

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 Août 1955 -SKIKDA
Faculté de technologie
Département de génie civil
Référence : D012121027D



جامعة 20 أوت 1955
كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية
المرجع : D012121027D

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de
Doctorat
En génie civil

Option : Géotechnique et environnement

**Ouvrages réalisés sur un sol renforcé par des mélanges co-valorisés:
Application à la valorisation des sédiments en génie civil.**

Présentée par :

BELLARA Selma

Sous la direction du : Pr. HIDJEB Mustapha

Thèse soutenue publiquement le : 19/05/2022

Devant le jury composé de :

Président	MESSAST Salah	Professeur	Université de Skikda
Directeur de thèse	HIDJEB Mustapha	Professeur	Université de Skikda
Co-directeur de thèse	MEZAZIGH Salim	M.C.A	Université de Caen, France
Examineur	BELACHIA Mouloud	Professeur	Université de Guelma
Examineur	AMRANE Moussa	M.C.A	Université de Batna 2
Invité	MAHERZI Walid	M.C.A	IMT Nord Europe, France

A mon père,

A ma mère,

A mes frères (les trois F : vive la Force) et leur petite famille

Vous êtes la source de ma force et mon courage...

الملخص

أصبح دمج النفايات كمواد خام ثانوية موضوعًا يجذب اهتمام العديد من العلماء ومسؤولي المجالات الصناعية، وقد إستدعى إستبدال الأسمنت بهذه الإضافات المعدنية إلى ظهور العديد من الدراسات في السنوات الأخيرة. في الواقع، هذا يمثل حلاً واعدًا لمستقبل إيكولوجي. مع ذلك، تظل الكميات المتاحة من هذه المواد محدودة على ضوء الطلب المتزايد للسوق.

يعد هذا العمل جزءًا من نهج الاقتصاد الدائري والتنمية المستدامة، ويهدف إلى تحسين قطاعات إعادة إستعمال (رسكلة) المواد الناعمة (الرواسب المجروفة من خزانات السدود وبقايا الرخام) في قطاعات البناء. هذا يؤدي إلى التقليل من إنبعاثات غازات الاحتباس الحراري والحفاظ على الموارد الطبيعية.

لهذا الغرض تمت مناقشة جانبين في هذا العمل، يتعلق الجانب الأول: بتطوير مواد لاصقة هيدروليكية تحتوي على رواسب السدود المجروفة والمنتجات الخاصة بالأنشطة الصناعية المحلية. اما الثاني: يتعلق بمعالجة الرواسب المجروفة باستخدام مواد رابطة هيدروليكية، مع تحسين او دون تحسين، للهيكل الحبيبي من أجل إستعمالها في إنشاء الطرقات.

في هذا الصدد، تم أولاً: إجراء الاختبارات الفيزيو-كيميائية والميكانيكية، لضمان إمتثالها للمتطلبات المنصوص عليها في المعيار EN 13282-2. ثانيًا: تمت معالجة الرواسب المجروفة المحسنة او غير المحسنة بنفايات الرخام بنسب مختلفة من المواد الرابطة الهيدروليكية التي تم وضعها في المرحلة الأولى من الدراسة. مختلف المخاليط تمت دراستها من حيث أدائها الميكانيكي قصير وطويل المدى، كما تم تقييم البنية المجهرية والجانب البيئي من خلال إخضاعها للمجهر الإلكتروني الماسح، وكذلك إختبارات الترشيح وفقا لجداول زمنية مختلفة.

الكلمات المفتاحية: رواسب السدود، مواد الربط الهيدروليكية، مخلفات الرخام، المواد البديلة للإسمنت.

Résumé

L'intégration des déchets comme matières premières secondaires fait désormais l'objet de réflexion de plusieurs scientifiques et industriels. La substitution du ciment par des additions minérales a suscité plusieurs études ces dernières années. En effet, elle représente une solution prometteuse pour un avenir plus écologique. Cependant, les quantités disponibles de ces matériaux restent limitées au regard de la demande croissante du marché.

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre d'une démarche d'économie circulaire et de développement durable, elle vise à optimiser les filières de valorisation des matériaux fins (sédiments de dragage et de déchets de marbre) dans les secteurs de la construction. Ceci permettra à terme de réduire les émissions des gaz à effet de serre et la préservation des ressources naturelles.

Deux volets ont été abordés : le premier volet concernait l'élaboration d'éco-liants ternaires à base de sédiments de dragage et de sous-produits industriels locaux et le deuxième concernait le traitement des sédiments de dragage aux liants hydrauliques optimisés, pour une éventuelle valorisation en couche de forme. Dans un premier temps, deux liants hydrauliques routiers à durcissement normal ont été optimisés par la méthode des surfaces de réponse (MSR). Le premier, référencé 50C35LHF15SC, était composé de 50% de ciment (C), 35% de laitier (LHF) et de 15% de sédiments calcinés (SC) et le deuxième LHR 80C10LHF10SC. Des essais physico-chimiques et mécaniques ont été conduits à cet égard pour s'assurer de leur conformité aux exigences prescrites par la norme EN 13282-2. Dans un deuxième temps, plusieurs mélanges de sédiments de dragage et de déchets de marbres ont été traités avec différents pourcentages des liants ternaires optimisés dans la première phase de l'étude. Les différents mélanges ont été caractérisés vis-à-vis de leurs performances mécaniques à court et à long terme, la microstructure et l'aspect environnemental ont été également appréciés à travers des observations au microscope électronique à balayage, ainsi que des essais de lixiviation à différentes échéances.

Mots clés : Sédiments de barrage, liants hydrauliques routiers, déchets de marbre, techniques routières, matériaux de substitution au ciment.

Abstract

The integration of waste as secondary raw materials has become the focus of reflection by several scientists and industrialists. Indeed, the substitution of cement by mineral additions was investigated in recent years. This issue represents a promising solution for a greener future. However, the availability of these materials remains limited compared to market demand.

The approach adopted in the present study concerns a circular economy and sustainable development approach which aims to optimize the reuse of fine materials (dredged sediments and marble waste) in construction fields. This will potentially lead to a reduction in greenhouse gas footprint and the preservation of natural resources.

This study was conducted in two main parts: The first part of this study focused on the development of eco-friendly ternary binders based on dredged sediments and local industrial by-products; while the second part focused on the treatment of dredged sediments with optimized hydraulic binders for possible application in subgrade layer materials. Initially, a response Surface Methodology was used to optimize two normal hardening hydraulic road binders (RSM). The initial mix, designated 50C35GGBS15CS, was made up of 50% cement, 35% blast furnace slag, and 15% calcined sediment. The second mix was named 80C10GGBS10CS, and it's composed of 80% cement, 10% blast furnace slag, and 10% calcined sediments.

Physico-chemical and mechanical tests have been carried out to ensure that they meet the requirements of EN 13282-2 standard. In a second phase, several mixtures of dredged sediments and marble wastes were treated with different percentages of optimized ternary binders. The various mixtures have been characterized by their short- and long-term mechanical performance. The microstructure and the environmental aspect have also been appreciated through scanning electron microscope observations, as well as leaching tests at different maturity terms.

Keywords: Dam sediments, hydraulic road binders, marble wastes, road construction, eco-friendly cement, low carbon binders.

Remerciement

Cette thèse est le fruit d'un travail collectif, ce travail a été réalisé entre le laboratoire LMGHU de l'Université 20 Aout 55, Skikda, le laboratoire M2C de l'Université de Caen Normandie, France et le laboratoire de l'IMT Nord Europe, France.

Je tiens tout d'abord à adresser mes sincères remerciements pour l'ensemble des membres du jury d'avoir bien voulu me faire le grand honneur d'accepter de juger le présent travail de thèse. Le Professeur Salah MESSAST de l'Université de Skikda, Président du jury, Le professeur BELACHIA Mouloud, de l'Université de Skikda, examinateur ainsi que M. AMRANE Moussa, maître de conférences A au niveau de l'Université de Batna 2, examinateur.

Je remercie chaleureusement mon directeur de thèse le Professeur Mustapha HIDJEB de m'avoir accordé cette opportunité qui m'a ouvert les yeux et l'esprit à cet unique univers de la recherche. Merci également, de m'avoir fait confiance, de m'avoir appris à être autonome, pour votre disponibilité et vos précieux conseils.

Mes plus vifs remerciements vont à mon co-directeur de thèse M. Salim MEZAZIGH, maître de conférences HDR de l'université de Caen Normandie, France, pour m'avoir accueilli et encadré durant mon séjour scientifique au sein du laboratoire M2C. Merci de m'avoir toujours soutenu, de m'avoir aidé à traverser les moments les plus difficiles et de m'avoir encouragé à prendre les bonnes décisions.

Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance à M. Walid MAHERZI, enseignant chercheur et mon encadrant au niveau de l'IMT Nord Europe, Université de Lille pour tous les efforts consentis à mon égard. Merci de m'avoir orienté et guidé, d'avoir cru en moi, même dans mes moments de doute, merci d'avoir renforcé ma motivation par vos encouragements et votre soutien permanent. Mon respect et ma gratitude pour vous dépassent les mots. **Merci pour tout.**

Un remerciement particulier s'adresse au Professeur émérite Pr. Daniel LEVACHER qui est à l'origine de mon accueil au laboratoire M2C, Caen.

Je voudrais aussi remercier tous ceux qui ont, à leur façon, contribué à l'aboutissement de ce travail. Je tiens à remercier M. Laurent DEZILEAU, Directeur du laboratoire M2C, Caen, M. Dominique MOUAZE, Directeur-adjoint du laboratoire M2C, Caen, sans oublier M^{me} Magalie LEGRAIN, assistante ingénieure CNRS au sein du laboratoire M2C. Mes

remerciements s'adressent également à M. Didier LUSUEUR, directeur du CERI Matériaux & Procédés de l'IMT-Nord-Europe ainsi que toute l'équipe technique, un par un, pour leur collaboration, accompagnement et tous les moyens mis à ma disposition durant mon séjour scientifique.

Un grand merci à tous les membres de ma famille, tous mes cousins et cousines, Adel et Mekki qui ont été toujours derrière moi, mes collègues et mes amis qui m'ont soutenu tout au long de cette période de thèse.

Enfin, Nawel et Soumaya, vous êtes bien plus que de simples amies, vous êtes mes sœurs de cœur...

Sommaire

الملخص	V
Résumé.....	VI
Abstract	VII
Remerciement	XIII
Liste des figures	XIX
Liste des tableaux	XXIV
Introduction générale	XXVII
Introduction générale.....	XXVIII
Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.....	1
1. Les sédiments de dragage	3
1.1 Origine des sédiments	3
1.2 Composition des sédiments	4
1.3 Effets de la matière organique sur le comportement des sédiments.....	7
1.4 Problématique d’envasement des barrages Algériens	8
1.5 Impact des sédiments de dragage vis-à-vis de l’environnement	11
1.6 Cadre réglementaire et juridique relative à la gestion des sédiments de dragage	12
2. Les laitiers de hauts-fourneaux (LHF).....	40
2.1 Valorisation des laitiers de hauts-fourneaux dans les liants hydrauliques	43
3. Les déchets de marbre	43
4. Acceptabilité environnementale pour l’application des sédiments, des laitiers de hauts-fourneaux et des déchets de marbre en techniques routières [149]	45
5. Bilan de l’état de l’art	48
Chapitre 2. Caractérisation des sédiments de Barrage de Zardezas : physicochimique, minéralogique et mécanique	50
Introduction	52

1. Origine des sédiments et présentation du site de prélèvement.....	53
2. Caractérisation physique et chimique des sédiments.....	54
2.1 La teneur en eau naturelle (W_{nat}).....	55
2.2 Distribution granulométrique	55
2.3 Masse volumique des particules solides (ρ_s),	60
2.4 Mesure de la surface spécifique BET.....	62
2.5 Teneur en matière organique et perte au feu	63
2.6 Détermination de l'argilosité.....	65
2.7 Classification selon le guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme [30]	72
2.8 Teneur en $CaCO_3$	74
2.9 Mesure de la valeur du pH	75
3. Caractérisation mécanique.....	76
3.1 Essai Proctor et portance des sédiments de Zardezas.....	76
4. Caractérisation chimique et environnementale.....	80
4.1 Analyse chimique par fluorescence X (FX).....	80
4.2 Essai de lixiviation	81
5. Caractérisation minéralogique par diffraction aux rayons X (DRX)	83
6. Microscopie optique (MO) et électronique à balayage (MEB)	84
7. Conclusion.....	86
Chapitre 3. Optimisation de liants hydrauliques routiers à base des sédiments de barrage et de laitier de hauts-fourneaux [82]	88
Introduction	90
1. Matériaux et méthodes.....	91
1.2 Laitier de hauts-fourneaux (LHF)	92
1.3 Sable	93
1.4 Sédiments de barrage	93

1.5	Optimisation du traitement thermique pour l'activation des sédiments.....	93
1.6	Composition chimique et minéralogique des sédiments bruts et des différentes additions	96
1.7	Optimisation des formulations utilisant la méthodologie des plans d'expérience (Plan de mélange).....	98
1.8	Protocole expérimental.....	99
2.	Résultats et discussion.....	106
2.1	Validation du modèle de prédiction	106
2.2	Consistance normalisée - Demande en eau	107
2.3	Consistance du mortier frais.....	108
2.4	Temps de début et de fin de prise des liants.....	109
2.5	Finesse et teneur en SO ₃	110
2.6	Mesure de l'expansion (essai Le Chatelier)	111
2.7	Performances mécaniques (Rc et Rf).....	112
2.8	Porosimétrie par intrusion de mercure	114
2.9	Quantification de la portlandite.....	116
2.10	Microscopie électronique à balayage (MEB).....	118
2.11	Essai de lixiviation sur les différentes formulations	120
3.	Conclusion.....	121
	Chapitre.4. Co-valorisation des sédiments de Zardezas et déchets de carrière de marbre en couche de forme.....	123
	Introduction	125
	1. Méthodologie d'optimisation du squelette granulaire des sédiments de barrage et traitement aux liants	126
1.1	Description du choix et du dosage des produits de traitement	126
	2. Détermination des caractéristiques de densification et de portance des formulations optimisées	132

3. Evaluation de l'aptitude des sédiments de Zardezas au traitement	135
3.1 Essai de gonflement volumique et essai de traction indirecte après 7 jours d'immersion	135
4. Evaluation du comportement mécanique des sédiments de Zardezas	144
4.1 À court terme.....	144
4.2 À long terme.....	153
5. Evaluation environnementale.....	155
6. Conclusion.....	156
Conclusions générales et perspectives	158
Références.....	164
Fiche technique de la chaux utilisée.....	Erreur ! Signet non défini.
Les différentes normes adoptées..	187

Liste des figures

Figure 1. Organigramme de la démarche d'étude adoptée.	XXXII
Figure 1- 1. Origine des sédiments.....	3
Figure 1- 2. Les différentes phases constituant un sédiment [37].	4
Figure 1- 3. Schématisation des différentes formes d'eau dans le sol [39,41].	5
Figure 1- 4. Critères d'évaluation du caractère inerte et de dangerosité des sédiments de dragage pour une gestion à terre [80].....	22
Figure 1- 5. Exemple sur la valorisation des sédiments du barrage d'Oued Lekhel: (a) dans le domaine de la poterie, (b) pour la réalisation des briques [87].....	23
Figure 1- 6. Sédiments calcinés et finement broyés (a) à 800C°[96], (b) à 750C° [98].	25
Figure 1- 7. (a). Briques cuites à base de sédiments du port de Bethioua [104], (b) BTC, (c) briques cuites à base de sédiments du barrage de Bouhanifia [75].	26
Figure 1- 8. (a) Granulats légers à base de sédiments, (b) mortier formulé avec l'ajout des granulats légers (coupe transversale) [108].....	27
Figure 1- 9. (a) Consommation des granulats en France pour l'année 2018 [114], (b) quantités d'agrégats produits par 10 wilayas en Algérie pour l'année 2009 [115].	28
Figure 1- 10. (a) Structure d'une chaussée routière, (b) comportement de chaussée sous sollicitations [30,116].....	29
Figure 1- 11. Classification des matériaux en fonction des paramètres de nature selon le GTR et la norme NF P 11-300 [30,117].....	31
Figure 1- 12. Organigramme de la démarche d'utilisation d'un matériau traité en couche de forme [118].....	32
Figure 1- 13. Modifications instantanées apportées par l'ajout de la chaux vive sur le comportement plastique d'un sol fin humide [31].	34
Figure 1- 14. Action de l'apport de la chaux vive sur les caractéristiques optimales de compactage d'un sol [31].	34
Figure 1- 15. Principe de développement d'une réaction pouzzolanique dans un sol/sédiments [44].	35
Figure 1- 16. Mécanismes d'hydratation du ciment (microstructure d'un mortier) [122].	36
Figure 1- 17. (a) Production du laitier de hauts-fourneaux au cours de la production de l'acier[132], (b) Laitier cristallisé, (c) laitier vitrifié[133]	41
Figure 1- 18. Classification des LHF en diagramme de Keil [135].	42
Figure 1- 19. Étapes de déroulement d'une réaction pouzzolanique [44].	42

Figure 1- 20. Domaine de recyclage destiné à l'usage des déchets de marbre dans des travaux génie civil sur la base (a) des travaux déjà publié (b) recherches récentes (en cours d'évaluation) [144].	44
Figure 1- 21. Démarche d'évaluation environnementale [150,151] .	47
Figure 2- 1. Mode de prélèvement des sédiments en amont du barrage de Zardezas.	54
Figure 2- 2. Lieu de prélèvement des sédiments.	54
Figure 2- 3. Étapes de préparation des échantillons pour l'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie.	56
Figure 2- 4. Granulomètre laser utiliser.	57
Figure 2- 5. Distribution granulométrique des sédiments de Zardezas.	58
Figure 2- 6. Diagramme triangulaire textural.	60
Figure 2- 7. Pycnomètre à hélium pour la mesure de la masse volumique absolue.	61
Figure 2- 8. Principe de la mesure.	61
Figure 2- 9. Détermination de la perte au feu des sédiments.	64
Figure 2- 10. Dispositif de mesure de la valeur au bleu (VBS).	66
Figure 2- 11. Classification des sédiments de Zardezas en fonction de leur valeur au bleu (VBS).	68
Figure 2- 12. Schéma représentant les trois états de consistance d'un sol.	69
Figure 2- 13. Etapes de préparation de la pâte pour la mesure des limites d'Atterberg.	70
Figure 2- 14. Disposition des sédiments de Zardezas par rapport aux différents sédiments des barrages Algériens dans l'abaque de CASAGRANDE.	72
Figure 2- 15. Disposition des sédiments de Zardezas sur le tableau synoptique de classification selon le GTR.	73
Figure 2- 16. Mesure du CaCO ₃ au calcimètre de Bernard.	74
Figure 2- 17. Mesure de la valeur du pH au pH-mètre.	75
Figure 2- 18. Essai de compactage à énergie équivalente à l'énergie Proctor normal.	77
Figure 2- 19. Protocole de conservation et de réalisation de l'essai de poinçonnement sur les sédiments de Zardezas.	78
Figure 2- 20. Courbes Proctor des sédiments de Zardezas.	79
Figure 2- 21. Composition chimique des sédiments de Zardezas.	81
Figure 2- 22. Protocole de préparation des échantillons pour la détermination de la teneur en contaminants.	82
Figure 2- 23. Spectres de diffraction des sédiments de Zardezas.	84

