

UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS DE MOSTAGANEM
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL
ET D'ARCHITECTURE



N° d'ordre :/2019

THÈSE

POUR OBTENIR LE DIPLOME DE DOCTORAT EN 3^{ème} CYCLE DE L'UNIVERSITE DE
MOSTAGANEM

SPECIALITE : GENIE CIVIL

OPTION : GEO-MATERIAUX ET ENVIRONNEMENT / MATERIAUX ET DURABILITE

Présentée par :

HADJ SADOK Rachid

DATE DE SOUTENANCE :

13 juin 2019

« ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES SEDIMENTS DE
DRAGAGE »

Devant le jury composé de :

Mr HIMOURI Slimane	Professeur, Université de Mostaganem	Président
Mr BOUHAMOU Nasr-Eddine	Professeur, Université de Mostaganem	Examineur
Mr BOUGARA Abdelkader	Professeur, Université de Chlef	Examineur
Mme BELAS Nadia	Professeur, Université de Mostaganem	Directrice de thèse
Mr TAHLAITI Mahfoud	Docteur, ICAM de Nantes	Co-directeur de thèse

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2018-2019



Avant tout je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné la foi, le courage et la patience pour continuer mon modeste parcours. Sans oublier mes très chers parents à qui je dois tout : mon père, ma mère qui ont su nous éduquer et donner un sens à notre vie.

A mes chers frères et sœurs qui m'ont soutenu tout le long de mon parcours.

A ma directrice de thèse Pr BELAS Nadia, mon Co-directeur Dr TAHLAITI Mahfoud et le Dr MAZOUZI Ridha pour leurs efforts et leur soutien pour la finalisation de cette thèse de doctorat.

A tous les doctorants du laboratoire LCTPE de l'université de Mostaganem et le laboratoire LE2M à l'ICAM de Nantes.

Et je dédie ce travail à tous les anonymes : amis, camarades, étudiants que je n'ai pas cités : qui ont contribué, soutenu et ont été présents. Ils se reconnaîtront.

J'espère que cette thèse servira de support pour les années à venir.

HADJ SADOK Rachid

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie le BON DIEU ALLAH de m'avoir donné du courage et la patience pour réaliser ce modeste travail.

J'adresse mes vifs remerciements :

Aux membres du jury : Mr HIMOURI Slimane Professeur à l'université de Mostaganem d'avoir accepté de présider ma soutenance. Un grand merci à Mr BOUHAMOU Nasr-Eddine Professeur à l'université de Mostaganem et Mr BOUGARA Abdelkader, Professeur à l'université de Chlef, d'avoir examiné ce modeste travail.

Je tiens, tout d'abord, à remercier ma directrice de thèse Pr BELAS Nadia, pour m'avoir fait confiance et soutenu pour la finalisation de cette thèse de doctorat et pour ses conseils durant tout mon parcours.

Je remercie également mon Co-encadreur Dr TAHLAITI Mahfoud pour m'avoir accueilli dans son laboratoire de recherche LE2M à Nantes (France), lors de mon stage où j'ai profité de ses conseils et de ses orientations qui m'ont aidé à avancer dans ma thèse.

Je remercie tous les enseignants, ingénieurs et techniciens du laboratoire LCTPE et de l'université de Mostaganem ; ainsi que toute l'équipe du laboratoire de recherche LE2M (ICAM) à Nantes pour l'aide qu'ils ont pu me donner pour la partie expérimentale ; ainsi que la mise à ma disposition des équipements ; ainsi que les ingénieurs et techniciens de la cimenterie de Zahana.

Je remercie l'ensemble des doctorants avec qui j'ai travaillé dans le laboratoire LCTPE de l'université de Mostaganem et le laboratoire LE2M à l'ICAM de Nantes. Enfin, je souhaite adresser mes remerciements à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de cette étude.

Merci

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

ملخص

RESUME

ABSTRACT

INTRODUCTION GENERALE.....3

PARTIE 1 : RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE 1 : SEDIMENTS ET ENVASEMENT DES BARRAGES EN ALGERIE

1.1	INTRODUCTION.....	4
1.2	GENERALITES SUR LES SEDIMENTS.....	5
1.2.1	Les sédiments	5
1.2.1.1	Définition.....	5
1.2.2	Constitution et composition minérale des sédiments.....	6
1.2.2.1	Les illites.....	6
1.2.2.2	Les montmorillonites.....	7
1.2.2.3	Le kaolin.....	7
1.2.3	Granulométrie des sédiments	7
1.3	EVOLUTION DE L'ENVASEMENT DES BARRAGES EN ALGERIE	9
1.3.1	Etat envasement en Algérie.....	9
1.3.2	Phénomène de l'envasement.....	14
1.3.3	L'envasement en quelques chiffres.....	15
1.3.4	Problèmes de l'envasement des barrages.....	16
1.3.4.1	La réduction de la capacité.....	16
1.3.4.2	L'obturation des organes de vidange	19
1.3.4.3	La sécurité de l'ouvrage.....	20
1.3.4.4	L'envasement des canaux d'irrigation.....	20
1.3.4.5	Dégradation de la qualité de l'eau.....	20
1.3.5	Processus de l'envasement.....	20

1.3.6	Moyens de lutte contre l'envasement.....	22
1.3.6.1	Le dragage des barrages.....	22
1.4	CONCLUSION.....	22
CHAPITRE 2 : VALORISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE		
2.1	INTRODUCTION.....	23
2.2	VALORISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE EN AGRICULTURE.....	24
2.3	VALORISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE EN GENIE CIVIL...	25
2.3.1	Caractéristique des sédiments de dragage.....	25
2.3.2	Traitement des sédiments de dragage.....	25
2.3.3	Composition chimique.....	27
2.3.4	Composition minéralogique.....	29
2.3.5	Analyse thermogravimétrique et analyse thermo différentielle.....	33
2.3.6	Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).....	36
2.3.7	Caractéristiques physiques.....	37
2.3.7.1	Granulométrie des sédiments.....	37
2.3.7.2	Masse volumique.....	39
2.3.7.3	Surface spécifique.....	39
2.3.8	Chaleur d'hydratation du ciment a base des sédiments calcines.....	40
2.3.9	Les coulis de ciments	44
2.3.10	Comportement mécanique des mortiers à base de substitution des sédiments de dragage.....	45
2.3.11	Comportement mécanique des matériaux à base de substitution des sédiments calcines vis-à-vis des différentes températures de cure.....	50
2.4	CONCLUSION.....	52
CHAPITRE 3 : ANALYSE DU CYCLE DE VIE : OUTIL D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE		
3.1	INTRODUCTION.....	53
3.2	METHODES D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE.....	53
3.3	BREF HISTORIQUE DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE.....	54
3.4	DEFINITION ET PRINCIPE DE L'ACV.....	55

3.4.1	Définition.....	55
3.4.2	Méthodologie de l'ACV.....	56
3.4.2.1	Définition des objectifs et champs d'étude de l'ACV.....	56
3.4.2.2	Analyse de l'inventaire en cycle de vie (ICV).....	59
3.4.2.3	Qualité des données.....	60
3.4.2.4	Evaluation des impacts environnementaux (Analyse en cycle de vie des impacts (ACVI).....	61
3.4.2.5	Interprétation des résultats.....	63
3.4.3	Les méthodes d'évaluation d'impacts et logiciels d'ACV.....	64
3.4.3.1	Les méthodes et indicateurs d'évaluation environnementaux	65
3.4.3.2	Les logiciels d'ACV.....	66
3.5	ETAT DE L'ART DE L'ACV.....	68
3.5.1	L'application de l'ACV dans les matériaux cimentaires.....	68
3.5.2	ACV des sédiments dragage contaminés.....	68
3.5.3	Méthodologie de gestion des opérations de stockage des sédiments de dragage.....	70
3.5.4	L'industrialisation des sédiments calcinés.....	70
3.6	CONCLUSION.....	71
PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE LARECHERCHE.....		72
PARTIE 2 : PROCESSUS EXPERIMENTAL ET RESULTATS		
CHAPITRE 1 : MATERIAUX		
1.1	INTRODUCTION.....	74
1.2	CIMENT.....	75
1.3	LES SEDIMENTS DE DRAGAGE.....	75
1.3.1	Caractéristiques physiques des sédiments calcinés.....	78
1.3.1.1	Masse volumique.....	78
1.3.1.2	Granulométrie des sédiments	78
1.3.1.3	Morphologie des sédiments de dragage.....	79
1.3.1.4	Surface spécifique.....	79
1.3.1.5	Caractérisation de l'activité pouzzolanique des sédiments calcinés.....	80
1.3.1.6	L'indice d'activité pouzzolanique (I).....	81

1.4	SABLE NORMALISE.....	81
1.5	L'EAU DE GACHAGE.....	82
1.6	ADJUVANT.....	82
1.7	CONCLUSION.....	83

CHAPITRE 2 : METHODES EXPERIMENTALES

2.1	INTRODUCTION.....	84
2.2	ESSAIS SUR LES ECHANTILLONS DES SEDIMENTS DE DRAGAGE	85
2.2.1	Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)	85
2.2.2	Analyse thermogravimétrique.....	86
2.3	ESSAIS SUR PATES NORMALISEES.....	86
2.3.1	Essais sur coulis.....	86
2.3.2	Essais de consistance.....	87
2.3.3	Essais de prise.....	87
2.4	ESSAIS SUR MORTIERS.....	88
2.4.1	Formulation des mortiers.....	88
2.4.2	Maniabilité des mortiers.....	89
2.4.3	Essai de la chaleur d'hydratation.....	89
2.4.4	Mode de conservation des échantillons.....	90
2.5	ESSAIS MECANQUES.....	92
2.5.1	Confection des éprouvettes.....	92
2.5.2	Procédure d'essai.....	92
2.5.3	Résistance à la compression.....	93
2.6	CONCLUSION.....	93

CHAPITRE 3 : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT FRAIS ET L'ETAT DURCI

3.1	INTRODUCTION.....	95
3.2	ANALYSE PAR SPECTROMETRIE INFRAROUGE A TRANSFORMEE DE FOURIER (F.T.I.R).....	96
3.3	Analyse thermogravimétrique (TG/DTG).....	97
3.4	ESSAI DE CONSISTANCE.....	99
3.5	ESSAI DE PRISE.....	99

3.6	INFLUENCE DES SEDIMENTS CALCINES SUR LA RHEOLOGIE DES MORTIERS FRAIS.....	100
3.7	ESSAIS DE COULIS DE CIMENT.....	103
3.7.1	Caractéristiques des coulis de ciment à base des sédiments calcinés	103
3.7.2	Compatibilité ciment PLASTIMENT® BV40.....	104
3.7.3	Mesure de l'efficacité d'un adjuvant en fonction des coulis de ciment à base de substitution des sédiments calcinés.....	105
3.7.3.1	Mesure de la fluidité des différents coulis de ciment à 5 et 60 min.....	105
3.8	ETAT DURCI.....	107
3.8.1	Essai de chaleur d'hydratation sur les pâtes à base de sédiments calcinés	107
3.8.2	Essai de chaleur d'hydratation sur les mortiers à base de sédiments calcinés.....	108
3.8.3	Résistances à la compression	109
3.8.4	Résistances à la traction.....	110
3.8.5	Corrélation entre la résistance en compression et la résistance en traction.....	115
3.9	CONCLUSION.....	115

PARTIE 3 : ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES SEDIMENTS CALCINES ET RESULTATS

CHAPITRE 1 : ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES SEDIMENTS CALCINES

1.1	INTRODUCTION.....	117
1.2	INDUSTRIALISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE CALCINES	116
1.2.1	Développement d'un modèle éco conçu du système de traitement des sédiments de dragage calcines.....	116
1.2.1.1	Description du système.....	116
1.2.1.2	Choix du matériel de traitement des sédiments.....	117
1.2.1.3	L'analyse du cycle de vie de traitement des sédiments de dragage calcinés.....	119
1.3	ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES SEDIMENTS CALCINES : CAS D'APPLICATION DE L'ACV DANS LE PROCESSUS EXPERIMENTAL.....	123

1.3.1	Analyse du cycle de vie des ciments à base de sédiments de dragage	123
1.3.1.1	Description du système.....	123
1.3.1.2	Présentation de la société des ciments de Zahana.....	124
1.3.1.3	L'analyse du cycle de vie du ciment à base de sédiments calcinés....	124
1.3.2	Analyse du cycle de vie des pâtes et mortiers à base des sédiments calcinés	128
1.3.2.1	Description du système.....	128
1.3.2.2	L'analyse du cycle de vie des pâtes et mortiers à base de sédiments calcinés.....	128
1.4	CONCLUSION.....	130
CHAPITRE 2 : RESULTATS ET DISCUSSION		
1.1	INTRODUCTION.....	131
1.2	INDUSTRIALISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE CALCINES	131
1.2.1	Le potentiel de réchauffement climatique.....	132
1.2.2	Le potentiel d'acidification.....	132
1.2.3	Le potentiel d'ozone troposphérique.....	133
1.2.4	La demande d'énergie cumulée et d'exergie.....	134
1.2.5	Analyse de sensibilité.....	134
1.2.5.1	Modélisation avec logiciel SimaPro 8.5.2.0.....	136
1.3	ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES SEDIMENTS CALCINES : CAS D'APPLICATION DE L'ACV DANS LE PROCESSUS EXPERIMENTAL	138
1.3.1	Analyse du cycle de vie des ciments à base de sédiments calcinés....	139
1.3.2	Analyse du cycle de vie des pâtes et mortiers à base des sédiments calcinés.....	144
1.3.2.1	Interprétation du cycle de vie des pâtes à base des sédiments calcinés.....	144
1.3.2.2	Interprétation du cycle de vie des mortiers à base des sédiments calcinés	148
1.4	CONCLUSION.....	153
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....		154
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		156
ANNEXES		

LISTE DES FIGURES

PARTIE 1 : RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

Figure 1. 1 : Origine des sédiments dans l'environnement aquatique (Maes E).....	5
Figure 1. 2 : Diagramme triangulaire utilisé pour les sols fins (Bonnet C, 2006).....	9
Figure 1. 3 : Les barrages en Algérie (Géoportail, 2018).....	14
Figure 1. 4 : Pourcentage d'envasement par rapport à la capacité totale des barrages Algériens (ANBT, 2015).....	15
Figure 1. 5 : Le classement des 10 plus grands barrages les plus envasés en Algérie (ANBT, 2015).....	15
Figure 1. 6 : Situation géographique du barrage de Bouhanifia (Google Maps, 2019).....	16
Figure 1. 7 : a) Le booster du barrage de Bouhanifia ; b) Situation géographique des zones de rejet du barrage de Bouhanifia (Google Earth, 2019).....	18
Figure 1. 8 : Situation géographique du barrage de K'sob (Google Earth, 2019).....	18
Figure 1. 9 : a) Dragueuse suceuse avec agrégateur CSD 350 du barrage de K'sob ; b) zone de rejet.....	19
Figure 1. 10 : Type de charriage (Remini, 1996).....	20
Figure 1. 11 : Organigramme du processus d'envasement d'une retenue (Remini, 1996).....	21
Figure 1. 12 : A l'intérieur de la zone de rejet N°3 du barrage de Bouhanifia.....	24
Figure 1. 13 : Organigramme de la méthode de traitement physico-thermique (Benzerzour et al., 2017a).....	27
Figure 1. 14 : Analyses diffractogrammes aux rayons X de la vase de Fergoug (non traitée) et traitée thermiquement (calcinée) à 750, 850 et 950 °C (Laoufi et al., 2016).....	30
Figure 1. 15 : Analyse Diffractogrammes des rayons X de la vase brute et la vase calcinée Chorfa II (Belguesmia et al., 2018).....	31
Figure 1. 16 : Mécanisme de transformation de la kaolinite en métakaolinite (Chikouche et al., 2016).....	32
Figure 1. 17 : Analyse DRX des sédiments bruts et traités (Safhi et al., 2019).....	32
Figure 1. 18 : a) Courbe ATG des sédiments (non traités) et traités thermiquement (calcinés) à 750.850 et à 950 °C ; b) Courbe ATD des sédiments (non traités) et traités thermiquement (calcinés) à 750, 850 et 950 °C (Laoufi et al., 2016).....	33
Figure 1. 19 : Analyse ATG-DSC des sédiments naturels (Chikouche et al., 2016).....	34

Figure 1. 20 : Résultat d'analyse ATG des sédiments marins naturels du port de Dunkerque (Nord de la France) (Amar et al., 2018).....	35
Figure 1. 21 : Analyse FTIR pour les sédiments non calcinés du barrage de Fergoug (Mostefa et al., 2018).....	37
Figure 1. 22 : Distribution granulométrique des grains des sédiments calcinés (Belguesmia et al., 2018).....	37
Figure 1. 23 : Courbes granulométriques des sédiments du barrage de Bouhanifia (Kazi Aoual-Benslafa et al., 2014).	38
Figure 1. 24 : Répartition granulométrique du ciment, des sédiments calcinés et non calcinés (Safhi et al., 2019).....	38
Figure 1. 25 : Flux thermiques et chaleurs dégagées des pâtes à base des sédiments non calcinés (Belguesmia, 2018).....	40
Figure 1. 26 : Flux thermiques et chaleurs dégagées des pâtes à base des sédiments calcinés (Belguesmia, 2018).....	41
Figure 1. 27 : Chaleur d'hydratation des différents ciments modifiés (MC) (Chikouche et al., 2016).....	42
Figure 1. 28 : Relation entre la chaleur d'hydratation et le temps de RM et MSC (Benzerzour et al., 2017a).....	43
Figure 1. 29 : Résistances à la traction et à la compression des sédiments de Fergoug (Semcha, 2006).....	45
Figure 1. 30 : Résistances à la compression des mortiers à base de sédiments calcinés à 750°C, 850°C et 950°C (Laoufi et al., 2016).....	46
Figure 1. 31 : Courbes de résistance à la compression de différents mortiers (Kazi Aoual-Benslafa et al., 2015).....	47
Figure 1. 32 : Résistance mécanique : a) résultats des essais de flexions en 3 points et b) résultats des essais de compressions (Benzerzour et al., 2017b).....	48
Figure 1. 33 : résistance relative à la compression à différents âges en fonction du taux de traitement thermique ; a) 600°C, b) 700°C et c) 800°C (Chikouche et al., 2016).....	49
Figure 1. 34 : (a) Evolution de la résistance sous l'effet des températures ; (b) Résistances obtenues sous des hautes températures en MPA (Siline et al., 2013).....	50
Figure 1. 35 : Résistance à la compression et résistance relative des mortiers (MK0, MK5, MK15 et MK25) durcis à différentes températures cures : (a) à 10°C, (b) à 20°C et (c) à 40°C (Tahlaiti et al., 2014).....	51
Figure 1. 36 : Principales phases d'une ACV (ISO 14040 :2006).....	57
Figure 1. 37 : Exemple de frontière d'un système [ISO14040 :2006, 2006].....	59
Figure 1. 38 : Structure générale des catégories intermédiaires (problèmes) et dommages (Jolliet et al., 2010).....	61
Figure 1. 39 : Relations des éléments lors de la phase d'interprétation avec les autres phases d'une ACV [ISO14044 :2006, 2006].....	64

Figure 1. 40 : Placement des méthodes Midpoint et Endpoint sur la chaîne causée à effet d'un impact (Aissani, 2008).....	65
Figure 1. 41 : Schéma général de la méthode Impact 2002+ adapté (Jolliet et al., 2010).....	66
PARTIE 2 : PROCESSUS EXPERIMENTAL ET RESULTATS	
Figure 2. 1 : Les étapes de traitement des sédiments de dragage.....	76
Figure 2. 2 : Traitement thermique des sédiments au four électrique à moufle.....	77
Figure 2. 3 : Distribution granulométrique des sédiments calcinés.....	78
Figure 2. 4 : Observations MEB des sédiments de dragage : a) Sédiments calcinés ; b) Sédiments non calcinés.....	80
Figure 2. 5 : Analyse qualitative et quantitative de la composition minéralogique des sédiments calcinés du barrage de Chorfa II (DRX).....	80
Figure 2. 6 : Composition granulométrique du sable de référence CEN.....	82
Figure 2. 7 : Spectroscopie d'infrarouge : a) Appareil Spectroscopie Infrarouge (ICAM sites de Nantes, France) ; b) Schéma d'un spectromètre à transformée de Fourier (Bouzidi, 2012).....	85
Figure 2. 8 : Appareil d'analyse thermogravimétrique (ATG) (laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) à l'université de La Rochelle, France).....	87
Figure 2. 9 : Le cône de Marsh [NF EN 14117].....	87
Figure 2. 10 : Calorimètre isotherme multicanal (Laboratoire GeM à l'école centrale de Nantes, France).....	90
Figure 2. 11 : Cure sèche à 10°C.....	91
Figure 2. 12 : Cure sèche à 20°C.....	91
Figure 2. 13 : a) Le montage de l'enceinte isothermique ; b) Cure sèche à 40°C.....	92
Figure 2. 14 : Machine d'essais de résistance à la flexion et compression.....	93
Figure 2. 15 : Organigramme résumant le protocole expérimental mené dans cette étude.	94
Figure 2. 16 : Spectre IR des sédiments calcinés et non calcinés.....	96
Figure 2. 17 : Analyses ATG/DTG des sédiments non calcinés.....	98
Figure 2. 18 : Analyses ATG/DTG des sédiments calcinés.....	98
Figure 2. 19 : Influence des dosages des sédiments calcinés sur le rapport E/L.....	99
Figure 2. 20 : Influence des dosages des sédiments calcinés sur le temps de prise.....	100
Figure 2. 21 : Influence du dosage du PLASTIMENT® BV40 sur le temps d'écoulement des mortiers à base des sédiments de dragage calcinés.....	101
Figure 2. 22 : le dosage du PLASTIMENT® BV40 par rapport à l'extrait sec.....	102
Figure 2. 23 : Densité des différents mortiers à base des sédiments calcinés à l'état frais....	102
Figure 2. 24 : Variation du temps d'écoulement à 5, 15, 30 et 60 min des coulis : a) Coulis témoin 1 ; b) Coulis 2 ; c) Coulis 3 et d) Coulis 4.....	105

Figure 2. 25 : Corrélation entre la dose de saturation et le taux de substitution des sédiments calcinés.....	106
Figure 2. 26 : Evolution de temps d'écoulement des coulis en fonction du dosage BV 40 : a) Temps d'écoulement à 15 min ; b) Temps d'écoulement à 60 min.....	106
Figure 2. 27 : Perte de fluidité pour les différents coulis avec substitution des sédiments calcinés.....	107
Figure 2. 28 : Flux thermiques et chaleurs dégagées des pâtes à base de 0%, 5%, 15% et 25% des sédiments calcinés.....	108
Figure 2. 29 : Flux thermiques et chaleurs dégagées des mortiers à base de 0%, 5%, 15% et 25% des sédiments calcinés.....	109
Figure 2. 30 : Evolution de la résistance en compression des mortiers à base de sédiments de dragage par rapport au mortier témoin à 10°C, 20°C et 40°C.....	110
Figure 2. 31 : Evolution du gain de résistance en compression des mortiers à base de sédiments de dragage calcinés par rapport au mortier témoin à 10°C, 20°C et 40°C.....	112
Figure 2. 32 : Evolution de la résistance en traction des mortiers à base de sédiments de dragage calcinés par rapport au mortier témoin à 10°C, 20°C et 40°C.....	113
Figure 2. 33 : Evolution du gain de résistance en traction des mortiers à base de sédiments de dragage calcinés par rapport au mortier témoin à 10°C, 20°C et 40°C.....	114
Figure 2. 34 : Corrélation entre la résistance en compression et la résistance en traction....	115
PARTIE 3 : ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES SEDIMENTS CALCINES ET RESULTATS	
Figure 3. 1 : Cycle de vie des sédiments de dragage : cas d'application dans le bâtiment avec un béton et mortier, où une partie du ciment sera substituée par des sédiments de dragage..	116
Figure 3. 2 : Processus de traitement des sédiments de dragage calcinés scenario envisagé N 1.....	117
Figure 3. 3 : Le processus de traitement des sédiments de dragage calcinés du scenario N 2.....	117
Figure 3. 4 : Rapport entre le taux d'humidité des sédiments en eau évaporée et la consommation énergétique (ADEME, 2006).....	118
Figure 3. 5 : Principe de définition de la frontière du système du traitement des sédiments calcinés.....	120
Figure 3. 6 : Définition et frontière du système de production ciment à base des sédiments calcines.....	125
Figure 3. 7 : Définition et frontière du système de confection des pâtes et mortiers à base de sédiments calcinés.....	129
Figure 3. 8 : Les flux d'émissions des 4 indicateurs d'impact environnementaux par GEMIS 4.95.....	133
Figure 3. 9 : Les phases pour chaque indicateur d'impact lors du traitement des sédiments de dragage par GEMIS 4.95.....	134

Figure 3. 10 : Analyse de sensibilité pour comparer le taux d'humidité variant de 0% à 90% pour le scénario N 2.....	136
Figure 3. 11 : Analyse de traitement d'une (1) tonne de sédiments de dragage avec la méthode de caractérisation CML-base line V3.05.....	137
Figure 3. 12 : Arborescence de la modélisation des différents scénarios sur l'indicateur changement climatique avec la méthode IMPACT 2002+ : a) ciment à base de 0% de sédiments calcinés ; b) ciment à base de 5% de sédiments calcinés ; c) ciment à base de 15% de sédiments calcinés et d) ciment à base de 25% de sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.....	140
Figure 3. 13 : Histogramme de comparaison des impacts sur l'ensemble des indicateurs de la modélisation des quatre ciments à base de sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.....	142
Figure 3. 14 : Comparaison des scores de dommages d'impacts d'une (1) tonne de ciments à base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.....	143
Figure 3. 15 : Comparaison des impacts environnementaux pondérés totaux des différents ciments à base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés issus de la pondération, selon IMPACT 2002+. Un point correspond ici à une pers.an pour toutes les catégories de dommages.....	143
Figure 3. 16 : Histogramme de comparaison des impacts sur l'ensemble des indicateurs de la modélisation des quatre pâtes à base des sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.....	145
Figure 3. 17 : Arborescence de la modélisation des différents scénarios sur l'indicateur changement climatique avec la méthode IMPACT 2002+ : a) pâte à base de 0% des sédiments calcinés ; b) pâte à base de 5% des sédiments calcinés ; c) pâte à base de 15% des sédiments calcinés et d) pâte à base de 25% des sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.....	146
Figure 3. 18 : Comparaison des scores de dommages d'impacts des pâtes à base de 0%, 5%, 15% et 25% sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.....	147
Figure 3. 19 : Comparaison des impacts environnementaux totaux pondérés des différentes pâtes à base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés issus de la pondération, selon IMPACT 2002+. Un point correspond ici à une pers.an pour toutes les catégories de dommages.....	147
Figure 3. 20 : Arborescence de la modélisation des différents scénarios sur l'indicateur changement climatique avec la méthode IMPACT 2002+ : a) mortier à base de 0% des sédiments calcinés ; b) mortier à base de 5% des sédiments calcinés ; c) mortier à base de 15% des sédiments calcinés et d) mortier à base de 25% des sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.....	149
Figure 3. 21 : Histogramme de comparaison des impacts sur l'ensemble des indicateurs de la modélisation des quatre mortiers à base des sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.....	151
Figure 3. 23 : Comparaison des scores de dommages d'impacts des mortiers à base de 0%, 5%, 15% et 25% sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.....	152
Figure 3. 24 : Comparaison des impacts environnementaux pondérés totaux des différentes pâtes à base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés issus de la pondération, selon IMPACT 2002+. Un point correspond ici à une pers.an pour toutes les catégories de dommages.....	152

LISTE DES TABLEAUX

PARTIE 1 : RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

Tableau 1. 1 : Classement granulométrique des sédiments (Shneider G, 2001).....	8
Tableau 1. 2 : Capacité des barrages Algériens ANBT (ANBT, 2015).....	9
Tableau 1. 3 : Envasement moyen annuel des barrages Algériens ANBT (ANBT, 2015)....	12
Tableau 1. 4 : Le barrage en chiffres (ANBT, 2015).....	17
Tableau 1. 5 : Le barrage en chiffres (ANBT, 2015).....	19
Tableau 1. 6 : Exemples de composition chimique des sédiments non calcinés.....	28
Tableau 1. 7 : Exemple de composition chimique des sédiments calcinés.....	28
Tableau 1. 8 : Compositions chimiques des différentes contaminations des sédiments (Eléments mineurs chimiques) (Kazi Aoual-Benslafa et al., 2015).....	29
Tableau 1. 9 : Compositions chimiques moyennes (%) des principaux éléments des sédiments dragués (Kazi Aoual-Benslafa et al., 2015).....	29
Tableau 1. 10 : Composition minéralogique des sédiments de dragage naturels (Chikouche et al., 2016).....	31
Tableau 1. 11 : Bandes caractéristiques des sédiments non calcinés observées avec le spectre FTIR(Chikouche et al., 2016).....	36
Tableau 1. 12 : Exemples de valeurs de masses volumiques des sédiments tirés de la littérature.....	39
Tableau 1. 13 : Exemples des valeurs des surfaces spécifiques des sédiments calcinés de dragage.....	39
Tableau 1. 14 : les résultats de l'écoulement au cône de Marsh et l'étalement au mini-cône (Belguesmia, 2018).....	44
Tableau 1. 15 : Document normatif relatif à l'ACV (Laratte, 2013).....	56

PARTIE 2 : PROCESSUS EXPERIMENTAL ET RESULTATS

Tableau 2. 6 : Composition chimique du ciment CPA CEM I 42,5.....	75
Tableau 2. 7 : Composition minéralogique du clinker.....	75
Tableau 2. 8 : Compositions chimiques des sédiments calcinés du barrage Chorfa II.....	77
Tableau 2. 9 : Vérification du comportement pouzzolanique et phase vitreuse des sédiments calcinés du barrage Chorfa II.....	78
Tableau 2. 10 : Tableau des masses volumiques des sédiments du barrage de Chorfa II.....	79

Tableau 2. 11 : Exemples des valeurs de finesse des sédiments calcinés du barrage de Chorfa II tirés de la littérature.....	80
Tableau 2. 12 : Indice et coefficient d'activité pouzzolanique des sédiments calcinés à 90 jours.....	81
Tableau 2. 13 : Caractéristiques de l'adjuvant PLASTIMENT ® BV40.....	83
Tableau 2. 9 : Formulation des différents mortiers.....	88
Tableau 2. 10 : Composition des différents mortiers.....	89
Tableau 2. 11 : Valeurs des pics (cm ⁻¹) et groupements fonctionnels correspondants observés et composants associés.....	97
Tableau 2. 12 : Composition des différents coulis testés.....	103
PARTIE 3 : ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES SEDIMENTS CALCINES ET RESULTATS	
Tableau 3. 14 : Inventaire du procédé de traitement des sédiments de dragage calcinés.....	121
Tableau 3. 15 : Minéralogique des sédiments de dragage du barrage de Chorfa II.....	121
Tableau 3. 16 : Inventaire des émissions des gaz dans l'air des engins de transport des sédiments.....	122
Hugrel et Joumard, 2006 (LCPC, 2010).....	122
Tableau 3. 17 : Inventaire du procédé de production des sédiments de dragage calcinés : Convention Argéco-LCPC, Avril 2010 (LCPC, 2010).....	122
Tableau 3. 18 : capacités contractuelles de production du clinker et ciment (Société des ciments de Zahana, 2017).....	124
Tableau 3. 6 : Inventaire de traitement des sédiments calcinés.....	127
Tableau 3. 7 : Inventaire de production d'une (1) tonne de ciment de Zahana à Mascara (voie humide).....	126
Tableau 3. 8 : formulation des pâtes à base à base des sédiments calcinés.....	130
Tableau 3. 9 : Formulation des différents mortiers.....	130
Tableau 3. 10 : Analyse de sensibilité pour comparer le taux d'humidité variant de 0% à 90% dans le scénario 2.....	135
Tableau 3. 11 : Indicateurs d'impacts environnementaux de traitement des sédiments calcinés.....	137
Tableau 3. 12 : Comparaison des indicateurs d'impacts environnementaux des valeurs tires de la littérature pour le traitement de sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.....	138
Tableau 3. 13 : : Comparaison des indicateurs d'impacts environnementaux des quatre ciments à base de substitution des sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.....	141
Tableau 3. 14 : Comparaison des indicateurs d'impacts environnementaux des quatre mortiers à base de substitution des sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.....	150

ملخص

وقد أجري هذا البحث بهدف تثمين رواسب السدود. تم تخطيط جزئين: يتمثل الجزء الأول في دراسة خصائص التفاعل البوزولاني للملاط إيكولوجي قائم على الاستبدال الجزئي للأسمنت بطمي المكلس؛ من خلال وصف أدائهم الفيزيائي، الكيميائي، الانسيابي والميكانيكي. سيتم إبراز تأثير درجة حرارة العلاج على الأنواع المختلفة من الملاط إيكولوجي على أساس الاستبدال الجزئي للرواسب المكلسة في هذه الدراسة. سيتم وضع أنواع مختلفة من الملاط إيكولوجي لعدة درجات حرارة علاج منخفضة من 10 و 20 و 40 درجة مئوية: مع مواعيد نهائية تتراوح من 3 إلى 180 يوماً. وقد لوحظت أفضل النتائج للسلوك الميكانيكي للملاط إيكولوجي المحضرة بتركيبات نسب مئوية من الاستبدال بالطمي المكلس عند درجات حرارة معالجة 20 درجة مئوية و 40 درجة مئوية. مع تسارع النشاط بوزولاني في 90 يوماً للعلاج عند 40 درجة مئوية و 180 يوماً للعلاج عند 20 درجة مئوية وتطوير قوة الضغط هي أكبر نسبياً من المقاومة للملاط المرجعي.

وسيركز جزء آخر على تحليل مسار الحياة للرواسب السدود التي تم تجريفها في بيئتها من استخراج إلى معالجة النفايات. تحليل نتائج هذه الدراسة جديدة لدورة الحياة لعملية لتصنيع الرواسب المجروفة تبين أن الاحتمال لظاهرة الاحتباس الحراري تمثل 0,246 طن من ثاني أكسيد الكربون المكافئ للطن واحد من الرواسب، احتمال التحمض هو $4,55 \times 10^{-3}$ طن من ثاني أكسيد الكبريت / طن من الرواسب، ويكون احتمال الأوزون التروبوسفيري الضار هو $9,97 \times 10^{-4}$ طن من تعادل تكافؤ الهواء المكافئ للطن الواحد من الرواسب، واستهلاك 2506,75 ميغاجول للطن الواحد من الرواسب. مؤشر الاحتمال لظاهرة الاحتباس الحراري للأسمنت على أساس 0، 5، 15، 25٪ من الطمي المكلس تمثل على التوالي 935,10 كغ من ثاني أكسيد الكربون المكافئ للطن واحد، 901,73 كغ من ثاني أكسيد الكربون المكافئ للطن واحد، 835 كغ من ثاني أكسيد الكربون المكافئ للطن واحد و 768,29 كغ من ثاني أكسيد الكربون المكافئ للطن واحد. هذا يمثل مكسب 3,57، 10,70، 17,84 ٪ لا سمحت على أساس 5، 15، 25٪ للطمي المكلس. تتم مقارنة نتائج هذه الدراسة مع الدراسات الأخرى التي أجريت في الجزائر. أظهر التقييم البيئي للعملية التجريبية أن الملاط ومعاجين المحضرة بتركيبات نسب مئوية مرتفعة من الاستبدال بالطمي المكلس تقدم أفضل أداء بيئي على فئات صحة الإنسان وجودة النظام الإيكولوجي وتغير المناخ والموارد.

كلمات مفتاحية: الرواسب الجرف، تثمين، ملاط إيكولوجي، درجات حرارة، مقاومة ميكانيكية، تحليل مسار الحياة، تصنيع.

RÉSUMÉ

Cette recherche a été menée dans l'objectif de valoriser ces déblais de dragage. Deux parties ont été prévues : La première partie consiste à optimiser et caractériser la réaction pouzzolanique d'un éco-mortier à base de substitution partielle des sédiments de dragage calcinés au ciment ; en caractérisant leurs performances physiques, chimiques, rhéologiques et mécaniques. L'influence de la température de cure sur les différents types de mortiers à base de substitution partielle des sédiments de dragage sera mise en évidence dans cette étude. Les différents types de mortiers seront portés à plusieurs basses températures de cure sèche 10, 20 et 40°C : avec des échéances allant de 3 jusqu'à 180 jours. Les meilleurs résultats du comportement mécanique des mortiers confectionnés ont été observés à des températures de cure de 20°C et 40°C. Avec une accélération de l'activité pouzzolanique à 90 jours pour la cure à 40°C et 180 jours à 20°C le développement des résistances à la compression est relativement supérieur à celui des résistances du mortier témoin.

Une autre partie portera essentiellement sur l'analyse de cycle de vie (ACV) des sédiments dragués dans son environnement depuis l'extraction des sédiments jusqu'au traitement des déchets. Les résultats de cette étude d'analyse du cycle de vie du nouveau processus d'industrialisation des sédiments de dragage montrent que le potentiel de réchauffement climatique (GES) est de 0,246 t éq de CO₂/t de sédiments, le potentiel d'acidification est de $4,55 \times 10^{-4}$ t de SO₂ éq/t de sédiments, le potentiel d'ozone troposphérique est de $9,97 \times 10^{-4}$ t de TOPP éq/t de sédiments et La dépense d'énergie cumulée est de 2506,75 en MJ/t de sédiments. L'indicateur du potentiel de changement climatique pour les ciments à base de 0%, 5%, 15 et 25% de sédiments calcinés émettent respectivement 935,10 kg CO₂ éq/T, 901,73 kg CO₂ éq/T, 835 kg CO₂ éq/T et 768,29 kg CO₂/T. Soit un gain de 3, 57%, 10,70% et 17,84% pour les ciments à base de 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés. Les résultats de cette étude sont comparés par rapport à d'autres études effectuées en Algérie. L'évaluation environnementale du processus expérimentale a montré que les mortiers, les pâtes et les ciments avec un fort taux de substitution offrent les meilleures performances environnementales, sur les catégories santé humaine, qualité des écosystèmes, changement climatique et ressources.

Mots clés : Sédiments de dragage, Valorisation, Eco-mortiers, Températures de cure, Résistance mécanique, Analyse du cycle de vie (ACV), Industrialisation.

ABSTRACT

This research was carried out with the aim of valorizing the value of this dredged material. Two parts have been planned: The first part consists in optimizing and characterizing the pozzolanic reaction an eco-mortar based on partial substitution of calcined dredging sediments with cement; by characterizing their physical performance, chemical, rheological and mechanical. The influence of the curing temperature on the different types of mortars based on partial substitution of dredged sediments will be highlighted in this study. different types of mortars will be brought at several low dry cure temperatures 10, 20 and 40°C: with maturities ranging from 3 to 180 days. The best results of the mechanical behavior of the mortars have been observed at curing temperatures of 20°C and 40°C. With an acceleration of pozzolanic activity at 90 days for the cure at 40 ° C and 180 days at 20°C the development of compressive strength is relatively higher than that of the resistances of the control mortar.

Another part focus on the life cycle assessment (LCA) of dredged sediments valorization. The results of this life cycle analysis study of the new industrialization process of dredged sediments show that climate change potential (GHG) is 0,246 ton of CO₂eq/t of sediments, acidification potential is $4,55 \times 10^{-4}$ ton of SO₂ eq/t of sediments, the tropospheric ozone precursor potential is $9,97 \times 10^{-4}$ ton of TOPP eq/t of sediments and the cumulative energy and exergy demand is 2506,75 in MJ/t of sediments.

The climate change potential indicator for cements based on 0%, 5%, 15 and 25% calcined sediments emits respectively 935,10 kg CO₂ eq/T, 901,73 kg CO₂ eq/T, 835 kg CO₂ eq/T and 768,29 kg CO₂ eq/T. Which represents a saving of 3, 57%, 10,70% and 17,84% for cements based on 5%, 15% and 25% calcined sediment. These values are compared to others carried out in Algeria. The environmental life cycle assessment of the experimental process showed that the mortars, pastes and cements with a high substitution rate offer the best environmental performance, on the categories of human health, ecosystem quality, climate change and resources.

Keywords: Dredged sediments, Valorization, Eco-mortars, Cure temperatures, Mechanical strength, Life Cycle Assessment (LCA), Dredged sediments, Industrialization.

I NTRODUCTION

Situé dans une zone géographique au climat semi désertique, notre pays bénéficie d'une pluviométrie très faible. Les besoins en eau d'une population de plus en plus nombreux, d'une économie en plein essor et d'un souci de développement gigantesque sont très importants. Des programmes de construction de barrages à travers tout le territoire national ont été entrepris. Malheureusement ces réalisations voient leurs capacités de retenue d'eau diminuer d'année en année. Il fallait donc penser à les débarrasser des sédiments qui séjournaient au fond du bassin. Le dragage constitue une activité vitale pour l'exploitation des barrages. Cette opération est une phase importante dans la récupération et la préservation des volumes utiles de stockage des barrages. Mais le devenir des quantités importantes de sédiments récupérés constitue un enjeu environnemental et économique de taille. Les sédiments dragués sont alors déposés aux alentours du barrage. Les déblais forment des monticules qui défigurent le paysage, détériorent le milieu ; occupent un espace de plusieurs hectares qui prive les habitants riverains pauvres des ressources habituelles et polluent l'environnement immédiat.

Des études ont été faites à travers le monde pour essayer de tirer profit de ces déblais de dragage des barrages. L'étude envisagée vise la même optique et la recherche du moindre impact sur l'environnement elle s'attachera à approfondir les moyens de bien gérer les sédiments résultant des travaux de dragage ; à rechercher les possibles contaminations et à proposer des solutions.

Plusieurs études de recherches récentes ont été publiées sur la valorisation des sédiments issus du dragage des barrages. Elles ont été menées dans le domaine de caractérisation physico-chimique, mécanique et durabilité. Elles ont démontré la possibilité d'utiliser ces sédiments en tant que matière première dans le domaine de génie civil, et spécialement en substitution partielle au ciment. Les matériaux à base de ces substitution, partielles (Pates, mortiers, béton ordinaire, béton auto plaçant) permettront de consommer ces d déblais de dragage, ainsi qu'une amélioration des performances et caractéristiques de ces types de matériaux.

Dans cette étude les performances techniques des sédiments après traitement thermique et l'évaluation environnementale par l'analyse du cycle de vie dans le but de quantifier le gain écologique de la substitution de ces sédiments dans le ciment. Le comportement rhéologique des coulis et mortiers et l'influence de la température de cure sur les différents types de mortiers à base de substitution partielle des sédiments de dragage (0, 5, 15, 25%) sera mise en évidence dans cette étude.

Une partie portera essentiellement sur l'analyse de cycle de vie (ACV) des sédiments dragués dans son environnement depuis l'extraction des sédiments jusqu'au traitement des déchets. Cet outil s'inscrit dans une démarche de management environnemental, pour comparer les charges environnementales des différentes étapes du cycle de vie du même produit ; et en déduire quelle étape est la plus impactante en termes environnementaux. On se focalisera sur les impacts environnementaux en quantifiant les consommations énergétiques et les ressources naturelles ainsi que les émissions vers l'atmosphère. A la fin on essayera de proposer des solutions pour industrialiser ces sédiments dragués dans le domaine de la construction des bâtiments.

Ce travail se présentera comme suit :

- **La première partie :** Est consacrée à l'étude bibliographique. Cette étude est composée de trois chapitres. Dans le premier, nous présentons des généralités sur les sédiments ; leurs origines et nous avons abordé les différents barrages qui existent en Algérie ainsi que l'état et l'évolution de leur envasement et les opérations de dragage en cours. Dans le deuxième chapitre nous avons évoqué les différentes recherches publiées sur la valorisation des sédiments de dragage, l'utilisation dans le domaine de génie civil et spécialement en substitution du ciment dans la fabrication des nouveaux bétons. Le dernier chapitre concerne les études d'ACV des sédiments de dragage qui ont été réalisées à travers le monde et spécialement le volet qui traite l'évaluation environnementale des sédiments contaminés.

- **La deuxième partie :** s'attachera à décrire les matériaux utilisés : mode d'obtention, composition chimique, morphologie...etc. ainsi que le programme expérimental adopté pour les différentes étapes de cette étude. Dans le dernier chapitre nous détaillerons l'influence des sédiments sur les différentes caractéristiques des pâtes, coulis, mortiers : formulation de la matrice cimentaire, propriétés mécaniques par rapport aux différentes températures de cures sur les différents types de mortiers à base de substitution des sédiments de dragage. Les différents types de mortiers seront portés à plusieurs basses températures de cure sèche 10°, 20° et 40°C : avec des échéances allant de 01 jusqu'à 180 jours. Nous détaillerons

l'hydratation des pâtes et mortiers de ciment en présence des sédiments. Enfin, une interprétation globale s'appuie sur l'observation en microscope électronique.

▪ **La troisième partie :** Nous avons proposé un processus d'industrialisation des sédiments de dragage en substitution du ciment dans le béton. Plusieurs scénarios afin de les comparer pour à la fin pouvoir décider quelle sera la meilleure hypothèse pouvant respecter l'environnement et veiller à un développement durable. L'étape suivante vise à modéliser les différents scénarios de processus de fabrication des sédiments au niveau du logiciel d'ACV (GEMIS 4.95 et SimaPro 8.5.2.0), et faire la comparaison des impacts sur l'environnement d'un modèle d'industrialisation des sédiments de dragage en Algérie, et une comparaison environnementale des matériaux utilisés dans la formulation des matrices cimentaires étudiées (ciments, pâtes, mortiers).

Enfin, une conclusion générale à travers laquelle les principaux résultats seront mis en évidence et les perspectives des futurs travaux envisageables.

PARTIE

-Recherches bibliographiques-

1

CHAPITRE 1

SEDIMENTS ET ENVASEMENT DES
BARRAGES EN ALGERIE

4 à 22

CHAPITRE 2

VALORISATION DES SEDIMENTS
DE DRAGAGE

23 à 52

CHAPITRE 3

ANALYSE DU CYCLE DE VIE : OUTIL
D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE

53 à 71

CHAPITRE

SEDIMENTS ET ENVASEMENT DES

BARRAGES EN ALGERIE

1

1.1	INTRODUCTION	4
1.2	GENERALITES SUR LES SEDIMENTS	5
1.2.1	Les sédiments	5
1.2.2	Constitution et composition minérale des sédiments	6
1.2.3	Granulométrie des sédiments.....	7
1.3	EVOLUTION DE L'ENVASEMENT DES BARRAGES EN ALGERIE.....	9
1.3.1	Etat envasement en Algérie	9
1.3.2	Phénomène de l'envasement	14
1.3.3	L'envasement en quelques chiffres	15
1.3.4	Problèmes de l'envasement des barrages	16
1.3.5	Processus de l'envasement	20
1.3.6	Moyens de lutte contre l'envasement	22
1.4	CONCLUSION.....	22

1.1 INTRODUCTION

La sédimentation dans les barrages est un phénomène naturel. Les sédiments ont les uns une origine endogène provenant de la production du milieu local ; les autres une origine exogène issue d'un apport de matières de l'érosion des sols ; et du ruissellement. Ces particules se déposent au fond du bassin du barrage où se produit la sédimentation à travers le temps. Une étude de leurs caractères s'impose : classement granulométrique ; caractéristiques ; composition minérale ; teneur en eau et en matière organique.

En même temps l'eau devient de plus en plus rare. Pour cela elle doit être davantage maîtrisée à travers tout le territoire national. Malheureusement le phénomène de l'érosion hydraulique met en danger ces potentialités. L'Algérie a investi des moyens colossaux pour alimenter en eau potable sa population et permettre l'irrigation des terres agricoles. De grands efforts ont été déployés pour assurer l'autosuffisance en eau potable et fournir l'eau aux industriels. Des réalisations de barrages à travers tout le territoire national ; de toutes dimensions, ont vu et

vont pouvoir voir le jour. Des efforts sont faits à travers le monde pour valoriser les sédiments issus du dragage des barrages. Il s'agit d'un problème mondial. Cela nous amène à réfléchir pour sauver les différentes réalisations.

1.2 GENERALITES SUR LES SEDIMENTS

1.2.1 Les sédiments

1.2.1.1 Définition

Les sédiments sont des particules minérales ou organiques déposées par l'eau, le vent ou la glace, qui proviennent de l'usure des continents, c'est-à-dire de la destruction de roches ou d'êtres vivants (Beauchamp J, 2005). La destruction se fait par des mécanismes physiques produisant la fragmentation des matériaux et des réactions chimiques donnant des solutions de lessivage. Parmi les particules minérales on peut citer les produits de l'érosion des berges et du lit lors du ruissellement après les fortes pluies, les poussières atmosphériques, les rejets industriels. Les matières organiques peuvent provenir de la biomasse, des déblais d'origines d'animaux ou de végétaux, des eaux usées domestiques, des élevages(bétail), du trafic routier et des traversées du lit par les engins forestiers (voir Figure 1.1).

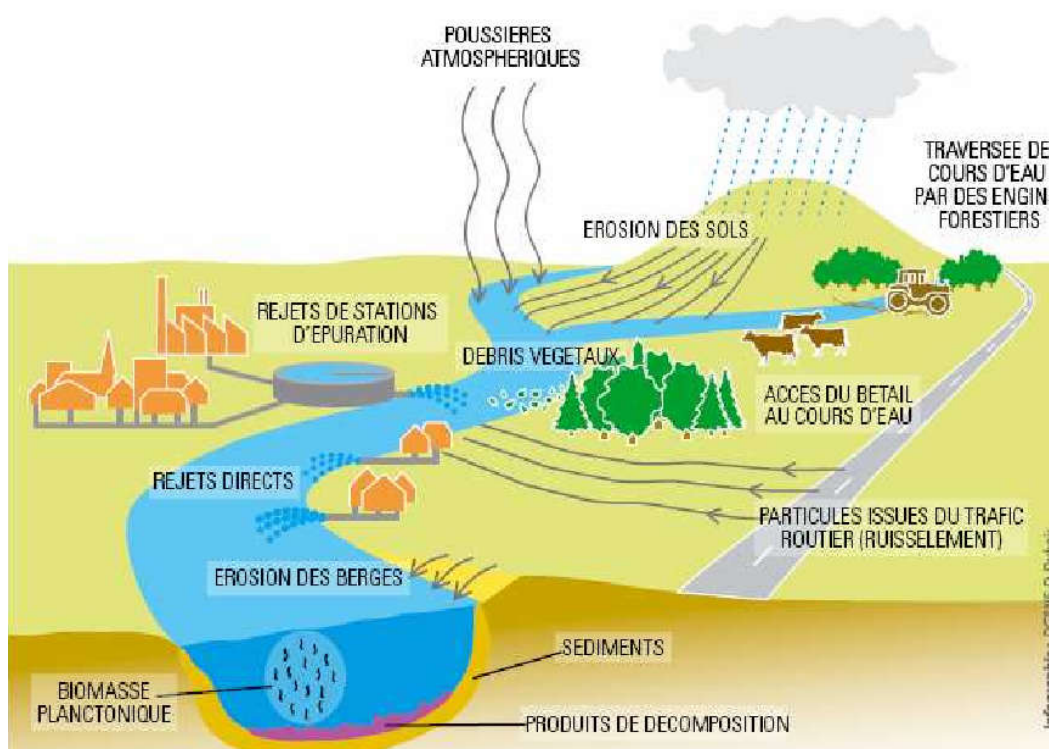


Figure 1. 1 : Origine des sédiments dans l'environnement aquatique (Maes E).

On distingue deux origines des sédiments :

- **Origine endogène** : les particules proviennent de la production autochtone du milieu. Il s'agit de débris de macrophytes comme les plantes aquatiques, les cadavres de microphytes et d'animaux (Shneider G, 2001).
- **Origine exogène** : il s'agit des particules qui sont issues du ruissellement des eaux ou bien transportées par les vents. D'origines naturelles ou anthropiques, elles proviennent de l'érosion des sols, de la décomposition de matière végétale, de l'apport de matière en suspension, matière organique, de nutriment ou de micropolluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques (Bertreau et al., 1993).

Plusieurs aspects permettent de décrire un sédiment : sa constitution et composition minéralogique, sa granulométrie, ses teneurs en eau et en matière organique. Les sédiments fluviaux des zones d'eau calmes contiennent en majorité les éléments fins (vases, limons et sables) (Shneider G, 2001).

1.2.2 Constitution et composition minérale des sédiments

Un sédiment se caractérise essentiellement par 4 éléments principaux (Agence de l'eau, 2002) :

1. La matrice minérale (quartz, feldspaths ou carbonates).
2. La fraction argileuse (kaolinite, illite ou montmorillonites).
3. La fraction organique (débris végétaux, micro-organismes, acides fulviques et humiques).
4. Une certaine quantité d'eau, présente sous différentes formes.

Les argiles sont des silicates d'aluminium hydratés qui présentent une structure cristalline en feuillets, d'où leur nom de phyllites. Ils appartiennent, comme les micas, au groupe des phyllosilicates. Chaque cristal ou phyllite, dont l'épaisseur se mesure en micromètres, est composé de quelques centaines de feuillets empilés, qui se mesurent en nanomètres. Chaque feuillet est composé de deux, trois ou quatre couches planes associées. De ses variations viennent les différentes espèces de minéraux argileux, parmi elles (Chikouche M, 2008) :

1.2.2.1 Les illites

Ce minéral est le plus répandu des minéraux argileux dans les sédiments et les sols. Il est construit sur le modèle du mica blanc, mais avec une structure plus désordonnée et moins de potassium dans les espaces interfoliaires. Il est très fréquent dans une foule de roches détritiques comme matrice ou comme ciment (Lucas et al., 1976).

1.2.2.2 Les montmorillonites

Les montmorillonites peuvent être détritiques, par héritage des sols ou des sédiments plus anciens qui les contiennent. Elles peuvent être néoformées en milieu alcalin à partir des autres silicates ou à partir des verres volcaniques. Elles ont une foule d'applications économiques, dans les industries chimiques, les boues de forage, etc ([Lucas et al., 1976](#)).

1.2.2.3 Le kaolin

D'origine chinoise, «Kaoling», La kaolinite se forme comme produit résiduel météorologique ou comme minéral sédimentaire, dans les sols. Elle est formée dans les conditions de pression et de température de la surface de la terre (25–30°C et de pression atmosphérique). Associe dans son feuillet, une couche de tétraèdres à cœur de silicium et une couche d'octaèdres à cœur d'aluminium. La distance de la surface d'un feuillet à l'autre est de 0,74 nm. Elle appartient au système triclinique ([Soro, 2003](#)).

En ce qui concerne la matière organique, on retrouve dans les sédiments tous les composés organiques naturels, issus des végétaux, des algues et des animaux, ou biosynthétisés par la microflore, ainsi que les colloïdes humiques. La décomposition de ces matières est très lente (plusieurs centaines d'années) et combine de très fortes propriétés tensioactives et complexantes. Les substances humiques colorent la vase en noir et interagissent avec la partie minérale, provoquant des agglomérations. En général, la proportion massique de matière organique est de l'ordre de 2 à 10 % pour les sédiments des cours d'eau et elle est constituée à 60% de composés humiques ([Shneider G, 2001](#)).

Enfin, la nature de l'eau contenue dans les vases, appelée « eau interstitielle » afin de la différencier de la colonne d'eau qui se trouve au-dessus, peut être répartie en 4 catégories ([Scordia, 2008](#)):

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

1.2.3 Granulométrie des sédiments

La répartition des sédiments dans un milieu aquatique se fait en fonction de la taille des particules. Les particules de dimensions importantes restent plutôt en amont alors que celles de plus faibles dimensions se retrouveront en aval. Selon ([Shneider G, 2001](#)) les sédiments de dragage peuvent comporter plusieurs classes granulométriques couramment utilisées. Elles sont présentées dans le tableau 1.1 :

Tableau 1. 1 : Classement granulométrique des sédiments (Shneider G, 2001).

Taille	Dénomination
> 20 cm	Blocs
2 cm à 20 cm	Galets et cailloux
2 mm à 2 cm	Gravier
20 μ m à 20 mm	Sables (grossiers et fins)
2 μ m à 20 μ m	Limons (silt)
< 2 μ m	Vase, boues argileuses

Une vase est généralement constituée des 3 dernières classes : sables, limons et argiles. Précisons que le terme d'argile utilisé en minéralogie n'a pas le même sens que celui utilisé en granulométrie. Ici, c'est un critère uniquement basé sur la taille des particules et non sur leur composition chimique et minéralogique. La proportion de sables, limons et argiles d'un sédiment peut varier très fortement en fonction de leur provenance géographique, du lieu de prélèvement (portuaire, estuarien ou fluvial), de la nature de la matière solide, etc. Cependant, la fraction argileuse est généralement prédominante (Boucard, 2006). Pour classer les matériaux fins dont la taille des particules est inférieure à 2 mm, les géotechniciens utilisent le diagramme triangulaire des sols fins. Ce type de diagramme est particulièrement adapté aux sédiments (Bonnet C, 2006).

L'identification des sédiments est utile servant de procédé à leur valorisation. La caractérisation physico-chimique et minéralogique permet de définir l'aspect physique et les principaux minéraux présents. Le premier traitement avant l'étude pourrait être le séchage naturel dans un bassin de décantation. On sépare ensuite les particules les plus fines des plus grosses. La détermination de la granulométrie est réalisée à l'aide de deux méthodes : La granulométrie laser et la sédimentation par densimètre associée au tamisage. On établit une classification triangulaire des sédiments % argile (<2 μ m) - % sable >63 μ m - % silts (sable très fin). Le sédiment peut être classé comme matériau limoneux, ou comme catégorie du limon silteux selon le diagramme triangulaire des classifications des sols de la figure 1.2. Globalement on peut dire que les sédiments se composent d'une importante fraction silteuse d'environ 60% et d'au moins 12% d'éléments inférieurs à 2 μ m.

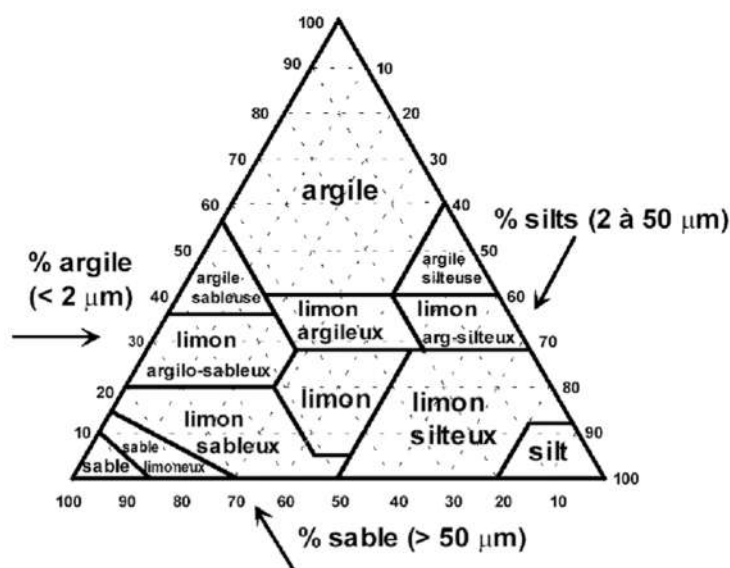


Figure 1. 2 : Diagramme triangulaire utilisé pour les sols fins (Bonnet C, 2006).

1.3 EVOLUTION DE L'ENVASEMENT DES BARRAGES EN ALGERIE

1.3.1 Etat envasement en Algérie

Dans le tableau 1.2, sont données les capacités des barrages Algériens ANBT (ANBT, 2015).

Tableau 1. 2 : Capacité des barrages Algériens ANBT (ANBT, 2015).

	Barrage	Wilaya	Année de mise à l'eau	Capacité Initiale Hm ³
1	AIN ZADA	BBA	1985	125
2	KOUDIAT MEDOUAR	BATNA	2001	69,1
3	HEMMAM DEBAGH	GUELMA	1987	220
4	GUENITRA	SKIKDA	1984	125
5	ZIT EMBA	SKIKDA	2002	120
6	BENI ZID	SKIKDA	2000	40
7	ZARDEZAS	SKIKDA	1945-1974	31
8	KSOB	MSILA	1940-1976	29,5
9	BENI HAROUN	MILA	2003	960
10	HEMMAM GROUZ	MILA	1987	45
11	CHEFFIA	EL TAREF	1965	171,96
12	MEXA	EL TAREF	1998	47

13	OUED CHAREF	SOUK AHRAS	1995	157
14	AIN DALIA	SOUK AHRAS	1988	82
15	AL AGRAM	JIJEL	2002	33,9
16	FOUM EL GHORZA	BISKRA	1950	47
17	FONTAINE DES GAZELLES	BISKRA	2000	55,5
18	BABAR	KHANCHELA	1995	41
19	FOUM EL GUEISS	KHANCHELA	1938-1969-2005	3
20	OUED ATHMANIA	MILA		33,25
21	KISSIR	JIJEL		68
22	BOUSSIABA	JIJEL		120
23	BOUGOUS	EL TAREF		66
24	BENI-AMRANE	BOUMERDES	1988-2003	16
25	BOUKOURDANE	TIPAZA	1992	97
26	BOUROUMI	AIN DEFLA	1985	188
27	HAMIZ	BOUMERDES	1897-1935	21
28	KEDDARA	BOUMERDES	1986	145,6
29	LADRAT	MEDEA	1990	10
30	LEKHAL	BOUIRA	1985	30
31	MEURAD	TIPAZA	1861	0,9
32	NADOR	TIPAZA	2003	Prise
33	TAKSEBT	TIZI-OUZOU	2001	175
34	TICHY HAF	BEJAIA	2007	80
35	TILESDIT	BOUIRA	2004	165,55
36	K-ACCERDOUNE	BOUIRA		640
37	CHIFFA	MEDEA		Transfert
38	HARBIL	MEDEA	1988	Transfert
39	BAKHADDA	TIARET	1936-1959	56
40	BOUGHZOUL	MEDEA	1934	55
41	COLONNEL BOUGARA	TISSEMSILT	1989	13
42	DAHMOUNI	TIARET	1987	41
43	DEURDEUR	AIN-DEFLA	1984	115
44	GHRIB	AIN DEFLA	1939	280
45	HARREZA	AIN DEFLA	1984	70
46	KOUDIAT ROSFA	TISSEMSILT	2004	73

47	OUED FODDA	CHLEF	1932	228
48	OULED MELLOUK	AIN DEFLA	2004	127
49	SIDI M'HAMED BEN TAIBA	AIN DEFLA	2005	75
50	SIDI YAKOUB	CHLEF	1985	280
51	SIDI M'HAMED BEN AOUDA	RELIZANE	1977	241
52	GARGAR	RELIZANE	1988	450
53	MERDJA SIDI ABED	RELIZANE	1984	58
54	KERRADA	MOSTAGANEM		65
55	B-BOUKADIR	CHLEF		
56	KHMIS	CHLEF		Transfert
57	MAO			Prise Chlef
58	BENI BAHDEL	TLEMCEN	1946	63
59	H-BOUGHRARA	TLEMCEN	1999	177
60	BOU-HANIFIA	MASCARA	1940-1990	73
61	BREZINA	EL BAYADH	2000	122,5
62	CHEURFAS II	MASCARA	1992	83,1
63	DJORF TORBA	BECHAR	1969	350
64	FERGOUG	MASCARA	1970	18
65	KRAMIS	MOSTAGANEM	2005	45,38
66	MEFROUCH	TLEMCEN	1963 SURELEVE	15
67	OUIZERT	MASCARA	1986	100
68	SARNO	SIDI BEL ABBES	1954	22
69	SIKKAK	TLEMCEN	2004	27
70	SIDI ABDELLI	TLEMCEN	1988	110

Le tableau montre que l'Algérie dispose actuellement de 72 barrages. La rareté des ressources en eau est importante. La quantité d'eau distribuée par an à la population est de 3,6 milliards de m³. Elle est puisée à hauteur de 51% des forages, de 35% des barrages et de 14% des stations de dessalement. La place occupée par les barrages est importante. Les transports des sédiments dans le réseau hydrographique et leur dépôt dans les retenues posent des problèmes d'exploitation. La capacité se réduit progressivement au fur et à mesure que les sédiments se déposent. De plus l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile, L'environnement immédiat subit souvent des dommages considérables. Dans le tableau 1.3, sont donnés les taux envasement moyen annuel des barrages Algériens ANBT (ANBT, 2015).

Tableau 1.3 : Envasement moyen annuel des barrages Algériens ANBT (ANBT, 2015).

	Barrage	Wilaya	Année de mise à l'eau	Cap Init	Levé 2014 Hm ³	Taux Envas Hm ³ /an	(%) Envasement
1	AIN ZADA	BBA	1985	125	121,4	0,5	2,88
2	KOUDIAT MEDOUAR	BATNA	2001	69,1	74,32	0,023	-7,55
3	HEMMAM DEBAGH	GUELMA	1987	220	184,35	0,53	16,20
4	GUENITRA	SIKDA	1984	125	117,82	0,13	5,74
5	ZIT EMBA	SIKDA	2002	120	116,59	0,24	2,84
6	BENI ZID	SIKDA	2000	40	39,39	0,52	1,53
7	ZARDEZAS	SIKDA	1945-1974	31	16,86	0,4	45,61
8	KSOB	MSILA	1940-1976	29,5	11,83	0,7	59,90
9	BENI HAROUN	MILA	2003	960	880	6	8,33
10	HEMMAM GROUZ	MILA	1987	45	40,15	0,4	10,78
11	CHEFFIA	EL TAREF	1965	171,96	158,83	0,17	7,64
12	MEXA	EL TAREF	1998	47	30,27	0,11	35,60
13	OUED CHAREF	SOUK AHRAS	1995	157	152,65	0,52	2,77
14	AIN DALIA	SOUK AHRAS	1988	82	76,08	0,75	7,22
15	AL AGRAM	IJEL	2002	33,9	33,04	0,1	2,54
16	FOUM EL GHORZA	BISKRA	1950	47	12,9	0,8	72,55
17	FONTAINE DES GAZELLES	BISKRA	2000	55,5	54,74	0,3	1,37
18	BABAR	KHANCHELA	1995	41	38,01	0,68	7,29
19	FOUM EL GUEISS	KHANCHELA	1938-1969-2005	3	1,6	0,43	46,67
20	OUED ATHMANIA	MILA		33,25	31,7		4,66
21	KISSIR	IJEL		68	59,92		11,88
22	BOUSSIABA	IJEL		120	109,37		8,86
23	BOUGOUS	EL TAREF		66	60,55		8,26
24	BENI-AMRANE	BOUMERDES	1988-2003	16	11,85	4,1	25,94
25	BOUKOURDANE	TIPAZA	1992	97	105	0,21	-8,25
26	BOUROUMI	AIN DEFLA	1985	188	181,86	0,8	3,27
27	HAMIZ	BOUMERDES	1897-1935	21	15,53	0,35	26,05
28	KEDDARA	BOUMERDES	1986	145,6	142,39	0,05	2,20
29	LADRAT	MEDEA	1990	10	8,47	0,02	15,30
30	LEKHAL	BOUIRA	1985	30	27,16	0,17	9,47
31	MEURAD	TIPAZA	1861	0,9	0,2	0,005	77,78
32	NADOR	TIPAZA	2003	Prise		6	
33	TAKSEBT	TIZI-OUZOU	2001	175	181,02	0,27	-3,44
34	TICHY HAF	BEJAIA	2007	80	77,26	4,7	3,42
35	TILESDIT	BOUIRA	2004	165,55	165,55	0,69	0,00

36	K- ACCERDOUNE	BOUIRA		640	618,54		3,35
37	CHIFFA	MEDEA		Transfert			
38	HARBIL	MEDEA	1988	Transfert			
39	BAKHADDA	TIARET	1936-1959	56	39,94	0,27	28,68
40	BOUGHZOUL	MEDEA	1934	55	20,27	0,66	63,15
41	COLONNEL BOUGARA	TISSEMSILT	1989	13	11,32	0,3	12,92
42	DAHMOUNI	TIARET	1987	41	39,52	0,4	3,61
43	DEURDEUR	AIN-DEFLA	1984	115	105,12	0,83	8,59
44	GHRIB	AIN DEFLA	1939	280	116,32	3,2	58,46
45	HARREZA	AIN DEFLA	1984	70	76,65	0,28	-9,50
46	KOUDIAT ROSFA	TISSEMSILT	2004	73	66,04	1,15	9,53
47	OUED FODDA	CHLEF	1932	228	102,85	2,66	54,89
48	OULED MELLOUK	AIN DEFLA	2004	127	119,4	1,4	5,98
49	SIDI M'HAMED BEN TAIBA	AIN DEFLA	2005	75	70,22	0,4	6,37
50	SIDI YAKOUB	CHLEF	1985	280	252,85	0,17	9,70
51	SIDI M'HAMED BEN AOUDA	RELIZANE	1977	241	153,71	1	36,22
52	GARGAR	RELIZANE	1988	450	358,28	4,5	20,38
53	MERDJA SIDI ABED	RELIZANE	1984	58	44,86	0,59	22,66
54	KERRADA	MOSTAGANEM		65	65		0,00
55	B-BOUKADIR	CHLEF					
56	KHMIS	CHLEF		Transfert			
57	MAO			Prise Chlef			
58	BENI BAHDEL	TLEMCEN	1946	63	54,63	0,2	13,29
59	H-BOUGHRARA	TLEMCEN	1999	177	175,45	0,43	0,88
60	BOU-HANIFIA	MASCARA	1940-1990	73	34,51	0,73	52,73
61	BREZINA	EL BAYADH	2000	122,5	108,47	1,2	11,45
62	CHEURFAS II	MASCARA	1992	83,1	70,21	0,36	15,51
63	DJORF TORBA	BECHAR	1969	350	260,25	1,3	25,64
64	FERGOUG	MASCARA	1970	18	1,02	1,5	94,33
65	KRAMIS	MOSTAGANEM	2005	45,38	41,36	0,55	8,86
66	MEFROUCH	TLEMCEN	1963 SURELEVE	15	14,99	0,12	0,07
67	OUIZERT	MASCARA	1986	100	93,91	0,3	6,09
68	SARNO	SIDI BEL ABBES	1954	22	21,25	0,12	3,41
69	SIKKAK	TLEMCEN	2004	27	24,09	0,11	10,78
70	SIDI ABDELLI	TLEMCEN	1988	110	106,61	0,18	3,08

Le tableau montre la forte variation de l'envasement d'un barrage à l'autre en 2014. Avec un climat alternant années sèches et années humides et des pluies d'automne intenses

destructives pour les sols, de l'ordre de $100\text{t/Km}^2/\text{an}$. Une importante quantité de matériaux solides est transportée par les cours d'eau jusqu'aux réservoirs des barrages, menacés par le phénomène de l'envasement (de l'ordre de $0,5\%$ par an) ; Réduisant les disponibilités en eau potable et l'eau pour l'irrigation.

