30 mm de diamètre sont pressées à 5 tonnes à l'aide d'une presse hydraulique. Deux types de céramiques sont élaborés. Le premier type nommé (PS) est obtenu à partir de substitution de kaolin par les sédiments naturels (0, 10, 20 et 30%). Le second type de céramique (PSC) est élaboré en utilisant les mêmes proportions de matières premières, mais avec substitution du kaolin par les sédiments calcinés à 700 °C. Le mélange est réalisé avec ajout de 40 % d'eau. Les échantillons ont été séchés à l'air pendant 24 heures puis séchés dans l'étuve à 105 °C pour assurer l'évaporation progressive de l'eau.

Les étapes d'élaboration des deux types de céramiques sont résumées dans le schéma technologique représenté sur la figure V.26. Les différents échantillons ont été cuits à différentes températures (1100 °C et 1200 °C) pendant 1 heure dans un four Carbolite CSF avec une vitesse de chauffage de 10 °C/min. Les échantillons ont été refroidis à température ambiante par convection naturelle à l'intérieur du four.

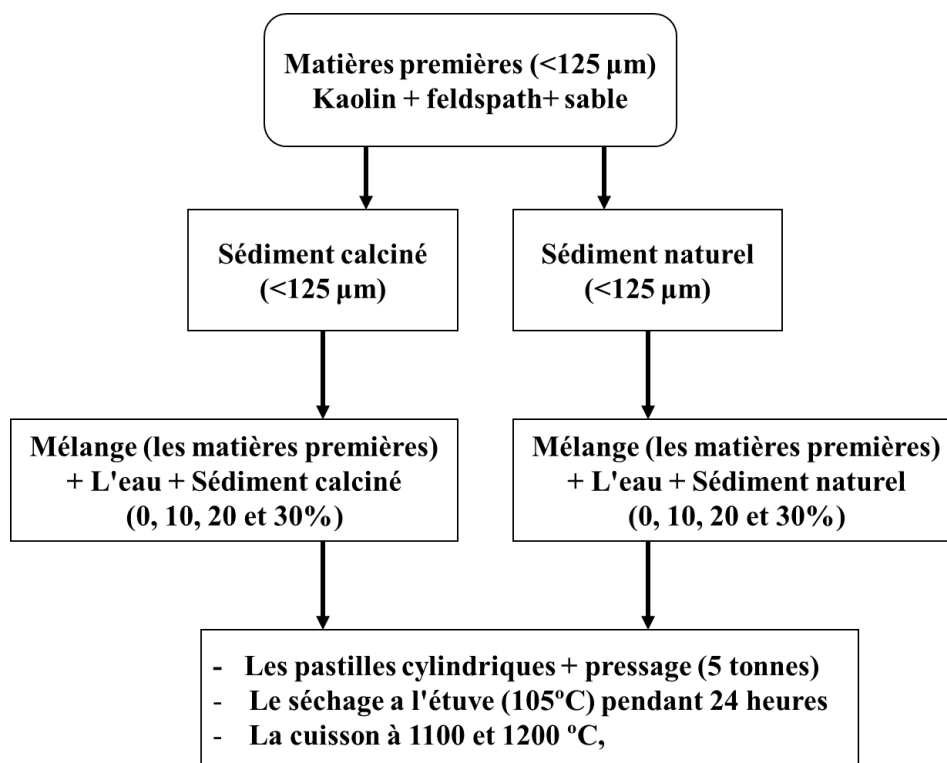


Figure V.26: Schéma des étapes d'élaboration des différentes céramiques.

V.2.3.1 Aspect visuel des différents échantillons (après cuisson)

Aucun défaut tel que les fissures, le gonflement ou l'efflorescence n'a été observés sur les échantillons après cuisson à 1100 et 1200 °C (Figure V.27).

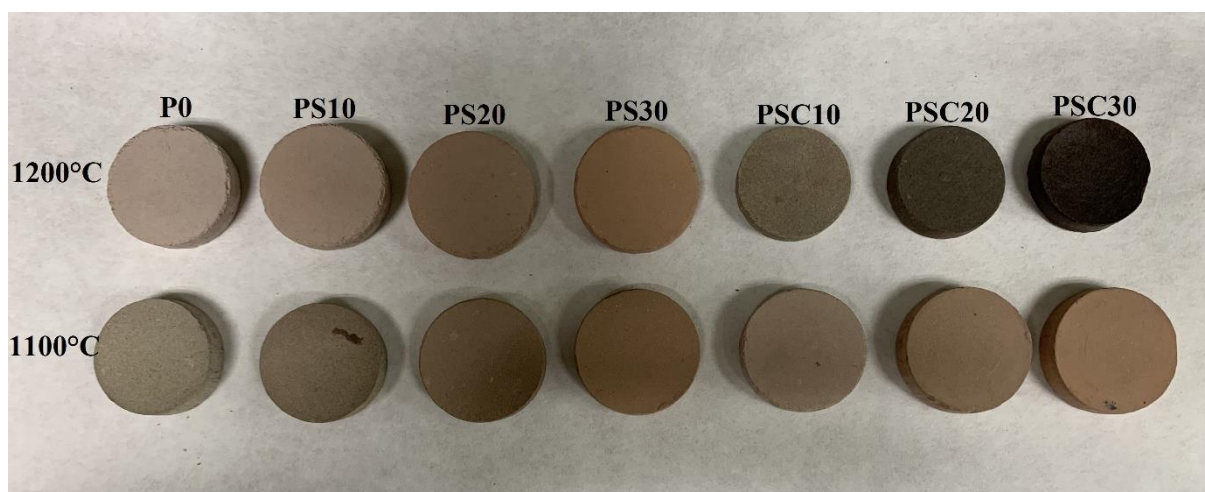


Figure V.27: Photos des différentes céramiques à base des sédiments naturels et calcinés.

La couleur des céramiques de référence (P0) est beige à 1100 et 1200 °C. Cependant, la substitution du kaolin par des quantités croissantes de sédiments naturels ont tendance à devenir relativement plus accentués virant vers le marron. En revanche, l'ajout de quantités croissantes

de sédiments calcinés donne des couleurs relativement clairs à 1100 °C et des couleurs marron foncé à 1200 °C. Ceci est dû à l'état de valence des impuretés colorantes tels que le fer (Fe^{2+} à Fe^{3+}) et du couple Fe/Ti (Fe^{3+} -O- Ti^{4+}) [1,3].

V.2.4 Caractéristiques physiques des différentes céramiques

V.2.4.1 V.5.1 Le retrait des différents échantillons (LFS %)

Selon le tableau V.6, le retrait de l'échantillon de référence (P0) est de 2,2 et 7,2% respectivement à 1100 et 1200 °C. Le retrait des échantillons a diminué avec l'augmentation de la quantité de sédiment naturel (0 à 30%) jusqu'à des valeurs de 1,40 et 1,36% pour les céramiques cuites à 1100 et 1200 °C respectivement. La même diminution est remarquée pour les céramiques cuites à 1100 °C à base de sédiments calcinés. En effet, avec l'ajout de 10 à 30% de sédiment les échantillons accusent un retrait linéaire de 0,49 et 1,24%, respectivement. L'expansion peut être causée par la quantité de gaz libérée par la décomposition des carbonates qui dilatent les pores. La décomposition des carbonates existant dans les sédiments (MgCO_3 et CaCO_3) a permis une augmentation de la pression à l'intérieur des orifices fermés, ce qui a tendance à dilater les pores provoquant l'expansion des céramiques [16]. Cependant, le retrait des échantillons calcinés à 1200 °C augmente avec l'augmentation de la quantité de sédiment calciné jusqu'à une valeur maximale de 10,53% (ajout de 20 % de sédiments calcinés). D'autre part, pour les céramiques à base de 30 % de sédiments calcinés, le retrait est légèrement inférieur atteignant seulement 9,5%.

Tableau V.6: Retrait des céramiques cuites à 1100 et 1200 °C.

Echantillon	P0	PS10	PS20	PS30	PSC10	PSC20	PSC30
1100 °C	2,2 ± 0,24	0,67 ± 0,48	0,7 ± 0,29	1,4 ± 0,31	1,44 ± 0,09	0,49 ± 0,39	1,24 ± 0,18
1200 °C	7,2 ± 0,24	4,89 ± 0,45	0,42 ± 0,3	1,36 ± 0,1	9,38 ± 0,36	10,53 ± 0,56	9,5 ± 0,08

V.2.4.2 V.5.2 Masses volumiques apparentes

D'après les résultats des masses volumiques des différents échantillons (Figure V.28), nous remarquons que les échantillons témoins cuits à 1100 et 1200 °C enregistrent des valeurs de 1605 et 1889 kg/m³. Les masses volumiques diminuent avec l'ajout de sédiment naturel, atteignant des valeurs de 1495 et 1526 kg/m³ avec l'incorporation de 30% de sédiment naturels pour les échantillons cuits à 1100 et 1200 °C respectivement.

L'ajout de sédiment cuit a donné lieu à des comportements différents selon la température de frittage. À 1100 °C, il y a eu une diminution de la masse volumique apparente avec l'incorporation de quantités croissantes de sédiments calcinés, obtenant la valeur de 1427 kg/m³ avec l'incorporation de 30% de sédiment calciné. Cependant, lorsque les céramiques sont frittées à 1200 °C, il y a eu une augmentation de ce paramètre avec l'incorporation de sédiment calciné, atteignant la valeur maximale de 2174 kg/m³ avec l'incorporation de 20% de sédiment calciné, ceci est dû à la formation de phase vitreuse au sein des céramiques.

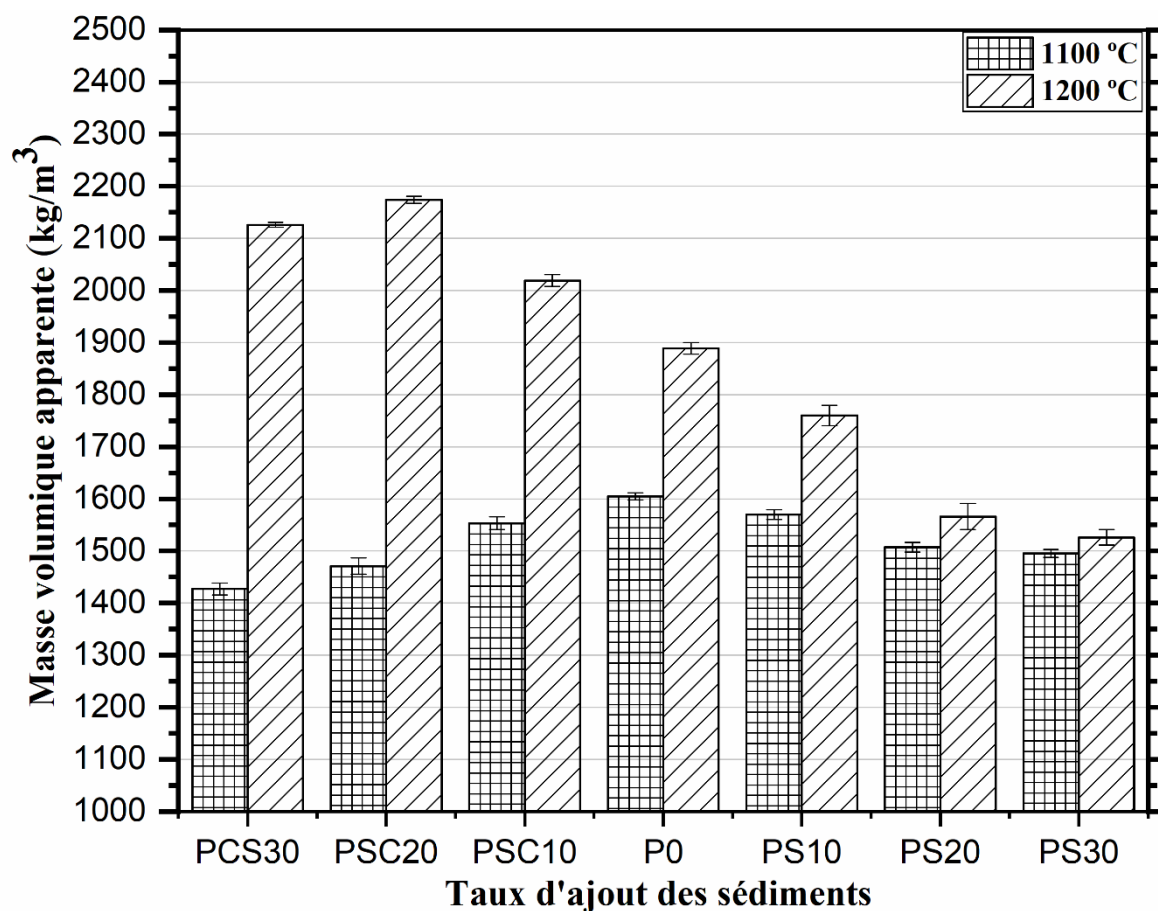


Figure V.28: Masses volumiques apparentes des céramiques cuites à 1100 et 1200°C.

L'augmentation de la température jusqu'à 1200 °C a produit une augmentation de la cinétique de frittage des particules, une plus grande génération de la phase vitreuse qui tend à remplir les pores contenus dans le corps céramique, produisant une plus grande densification [17]. Par conséquent, à cette température de cuisson, la taille des pores diminue et une efficacité de tassement accrue, aboutissant à une densité plus élevée. Ainsi, Wang et al., 2018[18] ont démontré la faisabilité d'une préparation céramique utilisant des cendres volantes à haute teneur en alumine avec une température de traitement thermique de 1000 à 1250 °C, l'évaluation de la

masse volumique apparente a atteint une valeur maximale de 1820 Kg/m^3 pour une cuisson de 1150°C .

V.5.3 Taux d'absorption d'eau des différents échantillons

Les taux d'absorption d'eau sont représentés sur la figure V.29. Les échantillons incorporant les sédiments naturels, cuits à 1200°C enregistrent une diminution prononcée de ce paramètre par rapport aux échantillons de céramique de référence P0. En effet, des valeurs d'absorption d'eau de 24,41 et 12,93% ont été obtenues pour les céramiques cuites à 1100°C et 1200°C respectivement. L'ajout de 30% de sédiment naturel a produit une augmentation considérable de l'absorption d'eau, augmentant jusqu'à 28,46 et 25,76% pour les échantillons cuits à 1100°C et 1200°C respectivement. Par ailleurs, l'addition de 30% de sédiment calciné a donné des valeurs d'absorption d'eau de 30,66% pour les céramiques cuites à 1100°C . D'autre part, pour les céramiques cuites à 1200°C , l'ajout de 20 % de sédiment calciné a conduit à une valeur d'absorption d'eau plus faibles qui est de 3,17 %. Au-dessus de 20 %, ce paramètre, a légèrement augmenté jusqu'à 3,98% (échantillons PSC30 cuits à 1200°C).