Figure 2- 24. Etapes de préparation des échantillons pour des observations au MEB (BES et SE).....	85
Figure 2- 25. Observation MEB, mode BSE (a) structure en feuillet des argiles (b) Fromboïde de Pyrite.....	86
Figure 2- 26. Clichés au MEB en électrons secondaires (SE), sur les sédiments bruts de Zardezas.	86
Figure 3- 1. Courbe granulométrique des différents constituants.	91
Figure 3- 2. Laitier de hauts-fourneaux provenant d'El Hadjar (a) granulé et (b) finement broyé.....	92
Figure 3- 3. Perte de masse des sédiments en fonction du temps et de la température.....	94
Figure 3- 4. Détermination de la durée optimale de calcination.	95
Figure 3- 5. Aspect visuel des (a) sédiments bruts séchés et concassés, (b) sédiments calcinés, (c) sédiments calcinés broyés.....	96
Figure 3- 6. Spectres de diffraction des sédiments et du LHF.	97
Figure 3- 7. (a) domaine expérimental, (b) distribution des formulations à tester dans le domaine expérimental.	99
Figure 3- 8. Etapes de préparation des mortiers pour écrasement.....	100
Figure 3- 9. Détermination de la consistance normalisée de la pâte de ciment.....	101
Figure 3- 10. Mesure de l'étalement à la table à choc des mortiers.....	101
Figure 3- 11. Détermination du temps de prise pour la pâte de ciment.....	102
Figure 3- 12. Mesure d'expansion des différentes pâtes de ciment.	103
Figure 3- 13. Porosimètre à mercure.	104
Figure 3- 14. (a) morphologie des sédiments calcinés ; (b) morphologie des particules de LHF.	105
Figure 3- 15. Surfaces de réponse (a) en 2D et (b) en 3D.....	107
Figure 3- 16. Evolution de l'étalement en fonction du temps des mortiers étudiés.....	109
Figure 3- 17. (a) Détermination du temps de prise ; (b) temps du début et de fin de prise pour les pâtes de ciment.....	110
Figure 3- 18. Valeurs d'expansion pour les différentes formulations.....	112
Figure 3- 19. (a) résistance à la compression et (b) résistance à la flexion à 7, 28, 56, et 90 jours de cure.	114
Figure 3- 20. Structure du réseau poreux à 28, 56 et 90 jours.....	115
Figure 3- 21. Distribution de la porosité.	116
Figure 3- 22. Analyse thermogravimétrique à 7 jours.....	117

Figure 3- 23. Analyse thermogravimétrique à 56 jours.....	118
Figure 3- 24. Observations MEB (BSE) à 56 Jours sur (a) le mortier de référence et (b) la formulation 50C35LHF15SC.....	119
Figure 3- 25. Observations MEB (SE) à 56 jours sur (a) le mortier de référence et (b) la formulation 50C35LHF15SC.....	119
Figure 3- 26. (a) Observation MEB et (b) observation MO sur la formulation 80C10LHF10SC à 56 jours.....	120
Figure 4- 1. Clichés obtenus par MEB sur le sable de marbre (a) mode BSE, (b) mode SE.	127
Figure 4- 2. Distribution granulométrique des différents mélanges composés de sédiments et du sable de marbre.....	127
Figure 4- 3. Tableau synoptique de classification selon le GTR [30] et la NF P 11-300 [117].	128
Figure 4- 4. Distribution granulométrique de la chaux et des liants hydrauliques routiers. .	129
Figure 4- 5. Préparation des sédiments à différents dosages en chaux pour la détermination du point de fixation de la chaux.	130
Figure 4- 6. Évolution du pH en fonction du taux de chaux incorporée.	131
Figure 4- 7. Protocole de malaxage des mélanges traités aux liants hydrauliques.....	133
Figure 4- 8. Étapes de préparation des échantillons et compactage à énergie Proctor normal des éprouvettes destinées à l'essai IPI.....	133
Figure 4- 9. Courbes Proctor normal pour les différentes formulations.	134
Figure 4- 10. Mesure de la hauteur moyenne et du diamètre moyen de l'éprouvette pour le calcul de V_0	137
Figure 4- 11. Etapes de confection, de cure et de mise en immersion des éprouvettes.	137
Figure 4- 12. Gonflement volumique mesuré après 7 jours d'immersion.....	140
Figure 4- 13. Mesure de la résistance à la traction diamétrale après 7 jours d'immersion. ..	140
Figure 4- 14. Observation au MEB en électrons secondaires (SE) de la formulation S7-1..	142
Figure 4- 15. Observation au MEB en électrons secondaires (SE) de la formulation SS7-1.	142
Figure 4- 16. Observation au MEB en électrons secondaires (SE) de la formulation S10-1.	143
Figure 4- 17. Observation au MEB en électrons secondaires (SE) de la formulation SS10-1.	143
Figure 4- 18. Confection, conservation et écrasement des éprouvettes destinées à l'essai de compression simple.....	145
Figure 4- 19. Évolution de la résistance à la compression simple dans le temps en fonction des différents types de traitements appliqués.....	147

Figure 4- 20. Mode de conservation et écrasement des éprouvettes destinées à l’essai de résistance à l’immersion.....	148
Figure 4- 21. Résistance à l’immersion au jeune âge de l’ensemble des formulations.....	149
Figure 4- 22. Modalités de préparation, de conservation et de d’écrasement des éprouvettes 50××50 pour la détermination de la résistance à la compression diamétrale.	151
Figure 4- 23. Principe de détermination de la résistance à traction indirecte.....	151
Figure 4- 24. Résultats des résistances à la traction indirecte des formulations étudiées	152
Figure 4- 25. Classification des différentes formulations en fonction des critères à long terme (E,R _t) selon le GTR [31] et de la norme NF P94-102-1 [218].	154

Liste des tableaux

Tableau 1- 1. Distribution granulométrique selon la taille des grains [44].....	6
Tableau 1- 2. Barrages surélevés [64].....	9
Tableau 1- 3. Les barrages les plus envasés en Algérie en [57].	10
Tableau 1- 4. Principaux éléments traces [67].	12
Tableau 1- 5. Seuils S1 relatifs aux sédiments continentaux définis par l'arrêté du 9 Août 2006 [74].	14
Tableau 1- 6. Niveaux de référence N1 et N2 pour les sédiments marins et estuariens en mg/kg de Sédiments Secs sur la fraction < 2mm [71].....	15
Tableau 1- 7. Valeurs limites de la teneur en éléments traces métalliques [75].	16
Tableau 1- 8. Critères de jugement de la dangerosité des sédiments selon l'article R. 541-8 du code de l'environnement [70].	18
Tableau 1- 9. Valeurs limites déterminants les critères d'acceptabilité des Installations de Stockage [67].....	21
Tableau 1- 10. Fonctionnalités de la couche de forme à court et à long terme selon le GTR [30].	30
Tableau 1- 11. Exigences requises pour les liants hydrauliques routiers à durcissement normal définis par la norme NF EN 13282-2 [125].	39
Tableau 1- 12. Valeurs limites à ne pas dépasser en lixiviation pour être candidat à une utilisation en technique routière [149].....	48
Tableau 2- 1. Tableau récapitulatif des différentes caractéristiques obtenues par l'analyse granulométrique.	59
Tableau 2- 2. Teneur en matière organique et perte au feu.....	65
Tableau 2- 3. Classes de sédiments en fonction de leurs VBS d'après le Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de formes « GTR ».	67
Tableau 2- 4. Paramètres d'argilosités obtenus par l'essai de bleu.....	67
Tableau 2- 5. Activité argileuse en fonction du type de minéral [168].....	70
Tableau 2- 6. Limites de consistance par Atterberg des sédiments.	72
Tableau 2- 7. Récapitulatif des caractéristiques géotechniques des sédiments de Zardezas. .	73
Tableau 2- 8. Classification des sédiments en fonction de leur teneur en CaCO ₃ par la norme NF P94-048.	75
Tableau 2- 9. Paramètres de compactage des sédiments bruts.....	79

Tableau 2- 10. Eléments chimiques par Fluorescence aux rayons X.....	80
Tableau 2- 11. Concentration en contaminants des sédiments bruts comparée aux valeurs limites à respecter ISDI.	83
Tableau 3- 1. Caractéristiques physiques et chimiques du ciment.....	92
Tableau 3- 2. Caractéristiques physico-chimiques du LHF.	93
Tableau 3- 3. Caractéristiques physico-chimiques des sédiments calcinés.	96
Tableau 3- 4. Valeurs limites des facteurs du plan de mélange.	98
Tableau 3- 5. Les formulations de mortiers proposées par le plan de mélange.	100
Tableau 3- 6. Le modèle suggéré par le logiciel Design-Expert.	106
Tableau 3- 7. Valeurs de la résistance à la compression prédite et déterminée expérimentalement après 28 jours de cure.	107
Tableau 3- 8. Demande en eau de la pâte de ciment avec ou sans additions.	108
Tableau 3- 9. Refus en masse à 90 µm et teneur en sulfate.	111
Tableau 3- 10. Valeurs d'expansion des différentes formulations	112
Tableau 3- 11. Pourcentage de la Porosité totale des différentes formulations.	114
Tableau 3- 12. Teneur en portlandite à 7, 28, 56 et 90 jours des différentes formulations...	118
Tableau 3- 13. Concentration en contaminants des différentes formulations comparée aux valeurs limites à respecter ISDI.	121
Tableau 4- 1. Ensemble des caractéristiques géotechniques obtenues sur le mélange 50% SM+50% Sed.....	128
Tableau 4- 2. Composition des formulations de l'étude traités aux liants avec ou sans l'ajout du correcteur granulométrique.	132
Tableau 4- 3. Paramètres de densification et de portance pour les formulations proposées.	135
Tableau 4- 4. Modalités de déroulement de l'essai d'aptitude au traitement en fonction du type de traitement appliqué [31].....	138
Tableau 4- 5. Critères de jugement pour l'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé ou non à la chaux [31].	144
Tableau 4- 6. Classes de résistance à l'immersion au jeune âge selon la NF P94-102-1 [218].	148
Tableau 4- 7. Rc et Rci après 28 jours de cure normale et 32 jours d'immersion.	149
Tableau 4- 8. Classes attribuées aux sols destinés à une utilisation en couche de forme selon le couple (Rt,E) [218].	154
Tableau 4- 9. Essais de lixiviation sur toutes les formulations à 14 jours.	155
Tableau 4- 10. Essais de lixiviation sur toute les formulation à 28 jours.	156

Tableau 4- 11. Essais de lixiviation sur toute les formulation à 90 jours.	156
Tableau. Les différentes normes adoptées.	188

Introduction générale

Introduction générale

D'énormes quantités de sédiments se déposent chaque année dans les fonds des barrages, par l'action de l'érosion naturelle accentuée ou non par diverses activités (humaines, industrielles...). Par conséquent, une diminution de la capacité de stockage de leurs retenues est engendrée par le phénomène d'envasement. Des opérations de dragage régulier sont donc nécessaires pour le maintien du bon fonctionnement de ces infrastructures hydrauliques ainsi que pour prolonger leur durée de vie. Entre autres, l'envasement du barrage de Zardezas a entraîné une perte du tiers de sa capacité initiale entre l'année 2003 et l'année 2006. De ce fait, le barrage de Zardezas présente ainsi un risque de comblement total à court terme [1]. Toutefois, les déchets issus des opérations de dragage sont difficiles à gérer et doivent être soumis à un cadre réglementaire. En raison de la saturation des aires de stockage, leur valorisation semble constituer une alternative à la mise en décharge ou à l'immersion dans les cours d'eau. La recherche de voie de valorisation de ces derniers est devenue, alors, une priorité majeure des gestionnaires de ces infrastructures.

Au cours des dernières années, la valorisation des sédiments de dragage est devenue un centre d'intérêt majeur de plusieurs scientifiques et industriels. En effet, plusieurs études ont été menées pour encourager l'intégration des sédiments en tant que matières premières secondaires dans différentes filières de valorisation : domaine agronomique, poterie ainsi que le génie civil. D'autre part, la forte croissance démographique induit une hausse de la demande en matériaux de construction dont le ciment et les granulats. En effet, les dépenses en ces matériaux et la demande dépassent l'offre. À l'échelle mondiale, et durant les dernières 65 années, les quantités de ciment produites ont flambé de plus de 34 fois, tandis que la population a enregistré seulement une augmentation de moins du triple [2]. En Algérie, la production locale du ciment s'élève à 18 millions de tonnes/an, avec un déficit de 5 millions de tonnes/an pour couvrir la demande croissante du marché [3].

Elle seule, l'industrie cimentaire est responsable de l'émission d'une tonne de CO₂ pour chaque tonne de clinker produit [4–6], soit entre 5-8 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre [6,7]. En effet, la clinkérisation à 1450 °C du cru de ciment consomme 3,5 GJ/t de clinker produit [8,9]. Deux-tiers de ces émissions sont attribués à la phase de calcination du calcaire (CaCO₃), lors de sa décomposition en oxyde de calcium (CaO), alors que le troisième tiers, vient de la combustion de combustibles fossiles [7,9,10]. Dans un contexte d'économie

circulaire et afin de lutter contre le réchauffement climatique [11], plusieurs solutions ont été proposées :

En 2009, l'Agence internationale de l'énergie a proposé la capture et la séquestration de carbone (CSC), qu'elle a jugé capable de diminuer les émissions de l'industrie cimentaire à 56%, pour 2050 [2,12]. En revanche, l'application de cette technologie reste toujours limitée à l'échelle industrielle [13], de plus, ce genre de techniques reste relativement très onéreuses [2,14].

La solution la plus adéquate et la plus économique reste le remplacement du ciment avec des additions minérales [15]. Cette solution contribue également à la préservation de l'approvisionnement en ressources naturelles qui devient de plus en plus restreint [8]. De nombreuses études antérieures ont porté sur le remplacement partiel du ciment par des matériaux naturels (pouzzolane, filler calcaire, métakaolin) ou des sous-produits industriels tels que: le laitier de hauts-fourneaux, la cendre volante et la fumée de silice [11,16–18]. Ces études ont abordé le potentiel pouzzolanique à moyen et à long terme (excluant le filler calcaire ici), ainsi que la faible énergie consommée lors de leur production par rapport aux ciments portland. À titre d'exemple, l'énergie résultante de la calcination du kaolin pour la fabrication du métakaolin est dix fois moins que celle consommée lors de la fabrication du clinker, à savoir 0,35 GJ/t [8]. Cependant, leurs faibles disponibilités par rapport à la demande du marché nécessitent une nouvelle stratégie se basant sur la recherche de nouvelles ressources en matières premières secondaires. A titre d'exemple, les cendres volantes, pourraient couvrir uniquement 30% de la demande, et seulement le tiers, ou moins est valable pour une utilisation comme addition minérale dans le ciment, vu la variabilité de leur qualité [15]. Cette quantité tend à diminuer dans les années à venir selon les prévisions de l'Agence Internationale de l'Énergie publiées en juin 2017 sur les objectifs à atteindre afin de limiter le réchauffement climatique à 2°C en 2100 [9].

L'intégration du kaolin en tant qu'addition minérale dans les matrices cimentaires a toujours été favorisée vu leur disponibilité abondante à travers le monde entier, spécifiquement pour les pays à forte demande de ciment [2,9]. En outre, des études récentes ont montré que le remplacement partiel du clinker par des sédiments calcinés semble être une solution probante. Des caractéristiques mécaniques du même ordre que les résistances des bétons standards ont été obtenues avec un remplacement jusqu'à 30% du ciment par des sédiments [3,4,19,20].

Le domaine routier, étant un grand consommateur de matériaux de construction, plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'utilisation des sédiments dans les travaux de terrassement ou bien d'assises de chaussées [21–28]

Plusieurs études ont évalué le potentiel d'utilisation des additions minérales en remplacement du ciment pour l'élaboration des liants hydrauliques routiers. Stevulova et al [29] ont étudié l'effet d'incorporation du laitier de hauts-fourneaux en combinaison avec d'autres additions pour la production d'un liant hydraulique routier à durcissement normal. Segui et al [5], de leur côté ont évalué l'efficacité d'un traitement aux liants hydrauliques routiers formulés à base de pouzzolane naturelle sur des sols argileux.

Ce mémoire de travaux de thèse est structuré selon quatre chapitres dont l'organisation générale est synthétisée sur la **Figure 1** :

L'état de l'art fait l'objet du **premier chapitre** du présent document, nécessaire à la compréhension de la problématique abordée. En premier lieu : l'origine, la composition des sédiments, la problématique d'envasement, la réglementation concernant la gestion des sédiments de dragage ont été rappelés ainsi que les différentes voies de valorisation des sédiments de dragage. Un bref aperçu a été ensuite présenté concernant les laitiers de hauts-fourneaux et les déchets de marbre vis-à-vis de leur intégration en tant matériaux alternatifs. En dernier lieu, un bilan de l'état de l'art a été réalisé.

Dans le **deuxième chapitre**, a été présenté l'origine des sédiments de l'étude, le mode de prélèvement, la détermination des caractéristiques physico-chimiques, minéralogiques, géotechniques, mécaniques et environnementales conformément au GTR [30] et à l'arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux Installations de Stockage de Déchets Inertes. Une observation des particules composant les sédiments a été également réalisée au microscope électronique à balayage.

Le **troisième chapitre**, a été consacré à l'élaboration de liants hydrauliques routiers à base de ciment CEM I 42,5 N, de sédiments calcinés et des laitiers de hauts-fourneaux. Tout d'abord, la température et la durée du traitement thermique ont été déterminées. Ce traitement thermique a été ensuite suivi par un traitement physique par broyage fin. L'optimisation des formulations a été réalisée par la méthode de plan de mélange à l'aide du logiciel Design-Expert.

L'évaluation des caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques (à l'état frais et à l'état durci) des deux formulations retenues a été effectuée selon le cahier des charges spécifique aux

liants hydrauliques routiers à durcissement normal. Une analyse de la microstructure a été également entreprise (ATG, PIM et MEB).