1.3.2 Phénomène de l'envasement

Le taux de sédimentation est un problème alarmant, Il touche particulièrement les pays du Maghreb. Il ne cesse de s'aggraver au fur et à mesure du temps, à cause de la forte érosion du bassin versant pendant les périodes de crues et lors des grands lâchers. L'Algérie dispose de 72 grands barrages, repartis selon la Figure 1.3, d'une capacité totale de 7692,24 millions m^3 selon les dernières mesures en 2014. Leur envasement est d'environ 1085,94 millions m^3 . Cela représente un pourcentage d'envasement de $14,12\%$ de la capacité totale (ANBT, 2015).

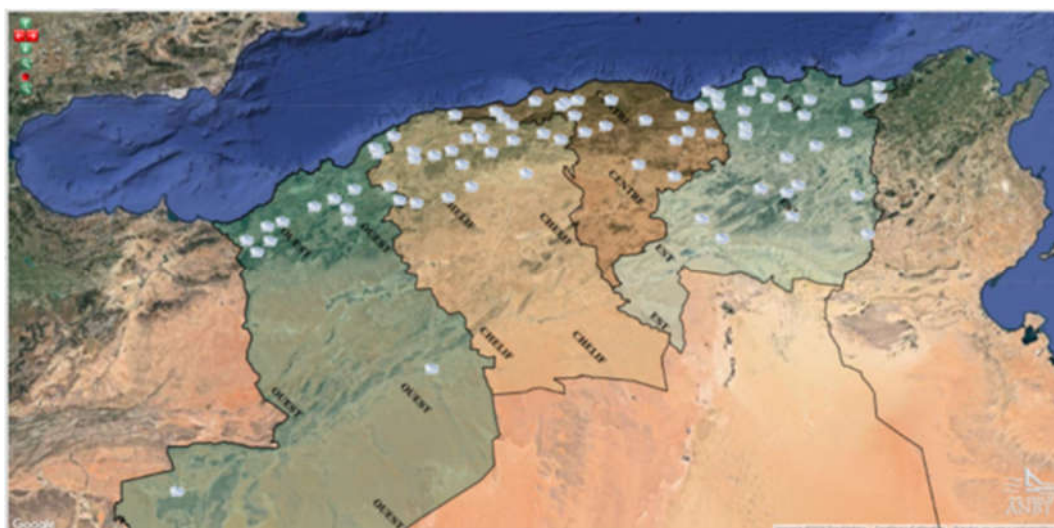


Figure 1. 3 : Les barrages en Algérie (Géoportail, 2018).

Cet envasement, selon des estimations prévisionnelles, atteindrait en 2020 un volume de 1 323,52 millions de m^3 pour les seuls barrages existants, soit 17% de la capacité globale d'emmagasinement. Cela représente une réduction de capacité de $0,65\%/an$. Les mesures de l'évaporation, effectuées sur 39 grands barrages, indiquent une perte annuelle moyenne de 250 millions de m^3 , soit $6,5\%$ de leur capacité maximale. Les pertes par infiltration incontrôlée dans les rives et fondations évaluées pour 22 barrages s'élèvent à 40 millions de m^3/an (Remini et al., 2009). De grandes opérations de dragage essaient d'éliminer une partie des sédiments dès leur arrivée dans les réservoirs des barrages. La troisième campagne de dévasement est en cours depuis 2014. Trois grandes opérations de dragage des barrages de Bouhanifia et Foum El Gherza et K'sob sont en cours. Elles visent à récupérer 21,3 millions m^3 de capacité de stockage dans un délai moyen de 30 mois (ANBT, 2015).

1.3.3 L'envasement en quelques chiffres

La figure 1.4 montre La quantité de sédiments déposée en 2014 est de 1085,94 Millions m³, soit un pourcentage d'envasement de 14,12 % de la capacité totale de 7692,24 Millions m³.

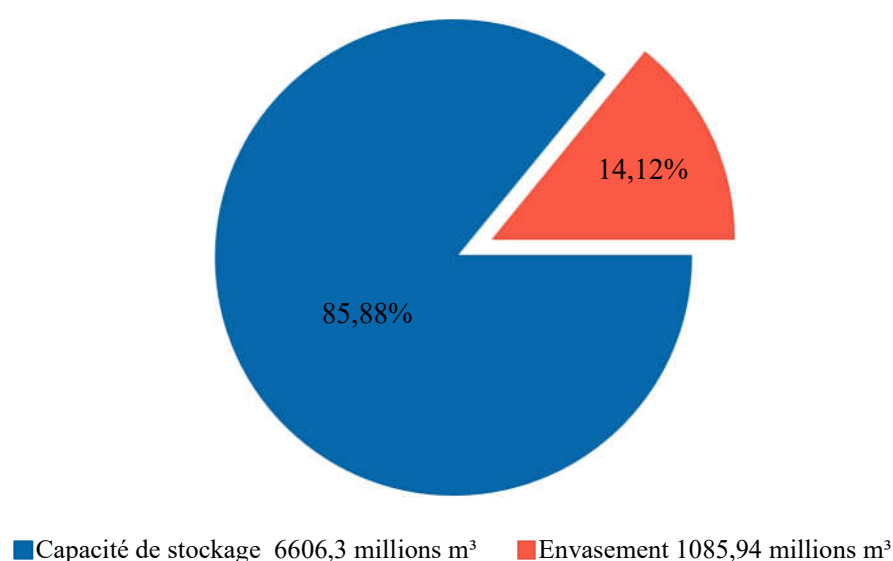


Figure 1. 4 : Pourcentage d'envasement par rapport à la capacité totale des barrages Algériens (ANBT, 2015).

La figure 1.5 montre la forte variation de l'envasement d'un barrage à l'autre, le barrage qui a un pourcentage d'envasement élevé est celui de Fergoug, wilaya de Mascara suivi par Meurad wilaya de Tipaza ; Foug El Ghorza wilaya de Biskara etc....

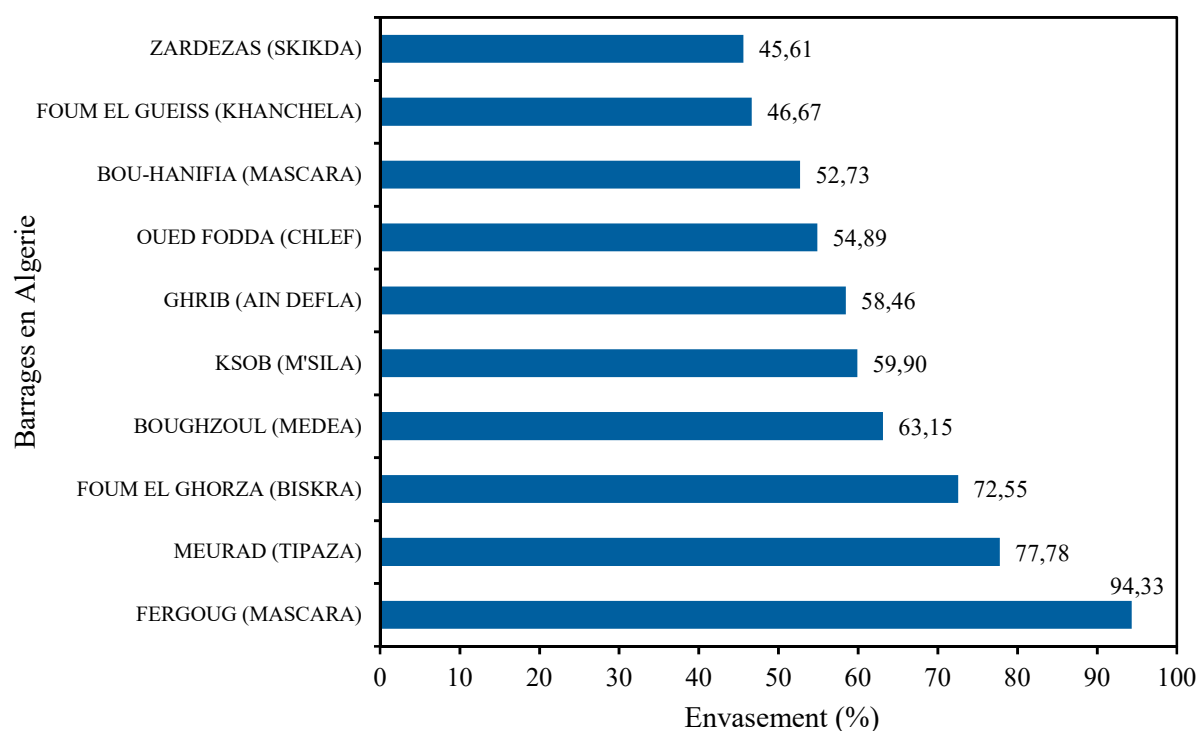


Figure 1. 5: Le classement des 10 plus grands barrages les plus envasés en Algérie (ANBT, 2015).

1.3.4 Problèmes de l'envasement des barrages

L'envasement des retenues des barrages pose de multiples problèmes à la gestion.

1.3.4.1 La réduction de la capacité

Chaque année le fond vaseux évolue et se consolide occupant un volume considérable de la retenue. La quantité de sédiments déposée augmente rapidement et certains barrages risquent de ne plus garantir les quantités d'eau potable et d'irrigation nécessaires. L'évolution dans le temps de la capacité utile des retenues des barrages de Bouhanifia et de Ksob sont un exemple :

Constat de la situation de deux barrages en cours de dragage :

- *Barrage de Bouhanifia (wilaya de Mascara)*
- *Barrage de Ksob (wilaya de M'sila)*

1.3.4.1.1 Le barrage de Bouhanifia :

Il est situé en amont du barrage de Fergoug. En 1934, débutèrent les travaux de sa construction. La mise en eau eut lieu en 1940. Elle visait à régulariser les écoulements de l'oued Hammam vers la retenue de Fergoug, à l'énorme capacité de 18 Millions m^3 à la cote de 100,5m. La superficie du bassin versant de l'oued Hābra est de 7850 Km^2 au niveau du barrage de Bouhanifia, à une altitude de 820 m (Figure 1.6, Tableau 1.4).

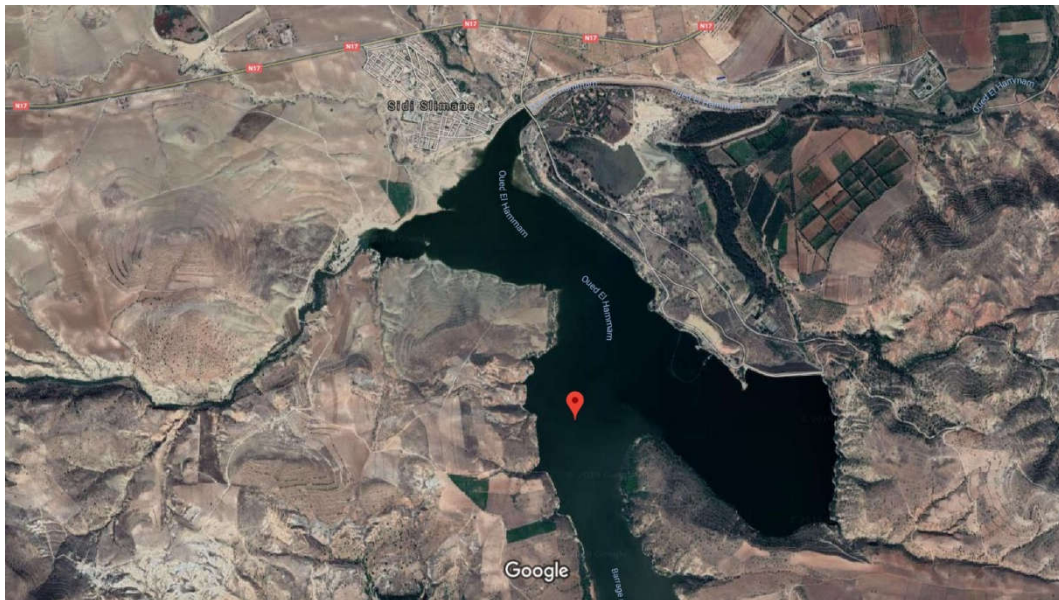


Figure 1. 6 : Situation géographique du barrage de Bouhanifia ([Google Maps, 2019](#)).

Les apports liquides s'élèvent à $138 \times 10^6 m^3$. Les apports solides des écoulements de l'oued el Hammam ont nécessité en 1950 un dragage partiel du réservoir d'une quantité de $6 \times 10^6 m^3$ de

vase. Les apports solides dus à des précipitations violentes sont actuellement de l'ordre de $0,38 \times 10^6 \text{ m}^3$. Depuis sa mise en service en 1940, le barrage de Bouhanifia joue le rôle de filtre en retenant les particules grossières et ne laissant passer que les sédiments fins vers la retenue de Fergoug.

Tableau 1. 4 : Le barrage en chiffres (ANBT, 2015).

Année de construction	1934
Année de Mise en eau	1940
Année de surélévation	1972 - 1976
Capacité	29,50 hm ³
Capacité dernier levé (2004)	12,34hm ³
Apport moyen annuel	51,50 hm ³
Envasement annuel	0,70 hm ³ /an
Surface du bassin versant	1 460 km ²
Hauteur	46,00 m
Longueur	280,00 m
Côte retenue Normale (R.N)	604,00 mNGA
Côte Plus Hautes Eaux (P.H.E)	605,50 mNGA
Déversoir à SEUIL LIBRE	850,0 m ³ /s
Vidange de Fond	2 x 65,0 m ³ /s

- **Le constat de la visite du barrage de Bouhanifia**

Suite à notre visite au barrage de Bouhanifia en cours de dévasement où l'ANBT a opté pour un dragage hydraulique estimé le plus économique et le plus pratique nous a permis de constater l'ensemble de l'opération, depuis l'extraction jusqu'au stockage de la vase. Le dragage du barrage se fait par une dragueuse suceuse avec agrégateur CSD 550 par le partenaire Hydro dragage. Le marché consiste à extraire de la retenue du barrage, une quantité de six millions de mètres cubes de vase ($6\,000\,000 \text{ m}^3$) avec un coût de 80 DA/m³. La vase draguée est ensuite transmise par des conduites flottantes (hydrauliques) sur une distance de 274 m et une conduite terrestre de 450 m avec une hauteur de dénivelé de 70 m. Il a été fait appel à deux Boosters pour amener la vase à la zone de rejet (Figure 1.7).

10 bassins ont été réalisés à cet effet ; 04 bassins sont remplis de vase, 03 bassins en cours de remplissage et 03 bassins sont vides. Actuellement le rejet de la vase se fait seulement vers le bassin N°5 ($1\,250\,000 \text{ m}^3$), en système (3×6h). La production journalière de vase est de ($6\,000 \text{ m}^3$ - $8\,000 \text{ m}^3$). (Hydro dragage) (Figure 1.7).

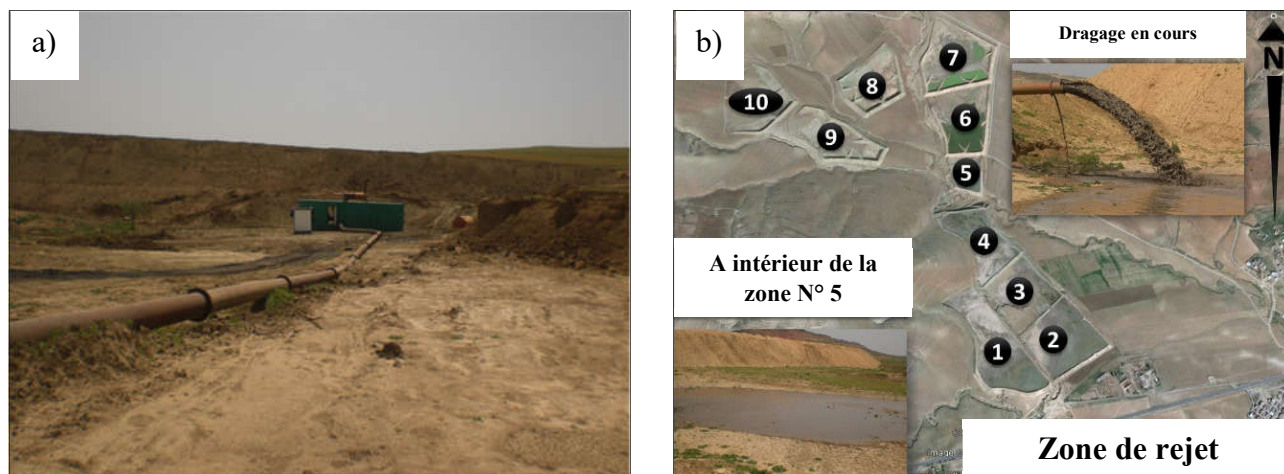


Figure 1. 7 : a) Le booster du barrage de Bouhanifia ; b) Situation géographique des zones de rejet du barrage de Bouhanifia (Google Earth, 2019).

1.3.4.1.2 Le barrage de K'sob :

Le barrage du K'sob sur l'oued du même nom se trouve dans la Wilaya de M'sila à 15 km au nord. Le barrage a été mis en eau en 1940, puis surélevé en 1976. Le bassin versant du barrage est une superficie de 1 460 km² (Figure 1.8, Tableau 1.5).



Figure 1. 8 : Situation géographique du barrage de K'sob (Google Earth, 2019).

La retenue créée par le barrage représentait 29,5 hm³ après surélévation, mais ne représente plus que 12,34 hm³ depuis 2004 (Dernier levé) à cause de l'envasement. Ce barrage est destiné à l'irrigation du périmètre de Bounamoussa et à l'alimentation en eau potable des villes de Annaba et Bouhadjar.

Tableau 1. 5 : Le barrage en chiffres (ANBT, 2015).

Année de construction	1934
Année de Mise en eau	1940
Année de surélévation	1972 - 1976
Capacité	29,50 hm ³
Capacité dernier levé (2004)	12,34hm ³
Apport moyen annuel	51,50 hm ³
Envasement annuel	0,70 hm ³ /an
Surface du bassin versant	1 460 km ²
Hauteur	46,00 m
Longueur	280,00 m
Côte retenue Normale (R.N)	604,00 mNGA
Côte Plus Hautes Eaux (P.H.E)	605,50 mNGA
Déversoir à SEUIL LIBRE	850,0 m ³ /s
Vidange de Fond	2 x 65,0 m ³ /s

- **Le constat de la visite du barrage de K'sob**

Suite à notre visite au barrage de K'sob qui est en cours de dévasement où ils ont opté pour le dragage hydraulique le plus économique et le plus pratique, on a pu assister à l'ensemble de l'opération depuis l'extraction jusqu'au stockage de la vase. Le dragage se fait par une dragueuse suceuse avec des agrégateurs CSD 350 par le partenaire Aldiph ; avec un délai de 30 mois. Le marché consiste à extraire de la retenue du barrage, une quantité de huit millions de mètres cubes de vase (8 000 000 m³) avec un coût de 80DA/m³ (figure 1.9).

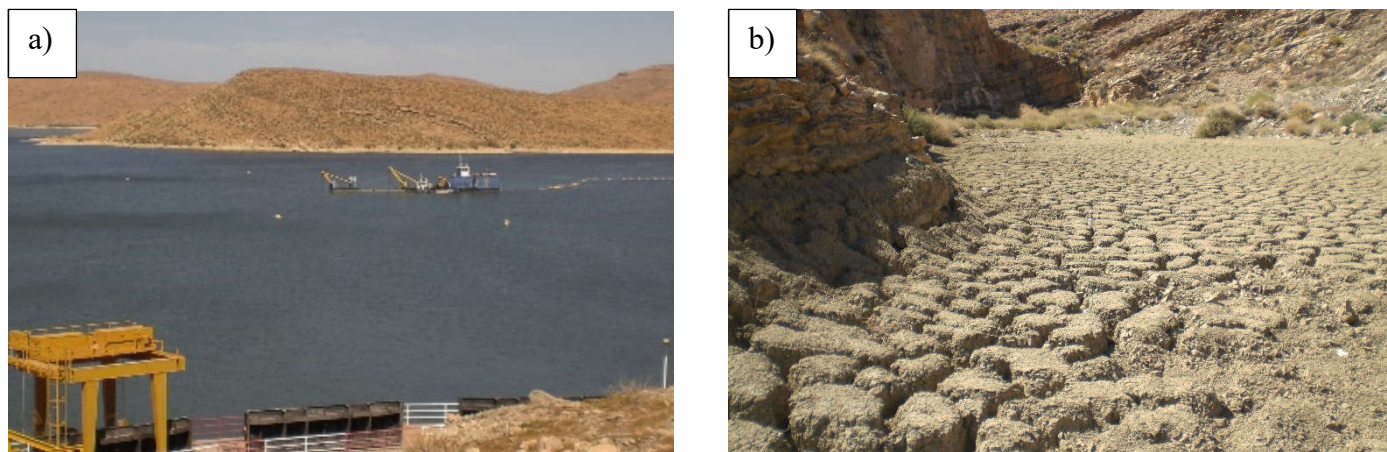


Figure 1. 9 : a) Dragueuse suceuse avec agrégateur CSD 350 du barrage de K'sob ; b) zone de rejet.

1.3.4.2 L'obturation des organes de vidange

L'autre danger présenté par l'envasement est l'obturation des organes de vidange. La vanne de fond bloquée à plusieurs dizaines de mètres dans la vase ne permet plus de le vider.

1.3.4.3 La sécurité de l'ouvrage

L'envasement pose le problème de la stabilité de l'ouvrage. Lorsque la hauteur de la vase augmente, la poussée progresse au carré de la hauteur. Il faut alors diminuer le volume d'eau claire pour éviter la rupture (ex : rupture du barrage de Fergoug en 1927).

1.3.4.4 L'envasement des canaux d'irrigation

Les dépôts des sédiments dans une retenue de barrage destinée à l'irrigation ; par une eau chargée de particules fines qui va se déposer dans les canaux réduisant leurs sections et le débit d'eau. Le réseau d'irrigation se détériore rapidement.

Le curage et le nettoyage des canaux d'envasement deviennent des opérations quotidiennes.

1.3.4.5 Dégradation de la qualité de l'eau

Les sédiments véhiculent des produits chimiques (nitrates, sulfates.....) provenant des apports et éléments fertilisants pour les cultures. Ils se déposent dans les réservoirs et entraînent une dégradation de la qualité de l'eau.

1.3.5 Processus de l'envasement

L'érosion est un phénomène très fréquent en Algérie. Il menace les potentialités en eau et en sol, car il est un des plus importants dans le monde. Pour un bassin versant de 3470 Km², le volume spécifique moyen de transport solide serait de 2000 t/Km²/an avec des précipitations annuelles de 660 mm. Le phénomène se manifeste surtout en période de crues. Les eaux des cours d'eau transportent les sédiments par charriage ou en suspension. Les matières minérales solides sont transportées sur le fond par roulement ou suspension lorsque le débit liquide est très important (figure 1.10).

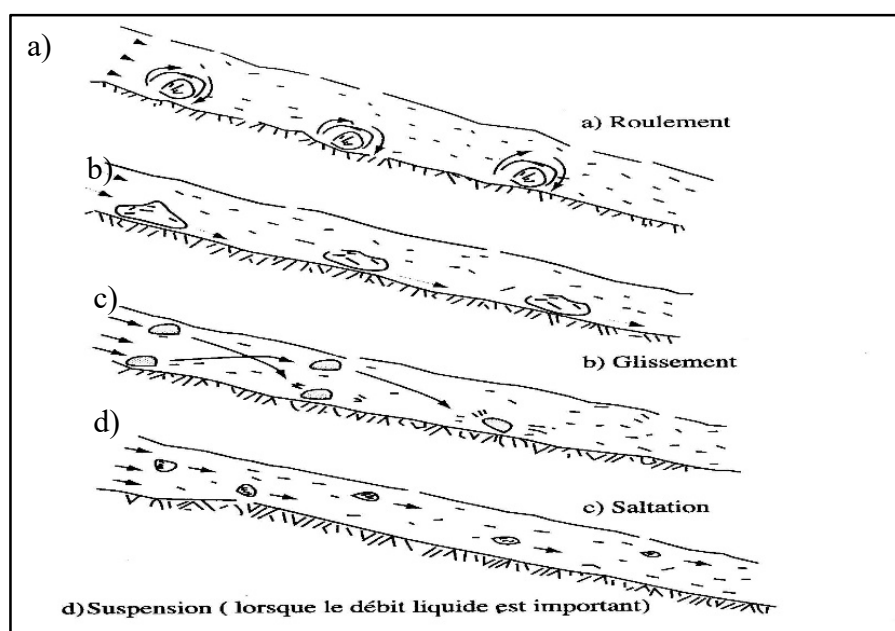


Figure 1. 10 : Type de charriage (Remini, 1996).

Les éléments fins sont maintenus en suspension. Leur concentration serait de 20g/l en moyenne, mais dépasse les 265g/l en période de crue.

Arrivées dans les retenues, les particules solides sont piégées dans les eaux calmes, puis se tassent et se consolident. Les travaux de KONE en 1962 (Remini, 1996) ont permis d'évaluer le débit des dépôts.

$$Q_{\text{dépôt}} = C.W_s.(1 - \frac{t_0}{(t_0)_s}). \quad (1.1)$$

Les sédiments décantés sur les fonds peuvent subir des tassements et des consolidations au cours des temps. MIGNOT.C et PARTHENIADES (Remini, 1996) ont décrit ces différentes phases de tassement (figure 1.11). Les particules minérales et organiques déposées par l'eau et le vent proviennent des usures des sols ; l'érosion-est la première étape du processus d'envasement d'un barrage. Elle se fait par des mécanismes physiques qui produisent la fragmentation des matériaux. Les matières solides sont transportées par ruissellement sur le fond et par roulement ou charriage. Lorsque le débit liquide est important les éléments fins sont maintenus en suspension. Arrivées dans la retenue, les particules sont piégées. Elles se tassent et se consolident, puis finissent par se déposer sur le fond. Avec le temps elles réduisent la capacité du barrage. Alors il faut penser au dragage.

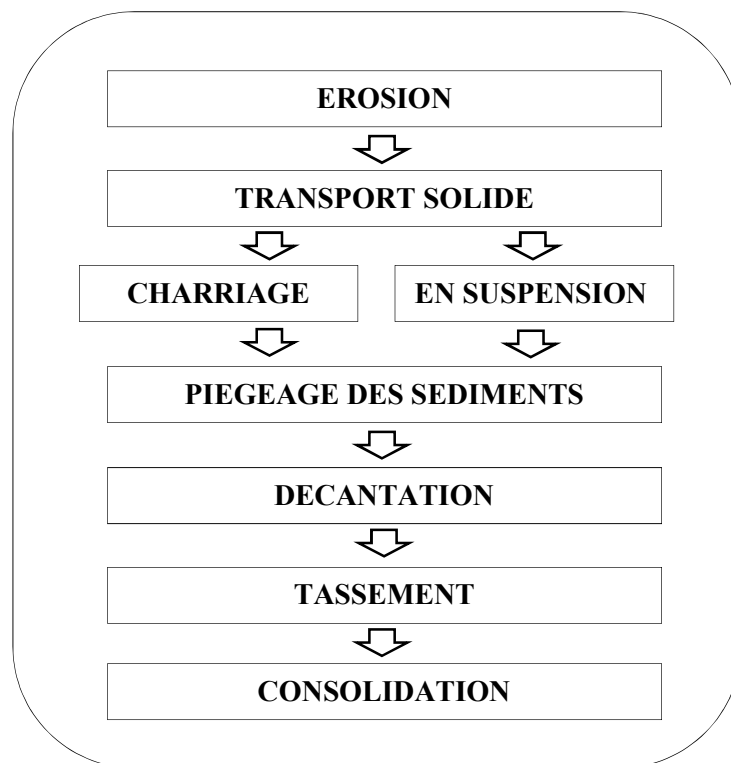


Figure 1. 11 : Organigramme du processus d'envasement d'une retenue (Remini, 1996).

Les sédiments grossiers (galets, graviers et sables), une fois déposés sur les fonds, restent stables dans le temps.

1.3.6 Moyens de lutte contre l'envasement

Les barrages servant à l'adduction en eau potable ou à l'irrigation des cultures, il était donc vital de prendre des dispositions pour les sauvegarder et allonger leur durée de vie au maximum.

Parmi les mesures prises on peut citer : Le reboisement, la restauration des sols, la formation de banquettes, la plantation de végétation à longues tiges. A l'amont du barrage de Bouhanifia (wilaya de mascara) ont poussé des tamaris devenus avec le temps de véritables pièges à sédiments. Les services des forêts ont initié des programmes coûteux pour protéger les bassins versants. Des barrages de décantation ont été réalisés en amont des barrages importants visant à retenir une partie de la vase.

1.3.6.1 Le dragage des barrages

La technique de dragage a été utilisée depuis les années cinquante. En Algérie le barrage de Fergoug, situé dans la région de Mohammedia a subi la première opération de dragage de 1986 à 1989, où plus de 10 millions m³ ont été retirés. Après remaniement local ; les sédiments sont aspirés par la drague et refoulés à travers une canalisation constituée ; d'une partie flottante et une partie fixe ; sur plusieurs centaines de mètres de longueur. La mise en dépôt et le stockage des sédiments issus des opérations de dragage nécessitent une bonne gestion ; pour éviter des dommages sur l'environnement. Les volumes considérables de matières solides déposés dans les voisinages interpellent sur la nécessité de leur valorisation et le refus de les considérer comme des déchets inexploitable.

1.4 CONCLUSION

De nombreux réservoirs destinés à l'irrigation et à l'alimentation en eau potable sont en cours de réalisation ou en projet. Malheureusement ces richesses se dégradent de jour en jour par la sédimentation accélérée. La lutte contre l'envasement, représente donc un enjeu considérable ; le barrage créant une retenue qui constitue une fosse à sédiments de grande taille ; ou au fil des années la décantation des dépôts réduira la capacité de stockage prévue. La lutte contre la sédimentation est toujours possible par les opérations de dragage hydraulique ou le dragage mécanique. Des zones de rejet sont prévues pour recevoir les déblais, Alors se créent dans les alentours du barrage des aires de stockage. Il est impératif de penser à les éliminer ; la meilleure manière serait de les valoriser.

CHAPITRE

VALORISATION DES SEDIMENTS DE

DRAGAGE

2

SOMMAIRE

2.1	INTRODUCTION	23
2.2	VALORISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE EN AGRICULTURE	24
2.3	VALORISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE EN GENIE CIVIL.....	25
2.3.1	Caractéristique des sédiments de dragage	25
2.3.2	Traitement des sédiments de dragage.....	25
2.3.3	Composition chimique.....	27
2.3.4	Composition minéralogique	29
2.3.5	Analyse thermogravimétrique et analyse thermo différentielle	33
2.3.6	Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).....	36
2.3.7	Caractéristiques physiques	37
2.3.8	Chaleur d'hydratation du ciment a base des sédiments calcines	40
2.3.9	Les coulis de ciments.....	44
2.3.10	Comportement mécanique des mortiers à base de substitution des sédiments de dragage.....	45
2.3.11	Comportement mécanique des matériaux à base de substitution des sédiments calcines vis-à-vis des différentes températures de cure.....	50
2.4	CONCLUSION.....	52

2.1 INTRODUCTION

L'envasement des barrages est un phénomène de grande envergure pour récupérer la capacité de stockage du volume d'eau initiale. Plusieurs méthodes de lutte contre la sédimentation des barrages sont utilisées, soit par méthode préventive par un traitement efficace des bassins versants ou la méthode curative ; à savoir la chasse hydraulique ou le dragage. L'expérience de l'Algérie dans le domaine du dragage est riche en enseignements, suite aux nombreuses campagnes de dévasement. La non disponibilité des zones de rejet des sédiments

dragués ; jetés directement dans le cours d'eau à l'aval du barrage ou transportés jusqu'à la zone de dépôt la plus proche sans tenir compte des problèmes de défiguration des paysages ; ont un impact écologique défavorable à l'environnement.

La valorisation des sédiments de dragage ouvre une nouvelle possibilité à la recherche dans plusieurs domaines (Agriculture, construction, travaux publics, industrie). Elle peut servir de remède à ce problème ; le sédiment n'étant plus considéré comme déchet, mais plutôt comme matière première. Dans le domaine de la construction, l'Algérie connaît un déficit en matériaux pour les granulats, le ciment, la brique et la tuile. L'exploitation des sédiments de dragage dans la fabrication et leur utilisation comme matériaux de construction demeure une réelle possibilité. Nous allons présenter dans ce chapitre quelques résultats des études effectuées à travers le monde pour la valorisation des sédiments de dragage en agriculture et en génie civil.

2.2 VALORISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE EN AGRICULTURE

Les sédiments ne seront utilisés que pour la fertilisation et non pas pour la structuration du sol dans la pratique de l'épandage sur les sols cultivés. En effet ces sédiments sont un mélange de sable, argile et de matières organiques nécessaires pour l'amélioration de la qualité des terres végétales. Cela se fait après un traitement au préalable de la dépollution des sédiments qui pourraient être contaminés.

Lors de notre visite au niveau des zones de rejet du barrage de Bouhanifia représenté dans la figure 1.12, on a pu constater un début de création des zones fertiles de végétation. Elles ouvrent la possibilité aux agriculteurs de la région d'utiliser ces zones de rejet dans le domaine de l'agriculture.



Figure 1. 12 : A l'intérieur de la zone de rejet N°3 du barrage de Bouhanifia.

2.3 VALORISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE EN GENIE CIVIL

Dans le domaine de génie civil, plusieurs travaux de recherches à travers le monde et sur le territoire national, ont pu exploiter ces déblais de dragage pour la fabrication de briques, liants, granulats, mortiers et bétons de toute classe et de toute résistance. Dans le domaine routier ils sont utilisés comme couche de forme et de remblais. Les sédiments de dragage peuvent être utilisés comme liants après un traitement thermique. Lorsque ces sédiments sont considérés comme inertes leur utilisation peut être envisagée comme granulat.

2.3.1 Caractéristique des sédiments de dragage

Les sédiments calcinés présentent une grande finesse suffisante pour être classés comme des ultrafines. L'utilisation des ultrafines dans les matériaux cimentaires est affiliée aux conditions ci-dessous ([Céline Perlot., 2007](#)) :

- Une grande demande d'eau pour acquérir une rhéologie satisfaisante dans les différents types de bétons.
- Une quantité de matière organique aussi faible que possible ; et une absence d'élément chimiques toxiques nocifs pour la santé et l'environnement (composés organiques volatiles, métaux lourds...).
- Une disponibilité des grandes quantités sur le long du territoire national (disposition géographique).
- Une similarité au niveau des caractéristiques chimiques ; d'un point de vue granulométrie ou teneur en composés organiques par rapport aux conséquences sur le comportement rhéologique et les performances finales.

La grande similarité entre les sédiments calcinés et le métakaolin présentent un grand avantage :

- Un effet physique est apporté par l'amélioration du squelette granulaire grâce à la complémentarité granulométrique aux autres constituants rentrant dans la formulation des matrices cimentaires ; et un chimique relatif à la formation de produits d'hydratation pour augmenter les propriétés mécaniques et la durabilité.

2.3.2 Traitement des sédiments de dragage

Les sédiments calcinés sont obtenus par une activation thermique à 750°C, qui engendre une transformation de la phase cristalline de la kaolinite en une phase amorphe en métakaolinite. Ce dernier est un matériau considéré comme pouzzolane artificielle depuis 1963. La calcination

entraîne la déshydroxylation et la destruction de la structure cristalline. La durée de traitement est de cinq heures (Semcha. A., 2007).

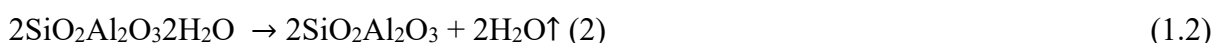
Le même traitement a été suivi par plusieurs chercheurs, en suivant le même traitement thermique pour l'activation des sédiments de dragage du barrage de Chorfa II avec un broyage, tamisage à 80µm ; puis une calcination à 750°C pendant 5 heures (Belaribi et al., 2014; Belguesmia et al., 2018; Safer et al., 2018; Taieb Fatima et al., 2018).

Chikouche et al., (2016) ont évalué le traitement thermique des boues du barrage de K'sob avec trois températures (600, 700 et 800 °C) en adoptant une vitesse de chauffage différente (5, 10 et 20 °C/min). Les principaux résultats montrent que le traitement thermique optimal est de 600 °C avec un temps de maintien de 5 h et une vitesse de chauffage 20 °C/min. La chaleur du traitement à 600 °C avec un débit de 20°C/min conduit à une boue activée sans émission de dioxyde de carbone (CO₂) et à une grande résistance mécanique lorsqu'il est ajouté au clinker à 10 %. Mais le pourcentage de kaolinite (11%) présent dans les boues naturelles n'est pas suffisant pour le traitement thermique à 600 °C des produits d'hydratation permettant d'améliorer de façon significative la résistance mécanique des ciments modifiés par rapport au CEMI.

Laoufi et al., (2016) ont soumis les sédiments du barrage de Fergoug à différents traitements de calcination à des températures de 750, 850 et 950 °C ; dans un four statique, réglé à une température de calcination et maintenues pendant 3h avec une rampe de 5°C/min. Les résultats ont montré que tous les pics de la kaolinite ont disparu dans la plage de température mentionnée. Par conséquent, La déshydroxylation et la transformation de la kaolinite en métakaolinite ont été entièrement réalisées. En plus, la déshydroxylation à 750, 850 et 950 °C ne montre aucune différence notable entre les différentes températures de calcination.

Plusieurs auteurs (Ramachandran, 1996 ;Justice, 2005 ;Ambroise et al., 1985 ;Khatib and Wild, 1996) ont conclu que la déshydroxylation de l'argile kaolinique est obtenue dans la plage de température de 650-850 °C, Cette plage de température entraîne une perte d'eau et une dégradation de la structure cristalline avec transformation par réaction élevée en métakaolinite (AS₂ ou Al₂O₃.2(SiO₂).

Équation :



(Benzerzour et al., 2017a) ont étudié Le traitement thermique des sédiments marins du grand port de Dunkerque, situé au nord de la France, à des températures de 650 °C, 750 °C et 850 °C

pendant 1 heure et 3 heures ; dans le but de les activer chimiquement par décarbonatation ou activation pouzzolanique du matériau (figure 1.13). Cette étude a démontré que le traitement thermique à 850°C avec un broyage et un tamisage à 120 µm présentent des performances mécaniques intéressantes, qui dépassant celles du mortier témoin. Le traitement à 650°C pendant 1h améliore les performances mécaniques et économiques pour leur utilisation efficace en tant que minéraux ajouts.

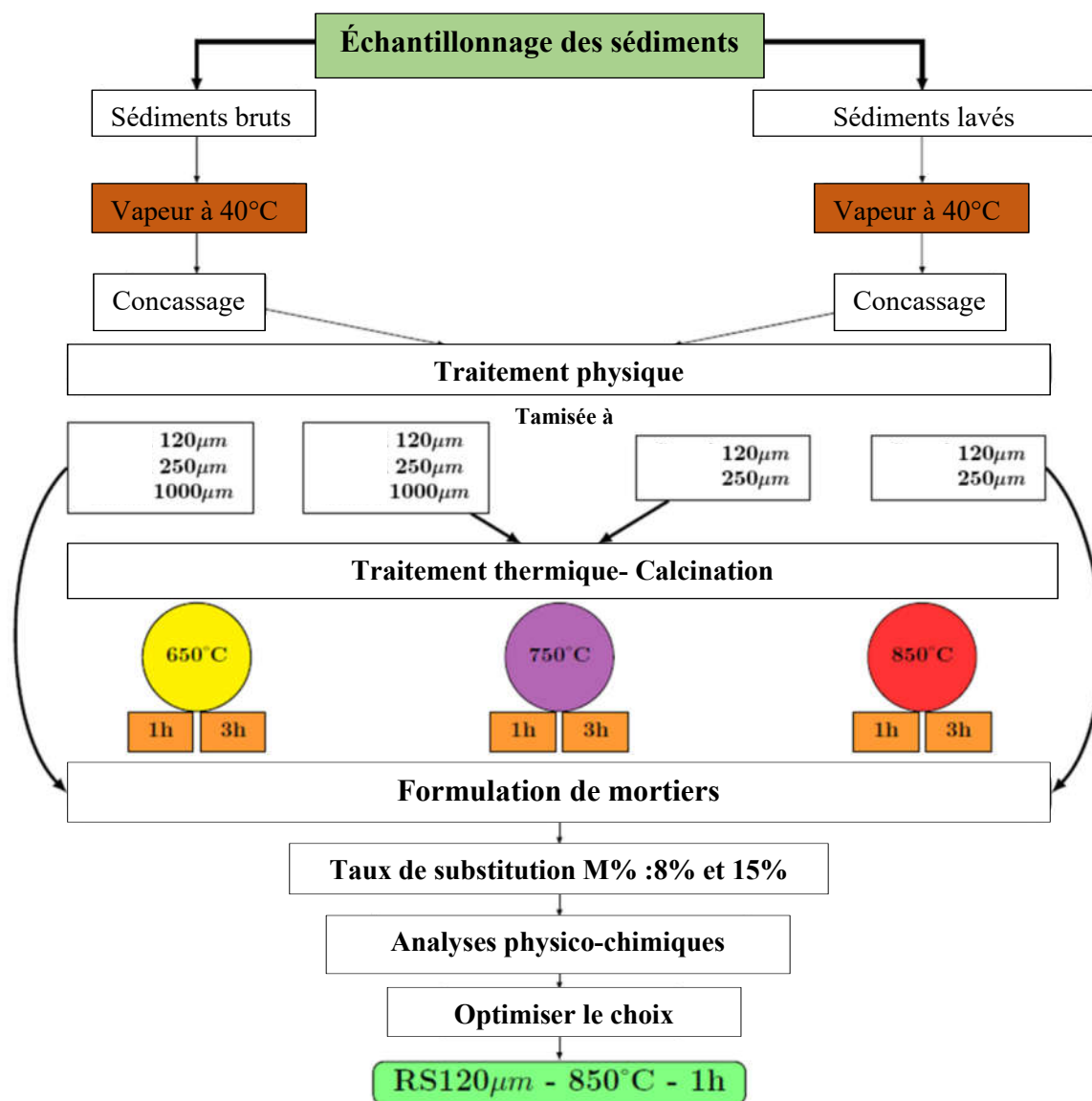


Figure 1. 13 : Organigramme de la méthode de traitement physico-thermique (Benzerzour et al., 2017a).

2.3.3 Composition chimique

Le tableau 1.6 représente l'analyse chimique des sédiments non calcinés. Les oxydes majoritairement représentés sont les oxydes de silicium, d'aluminium, de calcium et de fer. Les sédiments contiennent principalement de l'oxyde de silicium (entre 45% et 33%), de l'oxyde de l'aluminium (entre 15% et 10%) et de l'oxyde de calcium (entre 23% et 16%).

Tableau 1. 6 : Exemples de composition chimique des sédiments non calcinés.

Composition (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	LOI
(Chikouche et al., 2016)	45,31	10,16	4,31	16,18	1,95	0,30	1,28	-	19,98
(Laoufi et al., 2016)	41,40	7,82	5,02	17,47	3,12	1,17	1,36	0,43	22,84
(Safer et al., 2018)	47,36	15,75	7,43	23,08	2,67	0,37	2,97	-	1,79
(Safhi et al., 2019)	33,7	9,58	11,6	20,3	2,34	1,81	1,81	0,47	1,90

Les auteurs ont remarqué un changement de coloration lors de la calcination, dû au changement de la composition chimique (déshydroxylation).

Tableau 1. 7 : Exemple de composition chimique des sédiments calcinés.

Composition (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	LOI
(Chikouche et al., 2016)	46,16	9,90	4,07	19,96	1,88	0,37	1,24	-	14,80
(Laoufi et al., 2016)	47,40	8,93	5,63	19,31	3,54	1,18	1,52	0,49	13,25
(Safhi et al., 2019)	35,4	9,84	12,4	25,3	2,55	2,25	1,61	0,50	9,92

Le tableau 1.7 résume les résultats. Il y a une augmentation remarquable de l'effectif de la concentration de dioxyde de silicium et d'oxyde de calcium dans les sédiments après le traitement. Le changement dans la composition entre le brut et les sédiments traités confirme l'impact du traitement thermique sur la composition chimique.

Par contre [Kazi Aoual-Benslafa et al., \(2015\)](#) ont étudié les sédiments portuaires d'Oran confrontés à une forte contamination des eaux usées, due aux déchets humains et des usines sans aucun traitement. Les échantillons ont été analysés avant et après traitement, dans deux bassins à l'extérieur et à l'intérieur de la zone 1 et 2. Le tableau 1.8 représente les résultats de caractérisation des échantillons réalisée par [Draoui et al., \(2011\)](#) qui ont montré que les teneurs des hydrocarbures (THC) étaient de 1000mg/Kg à l'extérieur des bassins et 2000mg/Kg à l'intérieur des bassins. L'analyse des sédiments du premier bassin (Zone 1) a montré une forte contamination par les métaux lourds et les hydrocarbures. Dans le deuxième bassin (Zone 2) une grande contamination des hydrocarbures a été décelée.

Tableau 1. 8 : Compositions chimiques des différentes contaminations des sédiments (Eléments mineurs chimiques) (Kazi Aoual-Benslafa et al., 2015).

Polluants		Limites recommandées	Différents bassins	
(mg/Kg de sédiments sèche)		(Norme Algérienne)	Valeur moyenne mesurée	Valeur moyenne mesurée
			Bassins extérieurs	Bassins intérieurs
Cadmium	(Cd)	3	0,08	0,16
Chromium	(Cr)	250	34,16	118,3
Mercury	(Hg)	1,5	1,64	1,02
Nickel	(Ni)	75	342,5	9,6
Plomb	(Pb)	250	42,24	89,65
Zinc	(Zn)	500	390,8	335,52
THC		300	1000	2000

Après traitement par lixiviation et déshydratation des échantillons des sédiments marins pour réduire la teneur initiale en eau et en sels d'une durée de 23 jours ; on remarque une diminution des chlorures et des sulfates (Tableau 1.9).

Tableau 1. 9 : Compositions chimiques moyennes (%) des principaux éléments des sédiments dragués (Kazi Aoual-Benslafa et al., 2015).

Eléments chimiques majeurs (%)	Différents basins	
	Valeur moyenne mesurée	Valeur moyenne mesurée
	Bassins extérieurs	A l'intérieur des bassins
SiO ₂	45,0	54,5
CaO	25,0	19,0
Al ₂ O ₃	4,1	4,3
Fe ₂ O ₃	0,5	0,4
MgO	0,3	0,3
Cl ⁻	0,0	0,0
SO ₄	0,0	0,0
CO ₂	20,0	15,2
H ₂ O	5,5	6,6

2.3.4 Composition minéralogique

La composition minéralogique des sédiments de dragage dépend principalement du traitement thermique (Calcination et déshydroxylation). Les études ci-dessous représentent les analyses diffractogrammes des rayons X des différents types de traitement des sédiments de dragage :

Laoufi et al., (2016) ont Activé thermiquement des sédiments de dragage de la vase du barrage de Fergoug, dans le but d'élaborer une pouzzolane artificielle ; La vase a été sélectionnée et homogénéisée en éliminant les résidus organiques des herbes. Elle a été séchée, étuvée à 105°C pendant 24 heures et concassée manuellement, soumise à un broyage intense dans un broyeur à disque, puis tamisée dans un tamis de 75 μm . La calcination est effectuée dans un four statique réglé à une vitesse d'élévation de 5°C/mn, aux températures 750, 850 et 950 °C pendant une durée de 3 heures. La vase calcinée obtenue est conservée à l'abri de l'humidité et de l'air.

La figure 1.14 présente les résultats des diagrammes de la diffraction aux rayons X (DRX) des vases brutes et calcinées. Il montre la présence de quartz, calcite, feldspath et les minéraux d'argile, notamment kaolinite et illite ; comme principales phases minéralogiques des sédiments non calcinés. L'intensité des pics de kaolinite dans la vase brute est très forte, ce qui indique la bonne qualité de ce matériau et l'existence de faibles quantités d'impuretés.

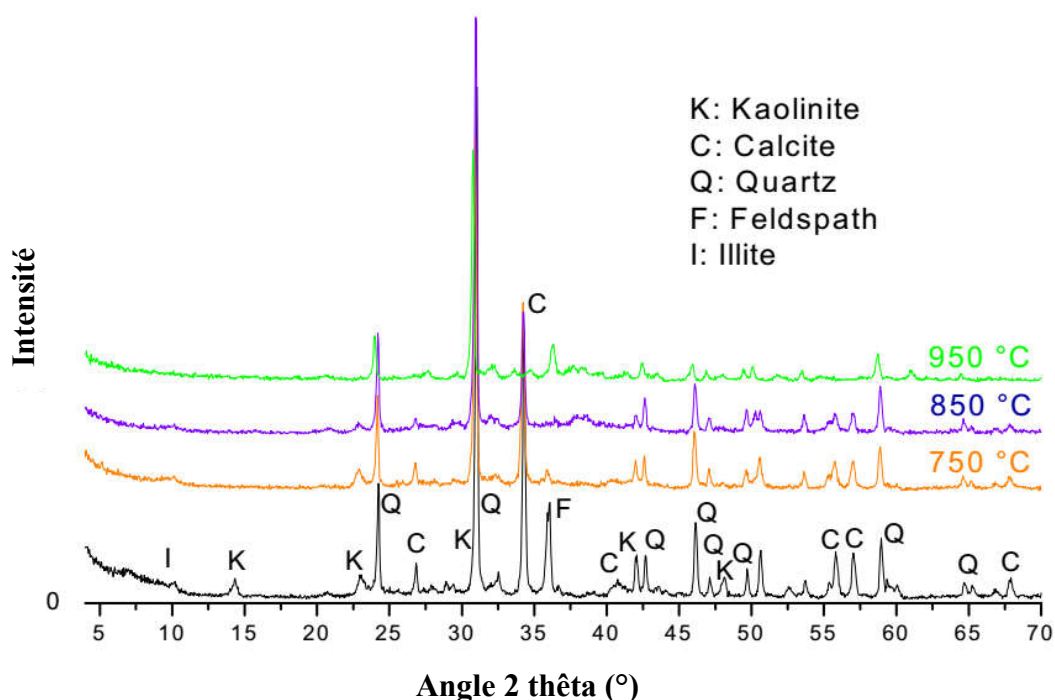


Figure 1. 14 : Analyses diffractogrammes aux rayons X de la vase de Fergoug (non traitée) et traitée thermiquement (calcinée) à 750, 850 et 950 C (Laoufi et al., 2016).

Belguesmia et al., (2018) ont traité les sédiments du barrage de Chorfa II pour éliminer des résidus organiques et la transformation des structures cristallines en structures amorphes capables de réagir avec la chaux libérée sous forme de portlandite. Les résultats du changement de la composition cristalline des sédiments avant et après traitement sont représentés dans la figure 1.15 correspondant aux principaux minéraux : la kaolinite, la calcite, le quartz et la moscovite. Le traitement thermique à 750 °C illustré montre la disparition des pics de kaolinite par transformation en métakaolinite.

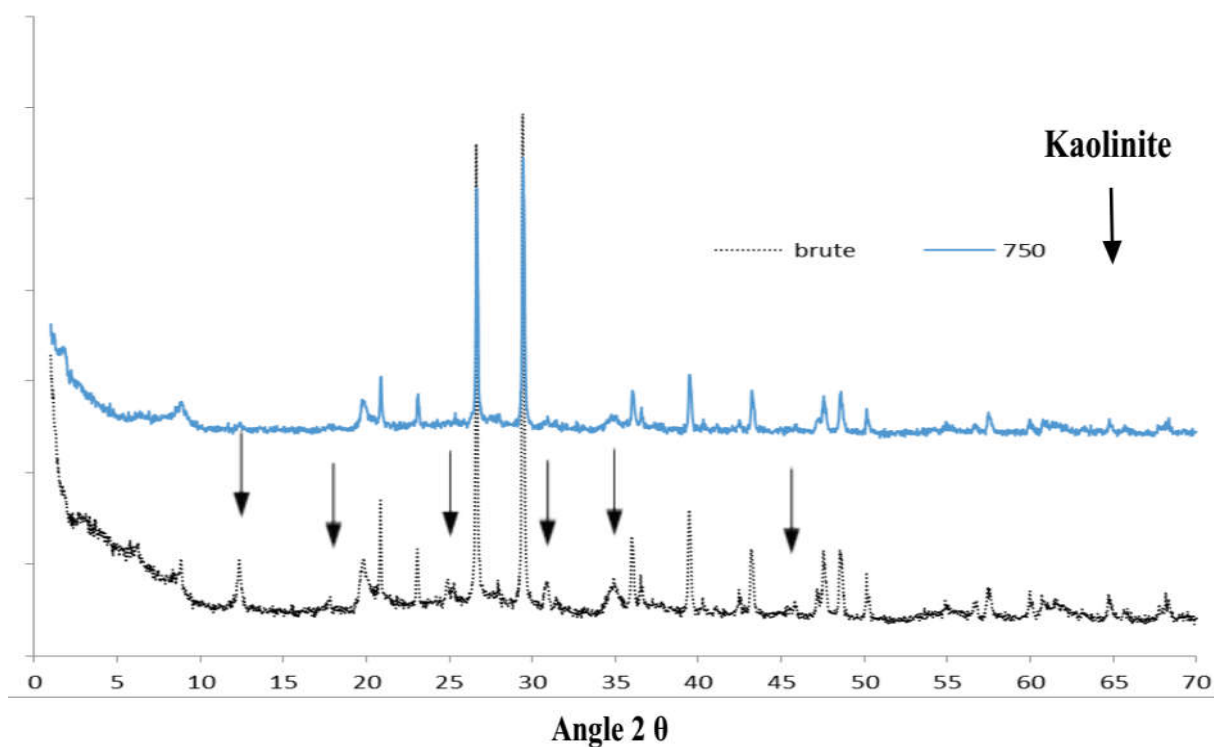


Figure 1. 15 : Analyse Diffractogrammes des rayons X de la vase brute et la vase calcinée Chorfa II (Belguesmia et al., 2018).

Chikouche et al., (2016) ont étudié l'analyse minéralogique par la méthode diffractogramme des rayons X des sédiments du barrage de K'sob. Les résultats sont résumés dans le tableau 1.10, Il semble que les sédiments de dragage sont principalement composés de quartz, de calcite et différents genres de phyllosilicates. Les sédiments du barrage naturel contiennent de la silice (45 %), de l'alumine (10 %) et de la chaux (16 %). La perte d'inflammation est de 20%.

Tableau 1. 10 : Composition minéralogique des sédiments de dragage naturels (Chikouche et al., 2016).

Composition minéralogique [%]					
Quartz	Calcite	Minéraux ferrugineux	Kaolinite	Illite/muscovite	Chlorite
22	30	05	11	20	12

Lors du traitement thermique de ces sédiments, une perte de poids est liée à la déshydroxylation des sédiments naturels et à sa décarbonatation liée à des réactions chimiques telles que décrites à la figure 1.16 (Bich, 2005) : déshydroxylation par condensation entre OH de groupes Al-OH suivie d'une condensation hétérogène entre OH de (Al-OH), et ceux de Si-OH. Cette déshydroxylation entraîne la formation d'une phase d'aluminosilicate désordonnée.

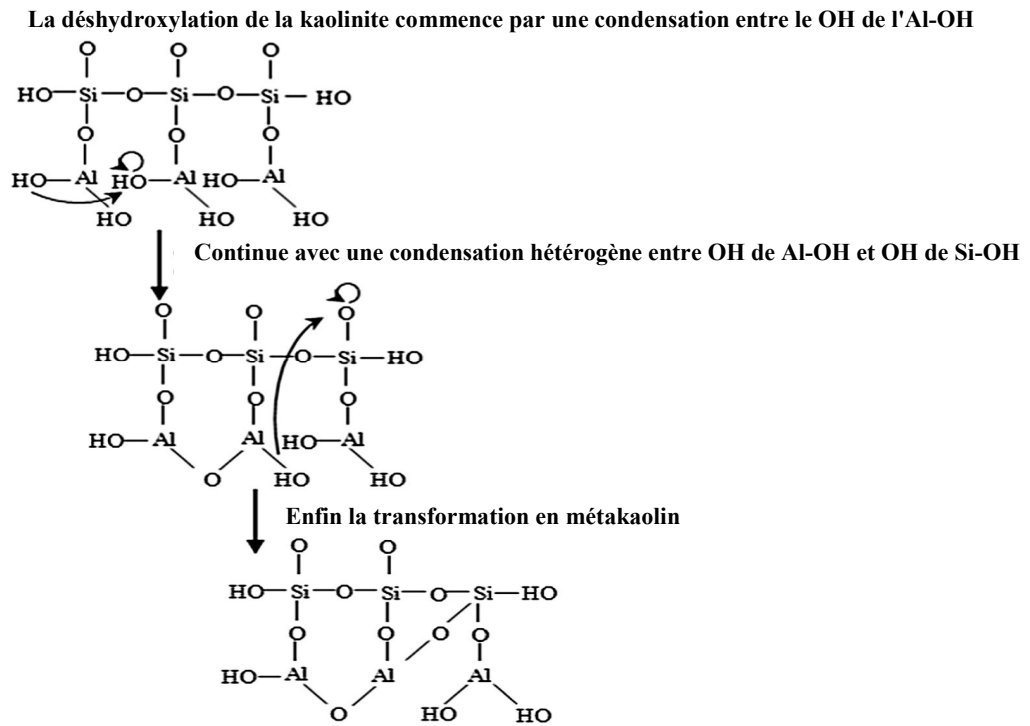


Figure 1. 16 : Mécanisme de transformation de la kaolinite en métakaolinite (Chikouche et al., 2016).
 Safhi et al., (2019) Ont effectué une analyse minéralogique sur les sédiments bruts et traités des sédiments du grand port maritime de Dunkerque qui est situé au nord de la France. Les résultats d'analyse des sédiments bruts ont montré la présence des principales phases : le quartz (SiO_2) et la calcite (CaCO_3), et la présence des phases mineures comme le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), l'hématite (Fe_2O_3), la natrosilite ($\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) et halite (NaCl). Après traitement, les principales phases observées sont : le quartz (SiO_2), la gélénite (plusieurs formes) et l'anhydrite (CaSO_4) ; ces caractéristiques minéralogiques peuvent améliorer la réaction d'hydratation du ciment, et quelques phases mineures comme l'hématite (Fe_2O_3), augite, gypse et la microcline (KAlSi_3O_8).

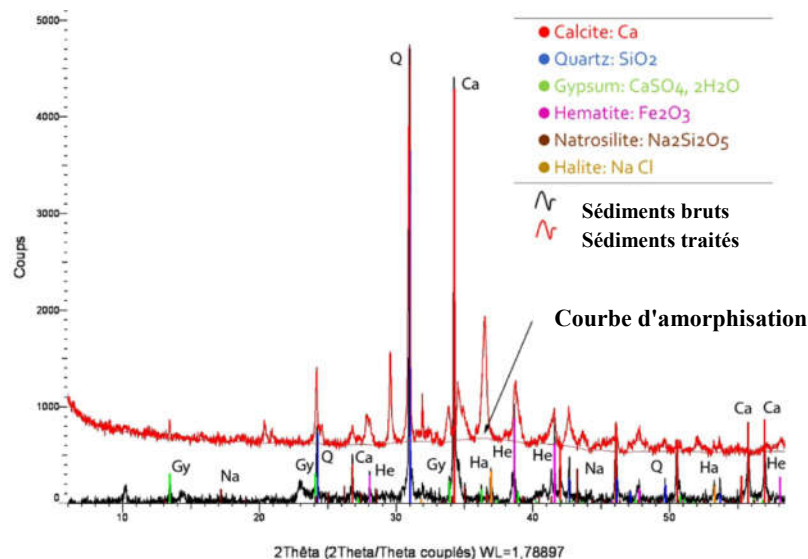


Figure 1. 17 : Analyse DRX des sédiments bruts et traités (Safhi et al., 2019).

L'ensemble des études montre que les sédiments bruts présentent des phases cristallines : le quartz (SiO_2), la calcite (CaCO_3) et la kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), la transformation thermique entre 600 °C à 950 °C transforme les structures cristallines en structures amorphes capables de réagir avec la chaux libérée sous forme de portlandite, dû à la disparition des pics de kaolinite par transformation en métakaolinite. La deuxième transformation est associée à la transition du quartz α , qui est la plus grande partie de l'activité de polymorphe stable de SiO_2 à température ambiante, en quartz β qui reste stable jusqu'à 900°C à 1000 °C (Aasly et al., 2007).

2.3.5 Analyse thermogravimétrique et analyse thermo différentielle

Laoufi et al., (2016) ont étudié le comportement thermique typique des sédiments du barrage de Fergoug. Les résultats de l'analyse sont représentés dans la figure 1.18 avec un intervalle de températures [0 à 120 ° C] montrant la durée de séchage de la vase brute consistant en la disparition des molécules d'eau. Dans l'intervalle de températures [400 à 500 °C], la kaolinite s'est transformée en donnant une nouvelle phase de métakaolin. Dans l'intervalle de températures [600 à 800 °C], la vase brute subit une réaction de carbonatation avec le gaz atmosphérique CO_2 .

Le résultat global montre que le traitement thermique des fractions d'argile à 750, 850 et 950 °C est suffisant pour transformer la kaolinite en métakaolin qui est en accord avec les analyses thermiques (ATD et ATG). Ces résultats ont montré aussi que la déshydroxylation de la kaolinite commence à partir d'environ 500 ° C. La différence entre la vase naturelle et la vase calcinée, semble être liée à la présence d'un minéral argileux, comme la kaolinite qui se transforme en métakaolin après calcination.

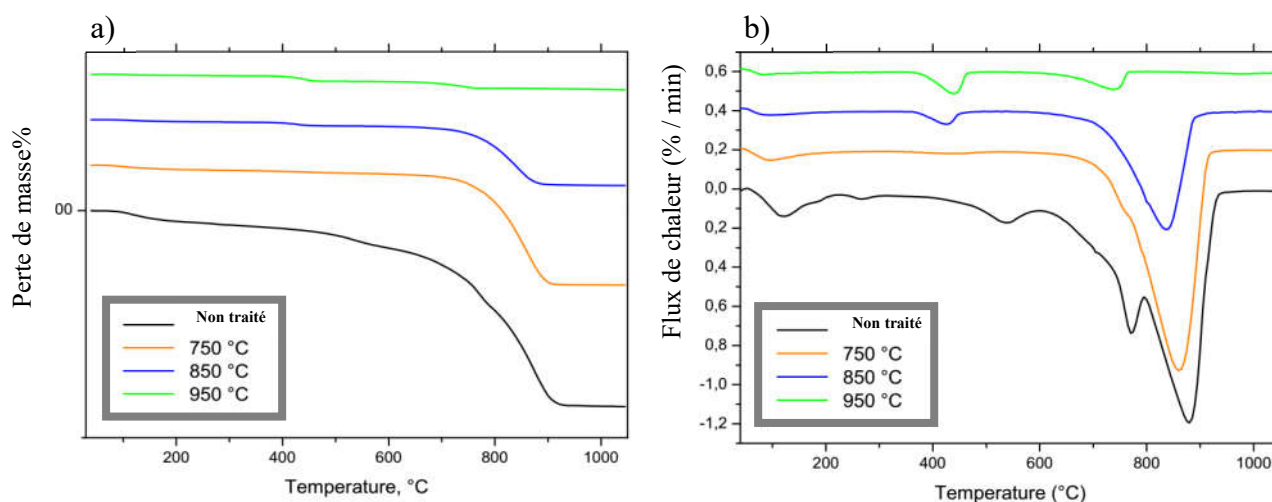


Figure 1. 18 : a) Courbe ATG des sédiments (non traités) et traités thermiquement (calcinés) à 750.850 et à 950 °C ; b) Courbe ATD des sédiments (non traités) et traités thermiquement (calcinés) à 750, 850 et 950 °C (Laoufi et al., 2016).

Chikouche et al., (2016) ont analysé les échantillons des sédiments du barrage de K'sob par l'analyse thermogravimétrique et l'analyse thermo différentielle obtenue par calorimétrie différentielle à balayage (DSC-ATG), à l'état naturel avec une vitesse de chauffage de 20 C/min, dans une plage de température variant de 20 à 1000 °C. La figure 1.19 indique l'existence de trois pics endothermiques distincts attribués à :

- La déshydratation (180 °C) : Cette réaction est associée à l'effet d'élimination de l'eau adsorbée. Cette réaction n'affecte pas la structure phyllosilicate des sédiments.
- La déshydroxylation (pic endothermique aigu à 550,9 C) : entre 420 et 600 C, où trois réactions chimiques ont été observées ; La première réaction liée à la décomposition de la kaolinite en métakaolinite et qui s'accompagne d'un changement structural de la coordination octaédrique de l'aluminium, à la coordination tétraédrique qui entraîne une perte de cristallinité. La deuxième réaction apparaît à 573 °C. Elle est associée à la transformation de transition du quartz α en quartz β qui reste stable jusqu'à 900 à 1000 °C (Aasly et al., 2007). La troisième est liée à la transformation de l'illite en illite déshydratée, qui succède au cadre stratifié de l'illite originale. La structure en couches est maintenue inchangée de 700 à 1093 °C. Lorsque la température dépasse 1100 C, la substance amorphe recristallise en mullite (Jiang et al., 2008).
- La décarbonatation (pic endothermique situé à 842 °C) : entre 700 et 900 C, la calcite (CaCO_3) est décomposée en calcium avec émission de CO_2 .

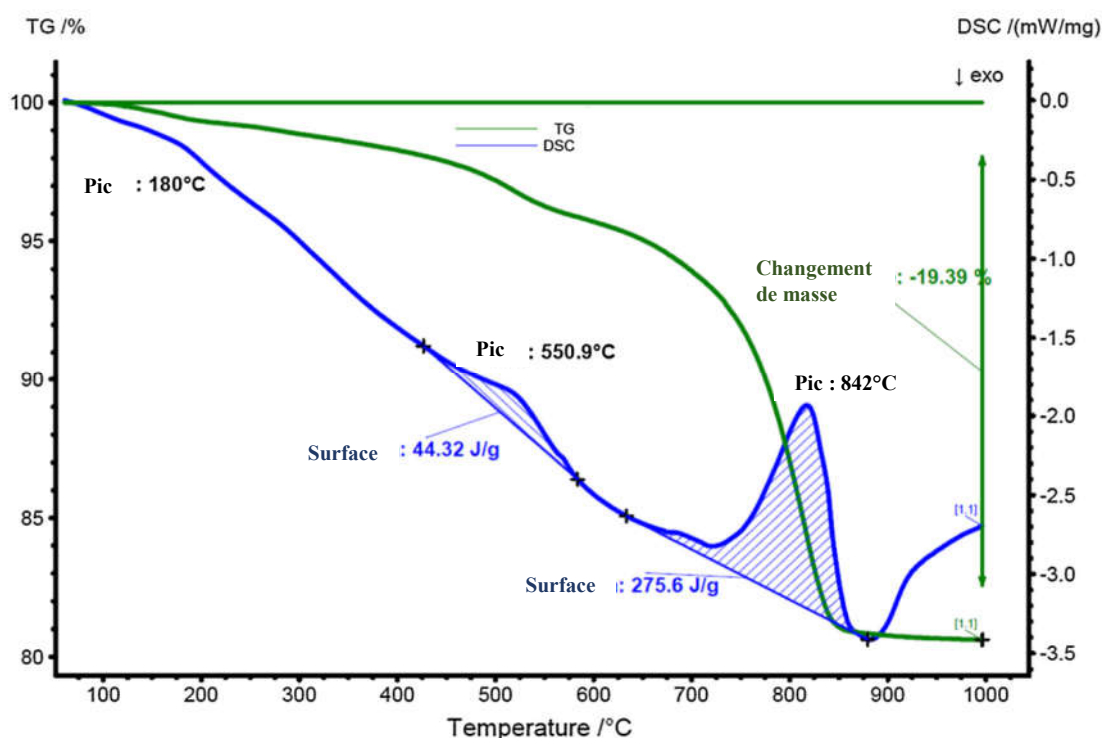


Figure 1. 19 : Analyse ATG-DSC des sédiments naturels (Chikouche et al., 2016).