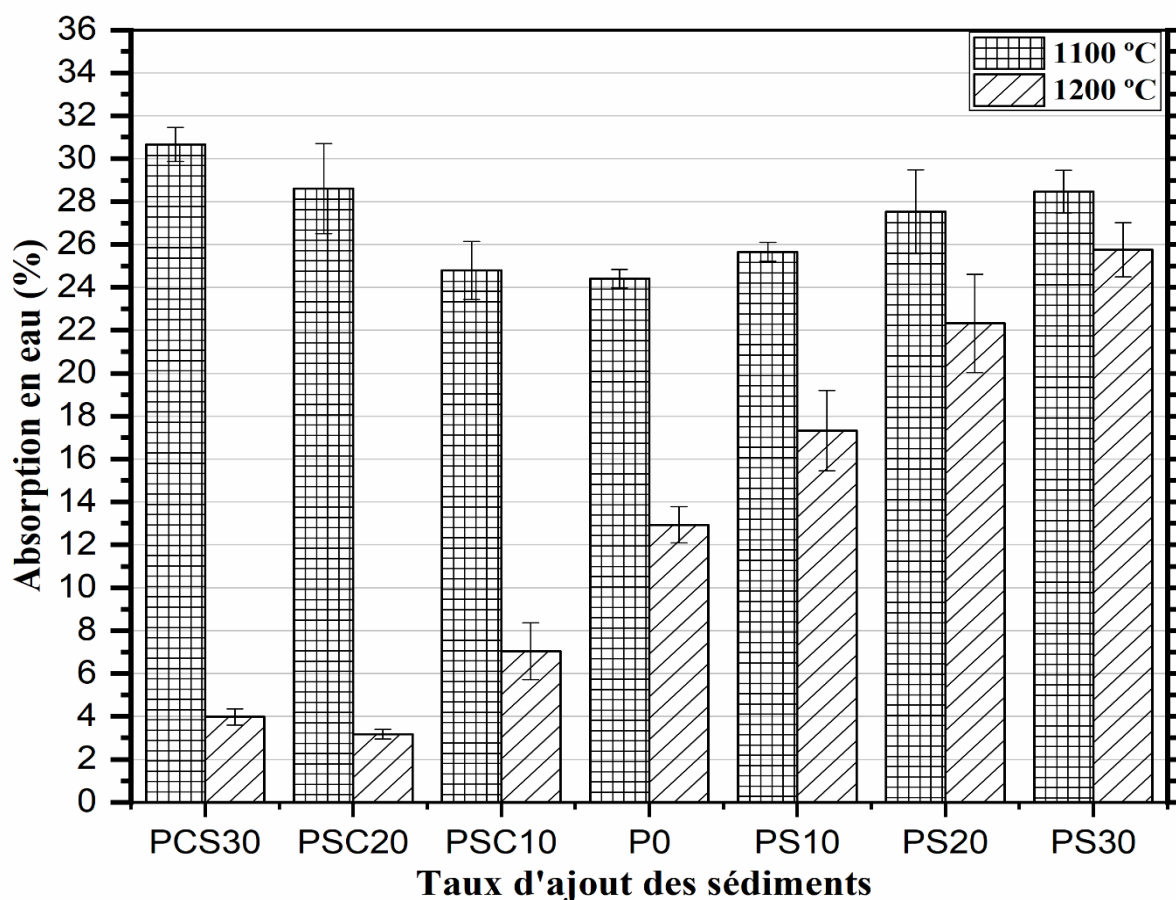


Figure V.29: Absorption d'eau des céramiques cuites à 1100°C et 1200°C .

V.5.4 Taux d'absorption d'eau par capillarité

Selon les résultats représentés dans la figure V.30, L'échantillon P0 a montré une absorption d'eau par capillarité de 2,84 et 1,70 kg/m²min à 1100 et 1200 °C respectivement. L'absorption d'eau par capillarité, des céramiques cuites à 1100 °C, augmente à mesure que les taux de sédiments (naturels et calcinés) augmentent, obtenant des valeurs maximales de 3,12 et 3,22 kg/m²min, pour les céramiques PS30 et PSC30, respectivement. Dans le cas des céramiques cuites à 1200 °C, l'absorption d'eau par capillarité a augmenté avec l'ajout de 30% de sédiment naturels donnant une valeur de 3,06 kg/m²min pour l'échantillon PS30. D'autre part, l'ajout de sédiment calciné produit une diminution prononcée de cette propriété, obtenant la valeur minimale de 0,07 kg/m²min pour les céramiques PSC20 alors que l'ajout de 30% de sédiment calciné (PSC30) a donné lieu à une augmentation de l'absorption d'eau par capillarité de 0,20 kg/m²min.

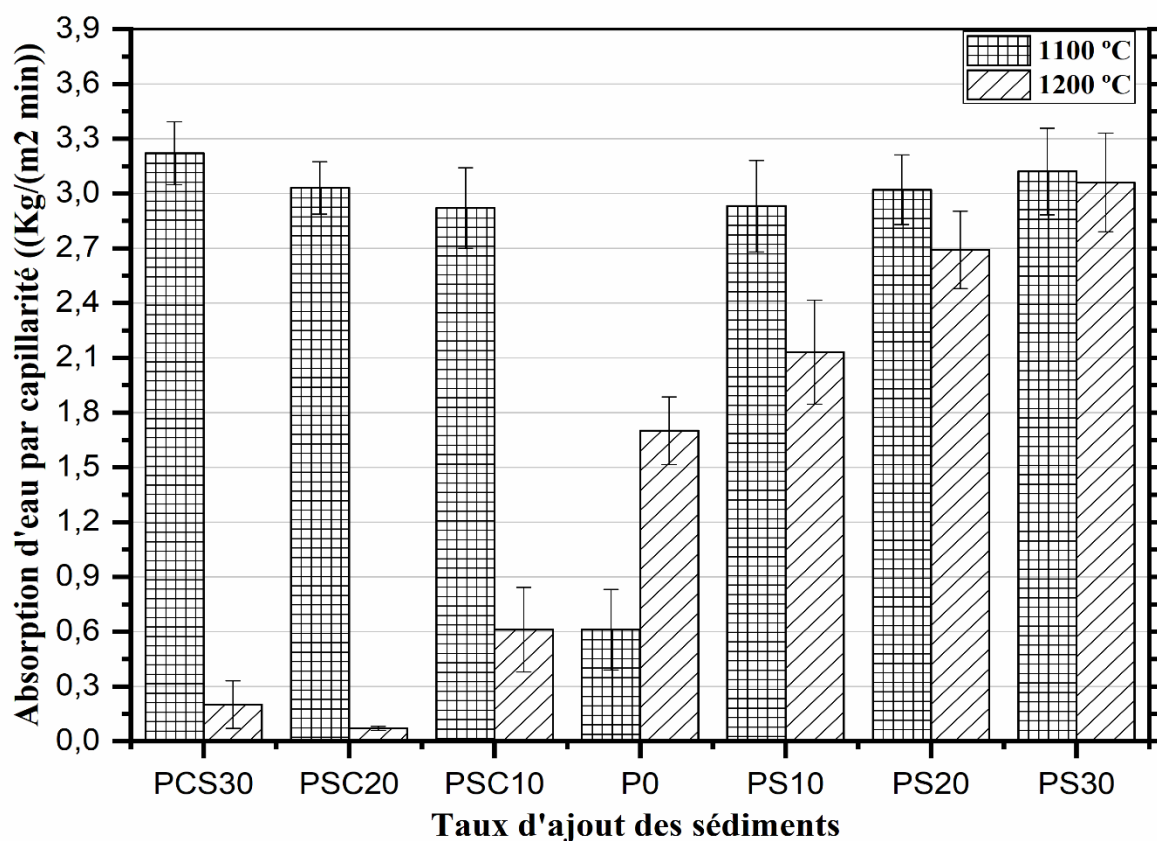


Figure V.30: Absorption d'eau par capillarité des céramiques cuites à 1100 et 1200 °C.

V.2.4.3 Porosité des céramiques cuites à 1100 et 1200 °C

Le comportement des céramiques vis à vis de la porosité est différent par rapport aux températures de cuisson, aux taux et au types de sédiments ajoutés (Figure V.31). En effet, en

fonction des températures de cuisson, la porosité diminue dans les deux types de sédiments. Ainsi, à 1100 °C, au fur et à mesure que le taux de sédiment est ajouté, les échantillons accusent des porosités croissantes allant de 39,17 % à 42,52 % et de 39,17 à 43,74 % pour les céramiques à base de sédiments naturels et calcinés respectivement. A 1200 °C, la porosité diminue dans l'ensemble des céramiques ; elle diminue jusqu'à 6,90 % pour les céramiques incorporant 20 % de sédiments calcinés et augmente légèrement à 8,42 % dans les échantillons incorporant 30 % de sédiments calcinés. Cependant, ce paramètre augmente au fur et à mesure que les sédiments naturels sont ajoutés atteignant les 39 % de porosité.

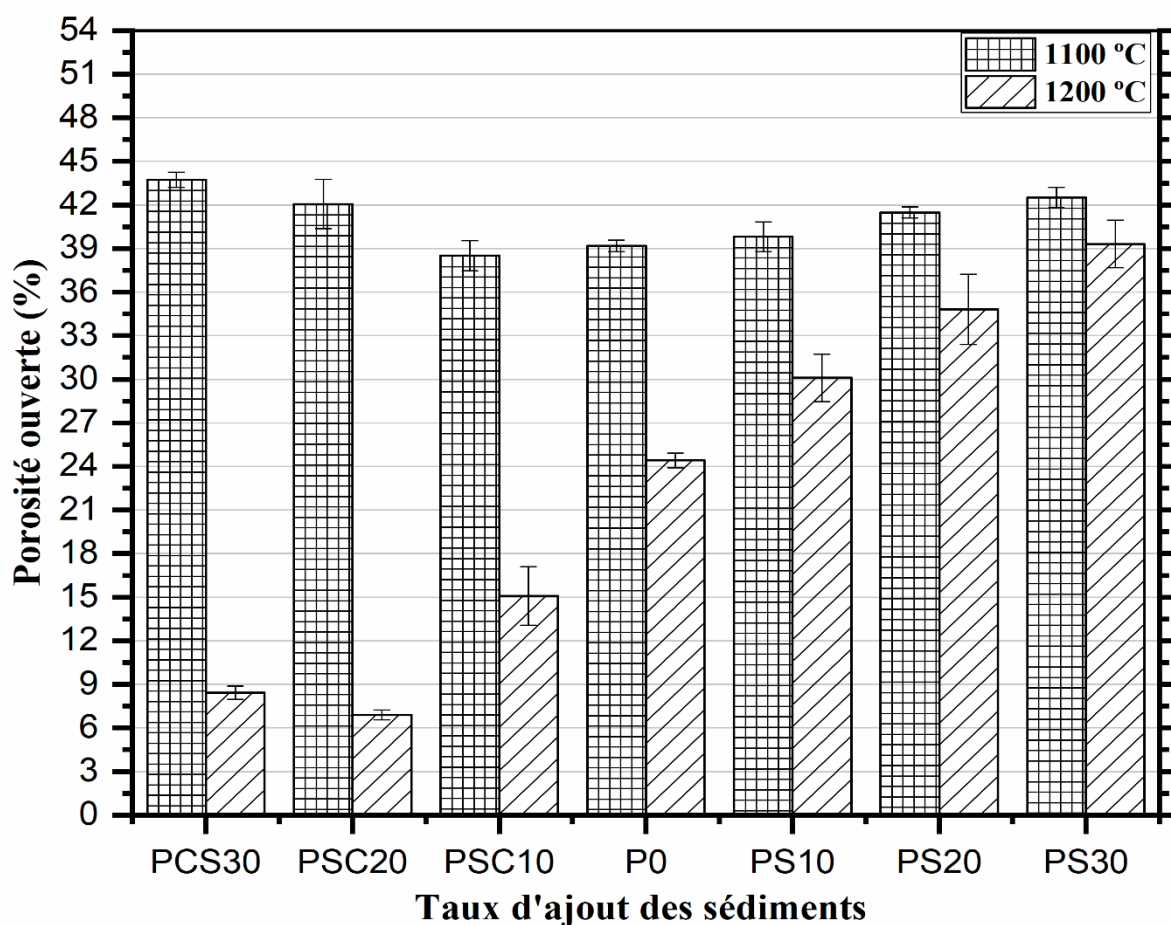


Figure V.31: Porosité ouverte des céramiques cuites à 1100 et 1200 °C.

Ces faits sont étroitement liés au phénomène de frittage dans les corps des céramiques. À la température de frittage de 1100 °C, une phase liquide visqueuse de verre fondu se forme à peine, ce qui donne lieu à une expansion des pores à l'intérieur des corps céramiques [19]. Lorsque la température de cuisson augmente à 1200 °C avec l'ajout de sédiment cuit, les particules acquièrent plus d'énergie d'activation et commencent à se diffuser et à former une phase plus vitreuse, ce qui indique le début de consolidation dans les céramiques. À ce stade, la phase vitreuse fondue a commencé à remplir les pores, les scellant et isolant les pores voisins,

réduisant le volume des pores. La tension superficielle du liquide et les effets capillaires de la phase vitreuse produisent un remplissage des pores. Ce processus réduit la porosité et densifie les céramiques lors du refroidissement. De ce fait, la porosité ouverte et l'absorption d'eau des céramiques sont réduites tandis que le retrait à la cuisson et la densité apparente ont augmenté. Les oxydes de fer (Fe_2O_3) et les oxydes de métaux alcalins (K_2O , Na_2O) présents dans le sédiment favorisent la formation d'une phase vitreuse qui remplit les pores de la matrice céramique à la température de frittage de 1200°C lorsque le sédiment est activé thermiquement.

V.2.5 Composition minéralogique des différentes céramiques

L'analyse minéralogique des différentes céramiques cuites à 1100°C et 1200°C a été étudiée (Figures V.32, V.33, V.34 et V.35). Selon les résultats représentés par les figures V.15 et V.16 relatifs aux céramiques à base de sédiments naturels, les phases minéralogiques obtenues après cuisson à 1100°C et 1200°C sont principalement le quartz, la mullite, la muscovite, l'anortite, l'anatase et le rutile. L'intensité des pics de mullite et de quartz s'intensifie à 1200°C alors que la muscovite et l'anatase/rutile (phase TiO_2) disparaissent entrant probablement dans le réseau vitreux des céramiques.

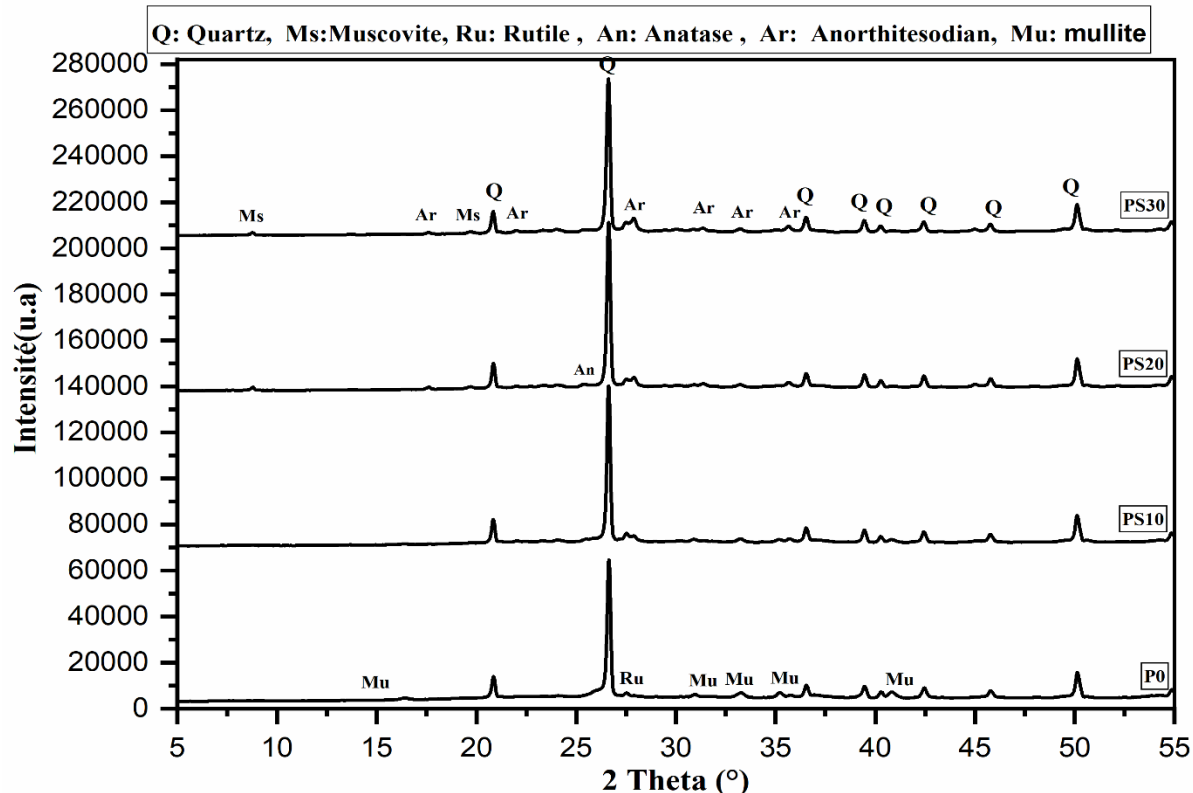


Figure V.32: Diagramme de DRX des céramiques cuites à 1100°C , à base de sédiments naturels.