Le **quatrième chapitre** a porté dans un premier temps sur l'optimisation du squelette solide par recomposition granulaire en ajoutant du sable de marbre, à l'aide de la méthode de Talbot-Fuller-Thompson. Dans un deuxième temps, une étude de formulations à base de sédiments, avec ou sans le renfort granulaire (déchets de marbre) par l'application d'un traitement mixte a été réalisée. Les pourcentages de chaux et de liants hydrauliques routiers ont été fixés en se basant sur l'essai de détermination du point de fixation de la chaux (PFC) et le guide GTS [31]. Une campagne d'essais a été ensuite réalisée afin d'évaluer l'aptitude des sédiments traités à leur valorisation en couche de forme vis-à-vis du comportement mécanique à court et à long terme ainsi que leur impact environnemental.

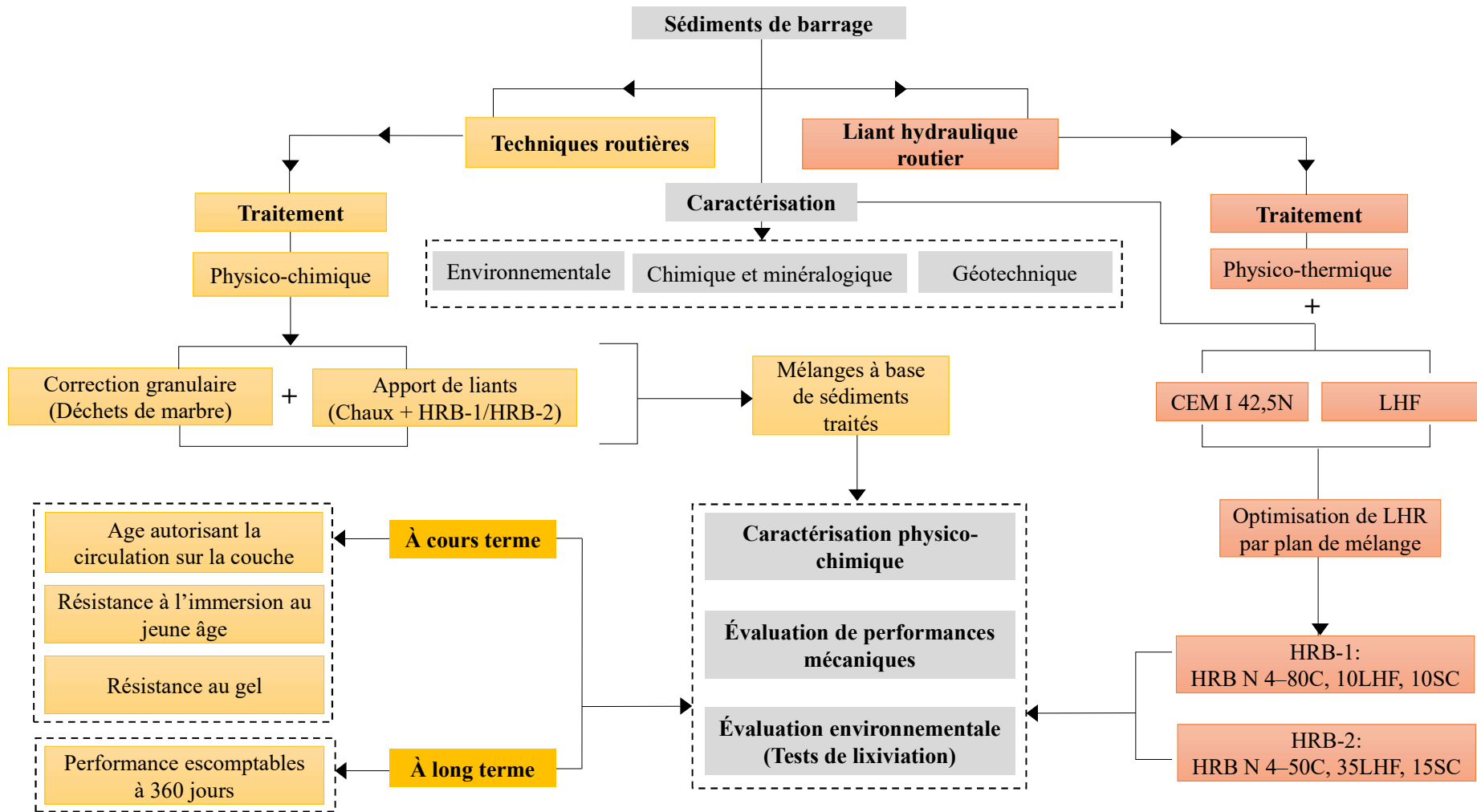


Figure 1. Organigramme de la démarche d'étude adoptée.

Chapitre 1.

Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

1. Les sédiments de dragage

1.1 Origine des sédiments

Le sédiment, encore appelé vase ou boue en raison de sa granularité ou de sa forte teneur en eau une fois dragué [32], est un produit provenant principalement du processus d'érosion des sols pour finir par se déposer au fond des milieux aquatiques et former une couche de particules de nature variée. Selon Schneider [33], nous distinguons deux principales origines de sédiments :

- Origine endogène : pour laquelle la formation des sédiments est autochtone du milieu, de nature organique provenant de la décomposition des végétaux aquatiques (microphytes et macrophytes) ou de cadavres d'animaux.
- Origine exogène : dit allochtone, la matière est transportée par érosion éolienne (provoquée par le vent) ou érosion hydrique (provoquée par des phénomènes de ruissèlement), de nature minérale ou/et organique.

Le sédiment peut être d'origine naturelle issu de la décomposition des organismes aquatiques ou des feuilles d'arbres ou/et des particules transportés par le vent ou par érosion hydrique, ou anthropique, provenant des activités humaines (rejets domestiques, agricoles et industrielles) [34] (**Figure 1- 1.**).

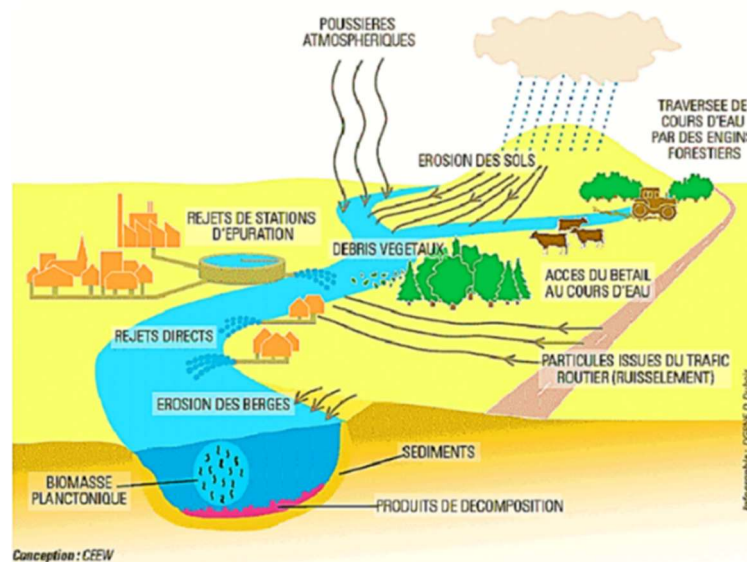


Figure 1- 1. Origine des sédiments.

1.2 Composition des sédiments

Un sédiment est considéré comme une matrice très hétérogène, composée: d'une phase liquide, une phase minérale et une phase organique [35,36], comme illustré sur la **Figure 1- 2** et la **Figure 1- 3** avec une présence probable de métaux lourds, polluants et micropolluants organiques.

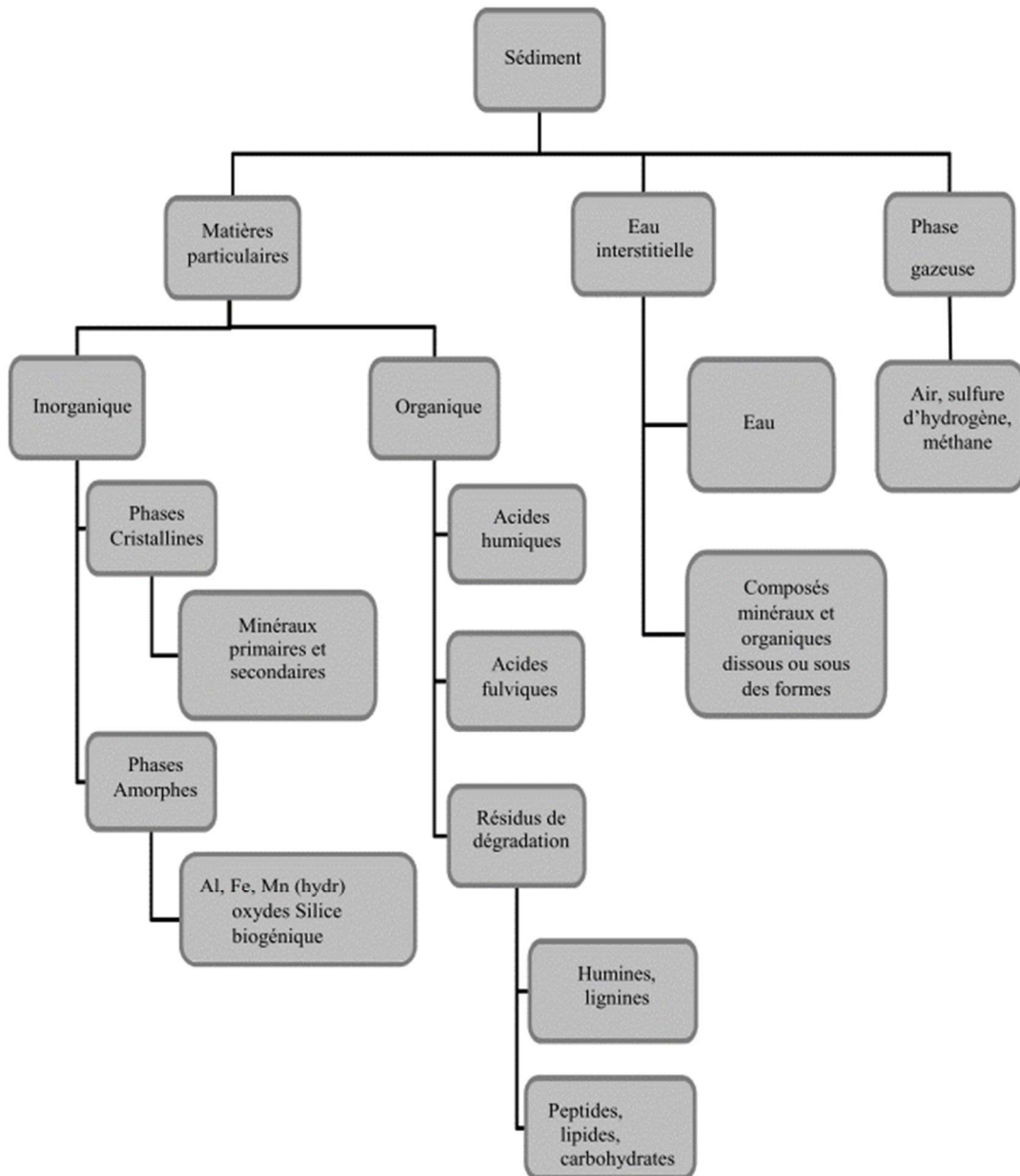


Figure 1- 2. Les différentes phases constituant un sédiment [37].

1.2.1 Phase liquide

La teneur en eau des sédiments est généralement comprise entre 100% et 300%, et cela dépend de la technique de dragage employée [25,38]. Elle se présente sous différents aspects [39]:

Eau adsorbée, eau de constitution, eau colloïdale et eau interstitielle ou eau de porosité (eau libre et eau capillaire)

Et c'est à travers l'eau interstitielle que les contaminants dissous migrent vers la colonne d'eau [40].

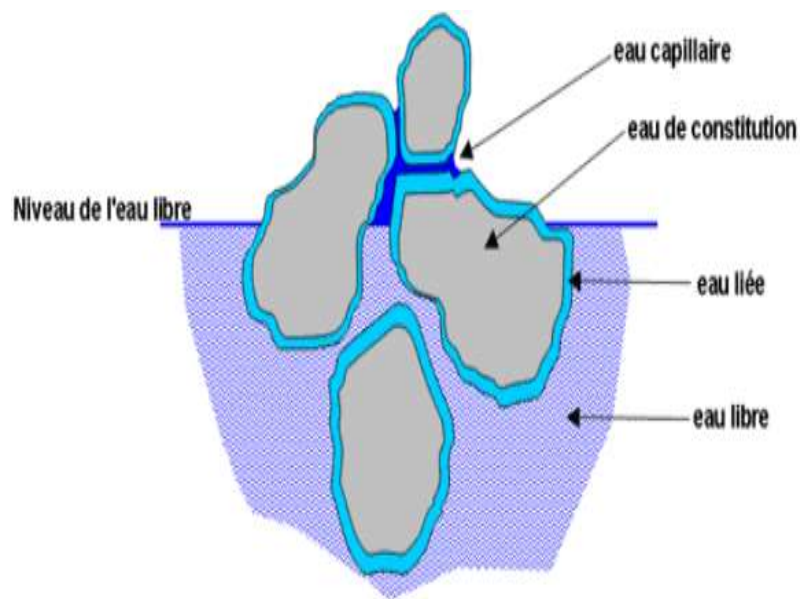


Figure 1- 3. Schématisation des différentes formes d'eau dans le sol [39,41].

1.2.2 Phase minérale

Nous distinguons pour la phase minérale, selon la taille du sédiment et sa distribution granulométrique : une fraction fine constituée d'argiles ou de limons, composés essentiellement des minéraux argileux mais également des squelettes provenant des organismes d'origine endogène ou exogène et une fraction grossière composée de sable, de gravier ou de cailloux. Le **Tableau 1- 1** ci-dessous renseigne les différentes classes granulométriques des sédiments, en fonction de la grosseur des grains. Une analyse sur une base de données comportant 27 000 échantillons de sédiments a été réalisée par la Commission Géologique des États-Unis dans l'objectif de déterminer la fraction dominante de leur squelette solide. Les résultats de cette

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

analyse ont montré que tous les sédiments avaient pratiquement un D_{\max} inférieur à 0,2 mm [42].

L'étude menée par Gosselin et al [43] sur des sédiments portuaires de Montréal a montré que les contaminants inorganiques se fixent généralement sur la fraction inférieure à 0,045 mm. Le comportement physique et mécanique du sédiment est lié directement à sa nature minérale [36], la fraction dénommée vase inférieure à 0,08 mm contenu dans les sédiments pourrait engendrer des comportements complexes à la suite de son interaction avec la matière organique, l'eau et les ions présents dans le milieu [22,38]. En effet, leur structure en feuillet ainsi que leur grande surface spécifique, leur confère une forte capacité d'échange cationique, faisant de cette fraction une cible des polluants organiques et inorganiques présents dans le milieu aquatique [40].

Tableau 1- 1. Distribution granulométrique selon la taille des grains [44].

Classe granulométrique	Taille de particule (mm)
Cailloux	$D > 20$ mm
Graviers	$2 \text{ mm} < D < 20$ mm
Sables	$0,063 \text{ mm} < D < 2$ mm
Limons	$0,002 \text{ mm} < D < 0,063$ mm
Argiles	$D < 0,002$ mm

↓ 0,08 mm

1.2.3 Phase organique

La matière organique est une fraction variable dans le temps, sa présence dans le sédiment est considérée comme faible par rapport à la phase minérale [38], elle varie généralement entre 2% à 10% [45] et pourrait même s'élever à 20% pour certains sédiments [26].

Elle est caractérisée par sa couleur grisâtre-noirâtre et son odeur spécifique [22,25,38]. Elle peut être déterminée par perte au feu suivant la norme NF EN 15169 [46]. Cette phase se présente sous quatre formes [26,47,48]:

- Matière organique vivante :

Elle représente la biomasse active et englobe la matière organique d'origine animale, végétale, bactérienne ou fongique.

- Matière organique fraîche :

Elle renferme les débris végétaux recouvrant le sol, cadavres d'animaux, exsudats, excréments et cadavres d'animaux.

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

- Composés organiques en cours d'évolution (transitoire) :

Proviennent de la dégradation de la matière organique fraîche.

- Composés organiques stabilisés ou humus :

L'humus est le fruit d'évolution des matière organiques fraîches à travers des processus chimiques et enzymatiques [49], assemblé à des composantes minérales (minéraux argileux) pour donner naissance à de nouvelles molécules argilo-humiques complexes [47] avec différents degrés de stabilité [28]. Il constitue 60% de matière organique présente dans le sol [47,50]. Nous distinguons ici trois catégories en fonction de leur pH :

❖ **Acides humiques (AH) :** Ils sont insolubles à pH inférieur à 2 (acide) et solubles à pH basique (≥ 13), il a été établi par Colin [49] que la matière organique totale d'un sol pourrait atteindre une teneur allant de 85%-90% en acide humique.

❖ **Acides fulviques (AF) :** Ils sont moyennement biodégradables et solubles dans l'eau à pH acide et basique [47].

❖ **Fraction non humifiée ou humine :** Elle constitue 50%-70% des matières organiques totales, et représente la fraction la plus réactive [47]. À l'opposé des acides humiques et fulviques, elle est insoluble à pH acide et basique [51].

1.3 Effets de la matière organique sur le comportement des sédiments

Bien que la matière organique représente seulement 2%-10% de la masse totale des sédiments, sa présence pourrait perturber les réactions chimiques des liants hydrauliques ou pouzzolaniques [31]. Elle pourrait comporter également des effets non négligeables sur leurs caractéristiques physiques, chimiques et géotechniques [52,53] ainsi qu'une diminution de la résistance mécanique pourrait être enregistrée [38]. Ceci a été confirmé par Liang [54], en effet, les résistances à la compression à 28 jours des sédiments traités de l'étude diminue plus la teneur en matière organique augmente. Sa présence représente une source d'instabilité majeure pour les sédiments [27,38,53-55]. L'effet de ces matières organiques sur le comportement des sédiments a fait l'objet de nombreuses études antérieures.

Maherzi [25] a montré l'impact de la matière organique sur les paramètres de compactage, la masse volumique sèche diminue avec l'augmentation de la teneur en matière organique. En revanche, la teneur en eau optimale augmente proportionnellement avec l'augmentation de la teneur en matière organique. Bourabah [22] a procédé à l'élimination de

la matière organique par calcination afin d'étudier l'influence de sa présence sur le comportement des sédiments. En effet, une diminution de la fraction fine présente dans les sédiments traités a été clairement observée. Ceci a conduit à une réduction considérable des limites d'Atterberg avec 37% moins pour la limite de liquidité ainsi que pour la valeur de bleu de méthylène (VBS). Cette diminution a été attribuée à l'altération du complexe argilo-humique, à la densité et à la structure des sédiments suite au traitement thermique. D'autre part, une augmentation de la limite de plasticité plus la teneur en matière organique augmente a été observée par Maherzi, Mc Donald et Rekik [25,27,56], Maherzi accorde ce comportement au caractère de rétention d'eau que possède la matière organique.