Amar et al., (2018) ont évalué la perte de masse d'un échantillon de sédiment marin du port de Dunkerque (Nord en France) qui correspond à la phase de déshydratation. L'analyse ATG est faite dans un environnement contrôlé avec écoulement d'Arگون (75 ml/min), où les échantillons sont exposés à une gamme de températures (105 °C à 1100 °C ; vitesse de rampe 2 °C/min). Les résultats de cette perte de masse sont représentés dans la figure 1.20. On remarque qu'à partir de 380 °C à 600 °C une perte de H₂O est probablement due à l'eau intergranulaire et à l'eau de constitution des minéraux argileux identifiés par Teklay et al., (2015). Le rejet de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone entre 350 °C et 550 °C pourrait provenir des réactions de combustion des matières organiques et des polluants organiques (HAP, BPC, TBT) présents dans les sédiments (Dia et al., 2014), le pic de H₂O sort plus ou moins en même temps que les pics de CO et de CO₂. Ceci reflète une dégradation incomplète de la matière organique présents dans l'échantillon. Un pic de CO₂ apparaît entre 600 °C et 750 °C, induit par la décarbonatation de la calcite (Dang et al., 2013). Cela provient probablement des coquilles d'espèces marines. Selon cette analyse, la température qui permet une calcination optimale des sédiments doit être supérieure à 730 °C.

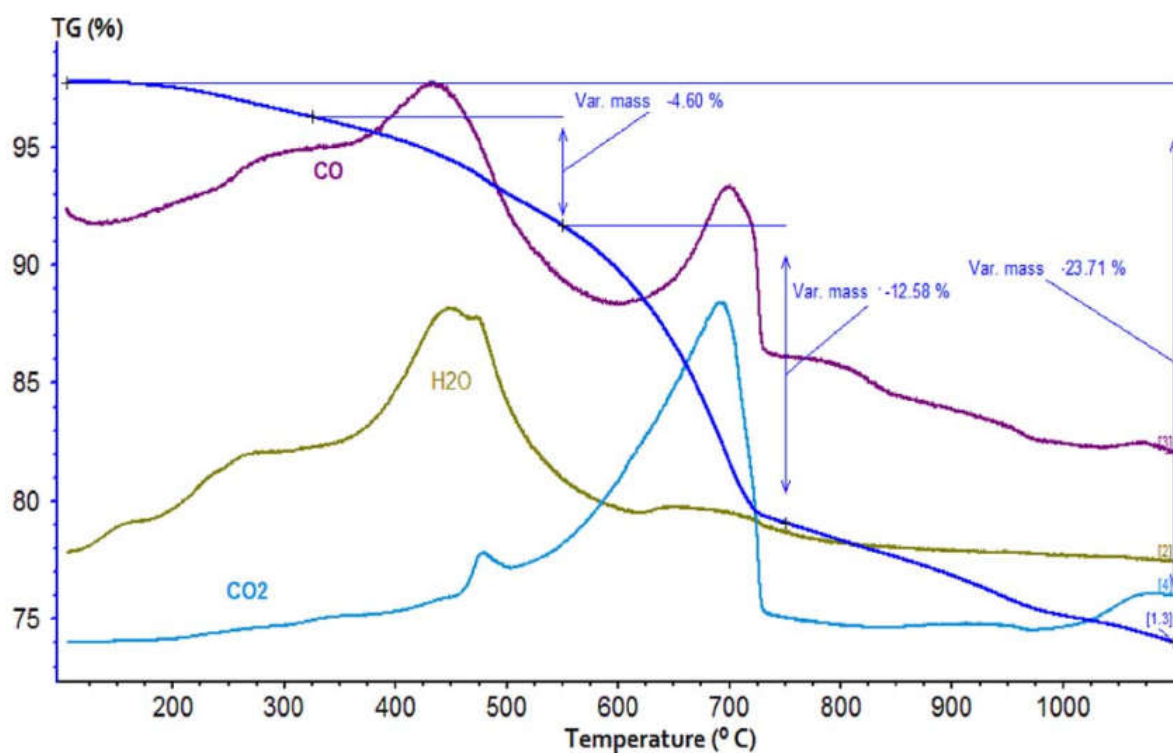


Figure 1. 20 : Résultat d'analyse ATG des sédiments marins naturels du port de Dunkerque (Nord de la France) (Amar et al., 2018).

2.3.6 Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

Chikouche et al., (2016) ont analysé les sédiments non calcinés du barrage de K'sob par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier. Les résultats des spectres obtenus par analyse FTIR sont donnés au tableau 1.11. Une domination des bandes caractérisant la kaolinite a été observée. Ces sédiments contiennent aussi d'autres minéraux, tels que l'illite et chlorite. La forme du spectre IR est dominée par celle de la kaolinite qui est plus important lorsque la teneur en kaolinite est élevée (Joussein et al., 2001; Truche, 2010).

Tableau 1. 11 : Bandes caractéristiques des sédiments non calcinés observées avec le spectre FTIR(Chikouche et al., 2016).

Bande observée (cm ⁻¹)	Groupe fonctionnel associé	Composant Associé
778	Vibration d'étirement de (Si-O)	Quartz
798,1006	Vibration d'étirement de (Si-O)	Kaolinite
712,873,1423	Vibration d'étirement de (C-O)	Calcite
3619	Vibration d'étirement de (O-H)	Kaolinite

Mostefa et al., (2018) ont étudié la faisabilité de fabrication d'un ciment géopolymère à base de sédiments de dragage du barrage de Fergoug (Algérie). Ils ont évalué leur potentiel de construction dans le domaine des matériaux cimentaires spéciaux. L'objectif de cette étude est de contribuer à la valorisation des sédiments de dragage dans la formulation de nouveaux bétons par substitution complète du ciment. La calcination a été effectuée sur la matière première tamisée à 80 µm pour une température de 750°C, pendant 3, 4 et 5 heures (temps de calcination). Les argiles sédimentaires ont été caractérisées avant et après calcination par spectroscopie (FTIR). Les résultats de l'analyse ont démontré la présence des bandes associées à 779 cm⁻¹ qui indique la possibilité de la présence d'illite (Wolff, 1963). D'après le graphique FTIR, il apparaît une large bande centrée autour de 1429 cm⁻¹ associées aux pics, 873 et 712 cm⁻¹. Ces bandes sont liées à l'étirement des groupes carbonates présents dans la calcite (Farmer, 1979), en plus des faibles pics centrés à 1796 et 2514 cm⁻¹ qui représentent également le même groupe. Les fréquences à 3621 cm⁻¹ et 3696 cm⁻¹ sont dues à l'étirement OH des groupes hydroxyle de l'ion surface interne. Leur présence associée au pic à 798 cm⁻¹, prouve que les sédiments contiennent de la kaolinite. Selon Ramasamy et al., (2005), les deux pics 3696 et 3620 cm⁻¹ suggèrent que la kaolinite pourrait être dans un état désordonné (figure 1.21).

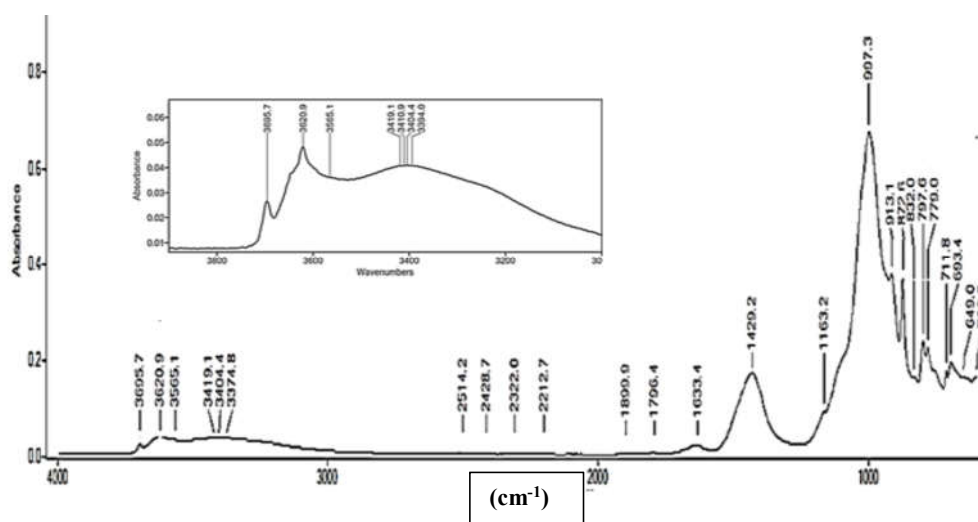


Figure 1. 21 : Analyse FTIR pour les sédiments non calcinés du barrage de Fergoug (Mostefa et al., 2018).

2.3.7 Caractéristiques physiques

2.3.7.1 Granulométrie des sédiments

La distribution granulométrique des différents types de sédiments de dragage est représentée à partir de la mesure des passants cumulés :

Belguesmia et al., (2018) ont montré que la distribution granulaire de la majorité des grains se situe en dessous de 50µm. Le diamètre moyen à 50% du volume de l'échantillon est de l'ordre de 10µm, qui confirme la grande finesse des sédiments calcinés (figure 1.22).

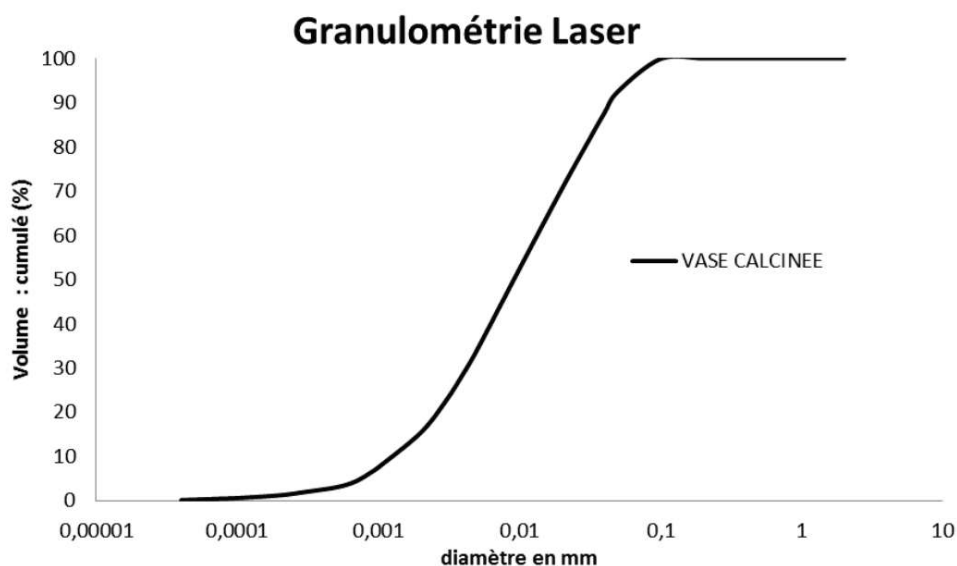


Figure 1. 22 : Distribution granulométrique des grains des sédiments calcinés (Belguesmia et al., 2018).

Kazi Aoual-Benslafa et al., (2014) ont analysé la distribution granulométrique moyennes des sédiments du barrage de Bouhanifia, illustrée par la figure 1.23, selon la norme européenne EN-P94056 (1992), Les échantillons ont été tamisés et broyés à 80 µm puis introduits dans les

mortiers par substitution partielle au ciment à différentes fractions (0 % pour le mortier de référence, 10% et 15%) pour la confection des mortiers. Les résultats montrent que les sédiments sont des sables fins limoneux.

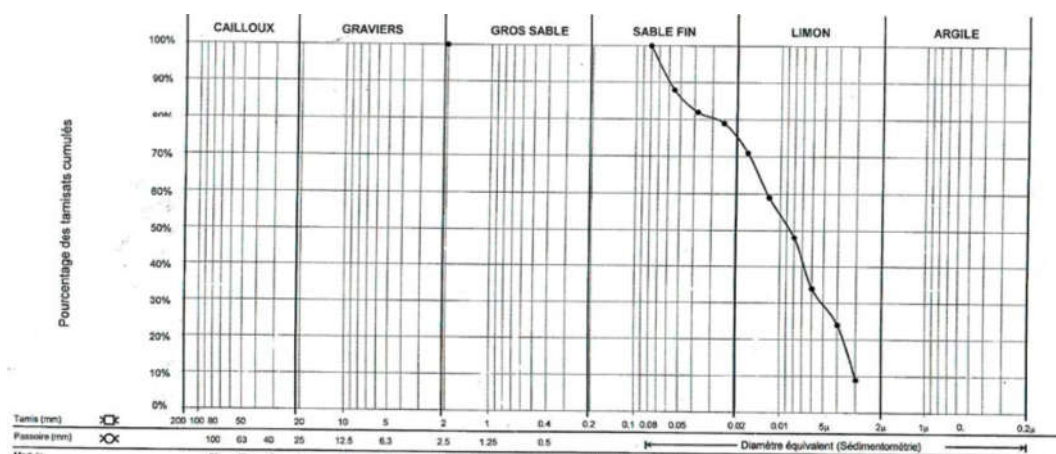


Figure 1. 23 : Courbes granulométriques des sédiments du barrage de Bouhanifia (Kazi Aoual-Benslafa et al., 2014).

El Mahdi Safhi et al., (2018) ont caractérisé la distribution granulométrique des sédiments calcinés et non calcinés du port marin de Dunkerque. Cette distribution granulométrique des particules a été déterminée à l'aide d'un soc de diffraction laser LS12330 qui peut mesurer les particules entre 0,04 et 2000 μm (norme ISO 13320-1). Les résultats ont indiqué que la calcination a modifié la netteté et la forme externe des particules. Ceci permet de conclure que les grains plus grossiers s'aggloméreraient à travers un soudage de grains ou un phénomène de gonflement se produisant dans le cadre de l'opération sous l'effet de la chaleur. Toutefois, ces effets ne sont pas linéaires parce que, plus la température est élevée, plus le grain est grossier (figure 1.24).

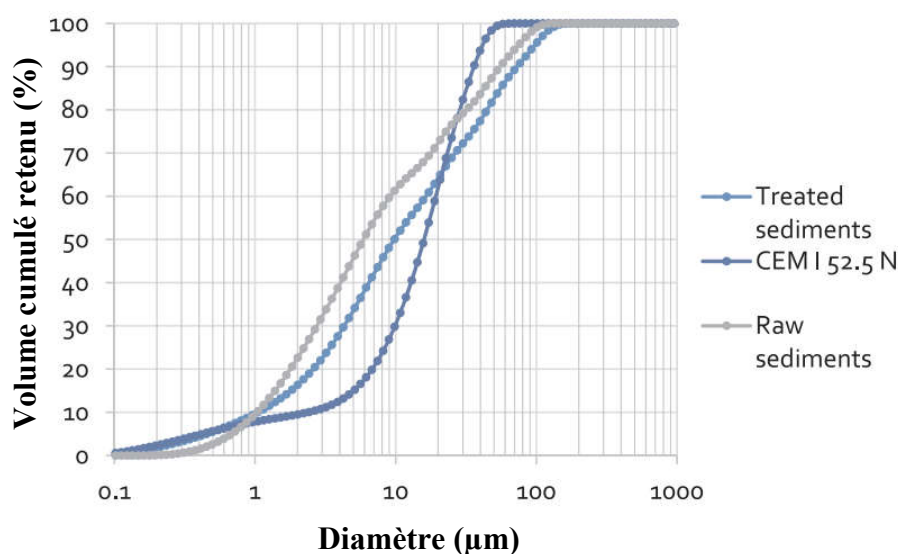


Figure 1. 24 : Répartition granulométrique du ciment, des sédiments calcinés et non calcinés (Safhi et al., 2019).

2.3.7.2 *Masse volumique*

La valeur moyenne de masse volumique des sédiments de dragage non calcinés est de l'ordre de $2,53 \text{ g/cm}^3$; pour les sédiments calcinés elle est de l'ordre $2,83 \text{ g/cm}^3$. La calcination entraîne une grande modification de la composition minéralogique et de la morphologie des particules. Le tableau 1.12 illustre les différentes valeurs des masses volumiques des sédiments non calcinés et calcinés.

2.3.7.3 *Surface spécifique*

La méthode de mesure des surfaces spécifiques des échantillons des sédiments la plus utilisée dans la littérature est la méthode BET. La surface spécifique des sédiments calcinés est classée en deux catégories : la première d'une moyenne de $3510 \text{ cm}^2/\text{g}$ pour les sédiments du barrage de Fergoug et pour les sédiments portuaires d'Oran (Kazi Aoual-Benslafa et al., 2015; Laoufi et al., 2016). La deuxième est d'une moyenne de $11689,37 \text{ cm}^2/\text{g}$ pour les sédiments du port de Dunkerque et pour les sédiments des barrages de Chorfa II et K'sob (Belguesmia et al., 2018; Benzerzour et al., 2017b; Chikouche et al., 2016). Les différentes valeurs sont dues aux différentes granulométries. Ces sédiments sont des poudres ultrafines, dont les particules sont très fines et qui entraînent une grande porosité interne qui joue un rôle important dans la réactivité des ultrafines (tableau 1.13).

Tableau 1. 12 : Exemples de valeurs de masses volumiques des sédiments tirés de la littérature.

Auteurs	Sédiments	Masse volumique (g/cm^3) Sédiments non calcinés	Masse volumique (g/cm^3) Sédiments calcinés
(Benzerzour et al., 2017b)	Port de Dunkerque	2,48	2,94
(Kazi Aoual-Benslafa et al., 2015)	Port d'Oran	2,45	
(Safer et al., 2018)	Barrage de Chorfa II		2,65
(Laoufi et al., 2016)	Barrage de Fergoug	2,67	2,77
(Chikouche et al., 2016)	Barrage de K'sob		2,99

Tableau 1. 13 : Exemples des valeurs des surfaces spécifiques des sédiments calcinés de dragage.

Références bibliographiques	Sédiments	Surface spécifique (cm^2/g)
(Benzerzour et al., 2017b)	Port de Dunkerque	20641
(Kazi Aoual-Benslafa et al., 2015)	Port d'Oran	2990
(Belguesmia et al., 2018)	Barrage de Chorfa II	7320
(Laoufi et al., 2016)	Barrage de Fergoug	4030
(Chikouche et al., 2016)	Barrage de K'sob	7098

2.3.8 Chaleur d'hydratation du ciment à base des sédiments calcinés

Trois récentes études présentent l'influence des sédiments sur la chaleur d'hydratation des ciments et qui a été réalisée pour suivre l'hydratation des différents types de pâtes et de mortiers :

[Belguesmia \(2018\)](#) a évalué les flux thermiques et les chaleurs dégagées des pâtes confectionnées à base des sédiments du barrage de Chorfa II. Sept (7) mélanges ont été confectionnés : un mélange témoin, 3 mélanges à base de trois pourcentages de substitution à savoir 10,20, et 30% de sédiments non calcinés. Trois autres mélanges avec des sédiments calcinés (figure 1.25 et 1.26). Les résultats des figures 1.25 montrent que les principaux pics de chaleur des pâtes à base des sédiments non calcinés ont des seuils légèrement plus élevés que celui des pâtes de ciment. Cela est dû à la surface spécifique Blaine des sédiments qui est plus importante que celle du ciment, avec agissement des nucléations pour les produits d'hydratation. La confection des pâtes à consistance égale permet une hydratation de grains plus importante que celle de la pâte témoin.

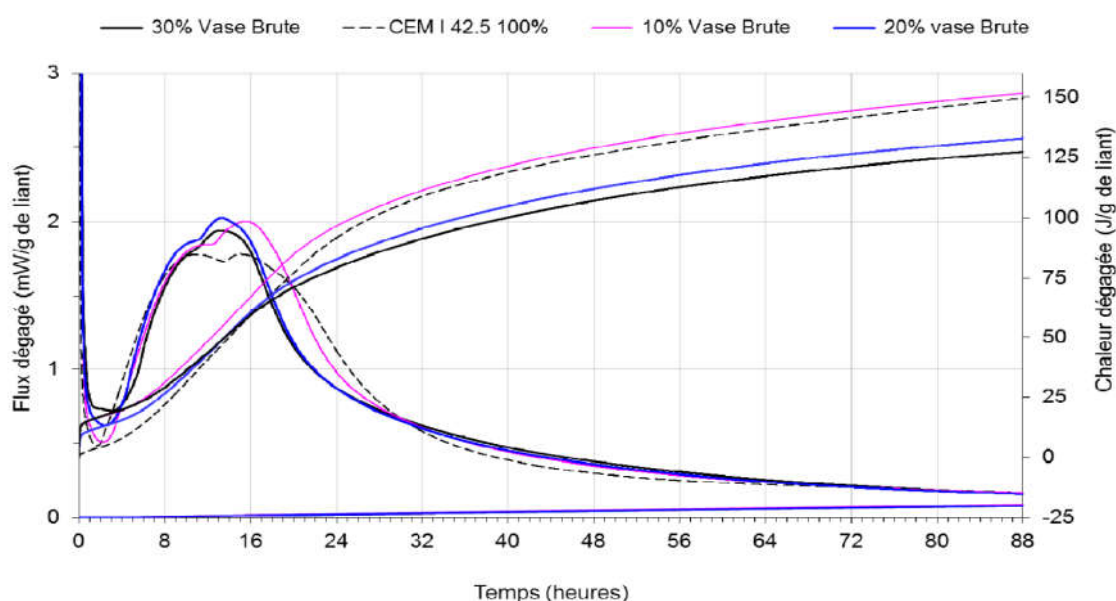


Figure 1. 25 : Flux thermiques et chaleurs dégagées des pâtes à base des sédiments non calcinés ([Belguesmia, 2018](#)).

Les résultats de la figure 1.26 montrent aussi que le flux de la chaleur des pâtes à base de sédiments calcinés est nettement plus important que celui de la pâte de ciment, dû à la deuxième réaction d'hydratation du ciment qui suit en parallèle. Les flux additionnels constatés dans les pâtes à base des sédiments calcinés sont proportionnels au pourcentage de substitution. Ils ne peuvent s'expliquer que par la réaction pouzzolanique entre la métakaolinite présente dans les sédiments calcinés et la chaux en présence d'eau.

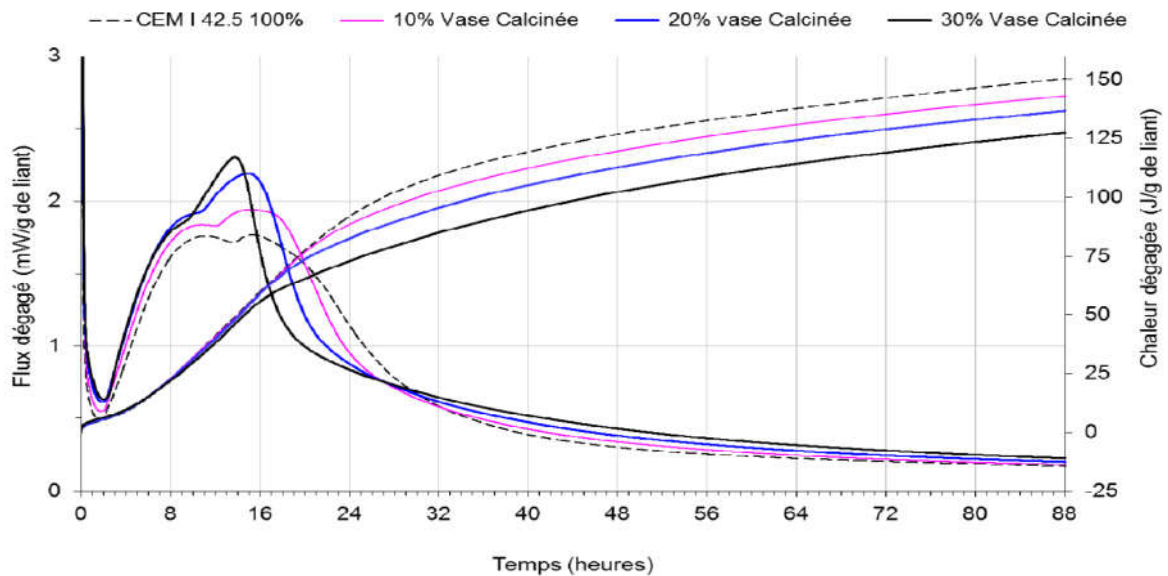


Figure 1. 26 : Flux thermiques et chaleurs dégagées des pâtes à base des sédiments calcinés (Belguesmia, 2018).

Chikouche et al., (2016) ont observé que le dégagement de chaleur le plus élevé est obtenu pour le ciment avec sédiments traités à 600 °C et 20 °C/min avec 25 J/g au lieu de 11 J/g pour le CEMI. Après 7 jours, la chaleur de l'hydratation devient presque stable pour tous les ciments. Le dégagement de chaleur le plus important est obtenu pour les mortiers élaborés avec MC600/5 avec 265 J/g, MC800/5 avec 264 J/g et MC600/20 avec 252 J/g ; tandis que 231 J/g est rapporté pour le CEMI. Ils ont supposé que les sédiments traités se combinent avec le clinker, qui réagit pour produire de l'hydroxyde de calcium (CH) et le transforme en calcium-silicate-hydrates (CSH). La teneur en CaO de tous les ciments modifiés (figure 1.27) est inférieure à celle du CEMI, avec augmentation du dégagement de chaleur des différents types de ciments pouvant être attribuée à l'hydratation de la chaux libre. Cela conduit à la croissance de la concentration de CH et par conséquent à l'augmentation de la concentration de CH des produits d'hydratation. Il est à noter que les sédiments traités à 600 °C à 20 °C/min sont caractérisés par une plus grande quantité de chaux. Le niveau réduit de la chaleur d'hydratation par rapport au CEMI à un âge précoce peut être dû à un manque de disponibilité de CH. Il est à souligner que la valeur du rapport de l'alumine est inférieure à 1,5 ($AFM < 1,47$) ; indiquant que le clinker est caractérisé par une faible chaleur d'hydratation, une prise lente et un faible retrait.

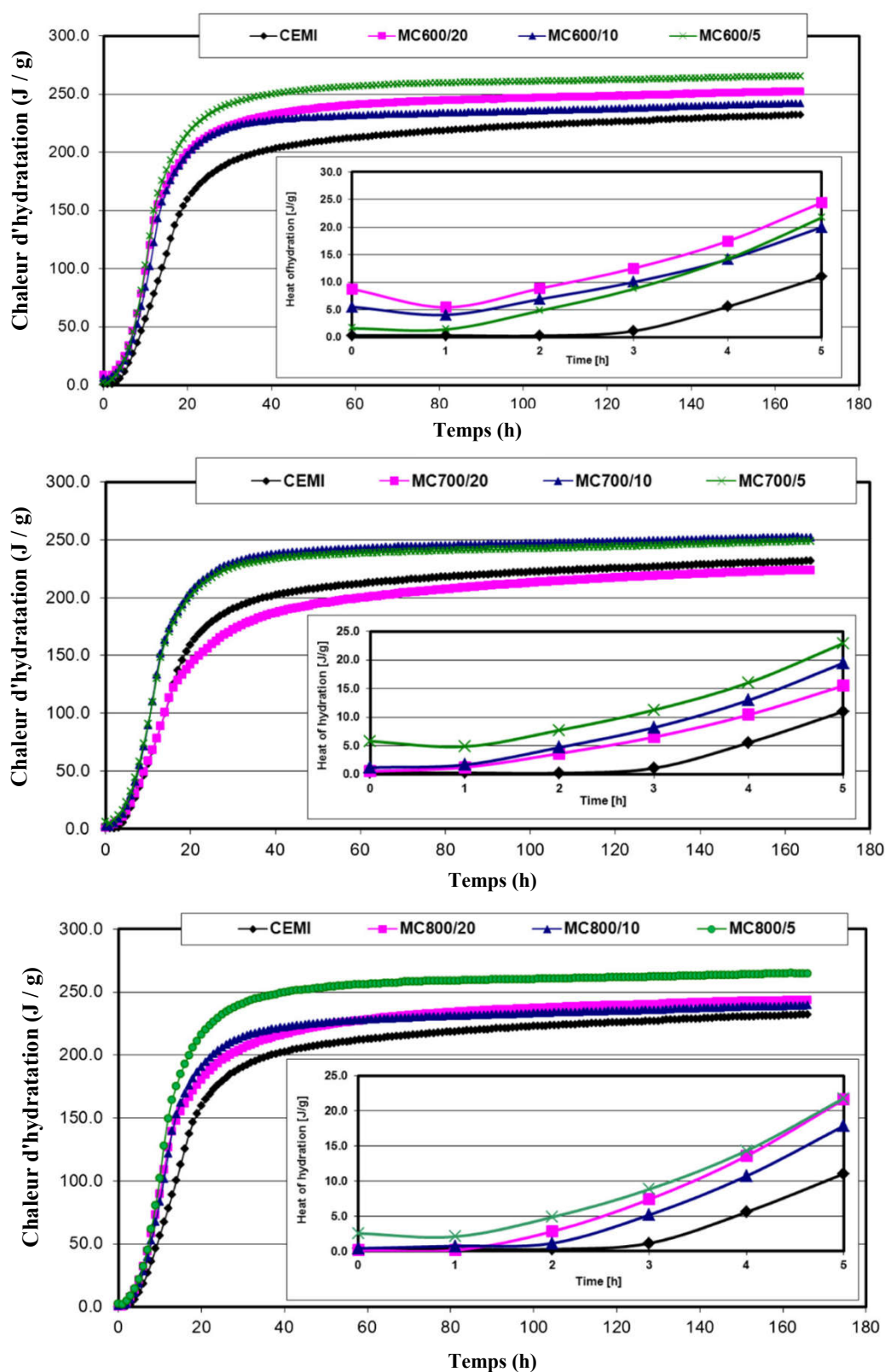


Figure 1. 27 : Chaleur d'hydratation des différents ciments modifiés (MC) (Chikouche et al., 2016).

Benzerzour et al., (2017a) ont déterminé la chaleur d'hydratation de trois mortiers à base des sédiments traités du port de Dunkerque : mortier témoin (RM) et deux mortiers à base de sédiments MSC (8% et 15%). L'étudié est donnée dans la figure 1.28. La méthode utilise un

calorimètre semi-adiabatique (méthode Langavant) selon la norme NF EN Norme 196-9. Le mortier témoin (RM) a atteint une température maximale de 51,9 C après 17,80 h. ce qui correspond à 220,08 J/g de chaleur générée. Les mortiers à base des sédiments traités de 8 % et 15 %, la chaleur dégagée à la fin de 15,60 et 15,90 h correspondent à 262.45 J/g et 265.47 J/g respectivement. Les schémas de chaleur cumulée démontrent clairement que les mortiers à base de sédiments (MSC) présentent une chaleur plus élevée que les mortiers témoins (RM). Cela permet de considérer que l'activité chimique a lieu en présence de sédiments. Cela peut être attribué à un effet de charge par rapport à la finesse des sédiments. Toutefois, cette contribution de la chaleur peut être à la fois négative et bénéfique en fonction de l'application ciblée. Une option pour l'abaisser serait d'utiliser un clinker pur ou un ciment à basse température d'hydratation. Les graphiques correspondants aux mortiers substitués ont la même apparence générale (8 % et 15 %). La ligne droite de la figure 1.28 correspond à un mortier d'étalonnage (avec un ciment spécial et une chaleur d'hydratation stabilisée). Elle peut servir à vérifier la stabilité et la cohérence globale des résultats.

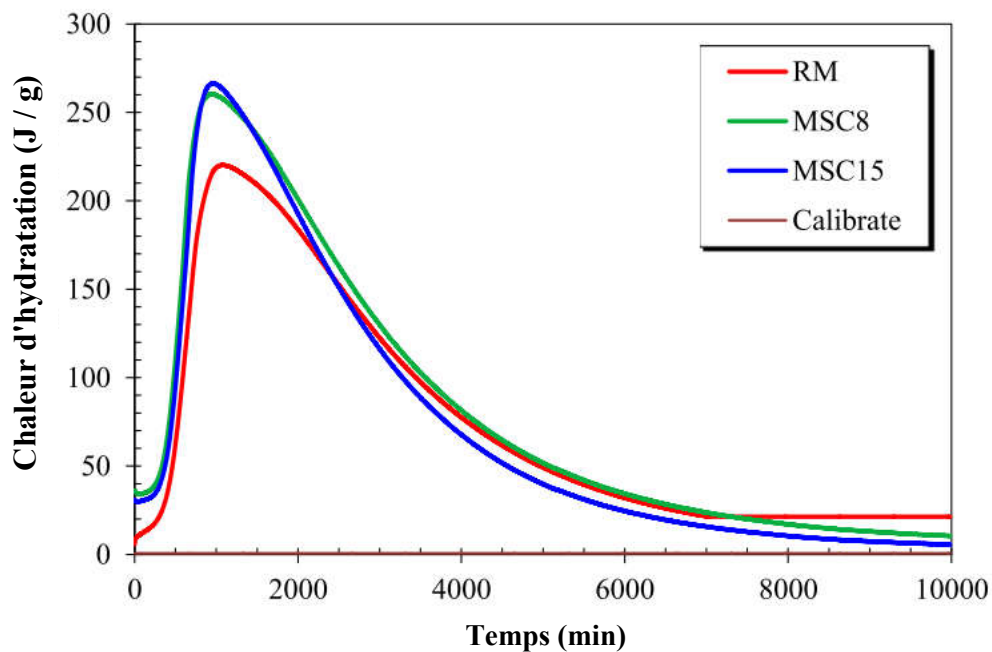
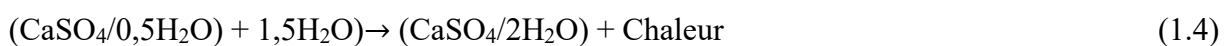


Figure 1. 28 : Relation entre la chaleur d'hydratation et le temps de RM et MSC (Benzerzour et al., 2017a).

Les auteurs ont pu conclure que le dégagement de chaleur supplémentaire devrait être généré par les particules de sédiments, en raison d'une activité physique ou chimique. Il peut également être lié à la phase calcaire, qui réagit avec l'eau d'après Eq. (2.1) ; ou à l'hydratation de l'hémihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) en Eq. (2.2) qui produit de la chaleur supplémentaire.



2.3.9 Les coulis de ciments

D'après nos connaissances une seule étude a été réalisée par [Belguesmia \(2018\)](#) dans le but de choisir un adjuvant pour les formulations de BAP à base des sédiments du barrage de Chorfa II ; et de déterminer les dosages et les choix adéquats en adjuvant ; avec deux coulis de ciments témoins, deux coulis de ciments à base de 15% de sédiments calcinés, et deux coulis de ciments à base de 30%. Un deuxième paramètre qui change aussi est l'adjuvant (Viscocrete Tempo 12) de la marque SiKa et le (Médaflow 113) de la marque Granitex avec un rapport E/L qui a été révisé à chaque pourcentage de substitution (0,35, 0,38 et 0,44). Les résultats de caractérisation au cône de Marsh et au mini-cône sont regroupés dans le tableau 1.14 :

Tableau 1. 14 : les résultats de l'écoulement au cône de Marsh et l'étalement au mini-cône ([Belguesmia, 2018](#)).

			Temps d'écoulement pour (1000ml)	Etalement au mini-cône (cm)
Coulis N 1 témoin E/C=0,35		0,6% sika	1 min 39 sec	16
		0,8% sika	1 min 34 sec	19
		1,0% sika	1 min 30 sec	19,5
		1,2% sika	1 min 15 sec	/
		1,4% sika	1 min 14 sec	/
		1,6% sika	1 min 13 sec	/
Coulis N 2 témoin E/C=0,35		0,6% granitex	1 min 33 sec	14,5
		0,6% granitex	1 min 29 sec	15,5
		0,6% granitex	1 min 23 sec	16
		0,6% granitex	1 min 19 sec	18
Coulis N 3 15% de sédiments	E/L= 0,38	1,2% sika	6 min 58sec	16
		1,7% sika	3 min 38 sec	19
	E/L=0,38	1,6% sika	1 min 43 sec	17
		1,8% sika	1 min 39 sec	19
Coulis N 4 15% de sédiments E/L=0,38		2% granitex	1 min 52 sec	15,8
Coulis N 5 30% de sédiments E/L=0,44		1,6% sika	1 min 52 sec	16
		2% sika	1 min 52 sec	20
Coulis N 6 30% de sédiments E/L=0,44		2% granitex	1min38sec	16

D'après les résultats il remarque que pour le rapport $E/L=0,35$ le dosage de saturation pour les coulis témoins est de 0.6% avec l'adjuvant (Sika Tempo 12) et 0,8% avec l'adjuvant (Granitex Médaflow 113) ; et pour 15% de sédiments : Les dosages des deux adjuvants augmentent respectivement à 1,6% et 2% ; avec un rapport $E/L=0,38$ cause de la grande absorption d'eau. Les coulis à base de 30% requièrent un rapport $E/L=0,44$. Enfin, l'adjuvant (Viscocrete Tempo 12) offre plus d'efficacité pour compenser la perte de maniabilité due aux sédiments.

2.3.10 Comportement mécanique des mortiers à base de substitution des sédiments de dragage

Le comportement mécanique des mortiers à base des sédiments de dragage est mis en évidence, deux études sur des échantillons de sédiments de dragage des barrages sont présentés (Fergoug et K'sob) et deux autres études des échantillons de sédiments portuaires sont décrites (Dunkerque et Oran) : [Semcha \(2006\)](#) a élaboré un éco matériau à partir des sédiments calcinés de Fergoug et il a proposé des procédés de valorisation des sédiments. Il a comparé les valeurs des résistances obtenues par rapport au mortier témoin, et il a constaté que le mortier à base de pouzzolane naturelle a un comportement proche de celui à base de ciment seul. Sa substitution au ciment constitue une économie sans lui faire perdre les caractéristiques de résistance. Le mortier à base des sédiments calcinés aux courtes échéances présente de plus faibles résistances. Mais à 28 jours les valeurs obtenues dépassent celles de la pouzzolane naturelle, l'effet pouzzolanique se traduit par des résistances meilleures que celles du témoin. Ces sédiments peuvent trouver des applications aussi bien pour la production de ciment composé de type CEM II, que pour la fabrication de liants pouzzolaniques. Un meilleur comportement est observé pour la pouzzolane de synthèse à base des sédiments de Fergoug calcinés à 750°C (figure 1.29).

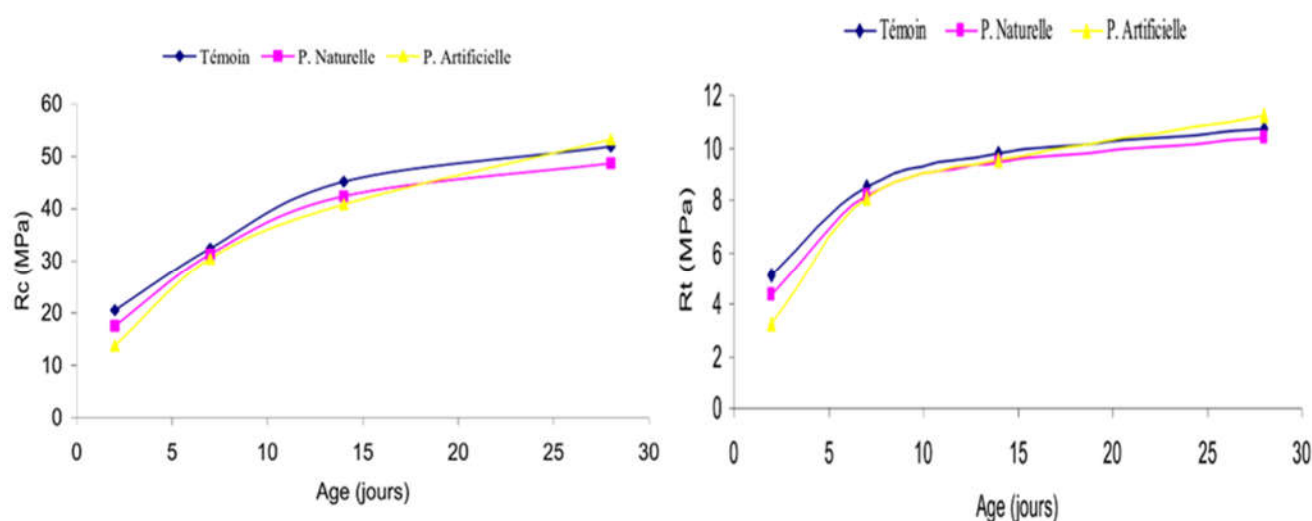


Figure 1. 29 : Résistances à la traction et à la compression des sédiments de Fergoug ([Semcha, 2006](#)).

Laoufi et al., (2016) ont mesuré les performances mécaniques de tous les mortiers incorporant différents taux de sédiments calcinés du barrage de Fergoug (10, 20, 30%). La figure 1.30 présente l'évolution des résistances mécaniques dans le temps, par rapport au mortier de référence. C'est la calcination à 750 °C qui donne les plus grandes résistances à la compression. Elles sont, pour des taux de substitution de 0, 10, 20 et 30 % égales à 48.3, 44.5, 43.21 et 40.61 MPa ; pour l'échéance 56 jours. Ces résultats montrent que les résistances mécaniques de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute de résistance. Il est clair de constater que même la substitution du ciment par un grand pourcentage de sédiments calcinés (30%), ne réduit pas considérablement sa résistance à la compression par rapport au mortier témoin. Les résistances mécaniques des mortiers contenant les sédiments calcinés sont satisfaisantes par rapport aux résistances atteintes par le mortier témoin formulé avec un CEM I pour les trois températures étudiées. Cependant les mortiers formulés avec des sédiments calcinés à la température de 750°C/3h, ont montré des performances mécaniques meilleures que pour des températures de 850 et de 950°C/3h.

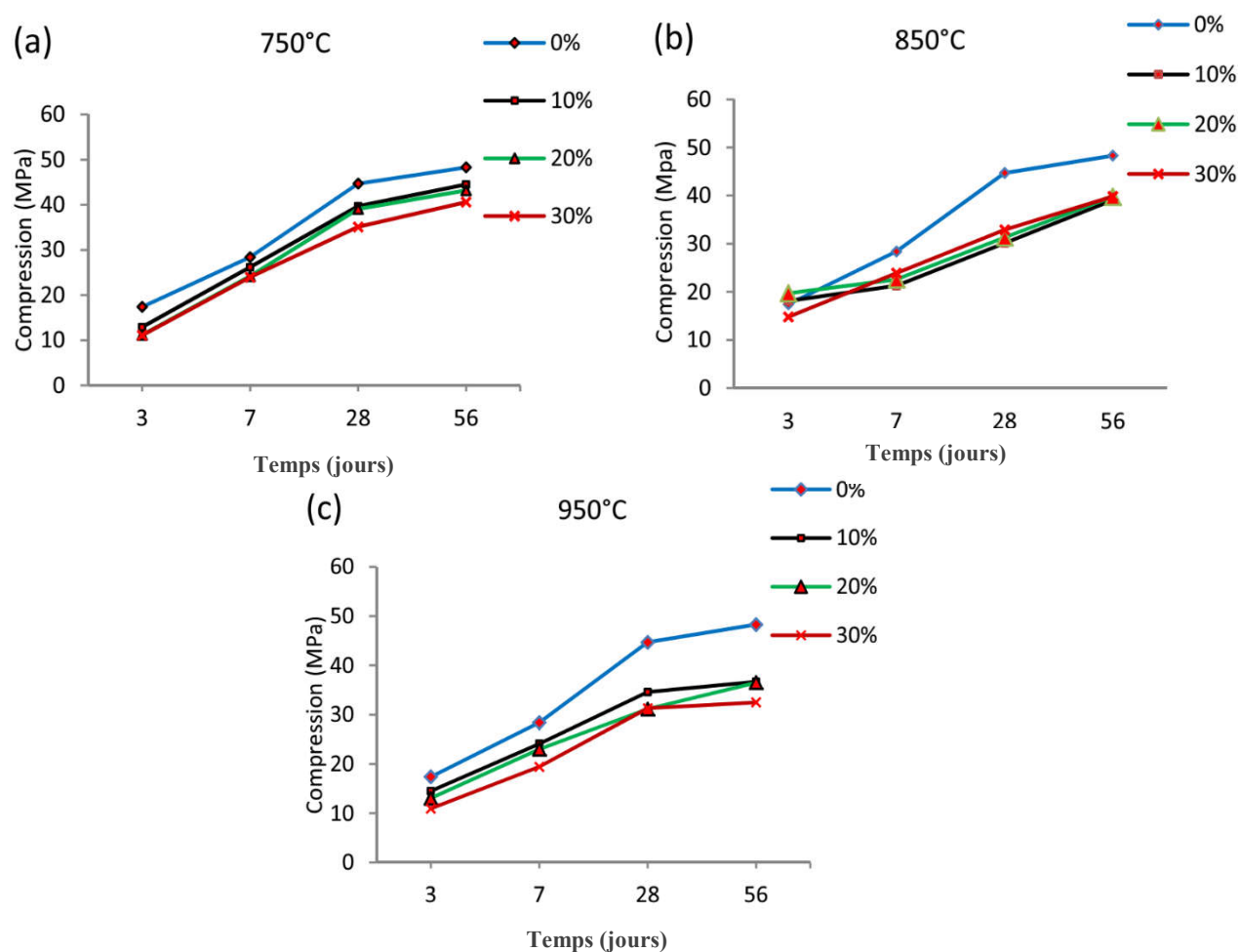


Figure 1. 30 : Résistances à la compression des mortiers à base de sédiments calcinés à 750°C, 850°C et 950°C (Laoufi et al., 2016).

Kazi Aoual-Benslafa et al., (2015) ont mis en évidence l'influence de l'effet de la substitution partielle du sable par les sédiments sur le comportement mécanique et la durabilité des mortiers. Sept séries de mortiers ont été réalisées : cinq séries pour déterminer les résistances à la compression, et deux séries pour déterminer la résistance à la compression résiduelle après attaque des acides. Ils sont nommés CM pour le mortier témoin, MPS5, MPS10, MS15, MS20, pour les mortiers contenant des pourcentages de 5%, 10%, 15% et 20% des sédiments traités en substitution partielle du ciment. Les résultats des résistances mécaniques des mortiers ont été donnés à la figure 1.31 Les valeurs de CM sont celles obtenues pour le mortier normal sans sédiments. L'évolution de résistance en compression des cinq séries de mortiers montre clairement que le comportement général observé est conforme à celui d'un mortier témoin. Les valeurs des résistances mécaniques des mortiers MPS5, MPS10, MPS15 et MPS20 sont inférieures à celles du mortier de référence (12%, 22%, 30% et 33%) jusqu'à l'âge de 90 jours. Le pourcentage de 5% semble le plus approprié à 90 jours. Les valeurs des résistances mécaniques de tous les mortiers diminuent avec l'augmentation du pourcentage des sédiments ; ce qui suggère qu'il y a eu une diminution associée du rapport eau-ciment. Cela pourrait être le résultat d'une absorption accrue de l'eau de gâchage par les sédiments en raison de leur surface spécifique élevée.

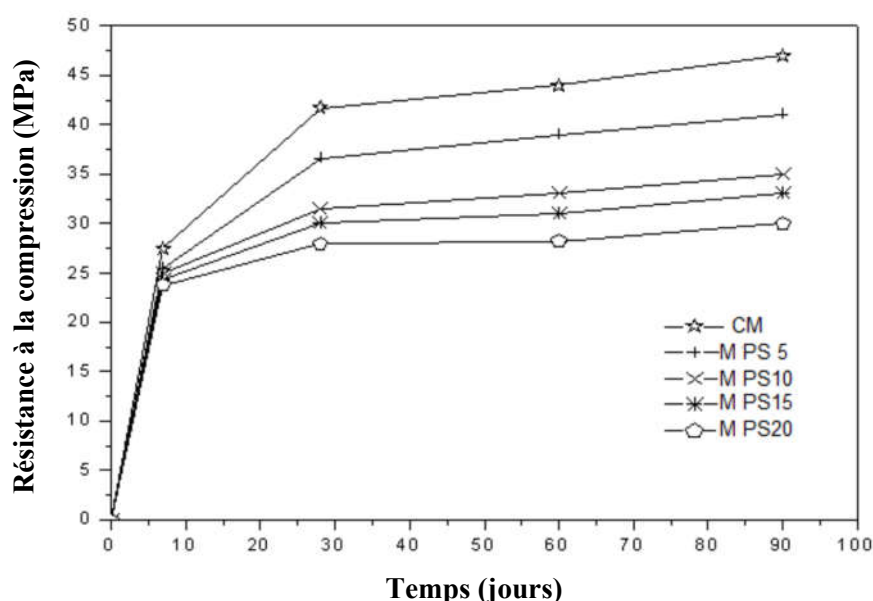


Figure 1. 31 : Courbes de résistance à la compression de différents mortiers (Kazi Aoual-Benslafa et al., 2015).

Benzerzour et al., (2017b) ont comparé le comportement mécanique des différents mortiers à base des sédiments portuaires traités de Dunkerque. Quatre mortiers ont été confectionnés. Un mortier de référence (RM) a été préparé conformément à la norme avec la norme française NF EN 196-1. Les autres mortiers contenaient des sédiments calcinés : 10% (MSC10), 20 % (MSC20) et 30 % (MSC30). Le rapport eau/liant total ($E/L=0,5$) a été maintenu constant pour

toutes les formulations. Les résultats des résistances en traction par flexion et compression ont montré que les mortiers de 10% (MSC) et 20% (MSC20) de taux de substitution sont équivalents aux résultats du mortier de référence (RM) (Figure 1.32). Les échantillons de MSC30 ont montré une baisse considérable de la résistance d'environ 20 %. En outre, les essais de compression ont montré que la résistance à la compression du MSC10 était de 10% plus élevée après 7 jours et 15% plus élevée après 28 jours que le mortier de référence (RM). Ce qui a été confirmé par les résultats des essais de 60 jours. Ces effets physiques positifs pourraient être le résultat de l'impact des sédiments calcinés servant de nucléation pour les hydrates pendant la formation de la tobermorite calcium gel de silicate hydraté (CSH). Le traitement thermique devrait développer des effets pouzzolaniques importants utilisés dans une matrice de ciment. Les sédiments fins qui contiennent une fraction d'argile faiblement cristallisée pourraient présenter une activité pouzzolanique relativement élevée.

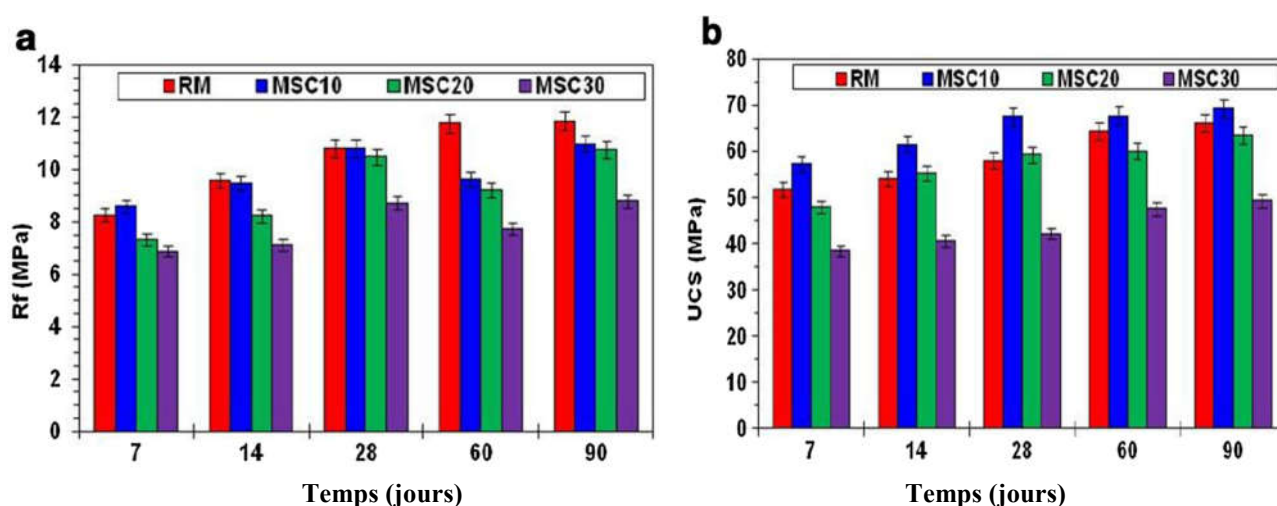


Figure 1. 32 : Résistance mécanique : a) résultats des essais de flexions en 3 points et b) résultats des essais de compressions (Benzerzour et al., 2017b).

Chikouche et al., (2016) ont suivi les résistances mécaniques des mortiers normalisés préparés avec le CEMI et les ciments modifiés jusqu'à l'âge de 90 jours contenant des sédiments du barrage de K'sob, pour un indice de résistance à la compression (IRC) défini comme le rapport entre la résistance à la compression du mortier de ciment modifié et la résistance à la compression du mortier de ciment. L'évolution de l'indice de résistance à la compression (IRC) en fonction de l'âge est illustrée dans la figure 1.33. Ils ont pu observer que la résistance à la compression augmente linéairement avec l'âge du mortier, et que la résistance à la compression des mortiers fabriqués à partir de mortiers avec du ciment modifié n'atteignent pas le niveau du mortier CEMI, à 28 jours. La résistance à la compression la plus élevée est attribuée au mortier fabriqué avec MC800/20 (IRC = 0,98) ; alors que le plus bas est celui fabriqué avec MC800/20 attribué au mortier MC700/5 (IRC = 0,80). Pour les mortiers fabriqués avec du ciment modifié avec les sédiments traités thermiquement à 600°C, la résistance à la compression la plus élevée

est obtenue pour MC600/20 avec ($IRC = 0,87$). Cependant, à 90 jours, une amélioration de la résistance du MC600/20 ($CSI = 0,89$) ; tandis qu'une diminution de la résistance est observée pour le mortier MC800/20 ($CSI = 0,91$). Le meilleur indice à caractère pouzzolanique à long terme est attribué au MC600/20. Le traitement thermique des sédiments étudiés à 700°C à $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ et $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ conduit aux résistances mécaniques les plus faibles. Cela peut s'expliquer par le changement morphologique survenu au cours de la période de la transition de la kaolinite à la métakaolinite. Les cycles de traitement peuvent être affectés à la dissolution et à la décalcification du gel C-S-H, à la dissolution de la portlandite et à la formation du monocarboaluminate.

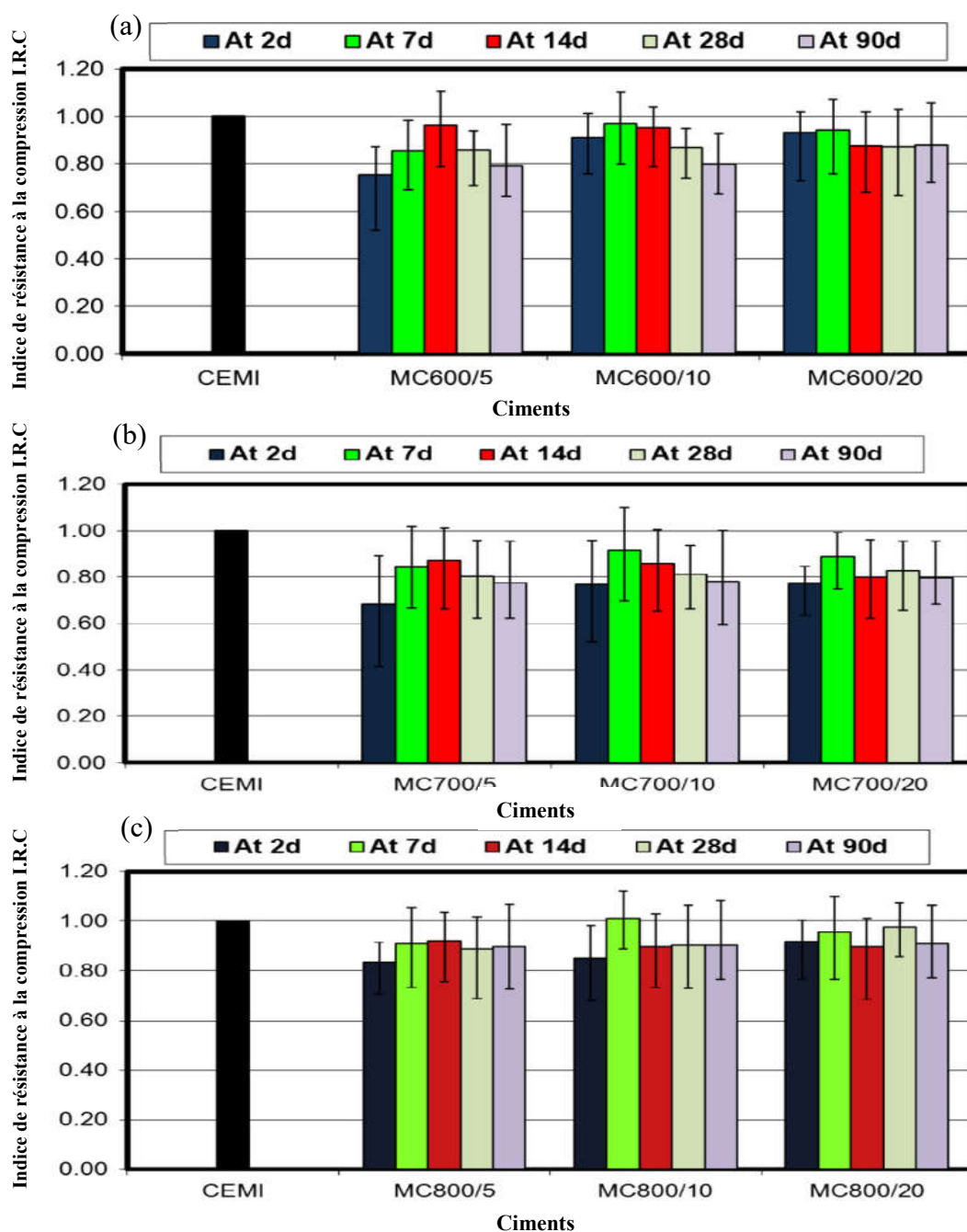


Figure 1. 33 : résistance relative à la compression à différents âges en fonction du taux de traitement thermique ; a) 600°C , b) 700°C et c) 800°C (Chikouche et al., 2016).

2.3.11 Comportement mécanique des matériaux à base de substitution des sédiments calcinés vis-à-vis des différentes températures de cure

Une étude de l'effet des températures de cure a été trouvée sur le béton à base de sédiments calcinés du barrage de K'sob. Dans cette étude [Siline et al., \(2013\)](#) ont étudié l'effet de l'exposition des bétons formulés à partir du ciment modifié (substitution à base des sédiments calcinés du barrage de K'sob) à plusieurs températures. Un seul béton a été analysé avec un taux de substitution de 10% (B1). Il a été étudié à des températures de (5°C, 30°C et 60°C). Deux types de béton avec un taux de substitution de 0% (béton témoin B) et de 10% (béton B1) ont été étudiés à des hautes températures (100°C, 300°C, 500°C et 1000°C). Les résultats de cette étude ont montré que l'augmentation des résistances mécaniques apparaissent sous l'effet des différentes températures au cours du temps (figure 1.34). À 5°C elles sont les plus faibles et à 60°C les résistances mécaniques de béton (B1) augmentent pour atteindre un seuil à 30 jours ; au-delà du quel aucune évolution n'est observée. A long terme l'exposition du béton (B1) à 30°C conduit à la résistance mécanique la plus élevée. La température accélère significativement l'hydratation du ciment qui plafonne à long terme. Le béton formulé à partir du ciment modifié présente une meilleure résistance aux hautes températures. Cela peut être attribué à la présence des sédiments calcinés. A 100°C les deux bétons présentent une très faible chute de résistance comparée à la température ambiante. A 300°C les chutes, de résistance atteignent 16%. A 500°C la résistance du béton témoin atteint 58,5%. La résistance du béton avec 0,5% d'adjuvant augmente et approche celle obtenue à température ambiante. A 1000°C la perte en résistance est de 77% pour le béton témoin et de 27% pour le béton avec adjuvant.

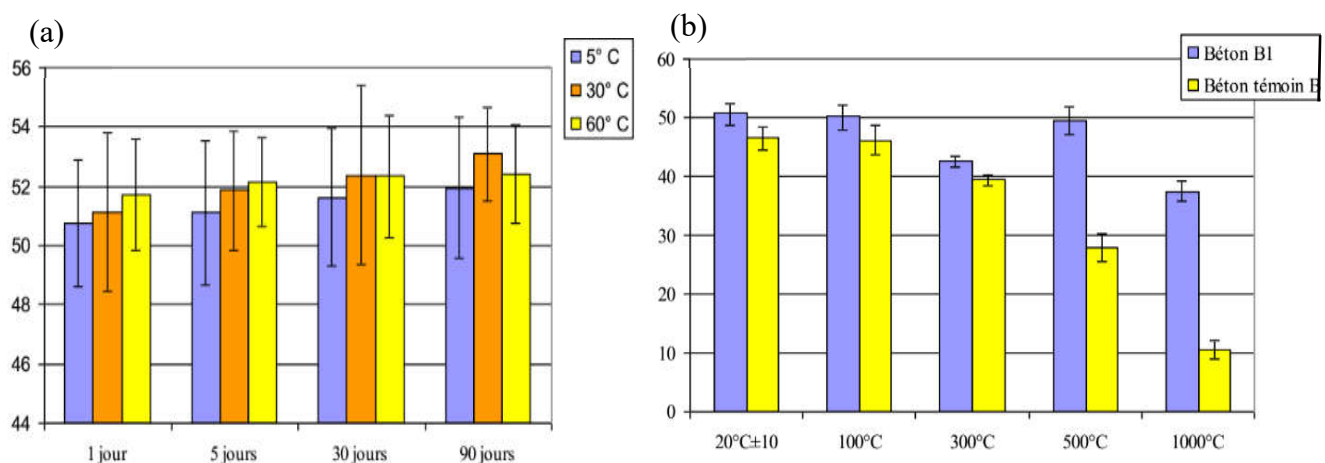


Figure 1.34 : (a) Evolution de la résistance sous l'effet des températures ; (b) Résistances obtenues sous des hautes températures en MPA ([Siline et al., \(2013\)](#)).

Une autre étude a été réalisée par [Tahlaiti et al., \(2014\)](#). Ils ont étudié l'effet des températures de cure sur l'hydratation et la résistance à la compression de quatre mortiers avec substitution

partielle par le méta kaolin (MK), MK0, MK5, M15 et MK25 ; avec un remplacement de 0, 5, 15 et 25 % (en poids). Ils ont été démoulés avec soin et scellés avec du papier collant en aluminium, puis placés à différentes températures de cure (10, 20, 40°C). Les résultats de cette étude illustrés dans la figure 1.35, montrent que les résistances relatives à la compression à 10°C pour le mortier MK15 atteint 20% de plus que le mortier de référence à 90j. Le taux optimal est de 15% de MK (figure 1.35 (a)). La résistance à la compression à 20°C pour les mortiers MK0, MK5, MK15 et MK25 n'est améliorée qu'à partir de 14 j. Cette augmentation est de 6 à 27% par rapport à la résistance des mortiers référence MK0. Le taux de substitution optimale à 20°C est de 25 % (Figure 1.35 (b)). L'incorporation de MK améliore les performances mécaniques dès le plus jeune âge à 40°C. Après 3 jours, les résistances des mortiers à base de métakaolin MK5 et de MK15 sont similaires à ceux du mortier de référence MK0 à partir de 3j. MK5 a une résistance plus faible jusqu'à 14 j. Le taux optimal est de 15% de MK (20% de plus) (Figure 1.35 (c)).

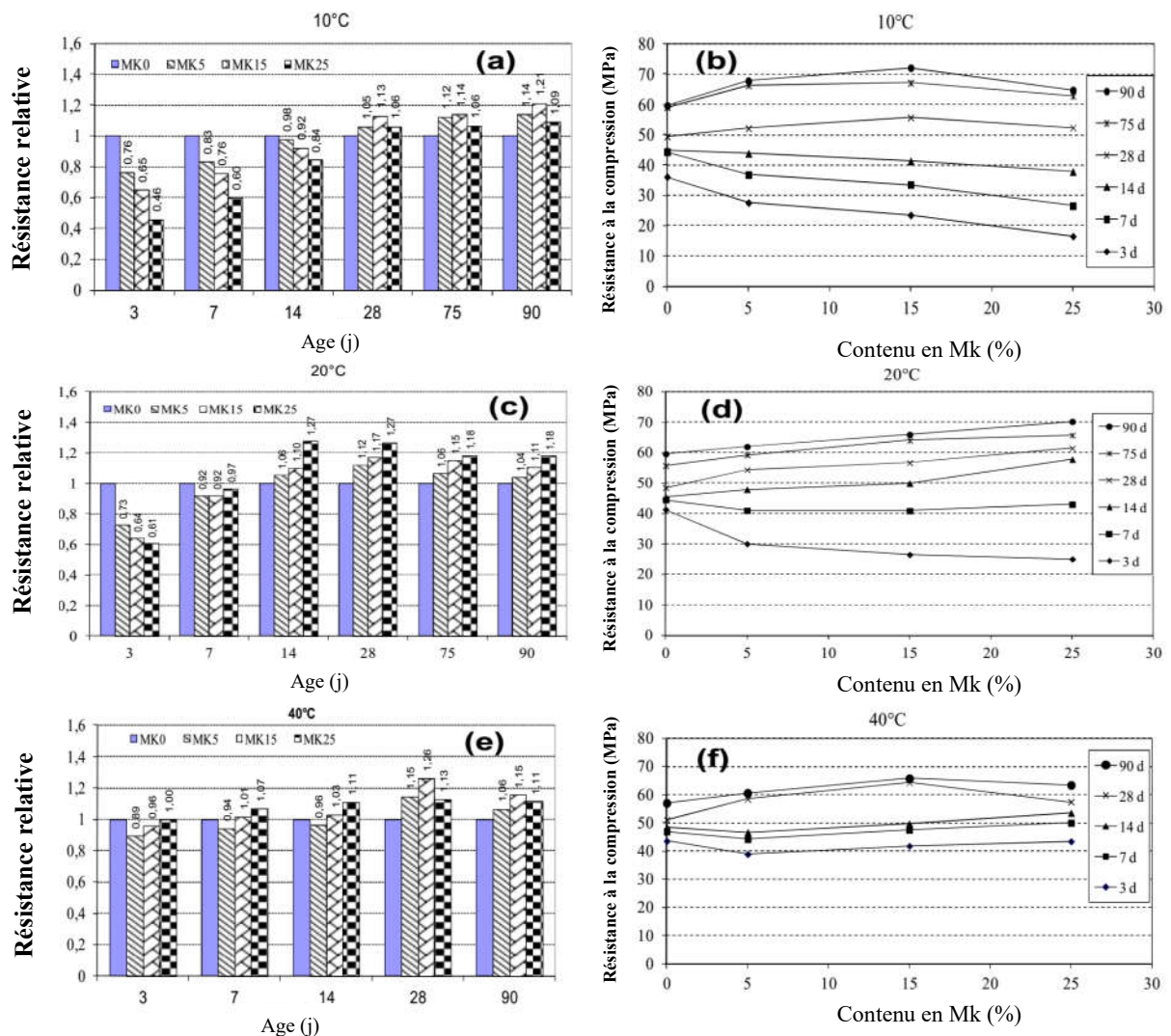


Figure 1. 35 : Résistance à la compression et résistance relative des mortiers (MK0, MK5, MK15 et MK25) durcis à différentes températures de cure de : (a) à 10°C, (b) à 20°C et (c) à 40°C (Tahlaiti et al., 2014).

2.4 CONCLUSION

Ce chapitre a mis en évidence les différents travaux réalisés à ce jour pour étudier la possibilité et la faisabilité technique de valoriser ces sédiments calcinés comme substitution partielle au ciment, ainsi que la caractérisation et l'activation thermique de ces sédiments de dragage. Les propriétés mécaniques et l'effet des températures de cure vis à vis du comportement mécanique des mortiers et bétons ont été étudiées. Plusieurs études ont porté sur l'influence des températures d'activation thermique des sédiments sur le comportement mécanique, en variant les températures de cuisson et le temps de cuisson. Par contre peu de travaux existent dans la littérature sur l'effet des températures de cure sur le comportement mécanique. L'objectif de ce travail portait sur le comportement mécanique des mortiers à base des sédiments calcinés du barrage de Chorfa II de la wilaya de Mascara vis-à-vis des températures de cure sèche et la comparaison des résultats des études faites auparavant sur le méta kaolin.