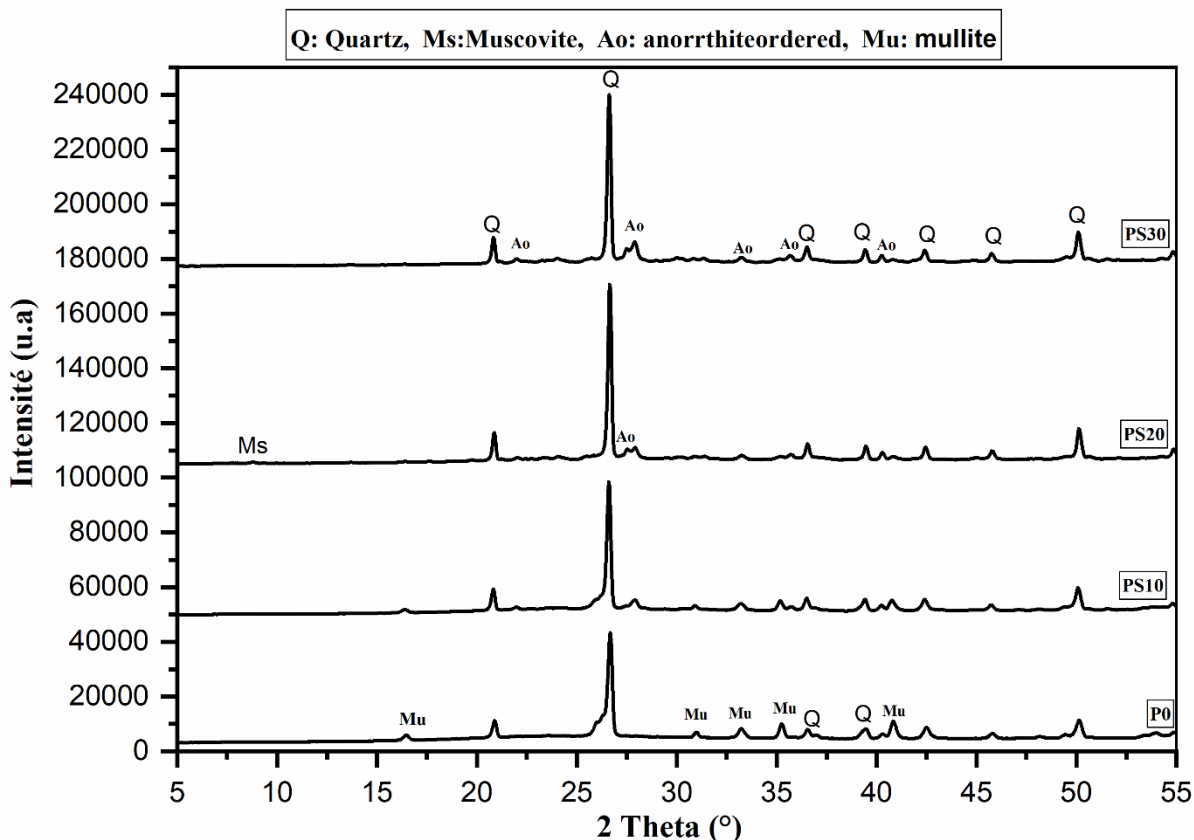


Figure V.033: Diagramme de DRX des céramiques cuites à 1200 °C, à base de sédiments naturels.

Selon les résultats représentés par les figures V.33 et V.34 relatifs aux céramiques à base de sédiments calcinés, les phases minéralogiques obtenues après cuisson à 1100 et 1200 °C sont principalement le quartz, l'anorthite, le rutile. La mullite se laisse apparaître qu'à 1200 °C pour ces types d'échantillons. Les intensités des pics de mullite et de quartz s'intensifient à 1200 °C sauf pour l'échantillon PSC30 qui ne renferme que de l'anorthite et du quartz. En outre, les phases anatase/rutile (phase TiO_2) disparaissent, entrant probablement dans le réseau vitreux des céramiques.

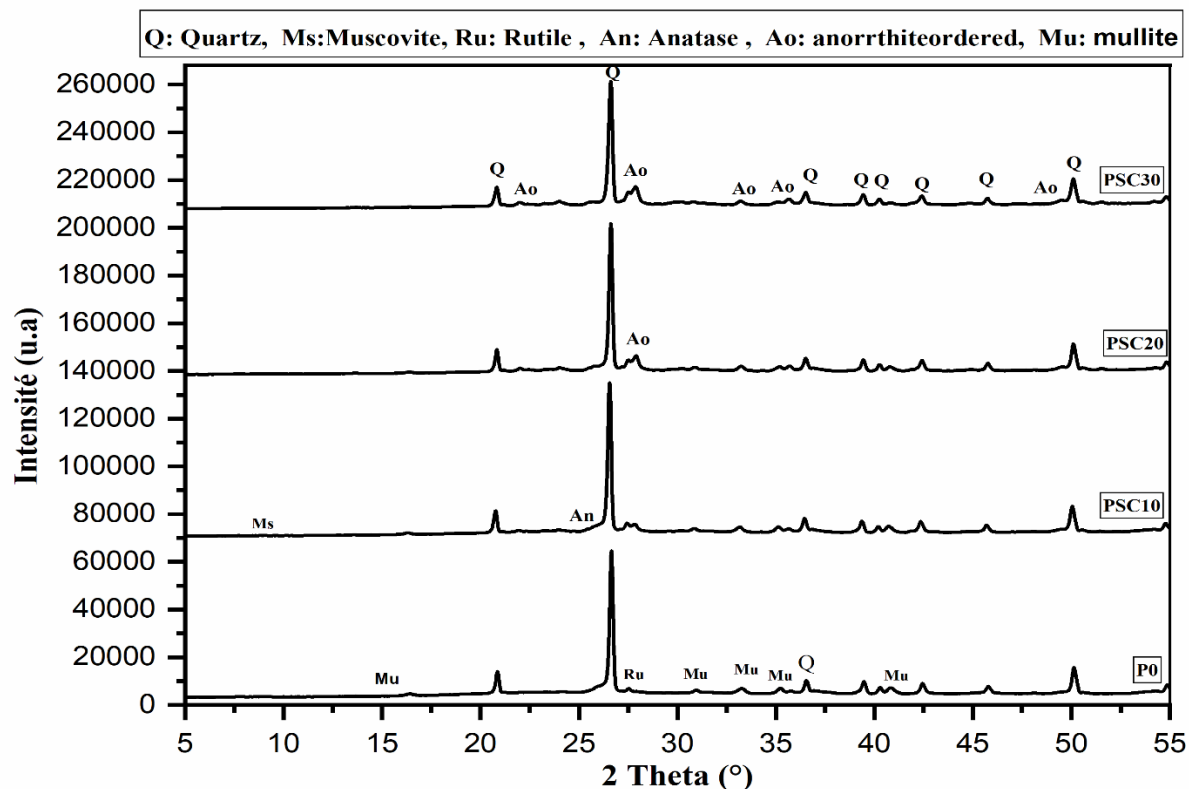


Figure V.034: Diagramme de DRX des céramiques cuites à 1100 °C, à base de sédiments calcinés.

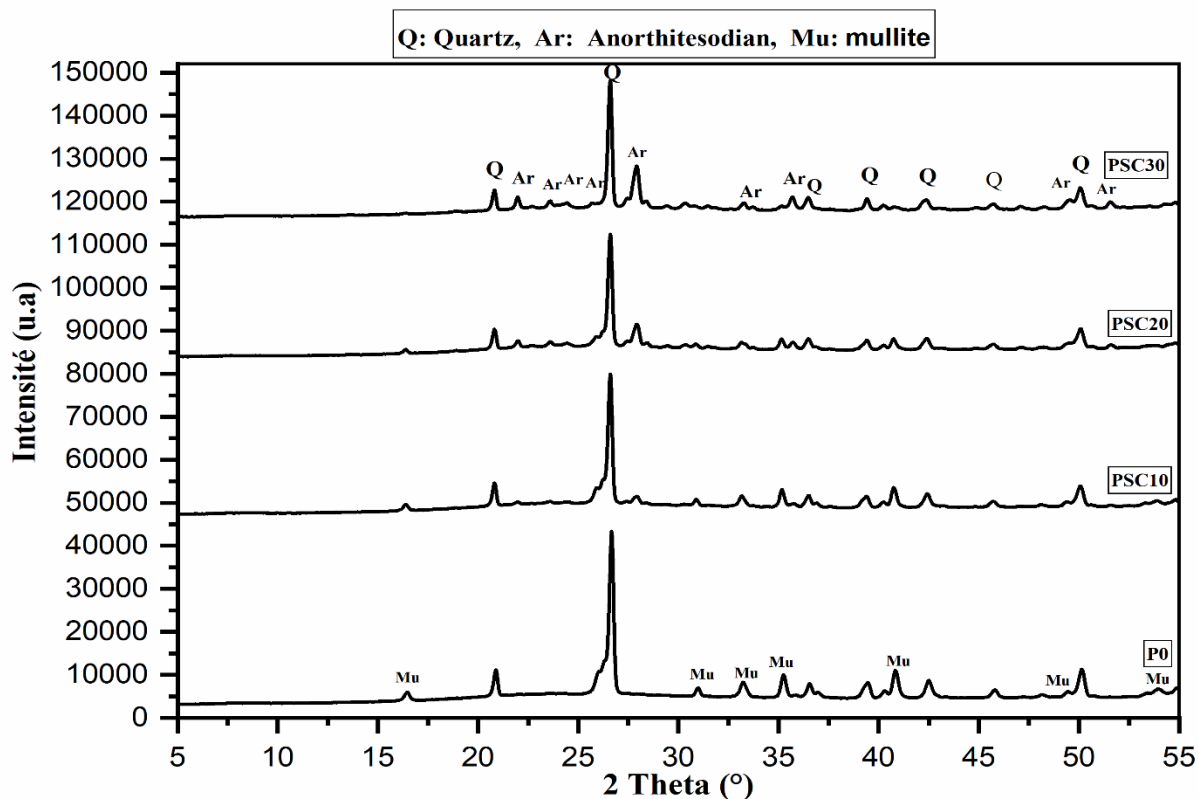
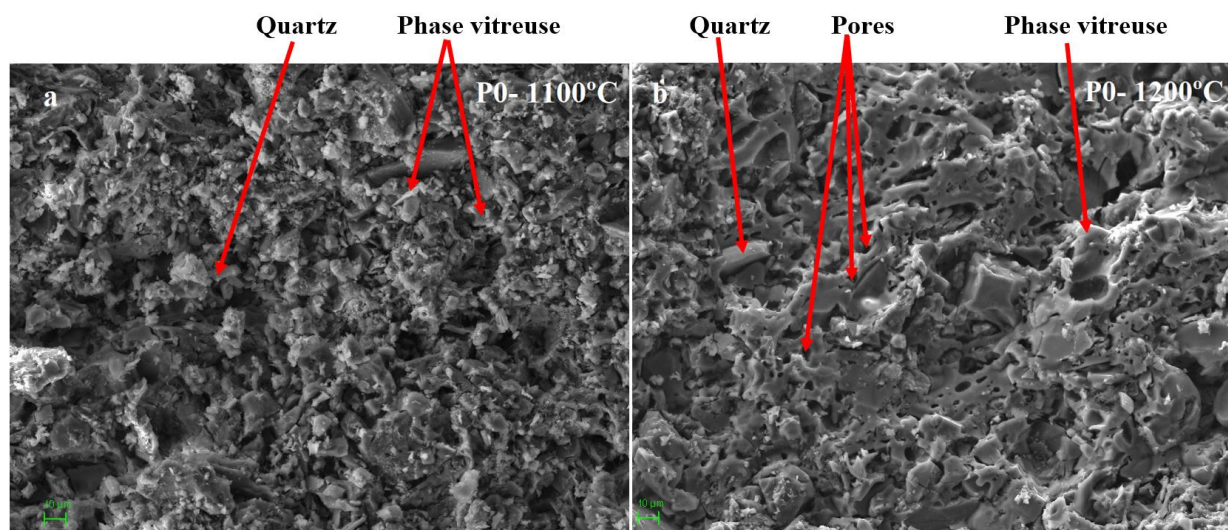


Figure V.35: Diagramme de DRX des céramiques cuites à 1200 °C, à base de sédiments naturels

V.2.6 Microstructure des différentes céramiques

La microstructure et la texture des surfaces des sections transversales fracturées des échantillons de céramiques frittées sont illustrées sur la figure V.36. La figure V.35 (a et b) montre des micrographies SEM pour l'échantillon de référence P0 cuit à 1100 et 1200 °C. L'échantillon de céramique P0 cuit à 1100 °C montre une morphologie homogène, avec une porosité accentuée (pores ouverts et fermés), ce qui indique un processus de frittage incomplet. A 1200 °C , cet échantillon montre une légère densification caractérisée par la diminution des pores et sa consolidation.

L'addition du sédiment naturel et calciné a modifié la microstructure et la texture des échantillons. En effet, les plaques individuelles des particules argileuses, formant des agrégats sont remarqués sur les figures V.36. c et d relatives aux échantillons PS30 et PSC30 cuits à 1100 °C. La porosité de ces échantillons a été observée, indiquant un faible degré de densification des céramiques. La phase liquide et phase vitreuse à 1100 °C n'est pas encore formée laissant apparaître la porosité excessive de cet échantillon [19]. L'ajout de sédiments naturels a changé la porosité des céramiques pour les deux températures de cuisson. En effet, la quantité de phase liquide formée pendant le processus de cuisson à 1200 °C est supérieure à la quantité formée à 1100 °C, mais insuffisante pour diminuer le taux de porosité et obtenir une structure densifiée. Cependant, l'ajout de sédiment calciné à une température de cuisson de 1200 °C a une influence sur le processus de vitrification par la formation du réseau vitreux, les échantillons PSC20 et PSC30 présentant une structure plus dense, plus vitrifiée avec moins de pores Figure 36 f et g.



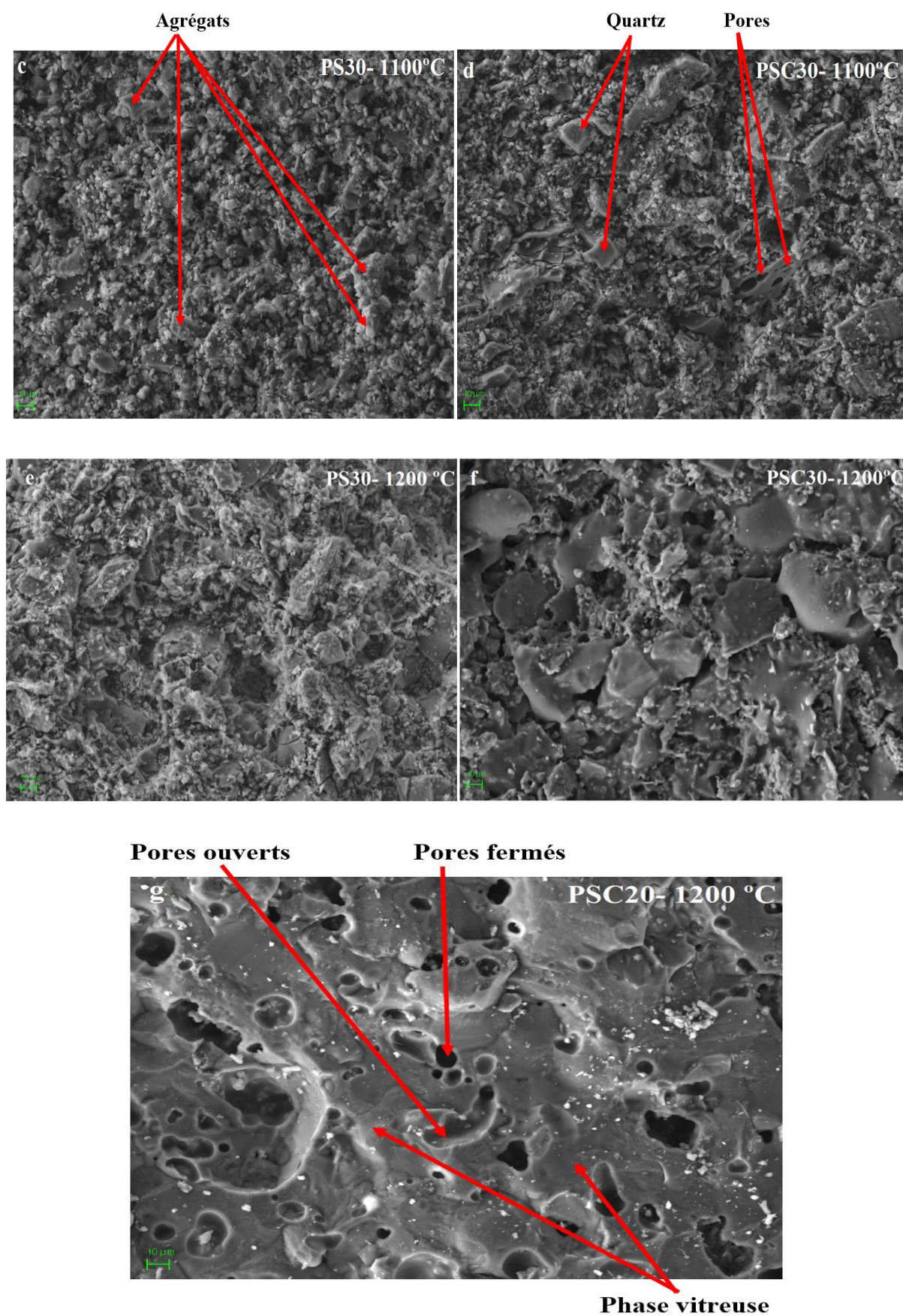


Figure V.36: Micrographies MEB des céramiques : (a et b) P0, (c et d) PS30 et PSC30, (e, f) PSC20 (g).