1.4 Problématique d'envasement des barrages Algériens

L'érosion hydrique est un phénomène naturel pouvant être accentué et aggravé par plusieurs facteurs, tels que, la topographie, le climat de la région, les crues torrentielles, la nature des roches et du sol [57], ainsi que par les activités humaines. Par conséquent, ce phénomène est à l'origine principale de l'envasement des retenues des barrages.

Du fait de la forte érosion de leurs bassins versants, des quantités colossales de sédiments transportées par les cours d'eau se déposent chaque année dans le fond des réservoirs et des retenues de barrages, entraînant une diminution progressive de leur capacité de stockage. Ces volumes menacent la stabilité et la sécurité de ces infrastructures hydrauliques, par les fortes poussées des sédiments, l'obturation des vannes de vidange et la disponibilité des ressources hydriques du pays, sans négliger les effets néfastes qui peuvent se répercuter sur la qualité des eaux [24,32,58] destinées à l'irrigation et l'alimentation en eau potable des agglomérations.

La région Afrique du nord est connue pour sa vulnérabilité à l'érosion sévère [59], en Algérie du nord par exemple, la quantité de sol érodé a été estimée à 180 millions de tonnes/an [60]. Cette région, possède près de 230 barrages avec une capacité de 23 milliards de m³, les retenues de ces barrages reçoivent chaque année 125 millions de m³ de vase [58].

Au Maroc, une perte de l'ordre de 0,5% de la capacité de stockage des retenues des barrages est enregistrée annuellement en raison d'un envasement de volume moyen correspondant à 11 milliards de m³ [61]. En Tunisie, une perte de capacité de stockage des barrages pouvant atteindre les 43% comparée à leur capacité de stockage initiale est estimée pour l'année 2030 [62].

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

En Algérie, le secteur hydrique dispose de 74 grands barrages en exploitation répartis sur l'ensemble du territoire national, d'une capacité totale de 8,5 milliards de m³ [59]. Une perte annuelle de 0,65% de la capacité de stockage a été estimée par Hallouche [63], sur la base des levés bathymétriques réalisés par l'agence nationale des barrages et transferts (ANBT) en 2005-2006, soit un envasement moyen de 45 millions de m³ /an. Au fil du temps, les barrages recueillent de plus en plus des sédiments, la vase ne cesse d'envahir leurs retenues de stockage et de nombreux barrages arrivent à leur fin de cycle de vie. Entre 2000 et 2017, le taux d'envasement a grimpé pour atteindre les 45 millions de m³ en 2006 puis, les 65 millions de m³ en 2017, soit une perte de capacité équivalente à 20% [1].

1.4.1 Techniques employées pour lutter contre le phénomène d'envasement

Dans l'intention de prolonger la durée de vie de ces infrastructures, pour assurer une meilleure gestion du phénomène d'envasement et un bon fonctionnement de ces ouvrages hydrauliques, diverses mesures ont été déployées par les services hydrauliques en Algérie. Des moyens de prévention notamment, l'aménagement des bassins versants et des cours d'eau, le reboisement et la correction torrentielle ont été adoptés. Mais encore, des méthodes de dévasement ont été également employées [64]:

o La surélévation des barrages

Cette technique permet de compenser et récupérer le volume envahi par les sédiments, elle s'applique surtout quand le taux d'envasement est avancé. Avec un volume de 94 millions de m³ récupérés sur neuf barrages depuis 1850, l'Algérie figure parmi les premiers pays qui ont eu recours à cette solution [57]. Le **Tableau 1- 2** ci-après fourni par Remini [64] présente certains barrages algériens qui ont subi des opérations de surélévation des digues.

Tableau 1- 2. Barrages surélevés [64].

Nom du barrage	Année de la mise en eau	Capacité initiale (millions de m ³)	Année de la surélévation	Capacité récupérée par la surélévation (millions de m ³)
Sig	1846	1	1858	1
Hamiz	1879	14	1936	16
Ksob	1939	11,6	1977	18
Zardezas	1945	14,9	1977	16
Boughezoul	1935	55,8	1960	10
Foum El Gueiss	1939	2,5	1969	05
Bakhadda	1936	36	1958	20
Beni Amrane	1988	15,6	2001	11

o Le dragage

Cette technique est utilisée souvent quand l'abandon de l'ancien ouvrage n'est pas possible par manque de sites géographiques nécessaires à la construction de nouveaux ouvrages et que l'envasement présente un risque sur la stabilité du barrage, mais également, pour des raisons économiques. Deux grands barrages ont été déclassés et remplacés par d'autres, le barrage de Fergoug II remplacé par Fergoug III avec une capacité de stockage de 18 millions de m³ en 1970 et le barrage de Cheurfas I remplacé par Cheurfas II avec une capacité de 82 millions de m³ en 1992. Cependant, l'abandon de ces ouvrages hydriques ne présente pas une solution efficace au problème et reste problématique [57].

Le **Tableau 1- 3** ci-dessous classe les barrages les plus envasés présents sur le territoire Algérien, selon leur degré d'envasement avec le nombre d'opérations de dragage effectué pour chaque barrage. Les premières opérations de dragage ont été entamées sur le barrage de Cheurfas, Sig, Fergoug et Hamiz entre 1958 et 1969. Entre 1989 et 1992 une deuxième campagne de dragage a été effectuée sur la retenue du barrage Fergoug II, ensuite le barrage de Zardezas entre 1993 et 2002 [57].

Tableau 1- 3. Les barrages les plus envasés en Algérie en [57].

Nom du barrage	Localisation	Année de mise en eau	Capacité de stockage initiale (millions de m ³ /an)	Envasement en 2006 (%)	Nombre de dévasement effectués (millions de m ³)
Fergoug	Mascara	1970	18	100	7
Beni Amrane	Boumerdes	1988	16	80	3
Meurad	Tipaza	1860	1	80	
Foum El Gerza	Biskra	1950	47	70	4
Foum El Gueiss	Biskra	1939	3	67	
Ghrib	Ain Defla	1939	280	60	
Ksob	M'Sila	1977	30	60	4
Oued Fodda	Chlef	1932	228	57	45
Bouhanifia	Maskara	1940	73	57	
Boughezoul	Médéa	1934	55	56	
Zardezas	Skikda	1977	27	54	10
Ighil Emda	Bejaïa	1953	155	35	47
Hamiz	Boumerdes	1935	21	27	8
Djorf Torba	Béchar	1969	350	27	
Sarno	Sidi Bel Abbès	1954	22	24	
Bakhadda	Tiaret	1963	56	20	
Beni Bahdel	Tlemcen	1952	63	17	
Merdja	Relizane	1984	55	14	5

1.5 Impact des sédiments de dragage vis-à-vis de l'environnement

Le potentiel polluant des sédiments est favorisé par leur fine granulométrie. En effet, comme évoqué précédemment, les éléments toxiques inorganiques se fixent principalement sur la fraction inférieure à 45 micromètres [43]. Les opérations de dragage peuvent perturber la stabilité, affecter l'équilibre géochimique et le potentiel de remobilisation des polluants présents dans les sédiments [25,32,35]. Ceci peut avoir des conséquences néfastes sur l'écosystème, ces conséquences peuvent aller plus loin que la zone de dragage même, suivant les conditions hydrauliques du site [35]. Toutefois, ses mêmes sédiments peuvent présenter un caractère stable dans des conditions normales du milieu [65].

L'origine principale des contaminants présents dans les sédiments provient de diverses sources d'activités anthropiques aux alentours des cours d'eau, entre autres les rejets urbains, industriels et agricoles, comme elle peut être naturelle. Ces polluants peuvent être classés en deux catégories :

○ **Polluants organiques**

Ils sont composés essentiellement des éléments suivants : le Carbone, l'Hydrogène, l'Oxygène et l'Azote. Nous distinguons trois familles de polluants organiques [66], les plus souvent rencontrées dans les sédiments :

- Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP),
- Les tributylétains (TBT),
- Le polychlorobiphényles (PCB).

○ **Polluants inorganiques (éléments traces métalliques)**

La source de présence des éléments traces métalliques (ETM) (anciennement appelés métaux lourds [67]) au sein des sédiments peut être d'origine Anthropique liée aux rejets générés par des activités industrielles et/ou des activités agricoles, ou en partie naturelle et est attribuée à l'altération des roches de la croûte terrestre [66]. Le **Tableau 1- 4** suivant représente les principaux éléments traces les plus rencontrés dans les sédiments.

Tableau 1- 4. Principaux éléments traces [67].

Éléments	Sources
Arsenic [As]	Sous-produits miniers, pesticides, déchets chimiques, préservateur de bois
Cadmium [Cd]	Extraction et fonderie du plomb et du zinc, décharges industrielles, déchets miniers
Chrome [Cr]	Additif des eaux de refroidissement
Cuivre [Cu]	Déchet domestique et industriels, mine, lixiviation de minéraux
Mercure [Hg]	Déchets industriels, mines, pesticides, charbon
Nickel [Ni]	Sources géologiques naturelles, industrie, mine
Plomb [Pb]	Industries, mines, plomberie, charbon, essence
Sélénium [Se]	Sources géologiques naturelles, charbon
Zinc [Zn]	Déchets industriels, plomberie

1.6 Cadre réglementaire et juridique relative à la gestion des sédiments de dragage

La problématique des sédiments issus du dragage et de leur devenir est un sujet qui a préoccupé et préoccupe plusieurs acteurs aujourd'hui et au cours de ces dernières décennies. À cet égard, de nombreux textes législatifs et réglementaires ont été élaborés sur le niveau internationale.

1.6.1 Réglementation internationale

o La convention OSPAR [68]

Signée à Paris le 22 septembre 1992 et entrée en vigueur le 25 mars 1998, la Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est, est la résultante de la fusion et la mise à jour de la convention d'Oslo de 1972 (visant la prévention de la pollution marine) et la convention de Paris de 1974 (traitant des rejets de substances d'origine tellurique). La convention OSPAR (OSlo et PARis) a été signée par 15 pays (Allemagne, Belgique, Danemark, Espagne, France, Irlande, Norvège, Islande, Pays-Bas, Portugal, Royaume-Uni, Suède, le Luxembourg, la Finlande, la Suisse) et l'Union Européenne [25,69,70] dans le but de protéger l'environnement et les écosystèmes marins.

Un guide dédié à la gestion des sédiments a été publié en 2009, indiquant des spécifications sur le choix des milieux d'immersion [71].

o La convention de Londres

Le « Protocole de la Convention sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets et autres matières », ou le protocole de Londres, est un traité international signé par 82 pays contractants et administré par l'Organisation maritime internationale (OMI). La convention de Londres, entrée en vigueur le 30 août 1975, a ensuite été mise à jour à plusieurs reprises avec l'ajout de plusieurs annexes [25]. À partir du 17 novembre 1996, tout déchet, substance ou matériau est désormais interdit à l'immersion, à

l'exception de quelques matériaux, seulement après la délivrance d'un permis. Ces matériaux englobent les déblais de dragage et sont concernés par le cadre d'évaluation des déchets, présenté dans l'annexe II de ce protocole [70].

○ **Convention Barcelone**

Dans une démarche de protection de l'environnement marin en Méditerranée, les parties signataires de la Convention pour la préservation des milieux aquatiques en Méditerranée s'engagent à prendre attentivement en compte les sources de pollution suivantes : la pollution provenant des opérations d'immersion effectuées par les navires et les aéronefs, la pollution produite par l'exploration et de l'exploitation du plateau continental, du fond de la mer et de son sous-sol, la pollution d'origine tellurique ainsi que la pollution générée par les navires [71]. Elle a été par la suite modifiée et mise à jour le 10 juin 1995 [70].

○ **Convention d'Helsinki [72]**

La Convention sur la protection et l'utilisation des cours d'eau transfrontières et des lacs internationaux, ainsi appelée Convention d'Helsinki signée le 17 mars 1992 et entrée en vigueur le 6 octobre 1996. Des modifications ont été apportées par la décision 2013/790/UE sur la Convention d'Helsinki et à compter du 6 février 2013 l'adhésion des pays non européens est désormais possible, ainsi que pour les membres de l'organisation des nations unies, à partir de mars 2016.

○ **Convention de Stockholm [72]**

Signée en mai 2000 et entrée en vigueur le 17 mai 2004, Parer aux menaces liées aux substances chimiques, appelé aussi Convention de Stockholm est un traité mondial visant à régler la question des polluants organiques persistants (POP) et leurs effets nuisibles qui peuvent se répercuter sur l'environnement ainsi que la santé humaine. L'Algérie fait partie des pays adhérents et a ratifié cette convention le 22 septembre 2006 [21,73].

1.6.2 Réglementation Française

En France, la gestion à terre ou l'immersion et/ou la remise en suspension en mer pour les sédiments marins et dans les cours d'eau pour les sédiments fluviaux ou les sédiments de barrages sont soumises aux réglementations du code de l'environnement et les engagements du grenelle de la mer (2009) avec des limitations différentes de seuils en contaminants. Selon Les articles L. 214-1 à 6 du Code de l'environnement, une autorisation ou une déclaration par le préfet est impérativement nécessaire afin de procéder à des opérations de dragage.

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

La loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006 (LEMA) et les articles L. 511-1 à 9 de l'ICPE (Code de l'environnement relatifs aux installations classées pour la protection de l'environnement) s'appliquent sur les sédiments de dragage.

o Remise en suspension et immersion

Une évaluation environnementale in-situ sur la colonne d'eau, la phase solide et les eaux interstitielles, avant même la réalisation des opérations de dragage est préconisée par l'Arrêté du 30 Mai 2008. La teneur en contaminants est d'abord déterminée puis comparée aux seuils définis par l'arrêté du 9 Août 2006 de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (repris dans le **Tableau 1- 5**). L'analyse d'autres contaminants pourrait être exigée par arrêté préfectoral [70].

Tableau 1- 5. Seuils S1 relatifs aux sédiments continentaux définis par l'arrêté du 9 Août 2006 [74].

Paramètres	Seuil S1 (mg/kg sédiments secs sur la fraction < 2mm)
Arsenic (As)	30
Cadmium (Cd)	2
Chrome (Cr)	150
Cuivre (Cu)	100
Mercure (Hg)	1
Nickel (Ni)	50
Plomb (Pb)	100
Zinc (Zn)	300
HAP totaux (16 définis par l'US EPA)	22,8
PCB totaux (7 usuels)	0,68

Le devenir des sédiments est ensuite décidé sur la base de ces données. En effet, l'immersion est jugée impossible si la teneur en éléments et composés traces obtenues par l'évaluation réalisée dépasse le seuil S1. Il est important de noter également que selon le SDAGE Rhône-Méditerranée 2010-2015, les effets apportés par les opérations de dragage sur les milieux concernés par l'immersion et la mise en suspension, ne peuvent en aucune façon être appréciés ici, ces seuils concernent seulement le choix du devenir des sédiments [70].

Les seuils N1 et N2 relatifs à l'appréciation de la qualité des sédiments marins et estuariens fixés par l'arrêté du 9 Août 2006 sont présentés dans le **Tableau 1- 6**. Les modifications apportées par l'arrêté du 30 Juin 2020, ont été prise en compte ici.

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

Tableau 1- 6. Niveaux de référence N1 et N2 pour les sédiments marins et estuariens en mg/kg de Sédiments Secs sur la fraction < 2mm [71].

Paramètres	N1	N2
Arsenic (As)*	25	50
Cadmium (Cd)*	1,2	2,4
Chrome (Cr)*	90	180
Cuivre (Cu)*	45	90
Mercure (Hg)*	0,4	0,8
Nickel (Ni)*	37	74
Plomb (Pb)*	100	200
Zinc (Zn)*	276	552
PCB congénère 28*	0,005	0,01
PCB congénère 52*	0,005	0,01
PCB congénère 101*	0,01	0,02
PCB congénère 118*	0,01	0,02
PCB congénère 138*	0,02	0,04
PCB congénère 153*	0,02	0,04
PCB congénère 180*	0,01	0,02
TBT**	0,1	0,4
Naphtalène***	0,16	1,13
Acénaphène***	0,015	0,26
Acénaphthylène***	0,04	0,34
Fluorène***	0,02	0,28
Anthracène***	0,085	0,59
Phénanthrène***	0,24	0,87
Fluoranthène***	0,6	2,85
Pyrène***	0,5	1,5
Benzo(a)anthracène***	0,26	0,93
Chrysène***	0,38	1,59
Benzo(b) fluoranthène***	0,4	0,9
Benzo(k) fluoranthène***	0,2	0,4
Benzo(a)pyrène***	0,43	1,015
Dibenzo (a, h) anthracène***	0,06	0,16
Benzo(g,h,i)15erylene***	1,7	5,65
Indéno (1, 2,3-cd) pyrène***	1,7	5,65

* Présent initialement dans l'Arrêté du 9 Aout 2006

** Ajouté par l'Arrêté du 23 Décembre 2009.

*** Ajouté par l'Arrêté du 17 juillet 2014.

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

Une immersion dans les milieux aquatiques est jugée acceptable si les teneurs obtenues sont en dessous du seuil N1, entre les deux niveaux de référence N1 et N2, une analyse complémentaire pour les sédiments ainsi que le milieu concerné est indispensable. En revanche, au-delà du niveau N2, l'immersion en milieu aquatique risque d'être interdite, sauf si cette immersion représente le caractère le moins contraignant vis-à-vis de l'environnement [70].

o Gestion à terre des sédiments de dragage

Dès lors leur extraction du milieu naturel, le terme déchet s'attribue aux sédiments de dragage, en suivant les spécifications de la loi-cadre européenne du 15 Juillet 1975 (l'article L541-1) qui définit le déchet comme suit « le résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son destinataire destine à l'abandon ». Les boues de dragage sont également définies par le décret N° 2002-540 du 18 avril 2002 : « terres, cailloux et boues de dragage ». En effet, tous sédiments générés à terre sont réglementés au titre de la législation relative aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) du Décret n° 2010-369 du 13 avril 2010.

1.6.3 Réglementation Nationale

En Algérie, l'évaluation de l'impact environnemental des sédiments marins est règlementée par le décret algérien n°88-228 du 05 novembre 1988 spécifique à l'immersion des déchets en mer et le décret algérien N° 90-78 du 27 février 1990 relatifs aux études d'impact sur l'environnement, recommandés par le Ministère Algérien de Aménagement de Territoire et de l'Environnement MATE [75].

Les valeurs seuils définies en 2005 par le laboratoire d'Etudes Maritimes (LEM), sont présentées dans le **Tableau 1- 7** ci-dessous :

Tableau 1- 7. Valeurs limites de la teneur en éléments traces métalliques [75].