CHAPITRE

ANALYSE DU CYCLE DE VIE : OUTIL

D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE

3

SOMMAIRE

3.1	INTRODUCTION	53
3.2	METHODES D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE	53
3.3	BREF HISTORIQUE DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE.....	54
3.4	DEFINITION ET PRINCIPE DE L'ACV.....	55
3.4.1	Définition.....	55
3.4.2	Méthodologie de l'ACV	56
3.4.3	Les méthodes d'évaluation d'impacts et logiciels d'ACV	64
3.5	ETAT DE L'ART DE L'ACV.....	68
3.6	CONCLUSION.....	71

3.1 INTRODUCTION

Aujourd'hui, les enjeux environnementaux prennent une place importante dans les prises de décisions politiques, industrielles et économiques. Le respect de l'environnement permet la préservation des richesses aux générations futures. Le concept du développement durable devenu sujet d'actualité ; repose sur trois piliers : l'économie, l'environnement et le social. Il concrétise les paroles par des actes par la réduction des impacts environnementaux et préserve la planète. Ce chapitre présente l'analyse du cycle de vie (ACV) qui est un outil d'analyse environnementale quantitatif et comparatif. Il explique le cadre méthodologique de l'ACV et le compare à d'autres méthodes d'analyse environnementale. Des exemples d'études d'analyses du cycle de vie des sédiments à travers le monde seront présentés.

3.2 METHODES D'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE

Plusieurs méthodes sont disponibles pour l'évaluation, l'analyse et le benchmarking des impacts environnementaux d'un produit, d'un processus ou d'une chaîne de processus et de

systèmes ([Finnveden and Moberg, 2005](#); [Galvez-Martos and Schoenberger, 2014](#); [Jolliet et al., 2010](#); [Ness et al., 2007](#)). On peut citer :

- L'analyse du cycle de vie (ACV).
- L'analyse des flux d'une substance (AFS).
- L'étude d'impact environnemental (EIE).
- L'analyse de risque (AR).
- L'analyse de flux de matière (AFM).
- Le bilan carbone (BC).

3.3 BREF HISTORIQUE DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE

En 1960, les premiers travaux de l'ACV sont menés par ([Boustead, 1996](#); [Hunt et al., 1996](#)) respectivement au Royaume-Uni (UK) et aux Etats-Unis d'Amérique (USA). En 1969, la première étude multicritères d'ACV a été réalisée par Harry E., Teastley Jr pour le compte de Coca-Cola. Cette étude ne fut jamais publiée de façon intégrale. Seul un résumé en avril 1976 a été présenté dans "Science Magazine". Elle présente une évaluation environnementale comparative entre la bouteille en verre et en plastique, de l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie. Les résultats de cette étude ont montré que le bilan de la bouteille en plastique est moins impactant que celui de la bouteille en verre.

A l'issue de cette étude, un référentiel d'évaluation environnementale est dénommé Analyse des Ressources et du Profil Environnemental (ARPE) basé sur l'approche de Harry E., Teastley Jr ([Svoboda, 1995](#)). Une quinzaine d'études ont été menées avec ce référentiel. Le premier choc pétrolier en 1973 a fait prendre conscience de la problématique de gestion des ressources énergétiques devenue une évidence ([Leontief, 1986](#)).

Les années 1980 marquent l'apparition des premières données de bilans écologiques qui sont fournies par l'OFEFP (Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage) ([BUS, 1984](#)). Jusqu'au début des années 1990, [Heijungs et al., \(1992\)](#) ont proposé un guide appelé "Environmental Life Cycle Assessment of Prodducts", publié par le centre des sciences de l'environnement (CML) de l'université Leiden aux Pays Bas. Ils proposent une nouvelle approche d'évaluation des impacts environnementaux et la publication de "The LCA Sourcebook" en 1993. En même temps, la Société de Toxicologie et de Chimie Environnementale (SETAC) a contribué à l'évolution de la méthode et a édité un guide pour la réalisation de l'ACV ([SETAC, 1994](#)). Dans cette période ont été créés les premiers logiciels permettant de lier les inventaires (Input/Output) de matières et les méthodes de calcul d'ACV.

En 1997, la première norme internationale donnant un cadre structuré de l'ACV est éditée (ISO 14040 :1997) et rapidement suivie par l'ISO 14041, 14042 et 14043 (ISO 14043 :1998 ; ISO14043 :1999). Depuis le début des années 2000, la méthodologie d'ACV sera mise à jour et regroupée dans la norme ISO14040 et ISO14044 (ISO 14040 :2006 ; ISO 14044 :2006). D'autre part ; la méthodologie intègre le calcul d'incertitude et de sensibilité, et voit l'évolution des bases de données d'inventaires et des méthodes de calcul.

3.4 DEFINITION ET PRINCIPE DE L'ACV

3.4.1 Définition

L'Analyse de cycle de vie (ACV) est la méthode la plus répandue pour l'évaluation des performances environnementales d'un produit, d'un service ou d'un système tout le long de son cycle de vie (Guinee, 2002; Hauschild and Wenzel, 1998; Hendrickson et al., 2006; Jolliet et al., 2010). Elle est une méthode multicritère et multi étapes. Elle se base sur la notion du développement durable tout le long du cycle de vie du produit ou du service. Une quantification des entrants et des sortants (consommations des ressources, émission dans l'air, l'eau, sol, etc.) est réalisée à partir de l'extraction des matières premières jusqu'à son traitement en fin de vie. L'ACV constitue un outil d'aide à la décision qui répond au besoin d'identifier les actions à engager en priorité, notamment quand les dirigeants ne sont pas prêts à investir dans les problématiques environnementales. L'analyse de cycle de vie (ACV) est la méthodologie de référence la plus complète pour réaliser l'inventaire des flux ; quantifier et évaluer les impacts environnementaux d'un produit ou service selon la série de norme ISO14040-14044, Elle comprend 4 étapes (Jolliet et al., 2010) :

- a) La définition des objectifs et du système d'étude.
- b) L'inventaire du cycle de vie des émissions et des extractions.
- c) L'évaluation des impacts environnementaux.
- d) L'interprétation des résultats.

Le tableau 1.15 illustre la méthodologie d'ACV qui résulte de l'évaluation continue d'une série de normes (Série des normes ISO 14040).

Il est important de préciser que l'ACV permet la quantification des impacts environnementaux tout le long du cycle de vie du produit ou du processus qui contribuent directement ou indirectement sur la fabrication du produit. L'objectif de cette méthode est d'éviter les déplacements de pollutions (Matthew J et al., 2011). Par contre l'ACV permet de

quantifier les impacts potentiels et non réels qui dépendent des hypothèses proposées lors de la définition de l'unité fonctionnelle et le périmètre d'étude. Cela risque fortement d'influencer les résultats obtenus et des interprétation erronées (Rogers et al., 2008). L'absence des données fiables à cause de la confidentialité et l'inexistence des données dans certains domaines implique une simplifications dans l'inventaire et l'utilisation des données génériques ou bibliographiques simples (Benoît-Norris et al., 2011).

Tableau 1. 15 : Document normatif relatif à l'ACV (Laratte, 2013).

Numéro	Type	Intitulé	Année
14040	ISO	Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre	1996, 2006
14041	14041	Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse de l'inventaire	1998
14042	ISO	Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Évaluation de l'impact du cycle de vie	2000
14043	ISO	Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Interprétation du cycle de vie	2000
14044	ISO	Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices	2006
14047	Rapport technique	Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exemples illustrant l'application de l'ISO 14044 à des situations d'évaluation de l'impact du cycle de vie	2003, 2012
14048	Rapport technique	Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Format de documentation de données	2002
14049	Rapport technique	Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exemples illustrant l'application de l'ISO 14044 à la définition de l'objectif et du champ d'étude et à l'analyse de l'inventaire	2000, 2012

3.4.2 Méthodologie de l'ACV

La description de la méthode d'ACV est détaillée dans les deux séries des normes ISO 14040 et ISO 14044. Selon la définition des normes ISO l'analyse du cycle de vie s'effectue en quatre phases : la définition des objectifs et du champ de l'étude, l'inventaire des émissions et des extractions, l'analyse de l'impact et l'interprétation du cycle de vie. Les principales étapes de l'ACV sont représentées dans la figure 1.36.

3.4.2.1 Définition des objectifs et champs d'étude de l'ACV

Cette étape consiste à décrire le contexte de l'étude permettant de poser le problème, de définir le cadre d'application. Elle décrit la fonction étudiée et l'unité fonctionnelle qui

représente cette fonction. Elle présente le champ d'étude et les limites les frontières du système étudié. La norme ISO 14044 donne les différents critères à renseigner pour définir au mieux le système évalué.

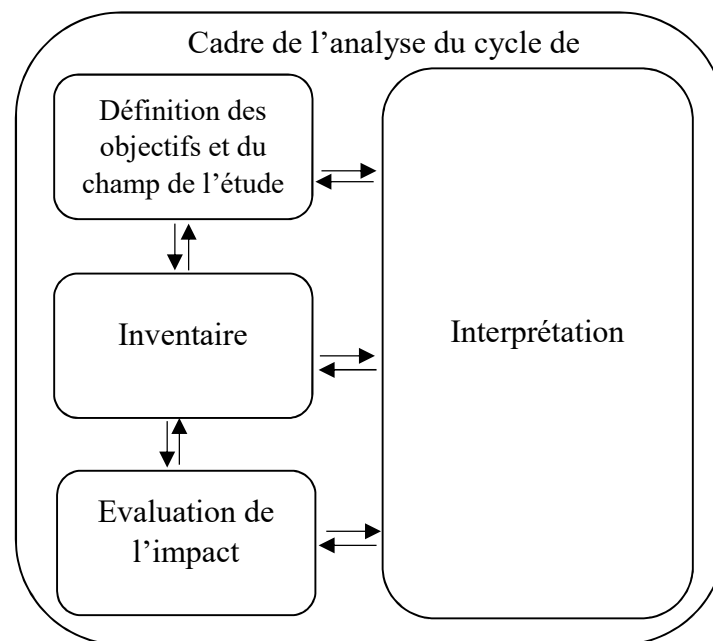


Figure 1. 36 : Principales phases d'une ACV (ISO 14040 :2006).

3.4.2.1.1 Objectif de l'étude

Comme l'explique la norme ISO 14040 [ISO, 2006] : La définition des objectifs d'une ACV doit indiquer sans ambiguïté les éléments suivants :

- L'application envisagée ;
- Les raisons conduisant à réaliser l'étude.
- Le public concerné, c'est-à-dire les personnes auxquelles il est envisagé de communiquer les résultats de l'étude ;
- S'il est prévu que les résultats seront utilisés dans des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public."

Une revue critique est nécessaire en cas d'une ACV comparative si l'étude est destinée au grand public.

3.4.2.1.2 Champ de l'étude

La définition du champ de l'étude d'une ACV doit prendre en compte les éléments décrits dans la norme ISO 14040 [ISO, 2006] :

- Le système de produits à étudier ;

- Les fonctions du système de produits ou des systèmes dans le cas d'études comparatives ;
- L'unité fonctionnelle ;
- La frontière du système de produits ;
- Les règles d'affectation ;
- Les catégories d'impact sélectionnées et la méthodologie de l'évaluation de l'impact, et l'interprétation ultérieure à utiliser ;
- Les exigences relatives aux données ;
- Les hypothèses et limitations ;
- Les exigences initiales de qualité des données ;
- Le type de revue critique, le cas échéant ;
- Le type et le format du rapport spécifié pour l'étude."

A cette étape, il est nécessaire que l'ensemble des éléments soient suffisamment complets pour que les résultats de l'ACV répondent aux objectifs de l'étude. Si l'obtention de plus d'information est possible, il est souhaitable d'élargir les objectifs de l'étude. L'ensemble des flux élémentaires du système doit être pris en compte pour élaborer un bilan environnemental réel du cycle de vie étudié. Un flux ou procédé dont les impact environnementaux totaux n'excèdent pas un pourcentage de 5% du produit étudié. Ce procédé unitaire peut être négligé (Jolliet et al., 2010).

3.4.2.1.3 L'unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle est la performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence (ISO 14040). L'unité fonctionnelle joue un rôle essentiel pour comparer deux produits ou deux systèmes sur une même échelle de service rendu, les fonctions entre les deux produits ou systèmes évalués doivent être les mêmes. Elle traduit aussi les caractéristiques et performances du produit ou systèmes évalués. Le flux de référence est déterminé selon le nombre de produits ou systèmes nécessaires pour répondre à la fonction. Les données qui seront collectées lors de l'inventaire seront associées à l'unité fonctionnelle (Cooper, 2003).

3.4.2.1.4 Frontière du système

Les frontières du système permettent de définir le cycle de vie du produit, ainsi que les différents flux à chaque étape. Deux flux ont été identifiés (Figure 1.37) :

- Les flux élémentaires : “matière ou énergie entrant dans le système étudié, qui a été puisée dans l’environnement sans transformation humaine préalable, ou matière ou énergie sortant du système étudié, qui est rejetée dans l’environnement sans transformation humaine ultérieure” [ISO14040 :2006, 2006].
- Les flux intermédiaires : “flux de produit, matière ou d’énergie intervenant entre des processus élémentaires du système de produits étudiés” [ISO14040 :2006, 2006].

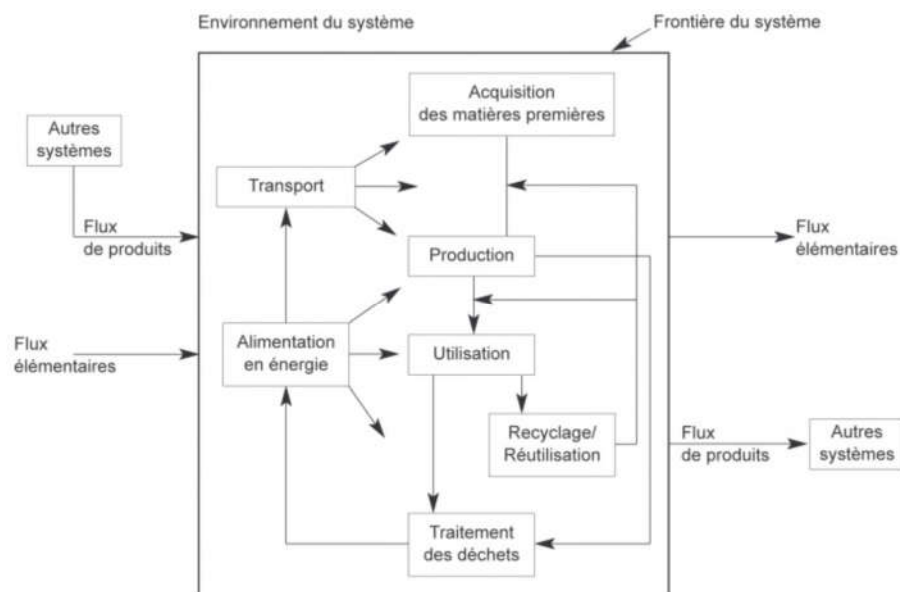


Figure 1. 37 : Exemple de frontière d’un système [ISO14040 :2006, 2006].

L’ensemble des quantités renseignées est ramené à l’unité fonctionnelle choisie ainsi qu’à son flux de référence. Pendant cette étape, il est possible d’identifier des indicateurs de flux, comme l’énergie consommée (bilan énergétique), la consommation d’eau, etc.

3.4.2.2 Analyse de l’inventaire en cycle de vie (ICV)

La phase de l’ICV comprend la collecte de données nécessaires pour la qualification et la quantification de chaque flux d’entrée et de sortie relatif au produit étudié. C’est un processus en général itératif. L’ensemble des flux est caractérisé par leurs natures et qualités des données collectées pour leur bilan, le mode d’acquisition et le degré de représentativité. Ce bilan (énergie-matière) est normalisé par rapport à l’unité fonctionnelle ([Basset-Mens, 2005](#)).

3.4.2.2.1 Collectes des données

Les données collectées concernent l’ensemble des flux identifiés à l’intérieur des frontières du système. On y retrouve les catégories suivantes [ISO14040 :2006, 2006] :

- “Intrants énergétiques, intrants de matières premières, intrants auxiliaires, autres intrants physiques ;
- Produits, coproduits et déchets ;
- Émissions dans l’air, l’eau et le sol ;
- Autres aspects environnementaux.”

Cette étape est la plus complexe. Il est important de bien répertorier l’ensemble des flux quantifiés et la procédure d’obtention de ces données.

3.4.2.2.2 *Calcul des données*

Le calcul des flux des données doit être précisé selon la norme [ISO14040 :2006, 2006] :

- “La validation des données collectées,
- La relation des données avec les processus élémentaires, et
- La relation des données avec le flux de référence de l’unité fonctionnelle”.

3.4.2.2.3 *Affectation des flux et des émissions*

A cette phase, il est nécessaire de faire une affectation des flux, parce qu’il est rare qu’une industrie ne fabrique qu’un seul produit. Dans le cas d’un procédé qui génère des produits multiples, il est nécessaire d’attribuer des affectations aux différents produits des consommations et rejets du procédé par : la modélisation de l’ensemble du système pour limiter les hypothèses et les erreurs et les discussions possibles, et de soustraire les impacts générés par un produit équivalent au co-produit non étudié. Ou bien d’essayer de trouver des liens entre les co-produits (masse, volume, énergie, économique, ...)(Jolliet et al., 2010).

3.4.2.3 *Qualité des données*

La pertinence des résultats d’une étude d’ACV dépend fortement de la qualité des données utilisées, car ces données ont été toujours une limite pour l’élaboration de l’inventaire d’ACV au niveau d’acceptation des résultats et conclusion ci-rattachés (Canter et al., 2002; Coulon et al., 1997).

Dans le cas d’une ACV comparative, il est impératif que l’ensemble des données soient renseignés. Mais il est courant que certaines données soient manquantes. Pour tout manque, il est donc nécessaire de bien justifier la non prise en compte de certains éléments (nomenclatures, flux, ...). Pour une ACV comparative, Il existe en effet souvent une grande asymétrie d’information entre le produit du commanditaire de l’étude, et l’autre produit (un produit concurrent par exemple). L’analyste se retrouve souvent avec deux niveaux d’information : d’une part celle du commanditaire (en général l’industriel), où des données

relativement exhaustives en termes de consommations, émissions, rejets, flux et cycle de vie, sont disponibles et, d'autre part des données souvent estimées pour l'autre produit à cause des données génériques issues de bases diverses (Laratte, 2013) et (de Haes et al., 1999; Guinée et al., 2002). Une analyse d'incertitude des données est nécessaire, en cas d'inexactitude des données ou en absence des données spécifiques non représentatives.

3.4.2.4 *Evaluation des impacts environnementaux (Analyse en cycle de vie des impacts (ACVI))*

Cette étape consiste à traduire les consommations des matières premières et l'énergie et les rejets des émissions recensés lors de l'inventaire en impacts environnementaux (Effet de serre, acidification, eutrophication, ...). Ces impacts doivent représenter les performances environnementales du système étudié, en reliant les données de l'inventaire avec les catégories d'impacts (Guinée et al., 2002). Le cadre méthodologique de l'ACV suit trois étapes dans l'analyse de l'impact : la classification des émissions et des extractions, la caractérisation intermédiaire et la caractérisation des dommages (Jolliet et al., 2010; Toffoletto et al., 2005).

La figure 1.38 représente le schéma général du cadre méthodologique, qui lie tous les résultats d'inventaires aux catégories intermédiaires (problèmes) et dommages (Jolliet et al., 2010).

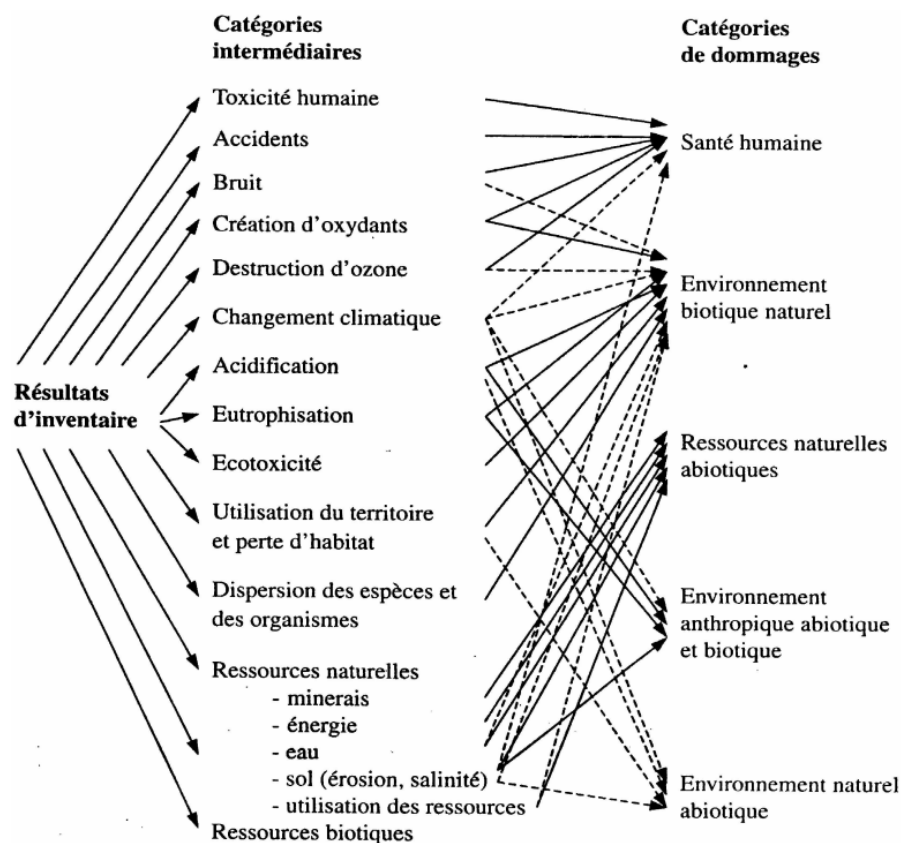


Figure 1. 38 : Structure générale des catégories intermédiaires (problèmes) et dommages (Jolliet et al., 2010).

3.4.2.4.1 Les étapes de l'analyse des catégories d'impacts

Cette étape consiste à présenter les catégories d'impacts ainsi que les modèles de caractérisation dans l'étude.

a) -Classification : Une définition des catégories d'impacts environnementaux intermédiaires aux types de problèmes environnementaux. Les émissions et substances sont classifiées dans des indicateurs d'impacts, chaque substance identifiée pouvant contribuer à plusieurs catégories.

b) – Caractérisation intermédiaire : dans cette étape les masses des émissions et des extractions sont multipliées par des facteurs de caractérisation intermédiaire puis sommées, pour fournir un score d'impact intermédiaire, Ils sont exprimés en Kg équivalents d'une substance de référence, la formule générale d'un calcul d'impact est donnée par l'équation 3.1 (Jolliet et al., 2010):

$$SI_i = \sum FI_{s,i} \cdot M_s \quad (1.5)$$

Avec :

- SI_i : Score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie i ,
- $FI_{s,i}$: facteur de caractérisation intermédiaire de la substance s dans la catégorie intermédiaire i ,
- M_s : Masse émise ou extraite de la substance s .

c) – Caractérisation des dommages : la caractérisation des dommages permet de quantifier les dommages engendrés par unité des facteurs de caractérisation de dommages, et de les multiplier par les scores d'impacts intermédiaires ; pour avoir le score de caractérisation de dommage dans chaque catégorie de dommages. La formule générale d'un calcul d'impact est donnée par l'équation 3.2 (Jolliet et al., 2010) :

$$SD_d = \sum_i FD_{i,d} \cdot SI_i \quad (1.6)$$

Avec :

- SD_d : score de caractérisation de dommages pour la catégorie d ,
- $FD_{i,d}$: facteur de caractérisation de dommages reliant la catégorie intermédiaire i à la catégorie de dommage d .

3.4.2.4.2 Catégories d'impact

Afin de réaliser l'évaluation des impacts, la réflexion sera basée sur 4 indicateurs :

- Le potentiel de réchauffement climatique ; en kilogramme de dioxyde de carbone. Cet indicateur exprime le potentiel d'effet de serre qui contribue à l'absorption atmosphérique par rayonnement infra-rouge des dérivés des gaz : CH₄, CO₂ et N₂O. Le calcul repose sur le modèle de caractérisation développé par l'Intergouvernemental Panel on Climate Change (IPCC) et repris dans la méthode CML. Ce modèle contribue directement au potentiel de réchauffement climatique global (Global Warming Potential) à un horizon de 100ans ([Hauschild and Potting, 2005](#)).
- Le potentiel d'acidification : en kilogramme équivalent de dioxyde de soufre. Cet indicateur exprime le potentiel d'acidification qui fait référence au problème de « pluies acides ». Il réduit la productivité des écosystèmes naturels (forêts) ou artificiels (cultures). Le calcul se base sur la méthode CML ([Guinée et al., 2002](#)).
- Le potentiel d'ozone troposphérique : en kilogramme équivalent de composés organiques volatiles non méthaniques (COVNM). Cet indicateur exprime le potentiel de formation d'ozone troposphérique (Photochemical Ozone Creation Potential) au niveau du sol qui engendre des problèmes sur la santé humaine et provoque le smog d'été. Le calcul se base sur la méthode CML. ([Osman and Ries, 2007](#)).
- L'indicateur d'épuisement des ressources : Dépense d'énergie cumulée (DEC) en mégajoules (MJ). Cet indicateur mesure la quantité totale d'énergie primaire nécessaire à la production d'un produit ou d'un service tout le long de son cycle de vie. La consommation d'énergie s'exprime en PCI (pouvoir calorifique inférieur). Le calcul de cet indicateur prend en compte l'énergie des ressources renouvelables et non renouvelables ([Klöpffer and Grahl, 2014](#)).

3.4.2.5 *Interprétation des résultats*

L'étape d'interprétation consiste à analyser la fiabilité des différents résultats obtenus. Elle doit répondre aux hypothèses telles que l'unité fonctionnelle, les objectifs et le champ de l'étude ; afin de proposer des recommandations qui leur soient appropriées. Il est également important d'identifier les solutions pertinentes pour reconcevoir le produit en fonction de la qualité des données, avec possibilité de faire des analyses de sensibilité et d'incertitude. Elle permet de valider et d'identifier les différentes étapes éventuelles des problèmes rencontrés dans cette étude. Cette phase a aussi pour but de montrer les limites et les vulnérabilités de l'étude. Les données manquantes, incomplètes, ou de ressources ou de qualité incertaine doivent être identifiées et justifiées. Dans cette phase, se fait la recherche des pistes

d'amélioration, pour déterminer les perspectives futures (Laratte, 2013; Makhoul, 2015) (figure 1.39).

Il s'agit donc :

- d'analyser les résultats ;
- d'expliquer les limites des étapes précédentes : inventaire et/ou évaluation des impacts.

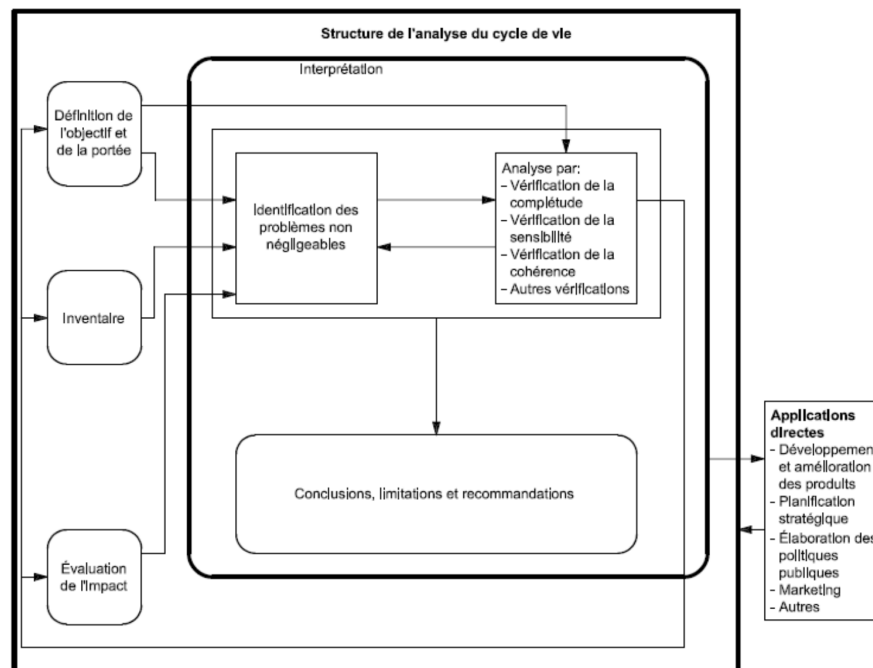


Figure 1. 39 : Relations des éléments lors de la phase d'interprétation avec les autres phases d'une ACV [ISO14044 :2006, 2006].

3.4.3 Les méthodes d'évaluation d'impacts et logiciels d'ACV

Plusieurs méthodes d'évaluation scientifique existent pour l'évaluation des impacts environnementaux potentiels à partir des données d'inventaire (ICV). La méthodologie est exigeante sur la qualité des données et des méthodes d'évaluation. Pour cela plusieurs bases de données ont été élaborées afin de faciliter la collecte de données. Les logiciels d'ACV permettent d'intégrer ces différentes bases de données et des méthodes de calcul en même temps, pour faciliter le travail des analystes et spécialistes d'ACV. Ces logiciels sont très importants pour la réalisation des ACV, car une donnée d'inventaire peut compter plus de 400 flux d'entrées/ sorties. Dans cette partie d'étude, deux méthodes seront présentées et deux logiciels d'ACV seront utilisés pour la modélisation de cette étude.

3.4.3.1 Les méthodes et indicateurs d'évaluation environnementaux

Il existe deux types d'approches de calcul qui sont représentés dans la figure 1.40 et qui proposent respectivement :

- Les méthodes “*Midpoint*” qui se situent au début de la chaîne cause ou effet, ils sont orientés problèmes (Aissani, 2008).
- Les méthodes “*Endpoint*” qui se situent à la fin de cette même chaîne intégrant ainsi un plus grand nombre de paramètres : ils ramènent la modélisation jusqu'aux dommages, malgré un nombre détracteur au regard des incertitudes (Aissani, 2008).

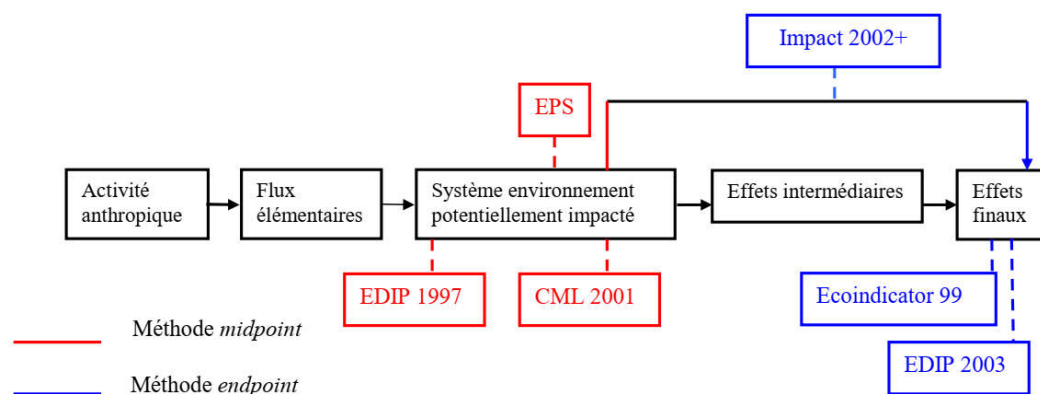


Figure 1. 40 : Placement des méthodes Midpoint et Endpoint sur la chaîne cause à effet d'un impact (Aissani, 2008).

3.4.3.1.1 La méthode CML

La méthode CML a été développée par l'institut des sciences environnementales de l'université de Leiden au Pays Bas (Guinee, 2002). Deux versions de cette méthode existent : la version CML 92 et CML 2000. Cette méthode a été l'une des méthodes les plus appliquées en Europe. La caractéristique de cette méthode est l'utilisation des indicateurs d'impact modélisant le pouvoir potentiel polluant des substances émises, selon une substance de référence. Pour chaque catégorie d'impact, une substance de référence est déterminée. Des indicateurs d'impacts sont déterminés pour chaque flux par rapport à la substance de référence. Ces indicateurs sont donc des mesures d'équivalence relative de certains polluants types pour chaque catégorie d'impact. Deux indicateurs d'impacts sont reconnus par un consensus international. Il s'agit du Global Warming Potential ou potentiel de réchauffement global et de l'Ozone Depletion Potential ou potentiel de déplétion de la couche d'ozone (Aissani, 2008). Les nouvelles versions de la méthode CML ont vu les catégories d'impacts évoluer et le nombre de flux considérés augmenter. La dernière version compte onze catégories d'impacts : la diminution des ressources abiotiques, les impacts de l'utilisation des

sols, le changement climatique, la destruction d’ozone stratosphérique, l’acidification, l’eutrophisation, la toxicité humaine, l’écotoxicité aquatique d’eau douce, l’écotoxicité marine, l’écotoxicité terrestre et la formation des photo oxydants (Jolliet et al., 2010).

3.4.3.1.2 La méthode Impact 2002+

La méthode Impact 2002+ est une méthode d’analyse de l’impact qui permet d’obtenir les résultats des deux méthodes au niveau intermédiaire et au niveau des dommages (*Midpoint* et *End point*). Cette méthode est un compromis entre les approches *Midpoint* et *Endpoint* qui permet de faire un lien entre ces deux approches. Cette méthode a été obtenue en combinant les méthodes CML et Eco Indicateur 99. Les résultats de l’inventaire sont groupés en 14 catégories d’impact intermédiaires : toxicité humaine, effets respiratoires, rayonnements ionisants, déplétion de la couche d’ozone, oxydation photochimique, écotoxicité aquatique, écotoxicité terrestre, acidification terrestre/nitrification, acidification aquatique, eutrophisation aquatique, occupation des sols, réchauffement global, énergie non renouvelable, l’extraction minière, qui sont ensuite affectées à quatre catégories de dommages : Santé humaine ; Qualité de l’écosystème ; Changements climatiques ; et Ressources (Figure 1.41) (Jolliet et al., 2010).

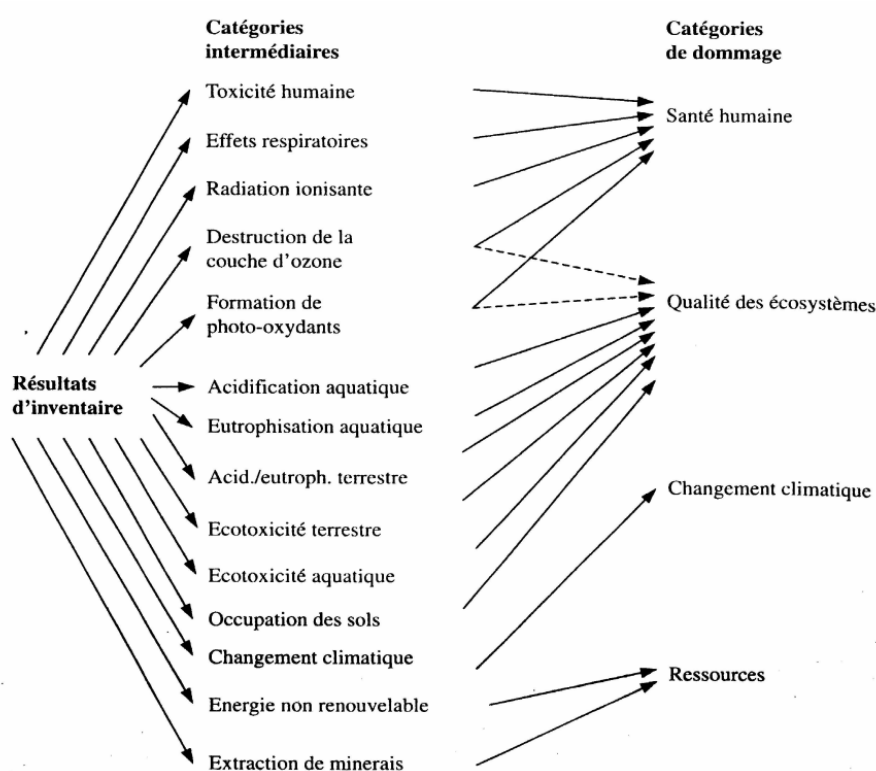


Figure 1. 41 : Schéma général de la méthode Impact 2002+ adapté (Jolliet et al., 2010).

3.4.3.2 Les logiciels d’ACV

Plusieurs logiciels d’ACV ont été développés dans les vingt dernières années, qui permettent d’intégrer les bases de données et les méthodes de calcul. Plusieurs logiciels sont disponibles

sur le marché. La plupart des fabricants de ces logiciels propose une version de démonstration, mais avec accès limité sur les bases de données : SimaPro, Pays-Bas ; GaBi, Allemagne ; Umberto, Allemagne ; KCL ECO, Finlande et d'autres sont gratuites comme : GEMIS 4.95, Allemagne ; IMPACT-ADEME 2.0, France ; Open LCA, Allemagne. Dans cette partie, nous ne décrivons que deux logiciels d'ACV : GEMIS et SimaPro, qui seront utilisés dans l'étude. Ces logiciels permettent de modéliser toutes les étapes d'une analyse de cycle de vie d'un produit ou d'un processus. Ils comportent une ou plusieurs bases de données et une ou plusieurs méthodes d'évaluation des impacts.

3.4.3.2.1 Logiciel GEMIS : Présentation et performance

La planification énergétique connaît actuellement un regain d'actualité. Le logiciel GEMIS (Modèle global d'émissions pour les systèmes intégrés) est sans aucun doute l'instrument le plus utilisé pour l'analyse énergétique, écologique et financière des systèmes d'énergie, de transport et de flux de matière. Dès 1987, il a été mis au point par l'Okoinstitut (Institut allemand d'écologie appliquée) et la Gesamthochschule Kassel (Université polyvalente de Kassel). La première présentation du logiciel a été élaborée en 2001. Ce logiciel comprend à la fois une base de données intégrée sur les références Suisses BUWAL et ETH et Allemandes GTZ et une méthode de caractérisation pondérée des flux de l'inventaire du cycle de vie orientée problème pour élaborer des bilans énergétiques (Outil de planification énergétique, GEMIS(DE)) ([ÖKOINSTITUT](#)).

Le logiciel GEMIS version 4.95 contient une méthode d'évaluation d'impact orientée problème (*Midpoint*). Cette méthode est la plus utilisée et la plus consensuelle. Les indicateurs offrent une marge d'erreur très faible. Ce logiciel contient une base de données matériaux, procédés, transport et d'énergie, permettant la modélisation d'un produit ou d'un service. La base de données comprend une liste de produits, processus et scénarios ([GEMIS© 4.7, 2011](#)).

3.4.3.2.2 Logiciel SimaPro (Pré Consultants)

SimaPro est un logiciel conçu par la société Hollandaise "Pré-Consultant" aux Pays Bas en 2000. Ce logiciel contient plusieurs méthodes d'évaluation des impacts environnementaux et plusieurs bases de données. L'avantage de ce logiciel est de contenir plusieurs bases de données. La plus riche est "Ecoinvent". Elle inclut plusieurs méthodes de calcul : Impact 2002+ ; CML 92, 2002 ; Eco-indicateur 95, 99 ; Bees (Building for Environmental and Economic Sustainability) ; Cumulative Energy Demand ; Cumulative Exergy Demand (CEXD) ; Ecological footprint ; Ecopoints 97 (CH) ; Ecological scarcity 2006 ; Ecosystem damage potential (EDP) ; Edip/umip 97 ; Edip 2003 ; Epd 2007 ; Eps 2000 ; Ipcc 2001 GWP ;

Ipcc 2007 ; Selected Ici result ; Traci 2 ([“SimaPro Logiciel d’ACV,” 2019](#)). C’est le logiciel utilisé par les experts d’ACV et le mieux adapté pour des analyses d’impacts détaillées de chaque processus unitaire. Il permet de comparer et d’analyser plusieurs produits ou service.

3.5 ETAT DE L’ART DE L’ACV

3.5.1 L’application de l’ACV dans les matériaux cimentaires

Plusieurs études ont été effectuées dans le cadre méthodologique de l’analyse du cycle de vie. Parmi ces travaux, on peut citer le travail réalisé par [Boubaker et al., \(2008\)](#) qui ont proposé une démarche d’analyse environnementale de toutes les activités d’une entreprise pour déterminer les impacts environnementaux. Dans ce travail l’ACV permet de faire une analyse quantitative et l’AMDEC-E une analyse qualitative plus fine. La réduction et le contrôle des émissions de gaz et de poussières étaient la préoccupation majeure des auteurs. Les résultats ont montré que l’émission la plus significative est celle des émissions de CO₂, et par conséquent la nécessité de diminuer la part de clinker. [Serres et al., \(2014\)](#) s’intéressent aux impacts environnementaux des déchets de béton issus de la démolition, pour en faire un nouveau béton. Les résultats de l’ACV mettent en évidence l’utilisation de sable et des graviers recyclés qui est intéressante pour réduire les impacts environnementaux. Le micro béton de brique présente un faible impact environnemental par rapport aux autres micro-bétons. [Chevalier \(2009\)](#) a présenté les principales utilisations de l’ACV dans la construction tant à l’échelle des produits qu’à l’échelle des quartiers. Il a conclu que l’ACV est donc un des outils de l’approche cycle de vie et un des piliers du développement durable dans la construction. [Guo \(2013\)](#) a étudié la distribution d’un (1) kg des différents types de moules de corps creux en béton. Il a montré que l’indicateur éco toxicité marine est le plus impactant pour tous les types des moules lors de la phase de production. [Guerraiche et Serradj \(2013\)](#) ont évalué les sources principales d’impacts environnementaux de la production des emballages et ils ont proposé une démarche d’évaluation des principaux impacts environnementaux.

3.5.2 ACV des sédiments dragage contaminés

D’autres études concernant l’ACV des sédiments de dragage ont été réalisées à travers le monde et spécialement le volet qui traite l’évaluation environnementale des sédiments contaminés. [Bai et al., \(2017\)](#) ont évalué le cadre méthodologique de l’ACV, en traitant la stabilisation et la valorisation d’un sédiment marin contaminé. L’article comprend deux scénarios : le premier étudie les étapes de la bioremédiation, criblage, chaulage, stabilisation hydraulique et concassage avant valorisation. Le second étudie les étapes de la bioremédiation

et le criblage avant valorisation en remblai de carrières. Les résultats montrent que le deuxième scénario de traitement par bioremédiation et criblage avant la valorisation en remblaiement de carrière est potentiellement moins impactant que le premier scénario de bioremédiation, criblage, chaulage, stabilisation hydraulique et concassage avant valorisation. Cela est dû à la phase de chaulage, stabilisation et concassage plus consommatrice de ressources et générant plus d'émissions. [Hou et al., \(2014\)](#) ont proposé une nouvelle méthodologie hybride de l'ACV en comparaison avec l'ACV traditionnelle pour l'amélioration de la voie navigable du site contaminé au Parc Olympique de Londres. Ces résultats avaient montré que presque tous les sédiments contenaient un certain niveau de contaminants d'hydrocarbures pétroliers, avec des gammes de lubrifiants organiques (GLO) (supérieur à 1990 mg/kg) et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) (supérieur à 72,5 mg/kg) supérieur à la limite fixée par l'Agence de l'Environnement (AE) pour les déchets dangereux. Les résultats ont montré que presque tous les sédiments contenaient un certain niveau de contamination ce qui représente un risque à long terme pour l'écosystème et la santé humaine. Le traitement des sédiments a réduit les impacts des contaminants de près de 30% par le lavage et de 80% lors de l'enfouissement. L'ACV hybride a corrigé les erreurs d'impact secondaire du processus troncature de 32% par le lavage des sols, et 8% de l'impact secondaire de l'enfouissement. [Falciglia et al., \(2018\)](#) ont comparé les techniques de traitements de chauffage par microondes en utilisant ACV. Les résultats ont montré que cette technologie est plus écologiquement durable pour la décontamination des sédiments, avec un dommage total de 75,74% inférieur à celui associé à la décontamination électrocinétique. [Beolchini et al., \(2013\)](#) ont évalué l'efficacité des agents de lixiviation (acides sulfurique, oxalique et l'acide citrique) et des procédés de biolixiviation (bases sur différentes souches bactériennes acidophiles) sur la mobilisation des métaux et semi- métaux dans un port contaminé. L'ACV a montré que le traitement à base d'acide sulfurique dilué est moins impactant en termes d'émissions d'oxyde de carbone par rapport aux autres scénarios et sur l'ensemble des catégories d'impact (Potentiel de réchauffement planétaire, le potentiel de création d'ozone photochimique, potentiel d'acidification, épuisement des ressources). Le potentiel environnemental le plus élevé est le traitement chimique avec l'acide citrique dû principalement à la consommation des matières premières, ainsi que le traitement biologique dû principalement aux besoins énergétiques élevés ; et le long traitement par bioréacteurs à lisier. [Sparrevik et al., \(2011\)](#) ont appliqué l'ACV pour évaluer des solutions de remédiation des sédiments contaminés du Fjord Groenland en Norvège. Ils ont étudié l'empreinte environnementale des différentes alternatives actives et passives de recouvrement de couches minces par rapport à la récupération naturelle. Les résultats ont montré que le recouvrement

est préférable à la récupération naturelle vis-à-vis de l'empreinte environnementale dû à l'utilisation des ressources et de l'énergie lors de la mise en œuvre d'une couche mince de recouvrement.

3.5.3 Méthodologie de gestion des opérations de stockage des sédiments de dragage

D'autre part, [Abriak et al., \(2006\)](#) ont présenté une nouvelle méthodologie pour la gestion des opérations de dragage dont l'objectif est le couplage des mesures qualitatives des données et les complémentarités d'anciennes méthodologies selon un cadre d'écologie industrielle. Cette méthodologie a montré que le couplage des mesures qualitatives avec la collecte des données sur les sédiments pourrait diminuer la dépendance aux mesures scientifiques (méthodologie de dragage développée au port de Dunkerque, France). [Manap and Voulvoulis, \(2015\)](#) ont évalué l'impact environnemental par des facteurs technologiques et la caractérisation des sédiments pour la gestion environnementale des pays en voie de développement. L'étude a montré que la concentration sur les épreuves économiques et scientifiques n'est pas bien équilibrée en évaluant la préoccupation environnementale et socio-économique de gestion des techniques importantes. Les pays en voie de développement et les pays développés ont des approches différentes pour la gestion des sédiments de dragage due à leurs situations financières. [Bates et al., \(2015\)](#) ont comparé la stratégie de mise en place des sédiments de dragage dans la région de Long Island Sound à New York selon trois scénarios : en haut plateau ; en île de confinement ; et dans le large. Les principaux résultats ont montré que le placement des sédiments dans le large génère l'impact le plus faible sur 14 catégories d'impacts. Par contre le scénario de placement des sédiments aux îles de confinement est le plus impactant, dû au transport par camion qui contribue davantage au changement climatique et aux impacts associés à la construction des îles de confinement. L'analyse de sensibilité a montré l'efficacité du type de remorques des camions de transport sur la réduction du nombre de voyage en raison de la consommation de carburant.

3.5.4 L'industrialisation des sédiments calcinés

D'après les résultats ci-dessus, la plupart des études précédentes d'analyse du cycle de vie évaluent uniquement le problème de traitement des sédiments marins contaminés ; la gestion environnementale des déchets des sédiments de dragage et la mise en place. On trouve très peu de publications qui abordent la question d'évaluation environnementale et qui proposent une industrialisation des sédiments de dragage pour une substitution partielle ou totale du ciment. Deux études introductives sur la proposition du processus d'industrialisation des sédiments de dragage ont été réalisées [Hadj Sadok et al., \(2019, 2018\)](#). Par contre, plusieurs

auteurs (Chiaramonti et al., 2010; Colantoni et al., 2017; Guerraiche and Serradj, 2013; Guezuraga et al., 2012; Makhoul et al., 2015; Picchio and Sirna, 2012; Puri et al., 2009; Serradj et al., 2016; Vlach, 2008) ont modélisé leurs évaluations environnementales en utilisant le logiciel GEMIS (modèle global d'émissions pour les systèmes intégrés) qui est disponible au niveau de notre laboratoire.

3.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, une présentation générale de la méthodologie et des principes d'ACV a été décrite. Quelques points importants à connaître avant de commencer une étude d'ACV : une bonne définition de l'unité fonctionnelle, pour la comparaison par rapport aux différentes recherches d'ACV déjà réalisées. Une collecte des données d'inventaires, avec quantification des flux entrants et sortants par des études bibliographiques, génériques et expérimentales.

Le choix s'est porté sur deux logiciels de modélisation des impacts environnementaux : GEMIS avec la méthode de caractérisation intermédiaire (Midpoint), et SimaPro avec deux méthodes d'évaluation : CML et Impact 2002+.

La présentation de l'état de l'art de l'ACV sur la valorisation des sédiments de dragage dans le monde, sera suivie par la proposition d'un modèle d'industrialisation des sédiments de dragage des barrages en Algérie ainsi que l'évaluation environnementale de ce modèle à l'aide de deux logiciels d'ACV (GEMIS et SimaPro).

En Algérie l'eau devient de plus en plus précieuse ; Elle doit être d'avantage maîtrisée à travers tout le territoire national. Des moyens colossaux ont été investis pour alimenter en eau potable sa population et permettre l'irrigation des terres agricoles. Des réalisations de barrages à travers tout le territoire national ; de toutes dimensions, ont vu et vont pouvoir voir le jour. Malheureusement ces réalisations voient leurs capacités de retenue d'eau diminuer d'année en année. Il fallait donc penser à les débarrasser des sédiments qui séjournent au fond du bassin. Les sédiments dragués déposés aux alentours du barrage forment des monticules de déblais qui défigurent le paysage, détériorent le milieu ; occupent un espace de plusieurs hectares qui privent les habitants riverains pauvres des ressources habituelles et polluent l'environnement immédiat.

La valorisation des sédiments de dragage ouvre une nouvelle possibilité de recherche dans plusieurs domaines (Agriculture, construction, travaux publics, industrie), peut servir de remède à ce problème. Le sédiment n'est plus considéré comme un déchet, mais plutôt comme matière première. Les études ont démontré la possibilité de l'utilisation en tant que matière première dans le domaine du génie civil, et spécialement dans le béton. Tous les résultats issus de ces recherches ouvrent la possibilité de proposer un modèle d'industrialisation des sédiments de dragage après une analyse de leur cycle de vie.

Ce travail s'inscrit dans une longue étude de recherche au sein du laboratoire LCTPE portant sur le domaine de la valorisation des sédiments de dragage. Dans cette étape de recherche le travail sera complété par une étude environnementale et par l'analyse du cycle de vie des sédiments de dragage. Pour faire face au problème d'envasement des barrages un procédé d'industrialisation est proposé, permettant l'élaboration d'une vase calcinée issue des sédiments de dragage, la moins impactante par rapport au ciment. L'intérêt de la valorisation des sédiments de dragage des barrages répond à l'élimination des zones de rejet, qui posent un problème important aux gestionnaires de l'ANBT, et la diminution des émissions de CO₂ dans l'atmosphère.

Pour compléter les recherches sur la valorisation des sédiments de dragage, cette étude visera à synthétiser l'ensemble des travaux de valorisation des sédiments de dragage en Algérie et à l'étranger, afin de trouver les principaux points communs pour les différents échantillons des sédiments déjà étudiés pour une utilisation en tant que matière première dans le domaine de génie civil, et leur utilisation dans le mortier.

Dans cette contribution on essaiera de répondre aux points de vue techniques et environnementaux :

- **Technologique** : Une optimisation du pourcentage de substitution du ciment par les sédiments calcinés du barrage de Chorfa II (Mascara), pour trouver un compromis entre les avantages et les inconvénients de cette substitution partielle, pour l'élaboration d'un éco-mortier à performances égales que le mortier témoin. Une caractérisation de la réaction pouzzolanique sera mise en évidence ; en caractérisant leurs performances physiques, chimiques, rhéologiques et mécaniques. Et par l'utilisation des pouzzolanes artificielles pour la confection des éco-mortiers. Peu de recherches existent sur l'influence de la température de cure dans les différents types de mortiers à base de substitution partielle des sédiments de dragage.

- **Environnemental** : Une évaluation environnementale des sédiments dragués dans son environnement depuis l'extraction des sédiments jusqu'au traitement des déchets, sera étudiée pour comparer les charges environnementales des différentes étapes du cycle de vie du même produit, en déduire l'étape la plus polluante en termes environnementaux, et optimiser la modélisation d'un processus d'industrialisation des sédiments de dragage des barrages, à l'aide du logiciel GEMIS (Global Emission Model for Integrated system) 4.95 et du logiciel SimaPro 8.5.2.0. Pour proposer un modèle le plus respectueux de l'environnement, on se focalisera sur les impacts environnementaux, en déterminant le scénario le plus respectueux de l'environnement. Les sédiments dragués seront traités par calcination pour les rendre actifs dans le domaine de la construction des bâtiments. Une partie expérimentale permettra l'évaluation environnementale des mortiers, pâtes et les ciments avec substitution partielle de sédiments calcinés.

PARTIE

-Processus expérimental et résultats-

2

CHAPITRE 1

MATERIAUX

74 à 83

CHAPITRE 2

MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

84 à 94

CHAPITRE 3

RÉSULTATS DES ESSAIS A L' ÉTAT FRAIS
ET À L'ÉTAT DURCI

95 à 116

CHAPITRE

MATERIAUX

1

SOMMAIRE

1.1	INTRODUCTION	74
1.2	CIMENT	75
1.3	LES SEDIMENTS DE DRAGAGE	75
1.3.1	Caractéristiques physiques des sédiments calcinés	78
1.4	SABLE NORMALISE	81
1.5	L'EAU DE GACHAGE.....	82
1.6	ADJUVANT	82
1.7	CONCLUSION.....	83

1.1 INTRODUCTION

Cette étude expérimentale consiste à optimiser et caractériser la réaction pouzzolanique d'un éco-mortier à base de substitution partielle des sédiments de dragage calcinés au ciment ; en caractérisant leurs performances physiques, chimiques, rhéologiques et mécaniques. Ce travail a pour objectif l'utilisation des pouzzolanes artificielles (sédiments de dragage calcinés du barrage de Chorfa (Mascara)) pour la confection des éco-mortiers. L'influence de la température de cure sur les différents types de mortiers à base de substitution partielle des sédiments de dragage (0, 5, 15, 25%) sera mise en évidence dans cette étude. Les différents types de mortiers seront portés à plusieurs températures de cure sèche 10, 20 et 40°C : avec des échéances allant de 3 à 180 jours.

Ce chapitre présente les matériaux utilisés dans la formulation des matrices cimentaires étudiées (Coulis, pâtes et mortiers), les essais expérimentaux de caractérisation à l'état frais et durci des mortiers soumis à des températures de cure à savoir le comportement mécanique (traction par flexion trois points et compression) selon les normes en vigueur.

1.2 CIMENT

Un seul type de ciment a été utilisé dans la composition des différentes pâtes et mortiers : le ciment CPA CEM I 42,5 provenant de l'usine de Zahana dans la wilaya de Mascara. Il est constitué principalement de clinker entre 95 à 100% et entre 0 à 5% de constituants secondaires (gypse). Le choix du ciment sans ajouts nous permettra une bonne visualisation des performances des pâtes et mortiers sur l'effet de substitution partielle des sédiments de dragage calcinés au ciment, sans interaction avec les autres additifs présents dans les ciments composés. Ce ciment a une surface spécifique Blaine de $3200\text{cm}^2/\text{g}$ selon la norme (EN 196-6) et sa densité est de 3,14.

Les caractéristiques chimiques et minéralogiques sont données par les tableaux 2.1 et 2.2.

Tableau 2. 1 : Composition chimique du ciment CPA CEM I 42,5.

Composants chimiques	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PF	RI
Teneur massique (%)	21,87	64,10	5,15	3,97	1,57	0,22	0,71	2,40	0,9	0,36

CaO : Chaux libre ; PF : Perte au feu ; RI : Résidus insolubles

Tableau 2. 2 : Composition minéralogique du clinker.

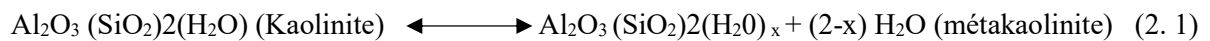
Constituants	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO libre
Teneur massique (%)	53,80	22,42	1,82	15,66	<01

1.3 LES SEDIMENTS DE DRAGAGE

Les sédiments de dragage ont été choisis pour être substitués au ciment. Ils proviennent du barrage de Chorfa II situé dans la wilaya de Mascara. Ils ont été prélevés en aval du barrage, dans la zone de rejet, et ont été séchés, concassés, broyés, tamisés et calcinés à 750°C au niveau du laboratoire LCTPE (Semcha, 2006). Les essais de caractérisation physico-chimique et minéralogique ont été effectués sur ces sédiments.

La composition chimique des sédiments montre la transformation de l'argile kaolinique (sédiments de dragage calcinés) en structures amorphes. Le traitement thermique des sédiments de dragage par calcination à des températures entre 600 et 900°C entraîne la déshydroxylation et une destruction de la structure cristalline initiale du kaolin en métakaolinite (réactivité pouzzolanique) (Belaribi, 2015 ; Belguesmia, 2018 ; Perlot et Rougeau, 2007 ; Safer, 2017).

La transformation de la kaolinite en métakaolinite lors de la déshydroxylation par calcination est donnée par l'équation (2.1).



Un processus de traitement des sédiments a été suivi, afin d'activer thermiquement l'échantillon des sédiments de dragage pour la substitution partielle au ciment, qui permet d'effectuer l'évaluation des caractéristiques physico-chimiques et les performances mécaniques des sédiments de dragage (Semcha, 2006).

Le même processus de traitement a été suivi pour le traitement des sédiments de dragage (Belaribi, 2015; Belguesmia, 2018; Safer, 2017; Semcha, 2006), Ils sont décrits dans la figure 2.1 :

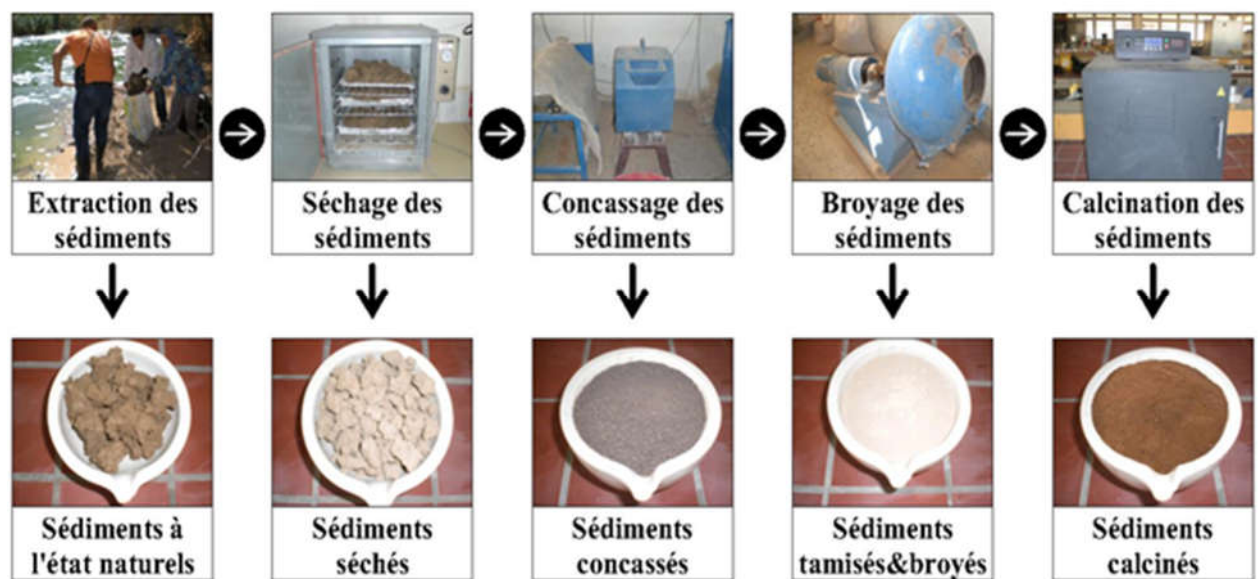


Figure 2. 1 : Les étapes de traitement des sédiments de dragage.

- 1) **Séchage** : les sédiments de dragage sont séchés à l'air libre et à l'étuve (105°C), pour écarter toute l'humidité et aider le processus de broyage et de tamisage.
- 2) **Concassage** : les sédiments sont concassés dans un concasseur à mâchoires.
- 3) **Broyage** : les sédiments sont broyés dans un broyeur à boulets.
- 4) **Tamisage** : les sédiments broyés sont tamisés via un tamis de 80 μm (utilisation du tamisât).
- 5) **Calcination** : les sédiments calcinés sont obtenus par calcination à 750°C (Four à moufle) (Semcha, 2006). Ce mode de traitement est composé de trois cycles de chauffage : Une phase de montée de température avec une rampe de 5°C/min, d'un palier de température constante et d'une phase de refroidissement. La durée du palier est fixée à 5 heures. Le retour à la température ambiante est obtenu en éteignant le four et en le maintenant fermé jusqu'à température ambiante de 20°C (figure 2.2).

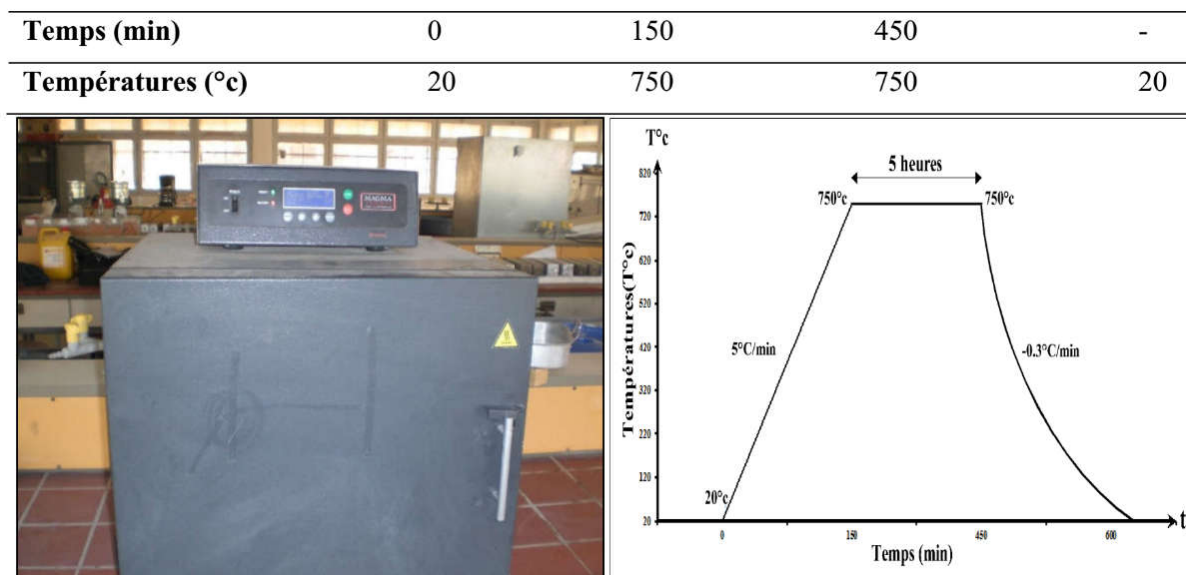


Figure 2. 2 : Traitement thermique des sédiments au four électrique à moufle.

Le tableau 2.3 donne des exemples de compositions chimiques des sédiments de dragage du barrage de Chorfa II tirés de la bibliographie. Il indique majoritairement une présence : d'oxyde de silicium, de calcium, d'aluminium et de fer. Les sédiments calcinés contiennent de l'oxyde de silicium (entre 45% à 55%), de l'oxyde de calcium (entre 15% à 25%) et de l'oxyde d'aluminium (entre 15% à 20%).

Tableau 2. 3 : Compositions chimiques des sédiments calcinés du barrage Chorfa II.

Composition (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PF
(Belguesmia et al., 2018)	55,34	15,75	7,43	13,82	2,64	0,22	2,09	-	-
(Taieb Fatima et al., 2018)	48,39	15,63	6,82	17,03	2,85	0,23	2,3	-	
(Safer et al., 2018)	47,36	15,75	7,43	23,08	0,17	2,67	2,97	0,37	1,76
(Belaribi et al., 2014)	51,69	15,49	7,53	18,06	3,08	0,23	2,99	0,41	1,87

Les résultats des analyses chimiques présentent en majorité des constituants de SiO₂, CaO, Al₂O₃, FeO₃.

Selon la norme ASTM C618 un matériau a un caractère pouzzolanique et une phase vitreuse si :

$$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\% \quad (2.2)$$

$$\text{SiO}_2 - \text{CaO} \geq 34\% \quad (2.3)$$

Le tableau 2.4 illustre ce caractère pour les sédiments calcinés du barrage Chorfa II utilisés récemment.

Tableau 2. 4 : Vérification du comportement pouzzolanique et phase vitreuse des sédiments calcinés du barrage Chorfa II.

Référence bibliographique	Comportement pouzzolanique	Phase vitreuse
(Belguesmia et al., 2018)	78,52	41,52
(Taieb Fatima et al., 2018)	70,84	31.36
(Safer et al., 2018)	70,54	24.28
(Belaribi et al., 2014)	74,71	33.63

La composition chimique des sédiments calcinés du barrage de Chorfa II présente un comportement pouzzolanique (entre 70% à 80%) sur l'ensemble des échantillons des exemples d'études, par contre seule l'étude de [Belguesmia et al., \(2018\)](#) a montré le comportement vitreux des sédiments calcinés du barrage de Chorfa II de l'ordre de $41.52\% \geq 34\%$.

1.3.1 Caractéristiques physiques des sédiments calcinés

1.3.1.1 Masse volumique

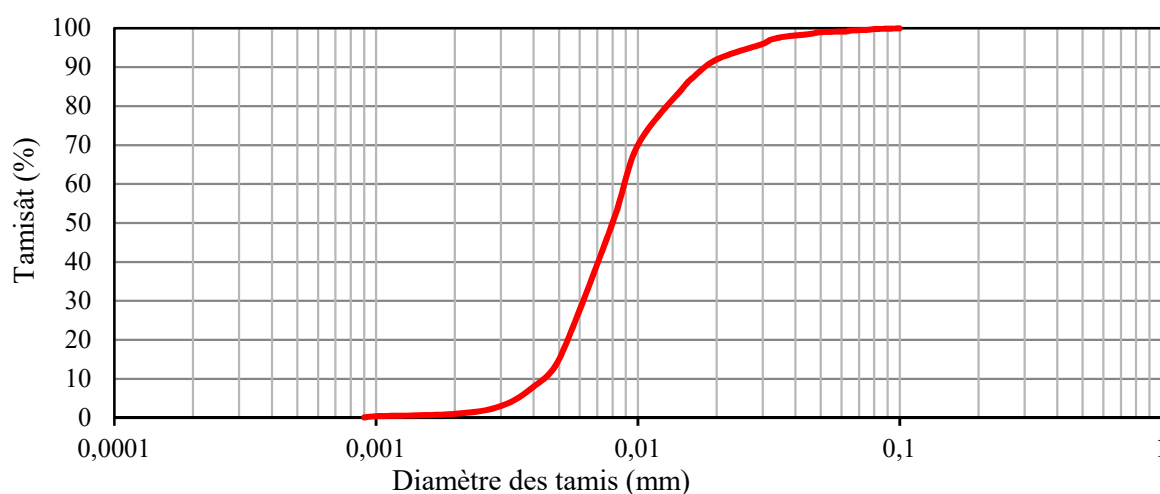
Les masses volumiques des sédiments du barrage de Chorfa II sont représentées dans le tableau 2.5.

Tableau 2. 5 : Tableau des masses volumiques des sédiments du barrage de Chorfa II.

Caractéristiques	Sédiments non calcinés	Sédiments calcinés
Masse volumique apparente des sédiments (g/cm ³)	0,49	0,47
Masse volumique absolue des sédiments (g/cm ³)	2,43	2,63

1.3.1.2 Granulométrie des sédiments

La figure 2.3 présente la distribution granulométrique moyenne des sédiments déterminés à partir de la mesure de passants cumulés.

**Figure 2. 3 :** Distribution granulométrique des sédiments calcinés.

Trois types de répartition granulaire caractérisent les distributions granulométriques des sédiments calcinés :

- Une répartition des grains des sédiments calcinés d'agglomération submicroniques centrée entre 0,001 - 0,01mm ;
- Une répartition des grains des sédiments calcinés d'agglomération microniques centrée entre 0,01 - 0,1mm, les diamètres majoritaires des grains se situent en dessous de 50µm ;
- Une répartition des grains des sédiments calcinés d'agglomération centrée entre 0,8 - 1mm.

1.3.1.3 Morphologie des sédiments de dragage

Les images d'observations au microscope électronique à balayage ont montré que les sédiments sont constitués des agglomérats de fines particules, compte tenu de leurs grandes finesses. Ces particules présentent une forme sphérique assez régulière mais de taille très variable de 0,01mm à 1 mm (figure 2.4).