P0, PSC20 et PSC30 cuits à 1200 ° C, ont montré la microstructure typique des carreaux céramiques, où les phases cristallines restantes sont noyées dans une matrice vitreuse [20]. La phase vitreuse formée à 1200 ° C abaisse alors la viscosité effective, rendant l'échantillon plus déformable et élève la pression des gaz poreux occlus au-dessus de la pression capillaire [21].

V.2.7 Propriétés mécaniques des différentes céramiques

Les valeurs des résistances à la compression des céramiques (Figure V.37) varient en fonction des températures de cuisson et du taux et du type de sédiment ajoutés. En effet, La résistance à la compression des céramiques de référence cuites à 1100 ° C et 1200 ° C sont de 53,85 et 134,11 MPa, respectivement. L'ajout de taux progressifs de sediments naturels et de sédiments calcinés dans les différents échantillons cuits à 1100 °C à conduit à une diminution de la résistance à la compression, de 53,85 MPa pour P0 à 34,57 MPa pour PS30 et de 53,85 (P0) à 26,52 pour PCS30. Les résistances à la compression sont améliorées dès que la température de cuisson est élevée à 1200 °C, celles-ci diminuent à mesure que le taux de sediments naturels augmentent dans les échantillons. Cependant, à cette même température de cuisson (1200 °C), la résistance à la compression des échantillons à base de sédiments calcinés s'améliorent à mesure que le taux augmentent atteignant la valeur maximale de 171,3 MPa pour l'échantillon PCS20.

La diminution des propriétés mécaniques des céramiques cuites à 1100 en fonction des taux d'ajouts de sédiments (naturels et calcinés) est attribuée à la structure poreuse (porosité totale) et au manque de solution solide capable de cimenter les grains entres eux (phase vitreuse) [22, 23]. La porosité totale agit comme des concentrateurs de contraintes et des initiateurs de propagation de fissures dans les céramiques entraînant une réduction des propriétés mécaniques [24 ,25]. Pour les céramiques cuites à 1200 ° C, l'ajout de jusqu'à 20% de sediments calcinés engendre une augmentation de la résistance à la compression des qui est presque linéairement, qui est dû à la diminution de la porosité totale (~ 6%) et la consolidation de l'échantillon par la création de phase vitreuse liant les grains entres eux. L'ajout de quantités plus élevées de sediment cuit (30% en poids) a produit une légère diminution de la résistance à la compression jusqu'à 167,8 MPa. Il semblerait que la silice capable de se transformer en flus vitreux dans le réseau n'est plus libre mais elle est lié à d'autres phase tels que l'anorthite (Figure V.37).

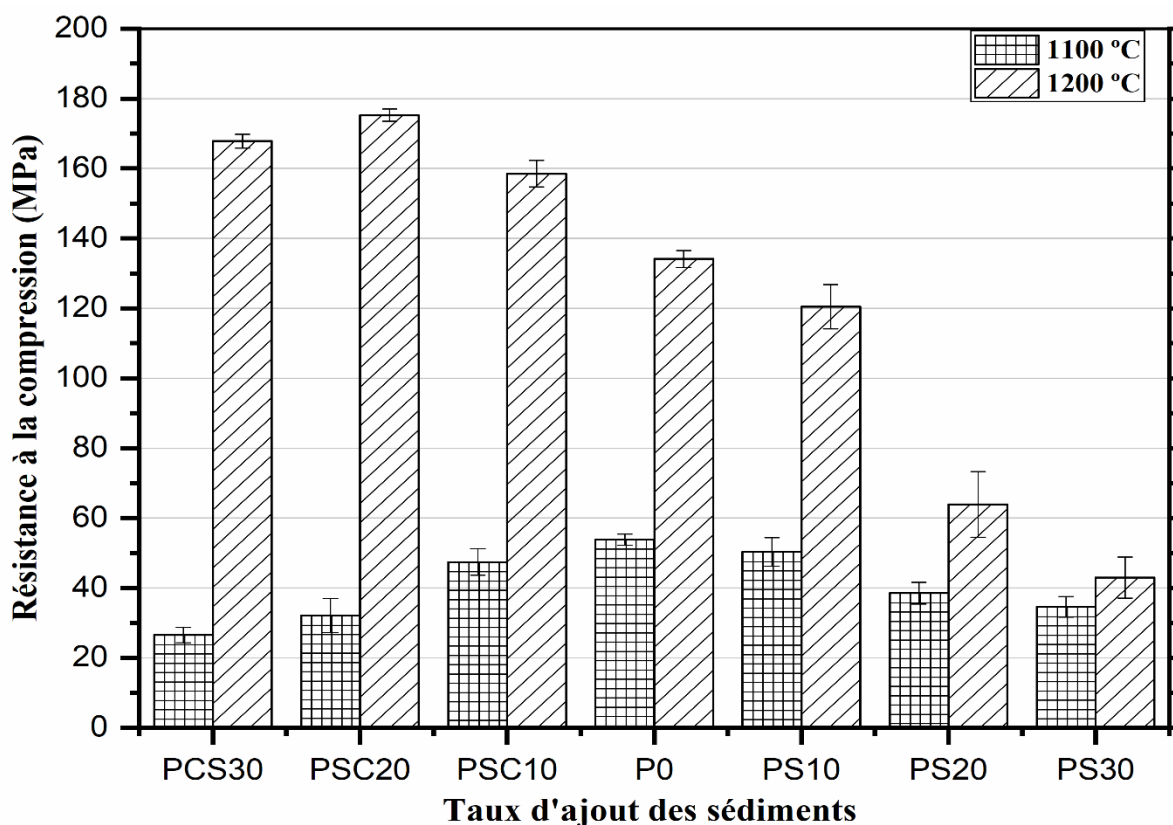


Figure V.37: Résistances à la compression (MPa) des céramiques cuites à 1100 et 1200 °C.

V.2.8 Propriétés thermiques des différentes céramiques

D'après les résultats des propriétés thermiques en fonction du taux d'ajouts des différents sédiments (Figure V.38), l'ajout progressif de taux de sédiments naturels et de calcinés dans les différents échantillons cuits à 1100 °C a conduit à une diminution des propriétés thermiques. Elles varient de 0,316 et 0,524 W/mK, pour les échantillons témoins, P0, cuit à 1100 et 1200 °C, respectivement. L'addition jusqu'à 30% de sédiment naturel (PS30) a conduit à une diminution de la conductivité thermique jusqu'à 0,273 et 0,282 W/mK représentant une amélioration de 13,6% et de 46,18% des échantillons cuits à 1100 et 1200 °C respectivement. D'autre part, l'ajout jusqu'à 30% en poids de sédiments calcinés a conduit les valeurs de conductivité thermique de 0,275 et 0,326 W/mK à une température de cuisson de 1100 et 1200 °C respectivement, alors que l'addition de 20% en poids de sédiment calcinés a conduit à une augmentation de la conductivité thermique jusqu'à une valeur maximale de 0,553 W/mK.

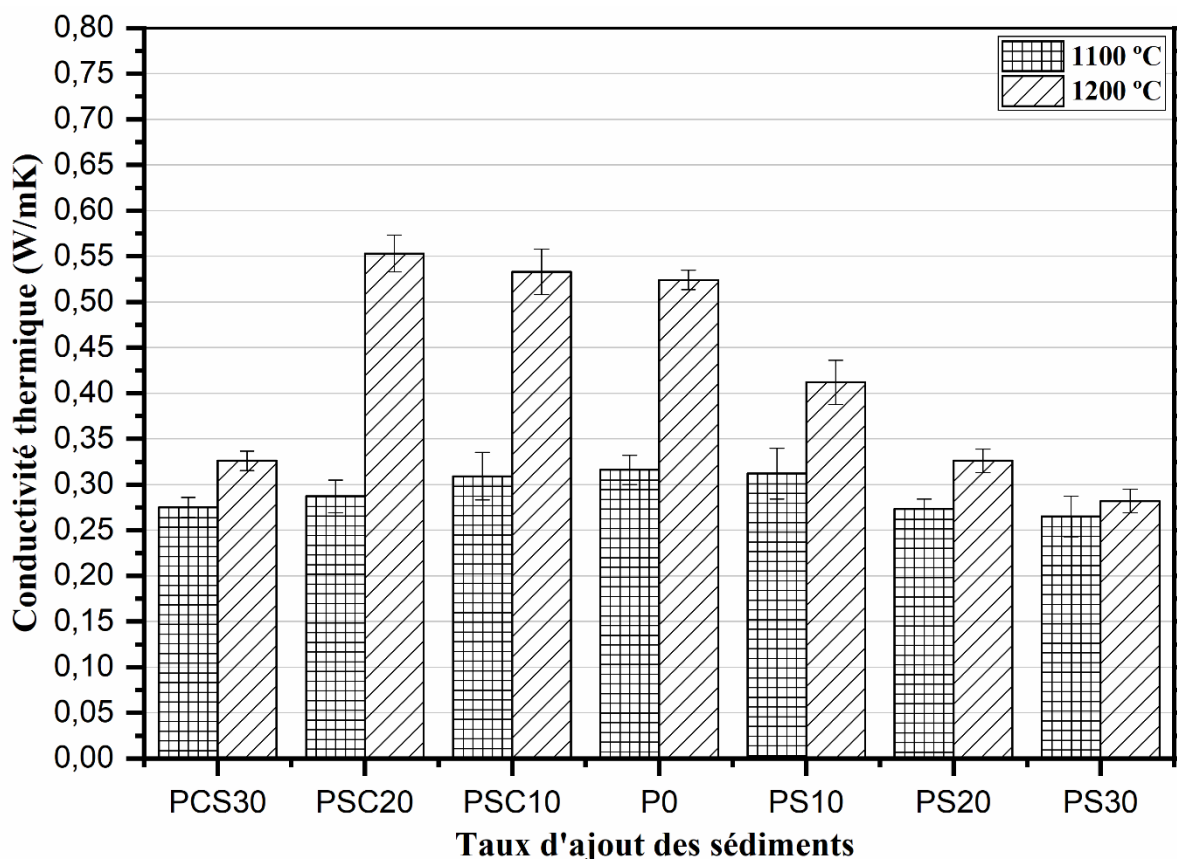


Figure V.38: Conductivité thermique des échantillons cuits à 1100 et 1200 °C.

Ce phénomène de variation est fortement lié à la porosité totale (ouverte et fermée) est donc à la densification des différents échantillons. La capacité d'isolation thermique la plus élevée a été obtenue pour des échantillons de céramique contenant 30% en poids de sédiments naturels et calcinés cuits à 1100 °C, avec des valeurs de conductivité thermiques de 0,273 et 0,275 W/mk, respectivement. Il est clair que la composition minéralogique, la microstructure des céramiques et la taille des pores, sont des facteurs très importants influençant la conductivité thermique [11, 13].

V.2.9 Évaluation environnementale des différentes céramiques :

Selon les résultats du TCLP (Tableau V.7), toutes les céramiques présentent des valeurs de métaux lourds bien inférieures à celles établies par les limites de l'Agence américaine de protection de l'environnement (US EPA) (2000)[25], indiquant un bon degré d'immobilisation dans le processus de frittage.

La mobilité des métaux lourds diminue avec l'augmentation de la température de cuisson et avec l'incorporation de sédiments calcinés. Les métaux lourds relargués par les céramiques à

base de sédiments calcinés sont plus immobilisés que les céramiques conçues à base de sédiments naturels. Cela est dû au fait que les métaux lourds existant dans le sédiment sont d'abord fixés dans la matrice lors de sa calcination à 750 ° C, puis à nouveau fixés dans la matrice céramique lors des processus de cuisson (1100 et 1200 °C). Le comportement des métaux lourds dans la solution de lixiviat est différent, il dépend d'une part, de la concentration des métaux lourds dans les sédiments (à l'état calciné et non calciné) et d'autre part, du milieu de la solution de l'essai de lixiviation (pH ~ 4). Les métaux de nickel et de zinc sont influencés par le milieu acide. Le test de lixiviation a indiqué un degré d'immobilisation des métaux lourds suggérant que l'incorporation de jusqu'à 30% en poids des sédiments (à l'état calciné et non calciné) dans les produits céramiques est une méthode d'inertisation efficace.

Tableau V.7: Résultats des tests TCLP (ppm) des céramiques cuites à 1100 et 1200 °C.

	1100 °C			1200 °C			Limits US-EPA (ppm)[25]
ppb	P0	PS30	PSC30	P0	PS30	PSC30	
Cr	0,168	0,71	0,55	0,09	0,28	0,47	5
Fe	0,36	0,93	0,41	0,31	0,46	0,38	-
Ni	0,75	1,19	0,55	0,68	0,52	0,50	-
Cu	0,33	0,47	0,44	0,23	0,25	0,32	-
Pb	0,37	0,014	0,009	0,03	0,071	0,043	5
Zn	1,04	1,43	1,19	1,01	1,36	0,74	-

V.3 Conclusion

A base des différentes méthodes d'investigations sur l'utilisation du sédiment de dragage comme substitution à l'argile de Remila nous tirons ce suit:

Le sédiment marin dragué (P2) a les mêmes compositions minéralogiques et chimiques que l'argile de Remila. Les principales phases minéralogiques sont le quartz, la muscovite, l'albite, l'hématite, la calcite et la kaolinite. Ainsi, le sédiment est un bon candidat pour remplacer l'argile.

La masse volumique apparente a diminué avec l'ajout des quantités croissantes de sédiments aux deux températures de cuisson 850 et 950 °C. L'absorption en eau et la porosité totale ont baissé avec l'ajout de 15 et 20% de sédiment pour les briques cuites à 850 et 950 ° C, respectivement. Par conséquent, l'ajout d'un maximum de 15 à 20% en poids de sédiment, a

donné lieu à une plus grande porosité fermée comme le montre les photos MEB relative à la microstructure des différents échantillons. Au-delà de ces proportions optimales, l'effet de formation de pores a prédominé.

A 850 °C, lorsque le taux d'ajout de sédiment est au-dessus de 15%, la calcite a disparu au profit de la formation de nouvelles phases sous forme de silicate de calcium aluminium ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) et aluminium diopside ($\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$). Cependant, ces phases sont plus évidentes dans les briques cuites à 950 °C.