Eléments traces métalliques	Seuils recommandés (mg/kg de Sédiments Secs)
Chromé Cr	250
Zinc Zn	500
Cadmium Cd	3
Plomb Pb	250
Mercure Hg	1.5
Nickel Ni	75
Hydrocarbures	300

1.6.4 Modalités de gestion des sédiments de dragage à terre (en France)

○ Evaluation de la dangerosité des sédiments gérés à terre et classement en « déchets dangereux »

Sont distingués deux classes de sédiments issus des opérations de dragage en entrée dite « miroir » par les articles R541-8 et R541-10 du Code de l'Environnement :

- **17- 5-05* : boues de dragage contenant des substances dangereuses,**
- **17 05-06 : boues de dragage autres que celles visées à la rubrique 17-05-05*.**

La dangerosité des sédiments appartenant à la première classe 17-05-05* est estimée sur la base de 15 critères en application de l'article R. 541-8 du code de l'environnement, un seul critère suffit pour qualifier les sédiments de « dangereux », les 15 critères sont présentés dans le **Tableau 1- 8**.

Du fait que les sédiments ne contiennent pas de matériaux pyrophoriques, de groupes réactifs, les mélanges de bromate, de potassium et de cellulose, l'analyse des critères HP1, HP2 et HP3 semble inadaptée aux sédiments de dragage [70].

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

Tableau 1- 8. Critères de jugement de la dangerosité des sédiments selon l'article R. 541-8 du code de l'environnement [70].

Code	Intitulé	Définition
HP 1*	Explosif	Pouvant exploser sous l'effet de la flamme ou qui sont plus sensibles aux chocs ou aux frottements que le dinitrobenzène
HP 2*	Comburant	Au contact d'autres substances, notamment de substances inflammables, présentent une réaction fortement exothermique
HP 3-A*	Facilement inflammable	- à l'état liquide (y compris les liquides extrêmement inflammables), dont le point d'éclair est inférieur à 21 °C, ou - pouvant s'échauffer au point de s'enflammer à l'air à température ambiante sans apport d'énergie, ou - à l'état solide, qui peuvent s'enflammer facilement par une brève action d'une source d'inflammation et qui continuent à brûler ou à se consumer après l'éloignement de la source d'inflammation, ou - à l'état gazeux, qui sont inflammables à l'air à une pression normale, - qui, au contact de l'eau ou de l'air humide, produisent des gaz facilement inflammables en quantités dangereuses.
HP 3-B*	Inflammable	Liquides, dont le point d'éclair est égal ou supérieur à 21 °C et inférieur ou égal à 55 °C
HP 4*	Irritant	Non corrosives qui, par contact immédiat, prolongé ou répété avec la peau et les muqueuses, peuvent provoquer une réaction inflammatoire
HP 5*	Nocif	Par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent entraîner des risques de gravité limitée
HP 6*	Toxique	Par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent entraîner des risques graves, aigus ou chroniques, voire la mort
HP 7*	Cancérogène	Par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent produire le cancer ou en augmenter la fréquence
HP 8*	Corrosif	En contact avec des tissus vivants, peuvent exercer une action destructrice sur ces derniers
HP 9	Infectieux	Matière contenant des micro-organismes viables ou leurs toxines, dont on sait ou dont on a de bonnes raisons de croire qu'ils causent la maladie chez l'homme ou chez d'autres organismes vivants.
HP 10*	Toxique pour la reproduction	Par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent produire ou augmenter la fréquence d'effets indésirables non héréditaires dans la progéniture ou porter atteinte aux fonctions ou capacités reproductives.

* Décret 2002-540 du 18 avril modifié par le décret 2007-1467 2007/10/12 art. 4 JORF

HP 11*	Mutagène	Par inhalation, ingestion ou pénétration cutanée, peuvent produire des défauts génétiques héréditaires ou en augmenter la fréquence.
HP 12	Dégagement toxique	Au contact de l'eau, de l'air ou d'un acide, dégagent un gaz toxique ou très toxique.
HP 13	Sensibilisant	Par inhalation ou pénétration cutanée, peuvent donner lieu à une réaction d'hypersensibilisation telle qu'une nouvelle exposition à la substance ou à la préparation produit des effets néfastes caractéristiques.
HP 14	Écotoxique	Présentent ou peuvent présenter des risques immédiats ou différés pour une ou plusieurs composantes de l'environnement.
HP 15**	Susceptibles, après élimination, de donner naissance, par quelque moyen que ce soit, à une autre substance, par exemple un produit de lixiviation, qui possède l'une des caractéristiques énumérées ci-avant	

Dans le cas où aucun rejet de station de traitement des eaux usées se trouve à proximité de la zone de dragage, la détermination du critère HP9 peut être éliminée [67]. L'estimation du critère d'écotoxicité HP14, est déterminée par le protocole MATE 1998, élaboré par le ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement en janvier 1998 puis mis à jour par l'INERIS en 2000 [76] et en 2006 [77], ce protocole est unique et applicable pour les sédiments marins et continentaux [78].

○ Installations de Stockage Des Sédiments de dragage

Pour établir le caractère inerte ou non des sédiments de dragage, des analyses environnementales déterminées par le test de lixiviation normalisée NF EN 12457-2 [79] avec un rapport liquide solide (L/S) égal à 10 doivent être réalisées sur le lixiviat des sédiments de dragage [32] ainsi que des analyses sur les sédiments bruts. Les teneurs en contaminants obtenues sont comparées aux valeurs limites représentées sur le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Les sédiments sont classés inertes s'ils respectent les seuils définis par l'arrêté du 28 octobre 2010 remplacé par l'arrêté du 12 décembre 2014 relatif aux Installation de Stockage de Déchets Inertes (ISDI). Deux autres classes sont distinguées :

- Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND) : les ISDND sont réglementées par Arrêté du 9 septembre 1997 modifié par l'arrêté du 12 mars 2012 puis

** Décret n°2011-828 du 11 juillet 2011 - art. 8.

par l'arrêté du 15 février 2016. Si les déchets de cette catégorie ne répondent pas aux critères d'acceptabilité des Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI), ils représentent un caractère non dangereux non inerte [67].

- Installations de Stockage de Déchets Dangereux (ISDD) : les déchets sont classés en ISDD selon l'arrêté du 30 décembre 2002 modifié par l'arrêté du 10 octobre 2012.

De nouvelles dispositions réglementaires relatives aux sédiments de dragage ont été mise en place par l'arrêté du 15 février 2016 fixant les limites spécifiques aux Installations de Stockage De Sédiments (ISDS) (**Tableau 1- 9**).

La **Figure 1- 4** récapitule les modalités d'évaluation de la dangerosité et du caractère inerte des sédiments de dragage pour leur gestion à terre [65,80].

Tableau 1- 9. Valeurs limites déterminants les critères d'acceptabilité des Installations de Stockage [67].

Paramètres	Seuils Stockage de Déchets Inertes (ISDI)*	Seuils Stockage de Déchets Non-Dangereux (ISDND)**	Seuils Stockage de Déchets Dangereux (ISDD)***	Seuils Stockage de Sédiment Dangereux (ISDS)****
Éluât NF EN 12457-2 (2002) (mg/l)				
As	0,5	2	25	2
Ba	20	100	300	100
Cd	0,04	1	5	1
Cr total	0,5	10	70	10
Cu	2	50	100	25
Hg	0,01	0,2	2	0,2
Mo	0,5	10	30	10
Ni	0,4	10	40	10
Pb	0,5	10	50	10
Sb	0,06	0,7	5	0,7
Se	0,1	0,5	7	0,5
Zn	4	50	200	50
Chlorures	800	15 000	25 000	15 000
Fluorures	10	150	500	150
Sulfates	1000	20 000	50 000	20 000
Indice phénols	1	3	1000	-
Fraction soluble	4000	60 000	100 000	60 000
COT	500	800	1000	800
Contenu total sur brut(mg/kg)				
BTEX	6	-	-	-
HAP	50	-	-	-
HCT	500	2500	50000	-
PCB	1	50	50	-
COT	30 000	50 000	60 000	50 000
Paramètres physiques				
Siccité	>30%	>30%	>30%	-
Température	< 60°C	< 60°C	< 60°C	-
pH	-	≥ 6	Entre 4 et 13	≥ 6

* Arrêté du 28 octobre 2010 abrogé et remplacé par l'arrêté du 12 décembre 2014.

** Arrêté du 9 septembre 1997 modifié par arrêté du 12 mars 2012, modifié par l'arrêté du 15 février 2016.

*** Arrêté du 30 décembre 2002 modifié par l'arrêté du 10 octobre 2012.

**** Arrêté du 15 février 2016 relatif aux Installations de Stockage de Déchets de Sédiments.

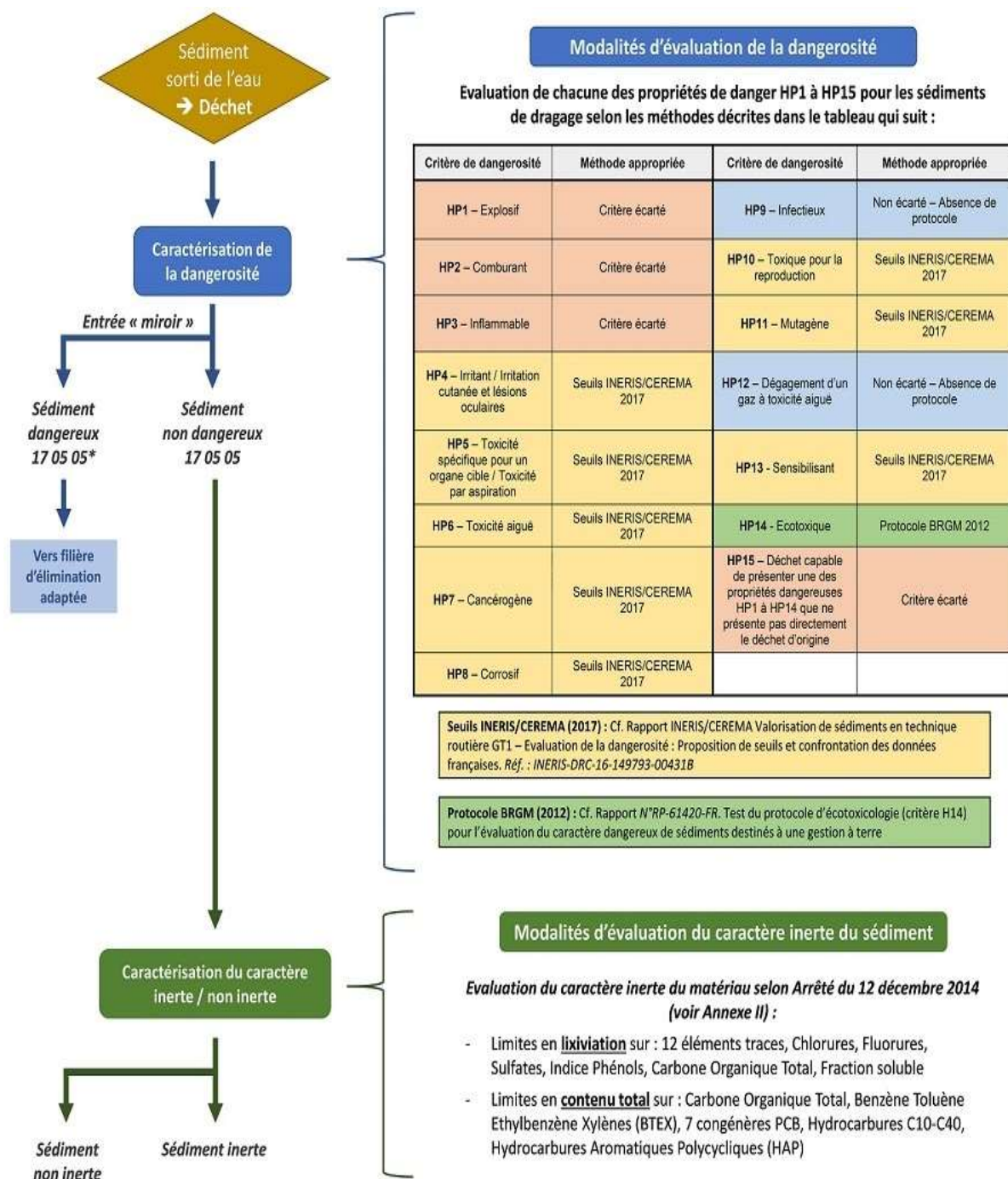


Figure 1- 4. Critères d'évaluation du caractère inerte et de dangerosité des sédiments de dragage pour une gestion à terre [80].

1.6.5 Filières de valorisation des sédiments de dragage dans le domaine du génie civil

Le secteur du BTP est le plus grand consommateur de ressources naturelles. En effet, environ 17,8 milliards de m³ de matières premières sont extraites chaque année pour la production de granulats, à l'échelle mondiale. Ces quantités importantes équivalent au volume d'une pyramide de 3,8 km de base et de hauteur [81].

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

Lorsque l'immersion/la mise en suspension des sédiments de dragage dans les milieux aquatiques n'est pas envisageable, des mesures spécifiques doivent être prises pour la gestion à terre de ces derniers, soit pour leur stockage soit pour leur orientation vers des voies de valorisation (par manque d'espace pour l'installation de stockage de ces sédiments). L'intégration des sédiments de dragage dans les filières du génie civil comme matières premières secondaires fait désormais l'objet de réflexion des scientifiques et des industriels. En effet, la valorisation des sédiments de dragage semble une solution prometteuse pour combler la demande croissante du marché en matériaux de construction et préserver les ressources naturelles. À cet égard, plusieurs études ont été menées dans diverses filières de valorisation [3,25,27,66,75,82–86].

Il est important de rappeler tout d'abord qu'avant d'envisager une valorisation des sédiments dans une filière précise, les sédiments de dragage doivent présenter un niveau de performance adéquat et s'assurer aussi de leur innocuité environnementale vis-à-vis du milieu concerné.

Diverses filières ont été abordées pour le recyclage et le réemploi des sédiments de dragage, autre que le génie civil, comme le domaine de l'agriculture et le domaine artisanal. En Algérie et en l'absence de réglementation concernant les boues de dragage, le rejet dans les cours d'eau ou le stockage en aval des barrages est généralement l'unique remède au devenir de ses produits de dragage, tout en négligeant l'aspect esthétique et l'impact environnemental [87]. Toutefois, Remini et al [87–89] étaient parmi les pionniers qui ont proposé plusieurs voies de valorisation pour l'élimination des sédiments fins par leur introduction dans la fabrication de la brique, de la tuile, la poterie ainsi que l'amendement des sols, depuis environ 30 ans (Figure 1- 5).

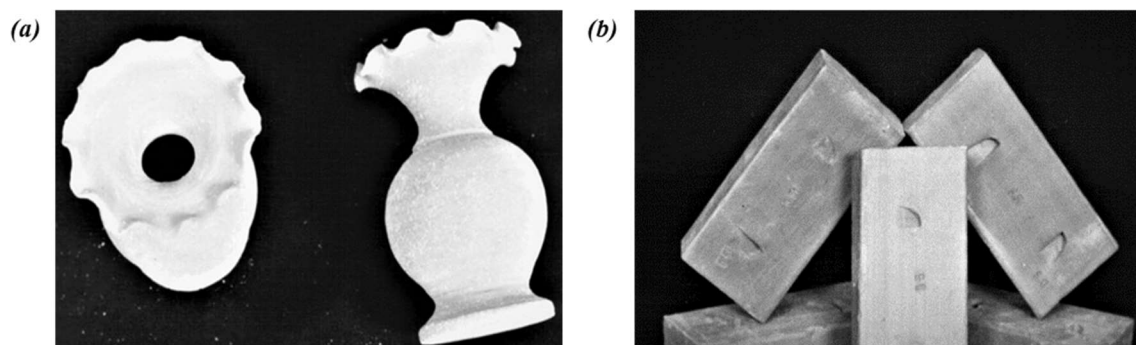


Figure 1- 5. Exemple sur la valorisation des sédiments du barrage d'Oued Lekhel: (a) dans le domaine de la poterie, (b) pour la réalisation des briques [87].

o Valorisation des sédiments comme addition minérale dans les matrices cimentaires

En Algérie, l'industrie cimentaire est confrontée à l'accroissement énorme de la demande du marché, estimé en 2020, à moins de la capacité de la production nationale [90]. Cette production a atteint les 40 millions de tonnes par an en 2020 [91]. En outre, la production du ciment est responsable de l'émission de 5-8% des émissions mondiales de gaz à effet de serre [6,7].

Face aux enjeux climatiques, d'une part, et devant l'obligation de couvrir la demande du marché d'une autre part, principalement dans les pays en cours de développement [82], l'incorporation des sédiments fins (fluviaux, marins ou de barrage) comme addition minérale dans les ciments pour la formulation des bétons et des mortiers a fait l'objet de plusieurs études antérieures [3,4,19,20,83,85,92–94].

Benzerzour et al, Laoufi et al et Bellara et al [3,4,19,20] ont montré qu'un traitement thermique par calcination à 750°C, (750°C, 850°C et 950°C), 750°C et 800°C, respectivement, suivi d'un traitement physique par broyage entraîne un pouvoir pouzzolanique. Le traitement thermique confère à la fraction argileuse présente dans la composition des sédiments une structure amorphe donnant naissance à des produits hydratés en présence d'eau (H₂O) et de la portlandite (Ca(OH)₂) [45]. Tandis qu'une structure stable empêche toute réaction avec la chaux de se produire [95]. Ceci a été confirmé par la consommation de la portlandite (CH) à travers des analyses thermogravimétriques [65], la **Figure 1- 6** représente des exemples de sédiments calcinés et broyés.

Des effets ont été également remarqués sur la résistance à la compression et la porosité totale du béton et des mortiers formulés à base de sédiments. En effet, les mortiers confectionnés avec l'ajout de 15% de sédiments calcinés par Bellara et al [82] présentent de meilleures résistances à la compression à 90 jours par rapport à celles obtenues par le témoin. Ce même comportement a été observé par Benzerzour et al [4]. La résistance à la compression du mortier composé avec 10% de sédiments en remplacement au ciment, était 10% supérieur à celle du mortier de référence, après seulement 28 jours. De même, l'incorporation jusqu'à 20% de sédiments dans le béton par Safhi et al [96] a montré une résistance à la compression comparable à celle obtenue sur le béton témoin.

Une diminution de la taille maximale des pores (appelée aussi diamètre critique) a été observée à partir du 28^{ème} jour sur des mortiers préparés avec l'addition de 10 et 15% de

sédiments calcinés par Bellara et al. [82]. Aussi, Il a été constaté par Safhi et al [97] que l'ajout des sédiments traités en substitution du ciment dans la formulation de béton autoplaçant (10 et 20%) raffine le réseau poreux et conduit à une diminution de la macroporosité par la forte réaction pouzzolanique des sédiments de Dunkerque.