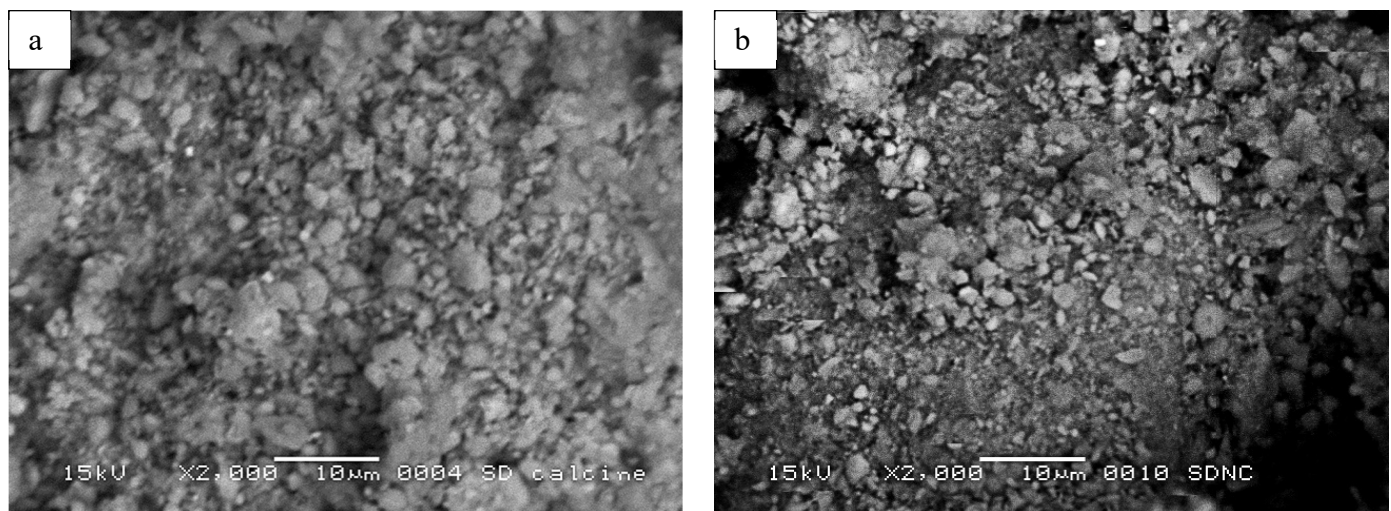


Figure 2. 4 : Observations MEB des sédiments de dragage : a) Sédiments calcinés ; b) Sédiments non calcinés.

1.3.1.4 Surface spécifique

La surface spécifique désigne la surface développée des particules contenues dans une masse. Elle s'exprime en cm^2/g . La méthode de mesure des surfaces spécifiques la plus utilisée est la méthode Blaine. La surface spécifique des sédiments calcinés se situe entre $6500\text{cm}^2/\text{g}$ – $8500\text{cm}^2/\text{g}$ (tableau 2.6). Les différences de valeurs de surface spécifique entre les sédiments calcinés s'expliquent par des différences de granulométrie, morphologie et de texture des particules. Les sédiments calcinés sont des particules très fines qui présentent une forte porosité interne et une surface complexe. La surface spécifique des sédiments calcinés est

L'analyse minéralogique par DRX des sédiments calcinés montre l'existence de pics correspondants aux minéraux tels que : Quartz, kaolinite, calcite et dolomite. La calcination de la kaolinite en métakaolin rend l'oxyde de silicium et l'oxyde d'aluminium potentiellement réactifs vis-à-vis de l'activité pouzzolanique.

1.3.1.6 L'indice d'activité pouzzolanique (I)

L'indice d'activité pouzzolanique est le rapport (en %) des résistances mécaniques à la compression d'éprouvettes normalisées de mortier de même âge ; les unes préparées avec 75% de ciment d'essai et 25% des sédiments calcinés (en masse) avec un étalement ne dépassant pas ± 10 mm par rapport à celui du mortier de contrôle ; les autres préparées avec du ciment d'essai uniquement suivant la norme EN 450 et NFP 18-506.

La norme européenne XP 18-305 et EN206-1 comptabilise la substitution dans le liant équivalent (Leq) par l'équation (2.4) :

$$\text{Leq} = C + K \times A \quad (2.4)$$

Où **C** : masse du ciment ; **K** : le coefficient d'activité ; **A** : la masse du substitut utilisé.

Le coefficient K à son tour est déterminé par l'une des formules (2.5) ou (2.6) :

$$K = 1 - [(1/P) \times [1 - 0,5 \times (E/C)]] \times (1-i) \quad (2.5)$$

$$K = 3 \times i - 2 \quad (2.6)$$

Deux types de mortiers ont été confectionnés, le premier à base de 100% ciment et le deuxième à base de 25% des sédiments calcinés et 75% ciment pour mesurer les résistances en compression sur les demi-échantillons rompus par flexion à 90 jours.

Le tableau 2.7 donne les valeurs et indices et coefficients d'inactivité relatifs aux sédiments calcinés.

Tableau 2. 7 : Indice et coefficient d'activité pouzzolanique des sédiments calcinés à 90 jours.

Coefficient d'activité pouzzolanique	Indice d'activité	Coefficient d'activité
Sédiments calcinés	$I(p) = f_p(t) / f_o(t)$	$K = 3 \times i - 2$
À 90 jours	0,98	0,94

L'indice d'activité pouzzolanique ≈ 1 , indique la grande activité pouzzolanique des sédiments calcinés dans l'intervalle $0,67 < I < 1$.

1.4 SABLE NORMALISE

Les mortiers sont confectionnés avec un sable normalisé (SABBIA NORMALE STANDARD SAND) certifié CEN, EN 196-1 conforme ISO 679 :2009. Le sable normalisé CEN (sable

normalisé ISO) est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines, ou la teneur en silice est $> 95\%$. Sa masse volumique réelle égale est de 2600Kg/m^3 . Sa teneur en eau est inférieure à $0,2\%$. Le sable est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun 1350 ± 5 g. La composition granulométrique déterminée par tamisage est conforme aux exigences de la norme EN 196-1 (Figure 2.6).

La dimension maximale du sable normalisé est $d_{\max}=2\text{mm}$. Il est inerte d'un point de vue chimique.

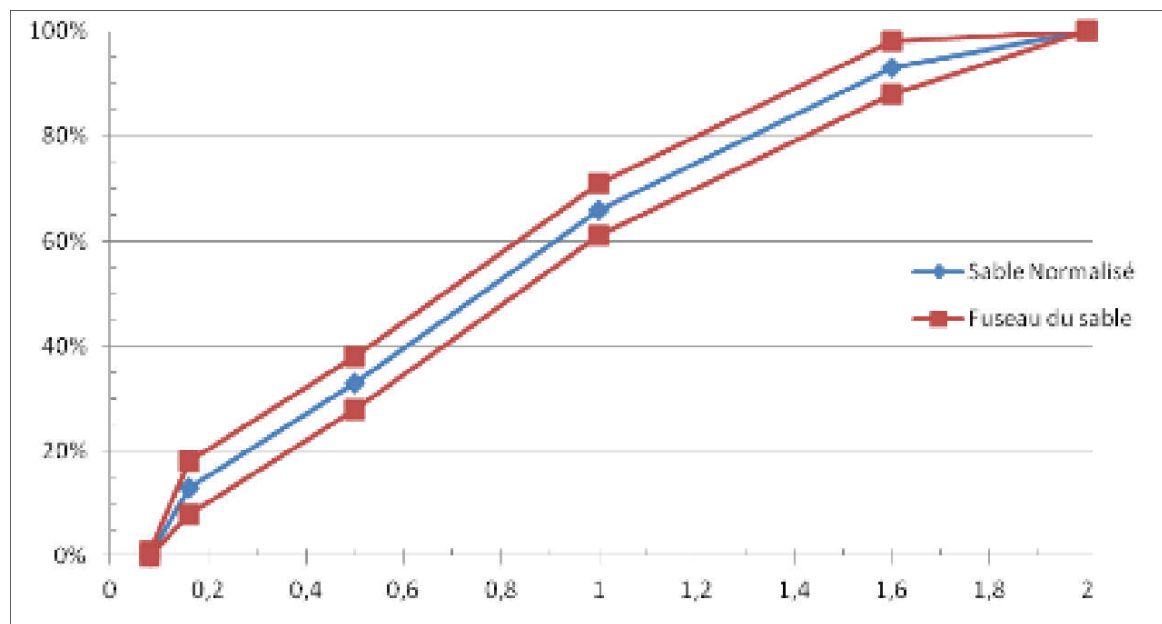


Figure 2. 6 : Composition granulométrique du sable de référence CEN.

1.5 L'EAU DE GACHAGE

L'eau de gâchage est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange pour l'hydratation du ciment, le mouillage des granulats et la mise en œuvre du mortier. Dans notre cadre expérimental, on a été utilisée l'eau potable « eau de robinet » du laboratoire MDC de l'Université de Mostaganem.

1.6 ADJUVANT

L'adjuvant employé pour confectionner les mortiers est un PLASTIMENT ® BV 40 (SIKA) ; plastifiant/ Réducteur d'eau, dont la fiche technique est dans l'Annexe 1.

Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau 2.8 :

Tableau 2. 8 : Caractéristiques de l'adjuvant PLASTIMENT® BV40.

Caractéristiques	PLASTIMENT® BV 40
Aspect	Liquide brun foncé
Densité	$1,180 \pm 0,025$
PH	$4,5 \pm 1$
Extrait sec	$38,5 \pm 1,9\%$
Teneur en Na_2O éq	$\leq 2\%$
Teneur en ions Cl^-	$\leq 0,1\%$
Plage d'utilisation	0,3 à 1%
Mise en œuvre	Introduire le BV40 dans l'eau de gâchage.

1.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, ont été identifiés les matériaux utilisés dans la confection des différents mortiers à base de substitution partielle des sédiments de dragage calcinés au ciment (ciment, sédiment calcinés, sable et adjuvant). C'est une étape très importante pour commencer l'étude expérimentale sur ces matériaux cimentaires. Les sédiments de dragage de Chorfa II contiennent un grand pourcentage de quartz (SiO_2) et de kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3(\text{SiO}_2)_2(\text{H}_2\text{O})_2$) qui réagissent ; avec l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) obtenue par l'hydratation du ciment, pour la formation d'un nouveau CSH et CASH d'où la nécessité d'un traitement thermique (calcination) pour les rendre réactifs.

Le constat est que les sédiments calcinés de Chorfa ont une surface spécifique supérieure à celle du ciment, qui nécessite une quantité supplémentaire d'eau pour l'hydratation du liant (ciment + sédiments calcinés) ou l'utilisation d'un plastifiant comme adjuvant pour maintenir la même maniabilité des différents mortiers.

CHAPITRE

METHODES EXPERIMENTALES

2

SOMMAIRE

2.1	INTRODUCTION	84
2.2	ESSAIS SUR LES ECHANTILLONS DES SEDIMENTS DE DRAGAGE	85
2.2.1	Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).....	85
2.2.2	Analyse thermogravimétrique	86
2.3	ESSAIS SUR PATES NORMALISEES	86
2.3.1	Essais sur coulis.....	86
2.3.2	Essais de consistance	87
2.3.3	Essais de prise.....	88
2.4	ESSAIS SUR MORTIERS	88
2.4.1	Formulation des mortiers.....	88
2.4.2	Maniabilité des mortiers	89
2.4.3	Essai de la chaleur d'hydratation.....	89
2.4.4	Mode de conservation des échantillons	90
2.5	ESSAIS MECANQUES	92
2.5.1	Confection des éprouvettes.....	92
2.5.2	Procédure d'essai.....	92
2.5.3	Résistance à la compression	93
2.6	CONCLUSION.....	93

2.1 INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de décrire les protocoles expérimentaux réalisés afin d'identifier les propriétés des matériaux cimentaires (pâtes, coulis, mortiers) ; à base des sédiments calcines ; ainsi que les essais expérimentaux des différentes formulations pour valoriser ces sédiments ; en tant que matière première dans la matrice cimentaire. Il présente tous les protocoles expérimentaux selon les normes en vigueur. Ces essais ont été réalisés pour l'identification et la caractérisation des échantillons des sédiments calcinés et non calcinés du barrage de Chorfa II ; la caractérisation des pâtes, coulis, mortiers à l'état frais et à

l'état durci ; les mesures de la chaleur d'hydratation des pâtes et mortiers ; et les résistances à la compression et la traction. Ces essais ont été réalisés au sein de plusieurs laboratoires à l'étranger : ICAM sites de Nantes, France ; GeM (Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique) à l'école centrale de Nantes, France et au laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) à l'université de La Rochelle, France.

2.2 ESSAIS SUR LES ECHANTILLONS DES SEDIMENTS DE DRAGAGE

2.2.1 Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR : Fourier Transformed Infra Red Spectroscopy) est un outil de caractérisation de la cristallinité des argiles par l'absorption d'un rayonnement infrarouge du matériau analysé. Elle permet ; via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques présentes dans le matériau ; l'observation des intensités relatives des bandes de vibration des hydroxyles de structure. La figure 2.7 illustre l'appareil spectroscopie infrarouge (l'appareil utilisé est un Perkins Elmer Spectrum Two à ICAM sites de Nantes, France) et le schéma d'un spectromètre à transformée de Fourier.

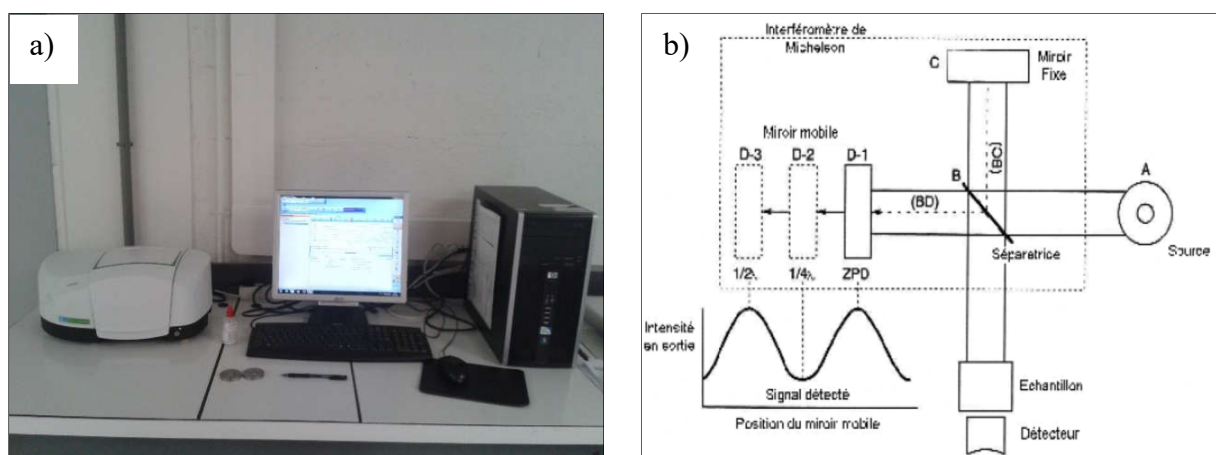


Figure 2. 7 : Spectroscopie d'infrarouge : a) Appareil Spectroscopie Infrarouge (ICAM sites de Nantes, France) ; b) Schéma d'un spectromètre à transformée de Fourier (Bouzidi, 2012).

Le spectre infrarouge entre 400 cm^{-1} et 4000 cm^{-1} correspond au domaine d'énergie de vibration des molécules. Il est lié à des niveaux d'énergie vibrationnelle des molécules. Cette dernière va absorber ou transmettre le rayonnement qui enregistre une diminution de l'intensité réfléchie.

Deux méthodes de préparation des échantillons sont utilisées : la première par réflexion de poudre (sédiments calcinés et non calcinés) préalablement séchée. La deuxième méthode par transmission où la préparation de l'échantillon consiste à mélanger la poudre à 1%

préalablement séchée avec 99% de KBr (Bromure de potassium) pour former avec ce mélange une pastille de 15 mm de diamètre.

2.2.2 Analyse thermogravimétrique

L'analyse thermogravimétrique (ATG) a pour objectif la caractérisation des matériaux par mesure directe de leur masse, en fonction de la température et du temps, entre l'échantillon à étudier et un corps témoin inerte. La technique d'analyse consiste à mesurer la perte de masse d'un échantillon soumis à des variations de température, dans une atmosphère contrôlée ou sous vide ; en mode isotherme ou en mode température programmée. Pour comprendre le comportement des matériaux à haute température. A l'aide d'une balance piézoélectrique on mesure les pertes de masses rapides à certaines températures caractéristiques. Cela permet la décomposition de certains composés chimiques. L'analyse des matériaux étudiés a été réalisée au sein du laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) à l'université de La Rochelle, France (figure 2.8).

L'opération envisagée nécessite un traitement entre 20°C et 1000°C, avec une vitesse de chauffe de 5°C/min restante constante tout le long de l'essai.



Figure 2. 8 : Appareil d'analyse thermogravimétrique (ATG) (laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) à l'université de La Rochelle, France.

2.3 ESSAIS SUR PATES NORMALISEES

2.3.1 Essais sur coulis

La caractérisation des sédiments calcinés a montré la grande importance de la surface spécifique par rapport à celle des autres constituants du mortier. Une identification de la compatibilité du liant avec l'adjuvant (PLASTIMENT® BV40) a été réalisée, pour

déterminer les points de saturation en plastifiant des différents mélanges avec un rapport $E/L=0,5$. Une optimisation du dosage en plastifiant sur les différents mélanges des mortiers a été réalisée.

Cet essai a pour but de mesurer le temps d'écoulement d'un volume spécifié de coulis à base de ciment ou bien un coulis à base de ciment ; avec substitution partielle des sédiments calcinés (0%, 5%, 15%, 25%) au travers d'un cône d'écoulement (cône de Marsh) illustré par la figure 2.9. Ce temps d'écoulement est une mesure de la viscosité des coulis pour remplir 1000 ml de réceptacle permettant de mesurer un volume de coulis (1000 ± 10) ml. Cet essai a été déterminé selon la norme NF EN 14117. L'écoulement des coulis a été mesuré à la température normalisée du laboratoire (21 ± 2) °C et (60 ± 10) %, à des intervalles de temps déterminés de 5 min, 15 min, 30 min et 60 min après le malaxage. Le coulis mélangé est agité dans le malaxeur de mortier pendant cinq secondes avant l'essai.

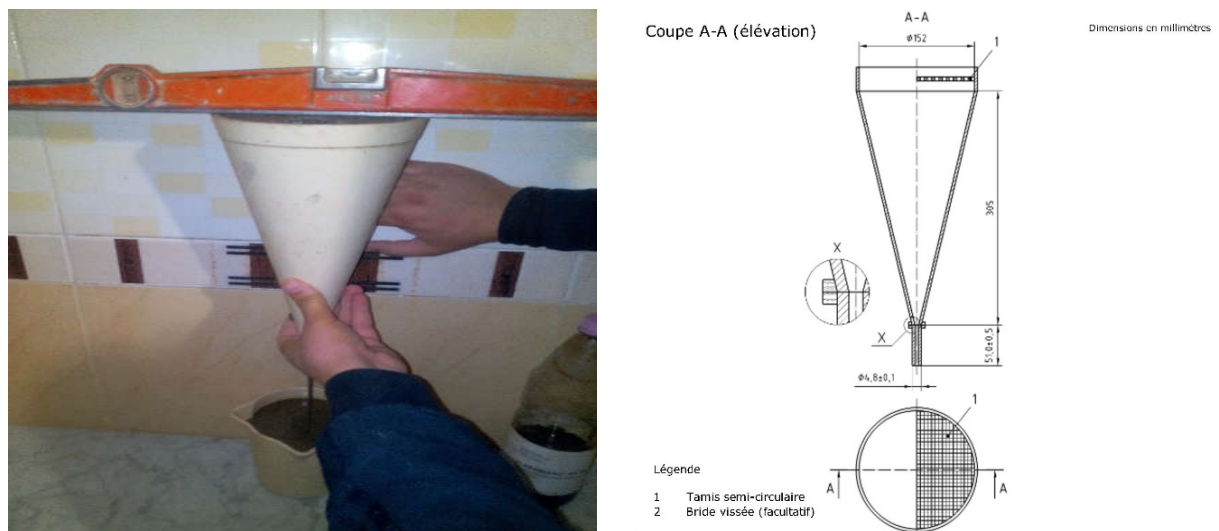


Figure 2. 9 : Le cône de Marsh [NF EN 14117].

2.3.2 Essais de consistance

La consistance de la pâte du liant hydraulique est une caractéristique qui évolue au cours de temps. L'objectif de cet essai est de définir la consistance normalisée du liant utilisé en donnant une consistance dite « normale ». La détermination de cette teneur en eau est importante pour la mesure de la prise. Cette consistance est déterminée selon la norme NF EN 196-3, à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une sonde.

La nature du ciment influe sur la consistance, notamment du fait de sa finesse. La consistance des différentes pâtes avec une substitution partielle des sédiments calcinés au ciment de 0%, 5%, 15%, 25% a été mesurée.

2.3.3 Essais de prise

Une fois la consistance normale de la pâte du liant hydraulique obtenue, il est nécessaire de connaître l'évolution de la consistance dans le temps. Le début de prise des liants hydrauliques est mesuré à partir du début de malaxage (temps de début de prise). Le temps de fin de prise est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm. Le mode opératoire de l'essai est fixé par la norme EN 196-3.

2.4 ESSAIS SUR MORTIERS

2.4.1 Formulation des mortiers

Le mortier de référence sera constitué, selon la norme (EN 196-1), d'une part de ciment (450Kg/m^3), de 3 parts de sable et d'une demi-part d'eau, avec un rapport $E/L=0,5$. Les mortiers avec addition sont obtenus dans les mêmes conditions, en remplaçant une fraction massique (taux de substitution) de ciment par des sédiments calcinés. Les quantités de sable et d'eau restant inchangées. En fixant la quantité d'eau, l'effet réducteur d'eau n'est pas mis à profit mais cette approche permet de réduire le nombre de paramètres variant simultanément. C'est la raison pour laquelle la quantité d'eau reste constante. Les taux de substitution massique étudiés sont de 0%, 5%, 15%, 25% du poids de ciment, par de sédiments calcinés.

La confection des différents mortiers a été réalisée à l'aide d'un malaxeur HOBART, Ce malaxeur est muni d'une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente et rapide) 140 et 285tr/min répondant aux caractéristiques de la norme EN 196-1. La procédure de malaxage est celle préconisée par la norme EN 196-1.

Les tableaux 2.9 et 2.10 ci-dessous présentent la formulation et la composition des différents types des mortiers à base des sédiments calcinés.

Tableau 2. 9 : Formulation des différents mortiers.

Mortiers	Massique (g)									
	Liants		Sable	Eau de gâchage	Eau BV40	BV40 Commercialisé	BV40 Extrait sec	Masse totale	E_{eff}/C	E_{eff}/L
	CEM I	SD								
	42,5									
SD0%	450	0	1350	225	0	0	0	2025	0,5	0,5
SD5%	427,5	22,5	1350	224,72	0,28	0,45	0,17	2025	0,53	0,5
SD15%	382,5	67,5	1350	223,75	1,25	2,03	0,78	2025	0,58	0,5
SD25%	337,5	112,5	1350	222,65	2,35	3,83	1,47	2025	0,66	0,5

Tableau 2. 10 : Composition des différents mortiers.

Mortiers	% Massique									
	Liants		Sable	Eau de gâchage	Eau BV40	BV40 Commercialisé	BV40 Extrait sec	Masse totale	E_{eff}/C	E_{eff}/L
	CEMI 42,5	SD								
SD0%	22,22	0	66,67	11,11	0	0	0	100	0,5	0,5
SD5%	21,11	1,11	66,67	11,10	0,01	0,02	0,01	100	0,53	0,5
SD15%	18,89	3,33	66,67	11,05	0,06	0,10	0,04	100	0,58	0,5
SD25%	16,67	5,56	66,67	10,99	0,12	0,19	0,07	100	0,66	0,5

- **Mortier SD0%** : Mortier normal à base de CEMI 42,5.
- **Mortier SD5%** : Mortier normal avec un taux de substitution massique de 5% des sédiments calcinés.
- **Mortier SD15%** : Mortier normal avec un taux de substitution massique de 15% des sédiments calcinés.
- **Mortier SD25%** : Mortier normal avec un taux de substitution massique de 25% des sédiments calcinés.
- **BV40** : PLASTIMENT® BV 40 1ere génération plastifiant/Réducteur d'eau retardateur de prise.
- E_{eff} : Eau efficace.

2.4.2 Maniabilité des mortiers

La consistance des mortiers est un paramètre pour apprécier l'efficacité d'un adjuvant plastifiant, sur la fluidité d'un mortier ou sur la réduction d'eau ; Dans cet essai la consistance est caractérisée par le temps d'écoulement du mortier sous l'effet d'une vibration. Il est défini selon la norme NF P18-452 et le fascicule P15-437.

La maniabilité du mortier est déterminée à l'aide d'un maniabilimètre B (LCPC). Le mortier est introduit en 4 couches, chaque couche étant soumise à 6 coups au moyen de la tige de piquage. 4 minutes après la fin du malaxage la cloison est retirée ; provoquant la mise en route du vibreur et le déclenchement d'un chronomètre ; pour mesurer le temps d'écoulement et caractériser sa consistance. La maniabilité des mortiers caractérisée par un rapport $E/L=0,5$ dont le temps d'écoulement avec un adjuvant plastifiant BV40 a été gardée aux alentours de $5,12 \pm 1$ secondes.

2.4.3 Essai de la chaleur d'hydratation

L'essai consiste à introduire un échantillon de mortier fraîchement préparé, dans un colorimètre pour déterminer la quantité de chaleur dégagée. Pour une durée de temps donnée, la chaleur d'hydratation de l'échantillon contenu est égale à la somme de la chaleur

accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant pendant toute la durée de l'essai. L'échauffement du mortier est comparé à la température d'un échantillon inerte dans un calorimètre de référence (NF EN 196-9).

Les essais ont été réalisés sur des pâtes et des mortiers (à base de 0%, 5%, 15%, 25% des sédiments calcinés) à différentes températures 10, 20 et 40°C. Deux échantillons de pâtes ou mortiers d'environ 100g sont placés dans un flacon en verre de 130g en mettant en place le couvercle et en s'assurant de l'étanchéité. Aussitôt après, ils seront introduits dans le calorimètre isothermique multicanal de type TAM Air (Figure 2.10) et refermés les flacons immédiatement avec le bouchon.



Figure 2. 10 : Calorimètre isotherme multicanal (Laboratoire GeM à l'école centrale de Nantes, France).

La mesure de l'échauffement du calorimètre consiste à relever directement l'acquisition des dégagements de la chaleur sur l'ordinateur, à des instants déterminés, ainsi que la température de l'échantillon d'essai et celle de l'échantillon inerte placé dans le calorimètre de référence. Les résultats obtenus illustrent la quantification de la vitesse de réaction d'hydratation de la pâte ou mortiers de ciment en présence des sédiments calcinés pendant les premières 72 heures ; pour des taux de substitution de 0%, 5%, 15%, 25% de sédiments calcinés.

2.4.4 Mode de conservation des échantillons

Un mode de conservation des éprouvettes a été utilisé pour tous les essais de l'influence des températures de cure sèche 10°C, 20°C, 40°C sur les mortiers à base de substitution des sédiments calcinés. Les moules pleins sont conservés dans une salle humide (20°C, 95%HR) pendant 24h. Après le démoulage des moules, les éprouvettes sont stockées à différentes températures de cure sèche 10°C, 20°C, 40°C avec des échéances allant de 3j jusqu'à 180 jours.

- a) Cure sèche à 10°C : Les éprouvettes sont soigneusement confinées en les enveloppant entièrement d'une double couche de scotch en aluminium autocollant pour assurer un milieu sans échange hydrique avec le milieu extérieur. Il n'y a aucune perte d'eau à travers les pores de la pâte ; ce qui atteste de la qualité de la microstructure à conserver ou à perdre son humidité. Les éprouvettes sont pesées et stockées dans un réfrigérateur pendant 180 jours avec une température contrôlée de 10°C (figure 2.11).



Figure 2. 11 : Cure sèche à 10°C.

- b) Cure sèche à 20°C : Le même protocole de confinement des éprouvettes a été suivi pour envelopper les éprouvettes. Elles ont été pesées et stockées dans une armoire fermée pendant 180 jours à une température de 20°C (figure 2.12).



Figure 2. 12 : Cure sèche à 20°C.

- c) Cure Sèche à 40°C : Les éprouvettes ont suivi le même protocole de confinement, Elles ont été pesées et stockées dans une enceinte isothermique réalisée spécialement pour cet essai, pendant 180 jours à une température de 40°C (figure 2.13).

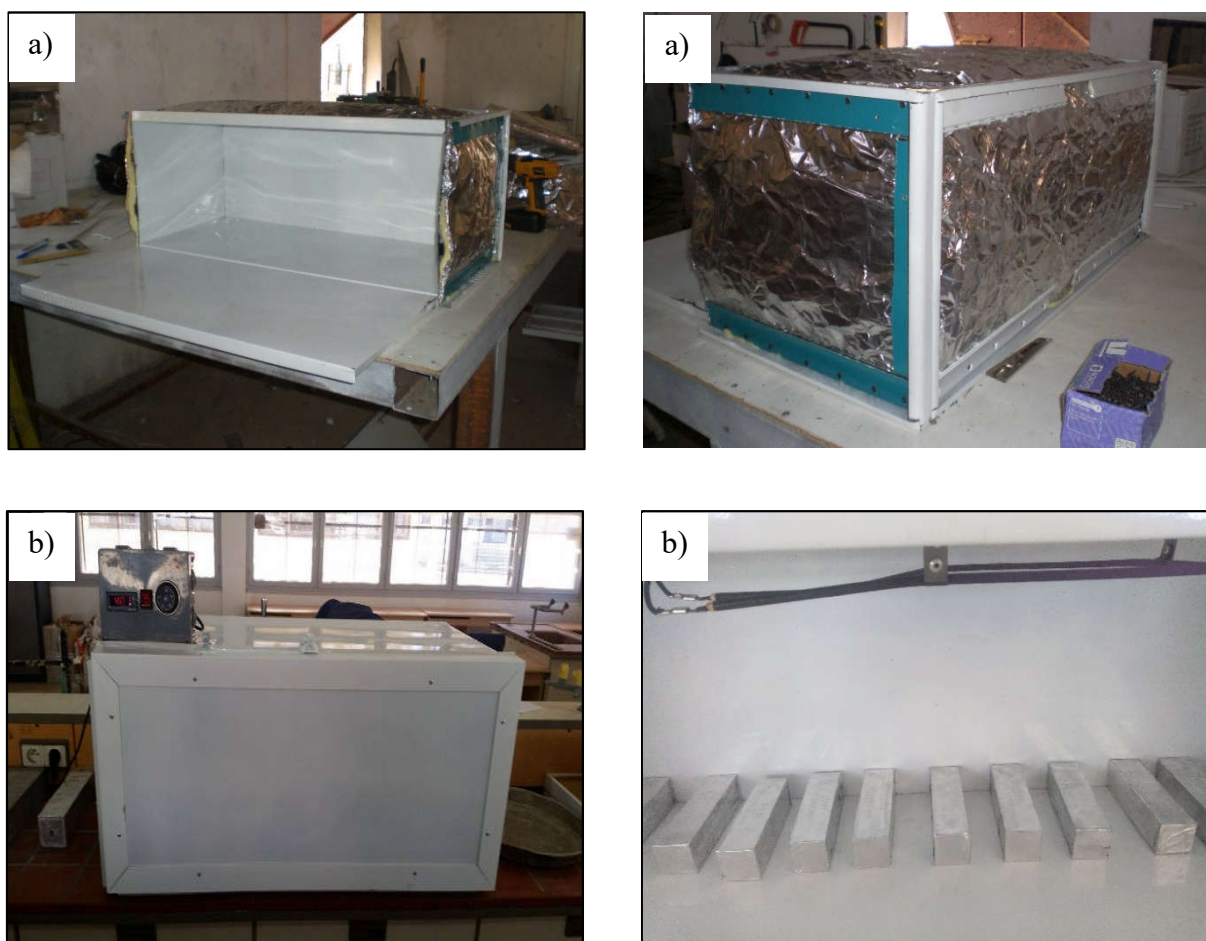


Figure 2. 13 : a) Le montage de l'enceinte isothermique ; b) Cure sèche à 40°C.

Les éprouvettes sont maintenues à ces températures jusqu'aux échéances d'essais mécaniques allant de 3 à 180 jours.

2.5 ESSAIS MECANIKES

2.5.1 Confection des éprouvettes

Des éprouvettes prismatiques $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ont été confectionnées pour mesurer les résistances à la traction et à la compression. 84 combinaisons de mortiers normalisés ont été confectionnées, soit 252 éprouvettes, à différents pourcentages de substitution des sédiments calcines : 0%, 5%, 15%, 25% avec un rapport $E/L=0,5$.

2.5.2 Procédure d'essai

Les éprouvettes ont été confectionnées selon la norme EN 196-1 et compactées manuellement à l'aide d'une table en bois avec 60 chocs aux moules d'une hauteur de $15 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$ par seconde pendant 60s. Une fois arasés, les moules sont couverts d'un film en plastique et stockés dans une salle humide (20°C, 95% HR), pendant 24h. Après le démoulage, les

éprouvettes sont stockées dans différentes températures de cure sèche 10, 20, 40°C jusqu'à 180 jours.

2.5.3 Résistance à la compression

Les demi- prismes obtenus après l'essai de traction par flexion ont été écrasés afin d'évaluer leur résistance à la compression. La machine d'essais de résistance à la flexion (figure 2.14) permet d'appliquer des charges jusqu'à 10 KN avec une vitesse de mise en charge de $50\text{N/s} \pm 10\text{N/s}$, Elle permet d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN à une vitesse de mise en charge de $2400\text{N/s} \pm \text{N/s}$ pour les essais à la compression. Les essais de résistance à la compression et à la traction sont effectués conformément à la norme EN 196-1.



Figure 2. 14 : Machine d'essais de résistance à la flexion et compression.

2.6 CONCLUSION

Ce programme expérimental a pour réponses la caractérisation des ajouts pouzzolaniques des sédiments calcinés et leur influence sur le comportement des pâtes et mortiers vis-à-vis du comportement physique et mécanique. Il expose, en premier lieu, les propriétés des matériaux expérimentaux et en second lieu, les protocoles expérimentaux : identification, caractérisation, mesures de la chaleur d'hydratation, le comportement à l'état frais de la matrice cimentaire et son évolution dans le temps. Une bonne partie a été consacrée à la méthode de calorimétrie isotherme pour la mesure de la chaleur d'hydratation à différentes températures 10°C, 20°C, 40°C. Enfin, un seul rapport $E/L=0,5$ ($Liant=C+K \times L$) a été adopté pour les différentes formulations des mortiers à base de substitution partielle au ciment des sédiments calcinés.

Les résultats obtenus à partir des essais expérimentaux devraient permettre de déterminer l'influence du pourcentage de substitution sur les performances des mortiers. L'organigramme de la figure 2.15 résume de manière exhaustive les essais expérimentaux.

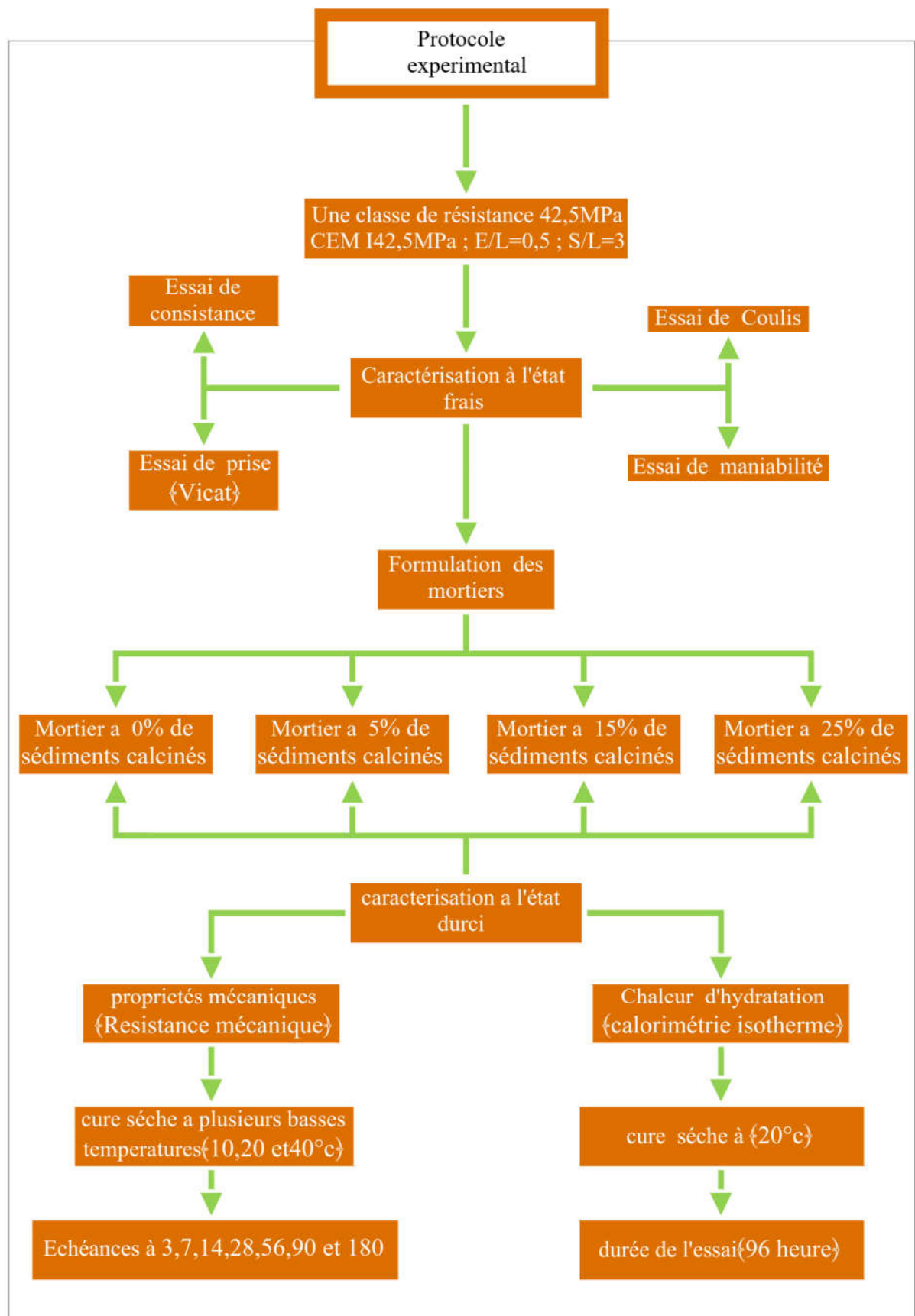


Figure 2. 15 : Organigramme résumant le protocole expérimental mené dans cette étude.

CHAPITRE

RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT

FRAIS ET A L'ETAT DURCI

3

SOMMAIRE

3.1	INTRODUCTION	95
3.2	ANALYSE PAR SPECTROMETRIE INFRAROUGE A TRANSFORMEE DE FOURIER (F.T.I.R).....	96
3.3	Analyse thermogravimétrique (TG/DTG)	97
3.4	ESSAI DE CONSISTANCE	99
3.5	ESSAI DE PRISE	99
3.6	INFLUENCE DES SEDIMENTS CALCINES SUR LA RHEOLOGIE DES MORTIERS FRAIS.....	100
3.7	ESSAIS DE COULIS DE CIMENT.....	103
3.8	ETAT DURCI.....	107
3.9	CONCLUSION.....	115

3.1 INTRODUCTION

L'objet de ce chapitre sera l'interprétation des résultats de caractérisation des sédiments calcinés et non calcinés : analyse par spectroscopie infrarouge et analyse thermogravimétrique. Les résultats de caractérisation des pâtes et mortiers à l'état frais et à l'état durci seront mis en évidence par l'incorporation des sédiments calcinés dans la matrice cimentaire, ainsi que le comportement mécanique des mortiers exposés aux basses températures de cure sèche. Ces mortiers soumis à différentes températures sont caractérisés en flexion 3 points et en compression. En premier lieu, les résultats à l'état frais sur pâtes composées successivement de liants CEM I et de sédiments calcinés, et les essais de consistance et de prise ont été mis en évidence. En second lieu, le comportement rhéologique des mortiers déterminera leur aptitude à l'écoulement et au remplissage des moules. La rhéologie des mortiers a été évaluée avec un maniabilimètre B (LCPC). Les résultats des comportements en flexion de 3 points et en compression ont été illustrés sur l'ensemble des essais mécaniques expérimentaux ; en gardant les mêmes nuances représentatives et les mêmes conditions d'essais données. La détermination des paramètres cinétiques des réactions

d'hydratation avec des essais de calorimétrie isotherme sur des pâtes et mortiers composés d'un mélange de CEM I et les sédiments calcinés (SD) ont été étudiées, à des températures de cure sèche de 10°C, 20°C et 40°C. Enfin, une interprétation globale s'appuiera sur l'observation en microscope électronique.

3.2 ANALYSE PAR SPECTROMETRIE INFRAROUGE A TRANSFORMEE DE FOURIER (F.T.I.R)

Le spectre infrarouge représenté par la figure 2.16 des sédiments calcinés et non calcinés est divisé en deux zones principales. La première zone correspond aux bandes de fréquence élevées entre 3700-3500 cm^{-1} ; la seconde correspond aux fréquences plus faibles située dans la zone 1500-400 cm^{-1} . La grande fréquence concerne la vibration des hydroxyles O-H ; par contre les petites fréquences des bandes concernent les liaisons O-H, H₂O, C-O, Si-O. Les valeurs des pics (cm^{-1}) sont représentées dans le tableau 2.11 :

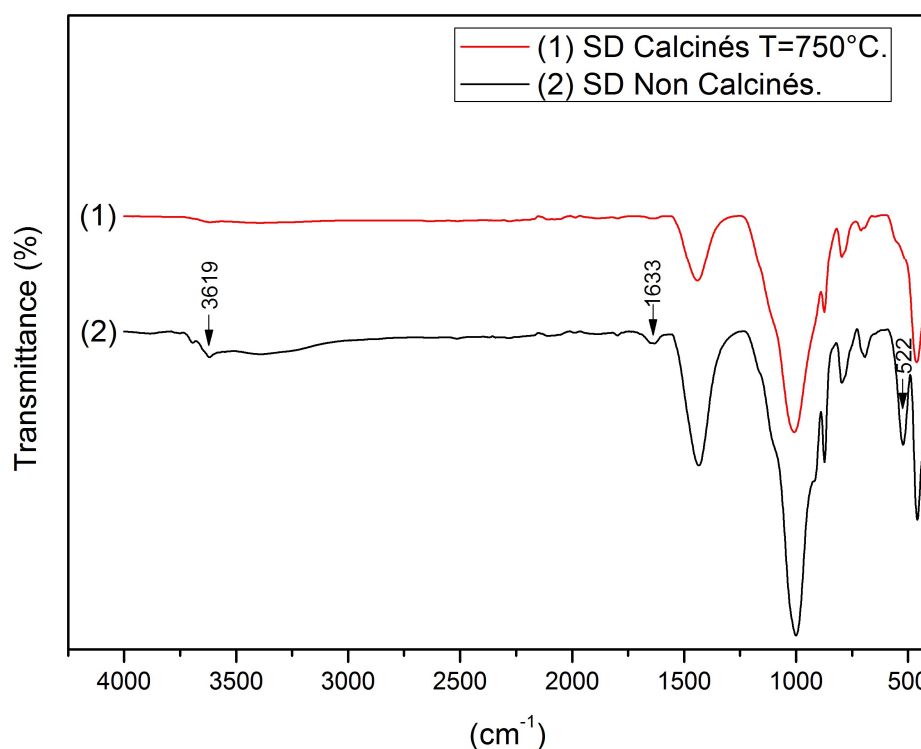


Figure 2. 161 : Spectre IR des sédiments calcinés et non calcinés.

Dans la première zone se trouve la vibration de valence du groupe O-H. Elle se traduit par une bande centrée sur la fréquence O-H interne située à 3619 cm^{-1} et correspond à la kaolinite ordonnée dans les sédiments non calcinés selon Russel ([Chikouche et al., 2016](#); [Hutagalung et al., 2012](#)). La transformation de la bande d'absorption de la kaolinite en métakaolinite dans les sédiments calcinés à 750°C rend l'alumine et la silice potentiellement réactifs qui réagissent avec la chaux libérée lors de l'hydratation sous forme de portlandite ([Anger, 2014](#)). La bande de vibration dans la région 1633 cm^{-1} sera attribuée à la liaison H-O-H qui est

présente dans la structure des sédiments non calcinés (Dondi et al., 2008). La calcite présente dans les deux échantillons des sédiments dans les bandes de vibration dans la région 1435-1440 cm^{-1} et dans la région 872-873 cm^{-1} est attribuée à la liaison C-O (Chikouche et al., 2016). Les bandes d'absorption dans l'intervalle de 795-458 cm^{-1} correspondent à l'élongation de la liaison Si-O et à la liaison par étirement antisymétrique de Si-O-Si ; Elles sont présentes dans les deux échantillons. Cela indique la présence de la kaolinite (Bouzidi, 2012; Joussein et al., 2001; Truche, 2010). La bande d'absorption dans l'intervalle 1000-1008 cm^{-1} correspond au quartz (Bouzidi, 2012; Joussein et al., 2001; Truche, 2010).

Tableau 2. 11 : Valeurs des pics (cm^{-1}) et groupements fonctionnels correspondants observés et composants associés.

Sédiments	Non Calcinés	Calcinés à 750°C	Composant associé	Composition
Hydroxyles O-H	3619	-	Kaolinite	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
H ₂ O	1633	-	Eau	H ₂ O
C-O	1435	1440	Calcite	CaCO_3
	872	873		
Si-O	795	795	Kaolinite	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	692	710		
	522	-		
	458	461		
Si-O	1000	1008	Quartz	SiO_2

3.3 Analyse thermogravimétrique (TG/DTG)

Les courbes correspondantes sont représentées sur les figures 2.17 et 2.18. Les pertes de masse de l'échantillon par rapport à la température fait que les masses des sédiments continuent à diminuer jusqu'à 1000 °C. Cela est dû aux groupements hydroxyles résiduels qui continuent à disparaître (Commission internationale de l'éclairage, 2004; Schneider, 2006).

Les résultats de l'analyse thermogravimétrique et l'analyse thermo différentielle sont représentés dans la figure 2.17 pour les sédiments non calcinés :

Dans l'intervalle de température entre [0 à 100°C] apparait la période de séchage des sédiments avec la disparition de l'eau (Chikouche et al., 2016; Laoufi et al., 2016; Teklay et al., 2015). Dans l'intervalle de température [460°C à 550°C] la déshydroxylation avec la décomposition de la kaolinite en métakaolinite, dûe au changement de la structure de coordination octaédrique de l'aluminium, et à la coordination tétraédrique qui entraîne une perte de cristallinité (Janotka et al., 2010; Sperinck et al., 2011). Dans l'intervalle de température [550°C-780°C], les sédiments bruts subissent une réaction de décarbonatation,

avec la décomposition de la calcite (CaCO_3) avec émission de CO_2 (Dang et al., 2013; Laoufi et al., 2016; Sanders and Gallagher, 2005).

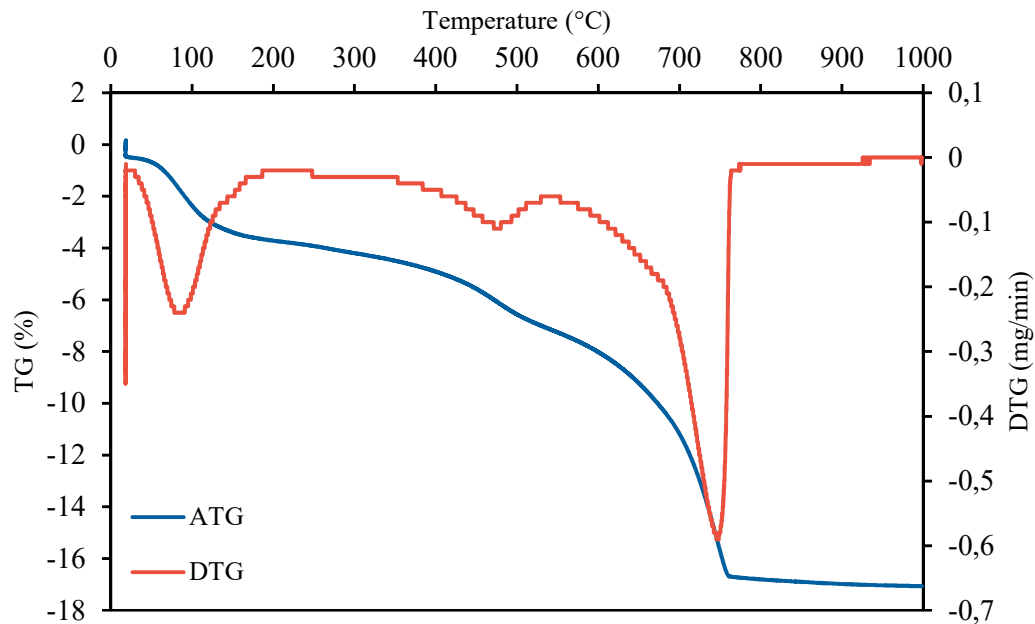


Figure 2. 17 : Analyses ATG/DTG des sédiments non calcinés.

Dans la figure 2.18 sur l'analyse des sédiments calcinés du barrage de Chorfa II, on remarque la disparition du deuxième pic qui correspond à la kaolinite vers 480°C (présent dans l'échantillon des sédiments non calcinés). Ces résultats montrent que le traitement thermique des sédiments non calcinés à 750°C est suffisant pour transformer la kaolinite en métakaolin (Laoufi et al., 2016).

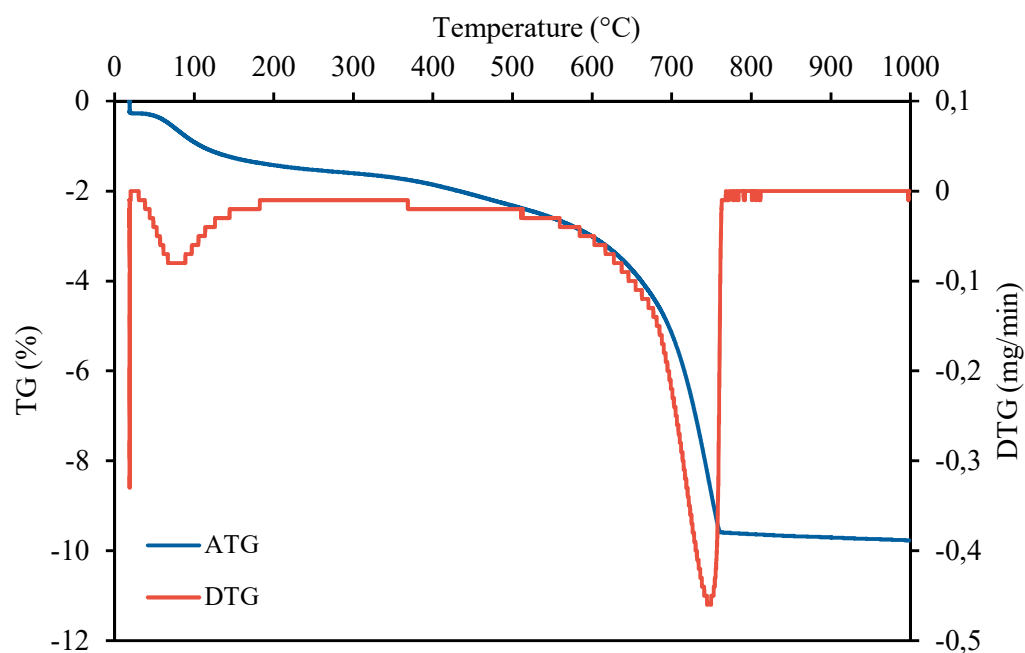


Figure 2. 18 : Analyses ATG/DTG des sédiments calcinés.

3.4 ESSAI DE CONSISTANCE

Les résultats de l'influence du rapport E/C sur la consistance de Vicat sont obtenus selon la norme EN196-3 pour chaque composition de pâte à base de substitution des sédiments de dragage calcinés. Ils sont notés dans la figure 2.19.

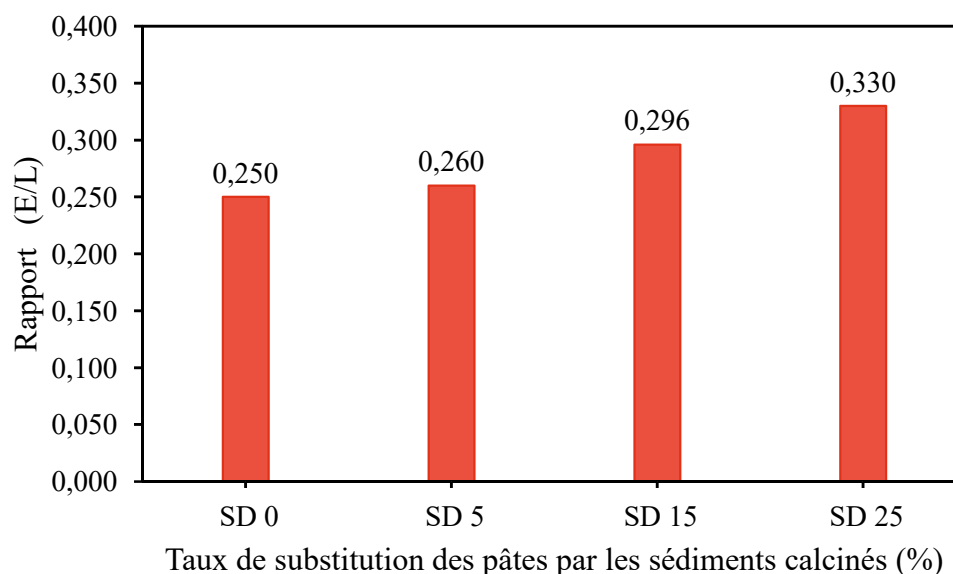


Figure 2. 19 : Influence des dosages des sédiments calcinés sur le rapport E/L.

Cet essai montre que la nature des nouveaux liants à base de substitution des sédiments de dragage calcinés influe sur la consistance. Elle est en relation linéaire avec l'augmentation du taux de substitution, et est due à la grande finesse des sédiments calcinés. Les grains des sédiments beaucoup plus fins que les grains de ciment demandent une plus grande quantité d'eau. Cela contribue à l'éloignement des grains du nouveau liant (ciment + sédiments calcinés) ainsi qu'à une fluidité du mélange. La floculation sera plus importante pour le liant (ciment + sédiments calcinés) et il faudra un dosage en eau plus important pour obtenir la même consistance normalisée. En effet, les grains constituant les sédiments calcinés ayant une dimension plus faible que les grains de ciment amène à la nécessité de défloculer par un adjuvant efficace. C'est pourquoi, il faut utiliser un plastifiant ou un super plastifiant.

3.5 ESSAI DE PRISE

La figure 2.20 représente les résultats de l'essai de mesure des temps de début et de fin de prise selon la norme EN196-3 des pâtes avec un taux de substitution des sédiments de dragage calcinés à 0%, 5%, 15% et 25% par rapport au dosage en masse du ciment.

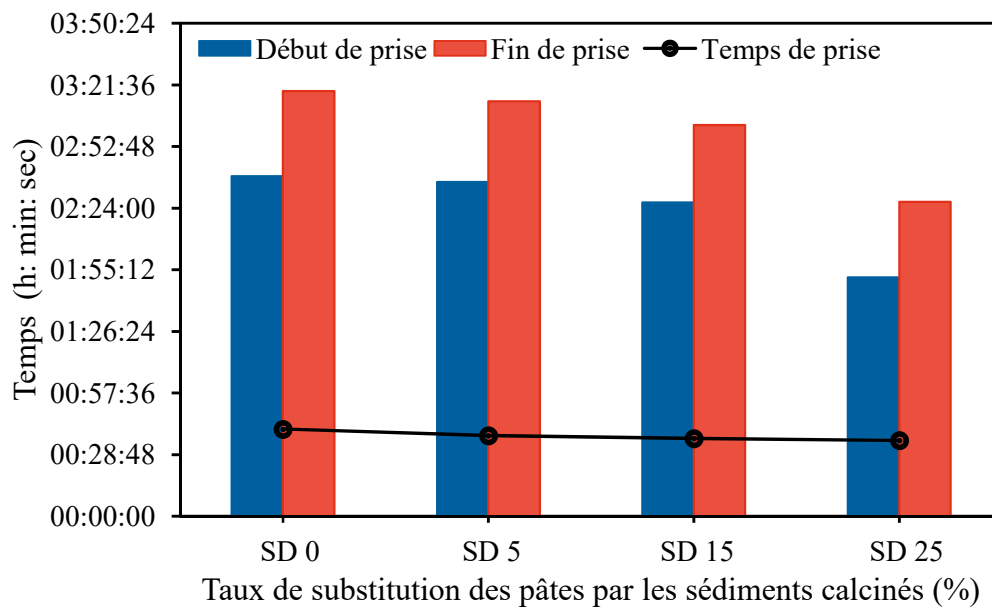


Figure 2. 20 : Influence des dosages des sédiments calcinés sur le temps de prise.

La figure 2.20 montre que l'ajout des sédiments de dragage calcinés affecte légèrement les temps de début et de fin de prise selon le taux de substitution des sédiments de dragage par rapport au ciment. La période dormante d'environ 2h d'hydratation diminue linéairement avec l'augmentation du taux de substitution des sédiments de dragage, dû à la diminution du pourcentage du gypse qui se combine au C_3A dans le ciment lors de l'hydratation. L'accélération de la rigidité de la pâte (temps de début de prise) au moment où l'hydratation de la pâte passe de la période dormante à une période d'hydratation plus active au cours de laquelle la pâte atteint la consistance d'un solide (la fin de prise). Le temps de prise des pâtes à base de substitution des sédiments de dragage est d'environ 37 min pour les différentes pâtes ce qui signifie que la substitution du ciment par les sédiments de dragage n'affecte pas le temps de prise jusqu'à un taux de 25% (Laoufi et al., 2016; Safer et al., 2018).

3.6 INFLUENCE DES SEDIMENTS CALCINES SUR LA RHEOLOGIE DES MORTIERS FRAIS

La figure 2.21 représente le dosage optimal du plastifiant BV40 par rapport à la maniabilité des mortiers à base de substitution des sédiments de dragage, avec la même maniabilité de référence de 5,12 secondes ($t=t^0 \pm 1s$). Pour garder la même consistance pour les autres mortiers une augmentation successive du dosage en adjuvant plastifiant BV40 a été nécessaire.

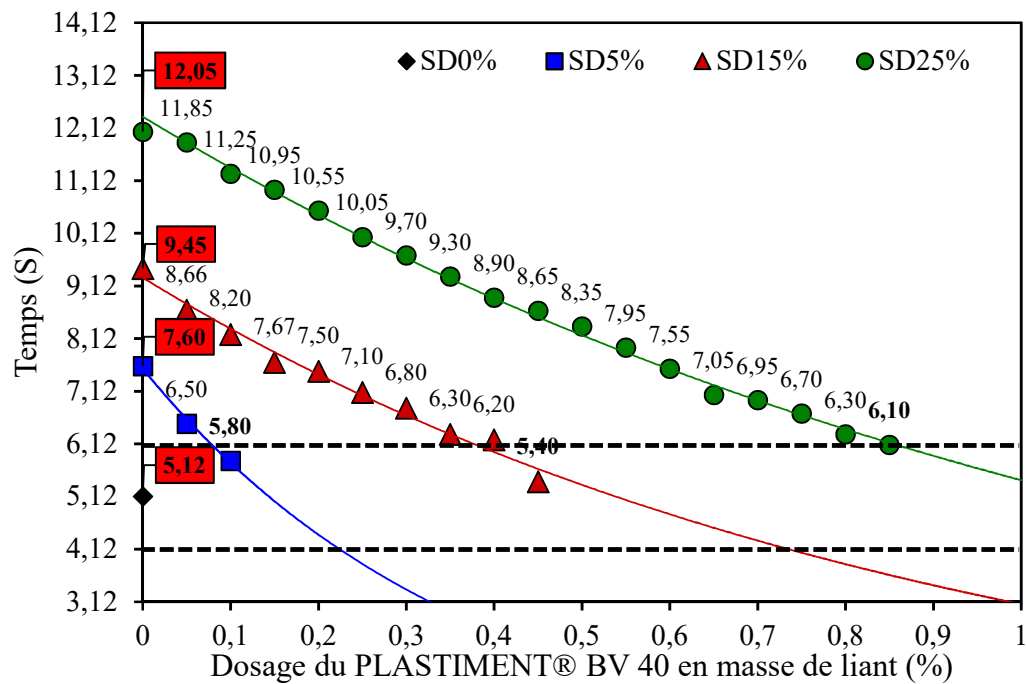


Figure 2. 21 : Influence du dosage du PLASTIMENT® BV40 sur le temps d'écoulement des mortiers à base des sédiments de dragage calcinés.

Pour maintenir une bonne dispersion des sédiments calcinés, il est nécessaire d'augmenter le rapport E/L ou la teneur en plastifiant. Le mortier témoin SD0% a un temps d'écoulement de 5,12s, selon la norme NF P18-452 et P15-437. Le mortier à base de 5%SD a un temps d'écoulement de 5,8s avec utilisation d'un dosage de 0,1% de BV40. Le mortier à base de 15%SD a un temps d'écoulement de 5,4s avec utilisation d'un dosage de 0,45% de BV40. Enfin le mortier à base de 25%SD a un temps d'écoulement de 6,1s avec utilisation de 0,85% d'extrait sec d'adjuvant plastifiant BV40. Les sédiments absorbent une quantité d'eau due à leur grande finesse par rapport au ciment. L'augmentation du taux de substitution des sédiments de dragage demande une augmentation du plastifiant BV40. Le taux de substitution de 25% de sédiments de dragage est le dosage maximum compatible avec le dosage en plastifiant BV40 avec un rapport E/L=0,5 suivant la plage d'utilisation recommandée selon Sika El Djazair. L'utilisation d'un plastifiant permet d'observer un comportement rhéoépaississant pour les mortiers à base des sédiments calcinés, avec une augmentation de la viscosité (Curcio and DeAngelis, 1998; Wild et al., 1996).

La figure 2.22 représente l'influence du dosage du plastifiant BV40 par rapport à l'extrait sec. Le mortier à base 0% SD est le mortier de référence. Il n'y a pas de nécessité d'un plastifiant BV40. Pour le mortier à base de 5%SD, il y a nécessité de 0,1% d'extrait sec. Le mortier à base de 15%SD a nécessité 0,45% d'extrait sec et le mortier à base de 25%SD a nécessité 0,85% d'extrait sec.

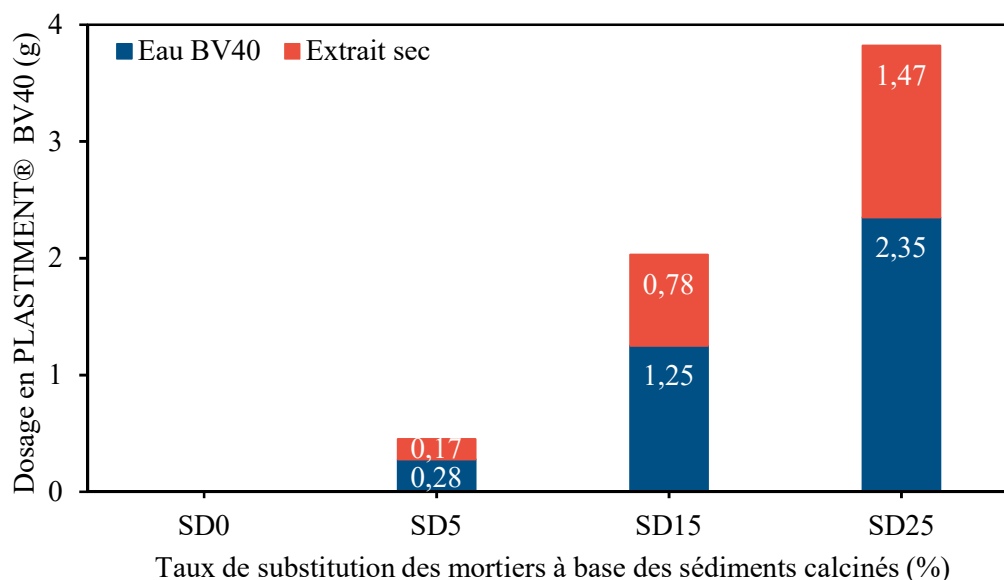


Figure 2. 22 : le dosage du PLASTIMENT® BV40 par rapport à l'extrait sec.

On remarque que le BV40 contient une quantité importante d'eau par rapport à l'extrait sec. Cela nous amène à soustraire cette quantité d'eau de l'eau de gâchage lors de l'élaboration de la formulation de base. L'ensemble des études faites auparavant ne prenait pas en compte cette quantité d'eau présente dans l'adjuvant.

La figure 2.23 présente la densité des différents mortiers à base des sédiments calcinés à l'état frais. On constate que la densité des différents mortiers diminue avec l'augmentation du dosage en substitution. Cela est dû à la faible densité des sédiments par rapport à la densité du ciment au niveau des différentes pâtes des mortiers confectionnés (Zhao et al., 2015).

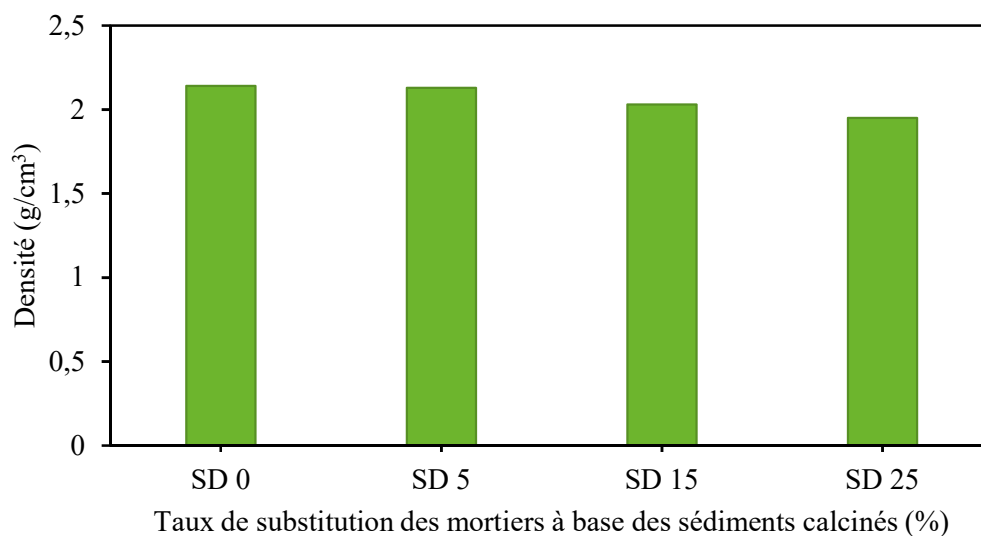


Figure 2. 23 : Densité des différents mortiers à base des sédiments calcinés à l'état frais.

3.7 ESSAIS DE COULIS DE CIMENT

Avant de commencer les essais de formulation des mortiers, il a été nécessaire de s'assurer de la compatibilité du ciment avec le PLASTIMENT® BV40. Des essais de cône de Marsh ont été réalisés pour déterminer les points de saturation en dosage d'adjuvant utilisé avec un rapport E/C=0,5 choisi lors de la formulation des mortiers. Cet essai permettra par la suite d'optimiser et d'ajuster les différents dosages en PLASTIMENT® BV40 pour la formulation des mortiers.

3.7.1 Caractéristiques des coulis de ciment à base des sédiments calcinés

Différentes compositions de coulis de ciment (1500 ± 15 ml) ont été testées à cet effet pour mesurer le temps pour remplir un volume de (1000 ± 10 ml) selon la norme NF EN 14117 et NF EN 13395-2 à des intervalles de temps déterminés de 5min, 15min, 30min et 60min après le malaxage: Un coulis de ciment témoin (C100%+SD0%) et trois coulis avec substitution partielle des sédiments calcinés (C95%+SD5%), (C85%+SD15%) et (C75%+SD25%) par rapport au dosage en PLASTIMENT® BV40 variant de 0% à 1,6%.

Plusieurs rapports E/C ont été testés allant de 0,35 à 0,5 pour la confection du coulis témoin. L'apparition d'une file de coulée de ciment continue apparaît avec le rapport E/C=0,5 avec un temps d'écoulement $t=2$ min et 9 secondes. Le paramètre de masse du ciment a été remplacé par la masse du liant équivalent E/L=0,5 une fois les sédiments calcinés incorporés.

Les formulations des différents coulis testés sont représentées dans le tableau 2.12 :

Tableau 2. 12 : Composition des différents coulis testés.