La résistance à la compression des briques augmente avec l'ajout de 15 et 20% de sédiment pour les briques cuites à 850 et 950 °C respectivement. Des valeurs optimales de résistance à la compression de 127,7 MPa et 124,8 MPa ont été obtenues pour les briques SB15 et SB20 cuites à 950 et 850 °C, respectivement. Toutes les briques sont entièrement conformes aux normes actuelles qui établissent une valeur minimale de résistance à la compression de 10 MPa.

Les conductivités thermiques de tous les échantillons sont faibles ; elles varient de 0,43 à 0,24 et de 0,46 à 0,21 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ pour les briques cuites à 850 et 950 °C, respectivement. Pour les briques SB00 et SB100, Ils sont considérés comme des matériaux isolants accusant des valeurs de 0,32 et 0,43 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ et de 0,36 et 0,24 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ à 850 et 950 °C.

Pendant le processus de cuisson de la brique, la mobilisation des métaux lourds qui sont présents dans les sédiments a augmenté avec l'augmentation de température. Ainsi, les briques à base des sédiments peuvent être utilisées en toute sécurité et ne peuvent pas être considérés comme des matériaux toxiques et dangereux.

Par conséquent, cette étude révèle que les sédiments peuvent être utilisés dans le domaine des matériaux de construction pour produire des briques écologiques respectant l'environnement et pouvant avoir des avantages économiques fort intéressant dans le domaine de la construction. L'utilisation des sédiments a donné lieu à des briques aux propriétés physiques, mécaniques et thermiques supérieures aux normes des briques usuelles.

Dans la deuxième partie portant sur la substitution du kaolin par les sédiments de dragage du port à l'état naturel et à l'état calciné (activation thermique à 700 °C), en fonction des taux d'ajouts et de la température de cuisson, la microstructure, les propriétés mécaniques, thermiques ainsi que l'évaluation environnementale des produits de cuisson, ont des comportements différents.

Les résultats indiquent que seules une densification et un développement de résistance mécanique ont été obtenus avec l'incorporation de sédiments calcinés dans des échantillons cuits à 1200 ° C. L'utilisation de 20% de sédiments calcinés à une température de cuisson de 1200 °C produit des céramiques avec les meilleures propriétés physiques et mécaniques et avec des propriétés thermiques acceptables. Ces céramiques pourraient être utilisées comme carreaux de sol, vu leur masse volumique la plus élevée de 2174 kg/m³ ayant une faible absorption d'eau de 3,2% et la porosité totale de 6,90%, ce qui correspond à la plus haute résistance à la compression (171 MPa) et la conductivité thermique (0,555 W/mK).

Selon les résultats expérimentaux, ce type de céramique a un grand potentiel pour être utilisée comme céramique à haute résistance dans l'industrie de la construction. Par ailleurs, l'utilisation des sédiments naturels, et des sédiments calcinés dans des céramiques cuites à 1100 °C, ont donné lieu à des spécimens plus légers avec des masses volumiques comprises entre 1421 et 1760 kg/m³. Ces échantillons enregistrent une diminution des propriétés mécaniques et de meilleures propriétés d'isolation thermique. Ils pourraient être utilisés pour la fabrication d'autres produits de construction en céramique structurelle tels que des briques d'isolation thermique.

Les essais de lixiviation ont montré que l'incorporation jusqu'à 30% de sédiment (naturels et calcinés) dans les produits céramiques n'affecte pas les performances de l'échantillon vis-à-vis du relargage des métaux lourds. Ces derniers se trouvent piégés et immobilisés dans la matrice cristalline et vitreuse des différentes céramiques.

Références bibliographiques

- [1] Bouzidi, N., Siham, A., Concha-Lozano, N., Gaudon, P., Janin, G., Mahtout, L., & Merabet, D. (2014). Effect of chemico-mineralogical composition on color of natural and calcined kaolins. *Color Research & Application*, 39(5), 499-505.
- [2] Kłosek-Wawrzyn, E., Małolepszy, J., Murzyn, P. (2013). Sintering behavior of kaolin with calcite. *Procedia Engineering*, 57, 572-582.
- [3] Peters, T. J. E. R. K. (1978). Mineralogical changes during firing of calcium-rich brick clays.
- [4] Maniatis, Y., Simopoulos, A., Kostikas, A. (1981). Mössbauer study of the effect of calcium content on iron oxide transformations in fired clays. *Journal of the American Ceramic Society*, 64(5), 263-269.
- [5] Klaarenbeek, F. W. (1961). The development of yellow colours in calcareous bricks. *Transactions of the British Ceramic Society*, 60, 738-772.
- [6] BIA, The Brick Industry Association, Technical Notes on Brick Construction 9-Manufacturing of Brick. Reston, VA, 2006.
- [7] ISO 8302: 1991, Thermal insulation—determination of steady-state thermal resistance and related properties—guarded hot plate apparatus, International Standards Organization, Geneva, Switzerland, 1991.
- [8] Mazzucato, E., Artioli, G., Gualtieri, A. (1999). High temperature dehydroxylation of muscovite-2M 1: a kinetic study by in situ XRPD. *Physics and Chemistry of Minerals*, 26(5), 375-381.
- [9] Pérez-Rodríguez, J. L., Maqueda, C., Justo, A., Morillo, E., de Haro, M. J. (1994). Characterization of decayed ceramic sculptures decorating the Pardon portico of Seville cathedral, Spain. *Applied clay science*, 9(3), 211-223.
- [10] Ten, J. G., Orts, M. J., Saburit, A., Silva, G. (2010). Thermal conductivity of traditional ceramics. Part I: influence of bulk density and firing temperature. *Ceramics International*, 36(6), 1951-1959.

- [11] Dondi, M., Mazzanti, F., Principi, P., Raimondo, M., Zanarini, G. (2004). Thermal conductivity of clay bricks. *Journal of materials in civil engineering*, 16(1), 8-14.
- [12] García-Ten, J., Orts, M. J., Saburit, A., Silva, G. (2010). Thermal conductivity of traditional ceramics: part II: influence of mineralogical composition. *Ceramics International*, 36(7), 2017-2024.
- [13] Gualtieri, M. L., Gualtieri, A. F., Gagliardi, S., Ruffini, P., Ferrari, R., Hanuskova, M. (2010). Thermal conductivity of fired clays: effects of mineralogical and physical properties of the raw materials. *Applied Clay Science*, 49(3), 269-275.
- [14] EPA 658/09, Guideline for solid waste: criteria for assessment, classification and disposal of waste, 2009.
- [15] Qi, Y., Yue, Q., Han, S., Yue, M., Gao, B., Yu, H., Shao, T. (2010). Preparation and mechanism of ultra-light weight ceramics produced from sewage sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 176(1-3), 76-84.
- [16] Mekki, H., Anderson, M., Benzina, M., Ammar, E. (2008). Valorization of olive mill waste water by its incorporation in building bricks. *Journal of Hazardous Materials*, 158(2-3), 308-315.
- [17] Loryuenyong, V., Panyachai, T., Kaewsimork, K., Siritai, C. (2009). Effects of recycled glass substitution on the physical and mechanical properties of clay bricks. *Waste Management*, 29(10), 2717-2721.
- [18] Wang, W., Chen, W., Liu, H., Han, C. (2018). Recycling of waste redmud for production of ceramicfloortilewith high strength and lightweight. *Journal of Alloys and Compounds*, 748, 876-881.
- [19] Rendtorff, N. M., Gómez, S., Gauna, M. R., Conconi, M. S., Suarez, G., Aglietti, E. F. (2016). Dense mullite–zirconia–zirconium titanate ceramic composites by reaction sintering. *Ceramics International*, 42(1), 1563-1572.
- [20] Carty, W. M., Senapati, U. (1998). Porcelain—raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behavior. *Journal of the American Ceramic Society*, 81(1), 3-20.

[21] Chinnam, R. K., Francis, A. A., Will, J., Bernardo, E., Boccaccini, A. R. (2013). Functional glasses and glass-ceramics derived from iron-rich waste and combination of industrial residues. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 365, 63-74.

[22] Guazzato, M., Albakry, M., Ringer, S. P., Swain, M. V. (2004). Strength, fracture toughness and microstructure of a selection of all-ceramic materials. Part II. Zirconia-based dental ceramics. *Dental materials*, 20(5), 449-456.

[23] Li, L., Aubertin, M. (2003). A general relationship between porosity and uniaxial strength of engineering materials. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(4), 644-658.

[24] Dowling, N. E. (2012). *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. Pearson.

[25] Jordan, M. M., Montero, M. A., Meseguer, S., Sanfeliu, T. (2008). Influence of firing temperature and mineralogical composition on bending strength and porosity of ceramic tile bodies. *Applied Clay Science*, 42(1-2), 266-271

[25] US EPA, (United States Environmental Protection Agency (US EPA). 2000. In: Jackson, L.E., Kurtz, J.C., Fisher, W.S. (Eds.), *Evaluation Guidelines for Ecological Indicators*. EPA/620/R-99/005, US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Research Triangle Park, NC.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

Les travaux de recherche entrepris dans cette thèse s'inscrivent dans la problématique de gestion des sédiments marins de port de Bejaia qui représentent un problème économique et environnemental majeur. Cette étude traite trois grands axes, la caractérisation physico-chimique et environnementale des sédiments de dragage, la valorisation des sédiments marins dans les matériaux de constructions et plus précisément dans les mortiers cimentaires et les céramiques et l'étude environnementale de chaque type de matériaux élaborés à base de ces sédiments (naturels et calcinés), il en découle ce qui suit :

- ✓ Deux types d'échantillons de sédiment de port de Bejaia (P1 pour les sédiments coté port de marchandise, P2 pour le côté déversement des rejets industriel (Bougie plage)) ont été présentés. Les sédiments ont été traités par voies thermique (séchage naturel et à 105 °C) et mécanique (concassage et broyage). Une caractérisation approfondie (physique, chimique, minéralogique, et environnementale) a été réalisée afin de déterminer leurs natures et propriétés.
- ✓ La caractérisation physique a montré que les deux échantillons (P1 et P2) peuvent être considérés comme des sols fins, avec une fraction de sable plus important pour l'échantillon P1 (40,78%) par rapport à P2 (13,78%). Ce qui a permis à ces échantillons de les classer parmi les limons et le limon fin respectivement et que ce sont des sols peu plastiques, avec des indices de plasticité égale à 16,87% pour P1 et 16,26% pour P2. Les masses volumiques absolues sont de 2,72 et 2,67 g.cm⁻¹, respectivement pour P1 et P2 ; cette différence est due à la présence de calcite qui est plus élevée dans P2 (34,05%) que dans P1 (31,89%). Les résultats obtenus par l'essai VBS au bleu de méthylène montrent que l'échantillon P1 est plus propre que l'échantillon P2. L'analyse minéralogique des deux sédiments P1 et P2 a montré la présence majoritaire de quartz et de la calcite, à côté de la muscovite et de la kaolinite dont les intensités des pics sont relativement faibles.
- ✓ Le remplacement partiel du ciment dans la fabrication des mortiers à base des sédiments naturels et calcinés, pour quatre teneurs de substitution (10, 20, 30 et 40%), montre que tous les mortiers présentent un étalement qui varie entre 12 et 18 cm de diamètre. L'augmentation de pourcentage des sédiments naturels et calcinés, ajoutés dans la pâte de ciment augmente la quantité d'eau requise pour avoir une consistance normale de mortier. Les sédiments naturels ont un impact négatif sur la résistance à la compression.

Cependant, l'utilisation de 10% de sédiments calcinés à 28 jours de cure produit une augmentation de la résistance à la compression et a donné une résistance maximale de 47,99 MPa. L'addition jusqu'à 10% de sédiments calcinés augmente la résistance à flexion des mortiers à 90 jours, obtenant des valeurs de 9,17 MPa, relativement proche de la résistance à la flexion du mortier témoin. La masse volumique apparente fraîche et durci diminue avec l'ajout des sédiments naturels et calcinés. L'absorption en eau par action capillaire des mortiers est augmentée avec l'augmentation du taux des sédiments naturels et calcinés. Les principaux pics de diffraction pour les mortiers sont marqués y compris par la présence du quartz, la portlandite, la calcite, l'alite non hydrater et l'ettringite. La microstructure montre existence de gel C-S-H présente par une structure massive et dense observée dans les deux mortiers avec sédiment (naturel et calciné) et mortier de référence avec l'existence de portlandite et ettringite à 28 jours de cure. L'incorporation de sédiment calciné montre des valeurs de la conductivité thermique inférieure à celle des mortiers avec l'addition des sédiments naturel et le mortier de référence. L'essai de lixiviation a montré que l'incorporation de 40% de sédiment dans les mortiers n'affecte pas les performances de l'échantillon, ce qui explique l'immobilisation des métaux lourds.

- ✓ Dans la même optique de gestion du sédiment dans le domaine des matériaux en génie civil, la seconde partie de la thèse est concentrée sur la réutilisation des sédiments de dragage à l'état naturel dans le domaine des briques cuites. L'ajout d'un maximum de 15 à 20% de sédiment, donne des valeurs de contraintes à la compression de 124,8 MPa et 127,7 124,8 MPa pour les briques cuites à 850 et 950 °C, respectivement. Toutes les briques sont entièrement conformes aux normes actuelles qui établissent une valeur minimale de résistance à la compression de 10 MPa. Les conductivités thermiques de tous les échantillons sont faibles ; elles varient de 0,43 à 0,24 et de 0,46 à 0,21 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ pour des températures de cuisson de 850 et 950 °C, respectivement. Pendant le processus de cuisson de la brique, la mobilisation des métaux lourds a augmenté avec l'augmentation de la température de cuisson. Ainsi, les briques à base des sédiments peuvent être utilisées en toute sécurité et ne peuvent pas être considérés comme des matériaux toxiques et dangereux.
- ✓ La substitution du kaolin par les sédiments de dragage du port à l'état naturels et à l'état calcinés (activation thermique à 700 °C) pour la fabrication des carreaux céramiques a permis une densification et une consolidation de la matrice céramique ce qui a permis l'amélioration de la résistance mécanique des échantillons. L'utilisation de 20% de

sédiments calcinés dans les échantillons à produit des céramiques avec les meilleures propriétés physiques et mécaniques et avec des propriétés thermiques acceptables. Ces céramiques pourraient être utilisées comme carreaux de sol, vu leur masse volumique élevée de 2174 kg/m^3 ayant une faible absorption en eau de 3,2%,t une porosité totale de 6,90%, une haute résistance à la compression de 171 MPa et une conductivité thermique de $0,555 \text{ W/mK}$). Selon les résultats expérimentaux, ce type de céramique a un grand potentiel pour être utilisée comme céramique à haute résistance dans l'industrie de la construction. Par ailleurs, l'utilisation des sédiments naturels, et des sédiments calcinés dans des céramiques cuites à 1100°C , ont donné lieu à des échantillons plus légers avec des masses volumiques comprises entre 1421 et 1760 kg/m^3 . Ces échantillons enregistrent une diminution des propriétés mécaniques et de meilleures propriétés d'isolation thermique. Ils pourraient être utilisés pour la fabrication d'autres produits de construction en céramique structurelle tels que des briques d'isolation thermique. Les essais de lixiviation ont montré que l'incorporation jusqu'à 30% de sédiment (naturels et calcinés) dans les produits céramiques n'affecte pas les performances de l'échantillon vis-à-vis du relargage des métaux lourds. Ces derniers se trouvent piégés et immobilisés dans la matrice cristalline et vitreuse des différentes céramiques

Perspectives

Ce travail de recherche propose d'autres pistes d'investigations comme perspectives afin de mieux comprendre le comportement des matériaux élaborés à base des sédiments. À cet effet, et pour poursuivre des investigations futures, nous recommandons les points suivants :

- Il serait pertinent de mener des essais complémentaires de durabilité sur les mortiers à base des sédiments naturels et calcinés, tels que les résistances mécaniques dans différents milieux acide et sulfatique. ;
- L'étude de l'influence de la finesse des sédiments (naturels et calcinés) sur les bétons autoplaçants, comme un ajout de filler ;
- L'utilisation de ces sédiments dans les techniques routières et dans la fabrication du clinker pour la fabrication du ciment.