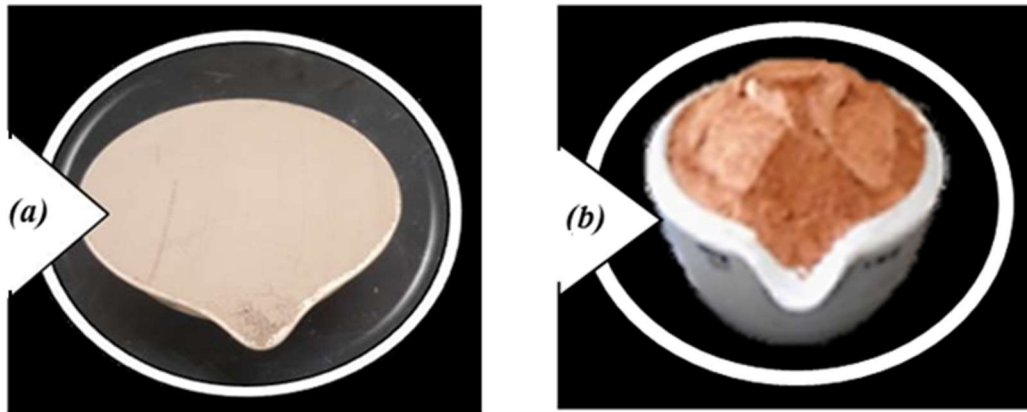


Figure 1- 6. Sédiments calcinés et finement broyés (a) à 800C°[96], (b) à 750C° [98].

L'intégration des sédiments de dragage en remplacement partiel du ciment dans les matrices cimentaires et l'élaboration de nouveaux liants à faible émission de gaz à effet de serre ont été approuvées par plusieurs scientifiques à travers de nombreux travaux. En effet, l'ajout de sédiments contribue favorablement à l'amélioration et la densification de la microstructure des matrices cimentaires et des bétons ainsi que l'augmentation de leur durabilité.

o Valorisation des sédiments dans la fabrication des briques

Plusieurs études se sont orientées vers la fabrication des briques à base de sédiments de dragage (quelques exemples dans la **Figure 1- 7**) [35,99,100]. L'utilisation des sédiments de dragage portuaires de Tanger et de Large (nord du Maroc) en tant que constituant de la brique cuite (avec des taux de substitution allant jusqu'à 70%) a été évaluée à l'échelle du laboratoire. Ben Allal et al [101] ont indiqué que la composition chimique des deux sédiments de l'étude est proche de celle utilisé par la briqueterie Al Andalous, et en accord avec la norme (**AFNOR, 1983**). Sur la base des essais mécaniques, il a été démontré que les performances techniques obtenues sur les briques confectionnées à partir des sédiments du port de Larache (jusqu'à un remplacement de 40%) sont comparables aux témoins.

Il a été établi par Benyerou et al [102], qu'une substitution de 5 et 10% des sédiments du port de Bethioua (Oran, Algérie) en remplacement d'argile pour la fabrication de la brique cuite, améliore considérablement les résistances en compression simple, pour une faible

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

température de cuisson (600°C) par rapport à la brique de référence (900°C). Ceci a été attribué à leur composition chimique renfermant un pourcentage important de Na₂O et de K₂O pour la formulation avec 5% de sédiments portuaires. Le même comportement a été confirmé par Slimanou et al [103] sur l'utilisation des sédiments du port de Bejaia. En effet, une augmentation atteignant jusqu'à 127,7 MPa avec un taux de substitution optimale de 20%.



Figure 1- 7. (a). Briques cuites à base de sédiments du port de Bethioua [104], **(b) BTC,** **(c)** briques cuites à base de sédiments du barrage de Bouhanifia [75].

D'après Serbah et al [105], les sédiments du barrage de Bakhadda ne peuvent pas être utilisés à l'état brut pour la fabrication des briques de terre crue compressées BTC. L'ajout de 30% d'un sable naturel (fraction 0-4 mm) paraît donc nécessaire pour leur valorisation. En revanche, une augmentation de l'énergie de compactage à une énergie correspondante à l'énergie Proctor modifiée + 25 coups a été appliquée pour atteindre des performances mécaniques satisfaisantes en matière de résistance en compression simple (supérieures ou égale à 1,6 MPa) recommandé par la norme XP P13-901 [106] pour la fabrication des BTC.

o Valorisation des sédiments en granulats

Le potentiel de valorisation des sédiments de dragage en tant que granulats en substitution des granulats naturels ou du sable pour la fabrication du béton, mortier ou autres a été exploré par plusieurs auteurs [107–109],

Said et al [109] ont réussi le passage de l'échelle du laboratoire à une échelle industrielle pour la fabrication des pavés à base des sédiments portuaires de Rades en remplacement du sable quartzeux (fraction 0-3 mm), avec un taux de substitution de 19%. La valorisation des sédiments dans le cadre de ce travail est une première pour le secteur industriel en Tunisie. Les résistances en compression obtenues par Kazi Aoul et al [110] sur des mortiers confectionnés par l'incorporation de 20% de sédiments du port d'Oran, présentent une certaine similitude avec

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

le mortier témoin ainsi qu'une meilleure résistance à l'attaque acide. En effet, l'utilisation des sédiments portuaires d'Oran, semble une bonne alternative aux sables, en termes de résistance et de durabilité. L'introduction de 30% de granulats légers formulés par l'ajout de 70% de sédiments marins de Dunkerque en substitution du sable naturel (**Figure 1- 8**) dans la formulation des mortiers par Ennahal et al [111], a donné des performances mécaniques satisfaisantes avec une faible perméabilité à l'eau, comparées à celles obtenues sur les mortiers de référence.

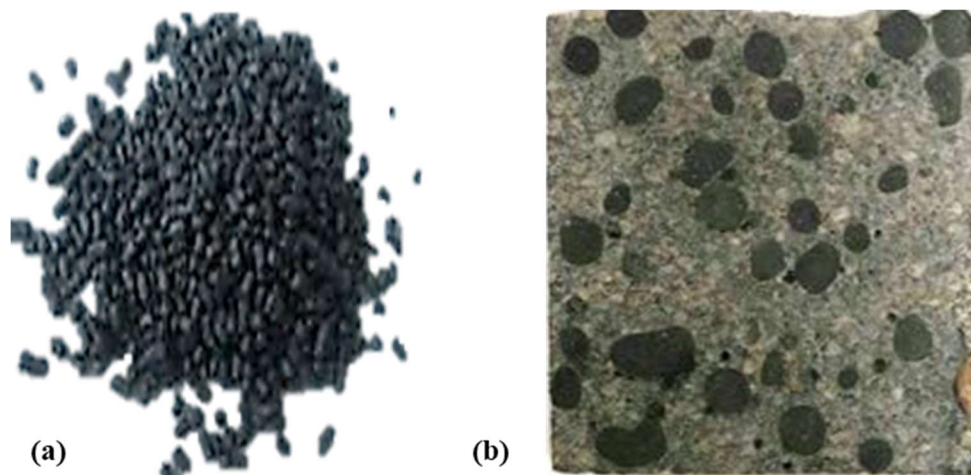


Figure 1- 8. (a) Granulats légers à base de sédiments, (b) mortier formulé avec l'ajout des granulats légers (coupe transversale) [108].

Des accropodes en béton pour protéger les structures maritimes ont été également conçus par Achour et al [112] avec une substitution correspondante à 12,5 et 20% des mêmes sédiments bruts, les deux mélanges présentent des performances mécaniques suffisantes. Néanmoins, la formulation avec 12,5% de sédiments semble être la plus appropriée vis-à-vis de la durabilité. En effet, les résultats montrent de meilleures résistances aux expositions des attaques sulfatiques externes.

Bedaa [65] de son côté, a souligné que la valorisation de 30% de la fraction fine des sédiments franciliens comme alternative aux sables affecte les propriétés d'un béton : un retard de prise accompagné d'une diminution de la résistance en compression simple et un accroissement des déformations de retrait.

o Valorisation des sédiments en techniques routières

La réalisation d'ouvrages et de travaux routiers nécessite d'énormes quantités de matériaux de construction et plus précisément d'agrégats. En effet, le besoin en ces matériaux augmente au fil du temps aux niveaux national et international. Selon le bilan de 2009 des réalisations du secteur de l'énergie et des mines, la production des agrégats en Algérie était de 41,6 millions de m³, en 2008. Elle a ensuite connu une augmentation de 27% en seulement une année [113] (**Figure 1- 9**). En France, par exemple, la consommation des granulats, est estimée à 453 millions de tonnes selon les chiffres des dernières statistiques de l'année 2019, dont 64% de ses matériaux sont destinés principalement aux travaux routiers et ferroviaires, VRD et endiguement (**Figure 1- 9**). Par ailleurs, une légère hausse de 2% de la production a été enregistrée par rapport à l'année 2018 [42]. Devant la faible disponibilité des matériaux locaux (agrégats) répondant aux critères de qualité d'une part et le coût excessif de ces derniers d'autre part et par souci de préservation des ressources naturelles, de nombreuses recherches ont été réalisées pour mettre à la disposition de ces secteurs stratégiques de nouveaux matériaux alternatifs, à condition qu'ils soient en conformité aux exigences techniques et environnementales. À cet effet, différents systèmes de classification existent.

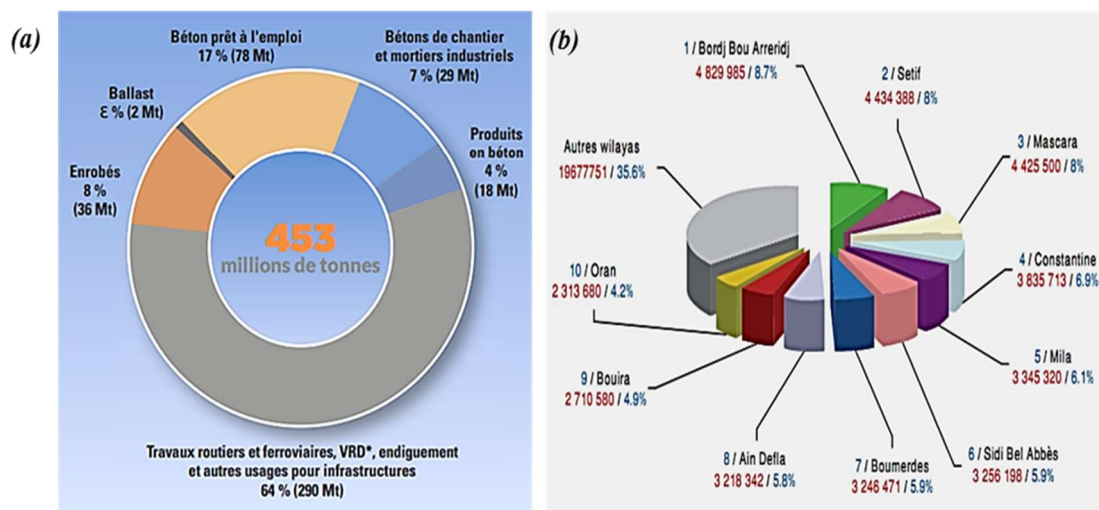


Figure 1- 9. (a) Consommation des granulats en France pour l'année 2018 [114], (b) quantités d'agrégats produits par 10 wilayas en Algérie pour l'année 2009 [115].

❖ Aperçu de la structure d'une chaussée routière

Une structure routière traditionnelle est composée généralement, de haut vers le bas, de la chaussée comportant 2 couches de surface (couche de roulement et couche de liaison) et deux couches d'assise (couche de base et couche de fondation), et d'une plate-forme support de

chaussée, composée elle-même d'une couche de forme (éventuellement, en fonction de la qualité du sol support s'il répond ou non aux exigences requises) et du sol support (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Le rôle d'une chaussée consiste à assurer une bonne résistance aux sollicitations climatiques et celles induites par le trafic routier sous forme de pressions pouvant engendrer diverses déformations, ainsi que la transmission et la bonne répartition de ces charges jusqu'à la plateforme support.

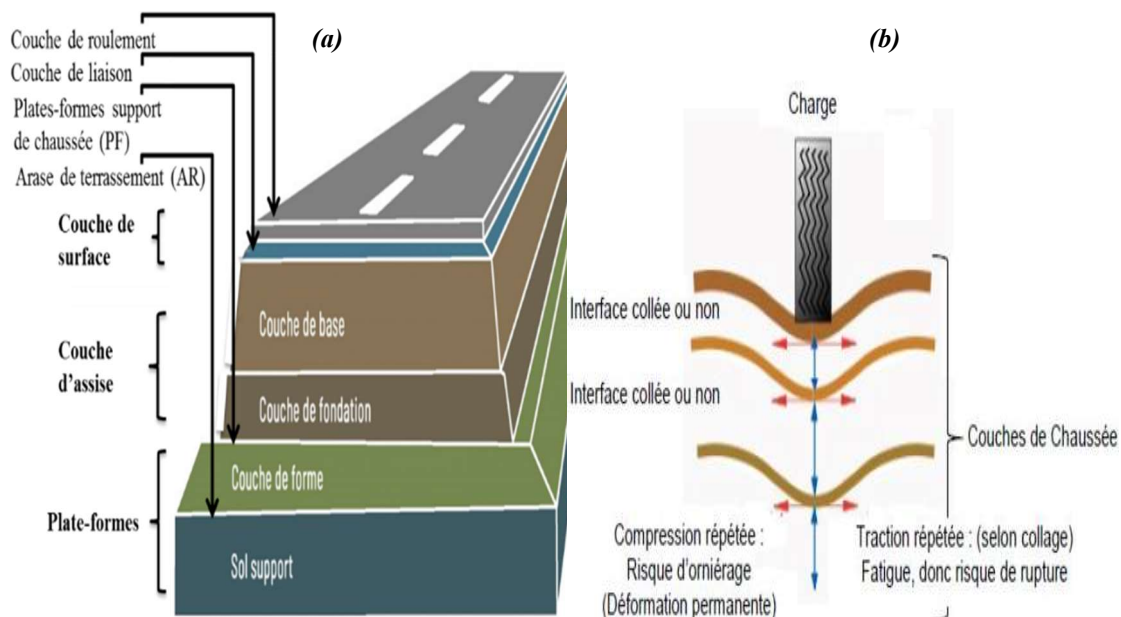

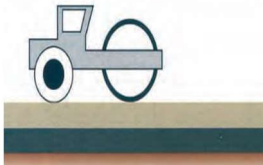

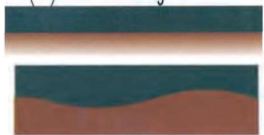
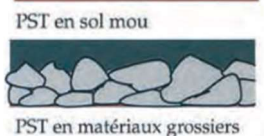


Figure 1- 10. (a) Structure d'une chaussée routière, (b) comportement de chaussée sous sollicitations [30,116].

❖ Conception d'une couche de forme et ses fonctionnalités

La couche de forme est une couche de transition entre le sol support (naturel, en déblai ou en remblai) et le corps de la chaussée (couches d'assise et couche de surface). Les différentes fonctions de la couche de forme en phase de réalisation (à court terme) ou lorsque la chaussée est en service (à long terme) représentées dans le guide technique de réalisation des remblais et des couches de forme [30] sont répertoriées dans le **Tableau 1- 10** suivant :

Tableau 1- 10. Fonctionnalités de la couche de forme à court et à long terme selon le GTR [30].

Rôle d'une couche de forme		
A court terme		Assurer : La traficabilité des engins en phase de chantier,
		Un bon compactage de la couche de fondation,
		Une étanchéité pour le sol support vis-à-vis des intempéries,
		Satisfaire les exigences de nivellement.
		
A long terme	<p>Homogénéisation de la portance de la plate-forme support pour concevoir des chaussées d'épaisseur constante,</p> <p>Maintenir une portance suffisante, en dépit des variations de l'état hydrique du sol support sensible à l'eau, ainsi que la protection des sols support gélifs,</p> <p>Contribution au drainage de la chaussée.</p>	

❖ **Caractérisation et classification géotechnique des sédiments en vue d'une valorisation en couche de forme selon le GTR [30]**

La connaissance des paramètres géotechniques gouvernant le comportement des sédiments est indispensable à leur identification, trois grandes catégories sont distinguées :

- **Des paramètres de nature** : ces caractéristiques sont liées à l'origine des sédiments :

Granularité : les classes de sédiments fins, grossiers ou mixtes sont attribuées aux sédiments selon la grosseur des éléments rentrant dans leur composition.

Argilosité : la quantité d'argiles contenue dans les sédiments et l'activité argileuse sont déterminées par deux types de paramètres, l'indice de plasticité **Ip** sur la fraction 0/0,4 mm et la valeur de bleu de méthylène **VBS** sur la fraction 0/2 mm

Ces deux paramètres de granularité et d'argilosité permettent aux sédiments le classement en quatre grandes catégories définies par le guide technique de réalisation des

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

remblais et des couches de forme GTR et la norme NF P 11-300 [30,117], comme représenté sur la **Figure 1- 11**.