Composition des coulis	E/L	Ciment(g)	Vase(g)	Eau(g)
Coulis témoin 1 (C100%+SD0%)	0,5	1832,63	0	916,34
Coulis 2 (C95%+SD5%)		1740,99	91,63	916,34
Coulis 3 (C85%+SD15%)		1557,73	274,89	916,34
Coulis 4 (C75%+SD25%)		1374,47	458,15	916,34

Les formulations des différents coulis ont été testés au cône de Marsh pour mesurer le temps d'écoulement à des intervalles déterminés de 5min, 15min, 30min et 60min après le malaxage.

3.7.2 Compatibilité ciment PLASTIMENT® BV40

L'étude de compatibilité du ciment avec le PLASTIMENT® BV40 a été testée sur les coulis de ciment. Les résultats de fluidité du coulis sont représentés dans des courbes de variation du temps d'écoulement à 5min, 15min, 30min et 60min en fonction du dosage en plastifiant des différents coulis à base de sédiments calcinés au cône de Marsh (figures 2.24).

D'après les résultats de l'écoulement du coulis 3 (C85%+SD15%) au cône de Marsh, il a été constaté que le dosage 0% en plastifiant a donné respectivement une coulée discontinu avec un temps de 7 min et 10 secondes, 7 min et 48 secondes et 10 min et 3 secondes pour les différents coulis testés 1,2,3 et 4. Pour le coulis 4 (C75%+SD25%), il a été constaté que le dosage de 0%, 0,2% donne un coulis discontinu suivi par un arrêt du coulé après 9 min et 59 secondes.

Le comportement rhéologique de la combinaison liant-plastifiant étudié a concerné :

- La détermination des points de saturation en plastifiant des différents mélanges avec un rapport E/C de 0,5.
- Le comportement rhéologique de la fluidité sur les différents coulis de ciment a des temps d'écoulement allant de 5 min jusqu'à 60 min.

Le surdosage en plastifiant n'améliore pas la fluidité des coulis mais il augmente les risques de sédimentation et déclenche un retard de prise et de durcissement important au niveau de la formulation adoptée. L'efficacité d'un plastifiant est testée sur un temps de 5min à 60 min sans aucune perte considérable de fluidité à 60 minutes (Dupain and Saint-Arroman, 2009).

La figure 2.24 présente les résultats de la variation du temps d'écoulement à 5, 15, 30, 60 min des différentes pâtes en fonction du dosage en PLASTIMENT® BV 40, pour le coulis 1 (C100%+SD0%) on constate que cette fluidité augmente avec l'augmentation du dosage en BV40 jusqu'à une valeur critique de 0,5%. Au-delà de ce dosage la consistance et la fluidité de la pâte ne varient pratiquement plus (Dose de saturation). Cette fluidité est maintenue constante jusqu'à 30 min. Pour atteindre cette même fluidité à 60 min il faudra un dosage supérieur à 1%. Le coulis 2 (C95%+SD5%) présente le même comportement rhéologique que le coulis témoin avec une dose de saturation en adjuvant de 0,6%. Cette fluidité est maintenue constante jusqu'à 15 min. Pour avoir cette même fluidité jusqu'à 60 min il faudra un dosage de 1,2% en BV40. Pour le coulis 3 un dosage de 0% d'adjuvant a permis d'avoir un coulis discontinu allant de 7 min et 10 sec jusqu'à 10 min et 3 sec sur les différentes échéances d'écoulement. Cette fluidité est récupérée avec une augmentation d'une dose de PLASTIMENT® BV40 allant de 0,2% à 1%, avec un dosage de saturation de 1% et une

légère dégradation de la fluidité à 60 min. Le coulis 4 avec un dosage de 0% et 0,2% du PLASTIMENT® BV40 permet d'observer du goutte à goutte. A partir de 0,4% du dosage en adjuvant cette fluidité augmente avec le dosage en adjuvant jusqu'à une valeur de 1,2% qui sera la dose de saturation maximum utilisable pour cette pâte. Un bon comportement rhéologique sur la fluidité a été maintenu à court terme ; mais avec une nette dégradation de la fluidité sur l'ensemble des échéances du temps d'écoulement.

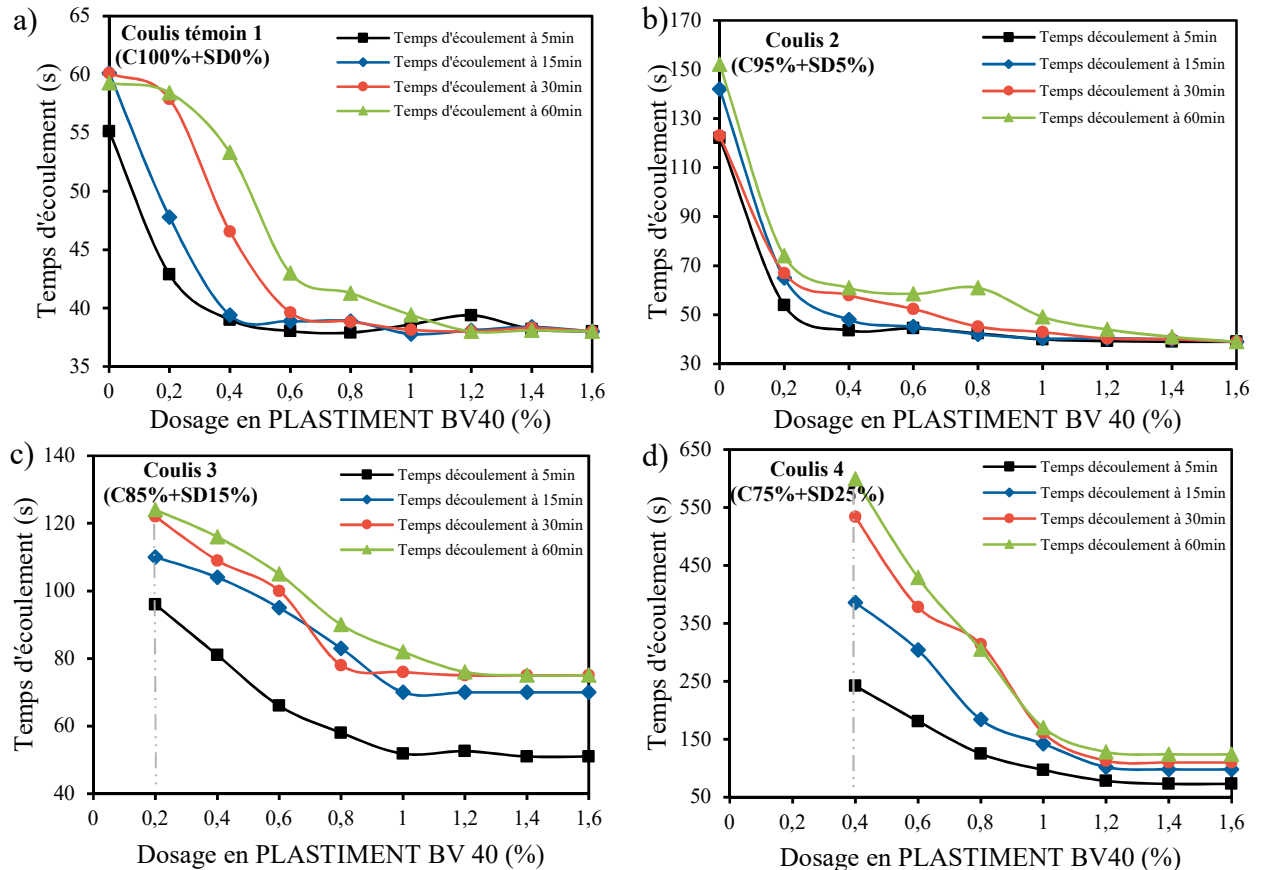


Figure 2. 24 : Variation du temps d'écoulement à 5, 15, 30 et 60 min des coulis : a) Coulis témoin 1 ; b) Coulis 2 ; c) Coulis 3 et d) Coulis 4.

3.7.3 Mesure de l'efficacité d'un adjuvant en fonction des coulis de ciment à base de substitution des sédiments calcinés

3.7.3.1 Mesure de la fluidité des différents coulis de ciment à 5 et 60 min

Les résultats de l'écoulement au cône de Marsh pour un rapport E/L= 0,5 montrent une grande influence du dosage en plastifiant sur le temps d'écoulement des différents coulis de ciment. Les points de saturation des différents types de coulis augmentent de façon linéaire avec le taux de substitution des sédiments calcinés suivant une équation linéaire $y=0.0295x+0.4932$ avec $R^2=0.9793$. La dose de saturation des différents coulis étudiés 1, 2, 3

et 4 est respectivement de 0,5%, 0, 6% %,1 % et 1,2 % en dosage de PLASTIMENT ®BV 40 (figure 2.25).

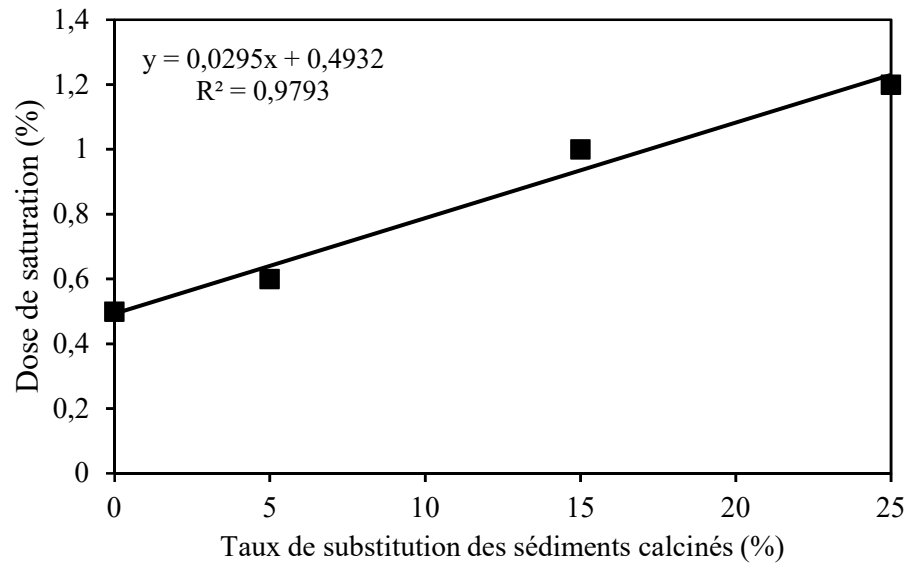


Figure 2. 25 : Corrélation entre la dose de saturation et le taux de substitution des sédiments calcinés.

La fluidité des coulis de ciment à base des sédiments calcinés a une grande influence avec le dosage en adjuvant. La substitution du ciment par les sédiments affecte négativement la fluidité jusqu'à des dosages importants en PLASTIMENT BV40 de 1% et 1,2% pour des taux de substitution de 15% et 25%.

La figure 2.26 illustre clairement le comportement des différents coulis de ciment en fonction des pourcentages de substitution par des sédiments calcinés avec une diminution significative de la fluidité des coulis. Ces résultats sont en concordance avec les résultats de la littérature sur les incorporations des différents ajouts à caractère pouzzolanique (Belguesmia, 2018; Djezzar et al., 1998).

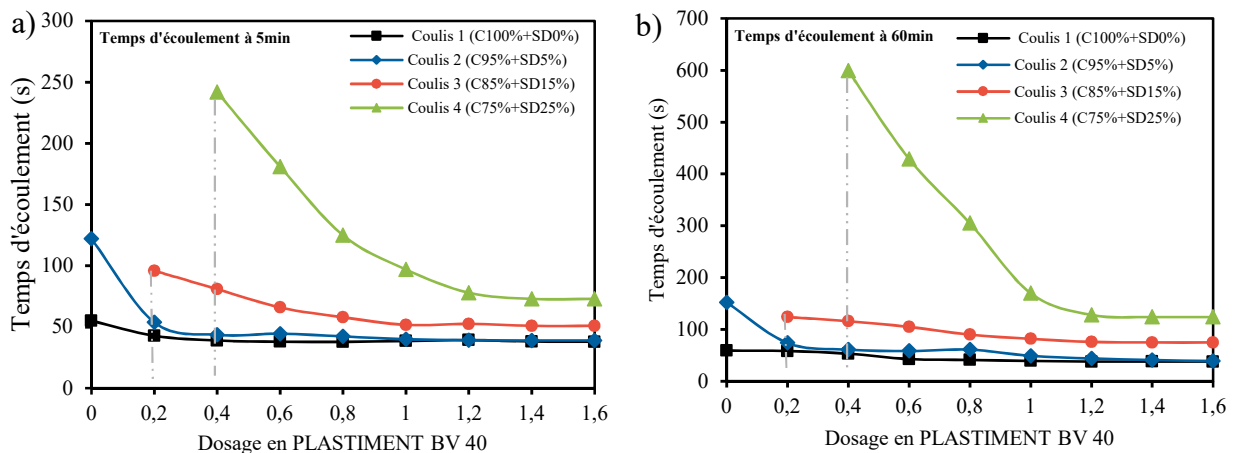


Figure 2. 26 : Evolution de temps d'écoulement des coulis en fonction du dosage BV 40 : a) Temps d'écoulement à 15 min ; b) Temps d'écoulement à 60 min.

La figure 2.27 montre de façon significative la perte de fluidité des différents coulis à base de sédiments calcinés avec un taux de substitution de 25%. Une grande fluidité est perdue de l'ordre de 357s avec un dosage en plastiment BV40 de 0,4%. Cette fluidité est récupérée jusqu'à un dosage de 1,2% en adjuvant (dose de saturation) ; avec une conservation de fluidité jusqu'à 60 min. Les autres pourcentages de substitution $\leq 15\%$ n'affectent pas vraiment la fluidité des différents coulis entre 0 et 39 s jusqu'à 60 min. Ces coulis de ciment (1, 2 et 3) sont stables et conservent leur fluidité jusqu'à 60 min.

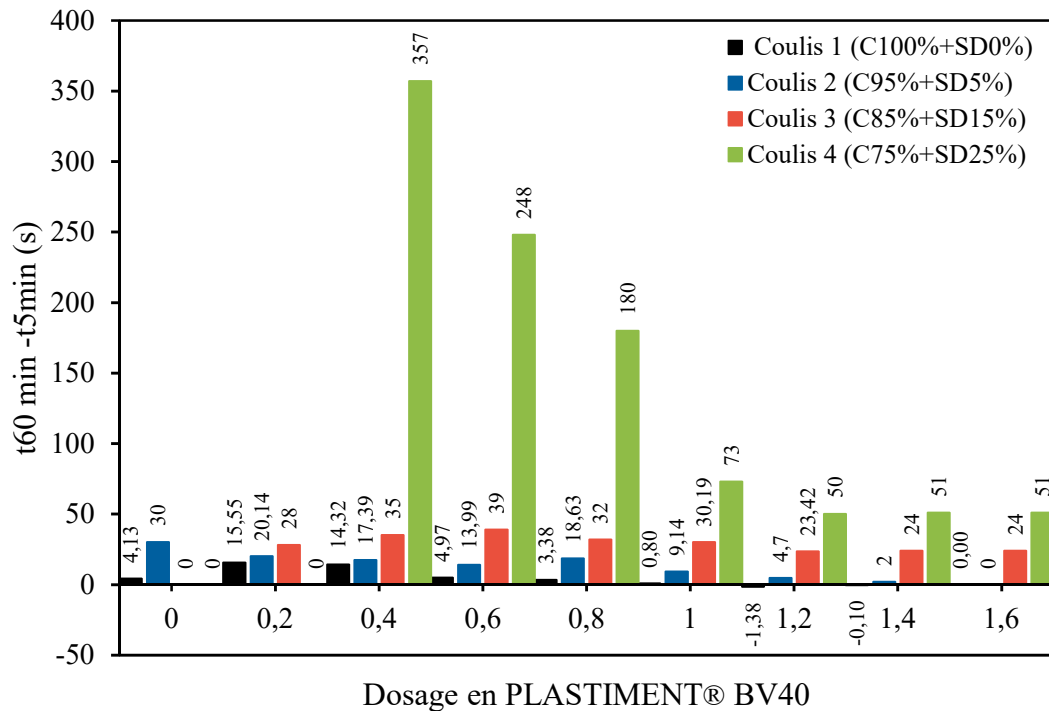


Figure 2. 27 : Perte de fluidité pour les différents coulis avec substitution des sédiments calcinés.

3.8 ETAT DURCI

3.8.1 Essai de chaleur d'hydratation sur les pâtes à base de sédiments calcinés

La figure 2.28 représente la chaleur et le flux dégagés en fonction du temps des pâtes avec substitution de 0, 5, 15 et 25% de sédiments calcinés (Chorfa II).

L'évolution du flux de chaleur des différentes pâtes suit la même cinétique. L'hydratation présente deux pics : Le premier pic correspond aux réactions initiales " Pré-induction", d'une durée de quelques minutes. Il commence tout de suite après le contact du ciment et des sédiments calcinés avec l'eau ; avec formation d'ettringite. Ce pic est suivi par la phase "d'induction" ou dormante, avec un dégagement de chaleur très faible et une saturation progressive de la chaux. Le deuxième pic représente la phase "d'accélération" au cours de laquelle l'activité chimique s'intensifie. Dans cette période se forment rapidement de la C-S-H et CH (le liant fait prise). Le taux de dégagement augmente pendant 8 heures ; jusqu'au pic

principal, avec formation d'hydrosilicate et d'ettringite supplémentaires (Bouabid et al., 2014; Jiang and Van Damme, 1996).

La substitution du ciment par les sédiments calcinés de l'ordre de 15% procure à 98 heures une chaleur plus importante que celle de 25%, 5% et 0%. Cela est dû à la réaction pouzzolanique lente entre la métakaolinite présente dans les sédiments calcinés, et la chaux avec présence d'eau, en comparaison a la réaction d'hydratation du C_3S (Belguesmia, 2018; Safer, 2017).

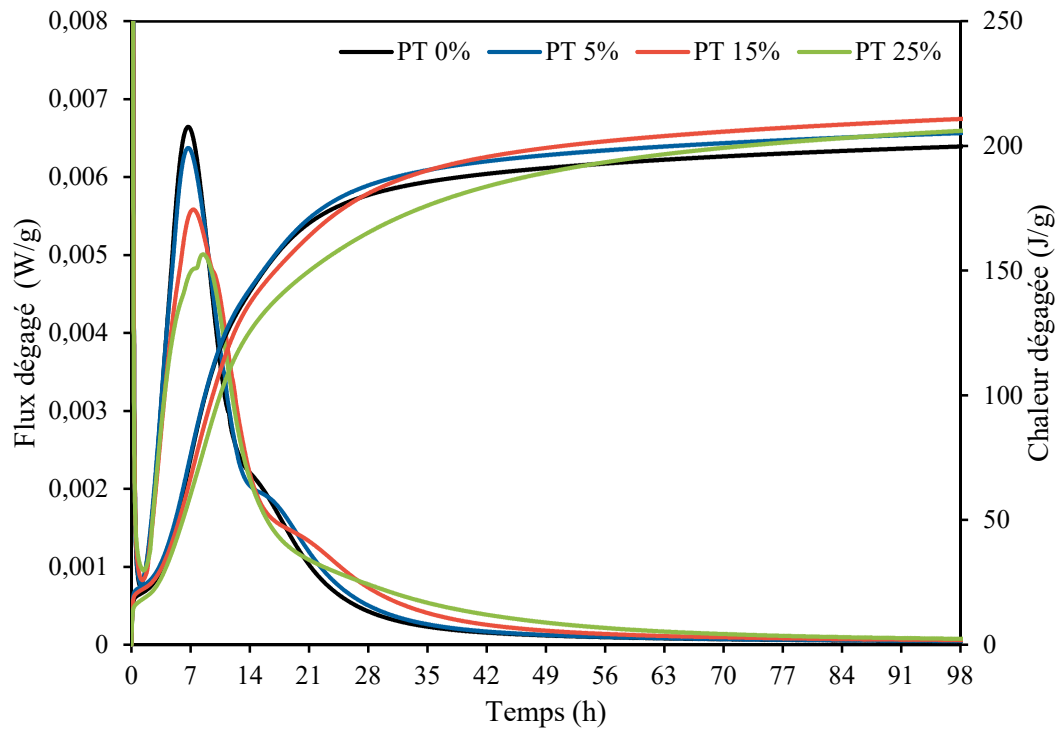


Figure 2. 28 : Flux thermiques et chaleurs dégagées des pâtes à base de 0%, 5%, 15% et 25% des sédiments calcinés.

3.8.2 Essai de chaleur d'hydratation sur les mortiers à base de sédiments calcinés

La figure 2.29 représente la chaleur et le flux dégagés en fonction du temps des mortiers à base de 0, 5, 15 et 25% des sédiments calcinés (Chorfa II).

La chaleur dégagée des différents mortiers évolué, de la même manière pour les différents taux de substitution (0, 5, 15, 25%). La chaleur dégagée diminue avec l'augmentation du taux de substitution, tout le long de l'hydratation des différents mortiers. L'augmentation croissante du taux d'adjuvant retarde la réaction d'hydratation. (Jiang and Van Damme, 1996) ont étudié l'effet des additions minérales sur la chaleur d'hydratation des mortiers. Les résultats ont montré que le processus d'hydratation endothermique du mortier est très influencé lors du remplacement d'une partie de ciment par les ajouts.

Le flux de chaleur des mortiers à base des taux de substitution 0% et 5% des sédiments calcinés est nettement plus important, que celui des mortiers à base des taux de substitution 15% et 25%, avec un dosage important en adjuvant BV40 d'extrait sec de l'ordre de 0,45% et 0,85% (Belaribi, 2015).

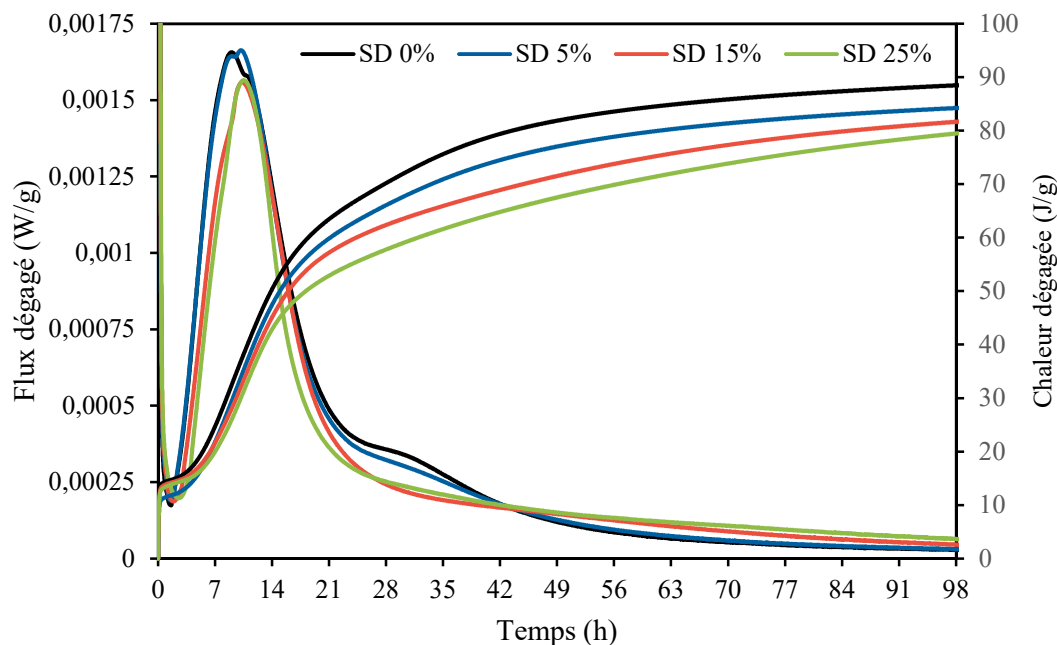


Figure 2. 29 : Flux thermiques et chaleurs dégagées des mortiers à base de 0%, 5%, 15% et 25% des sédiments calcinés.

3.8.3 Résistances à la compression

La figure 2.30 et 2.31 montre l'évolution de la résistance en compression et le gain de résistance des mortiers à base de sédiments de dragage par rapport au mortier témoin à différentes températures 10°C, 20°C et 40°C.

Les résultats ont montré qu'après 3 jours l'incorporation des sédiments de dragage réduit significativement les résistances en compression des mortiers avec un taux de 15% et de 25%. Cela est dû principalement au dosage important du plastifiant BV40 pour garder la même maniabilité que le mortier témoin. Un retard de durcissement des mortiers à base de 25% de sédiments de dragage a été observé. A partir de 7 jours on constate pour la plupart des mélanges des mortiers une augmentation régulière de la résistance, confirmant ainsi une certaine activité des sédiments de dragage calcinés. La température de 10°C affecte négativement les résistances à la compression des différents mortiers. Avec des températures de 20°C et 40°C des améliorations des résultats des résistances mécaniques ont été constatés ; dues à l'accélération du durcissement des différents mortiers. Les mortiers à base de sédiments donnent aussi des résultats très satisfaisants par rapport au mortier témoin ; et

même meilleurs pour les mortiers avec un taux de 5% et 15%. La cure à 40°C accélère l'activité pouzzolanique. Les meilleurs résultats de compression pour les taux de 15% et 25 % ont été observés à 90 jours pour la cure à 40°C. Par contre des améliorations ont été observées à 180 jours pour la cure à 20°C. Une température de cure à 10°C avec une durée supérieure à 180 jours est nécessaire pour avoir les mêmes performances (Siline et al., 2013; Tahlaiti et al., 2014; Zunino et Scrivener, 2018).

La température de cure de 40°C accélère l'activité pouzzolanique par rapport aux autres températures de cure à 10°C et 20°, par une formation de portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) entre 15 et 25% ; qui réagit avec la métakaolinite transformée ($\text{Al}_2\text{O}_3(\text{SiO}_2)_2$). La calcination des sédiments amorphes et vitreux forme un nouveau silicate calcique hydraté (CSH) et un aluminat calcique hydraté (CASH) (Abdelli et al., 2017a, 2017b; Perlot and Rougeau, 2007).

3.8.4 Résistances à la traction

La figure 2.32 et 2.33 montre l'évolution de la résistance en traction et le gain des résistances des mortiers à base de sédiments de dragage par rapport au mortier témoin à différentes températures 10°C, 20°C et 40°C.

Les résultats des essais de résistance mécanique en traction réalisés sur des mortiers à base de substitution partielle de sédiments de dragage calcinés à cure sèche ont montré une augmentation des résistances par rapport aux différentes températures de cure 10°C, 20°C et 40°C. Aucune chute des résistances n'a été observée tout le long des échéances de cure. La même évolution des résistances de traction qu'à la compression a été observée pour l'ensemble des différents taux de substitution aux différentes températures de cure 10°C, 20°C et 40°C. Cela montre une grande corrélation entre les résistances à la traction et à la compression sur les différents types de cure. La substitution du ciment par des sédiments calcinés améliore les résistances à la traction pour les deux modes de cure à 20°C et 40°C à 180 jours et 90 jours. La diminution des résistances aux jeunes âges est due principalement au déclenchement de l'activité pouzzolanique tardive et à une hydratation lente. La réaction chimique entre la silice et l'alumine dans la phase amorphe du métakaolinite dans les sédiments calcinés et la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) lors de l'hydratation du ciment forme des hydrates CSH et CH (Benaissa et al., 2016; Laoufi et al., 2016).

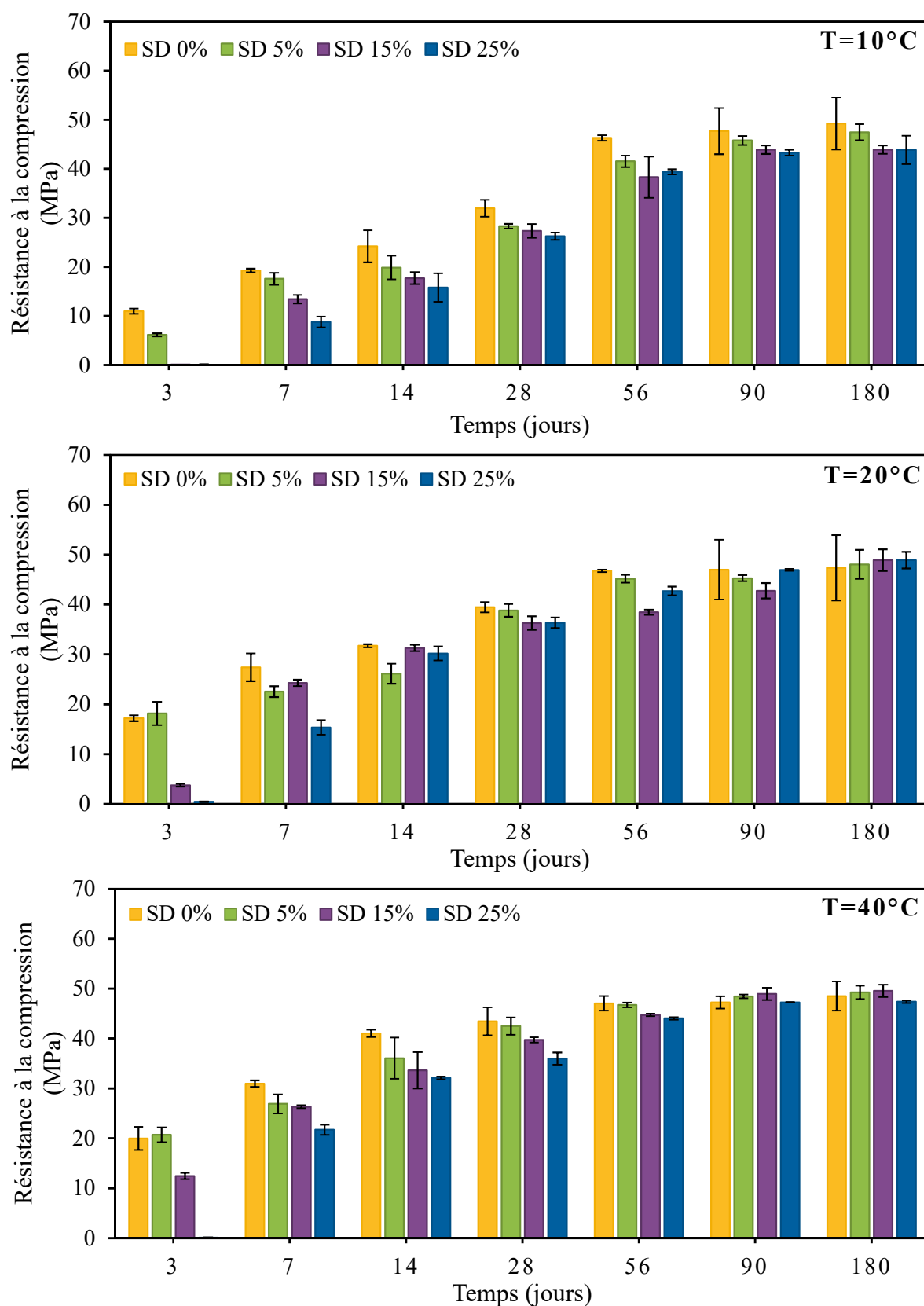


Figure 2. 30 : Evolution de la résistance en compression des mortiers à base de sédiments de dragage par rapport au mortier témoin à 10°C, 20°C et 40°C.

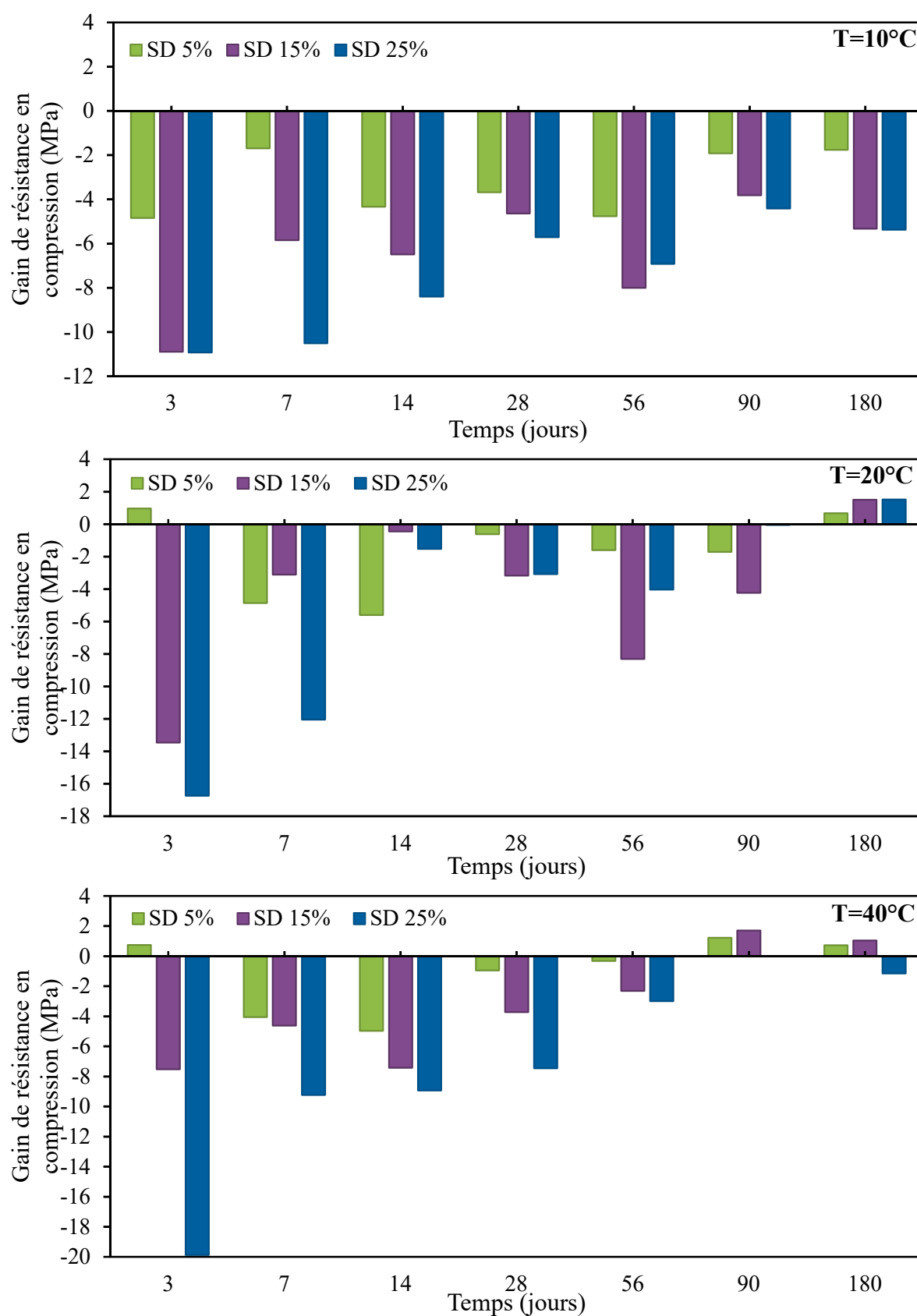


Figure 2. 31 : Evolution du gain de résistance en compression des mortiers à base de sédiments de dragage calcinés par rapport au mortier témoin à 10°C, 20°C et 40°C.

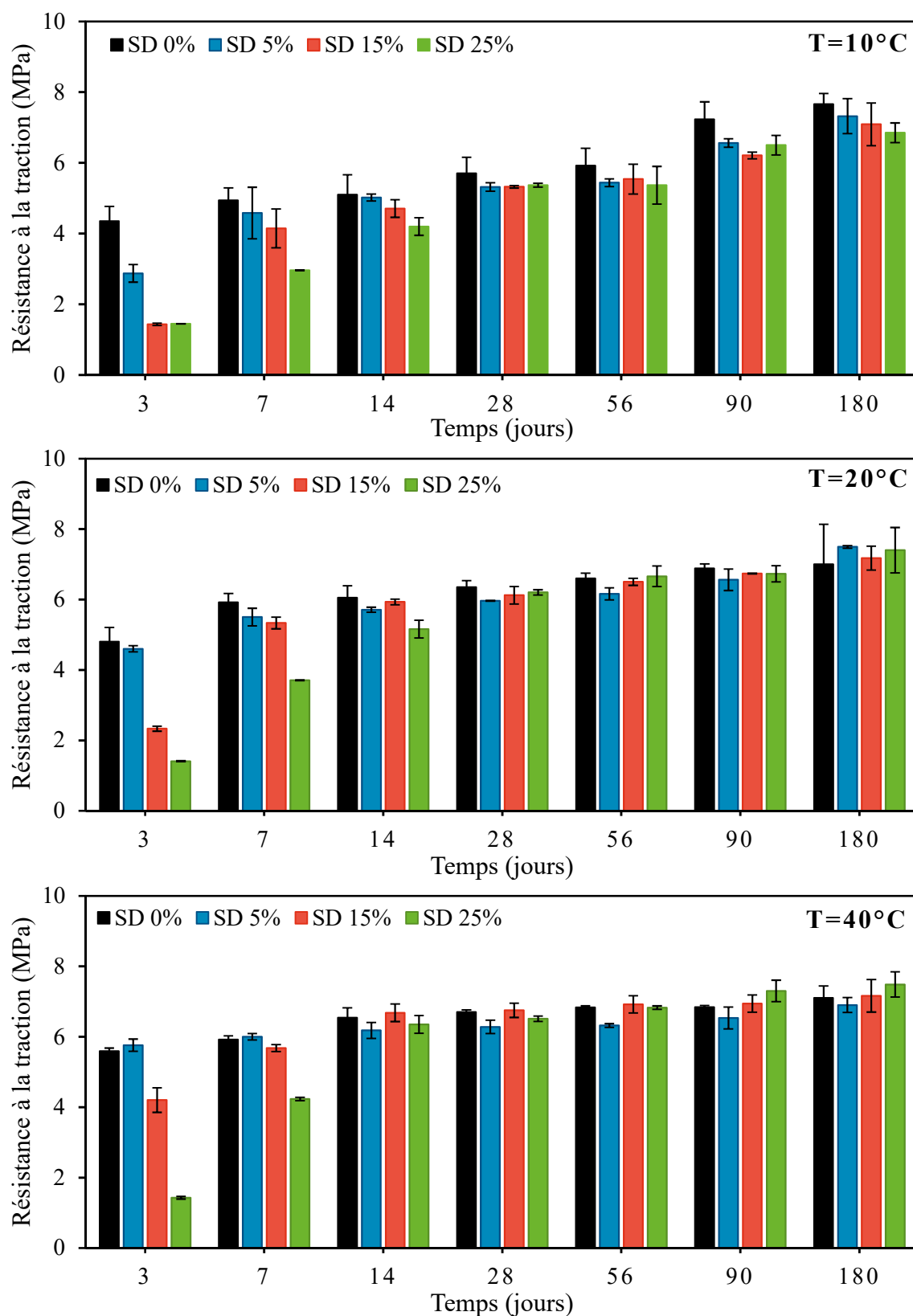


Figure 2. 32 : Evolution de la résistance en traction des mortiers à base de sédiments de dragage calcinés par rapport au mortier témoin à 10°C, 20°C et 40°C.

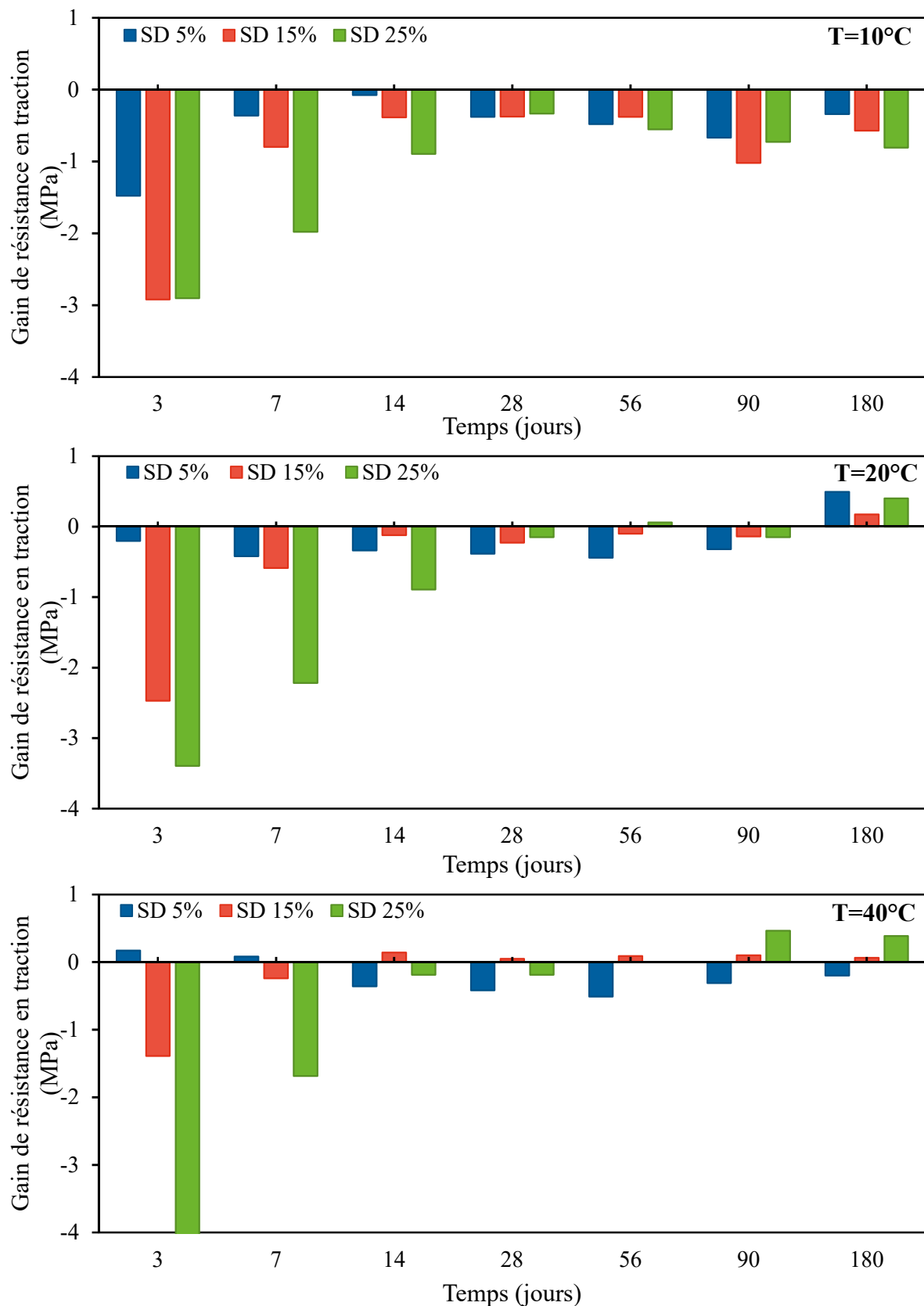


Figure 2. 33 : Evolution du gain de résistance en traction des mortiers à base de sédiments de dragage calcinés par rapport au mortier témoin à 10°C, 20°C et 40°C.

3.8.5 Corrélation entre la résistance en compression et la résistance en traction

Les résultats du comportement mécanique des résistance en compression et en traction suivent la même allure lors de leur évolution. Il est intéressant de trouver la corrélation entre la résistance à la compression et la résistance en traction par rapport aux différentes températures de cure 10°, 20°C et 40°C.

La figure 2.34 montre la corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction pour les différents types de mortiers, qui suit une loi linéaire selon une approche empirique traditionnelle. Avec le coefficient de corrélation $R^2=0,8723$ pour la température de cure de 10°C, $R^2=0,8868$ pour la température de cure 20°C et $R^2=0,7975$ pour la température de cure 40°C montre la grande similarité entre les mortiers témoins et les mortiers à base de substitution des sédiments calcinés.

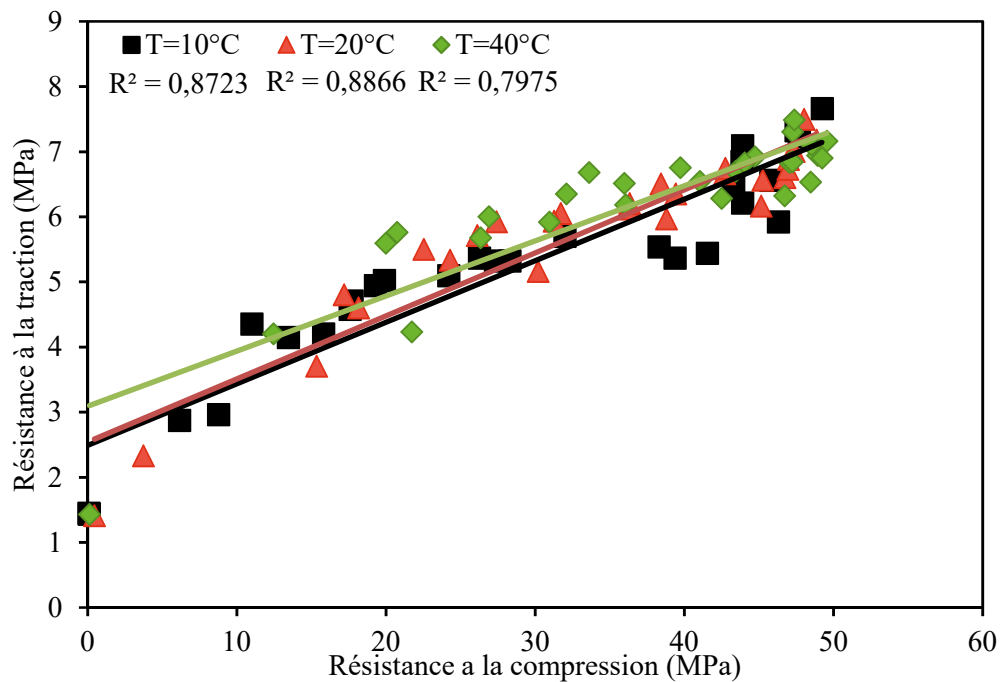


Figure 2. 34 : Corrélation entre la résistance en compression et la résistance en traction.

3.9 CONCLUSION

A travers ce programme expérimental l'identification et la caractérisation des ajouts à caractères pouzzolaniques (sédiments calcinés) du barrage de Chorfa ont été mis en évidence sur le comportement des pâtes, coulis et mortiers vis-à-vis du comportement rhéologique et du comportement mécanique avec plusieurs températures de cure sèche (10°C, 20°C et 40°C).

L'analyse DRX et FTIR a montré un réel avantage du traitement thermique des sédiments, pour acquérir un comportement pouzzolanique ; dû à la transformation de la kaolinite en métakaolinite.

Le temps de prise des pâtes à base de substitution des sédiments de dragage est d'environ 37min pour les différentes pâtes ; ce qui signifie que la substitution du ciment par les sédiments de dragage n'affecte pas le temps de prise jusqu'à un taux de 25%.

La substitution avec un taux de 25% affecte la fluidité des coulis de ciment à base de sédiments calcinés à 60 min avec une perte de fluidité, même avec un dosage important en plastifiant PLASTIMENT® BV 40.

Le dosage de saturation pour les différents coulis de ciment étudiés 1 (C100%+SD0%), 2 (C95%+SD5%), 3 (C95%+SD15), et 4 (C75%+SD25%) à base de sédiments calcinés a donné respectivement 0,5%, 0, 6% %,1 % et 1,2 % en dosage de PLASTIMENT ®BV 40.

Les meilleurs résultats du comportement mécanique des mortiers confectionnés ont été observés a des températures de cure de 20°C et 40°C. Avec une accélération de l'activité pouzzolanique à 90 jours pour la cure à 40°C et 180 jours à 20°C le développement des résistances à la compression est relativement supérieur à celui des résistances du mortier témoin. La cure sèche à 40°C permet un gain à 90 jours par rapport à la cure de 20°C, et au-delà de 90 jours pour la cure à 10°C de cure sèche. Les sédiments calcinés ont une cinétique dite lente similaire aux cendres volantes due à l'illite et à la muscovite avec un traitement inférieur à 930°C ([Chikouche et al., 2016](#)).

La suite de ce travail sera l'évaluation environnementale de cette partie expérimentale ; avec l'analyse du cycle de vie (ACV) des différents protocoles expérimentaux des pâtes, coulis, mortiers ; et la proposition d'un processus d'industrialisation des sédiments calcinés à l'échelle industrielle.

PARTIE

3

Analyse du cycle de vie des sédiments
calcinés et résultats

CHAPITRE 1

ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES
SEDIMENTS CALCINES

117à132

CHAPITRE 2

RESULTATS ET DISCUSSION

133à155

CHAPITRE

ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES

SEDIMENTS CALCINES

1

SOMMAIRE

1.1	INTRODUCTION	117
1.2	INDUSTRIALISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE CALCINES	118
1.2.1	DEVELOPPEMENT D'UN MODELE ECO CONÇU DU SYSTEME DE TRAITEMENT DES SEDIMENTS DE DRAGAGE CALCINES	118
1.3	ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES SEDIMENTS CALCINES : CAS D'APPLICATION DE L'ACV DANS LE PROCESSUS EXPERIMENTAL	125
1.3.1	Analyse du cycle de vie des ciments à base de sédiments de dragage	125
1.3.2	Analyse du cycle de vie des pâtes et mortiers à base des sédiments calcinés ..	130
1.4	CONCLUSION.....	132

1.1 INTRODUCTION

Le dragage constitue une activité vitale pour l'exploitation des barrages. Cette opération est une phase importante dans la récupération et la préservation des volumes utiles de stockage des barrages. Mais le devenir des quantités importantes de sédiments récupérés constitue un enjeu environnemental et économique de taille.

Plusieurs études de recherches récentes ont été présentées dans l'état de l'art sur la valorisation des sédiments issus du dragage des barrages ; menées dans le domaine de caractérisation physico-chimique, mécanique et de durabilité. Elles ont démontré la possibilité d'utiliser ces sédiments en tant que matière première dans le domaine de génie civil, et spécialement en substitution partielle au ciment. Tous les résultats issus de ces recherches ouvrent la possibilité de proposer un modèle d'industrialisation des sédiments de dragage après une analyse de leur cycle de vie.

Dans ce chapitre, on propose un modèle d'industrialisation des sédiments de dragage des barrages en Algérie ainsi que l'évaluation environnementale de ce modèle à l'aide des logiciels d'ACV (GEMIS 4.95 et SimaPro 8.5.2.0), et une comparaison environnementale des matériaux utilisés dans la formulation des matrices cimentaires étudiées (ciments, pâtes et mortiers).

1.2 INDUSTRIALISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE CALCINES

1.2.1 Développement d'un modèle éco conçu du système de traitement des sédiments de dragage calcines

L'objectif de ce travail est de mettre en place un système à basse consommation d'énergie pour le traitement des sédiments de dragage calcinés, en prenant en considération les impacts sur l'environnement, tout le long du cycle de vie de ce processus : et de réduire les émissions des flux sortants vers l'atmosphère (rejets dans l'eau, l'air et le sol).

A travers cette étude nous allons exposer les différents procédés, les hypothèses et les données utilisées dans la modélisation du processus de traitement des sédiments de dragage. Cette modélisation permettra d'élaborer un outil d'aide à la décision pour le choix optimal d'élimination des sédiments de dragage.

L'objectif de ce travail est l'application d'analyse du cycle de vie (ACV) des sédiments de dragage calcinés dans le domaine du bâtiment, avec un mortier où une partie du ciment sera substituée par des sédiments calcinés (figure 3.1).

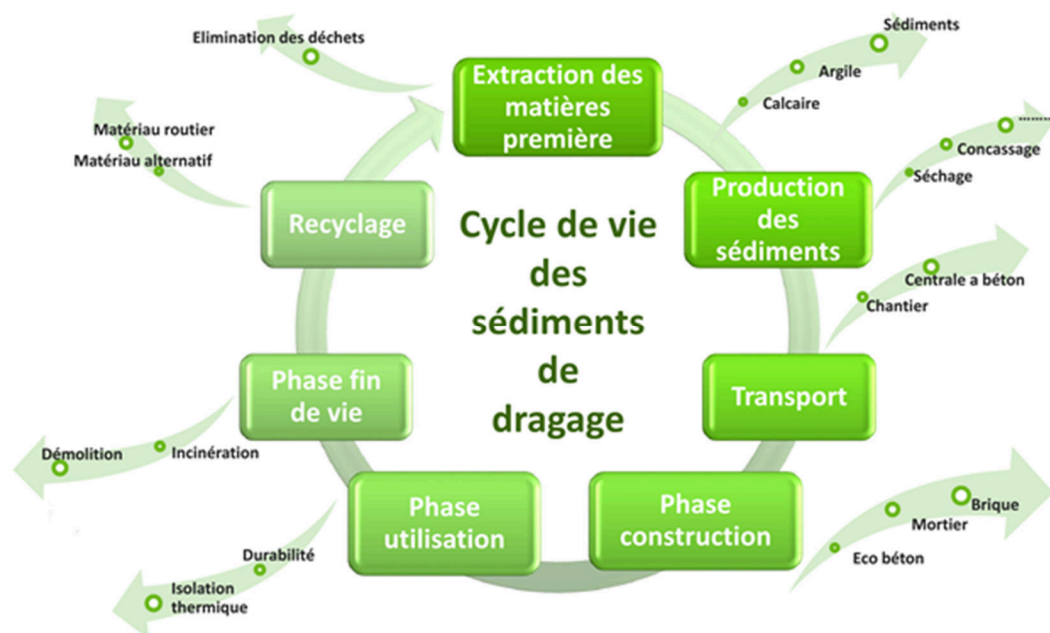


Figure 3. 1 : Cycle de vie des sédiments de dragage : cas d'application dans le bâtiment avec un béton et mortier, où une partie du ciment sera substituée par des sédiments de dragage.

1.2.1.1 Description du système

Deux scénarios industriels sont envisageables pour le traitement des sédiments, afin de les valoriser comme matière première dans la substitution du ciment.

- Scénario 1 : Il consiste à utiliser les sédiments après la décantation totale et le séchage

à l'air libre dans les zones de rejet. L'extraction des sédiments est faite par un chargeur, ensuite on les transporte par un dumper jusqu'à la station de traitement des sédiments de dragage, l'installation de l'usine étant au niveau des zones de rejet (figure 3.2).

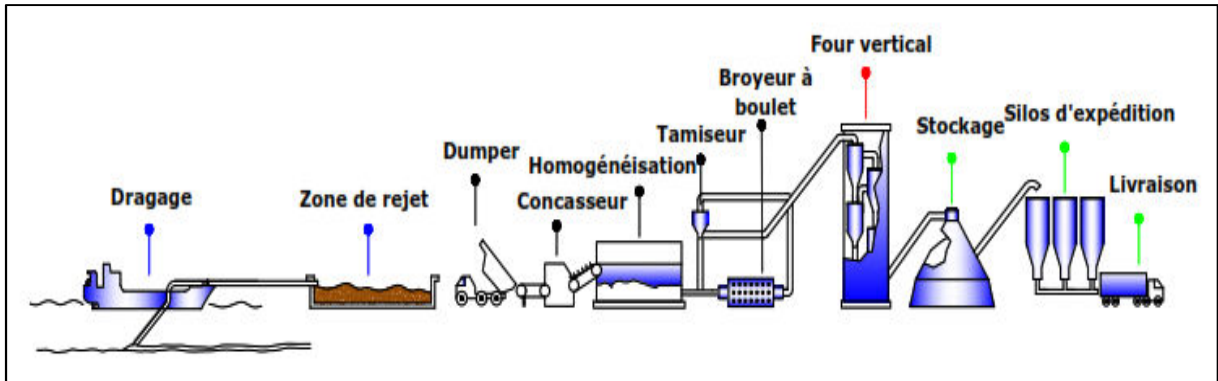


Figure 3. 2 : Processus de traitement des sédiments de dragage calcinés scenario envisagé N 1.

- Scénario N 2 : On exploite les sédiments après dragage dans les zones de rejets ou au niveau des conduites terrestres. Un sécheur permet de récupérer l'eau et les sédiments séchés, afin d'optimiser le temps de décantation à l'air libre (figure 3.3).

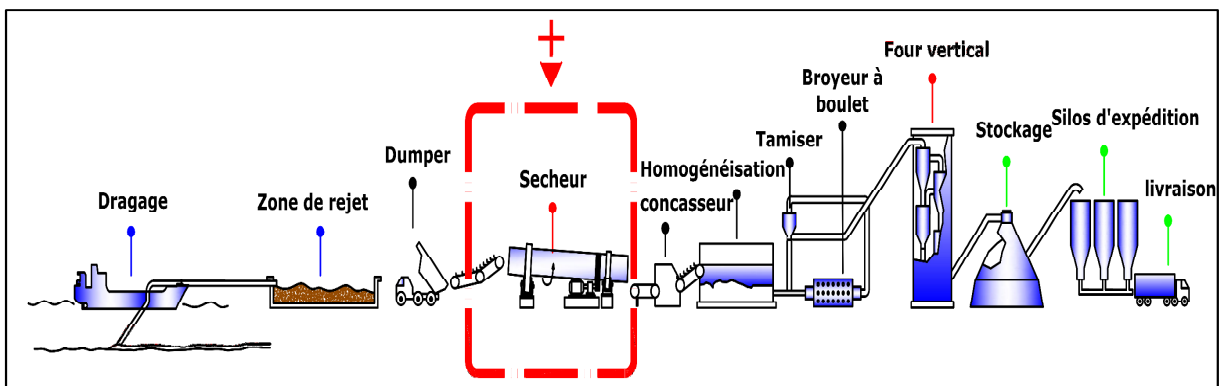


Figure 3. 3 : Le processus de traitement des sédiments de dragage calcinés du scenario N 2.

1.2.1.2 Choix du matériel de traitement des sédiments

- Choix des engins d'extraction des sédiments

L'extraction en zone de rejet des sédiments se fait avec un chargeur et un dumper. Les flux entrants sont formés par la consommation du gasoil et les flux sortants par la poussière et les émissions des gaz au niveau de l'atmosphère.

- Choix du sécheur

On compare plusieurs procédés de séchage des sédiments de dragage suivant leurs performances et les critères souhaités. Une série de procédés a été sélectionnée pour les comparer afin de choisir le type de procédé le moins consommateur d'énergie et le moins impactant sur l'environnement (sécheurs indirects, sécheurs directs, sécheurs mixtes).

Nous choisirons un sécheur direct à tambour rotatif d'une capacité de 5 à 100 T/h, permettant de sécher les sédiments à l'état de pâte. Le temps de séjour sera de 10 à 60 min, avec une consommation énergétique réduite de 0,6 à 0,7 kWh/kg d'eau évaporée (ADEME, 2006).

La figure 3.4 montre la consommation croissante d'énergie en fonction du taux d'humidité des sédiments de dragage.

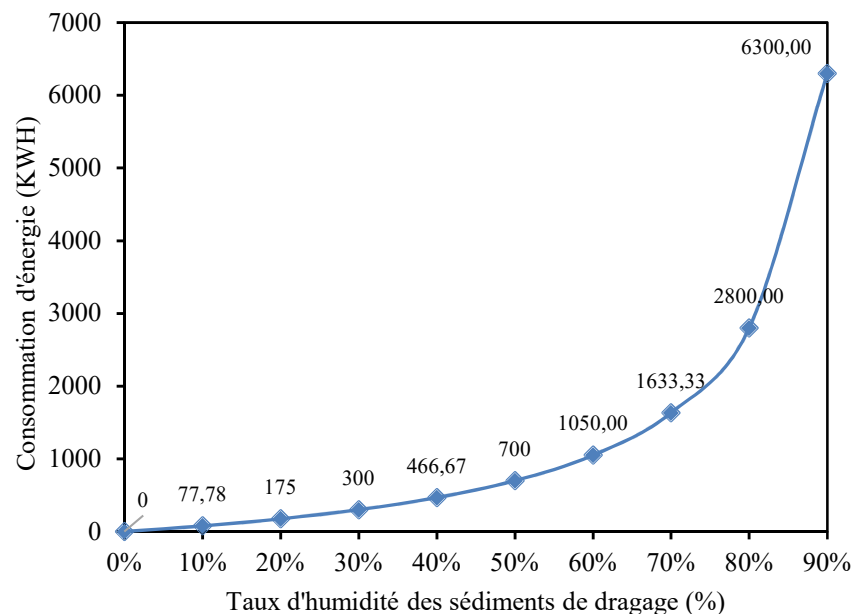


Figure 3. 4 : Rapport entre le taux d'humidité des sédiments en eau évaporée et la consommation énergétique (ADEME, 2006).

On constate que pour optimiser la consommation énergétique il faut utiliser les sédiments à l'état sec. Pour la suite de la recherche une analyse de sensibilité sera proposée pour comparer le taux d'humidité de 0% à celui de 90% pour le scénario N 2.

- Choix du concasseur

Pour le concassage, le choix se portera sur un concasseur à mâchoire avec une technicité plus simple. Les sédiments sont des matériaux semi durs et qui ne nécessitent pas un matériel lourd. Les concasseurs utilisés sont les moins chers sur le marché.

- Choix du broyeur

Le broyage est un procédé pour avoir une finesse supérieure à 3000 cm²/g. Pour cela il faut un réglage adéquat de la vitesse de rotation et du temps de broyage. Le choix du broyeur s'est porté sur le broyeur à boulets, bien que tous les types de broyeurs offrent des performances similaires, sauf au niveau de la granulométrie de sortie où le broyeur à boulets offre une broyabilité inférieure à 1mm.

- Choix du four de calcination

Le four de calcination vertical, pour l'activation thermique de la kaolinite au niveau des sédiments de dragage, est réglé à 750°C. Les flux entrants sont formés par la consommation d'électricité et du gaz naturel, et les flux sortants sont les gaz de décarbonatation de la kaolinite en métakaolin. Le choix portera sur un four flash pour optimiser le temps de cuisson. Ce four permettra de calciner des matériaux pulvérulents de faible dimension ($d < 80 \mu\text{m}$) à une température allant de 150 à 900°C (la calcination des sédiments se fera à 750°C) (Semcha, 2006).

- Choix du stockage en sac

Le stockage des sédiments calcinés se fait en vrac, ou en sac de papier kraft (60g) de 20 Kg, doublé pour garantir une très bonne conservation.

1.2.1.3 L'analyse du cycle de vie de traitement des sédiments de dragage calcinés

1.2.1.3.1 Champ de l'étude

- Fonction : L'analyse portera sur les trois étapes de production : L'étape de l'extraction des sédiments de dragage, l'étape de traitement et enfin l'étape de stockage en utilisant l'approche du berceau à la sortie de l'usine. Il s'agira de modéliser les différentes étapes de production afin de traiter une tonne de sédiments de dragage calcinés prêts à être substitués dans le ciment.
- Unité fonctionnelle : Traitement d'une (1) tonne de sédiments de dragage calcinés qui sera utilisée dans la substitution partielle du ciment (pour une finesse supérieure à 3000 cm^2/g).
- Hypothèses et limitations : L'étape de dragage est exclue de l'analyse du processus de traitement des sédiments de dragage. Cette étape est faite par l'agence nationale des barrages et transferts en Algérie (ANBT, 2015). On exploite les sédiments après dragage dans les zones de rejet.

La figure 3.5 représente le principe de définition de la frontière du système en utilisant l'approche (du berceau à la sortie de l'usine).

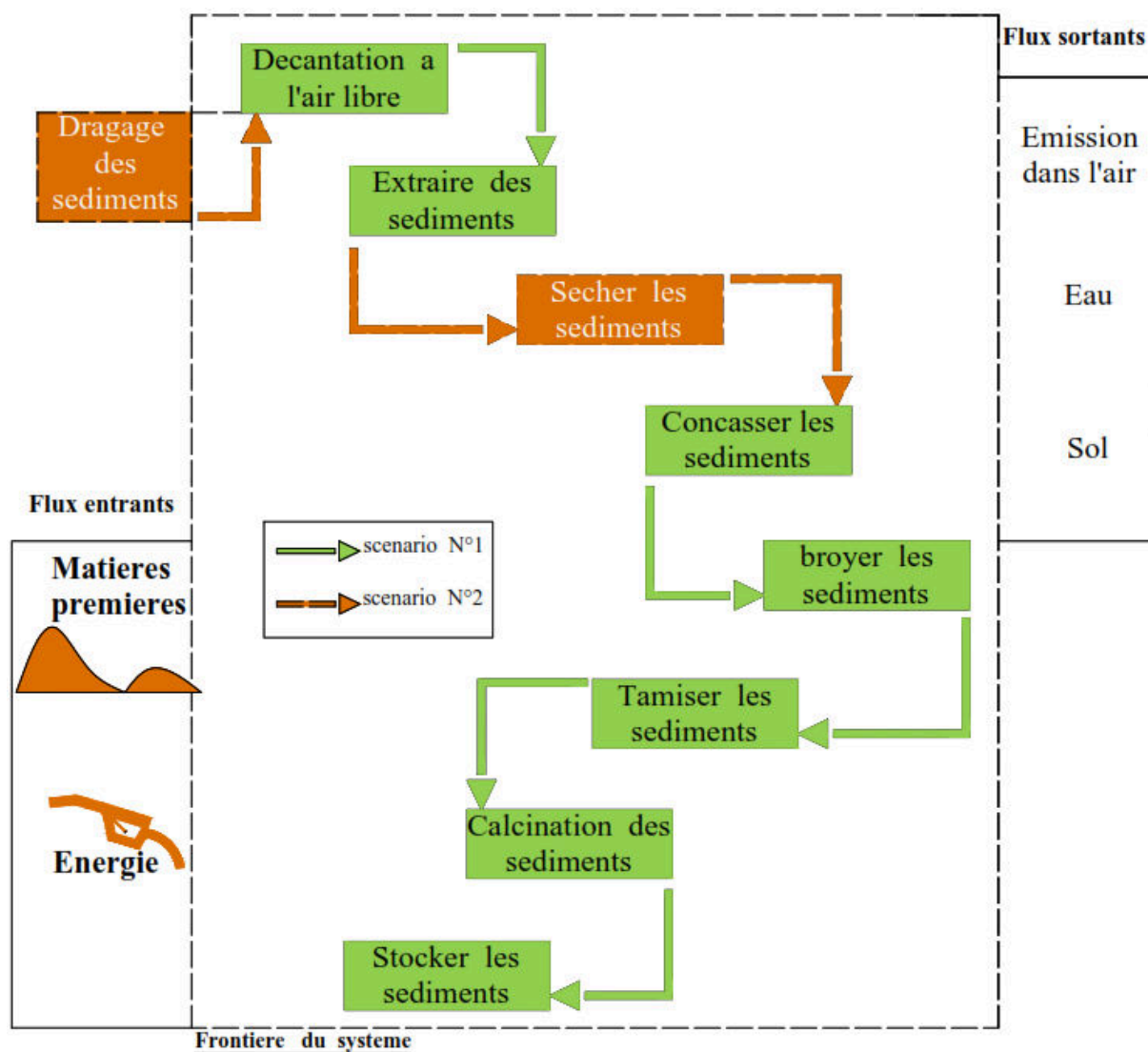


Figure 3. 5 : Principe de définition de la frontière du système du traitement des sédiments calcinés.

1.2.1.3.2 L'inventaire du cycle de vie

L'étude menée dans cette recherche est une étude prospective pour la proposition d'un nouveau procédé de traitement des sédiments de dragage calcinés. Jusqu'à présent tous les processus de traitement des sédiments sont à l'échelle du laboratoire de recherche en Algérie et à l'étranger.

Le tableau 3.1 illustre l'inventaire du procédé de traitement des sédiments de dragage calcinés décrivant les différents procédés utilisés pour obtenir un produit fini substituable au ciment et l'estimation des quantités d'énergie nécessaire pour le traitement des sédiments à chaque étape.

Tableau 3. 1 : Inventaire du procédé de traitement des sédiments de dragage calcinés.

Les différentes phases	Procédé	Consommation	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Réf
Phase d'extraction	Extraction	Gasoil	MJ/t	76,9	76,9	(LCPC, 2010)
Phase de traitement	Séchage	Electricité	KWh/t	-	Analyse de sensibilité	(ADEME, 2006)
Phase de traitement	Concassage	Electricité	KWh	0,57	0,57	Estimation
Phase de traitement	Broyage	Electricité	KWh	10,90	10,90	Estimation
Phase de traitement	Tamissage	Electricité	KWh	5,45	5,45	Estimation
Phase de traitement	Calcination flash	Gaz naturel	MJ/t	1894,7	1894,7	(LCPC, 2010)
Phase de stockage	Stockage en sac	Papier kraft	Kg	3	3	Estimation

Ce tableau nous permet de quantifier les entrants et les sortants du traitement d'une (1) tonne de sédiments de dragage calcinés qui sera utilisée dans la substitution partielle de ciment. Les sources de données primaires sont issues de la littérature et adaptées aux conditions locales en Algérie (production d'électricité et la production du gaz naturel).

Le tableau 3.2 représente l'estimation quantitative de la composition minéralogique d'une (01) tonne des sédiments de dragage du barrage de Chorfa II (Algérie). Cette composition minéralogique des sédiments de dragage est basée sur une analyse qualitative.

Tableau 3. 2 : Minéralogique des sédiments de dragage du barrage de Chorfa II.