ANNEXES

Annexe A

Opérations dragage et leurs couts associés

Tableau A.1: Profondeurs de dragages

Zone de dragage	Cote nominale	Volume sans tolérance 0,50 m	Volume avec tolérance de 0,50 m
Passe d'entrée	- 12.00	11 000 m ³	32 875 m ³
Chenal d'accès	- 12.00	12 788 m ³	29 038 m ³
Arrière port	- 12.00	137 588 m ³	314 743 m ³
Bassin secondaire à l'arrière port	- 10.50	76 675 m ³	126 881 m ³
Vieux port	- 8.50	18 275 m ³	60 795 m ³
Appontement Pétrolier	- 13.50	33 463 m ³	93 814 m ³
Volume total		289 789 m³ Arrondi à 290 000 m³	658 146 m³ Arrondi à 660 000 m³

Tableau A.2: Volume des sédiments

Projets	INTITULEE	QUANTITE (M ³)	MONTANT DA en TTC	SOURCE DE FINANCEMENT	ETUDE D'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT	AUTORISATION D'IMMERSION	CONTRAINTES
R E A L I S E S	Dragage du port de Bejaia Année 2005	1 330 300	436 091 465,16	Autofinancement	Etude d'impact sur l'environnement faite par le Laboratoire des Etudes Maritimes (L.E.M) en 1996	-Décision du ministère de l'environnement Du 10/03/1997 -Détermination des coordonnées du site d'immersion de la fosse de Bougie.	- <u>Passé Amir Abdelkader</u> - Présence d'un lit de pierres et de l'enrochement. - Poste 19 (Oued SALAMON) : - Présence d'une couche très compacte de TVO. - Dalle en béton + une assise de l'ancienne cale de halage.
	Poste gazier et huilier (Poste 26) Année 2009	405 506	492 470 816,76		Etude d'impact sur l'environnement faite par l'ENACT en 2008		-Présence de l'argile dense et de la vase au lieu du sable fin.
	Dragage des trois bassins du port de Béjaia Année 1990	300 000					
	Dragage du Quai central (Postes 7 et 8) et Quai Nord –Ouest (Postes 9,10 et 11)	15 000	33 345 000,00	PSD Wilaya/DTP	/		- Présence de blocs en maçonnerie - Déchet métaux et en bois
En cours	Poste 25 Année 2016	1 300 000	1 108 933 356,04	Autofinancement	Etude d'impact sur l'environnement faite par le Laboratoire des Etudes Maritimes (L.E.M) en 2015	Décision n°376 datée du 28/11/2016 du ministère de l'environnement	- Présence de l'argile dense et de la vase au lieu du sable fin et déchets de matériaux en béton.
A réaliser	Dragage des 03 bassins du port de Béjaia	720 000				Détermination de nouvelles coordonnées du site d'immersion de la fosse de Bougie.	

Annexes B

Fiches ASTM des différents phases minéralogiques

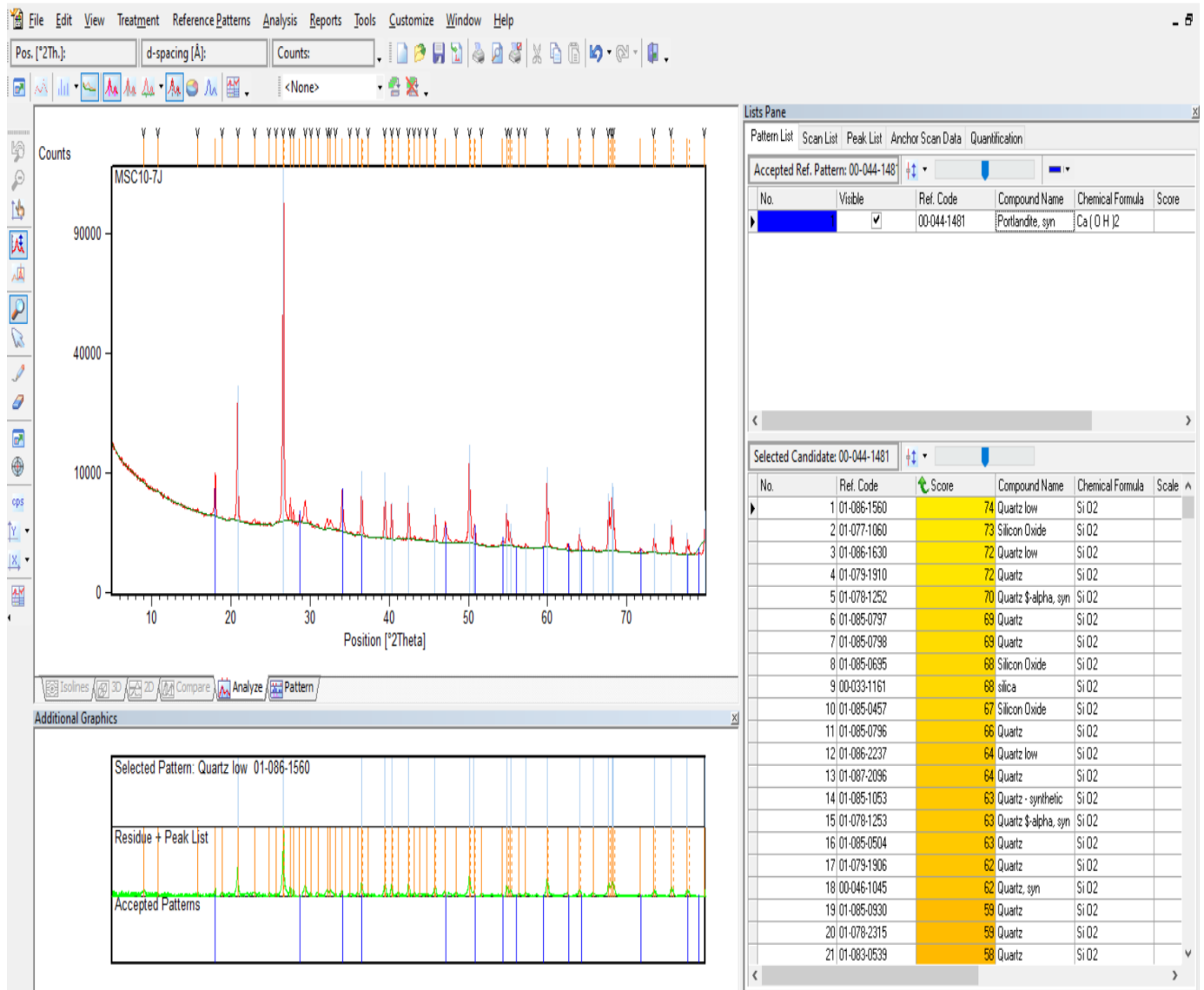


Figure B.1: Phase minéralogique de la Portlandite dans les mortiers.

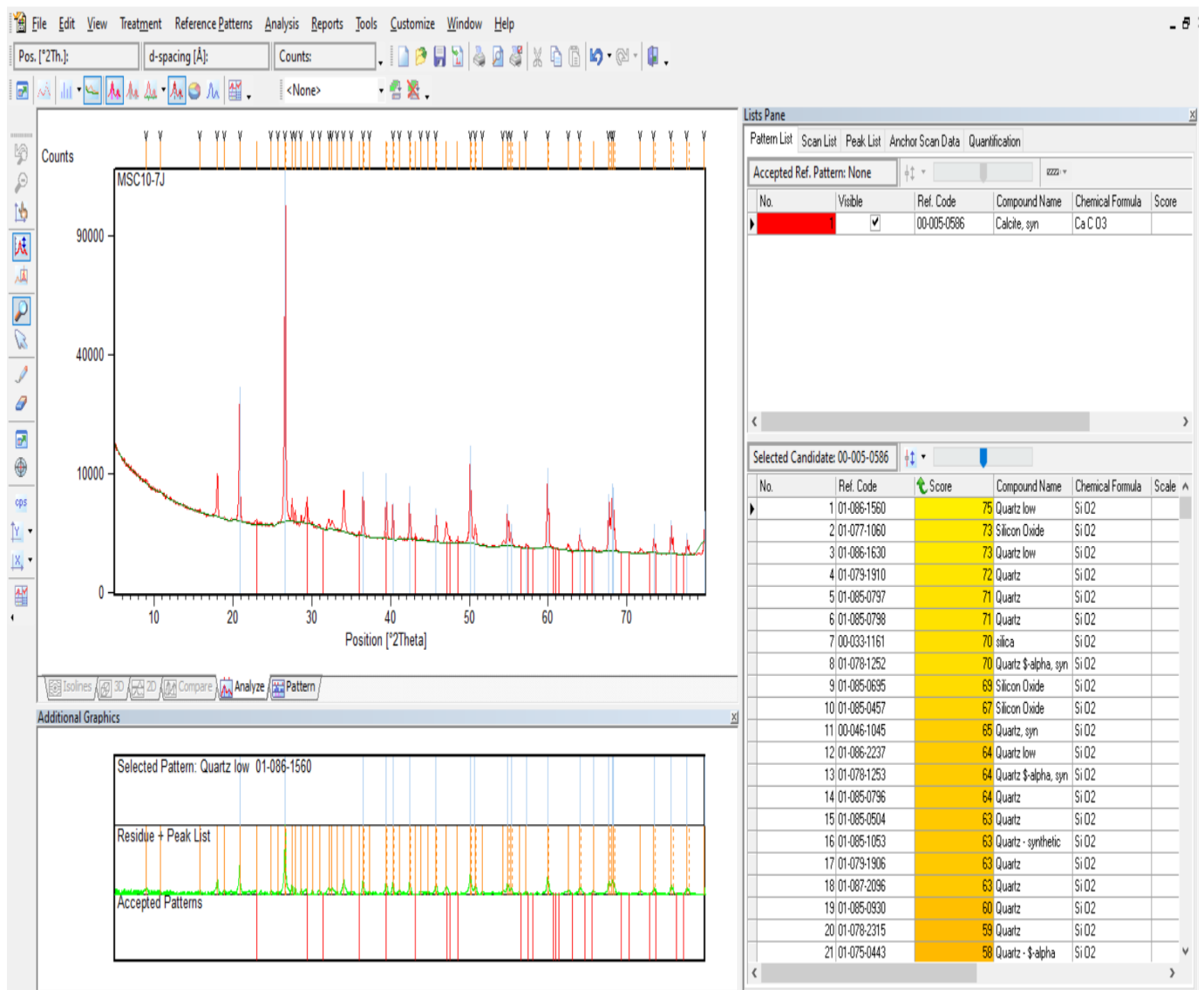


Figure B.2: Phase minéralogique de la calcite dans les mortiers.

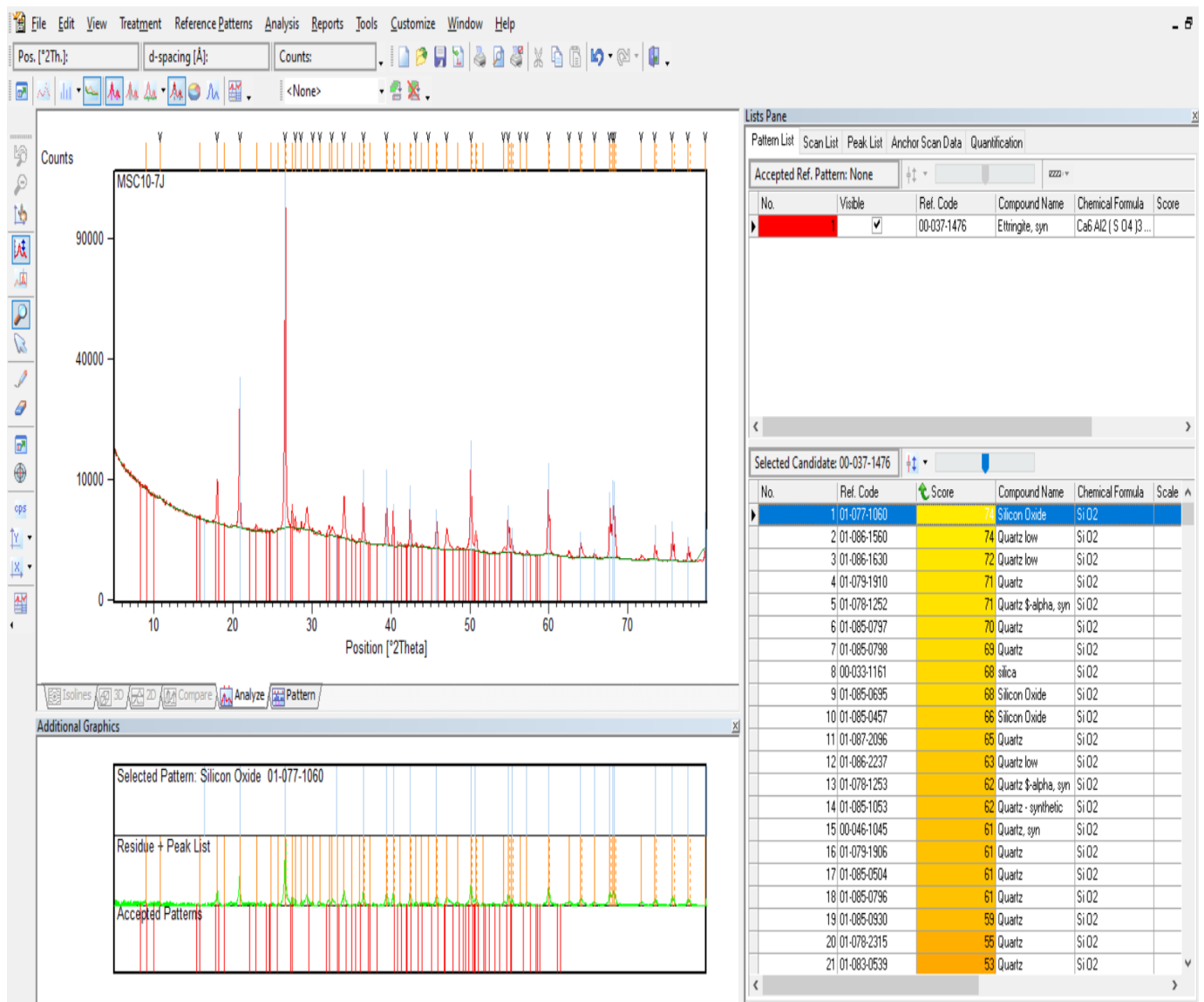


Figure B.3: Phase minéralogique de l’ettringite dans les mortiers.