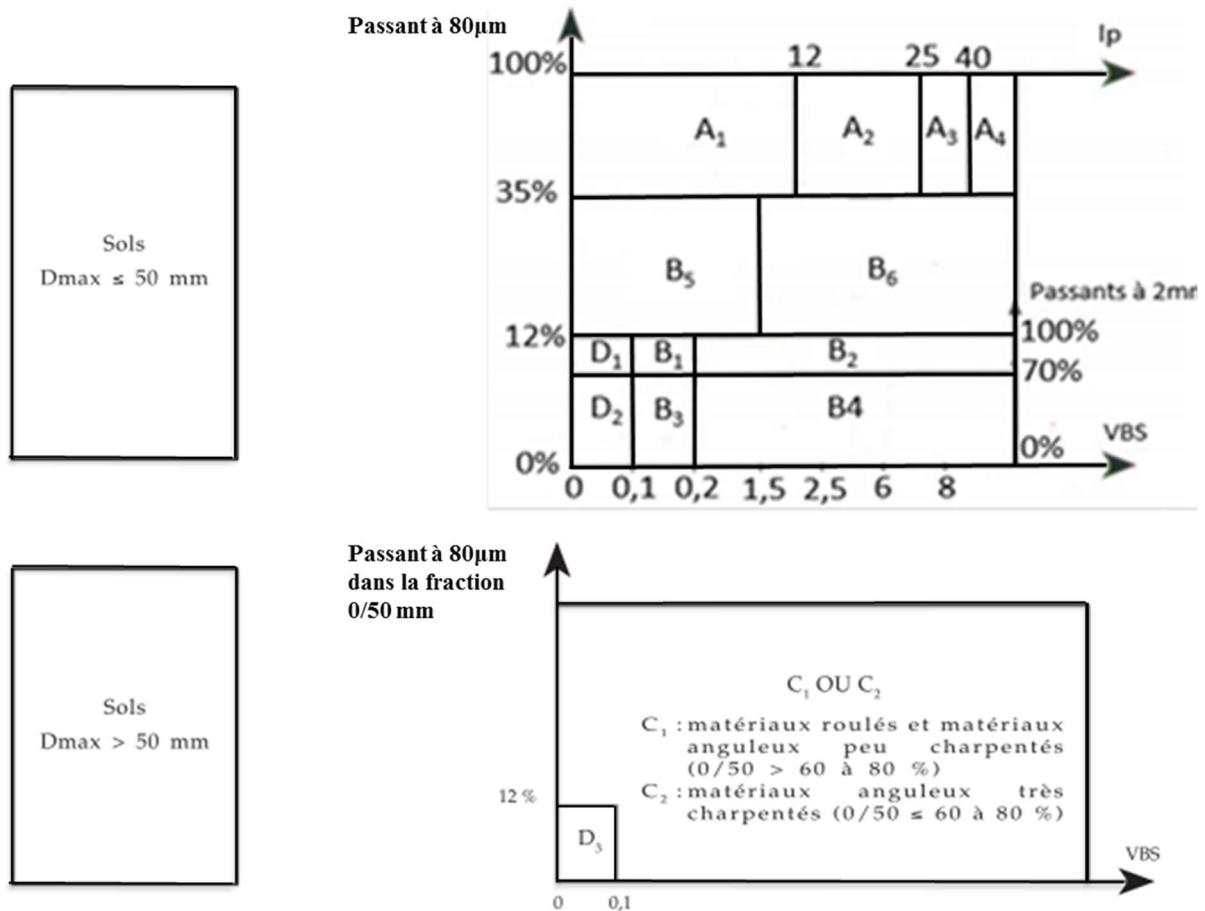


Figure 1- 11. Classification des matériaux en fonction des paramètres de nature selon le GTR et la norme NF P 11-300 [30,117].

- Des paramètres d'état :

Ce paramètre dépend de l'environnement dans lequel le matériau se trouve, l'état hydrique est le seul paramètre pris en considération dans la présente classification, et est déterminé à travers l'un des paramètres suivants :

La position de la teneur en eau naturelle (W_{nat}) de la fraction 0/20 par rapport à l'optimum Proctor normal (W_{OPN}),

La position de la teneur en eau naturelle (W_{nat}) par rapport à l'indice de consistance (I_c) (paramètre déterminé par les limites d'Atterberg), ou l'indice portant immédiat (IPI).

- **Des paramètres de comportement mécaniques :**

Afin d'apprécier la sensibilité des sols grenus à la fragmentabilité et à l'usure nous distinguons les paramètres suivants : la valeur micro-Deval en présence d'eau (**MDE**), la valeur Los Angles (**LA**) et le coefficient de friabilité des sables (**FS**).

❖ **Quel type de traitement nécessitent les sédiments destinés à une application en couche de forme d'infrastructure routière ?**

Plusieurs paramètres doivent être vérifiés avant d'envisager l'utilisation des sédiments en couche de forme, ces paramètres doivent répondre aux critères de jugement vis-à-vis des caractéristiques mécaniques à court et à long terme. Dans le cas où les sédiments n'atteignent pas les valeurs minimales requises et un niveau suffisant en termes de performances mécaniques prescrits par le Guide Technique de réalisation des Remblais et des couches de forme GTR [3], un traitement de ces derniers s'impose suivant les recommandations définies par le guide technique de traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques GTS [31] (**Figure 1-12**).

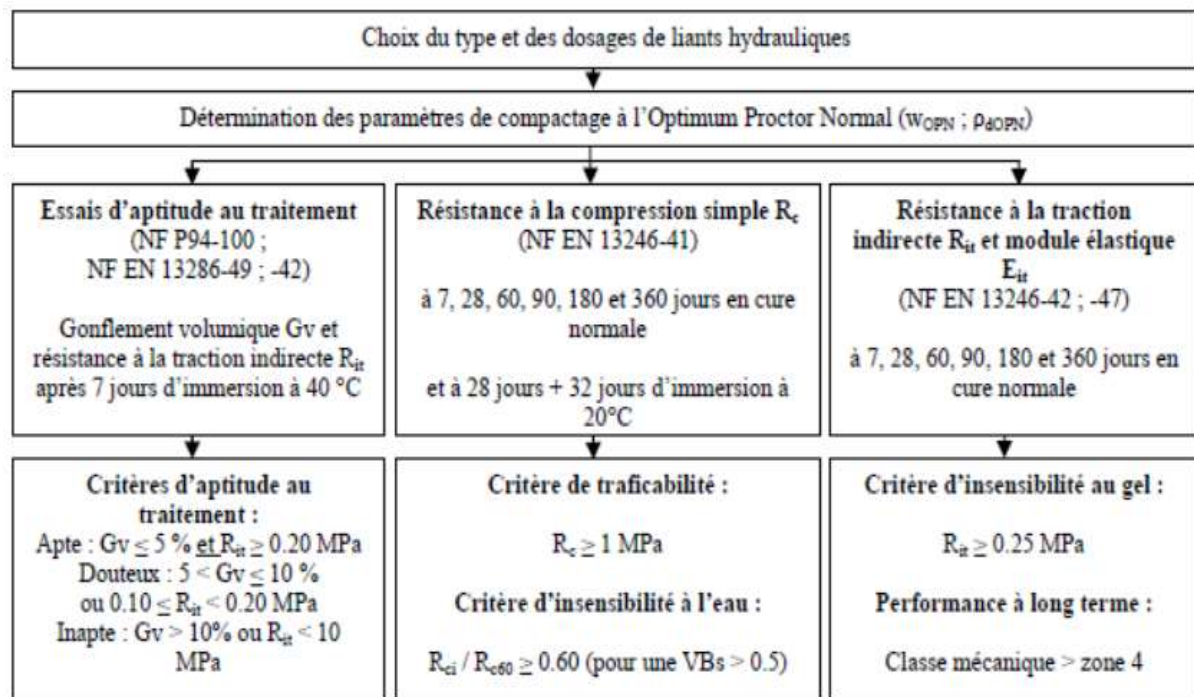


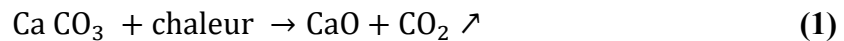
Figure 1- 12. Organigramme de la démarche d'utilisation d'un matériau traité en couche de forme [118].

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

Les différents traitements les plus constamment abordés dans la littérature [22,25,26,31,54] sont présentés ci-après :

- Traitement à la chaux seule

La chaux aérienne est le type de chaux généralement employé pour la stabilisation des sols en techniques routières, elle est issue de l'opération de décarbonations du calcaire pur par calcination à haute température (environ 900°C) suivant la formule (1),



Le traitement à la chaux est plus adapté pour les sols comportant une teneur non négligeable en fraction fine [36], et peut exister sous trois états (chaux vive, chaux éteinte ou lait de chaux). Son introduction au sein des sédiments entraîne deux types de réactions rapide, responsables à l'enclenchement des effets immédiats et lents. Les différentes modifications apportées par l'apport de chaux sont :

- La modification de l'état hydrique, en effet, l'hydratation de la chaux vive en portlandite est accompagnée d'une réaction fortement exothermique (2) conduisant à la diminution de l'ordre de 1% de leur teneur en eau pour chaque 1% de chaux ajouté [119].



- Modification des caractéristiques géotechniques en réaction avec les minéraux argileux :

Dès lors son introduction dans la matrice sédimentaire et dès leur contact avec de l'eau, les champs électriques inter-particulaires des sédiments sont modifiés, un échange entre les cations Ca^{2+} et OH^- fournit par l'hydratation de la chaux et les ions alcalins (Na^+ , K^+ ,...) présents dans la formation argileuse entraîne la floculation/agglomération des particules [26,32,120], ces floes possèdent une taille moyenne supérieure à 2 μm , plus stable et peu sensible à l'eau [36,121]. Au niveau des caractéristiques géotechniques ce changement peut être interprété par :

- Une amélioration de l'état de consistance des sédiments : l'accroissement de la limite de plasticité non associé ou peu à une modification de la limite de liquidité, permet le passage d'un sol plastique déformable à un sol adapté aux opérations de terrassement [32], **Figure 1-13.**

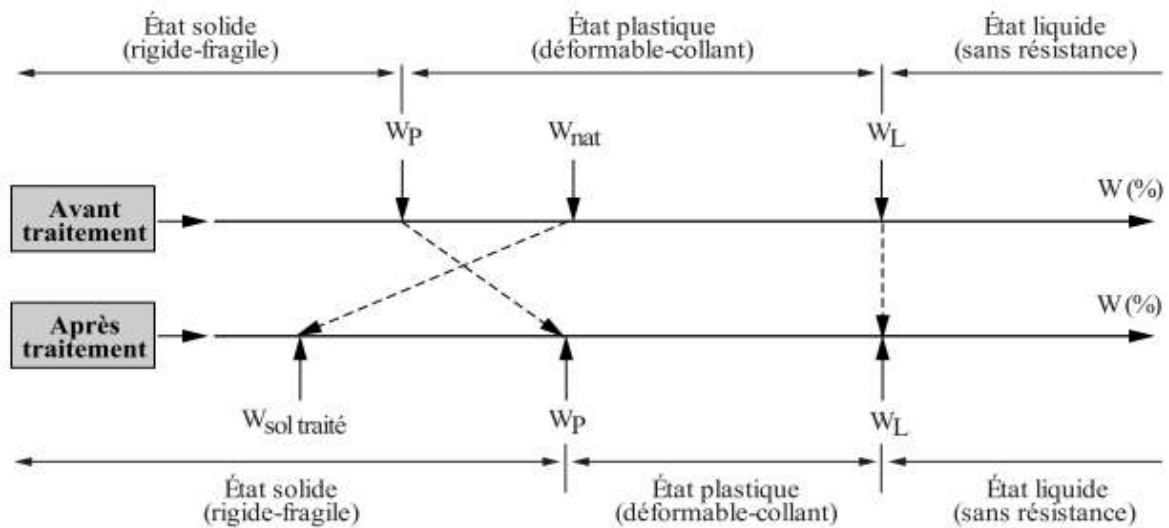


Figure 1- 13. Modifications instantanées apportées par l'ajout de la chaux vive sur le comportement plastique d'un sol fin humide [31].

- Une diminution de la densité sèche maximale parallèle à une augmentation de la teneur en eau optimale comme montré sur la **Figure 1- 14**, et une amélioration de l'indice portant immédiat IPI.

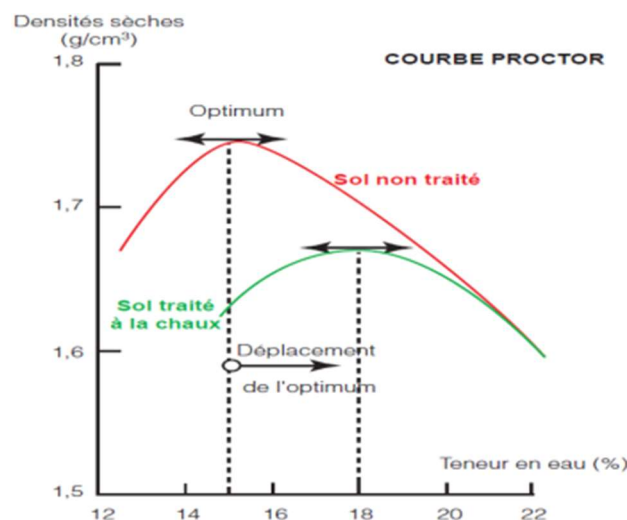


Figure 1- 14. Action de l'apport de la chaux vive sur les caractéristiques optimales de compactage d'un sol [31].

À long terme, la présence de la chaux dans le sol ou les sédiments, contribue à l'augmentation du pH du milieu, qui peut atteindre une valeur élevée de 12,4 [26,47], permettant la mise en solution de la silice et de l'alumine présents dans les particules fine du sol ou des sédiments et la cristallisation de nouveaux produits hydratés qui possède des propriétés liantes (silicates de calcium hydratés C-S-H et aluminates de calcium hydratés C-A-H) [26,32,36], par la combinaison de la chaux et des particules argileuses. Ces nouveaux

hydrates résultent d'une réaction appelée réaction pouzzolanique (**Figure 1- 15**) et est à l'origine des améliorations des résistances mécaniques obtenues à long terme. Cependant, la saturation du mélange traité en chaux est nécessaire à l'activation de la réaction pouzzolanique [26].

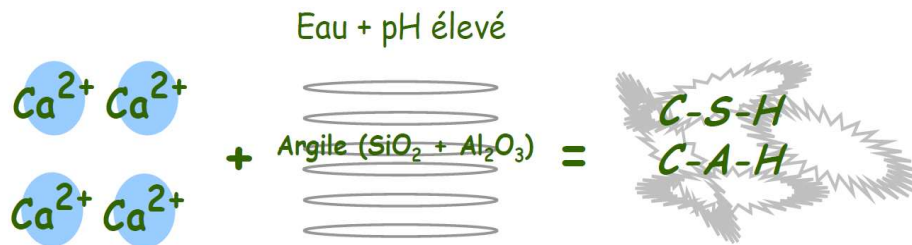


Figure 1- 15. Principe de développement d'une réaction pouzzolanique dans un sol/sédiments [44].

- Traitement au ciment seul

Le ciment portland généralement utilisé pour le traitement des sédiments [27] est un liant hydraulique composé de constituants principaux, principalement le clinker et des constituants secondaires, principalement le gypse (5%). Le clinker est obtenu par la cuisson d'un mélange appelé, cru, composé de 80% de calcaire et 20% d'argile à une très haute température équivalente à 1450°C. Quatre phases anhydres résultent du processus de clinkérisation après broyage et homogénéisation [22,44,121], ces phases font prise et durcit en contact avec l'humidité :

- Silicates tricalciques ou alite : 3CaOSiO_2 (C3S), 50 à 70%,
- Silicates bicalciques ou belite : 2CaOSiO_2 (C2S), 20 à 30%,
- Aluminate tricalcique ou cérite : $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ (C3A), 05 à 12%,
- Aluminoferrite tétracalcique ou ferrite : C4AF, 05 à 12%.

L'introduction du ciment dans un sol ou des sédiments humides provoque un phénomène appelé hydratation ou prise hydraulique accompagnée de la précipitation et la formation de nouveaux composés insolubles, appelés « hydrates » suivant les quatre phases suivantes [44] :

Phase des réactions initiales (gâchage), phase dormante, phase d'accélération et phase de ralentissement (**Figure 1- 16**).

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

Il est à noter qu'après 28 jours, la pâte de ciment atteint les deux-tiers de son hydratation et la vitesse de cette dernière ralentis [44,120]. En revanche, L'hydratation totale du ciment peut aller jusqu'à une année [50].

Les silicates tricalciques (C3S) et les silicates bicalciques (C2S) sont principalement les deux composés responsables à la formation des hydrates (C-S-H et CH) participant aux développements des résistances mécaniques du mélange, leur hydratation s'effectue suivant des réactions similaires (3) et (4) à des cinétiques différentes (plus lente pour la bélite avec une faible quantité de portlandite) [120].

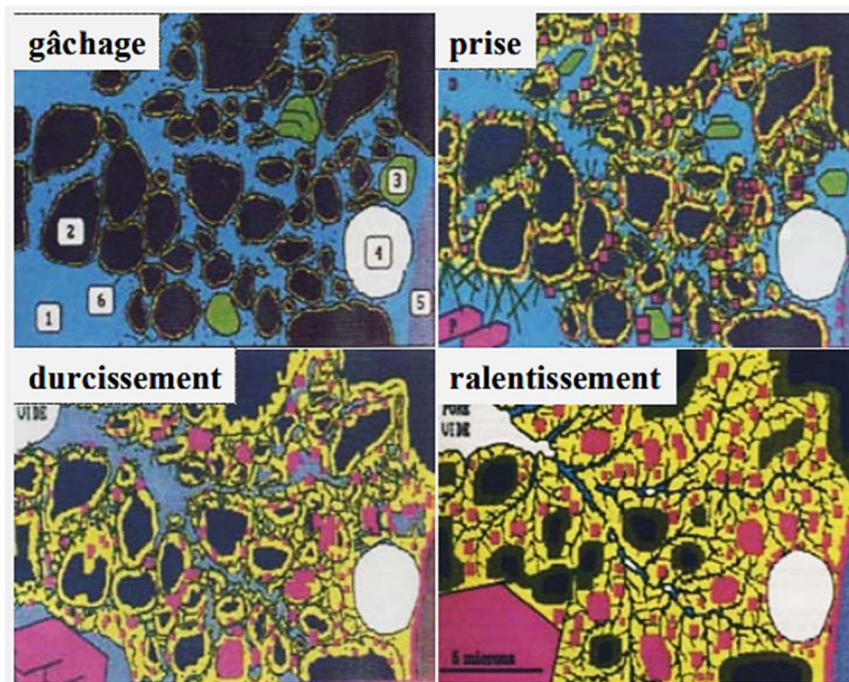
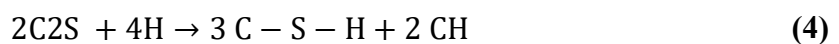
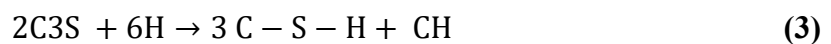


Figure 1- 16. Mécanismes d'hydratation du ciment (microstructure d'un mortier) [122].

1-Eau, 2-clinker, 3-gypse, 4-bulle d'air, 5-grains de sable, 6-hydrates C-S-H.



Avec :

H= H₂O, C= CaO et S= SiO₂.

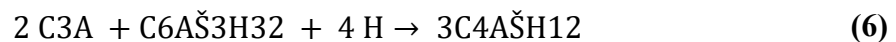
Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

L'aluminat de calcium est à l'origine des résistances initiales par la formation des hydrates C-A-H. En présence du sulfate de calcium présent dans le gypse, il se combine avec l'aluminat de calcium pour donner naissance à des espèces cristallines sous formes d'aiguilles appelées « ettringite », suivant la réaction (5) [50] :



Avec : A= Al₂O₃ et \check{S} = SO₃,

Similairement à l'aluminat de calcium, la ferrite (C4AF) entre en réaction les sulfates de calcium et contribuent à la réaction de l'ettringite, selon le même mécanisme de réaction, plus lentement. Dans ce cas-là, L'aluminium est remplacé partiellement par le fer. Lorsque la totalité du gypse est consommée, l'ettringite se dissout partiellement et réagit avec aluminat de calcium (C3A) pour former des monosulfoaluminates de calcium hydratés « thaumasite » [27] suivant la réaction (6) :



- Traitement aux liants hydrauliques routiers

L'utilisation des liants hydrauliques routiers est destinée aux traitements des sols ou traitement des granulats, elle vient en alternative aux liants hydrauliques classiques (ciment) [123]. En fait, ces liants détiennent les mêmes réactions chimiques, dues aux phénomènes de prise, que le ciment mais à cinétiques différentes et spécifiques (plus lente) [31]. Leur utilisation est plus économique que le ciment, puisqu'ils sont généralement fabriqués (en majeure partie) de co-produits industriels (laitiers, pouzzolanes, cendres volantes, etc.) et semble plus appropriée pour des opérations de terrassement des structures routières, ferroviaires, aéroportuaires et autres types d'infrastructures, réalisation des remblais, des couches de forme, couches de base et les couches de fondation [47,124,125].