Minéraux	Composition	Classification	Sédiments (%)
Quartz	SiO ₂	Oxyde de silicium	43,50 (%)
Kaolinite	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe)(Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ .H ₂ O	Phyllosilicate	33,60 (%)
Calcite	Ca(CO ₃) ₂	Carbonate anhydre	16,10 (%)
Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	Carbonate anhydre	6,80 (%)

Le tableau 3.3 représente les émissions des gaz dans l'air lors du transport des sédiments par les engins.

Tableau 3. 3 : Inventaire des émissions des gaz dans l'air des engins de transport des sédiments

Hugrel et Joumard, 2006 (LCPC, 2010).

Emission des gaz dans l'air	Quantité (Kg/t)
CO ₂	5,599
CO	0,016
COGNM	0007
NO _x	0071
CH ₄	0
Particules PM10	0,004
N ₂ O	0,001
H ₂ O	0

Le tableau 1.4 présente les émissions de gaz dans l'air sur une période de 2 heures en cheminée en adoptant la méthode de benchmarking. Ce procédé a été inspiré d'une étude faite par le laboratoire central des ponts et chaussées Nantes (France) sur l'évaluation environnementale d'un procédé de fabrication de métakaolin (calcination flash) (LCPC, 2010).

Tableau 3. 4 : Inventaire du procédé de production des sédiments de dragage calcinés : Convention Argéco-LCPC, Avril 2010 (LCPC, 2010).

Emission des gaz dans l'air	Quantité (Kg/t)
CO ₂	89,9
CO	0,206
COGNM	0,190
NO _x	0,15
CH ₄	0,007
Particules PM10	Non mesuré
N ₂ O	Non mesuré
H ₂ O	Analyse de sensibilité

Toutes les informations qui concernent le traitement des sédiments de dragage calcinés ont été estimées en utilisant l'approche (du berceau à la sortie de l'usine). Cette approche a été choisie principalement par manque de données précises du procédé de traitement des sédiments de dragage calcinés. L'exploitation de la base de données de GEMIS 4.95 nous a permis d'adapter les bases de données (production d'électricité et la production du gaz naturel) aux conditions réelles algériennes.

1.3 ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES SEDIMENTS CALCINES : CAS D'APPLICATION DE L'ACV DANS LE PROCESSUS EXPERIMENTAL

1.3.1 Analyse du cycle de vie des ciments à base de sédiments de dragage

Les bâtiments de construction contribuent de près de 33,33% aux émissions de dioxyde de carbone (CO₂) mondiale, un chiffre qui pourrait augmenter dans le futur ([Ibn-Mohammed et al., 2013](#)). L'énorme marche mondial des seules constructions courantes consomme annuellement 90% du béton produit. Son association à d'autres matériaux comme le bois ou l'acier en font le matériau de tous les possibles. La prédominance du matériau béton amène à s'interroger sur les impacts de ce matériau sur l'environnement (émission de CO₂, consommation ressources et ...), mais également sur la place des différents secteurs d'activité et les approches mises en place pour réduire ces impacts ; le béton étant un matériau minéral de construction au succès universel. La consommation annuelle moyenne par habitant est d'environ 1m³, c'est-à-dire une consommation annuelle d'environ 7,55 milliards de mètre cubes. L'essentiel des bétons produits entre dans la gamme de résistance modérée. Dans la production de béton, le constituant à l'origine de l'essentiel des émissions de GES est le ciment et surtout à sa teneur en clinker ([D'Aloia-Schwartzentruber and Torrenti, 2014](#)).

La production du ciment en Algérie a atteint 25,45 millions de tonnes en 2017 et selon des estimations prévisionnelles, atteindrait en 2020 une capacité de production de 40,6 avec taux de production de 49.26% pour GICA, 27,34% pour Lafarge Holcim et de 23,4% pour les opérateurs privés ([GICA, 2017](#); [LAFARGE, 2018](#)). Ce qui signifie une grande consommation de ressources naturelles et consommation des énergies renouvelables et non renouvelables ainsi que des émissions de CO₂ dans l'atmosphère.

1.3.1.1 Description du système

Quatre types de ciments avec une substitution partielle par les sédiments calcinés seront comparés par rapport au CPA CEM I 42,5 provenant de l'usine de Zahana dans la wilaya de Mascara. Ce ciment a été utilisé dans le processus expérimental pour la confection des différentes pâtes et mortiers, avec des taux de substitution de 0%, 5%, 15% et 25%.

Quatre scénarios seront comparés dans cette étape :

- Scénario 1 : Un ciment CPA CEM I 42,5 avec un taux de substitution de 0% des sédiments calcinés.
- Scénario 2 : Un ciment CPA CEM I 42,5 avec un taux de substitution de 5% des sédiments calcinés.

- Scénario 3 : Un ciment CPA CEM I 42,5 avec un taux de substitution de 15% des sédiments calcinés.
- Scénario 4 : Un ciment CPA CEM I 42,5 avec un taux de substitution de 25% des sédiments calcinés.

1.3.1.2 Présentation de la société des ciments de Zahana

La société des ciments de Zahana “SCIZ” est implantée dans la wilaya de Mascara. Elle est située au nord de Mascara au Sud Est d’Oran. Cette usine dispose de deux lignes de production à voie humide de 200.000 tonnes/an et a voie sèche de 1.000.000 de tonnes/an. Soit un totale de 1.200.000 tonnes/an (Société des ciments de Zahana, 2017).

Le tableau 3.5 présente la capacité contractuelle de production du clinker et ciment (Société des ciments de Zahana, 2017).

Tableau 3. 5 : capacités contractuelles de production du clinker et ciment (Société des ciments de Zahana, 2017).

	Débit four tonnes/jour	Diamètre four en mètres	Jours de marche (Norme)	Capacité clinker tonne/an	Capacité ciment tonne/an
Voie sèche	3000	5,60	315	945.000	1.000.000
Voie humide	600	3,75	315	189.000	200.000
Total	3600		630	1.134.000	1.200.000

1.3.1.2.1 Bref historique

De 1947 à 1953 deux (2) lignes de production à voie humide de 2 x 200.000 tonnes/an de ciment LAFARGE ont été réalisées. En 1977 une extension de la ligne de production à voie sèche d’une capacité de 1.000.000 de tonnes/an de ciment par la société FCB France. En 1955 la rénovation de la ligne de production à voie humide de 200.000 tonnes/an par la société FLS. Le deuxième four à voie humide de 1947 est à l’arrêt depuis 1988 (Société des ciments de Zahana, 2017).

1.3.1.3 L’analyse du cycle de vie du ciment à base de sédiments calcinés

1.3.1.3.1 Champ de l’étude

- Fonction : l’analyse portera sur l’ensemble des étapes de production du ciment de Zahana CEM I 42,5, depuis l’extraction des matières premières jusqu’à la sortie de l’usine. Ce procédé sera combiné au processus de traitement des sédiments calcinés,

avec différents taux de substitution 0%, 5%, 15% et 25%. Le transport du ciment et des sédiments de dragage seront pris en considération. Le transport du ciment et des sédiments calcinés à la ville de Mostaganem seront estimés à 102 Km pour le ciment et 94,8 Km pour les sédiments (google Maps).

- Unité fonctionnelle : Production d'une (1) tonne de ciment de CEM I 42,5 par le processus de fabrication "voie humide" produit dans la cimenterie de Zahana avec une substitution partielle des sédiments calcinés.
- Hypothèse et limitations : les données sont collectées à l'usine de Zahana du 04/10/2018 au 21/10/2018 avec la collaboration du bureau d'études et méthodes de la cimenterie de Zahana. Les émissions sortantes seront adaptées aux données collectées de la cimenterie de Rais Hamidou (voie humide), à cause d'absence des capteurs au niveau de la cimenterie de Zahana (Aksas et al., 2017).

La figure 3.6 illustre le principe de définition de la frontière du système en utilisant l'approche (du berceau à la porte) de production d'une (1) tonne de ciment à base des sédiments calcinés.

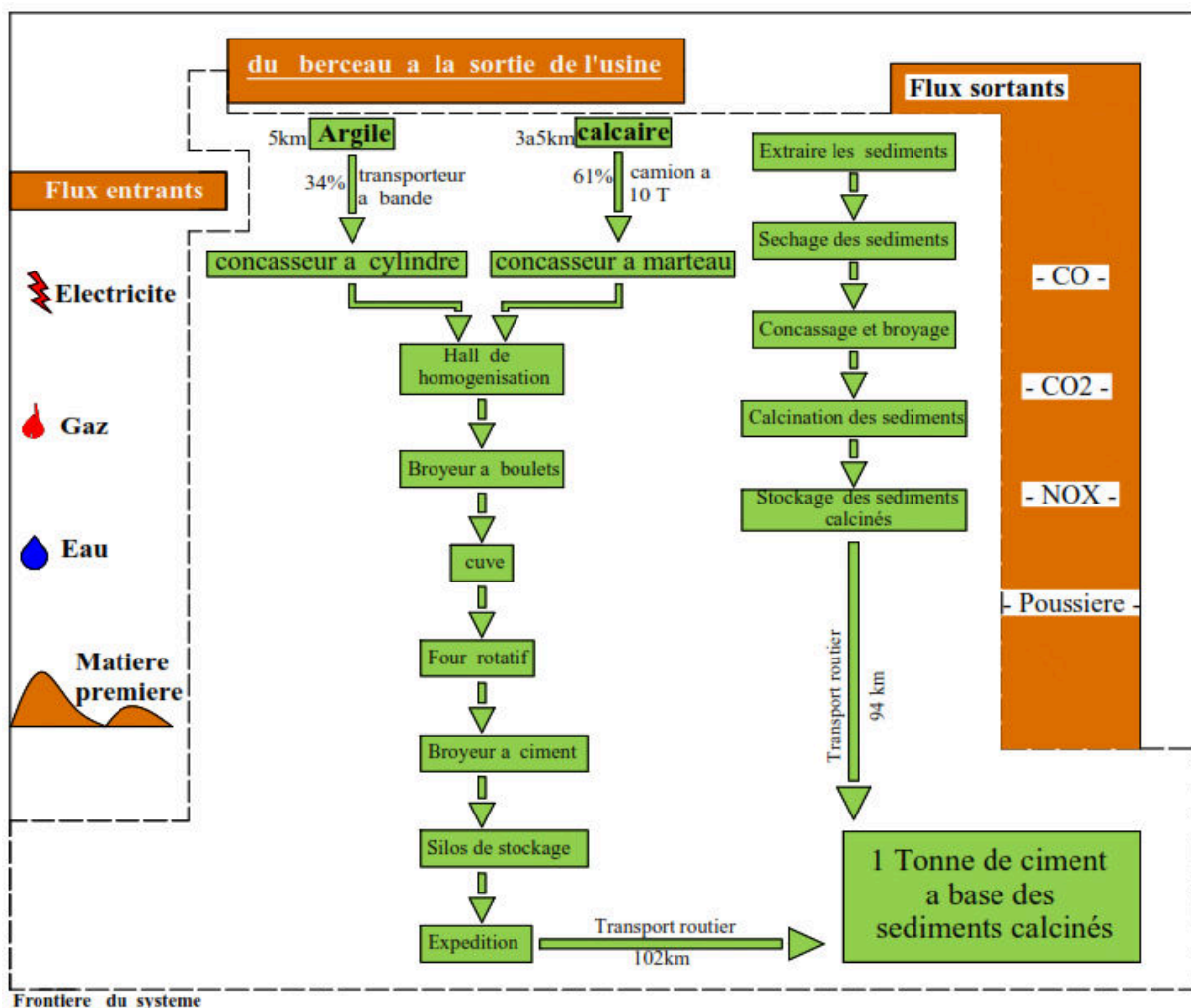


Figure 3. 6 : Définition et frontière du système de production ciment à base des sédiments calcines.

1.3.1.3.2 L'inventaire du cycle de vie

L'inventaire du procédé de traitement des sédiments calcinés a été actualisé et adapté aussi au processus de traitement de l'argile calcinée (Habert, 2013; Habert et al., 2011, 2009; Habert and Ouellet-Plamondon, 2016).

Le tableau 3.6 Présente l'inventaire du procédé de traitement des sédiments calcinés adapté au processus de traitement du métakaolin et de l'argile calcinés dans le monde. Le tableau montre les valeurs minimales, moyennes et maximales tirées de la littérature.

Le tableau 3.7 illustre l'inventaire collecté au niveau de la cimenterie de Zahana du 04/10/2018 au 21/10/2018 avec la collaboration du bureau d'études et méthodes de la cimenterie de Zahana. Les émissions sortantes seront adaptées aux données collectées de la cimenterie de Rais Hamidou (voie humide), à cause d'absence des capteurs au niveau de la cimenterie de Zahana (Aksas et al., 2017).

Le transport du ciment et des sédiments de dragage seront pris en considération. Le transport du ciment et des sédiments calcinés à la ville de Mostaganem seront estimés à 102 Km pour le ciment et 94,8 Km pour les sédiments (google Maps).

Tableau 3. 7 : Inventaire de production d'une (1) tonne de ciment de Zahana à Mascara (voie humide).

	Matières premières et énergies	Unité	Quantités	Références
Entrants	Calcaire	%	61	Collecté à la cimenterie de Zahana (Mascara)
	Argile	%	34	
	Fer	%	5	
	Gypse	%	2,5<SO ₃ <3,5	
	Eau	%	40	
	Electricité	KWh	135	
	Gaz	Nm ³	281,044	
	Diesel	L	5,18	
	Huile	L	0,258	
	Grises pour moteur	Kg	0,0395	
Sortants	Poussières		0,089	(Aksas et al., 2017)
	CO	Kg/tonne	0,192	
	CO ₂		850	
	NOx		0,712	

Tableau 3. 6 : Inventaire de traitement des sédiments calcinés.

Processus	Consommation	Unité	Expérimental / Calculé	(NLK, 2002)	(LCPC, 2010)	(Sánchez Berriel et al., 2016)	(Sui et al., 2018)	Valeur minimale	Valeur moyenne	Valeur maximale
Données entrants										
Sédiments de dragage		Kg	1186,66					1186,66	1186,66	1186,66
Quartz	Minérales		516,20					516,20	516,20	516,20
Kaolinite			398,72					398,72	398,72	398,72
Calcite			191,05					191,05	191,05	191,05
Dolomite			80,693					80,693	80,693	80,693
Extraction	Diesel fuel	MJ/t			76,9			76,9	76,9	76,9
Séchage + concassage + broyage + tamisage	Electricité	MJ/t			239,16	60,01		60,01	149,585	239,16
Calcination flash	Gaz naturel	MJ/t		2500	1894,7	2775	2595,816	1894,7	2441,379	2775
Emballage (AKP CALEMPA)	Papier kraft	Kg	2,51					2,51	2,51	2,51
Transport		tonneKm	0,08785					0,08785	0,08785	0,08785
Données sortants										
CO ₂	Emissions	Kg/t		370	95,5			95,5	232,75	370
CO				0,133	0,222			0,133	0,1775	0,222
COGNM					0,197			0,197	0,197	0,197
NO _x				0,32	0,222			0,222	0,271	0,32
CH ₄				3,60E-03	7,00E-03			3,60E-03	0,0053	7,00E-03

Toutes les données collectées de l'usine de Zahana et les données adaptées de la bibliographie, seront modélisées par SimaPro 8.5.2.0 et adaptées aux conditions réelles algériennes (production d'électricité et la production du gaz).

1.3.2 Analyse du cycle de vie des pâtes et mortiers à base des sédiments calcinés

Dans ces derniers années, un grand intérêt pour l'évaluation environnementale des matériaux cimentaires a été constaté (Van den Heede and De Belie, 2012). Dans cette partie l'évaluation des impacts environnementaux des pâtes et mortiers à base des sédiments calcinés sera mise en évidence, en tenant compte des matériaux rentrants dans les différentes formulations déjà étudiées dans le processus expérimental.

1.3.2.1 Description du système

Quatre scénarios de formulation des pâtes et mortiers à base des sédiments calcinés seront comparés par rapport à des pâtes et mortiers témoins.

- Scénario 1 : une pâte et un mortier avec un taux de substitution de 0% des sédiments calcinés.
- Scénario 2 : une pâte et un mortier avec un taux de substitution de 5% des sédiments calcinés.
- Scénario 3 : une pâte et un mortier avec un taux de substitution de 15% des sédiments calcinés.
- Scénario 4 : une pâte et un mortier avec un taux de substitution de 25% des sédiments calcinés.

1.3.2.2 L'analyse du cycle de vie des pâtes et mortiers à base de sédiments calcinés

1.3.2.2.1 Champ de l'étude

- Fonction : l'analyse comportera les formulations des différentes pâtes et mortiers élaborés dans le processus expérimental, avec différents taux de substitution 0%, 5%, 15% et 25%.
- Unité fonctionnelle : la formulation des pâtes à base des sédiments calcinés à consistance égale selon la norme NF EN 196-3 ; formulation des mortiers à base des sédiments calcinés selon la norme EN 196-1, avec un rapport E/L=0,5.
- Hypothèses et limitations : les phases d'utilisation et fin de vie ne seront pas prises en considération dans cette étude, avec utilisation des différentes données déjà présentées dans ce chapitre.

La figure 3.7 présente le principe de définition et la frontière du système pour les formulations des pâtes et mortiers à base des sédiments calcinés.

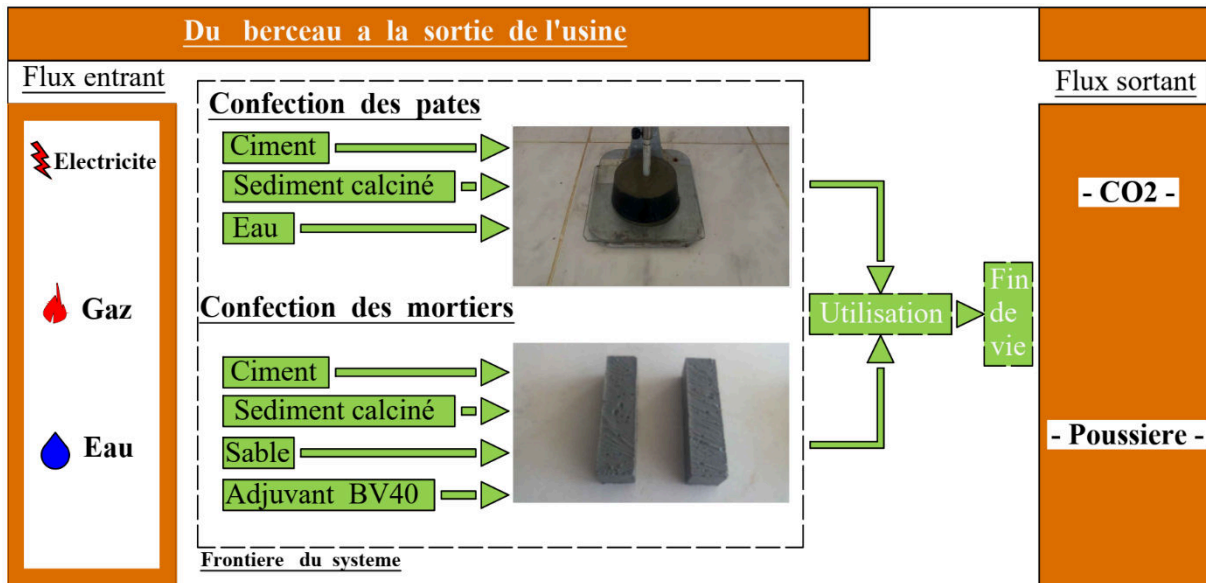


Figure 3. 7 : Définition et frontière du système de confection des pâtes et mortiers à base de sédiments calcinés.

1.3.2.2.2 L'inventaire du cycle de vie

Dans l'évaluation des impacts environnementaux des échantillons, il est important de prendre en compte tous les matériaux (ciments de Zahana, sédiments calcinés de Chorfa II, sable, adjuvant BV40 et eau) et leurs processus d'élaboration. Dans ce cas les deux formulations des pâtes et mortiers déjà décrites dans les processus expérimentaux seront utilisés dans la modélisation avec SimaPro 8.5.20. Les différentes données utilisées proviennent de la base de données Ecoinvent.

La production des échantillons est étudiée à l'échelle nationale. Ainsi les processus modulables au cas Algérien (le mix énergétique électrique et la production du gaz naturel) seront adaptés. La fabrication des outils de confection des pâtes et mortiers ne sera pas considérée dans cette étude.

Les formulations des pâtes et mortiers sont présentées dans les tableaux 3.8 et 3.9.

Tableau 3. 8 : formulation des pâtes à base à base des sédiments calcinés.

Pâtes	Liants (g)		Eau (g)	Electricité (Wh)	E /L
	CEM I	SD			
PT 0%	500	0	125	12,5	0,25
PT 5%	475	25	130	12,5	0,26
PT 15%	425	75	148	12,5	0,296
PT 25%	375	125	165	12,5	0,33

Tableau 3. 9 : Formulation des différents mortiers.

Mortiers	Massique (kg/m ³)									
	Liants		Sable	Eau de gâchage	Eau BV40	BV40 Commercialisé	BV40 Extrait sec	Masse totale	Electr icité (Wh)	E _{eff} /L
	CEM I	SD								
	42,5									
SD0%	450	0	1350	225	0	0	0	2025	10,41	0,5
SD5%	427,5	22,5	1350	224,72	0,28	0,45	0,17	2025	10,41	0,5
SD15%	382,5	67,5	1350	223,75	1,25	2,03	0,78	2025	10,41	0,5
SD25%	337,5	112,5	1350	222,65	2,35	3,83	1,47	2025	10,41	0,5

1.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, ont été présentées les différentes études d'ACV qui seront modélisées par le logiciel SimaPro 8.5.2.0 ; la méthode d'évaluation des impacts environnementaux (impact 2002+), la présentation des inventaires et les sources de collecte de données tirées de la bibliographie, les données collectées à la cimenterie de Zahana et les données exploitées du processus expérimental de la partie 2.

CHAPITRE

RESULTATS ET DISCUSSION

2

SOMMAIRE

1.1	INTRODUCTION	133
1.2	INDUSTRIALISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE CALCINES	133
1.2.1	Le potentiel de réchauffement climatique	134
1.2.2	Le potentiel d'acidification.....	134
1.2.3	Le potentiel d'ozone troposphérique	135
1.2.4	La demande d'énergie cumulée et d'exergie	136
1.2.5	Analyse de sensibilité	136
1.3	ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES SEDIMENTS CALCINES : CAS D'APPLICATION DE L'ACV DANS LE PROCESSUS EXPERIMENTAL	140
1.3.1	Analyse du cycle de vie des ciments à base de sédiments calcinés.....	141
1.3.2	Analyse du cycle de vie des pâtes et mortiers à base des sédiments calcinés ..	146
1.4	CONCLUSION.....	155

1.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente les résultats d'évaluation environnementale des différents scénarios envisagés, pour quantifier les impacts du modèle d'industrialisation des sédiments de dragage des barrages en Algérie à l'aide des logiciels d'ACV (GEMIS 4.95 et SimaPro 8.5.2.0) et une comparaison environnementale des différents matériaux utilisés dans le processus expérimental de formulation des matrices cimentaires étudiées (ciments, pâtes et mortiers). Il permet d'intégrer le processus expérimental dans une phase d'analyse des impacts afin de quantifier le bilan environnemental de la substitution partielle des sédiments calcinés dans les ciments, pâtes et mortiers.

1.2 INDUSTRIALISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE CALCINES

Dans cette étape, on propose un modèle d'industrialisation des sédiments de dragage des barrages en Algérie, ainsi que l'évaluation environnementale de ce modèle à l'aide du logiciel GEMIS 4.95 avec la méthode caractérisation intermédiaire. Ce logiciel contient une base de données matériaux, procédés, transport et d'énergie ; permettant la modélisation d'un produit

ou d'un service. La base de données comprend une liste de produits, processus et scénarios. Cela nous permettra de quantifier les entrants et les sortants pertinents d'un système de produits. Des sources de données primaires ont été trouvées dans la littérature et ont été adaptées aux conditions locales en Algérie. Ces résultats sont comparés par rapport à d'autres études menées en Algérie ([GEMIS© 4.7, 2011](#)).

La figure 3.8 représente les flux émis des 4 indicateurs d'impacts environnementaux pour le traitement d'une (01) tonne de sédiments de dragage calcinés pour le scenario 1, après la modélisation :

1.2.1 Le potentiel de réchauffement climatique

Ce potentiel est de 0,246 tonne de CO₂ éq/UF. Les pourcentages des principaux gaz à effet de serre générés par la production d'une (01) tonne des sédiments de dragage sont : 97,28% de CO₂, 2,21% de CH₄ et 0,50% de N₂O. La quantité de CO₂ émise est de 0,239 tonne de CO₂ éq/UF de production tout le long du cycle de vie des sédiments due à la combustion du gaz pendant la phase de calcination avec 46,36%. Les émissions des gaz de la cheminée mesurées lors de la décarbonatation et la transformation du kaolin en métakaolin est de 37,53% et la consommation du diesel est de 7,02%. La quantité de CH₄ produite tout le long du cycle de vie de production des sédiments est égale à $5,45 \times 10^{-3}$ tonne de CO₂ éq/UF. Sa production est principalement causée par le raffinage et le traitement du gaz naturel avec environ 52,37%. L'extraction du gaz naturel avec 32,36% et en dernier les émissions des gaz de la cheminée par 3,85%. La quantité de N₂O produite est de $1,23 \times 10^{-3}$ tonne de CO₂ éq/UF. Sa production est principalement causée par la combustion du gaz de 48,33%, suivie par les émissions des gaz des engins de transport des sédiments de l'ordre de 21,44%, la consommation du diesel est de 14,87% et la consommation d'électricité de 6,62%. Dans cette section, le traitement d'une (1) tonne de sédiments calcinés qui seront utilisés pour la substitution partielle du ciment nécessite moins d'énergie pour être activée. En comparant ce type de traitement des sédiments calcinés par rapport au ciment, on remarque une forte réduction du potentiel de réchauffement climatique, à partir de 850 kg d'équivalent CO₂ par tonne de ciment ([Aksas et al., 2017](#)). Les sédiments calcinés n'émettent que 246 kg d'équivalent CO₂ par tonne, ce qui représente un gain de 71,05%.

1.2.2 Le potentiel d'acidification

Ce potentiel est de $4,55 \times 10^{-4}$ tonne de SO₂ éq/UF et les principaux gaz en termes d'émissions sont : NO_x, SO₂ et H₂S avec un pourcentage respectif de 93,51%, 6,15% et 0,20%. Le contributeur aux émissions de NO_x est de $4,26 \times 10^{-4}$ tonne de SO₂ éq/UF pour la production

d'une (01) tonne de sédiments calcinés réparties en consommation du diesel à 35,80%, les émissions des gaz par la cheminée à 24,51% et la combustion du gaz pendant la phase de calcination avec 18,42%. Les émissions SO_2 est de $2,80 \times 10^{-5}$ tonne SO_2 éq/UF. Les sources d'émissions des gaz sont la consommation du diésel avec 56,70%, le papier kraft dans la phase de stockage avec 7,24% et les émissions de gaz du pétrole lourd avec 5,36%. Les émissions H_2S sont de $9,42 \times 10^{-7}$ tonne de SO_2 éq/FU. Le papier kraft est la source d'émission des gaz dans la phase de stockage de 99,96%.

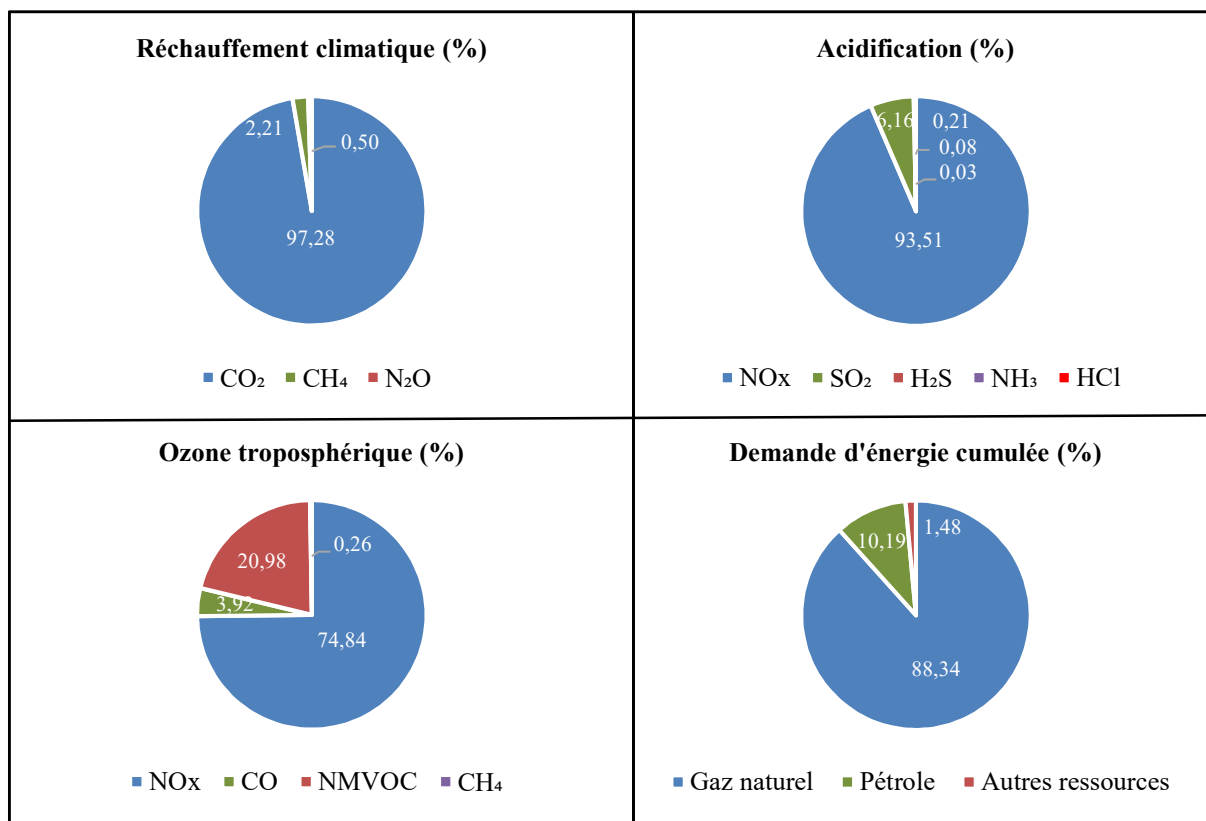


Figure 3. 8 : Les flux d'émissions des 4 indicateurs d'impact environnementaux par GEMIS 4.95.

1.2.3 Le potentiel d'ozone troposphérique

Ce potentiel est de $9,97 \times 10^{-4}$ tonne de TOPP éq/UF et les principaux gaz en termes d'émissions sont : NO_x , COVNM et CO avec un pourcentage respectif de 74,84%, 20,97% et 3,92%. Le contributeur aux émissions de NO_x est de $7,46 \times 10^{-4}$ tonne de TOPP éq/UF pour la production d'une (01) tonne de sédiments calcinés constitué par la consommation du diesel de l'ordre de 35,80%, les émissions des gaz dans la cheminée de l'ordre de 24,51% et la combustion du gaz pendant la phase de calcination avec 18,42%. Le contributeur aux émissions de COVNM est de $2,09 \times 10^{-4}$ tonne de TOPP éq/UF pour la production d'une (01) tonne de sédiments calcinés, constitué par les émissions des gaz dans la cheminée de l'ordre de 90,80%, les émissions des gaz des engins de transport des sédiments avec 3,35%, la combustion du gaz de l'ordre de 2,42% et les émissions de gaz du pétrole lourd avec 1,15%. Les émissions de CO sont de

$3,91 \times 10^{-5}$ tonne de TOPP éq/UF. Les principales sources d'émissions des gaz sont les évacuations des gaz par la cheminée de 57,92%, la combustion du gaz naturel de 15,84% et la consommation du diesel de l'ordre de 13,34%.

1.2.4 La demande d'énergie cumulée et d'exergie

La dépense d'énergie cumulée est de 2506,75 en MJ/UF avec 2500,40 en MJ/UF de ressources non renouvelables et 4,39 MJ/UF de ressources renouvelables et autres ressources avec 1,96 MJ/UF. Le traitement d'une (01) tonne de sédiments de dragage calcinés consomme principalement 2214,37 en MJ/UF de gaz naturel, 255,38 en MJ/UF de pétrole lourd et autres ressources avec 37 MJ/UF.

La figure 3.9 montre les phases de traitement pour chaque indicateur d'impact environnemental pour le traitement des sédiments de dragage calcinés.

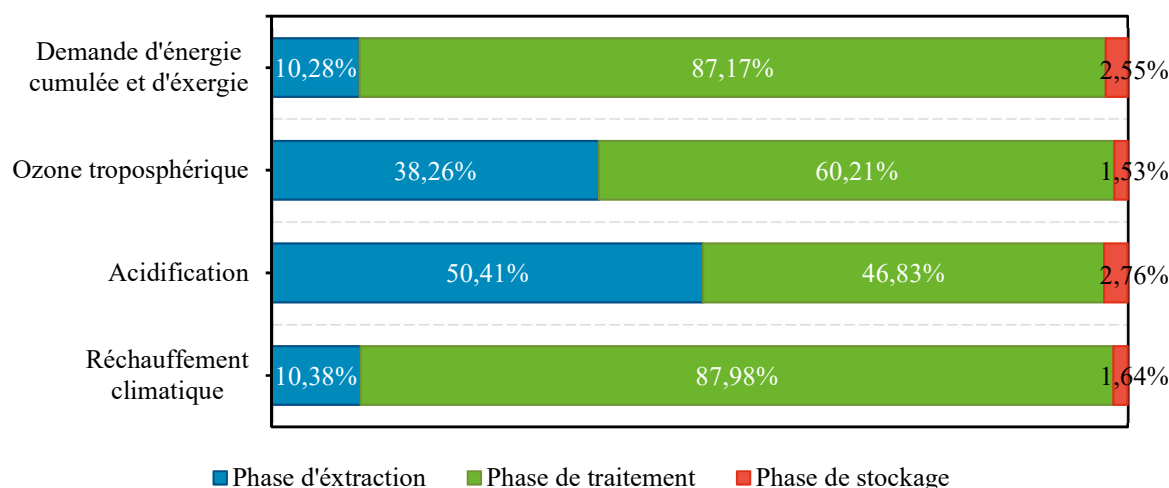


Figure 3. 9 : Les phases pour chaque indicateur d'impact lors du traitement des sédiments de dragage par GEMIS 4.95.

Les résultats nous permettent de constater que la phase de traitement, due principalement à la sous phase de calcination flash est la plus impactante sur l'ensemble des indicateurs de réchauffement climatique, l'ozone troposphérique et la demande d'énergie cumulée et d'exergie. La phase d'extraction due principalement à la consommation de diesel avec 73,60 % et les émissions atmosphériques des engins de transport de sédiments avec 23,85% sont les sous phases les plus impactantes pour l'indicateur d'acidification. Elle est suivie de la phase d'extraction et enfin par la phase de stockage des sédiments dragués.

1.2.5 Analyse de sensibilité

Les résultats du séchage avec un taux d'humidité variant de 0% à 90% de sédiments de dragage sont regroupés dans le tableau 3.10 et la figure 3.10.

Tableau 3. 10 : Analyse de sensibilité pour comparer le taux d'humidité variant de 0% à 90% dans le scénario 2.

Processus	Evaluation des impacts Gaz à effet de serre (GES)		Voie sèche (cimenterie Sour El Ghozlane)	Voie sèche (cimenterie Sour El Ghozlane)	Voie humide (cimenterie Sour El Ghozlane)
	Unité	Analyse de sensibilité	(Aksas et al., 2017)	(Boughrara et al., 2015)	(Aksas et al., 2017)
Scénario 1 :	A l'état sec (0%)	0,246			
	A l'état humide (10%)	0,258			
	A l'état humide (20%)	0,267			
	A l'état humide (30%)	0,296			
	A l'état humide (40%)	0,334			
Scénario 2 :	A l'état humide (50%)	0,387			
	A l'état humide (60%)	0,467			
	A l'état humide (70%)	0,600			
	A l'état humide (80%)	0,865			
	A l'état humide (90%)	1,662			

L'indicateur prédominant étant le réchauffement climatique, notre analyse de sensibilité a été réalisée sur cet impact. L'évolution du taux de séchage des sédiments de dragage est fortement corrélée avec les émissions en tonne équivalent de CO₂. Le séchage des sédiments avec un taux d'humidité inférieur à 70% est moins impactant en référence à deux études récentes en Algérie :

La première étude est réalisée par les auteurs [Boughrara et al., \(2015\)](#), qui ont étudié l'utilisation de l'analyse du cycle de vie dans la production du ciment portland de la cimenterie de Sour El Ghozlane à l'est de Algérie ; par voie sèche. Les émissions générées sur l'effet de réchauffement climatique sont de l'ordre de 882Kg eq CO₂ pour la production d'une (01) tonne de ciment. La deuxième étude est réalisée par les auteurs [Aksas et al., \(2017\)](#), qui ont comparé les impacts environnementaux de deux types de ciment portland en Algérie. Le premier en utilisant le processus par voie sèche dans une zone rurale (cimenterie de Sour El Ghozlane) dans l'est de l'Algérie et le second processus par voie humide dans une zone urbaine (cimenterie de Rais Hamidou) à Alger. Ils ont observé que le processus par voie humide émet 850kg CO₂ alors que le processus par voie sèche émet 651 kg eq CO₂. En comparant avec les émissions de production du ciment portland en Algérie des deux cimenteries, cela donne une réduction du potentiel de réchauffement climatique variant entre 651 et 850 kg d'équivalent CO₂ par tonne pour la production du ciment ([Aksas et al., 2017](#); [Boughrara et al., 2015](#)), le traitement des

sédiments de dragage n'émettant que 246 kg d'équivalent CO₂ par tonne, soit un gain compris entre 62,05% et 71,05%.

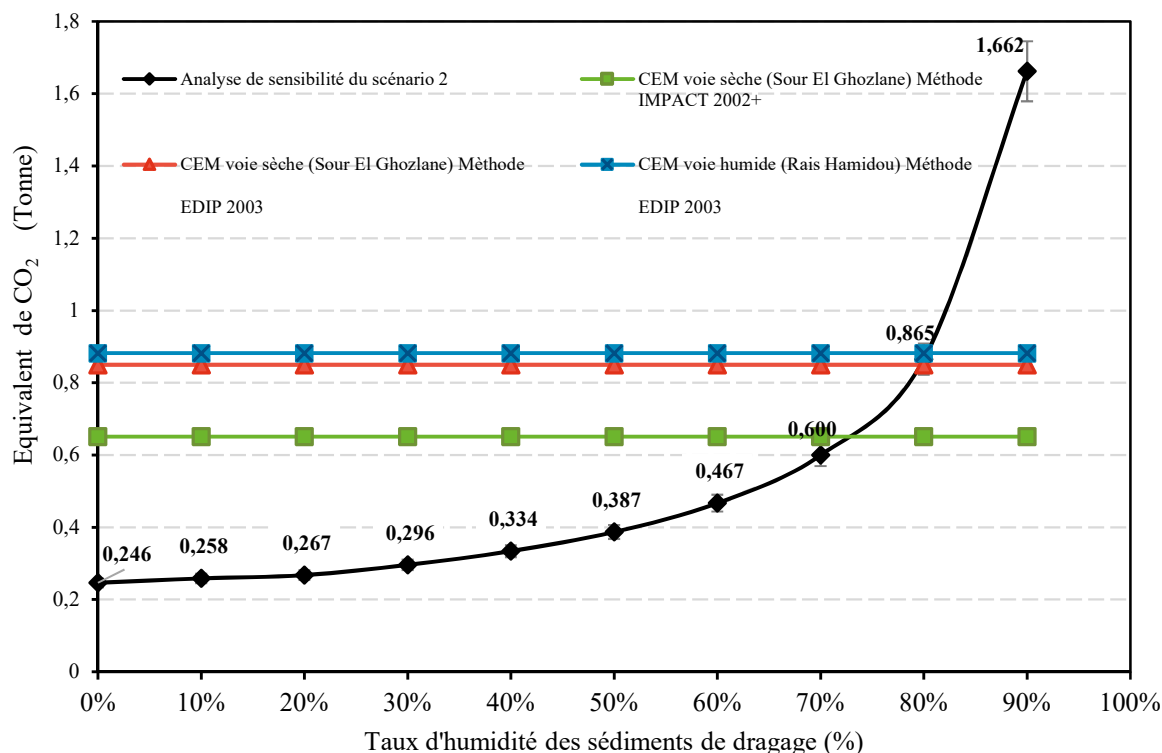


Figure 3. 10 : Analyse de sensibilité pour comparer le taux d'humidité variant de 0% à 90% pour le scénario N 2.

1.2.5.1 Modélisation avec logiciel SimaPro 8.5.2.0

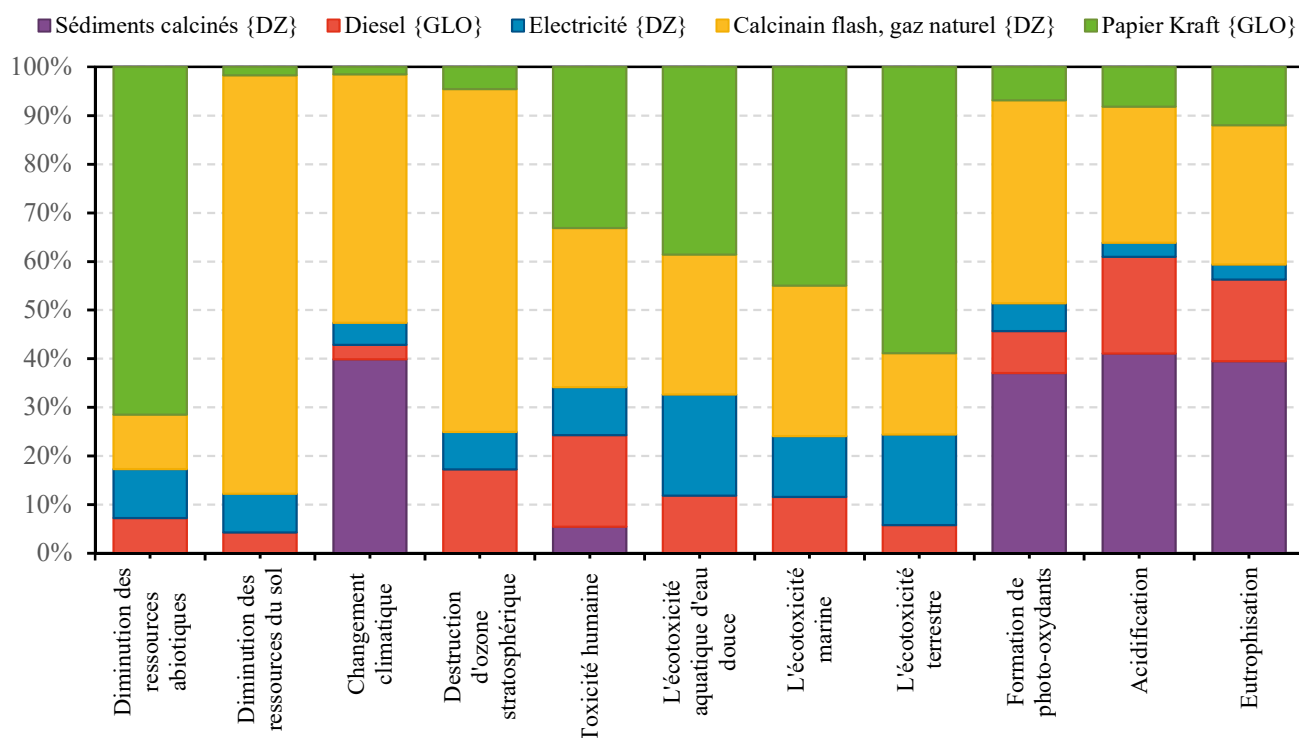
La modélisation du processus de traitement des sédiments calcinés avec le logiciel SimaPro et la méthode de caractérisation CML-base line V3.05, a montré une grande similarité entre les résultats de modélisation obtenus par GEMIS 4.95 et les résultats obtenus par SimaPro. Les indicateurs d'impacts du potentiel de réchauffement climatique, la diminution des ressources et l'acidification donnent 240,67 Kg de CO₂ éq/T, 2379,56 MJ/T et 0,27 kg de SO₂éq/T par le logiciel SimaPro et de 246 Kg CO₂ éq/T, 2506 ,75 MJ/T et 0,45 kg éq de SO₂/T par le logiciel GEMIS. Cette similarité peut importante est due aux bases de données et à la méthodologie de calcul de chaque logiciel. Par contre l'émission de l'indicateur d'impact du potentiel d'ozone troposphérique $7,39 \times 10^{-6}$ Kg CFC-11 éq/T obtenue par le logiciel SimaPro et 0,997 kg de TOPP éq/T par le logiciel GEMIS, est due à la différence du facteur de caractérisation des deux logiciels d'ACV.

Le tableau 3.11 et la figure 2.4 montrent les résultats de traitement d'une (1) tonne de sédiments calcinés par le logiciel SimaPro et par la méthode de caractérisation CML-base line V3.05.

Tableau 3. 11: Indicateurs d'impacts environnementaux de traitement des sédiments calcinés.

Catégorie d'impact	Unité	Total
Diminution des ressources abiotiques	kg Sb eq	3,46455E-05
Diminution des ressources du sol	MJ	2379,56
Changement climatique	kg CO ₂ eq	240,67
Destruction d'ozone stratosphérique	kg CFC-11 eq	7,39E-06
Toxicité humaine	kg 1,4-DB eq	4,94
L'écotoxicité aquatique d'eau douce	kg 1,4-DB eq	3,19
L'écotoxicité marine	kg 1,4-DB eq	8963,43
L'écotoxicité terrestre	kg 1,4-DB eq	0,073
Formation de photo-oxydants	kg C ₂ H ₄ eq	0,016
Acidification	kg SO ₂ eq	0,27
Eutrophisation	kg PO ₄ --- eq	0,074

La figure 3.11 permet de constater que la phase de calcination flash est la phase la plus impactante sur l'ensemble des indicateurs d'impacts. Elle est suivie par l'emballage par le papier kraft pour les indicateurs d'impacts (diminution des ressources abiotique, l'écotoxicité terrestre, marine, aquatique d'eau douce et humaine), et la consommation d'électricité sur l'ensemble des indicateurs d'impacts.

**Figure 3. 11 :** Analyse de traitement d'une (1) tonne de sédiments de dragage avec la méthode de caractérisation CML-base line V3.05.

La similarité des résultats trouvés lors de la modélisation par le logiciel GEMIS et SimaPro confirme l'intérêt de la possibilité de valoriser ces sédiments par substitution partielle par le

ciment et la possibilité d'exploiter le logiciel GEMIS dans les futures recherches dans les analyses d'ACV, à cause de l'indisponibilité du logiciel SimaPro dans notre laboratoire LCTPE.

1.3 ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES SEDIMENTS CALCINES : CAS D'APPLICATION DE L'ACV DANS LE PROCESSUS EXPERIMENTAL

Après l'analyse du cycle de vie d'un nouveau procédé de traitement des sédiments calcinés, commencera l'application de l'analyse du cycle de vie (ACV) dans le processus expérimental.

Une comparaison entre quatre types de ciments : le premier ciment CEMI de Zahana fabriqué par voie humide, les autres ciments ont été substitués par des sédiments calcinés. Les nouveaux matériaux obtenus seront modélisés par l'emploi du logiciel SimaPro et la méthode IMPACT 2002+ : ciment à base des sédiments calcinés, pâtes à base de sédiments calcinés et mortiers à base de sédiments calcinés (SC).

Le tableau 3.12 illustre la comparaison des indicateurs d'impacts environnementaux des valeurs tirées de la littérature pour le traitement de sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.

Tableau 3. 12 : Comparaison des indicateurs d'impacts environnementaux des valeurs tirées de la littérature pour le traitement de sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.

Catégorie d'impact	Unité	1 Tonne de SC (valeur minimale)	1 Tonne de SC (valeur moyenne)	1 Tonne de SC (valeur maximale)
Toxicité humaine (cancérigène)	kg C ₂ H ₃ Cl eq	0,313	0,385	0,444
Toxicité humaine (non cancérogène)	kg C ₂ H ₃ Cl eq	0,761	0,818	0,864
Effets respiratoires inorganique	kg PM _{2.5} eq	0,091	0,107	0,121
Radiations ionisantes	Bq C-14 eq	208,637	219,000	227,092
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	0,000010	0,000012	0,000014
Effets respiratoires organique	kg C ₂ H ₄ eq	0,146	0,151	0,155
Ecotoxicité aquatique	kg TEG water	6694,857	7510,599	8129,062
Ecotoxicité terrestre	kg TEG soil	2593,963	2796,197	2952,627
Acidification/Eutrophisation terrestre	kg SO ₂ eq	2,935	3,500	3,980
Occupation des sols	m ² org.arable	2,658	2,690	2,718
Acidification aquatique	kg SO ₂ eq	0,417	0,495	0,561
Eutrophisation aquatique	kg PO ₄ P-lim	0,005	0,005	0,005
Changement climatique	kg CO ₂ eq	248,244	435,791	609,888
Energie non renouvelable	MJ primary	2838,721	3803,926	4513,384
Extraction de minerais	MJ surplus	0,547	0,710	0,859

Les résultats montrent que les émissions du potentiel de changement climatique varient entre un intervalle de 248,24 kg CO₂ éq/T à 609,88 kg CO₂ éq/T pour le traitement d'une (1) tonne de sédiments calcinés. Le potentiel de consommation des ressources varie entre 2803,72 MJ/T à 4513,38 MJ/T et le potentiel d'acidification varie entre 0,41 kg SO₂ éq/T à 0,56 kg SO₂ éq/T. Ces valeurs sont nettement inférieures aux valeurs des différentes recherches menées en Algérie dans la production d'une (1) tonne de ciment (Aksas et al., 2017; Boughrara et al., 2015). Dans la modélisation du processus expérimental les valeurs favorables seront utilisées dans le calcul (valeur minimal).

1.3.1 Analyse du cycle de vie des ciments à base de sédiments calcinés

La figure 3.12 représente les résultats des arborescences de la modélisation des quatre ciments à base des sédiments sur l'indicateur changement climatique avec la méthode IMPACT 2002+. Les sédiments offrent une nette diminution des impacts dus à la production du clinker. C'est l'élément le plus consommateur d'énergie dans le procédé de fabrication du ciment, à une température de calcination de 1450°C. La substitution des sédiments de dragage avec une calcination flash de 750°C va contribuer à la diminution des impacts de consommation d'énergie, en rapport avec les taux de substitution de sédiments.

La contribution du ciment à base de 0% des sédiments calcinés est composée de 97,9% pour la production du ciment, 0,679% pour le transport lourd de la cimenterie à Mostaganem et de 1,42% pour le transport léger jusqu'au laboratoire LCTPE. La contribution du traitement des sédiments calcinés pour les autres ciments à base de 5%, 15% et 25% est de l'ordre de 1,38%, 4,46% et 8,08%. Cette contribution permettra de diminuer la contribution de production du clinker pour le ciment témoin (ciment à base de 0% de sédiments calcinés) avec des taux de 96,4%, 93,2% et 89,4% pour les ciments à base de 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés.

La comparaison des différents ciments a montré que la substitution du ciment par les sédiments calcinés améliore nettement les impacts environnementaux de 13 indicateurs par rapport à 15 indicateurs dans la méthode IMPACT 2002+ ; dans la phase de caractérisation intermédiaire. L'indicateur du potentiel de changement climatique pour les ciments à base de 0%, 5%, 15 et 25% de sédiments calcinés émettent respectivement 935,10 kg CO₂ éq/T, 901,73 kg CO₂ éq/T, 835 kg CO₂ éq/T et 768,29 kg CO₂/T. Soit un gain de 3, 57%, 10,70% et 17,84% pour les ciments à base de 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés (tableau 3.13 et figure 3.13).

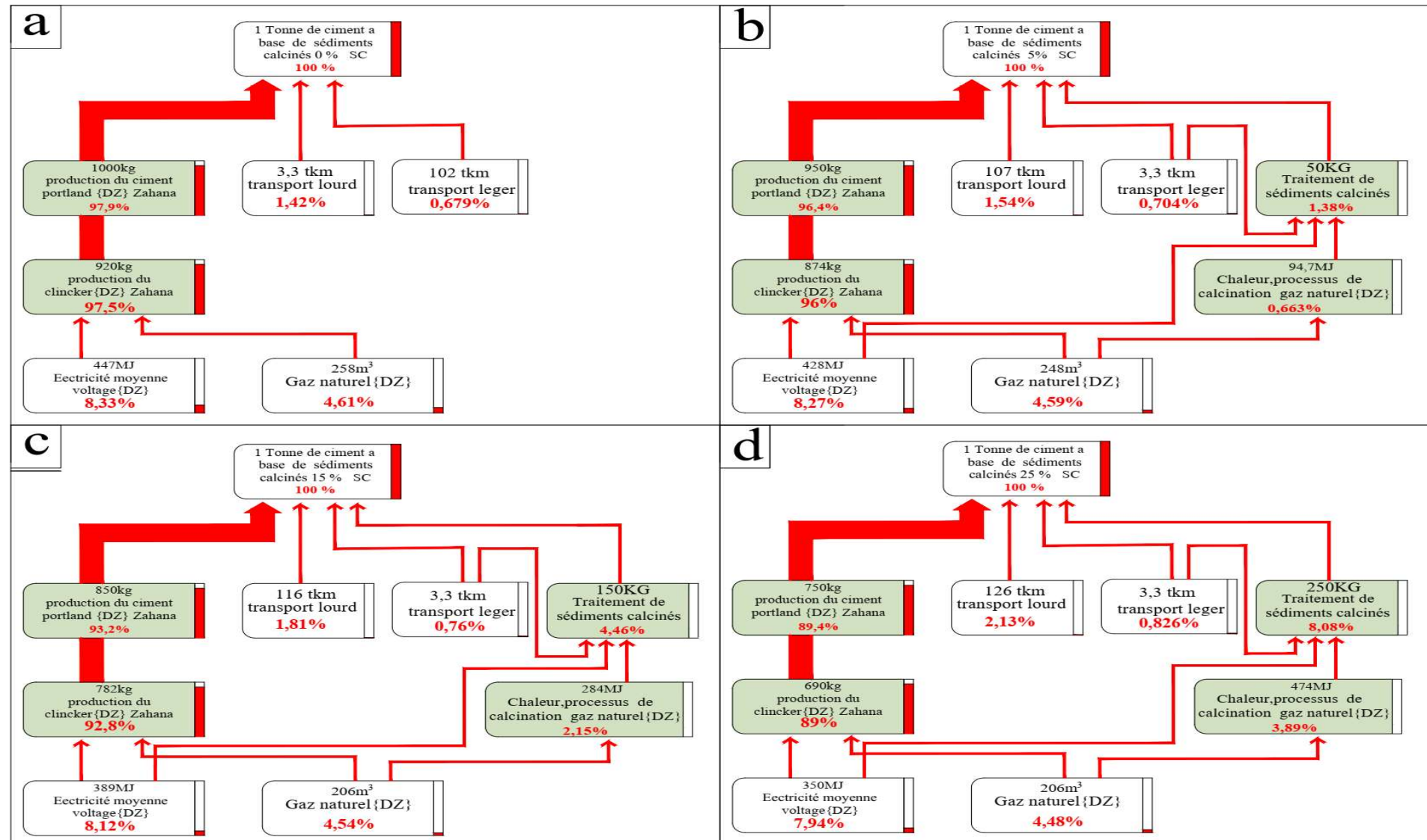


Figure 3. 12 : Arborescence de la modélisation des différents scénarios sur l'indicateur changement climatique avec la méthode IMPACT 2002+ : a) ciment à base de 0% de sédiments calcinés ; b) ciment à base de 5% de sédiments calcinés ; c) ciment à base de 15% de sédiments calcinés et d) ciment à base de 25% de sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.

Pour l'indicateur d'impact de l'effet respiratoire organique l'accentuation des impacts environnementaux est due aux composés organiques volatiles non méthaniques (COVNM) avec 0,051 kg C₂H₄ éq/T, 0,056 kg C₂H₄ éq/T, 0,066 kg C₂H₄ éq/T et 0,076 kg C₂H₄ éq/T pour les ciments à base de 0%, 5%, 15% et 25% des sédiments calcinés. La même accentuation est observée pour l'indicateur d'impact d'occupation des sols due aux occupations annuelles des sols de 0,0105 m²org.arable, 0,0108 m²org.arable, 0,0115 m²org.arable et 0,0121 m²org.arable pour les ciments à base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés.

Tableau 3. 13 : Comparaison des indicateurs d'impacts environnementaux des quatre ciments à base de substitution des sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.

Catégorie d'impact	Unité	Ciment à base de 0% SC	Ciment à base de 5% SC	Ciment à base de 15% SC	Ciment à base de 25% SC
Toxicité humaine (cancérigène)	kg C ₂ H ₃ Cl eq	1,29	1,25	1,18	1,10
Toxicité humaine (non cancérogène)	kg C ₂ H ₃ Cl eq	1,64	1,61	1,56	1,51
Effets respiratoires inorganique	kg PM _{2.5} eq	0,19	0,19	0,18	0,17
Radiations ionisantes	Bq C-14 eq	459,93	455,21	445,75	436,30
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	0,000039	0,000038	0,000035	0,000033
Effets respiratoires organique	kg C₂H₄ eq	0,08	0,08	0,09	0,10
Ecotoxicité aquatique	kg TEG water	19462,41	18911,92	17810,92	16709,93
Ecotoxicité terrestre	kg TEG soil	5648,45	5558,63	5378,97	5199,32
Acidification/Eutrophisation terrestre	kg SO ₂ eq	5,82	5,71	5,48	5,24
Occupation des sols	m²org.arable	2,14	2,21	2,36	2,50
Acidification aquatique	kg SO ₂ eq	0,87	0,85	0,82	0,78
Eutrophisation aquatique	kg PO ₄ P-lim	0,02	0,02	0,02	0,01
Changement climatique	kg CO ₂ eq	935,10	901,73	835,01	768,29
Energie non renouvelable	MJ primary	14065,72	13520,39	12429,72	11339,05
Extraction de minerais	MJ surplus	7,45	7,14	6,51	5,88

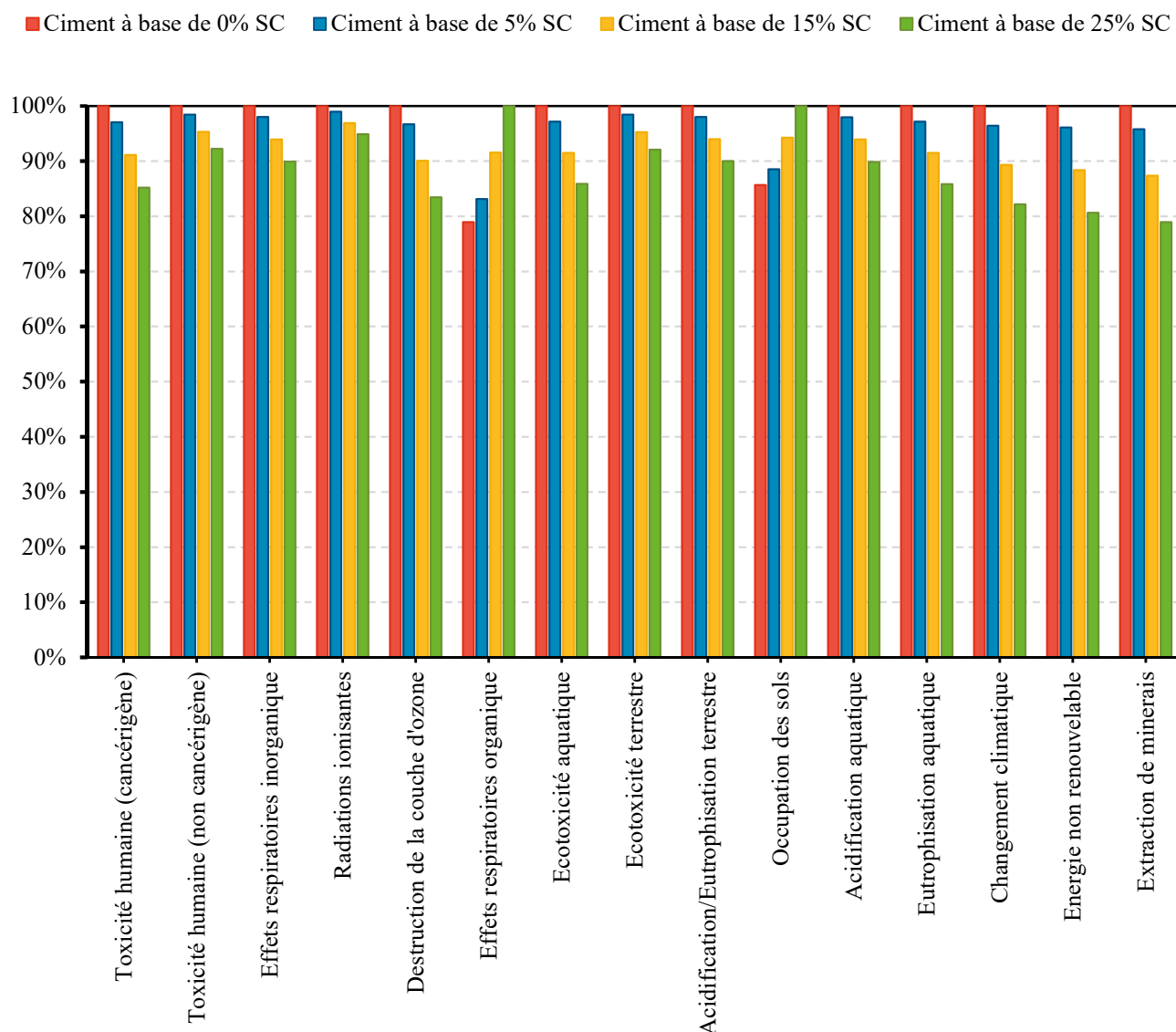


Figure 3. 13 : Histogramme de comparaison des impacts sur l'ensemble des indicateurs de la modélisation des quatre ciments à base de sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.

La comparaison des quatre ciments à base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés montre que les ciments avec un fort taux de substitution offrent les meilleures performances environnementales. Leurs scores sont inférieurs aux scores du ciment témoin dans les catégories santé humaine, qualité des écosystèmes, changement climatique et ressources (figure 3.14).

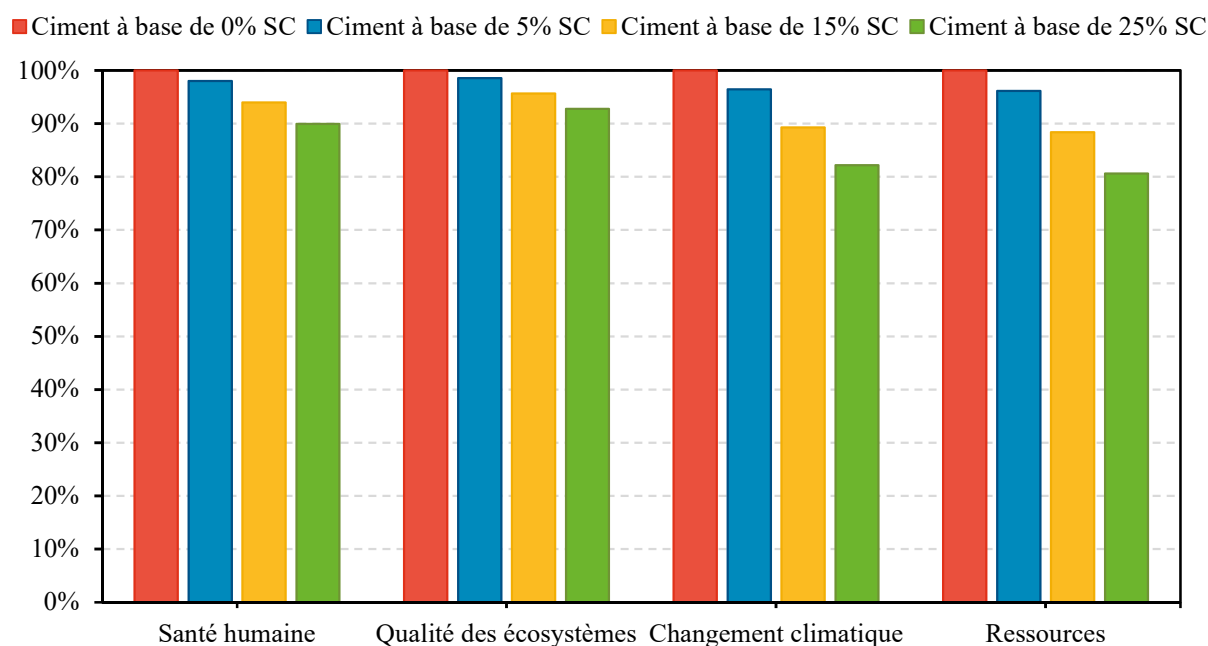


Figure 3. 14 : Comparaison des scores de dommages d'impacts d'une (1) tonne de ciments à base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.

La comparaison des différents ciments pondérés en score unique montre que le ciment témoin de Zahana sans substitution présente le plus grand impact environnemental, suivi du ciment à base de 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés. Le taux de 25% est le taux le plus avantageux sur le plan environnemental (figure 3.15).

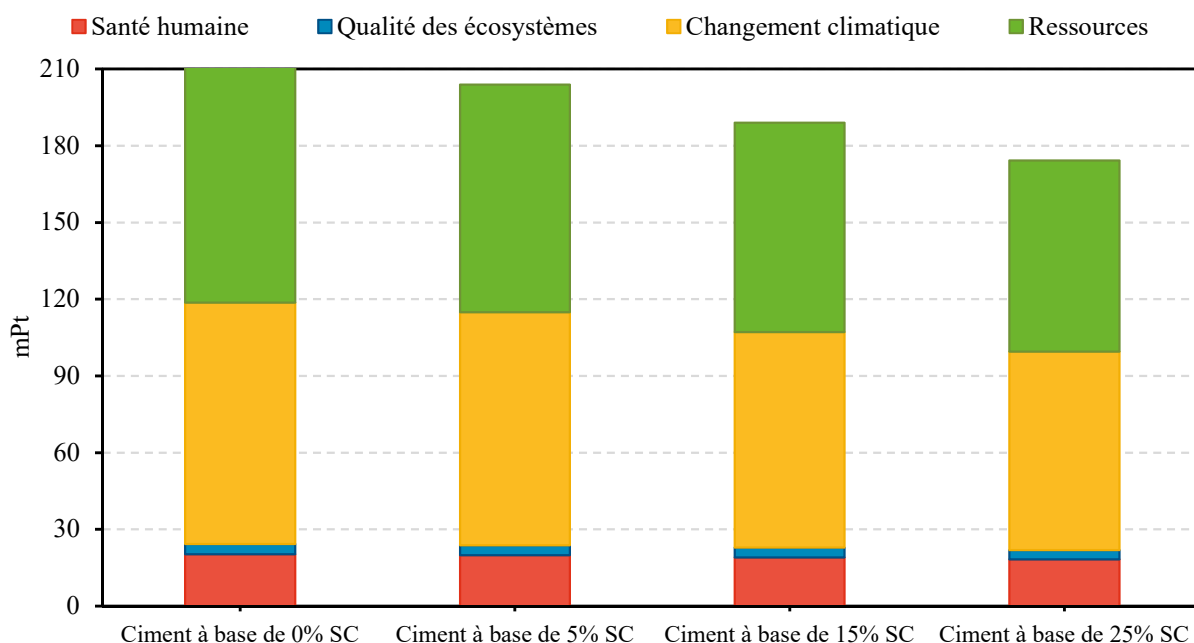


Figure 3. 15 : Comparaison des impacts environnementaux pondérés totaux des différents ciments à base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés issus de la pondération, selon IMPACT 2002+.

Un point correspond ici à une pers.an pour toutes les catégories de dommages.

1.3.2 Analyse du cycle de vie des pâtes et mortiers à base des sédiments calcinés

De nos jours, la combinaison du processus expérimental avec l'évaluation environnementale (ACV) a un intérêt primordial pour valoriser le travail expérimental. Il quantifié le bilan environnemental du matériau à valoriser dans la matrice cimentaire, dans les conditions nationales adaptées pour chaque pays. (Gursel et al., 2016; Robayo-Salazar et al., 2018; Serres et al., 2014) ont combiné le protocole expérimental avec une évaluation environnementale (ACV) pour quantifier le bilan environnemental des différentes formulations proposées dans l'étude expérimentale.

Une comparaison des scénarios de confection des pâtes et mortiers à base de 0%, 5%, 15% et 25% des sédiments calcinés ont été évalués par l'utilisation du logiciel SimaPro 8.5.2.0 et la méthode IMPACT 2002+.