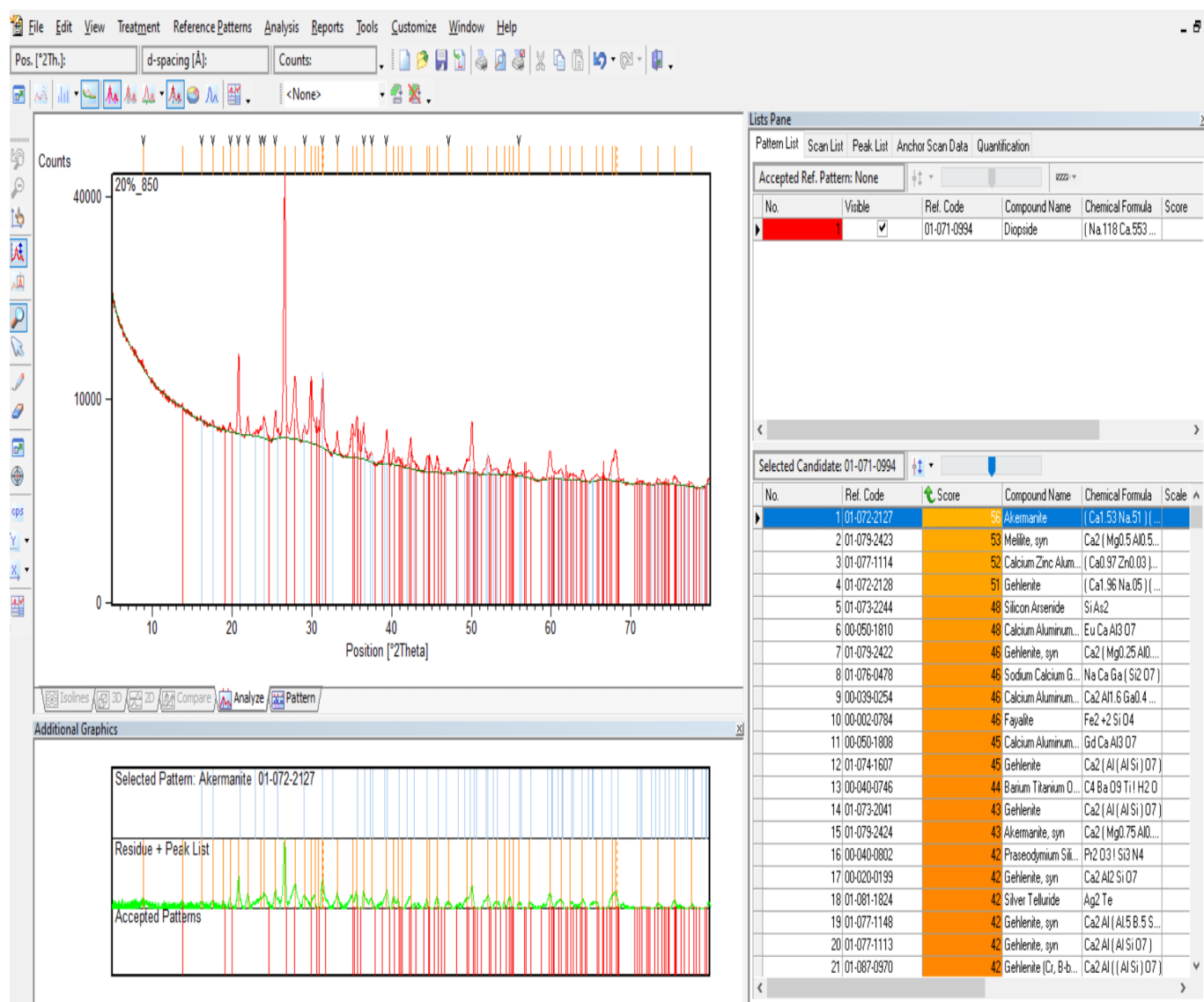


Figure B.4: Phase minéralogique du diopside dans les briques cuites.

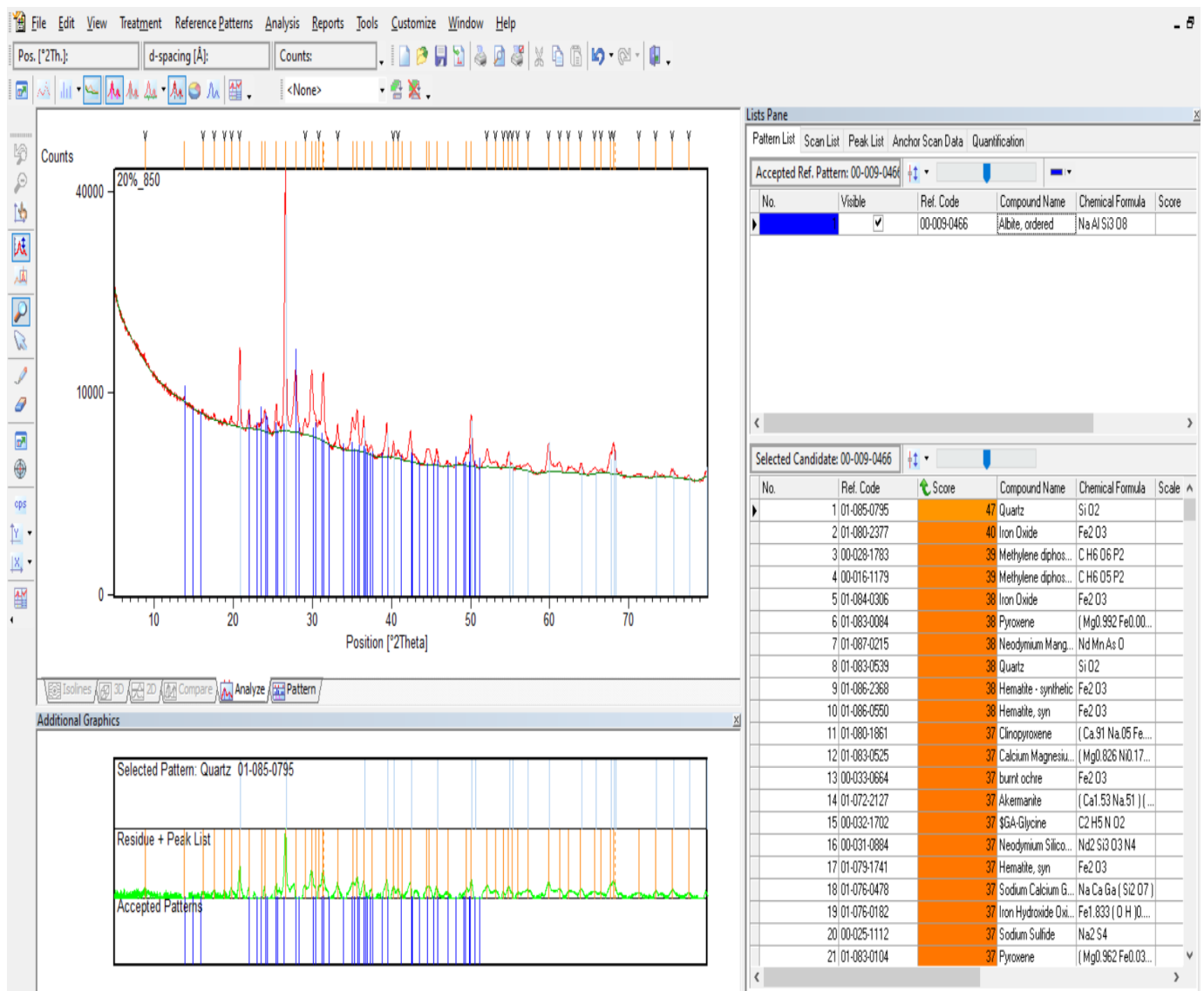


Figure B.5: Phase minéralogique de l'albite dans les briques cuites.

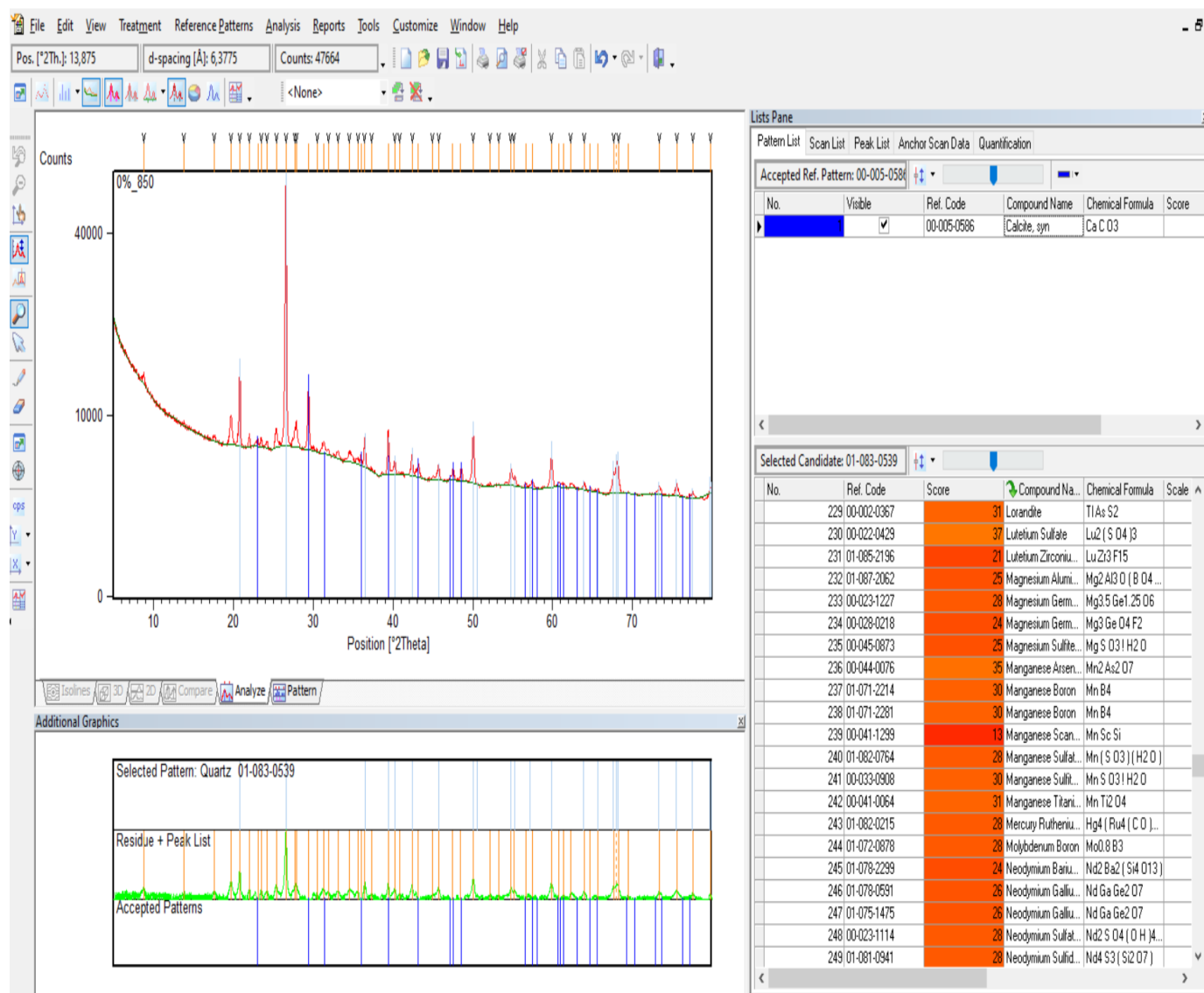


Figure B.6: Phase minéralogique de la calcite dans les briques cuites.

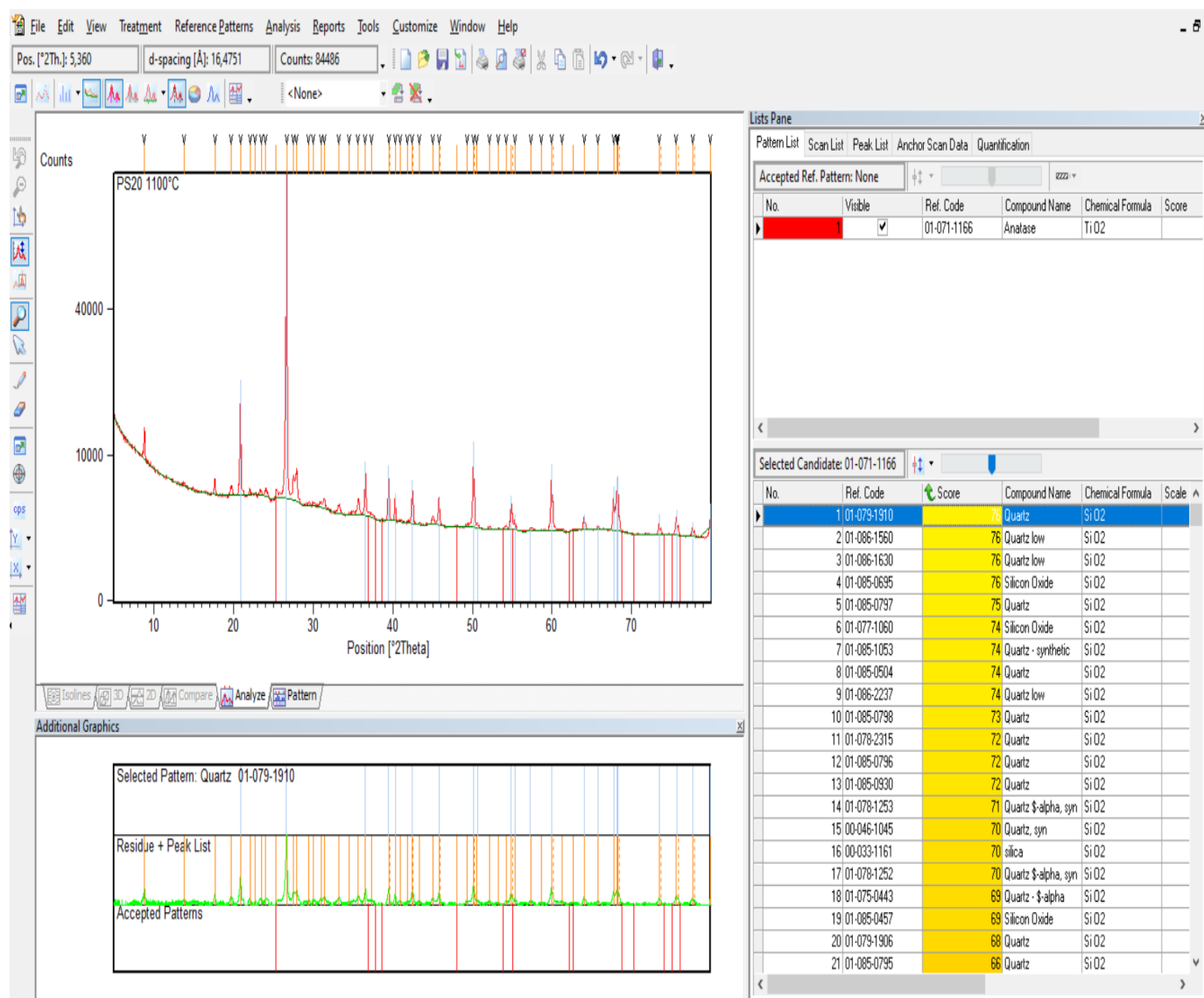


Figure B.7: Phase minéralogique de l'anatase dans les carreaux céramiques.

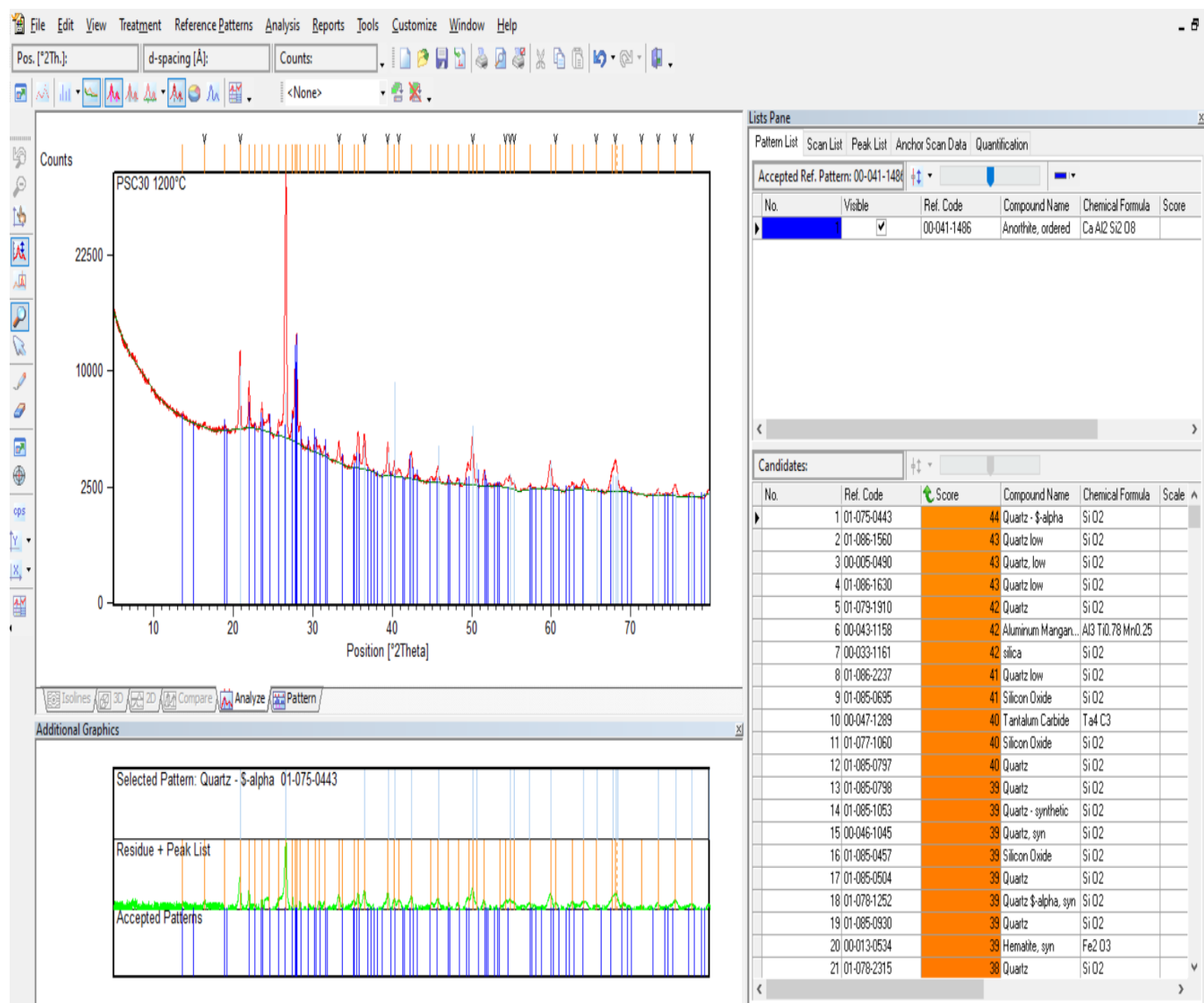


Figure B.8: Phase minéralogique de l'anorthite dans les carreaux céramiques.