1.3.2.1 Interprétation du cycle de vie des pâtes à base des sédiments calcinés

La figure 3.16 représente les résultats des arborescences de la modélisation des quatre scénarios de formulation des pâtes à base de 0%, 5%, 15% et 25% des sédiments calcinés sur l'indicateur changement climatique avec la méthode IMPACT 2002+. La contribution de la pâte à base de 0% des sédiments calcinés est de l'ordre de 98% pour la production du ciment, de 1,96% pour la consommation de l'électricité et de 0,0146% pour la consommation de l'eau. La contribution des pâtes à base de 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés sont de l'ordre de 96,6%, 93,4% et 89,7% pour la production du ciment, de 2,03%, 2,19% et 2,39% pour la consommation de l'électricité, de 1,35%, 4,38% et 7,98% pour le traitement des sédiments calcinés et de 0,0157%, 0,094% et 0,0235% pour la consommation de l'eau.

La comparaison des différentes pâtes a montré les mêmes résultats obtenus du bilan environnementale par rapport aux résultats du ciment avec substitution partielle par les sédiments calcinés sur l'ensemble des indicateurs. On a constaté que les 13 indicateurs d'impact (toxicité humaine (cancérigène), toxicité humaine (non cancérogène), radiations ionisantes, destruction de la couche d'ozone, effets respiratoires organiques, écotoxicité aquatique, écotoxicité terrestre, acidification/eutrophisation terrestre, acidification aquatique, eutrophisation aquatique, changement climatique, énergie non renouvelable, extraction de minerais) améliore les impacts environnementaux. Les indicateurs d'impacts des effets respiratoires inorganiques et l'occupation des sols augmentent légèrement les impacts des pâtes à base de substitution partielle des sédiments par rapport à la pâte témoin (figure 3.17).

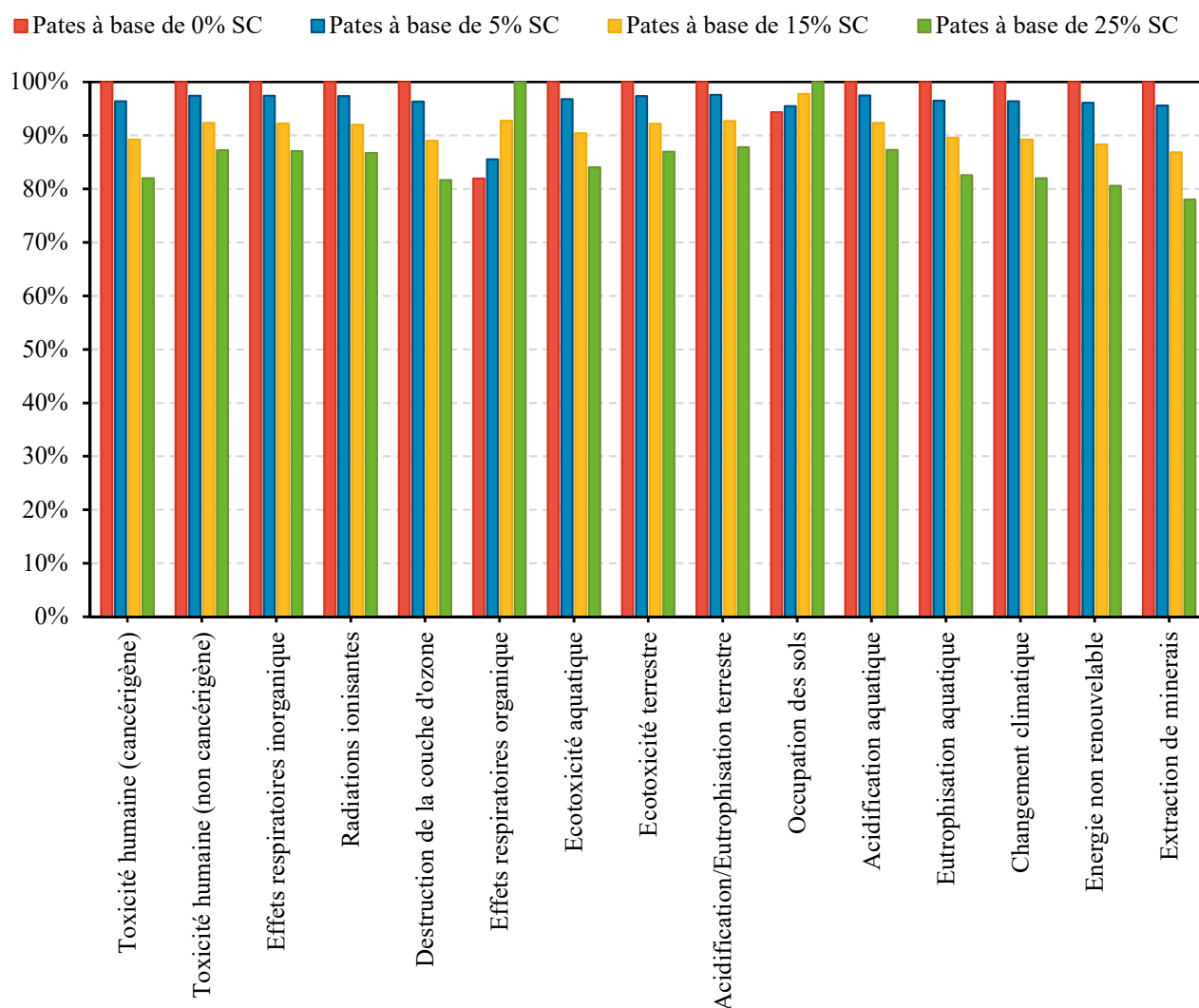


Figure 3. 17 : Histogramme de comparaison des impacts sur l'ensemble des indicateurs de la modélisation des quatre pâtes à base des sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.

La figure 3.18 représente les résultats de comparaison des scores de dommages d'impacts des différentes pâtes à base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+. Les résultats montrent que les pâtes avec un fort taux de substitution offrent les meilleures performances environnementales. Leurs scores sont inférieurs aux scores de la pâte témoin dans les catégories santé humaine, qualité des écosystèmes, changement climatique et ressources.

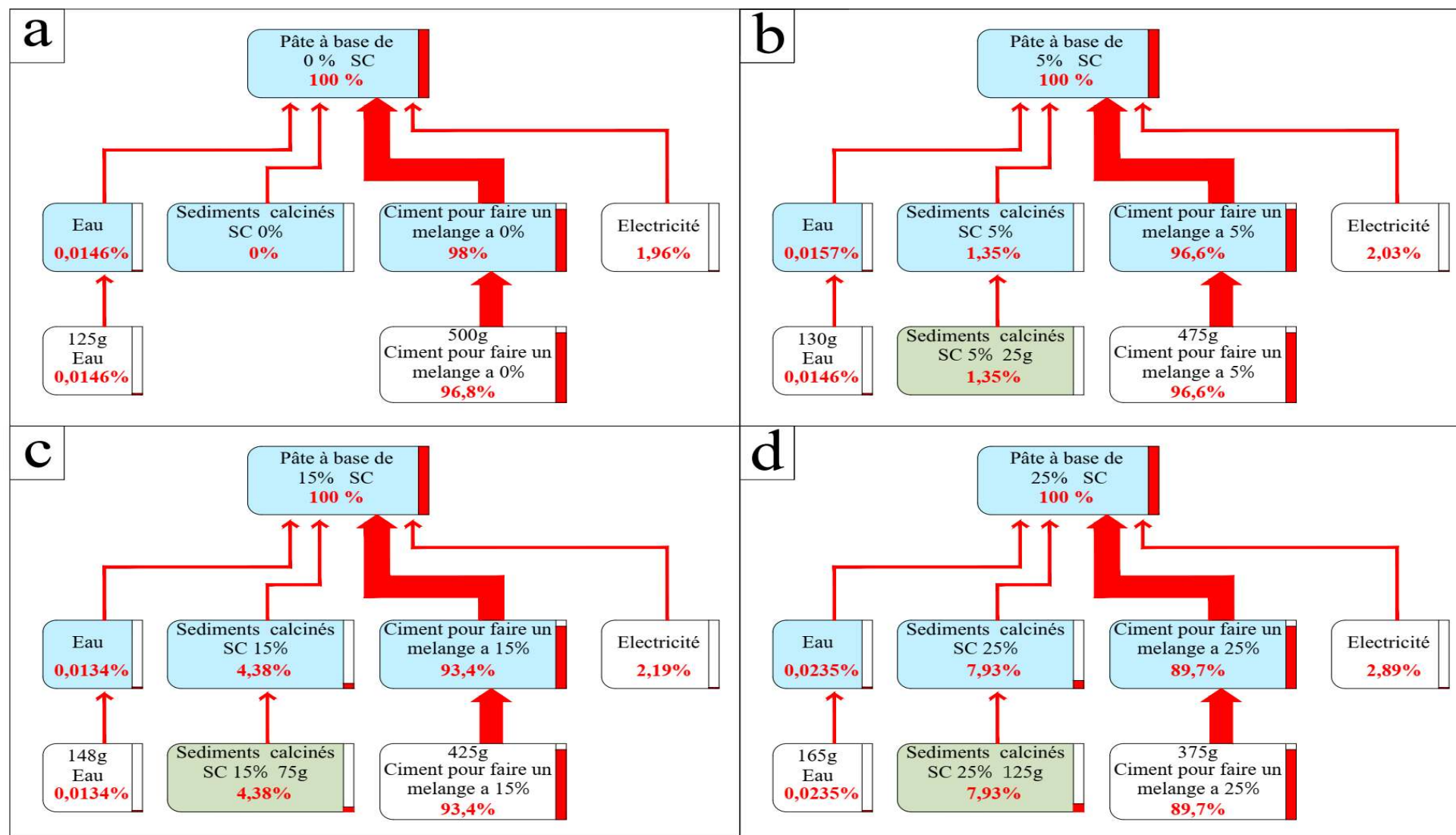


Figure 3. 16 : Arborescence de la modélisation des différents scénarios sur l'indicateur changement climatique avec la méthode IMPACT 2002+ : a) pâte à base de 0% des sédiments calcinés ; b) pâte à base de 5% des sédiments calcinés ; c) pâte à base de 15% des sédiments calcinés et d) pâte à base de 25% des sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.

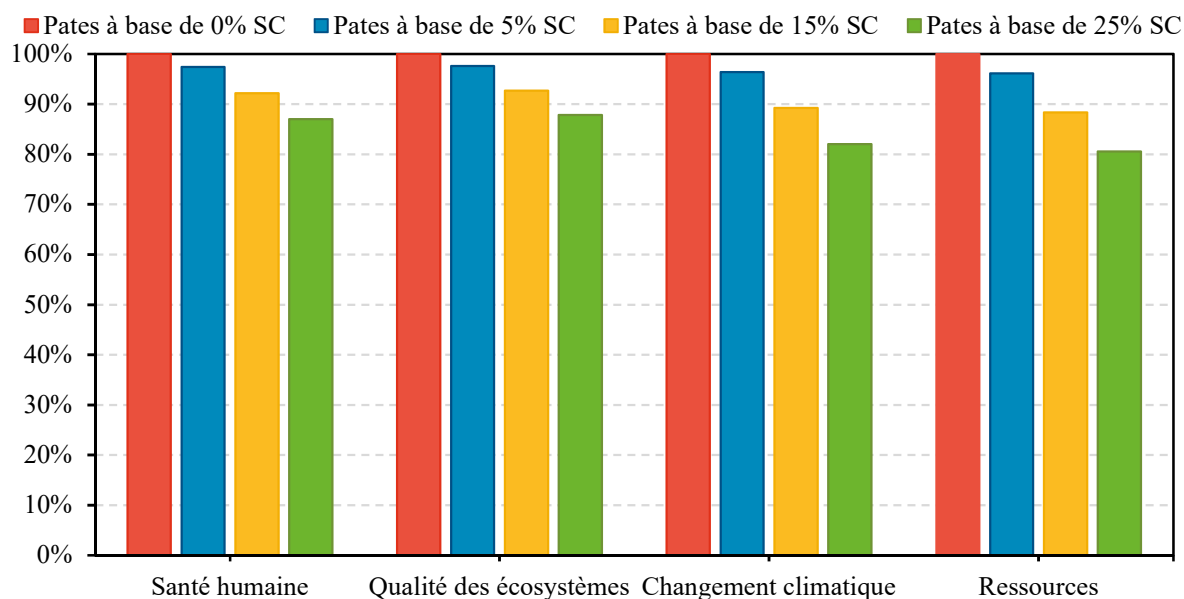


Figure 3. 18 : Comparaison des scores de dommages d'impacts des pâtes à base de 0%, 5%, 15% et 25% sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.

La figure 3.19 représente les résultats de comparaison des impacts environnementaux pondérés totaux des différentes pâtes à base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés issus de la pondération, selon IMPACT 2002+. Un point correspond ici à une pers.an pour toutes les catégories de dommages. Les résultats de comparaison des différents ciments pondérés en score unique montrent que la pâte témoin sans substitution présente le plus grand impact environnemental, suivie de la pâte à base de 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés. Le taux de 25% est le taux le plus avantageux sur le plan environnemental.

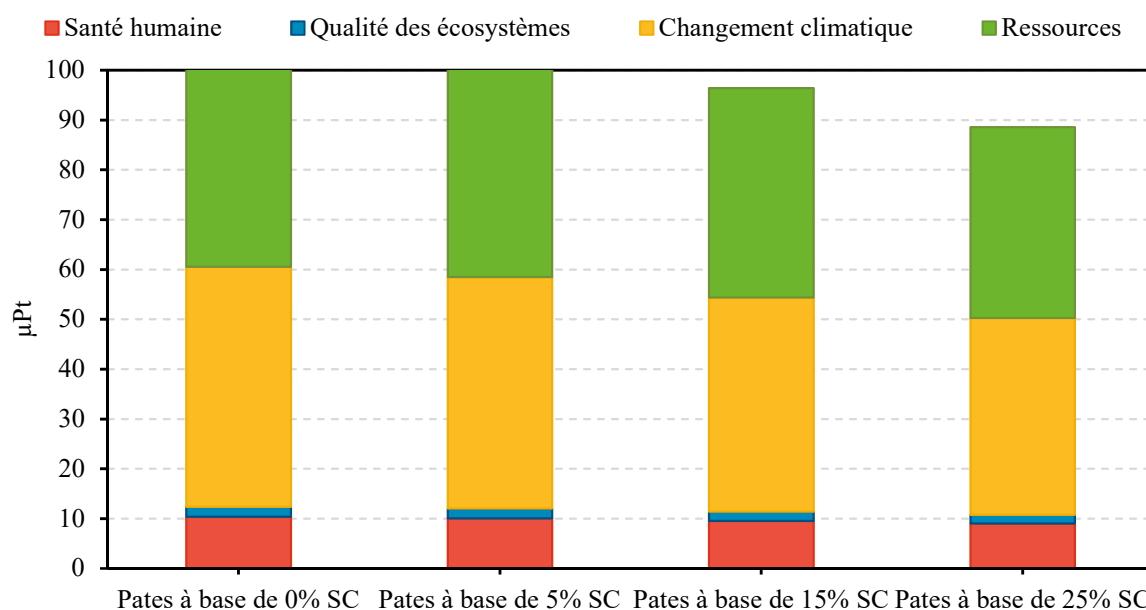


Figure 3. 19 : Comparaison des impacts environnementaux totaux pondérés des différentes pâtes à base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés issus de la pondération, selon IMPACT 2002+. Un point correspond ici à une pers.an pour toutes les catégories de dommages.

1.3.2.2 Interprétation du cycle de vie des mortiers à base des sédiments calcinés

La figure 3.20 représente les résultats des arborescences de la modélisation des quatre scénarios de formulation des mortiers à base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés sur l'indicateur changement climatique avec la méthode IMPACT 2002+. La contribution du mortier à base de 0% des sédiments calcinés est de l'ordre de 96,8% pour la production du ciment, de 3,66% pour la consommation du sable, de 0,0287% pour la consommation de l'eau et de 0,00178% pour la consommation d'électricité. La contribution des mortiers à base de 5%, 15% et 25% des sédiments calcinés est de l'ordre de 94,7%, 91% et 86,6% pour la production du ciment, de 1,32%, 4,26% et 7,66% pour le traitement des sédiments calcinés ; de 3,78%, 4,06% et 4,38% pour la consommation du sable ; de 0,0296%, 0,0317% et 0,34% pour la consommation de l'eau et de 0,133%, 0,645% et 1,31% pour la consommation de l'adjuvant et de 0,00184%, 0,00198% et 0,00214% pour la consommation d'électricité.

La comparaison des différents mortiers a montré les mêmes résultats obtenus du bilan environnemental par rapport aux résultats du ciment et pâtes avec substitution partielle par les sédiments calcinés sur l'ensemble des indicateurs. On a constaté que les 12 indicateurs d'impact (toxicité humaine (non cancérigène), radiations ionisantes, destruction de la couche d'ozone, effets respiratoires organiques, écotoxicité aquatique, écotoxicité terrestre, acidification/eutrophisation terrestre, acidification aquatique, eutrophisation aquatique, changement climatique, énergie non renouvelable, extraction de minerais) améliore les impacts environnementaux. Les indicateurs d'impacts de toxicité humaine (cancérigène), les effets respiratoires inorganiques et l'occupation des sols augmentent légèrement les impacts des mortiers à base de substitution partielle des sédiments par rapport au mortier témoin, cela est dû aux mêmes causes pour le ciment et les pâtes. L'ajout du plastifiant BV40 pour les mortiers à base des sédiments calcinés accentue le plus les impacts sur l'indicateur toxicité humaine (cancérigène) (figure 3.21 et tableau 3.14).

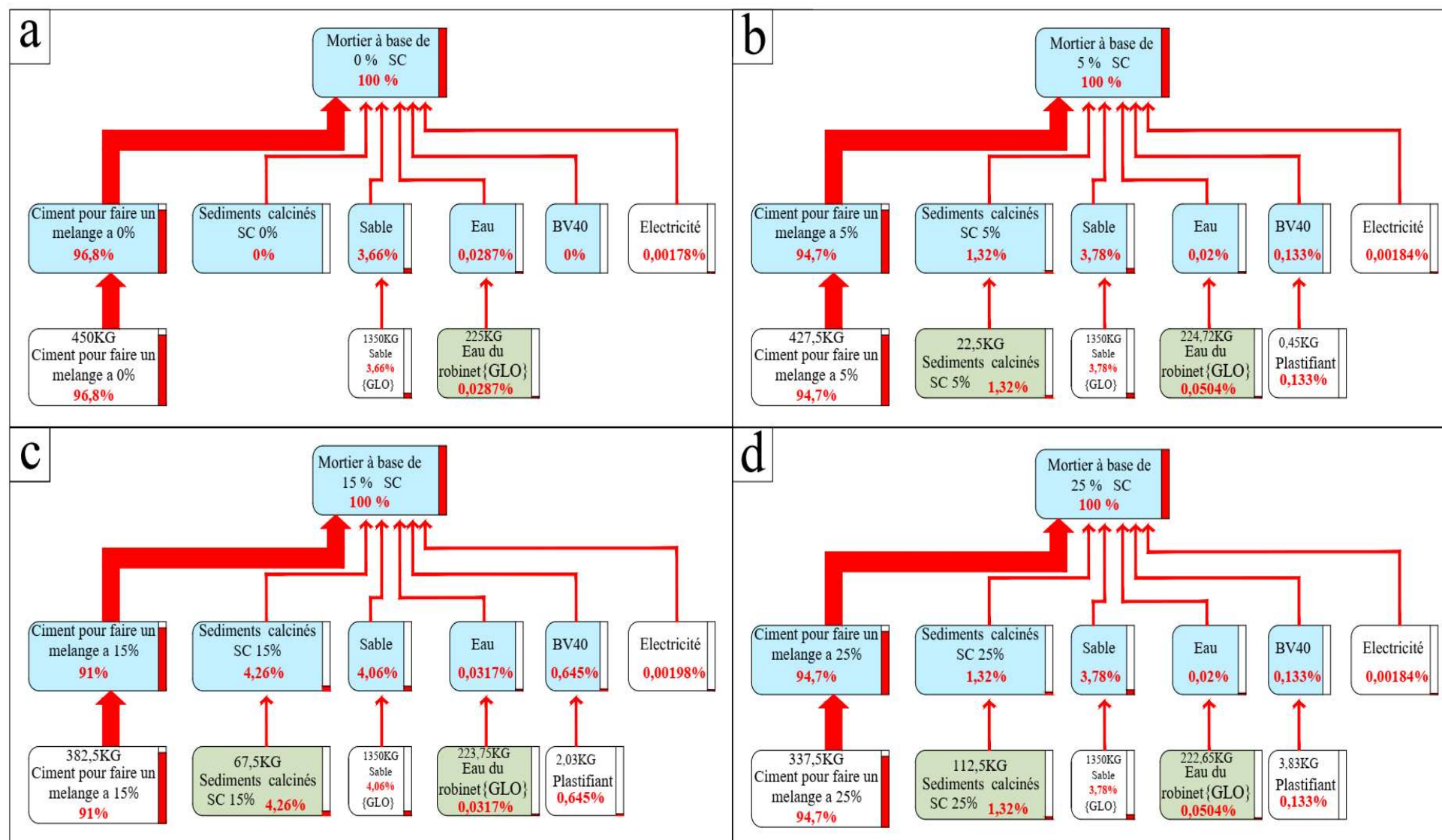


Figure 3. 20 : Arborescence de la modélisation des différents scénarios sur l'indicateur changement climatique avec la méthode IMPACT 2002+ : a) mortier à base de 0% des sédiments calcinés ; b) mortier à base de 5% des sédiments calcinés ; c) mortier à base de 15% des sédiments calcinés et d) mortier à base de 25% des sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.

Tableau 3. 14 : Comparaison des indicateurs d'impacts environnementaux des quatre mortiers à base de substitution des sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.

Catégorie d'impact	Unité	Mortier à base de 0% SC	Mortier à base de 5% SC	Mortier à base de 15% SC	Mortier à base de 25% SC
Toxicité humaine (cancérigène)	kg C2H3Cl eq	0,7650	0,7686	0,8143	0,8725
Toxicité humaine (non cancérigène)	kg C2H3Cl eq	1,0177	1,0078	1,0029	1,0029
Effets respiratoires inorganique	kg PM2.5 eq	0,1141	0,1126	0,1107	0,1091
Radiations ionisantes	Bq C-14 eq	353,8784	352,8854	357,9434	365,2803
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Effets respiratoires organique	kg C2H4 eq	0,0437	0,0458	0,0506	0,0557
Ecotoxicité aquatique	kg TEG water	9906,9708	9657,2013	9214,3301	8789,7926
Ecotoxicité terrestre	kg TEG soil	3189,6562	3132,3074	3034,8021	2942,8590
Acidification/Eutrophisation terrestre	kg SO2 eq	3,1802	3,1254	3,0313	2,9423
Occupation des sols	m2org.arable	1,8965	1,9139	1,9576	2,0041
Acidification aquatique	kg SO2 eq	0,5025	0,4956	0,4869	0,4797
Eutrophisation aquatique	kg PO4 P-lim	0,0104	0,0102	0,0101	0,0101
Changement climatique	kg CO2 eq	436,8949	422,0023	393,0658	364,4039
Energie non renouvelable	MJ primary	6574,5923	6337,3600	5886,1291	5442,4151
Extraction de minerais	MJ surplus	3,9688	3,8396	3,6204	3,4139

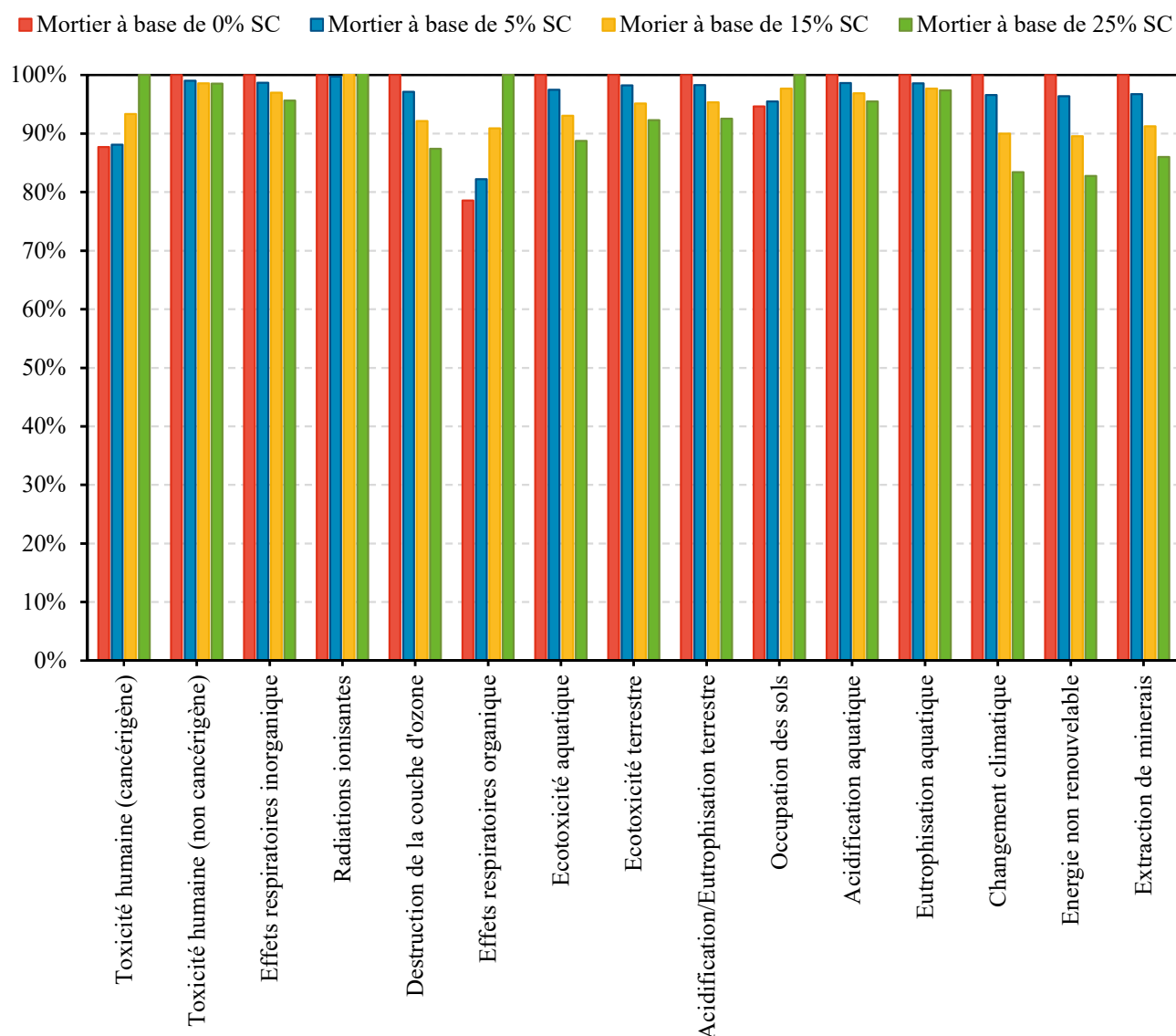


Figure 3. 21 : Histogramme de comparaison des impacts sur l'ensemble des indicateurs de la modélisation des quatre mortiers à base des sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.

La figure 3.22 représente les résultats de comparaison des scores de dommages d'impacts des différentes pâtes à base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+. Les résultats montrent que les pâtes avec un fort taux de substitution offrent les meilleures performances environnementales. Leurs scores sont inférieurs aux scores de la pâte témoin dans les catégories santé humaine, qualité des écosystèmes, changement climatique et ressources.

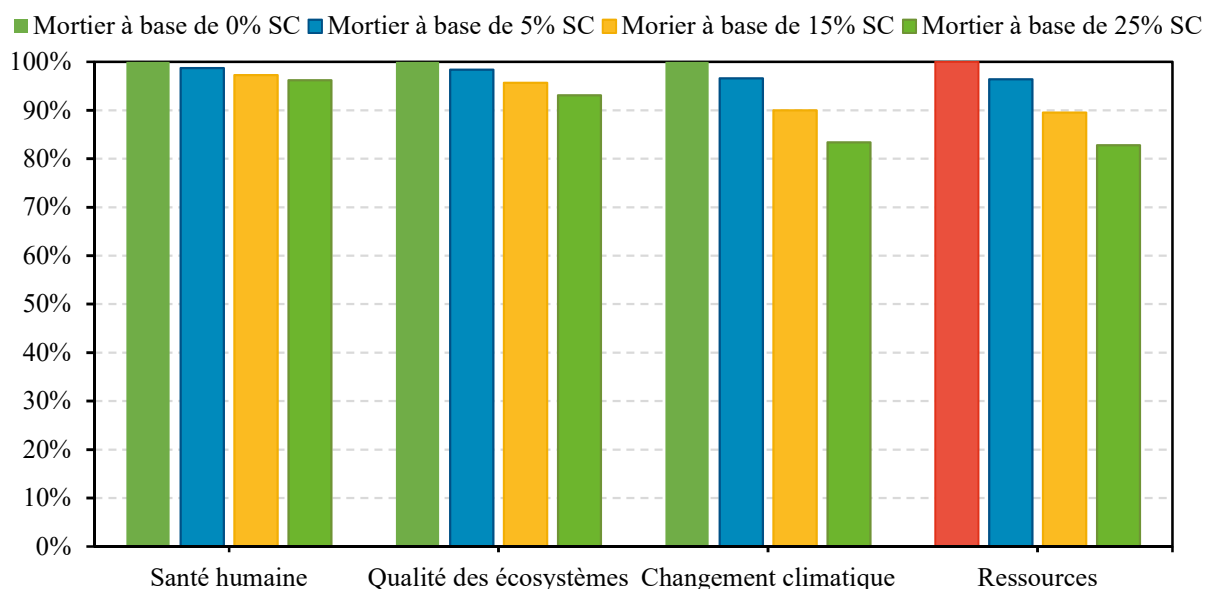


Figure 3. 22 : Comparaison des scores de dommages d'impacts des mortiers à base de 0%, 5%, 15% et 25% sédiments calcinés, selon IMPACT 2002+.

La figure 3.23 représente les résultats de comparaison des impacts environnementaux pondérés totaux des différentes pâtes à base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés issus de la pondération, selon IMPACT 2002+. Un point correspond ici à une pers.an pour toutes les catégories de dommages. Les résultats de comparaison des différents ciments pondérés en score unique montrent que le mortier témoin sans substitution présente le plus grand impact environnemental, suivi du mortier à base de 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés. Le taux de 25% est le taux le plus avantageux sur le plan environnemental.

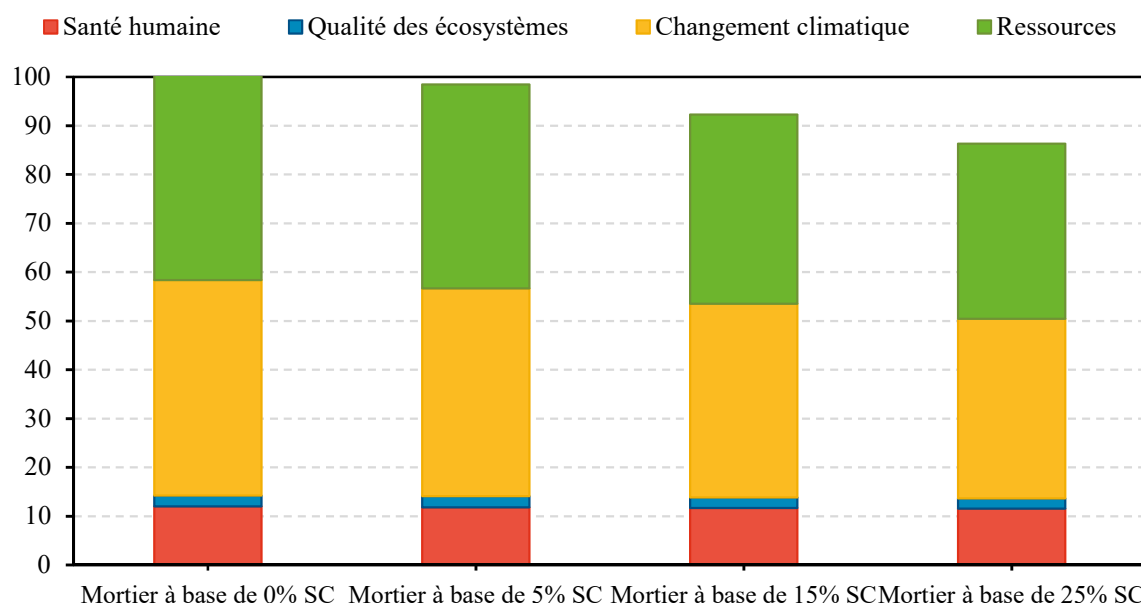


Figure 3. 23 : Comparaison des impacts environnementaux pondérés totaux des différentes pâtes à base de 0%, 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés issus de la pondération, selon IMPACT 2002+. Un point correspond ici à une pers.an pour toutes les catégories de dommages.

1.4 CONCLUSION

L'intérêt de la valorisation des sédiments de dragage des barrages répond à l'élimination des zones de rejet qui posent un problème important aux gestionnaires de l'ANBT pour la diminution des émissions de CO₂ dans l'atmosphère. Les scénarios étudiés ont porté sur le développement d'un nouveau procédé de production des sédiments de dragage calcinés en Algérie selon deux scénarios. Le scénario 1 consistait à utiliser les sédiments à l'état sec. Cette opération nécessite un temps de séchage à l'air libre assez important. Le scénario 2 a été réalisé sur des sédiments à l'état humide. Le temps de séchage est plus réduit. Le choix se portera sur le scénario 1, les impacts environnementaux ont été plus faibles ; d'où une nette amélioration sur les indicateurs environnementaux. Les résultats de l'analyse du cycle de vie du processus de production des sédiments de dragage mettent en évidence la possibilité de développer un processus qui respecte l'environnement. L'étape de calcination est la plus impactante sur l'environnement. Il y a lieu d'envisager une recherche plus détaillée sur un nouveau procédé, avec une optimisation de consommation d'énergie. La phase de calcination peut être envisagée avec un choix plus judicieux d'un four flash moins consommateur d'énergie. La meilleure manière d'exploitation des sédiments de dragage est une exploitation à l'état sec. L'installation d'une usine de transformation des sédiments de dragage peut être envisagée. L'exploitation après un séchage complet, permettra d'optimiser les impacts environnementaux.

L'évaluation environnementale du processus expérimental a montré que les mortiers, les pâtes et les ciments avec un fort taux de substitution offrent les meilleures performances environnementales, sur les catégories santé humaine, qualité des écosystèmes, changement climatique et ressources.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif du thème étudié était la valorisation des sédiments dragués depuis l'extraction jusqu'au traitement. Un programme expérimental d'identification et de caractérisation a montré que les meilleurs résultats du comportement mécanique des mortiers confectionnés s'observent à des températures de cure de 20°C à 40°C et avec une substitution partielle de ciment par les sédiments calcinés à un taux de 25%.

L'intérêt de la valorisation des sédiments de dragage des barrages répond à l'élimination des zones de rejet qui posent un problème important aux gestionnaires de l'ANBT. La solution serait de substituer les sédiments calcinés partiellement au ciment pour la diminution des émissions de gaz à effets de serre. Les meilleurs résultats du comportement mécanique des mortiers confectionnés ont été observés à des températures de cure de 20°C et 40°C. Avec une accélération de l'activité pouzzolanique à 90 jours pour la cure à 40°C et 180 jours à 20°C le développement des résistances à la compression est relativement supérieur à celui des résistances du mortier témoin.

Une étude d'analyse de cycle de vie des sédiments calcinés effectuée dans notre laboratoire pour la production d'une tonne de sédiments calcinés par rapport à une tonne de ciment en Algérie a montré un gain entre 62,05% à 71,05% des émissions de gaz à effets de serre dans l'environnement. Les résultats obtenus par les études menées auparavant sur la valorisation des sédiments des barrages offrent des perspectives d'industrialisation de ces sédiments comme matières premières dans l'industrie cimentaire.

Une partie de l'étude a porté sur le développement d'un procédé de production des sédiments de dragage calcinés, sur l'influence du taux d'humidité des sédiments de dragage calcinés, sur la consommation d'énergie électrique et surtout son impact sur l'environnement des différents paramètres. L'installation d'une usine de traitement des sédiments de dragage pourrait être envisagée. L'élimination des déblais de dragage des barrages visera à transformer cette contrainte écologique en opportunité économique en optant pour des voies de valorisations appropriées améliorant les impacts et respectant l'environnement.

Cette recherche a pour objectif d'analyser le cycle de vie des sédiments dragués depuis l'extraction jusqu'au traitement. Deux scénarios sont proposés pour l'installation du processus

de traitement après le dragage et le stockage des sédiments. Les travaux de recherche ont été orientés particulièrement vers l'influence du taux d'humidité des sédiments sur la consommation d'énergie et des ressources et surtout l'impact sur l'environnement des différents paramètres à l'aide du logiciel GEMIS 4.95 et SimaPro 8.5.2.0. Les résultats de cette étude d'analyse du cycle de vie du nouveau processus d'industrialisation des sédiments de dragage montrent que le potentiel de réchauffement climatique (GES) est de 0,246 t éq de CO₂/t de sédiments, le potentiel d'acidification est de $4,55 \times 10^{-4}$ t de SO₂ éq/t de sédiments, le potentiel d'ozone troposphérique est de $9,97 \times 10^{-4}$ t de TOPP éq/t de sédiments et la dépense d'énergie cumulée est de 2506,75 en MJ/t de sédiments. L'indicateur du potentiel de changement climatique pour les ciments à base 0%, 5%, 15 et 25% donne des émissions de 935,10 kg CO₂ éq/T, 901,73 kg CO₂ éq/T, 835 kg CO₂ éq/T et 768,29 kg CO₂/T. Soit un gain de 3, 57%, 10,70% et 17,84% pour les ciments à base de 5%, 15% et 25% de sédiments calcinés. Les résultats de cette étude sont comparés par rapport à d'autres études effectuées en Algérie. L'évaluation environnementale du processus expérimental a montré que les mortiers, les pâtes et les ciments avec un fort taux de substitution offrent les meilleures performances environnementales, sur les catégories santé humaine, qualité des écosystèmes, changement climatique et ressources.

Comme perspectives :

Au vu des résultats de cette étude, de nouveaux paramètres pourront la compléter, en variant la cure à 10°C et 40°C de la chaleur d'hydratation pour calculer l'énergie d'activation des sédiments calcinés et la comparer par rapport au métakaolin. Lancer une étude analytique sur l'élaboration d'un logiciel de formulation des mortiers bétons avec substitution partielle du ciment par des sédiments, le développement d'un modèle de prédiction et l'utilisation des algorithmes génétiques (AG) et des réseaux de neurones artificiels (RNAs) ; ou leur combinaison (RNAG).

Les prochaines recherches pourraient porter sur des analyses de sensibilité plus affinées ; sur des analyses d'incertitude avec adoption de la méthode Monté Carlo ; et la conception d'un affichage environnemental visant la promotion des résultats de l'industrialisation des sédiments calcinés. Cette étude pourrait être étendue aux bétons et aux bétons autoplaçants,

Enfin, il est intéressant de commencer une étude socio-économique des sédiments de dragage du barrage de Chorfa II, une analyse du cycle de vie du coût et une analyse sociale (LCC et SLCA).

- Aasly, K., Malvik, T., Myrhaug, E., 2007. Advanced methods to characterize thermal properties of quartz. Presented at the Proceeding of the XI International Conference on Innovations in Ferro Alloy Industry, New Delhi, India, pp. 381–392.
- Abdelli, K., Tahlaiti, M., Belarbi, R., Oudjit, M.N., 2017a. Influence of the origin of metakaolin on pozzolanic reactivity of mortars. *Energy Procedia, Materials & Energy I* (2015) 139, 230–235. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.201>
- Abdelli, K., Tahlaiti, M., Belarbi, R., Oudjit, M.N., 2017b. Influence of the pozzolanic reactivity of the Blast Furnace Slag (BFS) and metakaolin on mortars. *Energy Procedia, Materials & Energy I* (2015) 139, 224–229. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.200>
- Abriak, N.E., Junqua, G., Dubois, V., Gregoire, P., Farlane, F.M., Damidot, D., 2006. Methodology of Management of Dredging Operations I. Conceptual Developments. *Environ. Technol.* 27, 411–429. <https://doi.org/10.1080/09593332708618653>
- ADEME, 2006. Le séchage thermique. ADEME/DABEE/Département industrie et agriculture.
- Agence de l'eau, 2002, Méthode de gestion et de réutilisation des sédiments pollués - Inventaire détaillé des techniques de curage, transport, traitement et usage des sédiments. [En ligne], 126 p. Disponible sur : <http://www.eau-artoispicardie.fr/>.
- Aissani, L., 2008. Intégration des paramètres spatio-temporels et des risques d'accident à l'Analyse du Cycle de Vie : Application à la filière hydrogène énergie et à la filière essence (thèse). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- Aksas, H., Boughrara, S., Louhab, K., 2017. Environmental Impact of Algerian Cement Factories on Fauna and Flora. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2017.20170>
- Amar, M., Benzerzour, M., Safhi, A.E.M., Abriak, N.-E., 2018. Durability of a cementitious matrix based on treated sediments. *Case Stud. Constr. Mater.* 8, 258–276. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.01.007>
- Ambroise, J., Murat, M., Péra, J., 1985. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals V. Extension of the research and general conclusions. *Cem. Concr. Res.* 15, 261–268. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(85\)90037-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(85)90037-7)
- ANBT, 2015. Agence nationale des barrages et transferts.
- Anger, B., 2014. Caractérisation des sédiments fins des retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière (thèse). Caen.

- Bai, J., Chatain, V., Laforest, V., 2017. Analyse du cycle de vie (ACV) d'une filière de valorisation terrestre de sédiments de dragage marins contaminés. *Déchets Sci. Tech.* 73, 13p. <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.3564>
- Basset-Mens, C., 2005. Propositions pour une adaptation de l'Analyse de Cycle de Vie aux systèmes de production agricole. Mise en œuvre pour l'évaluation environnementale de la production porcine (thèse). Agrocampus - Ecole nationale supérieure d'agronomie de renneS.
- Bates, M.E., Fox-Lent, C., Seymour, L., Wender, B.A., Linkov, I., 2015. Life cycle assessment for dredged sediment placement strategies. *Sci. Total Environ.* 511, 309–318. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.003>
- Beauchamp J, 2005. Sédiments et roches sédimentaires, Cours de sédimentologie [WWW Document]. URL <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours-sed/sed-1.htm> (accessed 2.6.19).
- Belaribi, O., 2015. Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane (thèse). Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Mostaganem.
- Belaribi, O., Belas, N., Aggoun, S., Bendani, K., Nasr-eddine, B., Abdelkader, M., 2014. Enhancing the value of dam dredged sediments as a component of a self compacting concrete. *Cement-Wapno-Beton* 6.
- Belguesmia, K., 2018. Optimisation d'un éco-BAP à base de sédiment de dragage vis-à-vis des états frais, durci et de la durabilité (thèse). Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Mostaganem.
- Belguesmia, K., 2018. Optimisation d'un éco-BAP à base de sédiment de dragage vis-à-vis des états frais, durci et de la durabilité (thèse). Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Mostaganem.
- Belguesmia, K., Belaribi, N.B., Amiri, O., Leklou, N., Belaribi, O., 2018. Influence of treated sediment substitution percentage on workability, strength and porosity of SCC. *J. Mater. Eng. Struct.* « JMES » 5, 47–55.
- Benaissa, M., Bendani, K., Belas, N., Belguesmia, K., Missoum, H., 2016. Effet de l'ajout de la bentonite sur les propriétés des mortiers et des bétons autoplaçants. *Matér. Tech.* 104, 608. <https://doi.org/10.1051/mattech/2017021>
- Benoît-Norris, C., Vickery-Niederman, G., Valdivia, S., Franze, J., Traverso, M., Citroth, A., Mazijn, B., 2011. Introducing the UNEP/SETAC methodological sheets for subcategories of social LCA. *Int. J. Life Cycle Assess.* 16, 682–690. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0301-y>
- Benzerzour, M., Amar, M., Abriak, N.-E., 2017a. New experimental approach of the reuse of dredged sediments in a cement matrix by physical and heat treatment. *Constr. Build. Mater.* 140, 432–444. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.142>
- Benzerzour, M., Maherzi, W., Amar, M.A.A., Abriak, N.-E., Damidot, D., 2017b. Formulation of mortars based on thermally treated sediments. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0626-0>

- Beolchini, F., Fonti, V., Rocchetti, L., Saraceni, G., Pietrangeli, B., Dell'Anno, A., 2013. Chemical and biological strategies for the mobilisation of metals/semi-metals in contaminated dredged sediments: experimental analysis and environmental impact assessment. *Chem. Ecol.* 29, 415–426. <https://doi.org/10.1080/02757540.2013.776547>
- Bertreau I., Martin S., Vassiliadis A., « Le curage des cours d'eau lorsque les sédiments contiennent des éléments-traces toxiques ». *Le courrier de l'environnement de l'INRA*, vol. 20, pp.27-35, 1993.
- Bich, C., 2005. Contribution à l'étude de l'activation thermique du kaolin : évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique (thèse). Lyon, INSA.
- Bonnet C., « Développement de bio-essais sur sédiments et applications de l'étude, en laboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés ». Thèse de l'Université de Metz, 2000.
- Bouabid, G., Wassate, B., Touaj, K., Nahya, D., Falaki, K.E., Azzi, M., 2014. Effluents treatment plants sludge characterization in order to be used as solid fuels. *J. Mater. Environ.* 5, 8.
- Boubaker, L., Gondran, N., Djebabra, M., 2008. Vers une combinaison ACV / AMDEC-E en vue de l'analyse environnementale d'une cimenterie algérienne. *Httpirevuesinistfrdechets-Sci.-Tech.* 52. <http://dx.doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.1520>
- Boucard, L., 2006. Etude expérimentale : valorisation de sédiments fluviaux stabilisés (thesis). Ecole Centrale de Lille.
- Boughrara, S., Chedri, M., Louhab, K., 2015. Evaluation of Environmental Impact of Cement Production in Algeria Using Life Cycle Assessment. *Int. Lett. Chem. Phys. Astron.* 45, 79–84. <https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/ILCPA.45.79>
- Boustead, I., 1996. LCA — how it came about. *Int. J. Life Cycle Assess.* 1, 147–150. <https://doi.org/10.1007/BF02978943>
- Bouzidi, N., 2012. Influence des impuretés des kaolins sur les propriétés des produits de cuisson. (thèse). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- BUS, 1984. Oekobilanzen von packenstoffen (Technical Report No. 24). Bundesamt für Umweltschutz, Bern.
- Canter, K.G., Kennedy, D.J., Montgomery, D.C., Keats, J.B., Carlyle, W.M., 2002. Screening stochastic Life Cycle assessment inventory models. *Int. J. Life Cycle Assess.* 7, 18–26. <https://doi.org/10.1007/BF02978906>
- Chevalier, J., 2009. Analyse du cycle de vie - Utilisation dans le secteur de la construction. Tech. L'Ingénieur.
- Chiaromonti, D., Recchia, L., Nistri, R., 2010. Critical Analysis of Field Data Versus LCA Results for GHG Saving Assessment through LCA of Sunflower Biodiesel Chain in Italy. *Eur. Biomass Conf. Exhib. Proc. 18th EU BC&E-Lyon 2010*, 2215–2222. <https://doi.org/10.5071/18thEUBCE2010-VP5.2.11>

- Chikouche Mohamed Aziz., « Effet des ajouts à base d'argiles gréseuses et vaseuses sur les propriétés des matériaux cimentaires » Thèse Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister spécialité : Génie Civil Option : Matériaux, université de M'SILA, 2008.
- Chikouche, M.A., Ghorbel, E., Bibi, M., 2016. The possibility of using dredging sludge in manufacturing cements: Optimization of heat treatment cycle and ratio replacement. *Constr. Build. Mater.* 106, 330–341. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.128>
- Colantoni, A., Recchia, L., Bernabei, G., Cardarelli, M., Roupheal, Y., Colla, G., 2017. Analyzing the Environmental Impact of Chemically-Produced Protein Hydrolysate from Leather Waste vs. Enzymatically-Produced Protein Hydrolysate from Legume Grains. *Agriculture* 7, 62. <https://doi.org/10.3390/agriculture7080062>
- Commission internationale de l'éclairage (Ed.), 2004. Colorimetry, 3. ed. ed, Technical report / CIE. CIE, Central Bureau, Vienna.
- Cooper, J.S., 2003. Specifying functional units and reference flows for comparable alternatives. *Int. J. Life Cycle Assess.* 8, 337–349. <https://doi.org/10.1007/BF02978507>
- Corinne, B., 2006. Développement de bioessais sur sédiments et applications à l'étude, en laboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés 326.
- Coulon, R., Camobreco, V., Teulon, H., Besnainou, J., 1997. Data quality and uncertainty in LCI. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2, 178–182. <https://doi.org/10.1007/BF02978816>
- Curcio, F., DeAngelis, B.A., 1998. Dilatant Behavior of Superplasticized Cement Pastes Containing Metakaolin 11Communicated by F. Massazza. *Cem. Concr. Res.* 28, 629–634. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00046-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00046-5)
- D'Aloia-Schwartzentruber, L., Torrenti, J.-M., 2014. Le grand livre des bétons, Editions du Moniteur. ed. Paris.
- Dang, T.A., Kamali-Bernard, S., Prince, W.A., 2013. Design of new blended cement based on marine dredged sediment. *Constr. Build. Mater.* 41, 602–611. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.088>
- De Haes, H.A.U., Jolliet, O., Finnveden, G., Hauschild, M., Krewitt, W., Müller-Wenk, R., 1999. Best available practice regarding impact categories and category indicators in life cycle impact assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 4, 66. <https://doi.org/10.1007/BF02979403>
- Dia, M., Ramaroson, J., Nzihou, A., Zentar, R., Abriak, N.E., Depelsenaire, G., Germeau, A., 2014. Effect of Chemical and Thermal Treatment on the Geotechnical Properties of Dredged Sediment. *Procedia Eng., SYMPHOS 2013 - 2nd International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry* 83, 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.034>
- Djezzar, M., Ezziiane, K., Kadri, A., 1998. Evaluation pratique de la compatibilité ciment superplastifiant dans les BHP. Presented at the Colloque Maghrébin en Génie Civil, Biskra, pp. 263-272.
- Dondi, M., Iglesias, C., Dominguez, E., Guarini, G., Raimondo, M., 2008. The effect of kaolin properties on their behaviour in ceramic processing as illustrated by a range of

- kaolins from the Santa Cruz and Chubut Provinces, Patagonia (Argentina). *Appl. Clay Sci.* 40, 143–158. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.07.003>
- Draoui, A., Kazi Aoual – Bensla, F., Mekerta, B., Semcha, A., 2011. Caractérisation des sédiments marins du port d'Oran et contribution à la protection de l'environnement. Presented at the Séminaire Euro Méditerranéen sur l'Environnement et la Sécurité Industrielle, ENSET Oran Algérie.
- Dupain, R., Saint-Arroman, J.-C., 2009. Granulats, sols, ciments et bétons : caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, 4th ed. Casteilla. Paris, Paris.
- El Mahdi Safhi, A., Benzerzour, M., Rivard, P., Abriak, N.-E., Ennahal, I., 2018. Development of Self-Compacting Mortars Based on Treated Marine Sediments. *J. Build. Eng.* <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.12.024>
- Falciglia, P.P., Ingrao, C., De Guidi, G., Catalfo, A., Finocchiaro, G., Farina, M., Liali, M., Lorenzano, G., Valastro, G., Vagliasindi, F.G.A., 2018. Environmental Life Cycle Assessment of marine sediment decontamination by citric acid enhanced-microwave heating. *Sci. Total Environ.* 619/620, 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.085>
- Farmer, V.C., 1979. Infrared spectroscopy: Data handbook for clay materials and other non-metallic minerals, H. VAN Olphenh. ed, J.J. Fripiat. Oxford: Pergamon Press.
- Finnveden, G., Moberg, Å., 2005. Environmental systems analysis tools – an overview. *J. Clean. Prod.* 13, 1165–1173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.06.004>
- Galvez-Martos, J.-L., Schoenberger, H., 2014. An analysis of the use of life cycle assessment for waste co-incineration in cement kilns. *Resour. Conserv. Recycl.* 86, 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.02.009>
- GEMIS© 4.7, 2011. Life cycle assessment software package, Global Emission Model for Integrated Systems, Version 4.7. Öko-Institu.
- Géoportail [WWW Document], n.d. URL <http://anbt-dz.com/index.php/reglementation> (accessed 2.7.19).
- GICA, 2017. Production de ciment : Le GICA avoisine les 14 millions de tonnes en 2017 Nation [WWW Document]. URL http://www.lemaghreb.dz.com/?page=detail_actualite&rubrique=Nation&id=86842 (accessed 6.16.18).
- Google Earth, 2019.
- Guerraiche, S., Serradj, T., 2013. L'analyse Du Cycle De Vie Appliquée à un casier (Pehd) de plastique en Algérie. *Géographie Sci. Publ.*
- Guezuraga, B., Zauner, R., Pölz, W., 2012. Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines. *Renew. Energy* 37, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.008>
- Guinée, J., Gorée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H., Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M., 2002. Handbook on LCA, operational guide to the ISO standards.

- Guinee, J.B., 2002. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. *Int. J. Life Cycle Assess.* 7, 311. <https://doi.org/10.1007/BF02978897>
- Guo, M., 2013. *Life Cycle Assessment (LCA) of Light-Weight Eco-composites*. Springer Science & Business Media.
- Gursel, A.P., Maryman, H., Ostertag, C., 2016. A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of “green” concrete mixes with rice husk ash. *J. Clean. Prod.* 112, 823–836. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.029>
- Habert, G., 2013. Assessing the environmental impact of conventional and “green” cement production. <https://doi.org/10.1533/9780857097729.2.199>
- Habert, G., Choupay, N., Escadeillas, G., Guillaume, D., Montel, J.M., 2009. Clay content of argillites: Influence on cement based mortars. *Appl. Clay Sci.* 43, 322–330. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.09.009>
- Habert, G., d’Espinose de Lacaillerie, J.B., Roussel, N., 2011. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *J. Clean. Prod.* 19, 1229–1238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.012>
- Habert, G., Ouellet-Plamondon, C., 2016. Recent update on the environmental impact of geopolymers. *RILEM Tech. Lett.* 1, 17–23. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.6>
- Hadj Sadok, R., Belas, N., Tahlaiti, M., Belaribi, O., Taieb, F., Belguesmia, K., Safer, O., 2018. Proposal of industrialization process of dredged sediments. *MATEC Web Conf.* 149, 02050. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902050>
- Hadj Sadok, R., Tahlaiti, M., Belas, N., Mazouzi, R., 2019. Environmental life cycle assessment of industrialization process of calcined dredged sediments. *J. Mater. Eng. Struct.* « JMES » 6, 25–37.
- Hauschild, M., Potting, J., 2005. Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment - The EDIP2003 methodology, in: Danish Environmental Protection Agency. Copenhagen, Denmark.
- Hauschild, M.Z., Wenzel, H., 1998. Environmental assessment of products. *Int. J. Life Cycle Assess.* 3, 28–28. <https://doi.org/10.1007/BF02978447>
- Heijungs, R., Guinée, J., Huppes, G., Lankreijer, R., Udode Haes, H., Wegener Sleeswijk, A., 1992. *Environmental Life Cycle Assessment of products. Guide-October 1992* (No. NOH report 9266 Leiden). Centre of Environmental Science, Leiden.
- Hendrickson, C.T., Lave, L.B., Scott Matthews, H., 2006. *Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-Output Approach*, 1st Edition.
- Hou, D., Al-Tabbaa, A., Guthrie, P., Hellings, J., Gu, Q., 2014. Using a hybrid LCA method to evaluate the sustainability of sediment remediation at the London Olympic Park. *J. Clean. Prod.* 83, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.062>
- Hunt, Robert G., Franklin, W.E., Hunt, R. G., 1996. LCA — How it came about. *Int. J. Life Cycle Assess.* 1, 4–7. <https://doi.org/10.1007/BF02978624>

- Hutagalung, S.D., Sahrol, N.H., Ahmad, Z.A., Ain, M.F., Othman, M., 2012. Effect of MnO₂ additive on the dielectric and electromagnetic interference shielding properties of sintered cement-based ceramics. *Ceram. Int.* 38, 671–678. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.07.055>
- Ibn-Mohammed, T., Greenough, R., Taylor, S., Ozawa-Meida, L., Acquaye, A., 2013. Operational vs. embodied emissions in buildings—A review of current trends. *Energy Build.* 66, 232–245. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.026>
- Janotka, I., Puertas, F., Palacios, M., Kuliffayová, M., Varga, C., 2010. Metakaolin sand-blended-cement pastes: Rheology, hydration process and mechanical properties. *Constr. Build. Mater.* 24, 791–802. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.028>
- Jiang, S., Van Damme, H., 1996. Influence des fillers de nature différente sur l'hydratation et la texture des pâtes de C3S (Rapport de CRMD-ATILH). Université d'Orléans.
- Jiang, T., Li, G., Qiu, G., Fan, X., Huang, Z., 2008. Thermal activation and alkali dissolution of silicon from illite. *Appl. Clay Sci.* 40, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.08.002>
- Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P., 2010. Analyse du cycle de vie: Comprendre et réaliser un écobilan. PPUR Presses polytechniques.
- Joussein, E., Petit, S., Decarreau, A., 2001. Une nouvelle méthode de dosage des minéraux argileux en mélange par spectroscopie IR. *Comptes Rendus L39Académie Sci. - Ser. IIA - Earth Planet. Sci.* 332, 83–89.
- Justice, J.M., 2005. Evaluation of Metakaolins for Use as Supplementary Cementitious Materials (Thèse). Georgia Institute of Technology.
- Kazi Aoual-Benslafa, F., Ameer, M., Mekerta, B., Semcha, A., 2014. Caractérisation des sédiments de dragage du barrage de Bouhanifia pour une réutilisation, in: XIIIèmes JNGCGC, Dunkerque. Presented at the Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Editions Paralia, pp. 999–1006. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2014.110>
- Kazi Aoual-Benslafa, F., Kerdal, D., Ameer, M., Mekerta, B., Semcha, A., 2015. Durability of Mortars Made with Dredged Sediments. *Procedia Eng., Defining the future of sustainability and resilience in design, engineering and construction* 118, 240–250. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.423>
- Khatib, J.M., Wild, S., 1996. Pore size distribution of metakaolin paste. *Cem. Concr. Res.* 26, 1545–1553. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00147-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00147-0)
- Klöpffer, W., Grahl, B., 2014. Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- LAFARGE, 2018. URL <https://www.lafarge.dz/> (accessed 6.16.18).
- Laoufi, L., Senhadji, Y., Benazzouk, A., 2016. Valorization of mud from Fergoug dam in manufacturing mortars. *Case Stud. Constr. Mater.* 5, 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.06.002>
- Laratte, B., 2013. Evaluation dynamique et cumulative des impacts environnementaux dans le cadre d'une analyse de cycle de vie (thèse). Troyes.

- LCPC, 2010. Evaluation environnementale d'un procédé de fabrication de Métakaolin (calcination flash) (convention Argéco-LCPC No. 13L09291). Laboratoire central des ponts et chaussées LCPC, Nnates, France.
- Leontief, W., 1986. Input-output economics. Oxford University Press.
- Lucas, G., Cros, P., Lang, J., 1976. Les Roches sédimentaires, étude microscopique des roches meubles et consolidées.2, 2, édition DOIN, 1976, P 38, Paris.
- Maes E., L'eau et l'environnement aquatique, Chapitre 10, [en ligne]. Disponible sur :<<http://environnement.wallonie.be>>.
- Makhlouf, A., 2015. Analyse entrée-sortie des déchets : analyse de cycle de vie des fertilisants produits en Algérie (thèse). Université Badji Mokhtar Annaba, Annaba.
- Makhlouf, A., Serradj, T., Cheniti, H., 2015. Life cycle impact assessment of ammonia production in Algeria: A comparison with previous studies. Environ. Impact Assess. Rev. 50, 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.08.003>
- Manap, N., Voulvoulis, N., 2015. Environmental management for dredging sediments – The requirement of developing nations. J. Environ. Manage. 147, 338–348. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.09.024>
- Matthew J, T., Jennifer L, K., Denise R, P., 2011. Life-cycle assessment as a sustainability management tool: Strengths, weaknesses, and other considerations. Wiley Online Libr. 20. <https://doi.org/10.1002/tqem.20285>
- Mostefa, F., Bouhamou, N.E., Mesbah, H.A., Aggoun, S., Mekhatria, D., 2018. Sedimentary Clays as Geopolymer Precursor [WWW Document]. Int. J. Eng. Res. Afr. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.39.97>
- Ness, B., Urbel-Piirsalu, E., Anderberg, S., Olsson, L., 2007. Categorising tools for sustainability assessment. Ecol. Econ. 60, 498–508. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.07.023>
- NLK, 2002. Ecosmart concrete project: metakaolin pre-feasibility study. NLK Consultants Inc, Vancouver, Canada.
- Osman, A., Ries, R., 2007. Life cycle assessment of electrical and thermal energy systems for commercial buildings. Int. J. Life Cycle Assess. 12, 308–316. <https://doi.org/10.1065/lca2007.02.310>
- Perlot, C., Rougeau, P., 2007. Intérêt des métakaolins dans les bétons, Les éditions du CERIB. ed. cerib, France.
- Picchio, D.R., Sirna, D.A., 2012. Impianti di medio piccola scala per la conversione termotecnica delle biomasse agro forestali, impiego della metodologia LCA 222.
- Puri, P., Compston, P., Pantano, V., 2009. Life cycle assessment of Australian automotive door skins. Int. J. Life Cycle Assess. 14, 420–428. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0103-7>
- Ramachandran, V.S., 1996. Concrete Admixtures Handbook, 2nd Ed.: Properties, Science and Technology. William Andrew.

- Ramasamy, V., Murgesan, S., Mullainathan, S., 2005. Distribution and characterization of minerals in Cauvery river sediments by grain size analysis: a new approach by FT-IR study. *Ind. Mineral* 39.
- Remini, B., 1996. L'envasement des barrages.
- Remini, B., Leduc, C., Hallouche, W., 2009. Évolution des grands barrages en régions arides : quelques exemples algériens. *Sécheresse* 20, 96–105. <https://doi.org/10.1684/sec.2009.0172>
- Robayo-Salazar, R., Mejía-Arcila, J., Mejía de Gutiérrez, R., Martínez, E., 2018. Life cycle assessment (LCA) of an alkali-activated binary concrete based on natural volcanic pozzolan: A comparative analysis to OPC concrete. *Constr. Build. Mater.* 176, 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.017>
- Rogers, K., Seager, T., Linkov, I., 2008. Multicriteria Decision Analysis and Life Cycle Assessment, in: Linkov, Igor, Ferguson, E., Magar, V.S. (Eds.), *Real-Time and Deliberative Decision Making*. Springer Netherlands, pp. 305–314.
- Safer, O., 2017. Optimisation de la formulation d'un éco-béton à base de sédiments de dragage et étude de sa résistance aux attaques chimiques (thèse). Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Mostaganem.
- Safer, O., Belas, N., Belaribi, O., Belguesmia, K., Bouhamou, N.-E., Mebrouki, A., 2018. Valorization of Dredged Sediments as a Component of Vibrated Concrete: Durability of These Concretes Against Sulfuric Acid Attack. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 12, 44. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0270-7>
- Safhi, A. el M., Benzerzour, M., Rivard, P., Abriak, N.-E., Ennahal, I., 2019. Development of self-compacting mortars based on treated marine sediments. *J. Build. Eng.* 22, 252–261. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.12.024>
- Sánchez Berriel, S., Favier, A., Rosa Domínguez, E., Sánchez Machado, I.R., Heierli, U., Scrivener, K., Martirena Hernández, F., Habert, G., 2016. Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba. *J. Clean. Prod.* 124, 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.125>
- Sanders, J.P., Gallagher, P.K., 2005. Kinetic analyses using simultaneous TG/DSC measurements. *J. Therm. Anal. Calorim.* 82, 659–664. <https://doi.org/10.1007/s10973-005-0946-5>
- Schneider, H., 2006. Mullite Fibers, in: *Mullite*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 377–396. <https://doi.org/10.1002/3527607358.ch6>
- Scordia, P.-Y., 2008. Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers 203. Pierre-Yves SCORDIA., « Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers », Thèse présentée pour l'obtention du grade de docteur, l'école centrale de LILLE, Spécialité : Génie Civil, 2008. P 7-23.
- Semcha, A., 2006. Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug. (thèse). Université de Reims Champagne-Ardenne.

- Serradj, T., Makhlouf, A., Ahmed, M.S.A., 2016. Application of life cycle assessment to the case studies of new nitrogen fertiliser production. *Int. J. Glob. Warm.* 10, 216–229. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2016.077914>
- Serres, N., Braymand, S., Feugeas, F., 2014. Evaluation environnementale de bétons de granulats recyclés de béton et de béton de granulats recyclés de terre cuite à partir d'analyses de cycle de vie, in: *Conférence Matériaux 2014 - Colloque Ecomatériau*. Montpellier, France.
- SETAC, 1994. Guidelines for Life-Cycle Assessment: *Environ. Sci. Pollut. Res.* 1, 55–55. <https://doi.org/10.1007/BF02986927>
- Shneider G., « Le curage des sédiments des cours d'eau ». *Le courrier de l'environnement de l'INRA*, vol. 43, pp. 146-147, 2001.
- Siline, M., Ghorbel, E., Bibi, M., 2013. Valorisation d'une argile gréseuse comme ajout pour la fabrication d'un ciment à faible impact environnemental 10.
- SimaPro Logiciel d'ACV [WWW Document], 2019. . Evea. URL <https://network.simapro.com/evea/#usp> (accessed 3.9.19).
- Société des ciments de Zahana, 2017. Description voie sèche. Zahana.
- Soro, N.S., 2003. Influence des ions fer sur les transformations thermiques de la kaolinite (thesis). Limoges.N.S. SORO., « Influence des ions fer sur les transformations thermiques de la kaolinite », Thèse pour l'obtention d'un grade de docteur, spécialité sciences des matériaux céramiques et traitements de surfaces, université de Limoges, 2003, P 16-19, 34.
- Sparrevik, M., Saloranta, T., Cornelissen, G., Eek, E., Fet, A.M., Breedveld, G.D., Linkov, I., 2011. Use of Life Cycle Assessments To Evaluate the Environmental Footprint of Contaminated Sediment Remediation. *Environ. Sci. Technol.* 45, 4235–4241. <https://doi.org/10.1021/es103925u>
- Sperinck, S., Raiteri, P., Marks, N., Wright, K., 2011. Dehydroxylation of kaolinite to metakaolin—a molecular dynamics study. *J. Mater. Chem.* 21, 2118–2125. <https://doi.org/10.1039/C0JM01748E>
- Sui, T., Bin, W., Yuliang, C., Shengliang, T., 2018. Progress of limestone calcined clay cement in china, in: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Presented at the Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete, RILEM Bookseries, Cuba, pp. 461–467. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_74
- Svoboda, S., 1995. Note on life cycle analysis. Technical report, University of Michigan, Corporate Environmental Management Program (CEMP).
- Tahlaiti, M., Bonnet, S., Mounanga, P., 2014. Hydration rate and compressive strength of metakaolin-cement blended mortars cured at different temperatures. Presented at the 1ères Rencontres Nationales de Génie Civil, Bejaia.
- Taieb, F., Belas N., Belaribi, O., Belguesmia, K., Hadj Sadok, R., 2018. Influence of calcined mud on the mechanical properties and shrinkage of self-compacting concrete. *MATEC Web Conf.* 149, 01026. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814901026>

- Teklay, A., Yin, C., Rosendahl, L., K hler, L.L., 2015. Experimental and modeling study of flash calcination of kaolinite rich clay particles in a gas suspension calciner. *Appl. Clay Sci.* 103, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.11.003>
- Toffoletto, L., Deschênes, L., Samson, R., 2005. LCA of Ex-Situ Bioremediation of Diesel-Contaminated Soil (11 pp). *Int. J. Life Cycle Assess.* 10, 406–416. <https://doi.org/10.1065/lca2004.09.180.12>
- Truche, C., 2010. Caractérisation et quantification des minéraux argileux dans les sols expansifs par spectroscopie infrarouge aux échelles du laboratoire et du terrain (phd). Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- Van den Heede, P., De Belie, N., 2012. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and ‘green’ concretes: Literature review and theoretical calculations. *Cem. Concr. Compos.* 34, 431–442. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004>
- Vlach, J., 2008. Posuzov n   ivotn ho cyklu komun ln ho odpadu. Life cycle assessment of municipal waste.
- Wild, S., Khatib, J.M., Jones, A., 1996. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. *Cem. Concr. Res.* 26, 1537–1544. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00148-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00148-2)
- Wolff, R., 1963. Structural aspects of kaolinite using infrared absorption. *The American Mineralogist* 48.
- Zhao, Z., Benzerzour, M., Abriak, N.E., Damidot, D., 2015. Valorisation des sédiments marins dragués en substitution partielle du ciment dans la fabrication de mortiers et de bétons. Presented at the Conférence Internationale Francophone NoMaD 2015 Mines Douai, Douai, France.
- Zunino, F., Scrivener, K., 2018. Reactivity and performance of limestone calcined-clay cement (LC3) cured at low temperature. Presented at the Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete, RILEM book series, Cuba, pp. 514–520. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9>