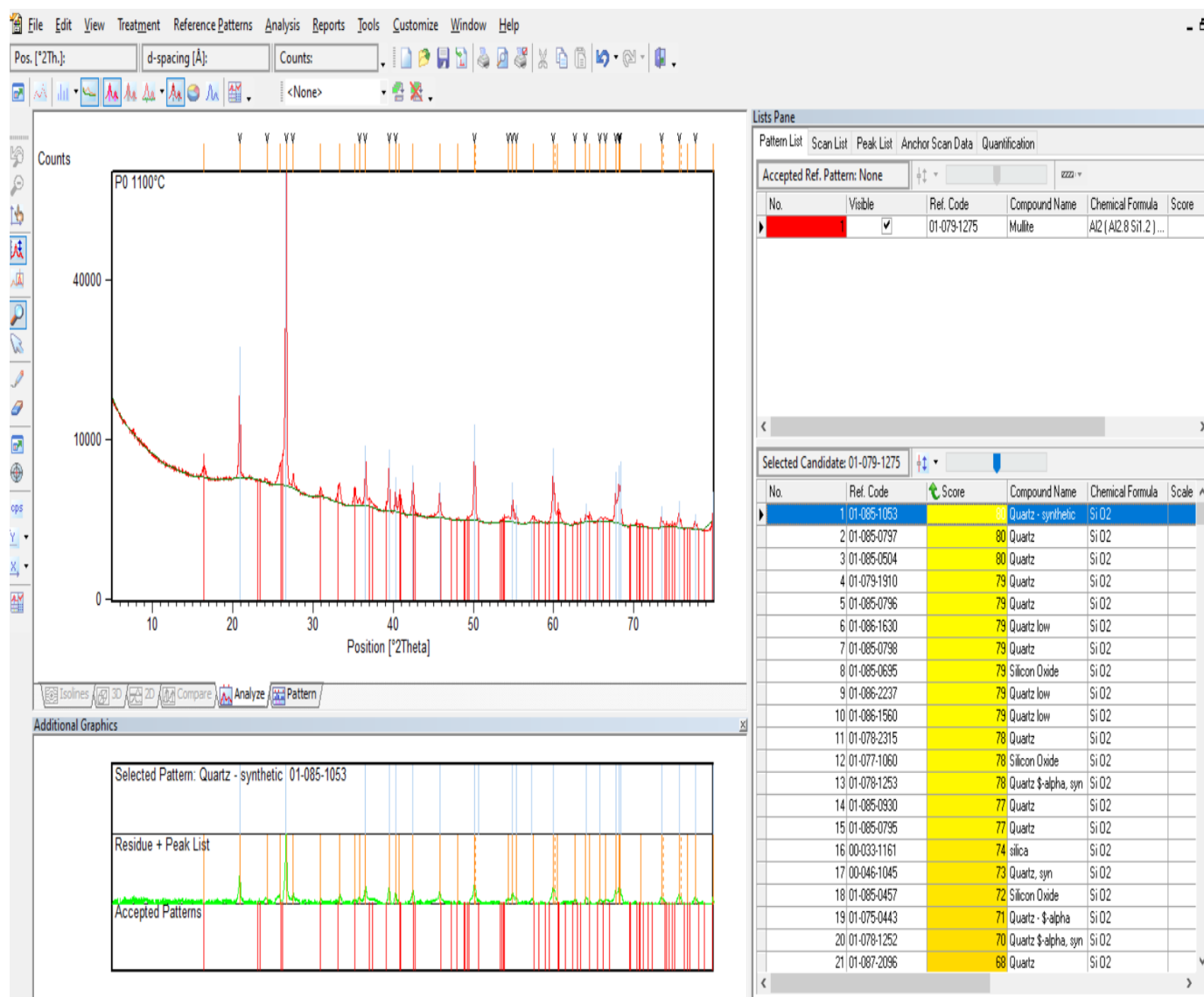


Figure B.9: Phase minéralogique de la mullite dans les carreaux céramiques.

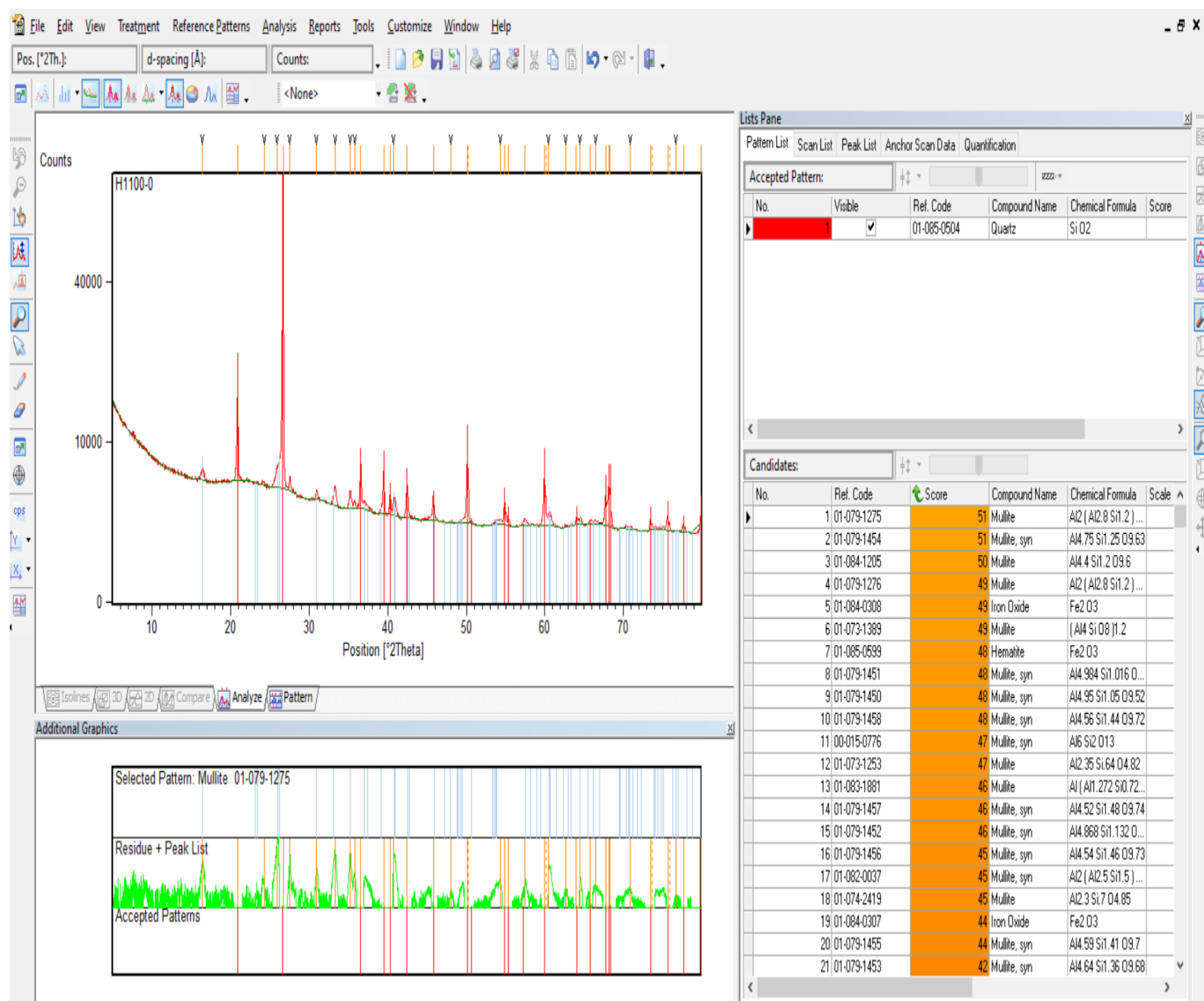


Figure B.10: Phase minéralogique du quartz dans les carreaux céramique

Résumé

Ce travail entre dans le cadre de la gestion et la valorisation des sédiments de dragage du port de Bejaia, en vue de leurs utilisations comme matières premières dans le domaine des matériaux de construction et des céramiques. Ainsi, une étude de caractérisation physico chimique, microstructurale, et environnementale a été réalisée moyennant des méthodes d'investigations divers.

Les sédiments marins naturels ont les mêmes compositions minéralogiques et chimiques que les argiles, cela fait d'eux une solution écologique de les réutiliser, après séchage, concassage et broyage, dans le domaine des matériaux de construction. L'étude de formulation des mortiers à base des sédiments naturels et calcinés nous montre que l'utilisation de 10% des sédiments calciné dans les mortiers à 28 et 90 jours de cure produit une augmentation de la résistance à la compression et une augmentation de la résistance à flexion de 47,98 à 49,76 MPa et de 6,01 à 9,17 MPa, respectivement. Par ailleurs, la possibilité d'utilisation des sédiments naturels dans le domaine des briques cuites nous montre que l'ajout de 15 et 20% de sédiment naturel pour les briques cuites à 850 et 950 ° ont produits une augmentation de la résistance à la compression allant de 108.26 à 127,67 MPa. Ainsi, toutes les briques conçues à base des sédiments naturel sont considérés comme des matériaux isolants. Une autre étude détaillée a été menée à base des sédiments de dragage, naturels et calcinés, pour la fabrication des céramiques (type dalle de sol). Les résultats indiquent que l'utilisation de 20% de sédiments calcinés à une température de cuisson de 1200 °C produit des céramiques avec les meilleures propriétés physiques et mécaniques et thermiques acceptables.

L'étude environnementale sur des tests de lixiviation des métaux lourds (Ni, Cr, Cu, Zn et le Cd) selon les normes TCLP, des différents matériaux élaborés, nous a donné des résultats satisfaisants quant au relargage de ces métaux lourds. Ces derniers sont stabilisés et immobilisés dans les différentes matrices cimentaires et céramiques (briques et dalle de sol). Cette étude révèle que les sédiments peuvent être utilisés dans le domaine des matériaux de construction pour produire des matériaux écologiques respectant l'environnement et pouvant avoir des avantages économiques fort intéressant dans le domaine de la construction.

Mots clés : Sédiments marins, Port de Bejaia, Mortiers, Briques, céramiques, caractérisations, propriétés mécaniques et thermiques

Abstract

This work is part of the management and valuation of dredged sediments from the port of Bejaia, with a view to their use as raw materials in the field of construction materials and ceramics. Thus, a physicochemical, microstructural and environmental characterization study was carried out using various investigation methods.

Natural marine sediments have the same mineralogical and chemical compositions as clays, making them an ecological solution to reuse them, after drying, crushing and grinding, in the field of construction materials. The formulation study of the mortars based on natural and calcined sediments shows us that the use of 10 wt% of the calcined sediments in the mortars at 28 and 90 days of cure produces an increase in compressive strength and an increase in flexural strength of 47.98 to 49.76 MPa and 6.01 to 9.17 MPa, respectively. In addition, the possibility of using natural sediments in the field of fired bricks shows us that the addition of 15 and 20 wt% natural sediment for bricks fired at 850 and 950 ° produced an increase in compressive strength, ranging from 108.26 to 127.67 MPa. Thus, all bricks designed on the basis of natural sediments are considered insulating materials. Another detailed study was carried out on the basis of dredged sediments, natural and calcined, for the manufacture of ceramics (floor slab type). The results indicate that the use of 20 wt% calcined sediment at a firing temperature of 1200 ° C produces ceramics with the best acceptable physical and mechanical and thermal properties.

The environmental study on leaching tests for heavy metals (Ni, Cr, Cu, Zn and Cd) according to TCLP standards, of the various materials produced, gave us satisfactory results with regard to the release of these heavy metals. These are stabilized and immobilized in the various cement and ceramic matrices (bricks and floor slabs). This study reveals that sediments can be used in the field of building materials to produce ecological materials that respect the environment and can have very interesting economic benefits in the field of construction.

Keywords: Marine sediments, Port of Bejaia, Mortars, Bricks, ceramics, characterizations, mechanical and thermal properties

ملخص

يندرج هذا العمل في إطار إدارة وتقييم الرواسب المجروفة من ميناء بجاية ، بهدف استخدامها كمواد أولية في مجال مواد البناء والسيراميك . وهكذا ، تم إجراء دراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيئية والميكروية باستخدام طرق التحقيق المختلفة

تحتوي الرواسب البحرية الطبيعية على نفس التركيبات المعدنية والكيميائية مثل الطين ، مما يجعلها حلاً بيئياً لإعادة استخدامها ، بعد التجفيف والسحق والطحن ، في مجال مواد البناء . توضح لنا دراسة تركيب الملاط على أساس الرواسب الطبيعية والمكلسة أن استخدام 10% من الرواسب المكلسة في الملاط بعد 28 و 90 يوماً من المعالجة ينتج زيادة في مقاومة الانضغاط وزيادة في مقاومة الانحناء بمقدار 47.98 إلى 49.76 ميجا باسكال و 6.01 إلى 9.17 ميجا باسكال على التوالي . علاوة على ذلك ، فإن إمكانية استخدام الرواسب الطبيعية في مجال الطوب المحروق تبين لنا أن إضافة 15% و 20% من الرواسب الطبيعية للطوب المحروق عند 850 و 950 درجة أدى إلى زيادة مقاومة الانضغاط تتراوح من 108.26 إلى 127.67 ميجا باسكال . وبالتالي ، فإن جميع الطوب المصمم على أساس الرواسب الطبيعية يعتبر مواد عازلة . أجريت دراسة تفصيلية أخرى على أساس الرواسب المجروفة 108.26 الطبيعية والمكلسة ، لتصنيع السيراميك (نوع بلاطة الأرضية . تشير النتائج إلى أن استخدام 20% من الرواسب المكلسة عند درجة حرارة حريق 1200 درجة مئوية ينتج سيراميك ، بأفضل الخواص الفيزيائية والميكانيكية والحرارية المقبولة

للمواد المختلفة المنتجة ، نتائج مرضية فيما يتعلق بإطلاق TCLP وفقاً لمعايير (Ni ، Cr ، Cu ، Zn ، Cd) أعطتنا الدراسة البيئية لاختبارات الترشيح للمعادن الثقيلة هذه المعادن الثقيلة . يتم تثبيتها وتثبيتها في مختلف المصفوفات الأسمنتية والسيراميك (الطوب والأواح الأرضيات . (تكشف هذه الدراسة أنه يمكن استخدام الرواسب في مجال مواد البناء . لإنتاج مواد بنية تحترم البيئة ويمكن أن يكون لها فوائد اقتصادية مثيرة للاهتمام في مجال البناء

الكلمات المفتاحية: الرواسب البحرية ، ميناء بجاية ، المونة ، الأجر ، الخزف ، الخصائص ، الخصائص الميكانيكية والحرارية