En France, la mise en œuvre des liants hydrauliques routiers (LHR) est récente, en effet, leur apparition date des années 1980, seulement. Deux types de liants hydrauliques routiers (LHR-R et LHR-N) sont élaborés en usine et distribués sous forme d'une poudre fine et homogène, composé de divers constituants. Le processus de fabrication de ces deux liants est contrôlé et encadré par deux documents normatifs :

- **NF EN 13282-1** [126] « Liants hydrauliques routiers à durcissement rapide - Composition, spécifications et critères de conformité », ce type de LHR est issu d'une expérience Allemande.

- **NF EN 13282-2** [125] « Liants hydrauliques routiers à durcissement normal - Composition, spécifications et critères de conformité », ce type de LHR est issu d'une expérience Française.

À l'encontre des LHR-N issus de l'expérience Française, les LHR-R sont issus de l'expérience Allemande. Les LHR pouvant être différenciés des ciments par des caractéristiques [127] qui présentent des avantages tant sur le plan technique que sur le plan économique et écologique :

- Leur composition qui contient une teneur faible en clinker, permet la préservation des ressources naturelles, et conduit à moins d'émission de gaz à effets de serre,
- Leur finesse supérieure comparativement à celle des ciments : 2800 à 3500 cm^2/g pour les LHR et 3000 à 5500 cm^2/g pour les ciments,
- Leur cout de production plus faible et plus compétitif, en raison de l'utilisation minime du clinker et de l'intégration des sous-produits industriels qui ne nécessitent pas de cuisson.
- Leur facilité d'usage (délai de maniabilité adapté aux matériaux des travaux routiers).

L'utilisation des liants (hydrauliques ou aériens) seuls ou conjointement pour le traitement des sédiments confère l'amélioration de leurs performances mécaniques, ils s'appliquent pour des procédés de stabilisation et de solidification afin de limiter tout risque environnemental par lixiviation et rejet de contaminants éventuellement présents dans les sédiments [120].

▪ **Composition des LHR à durcissement normal** [126]

L'élaboration des liants hydrauliques routiers fait appel à l'emploi des sous-produits industriels de différentes natures. Ils sont composés conformément à la norme NF EN 197-1 [128] :

→ Des constituants principaux : Clinker (K), laitiers granulés de hauts-fourneaux (S), les pouzzolanes naturelles (Z), cendres volantes siliceuses (V) et calciques (W), schistes calcinés (T), calcaire (L), cendres volantes siliceuses de lit fluidisé (Va) et cendres volantes

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

calciques non éteintes (Wa), cendre de boue de papier (WP), laitier cristallisé de convertisseur à oxygène (Sb), chaux calcaïque (CL) et chaux hydraulique naturelle (NHL).

→ Des constituants secondaires : les constituants secondaires sont présents en faible proportion, inférieure ou égale à 10% en masse au total.

→ Sulfate de calcium (Cs) : un ajout de sulfate de calcium (gypse) à moins de 1% pendant la fabrication de liants hydrauliques routiers est possible.

▪ Exigences et cahier des charges vis-à-vis des caractéristiques physico-chimiques et des performances mécaniques pour les LHR-N

La norme NF EN 13282-2 [125] spécifique aux liants hydrauliques routiers à durcissement normal définit la proportion maximale de chaque constituant principale à 40%, dont les laitiers de hauts-fourneaux. En termes de performances mécaniques, quatre classes de résistance sont déterminées par la NF EN 13282-2 en fonction de la résistance à la compression obtenue à 56 jours sur des mortiers normalisés, préparés et conservés suivant les spécifications de la norme NF EN 196-1 [129]. Les résistances relatives à chaque classe, les exigences chimiques et physiques sont répertoriées dans le **Tableau 1- 11**.

Tableau 1- 11. Exigences requises pour les liants hydrauliques routiers à durcissement normal définis par la norme NF EN 13282-2 [125].

Exigences mécaniques NF EN 196-1		Exigences physiques NF EN 196-6, 3			
Classe de résistance	Résistance en compression simple à 56 jours (MPa)		Finesse (%) Refus à 90µm	Temps de début de prise (min)	Expansion (mm)
	N1	≥ 2,50	≤ 22,50	≤ 15,00	≥ 150,00
N2	≥ 12,50	≤ 32,50	Exigences chimiques NF EN 196-2		
N3	≥ 22,50	≤ 42,50			
N4	≥ 32,50	≤ 52,50	Teneur en SO3 (%)		
			4,00		

L'ajout de liants hydrauliques routiers provoque différentes actions instantanées qui consistent en la modification de l'état hydrique de l'ordre de 0,3 à 0,5% par 1% de liant, comme des réactions à moyen et à long terme sur la cinétique de prise [127].

- Ajout d'un correcteur granulaire

La technique d'amendement des sédiments avec un correcteur granulaire pour leur application en techniques routières a été adoptée par de nombreux auteurs, ce traitement vise à améliorer les propriétés physico-mécaniques, spécifiquement la compacité par la diminution de

la porosité et un meilleur arrangement du squelette granulaire [25] et participe ainsi à la densification de la structure.

L'optimisation d'un modèle granulaire avec le minimum de vide et une compacité maximale en appliquant différents modèles notamment le modèle d'empilement compressible, le fuseau optimal de Talbot-Fuller-Thomson (TFT) a fait l'objet d'étude de plusieurs travaux menés par, Maherzi, Kasmi, Tran, Dubois et Miraoui [25,26,36,38,121], l'emploi de ce type de traitement conjointement avec des traitements aux liants (hydrauliques et aériens) a montré son efficacité vis-à-vis des caractéristiques physiques et mécaniques [25,26,121,130,131]. Un accroissement de 40% de la résistance à la compression simple à 28 jours a été observé par Boutouil et al [130]. Bourabah [22] a trouvé que la formulation composée de 70% de sable de carrière (0/4 mm) et de 30% des sédiments du barrage de Cheurfas présente les indices des vides les plus faibles. L'ajout de sable en tant que correcteur du squelette granulaire des sédiments agit alors sur les caractéristiques de compactage du mélange par la diminution de la teneur en eau optimale et l'amélioration de la densité sèche maximale [22].

2. Les laitiers de hauts-fourneaux (LHF)

Les laitiers de hauts-fourneaux sont des déchets sidérurgiques issus de la production de l'acier pendant l'élaboration de la fonte par la transformation des minerais de fer (Erreur ! Source du renvoi introuvable.. (a)). En fonction du procédé de refroidissement adopté, les laitiers de hauts-fourneaux se classent en deux catégories :

- **La famille des laitiers cristallisés, Figure 1- 17.(b),**

Obtenus par refroidissement lent à l'air libre. Cette forme possède de bonnes caractéristiques physiques et mécaniques, ils sont généralement utilisés en tant que granulats. Cependant elle ne présente aucune réaction lors de la mise en contact des LHF avec de l'eau en raison de leur stabilité chimique.

- **La famille des laitiers vitrifiés « granulés », Figure 1- 17.(c)**

Obtenus par refroidissement instantané et très rapide à l'eau pour les laitiers renfermant plus de 80% de verre et à l'air pour les laitiers qui contiennent entre 60 et 80% de verre. Ils se présentent sous forme de particules avec un diamètre allant de 3 jusqu'à 5 mm. En outre, ils sont dotés de caractéristiques hydrauliques latentes.

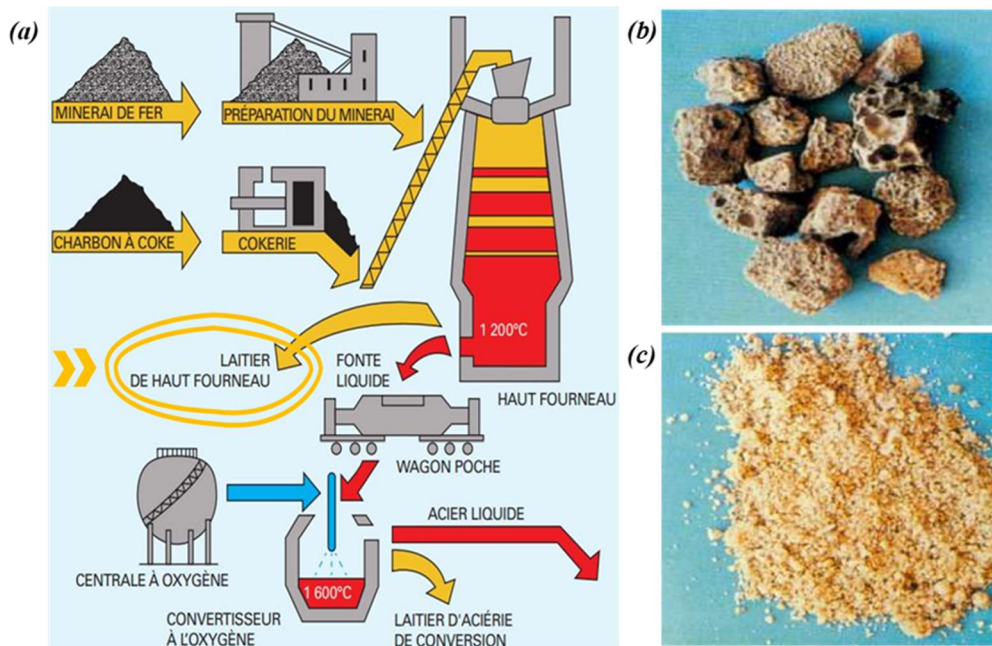


Figure 1- 17. (a) Production du laitier de hauts-fourneaux au cours de la production de l'acier[132], **(b)** Laitier cristallisé, **(c)** laitier vitrifié[133] .

Les laitiers de hauts-fourneaux se composent majoritairement de quatre oxydes à différentes proportions [132], la composition chimique élémentaire moyenne des laitiers Français, par exemple, est présentée ci-dessous [134]:

CaO (chaux) : environs 38 - 46%, SiO₂ (silice) : environs 31 -36%, Al₂O₃ (alumine) : environs 9 - 18%, MgO (magnésium) : environs 4 – 10%.

La **Figure 1- 18** présente la position des laitiers de hauts-fourneaux dans le diagramme ternaire de Keil, par rapport aux liants habituellement utilisés en techniques routières [132]. En fonction de leur teneur en silice, alumine et en chaux, nous pouvons constater la proximité des laitiers et du clinker portland, les deux liants se placent dans la même zone cela explique bien, la similarité des mécanismes d'hydratation des deux liants.

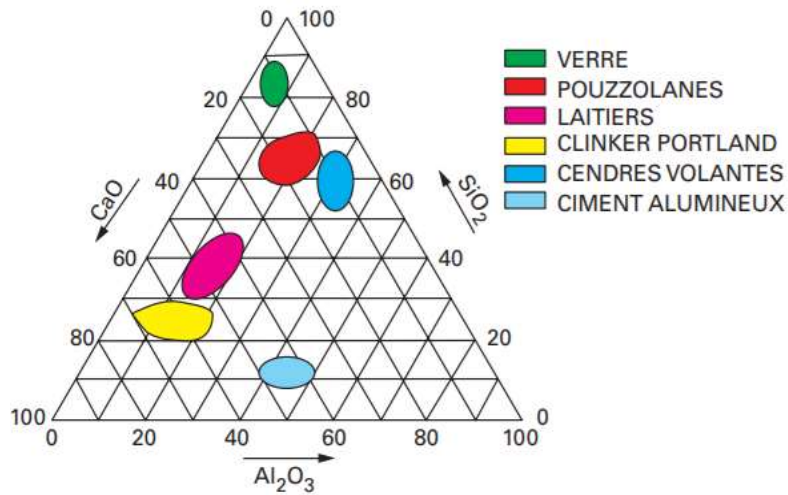


Figure 1- 18. Classification des LHF en diagramme de Keil [135].

En présence d'eau et d'un activant basique, notamment la chaux, l'augmentation du pH jusqu'à une valeur supérieure à 12 conduit à la réaction des laitiers de hauts-fourneaux sous une attaque hydroxylique (OH^-) [136]. En effet, dans un milieu à pH basique, ils se dissolvent permettant la précipitation de nouvelles espèces minérales « hydrates ». Hormis le pH, d'autres paramètres peuvent influencer la réaction des laitiers comme la finesse, plus le laitier est finement broyé plus sa surface spécifique est importante et plus la vitesse de réaction d'hydratation est élevée [136]. Cependant, la cinétique d'hydratation des LHF reste plus lente comparée à celle du ciment.

Les différentes étapes du phénomène d'hydratation d'un matériau pouzzolanique (LHF) mis en solution avec un activant calcique (chaux, ciment, ...) sont illustrées sur la Figure 1- 19.

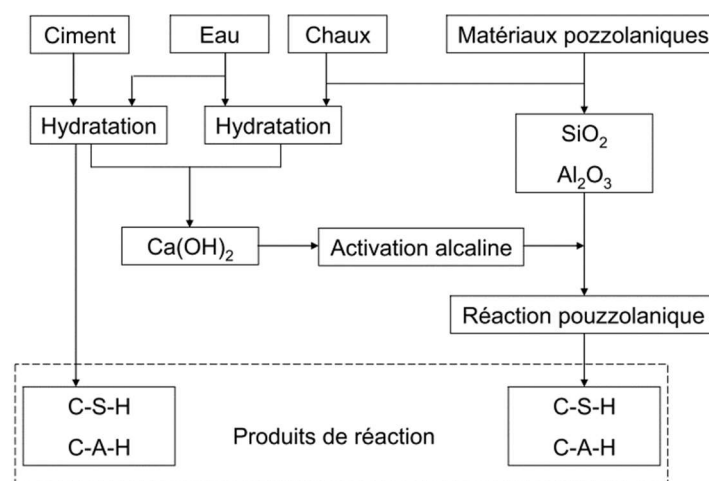


Figure 1- 19. Étapes de déroulement d'une réaction pouzzolanique [44].

2.1 Valorisation des laitiers de hauts-fourneaux dans les liants hydrauliques

L'emploi des LHF pour la fabrication des liants hydrauliques ou dans le béton date de plus d'un siècle, en raison de leur composition chimique. Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'utilisation des laitiers de hauts-fourneaux en remplacement au clinker, en combinaison avec d'autres constituants [11,16,142,143,17,19,82,137–141], depuis maintenant longtemps. Le remplacement de 50% de ciment portland CEM I par 35% de LHF et de 15% de sédiments calcinés a montré de meilleures performances mécaniques à 90 jours. Une diminution de la porosité au cours du temps conduisant à une densification de la microstructure à long terme, a été également observée par Bellara et al [82], pour les mortiers composés du LHF et des sédiments comparés aux mortiers de référence. En revanche, l'étude entreprise par Hadj Sadok et al [19] sur des mortiers réalisés avec la substitution de 50% de ciment par différents taux de LHF et de sédiments calcinés, présente des résistances inférieures à celles du mortier témoin sur toutes les échéances, mais cette tendance tend à diminuer après 28 et 90 jours et les résistances à la compression restent supérieures la valeur de référence.

3. Les déchets de marbre

Le marbre résulte du métamorphisme des roches carbonatées souvent le calcaire ou la dolomite dont la constituante principale est la calcite (CaCO_3) et d'autres composées (minéraux argileux, micas, quartz, oxyde de fer et le graphite). Il est considéré comme un matériau noble, réputé pour sa forte capacité de portance et sa brillance. En fait, son utilisation remonte à très longtemps ou plutôt depuis toujours à travers le monde. Il a été anciennement utilisé pour les sculptures et statuts par les Grecs et les Romains. La forte demande pour le marbre en raison de ses divers domaines d'utilisation, nous pouvons citer : la pierre de taille pour la décoration de façade et de l'intérieur, les marges... etc, ainsi que la réhabilitation des structures historiques, conduit à la production d'énorme quantité de déchets sous forme de poudre ou de sable. La production des déchets de marbre au niveau des marbreries provient des opérations d'extraction et de façonnage.

En Italie, en 2010, les quantités de déchets générés par les marbreries ont été estimées à 335 000 tons. En Inde, en 2015 les sables et les fines de marbre sont deux fois plus importants par rapport à 2013. La démarche de valorisation et l'exploitation des déchets de marbre pour des travaux de génie civil présente un intérêt double, environnemental, d'une part et économique, d'autre part. En effet, leur utilisation contribue à la diminution de l'empreinte

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

carbone, par leur emploi en tant que matière première secondaire en remplacement des matériaux de construction, mais également cela permet à la préservation des ressources naturelles nobles.

La synthèse bibliographique réalisée par Papatzani [144] a évoqué les principales voies de recyclage des déchets de marbre les plus abordées par les chercheurs dans ces dernières années, un peu partout dans le monde. Elles sont représentées sur les diagrammes circulaires de la **Figure 1- 20** ci-dessous :

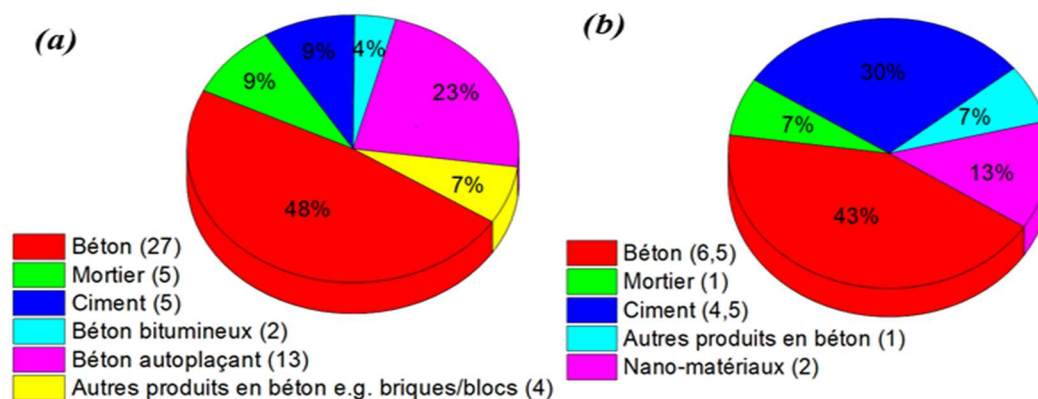


Figure 1- 20. Domaine de recyclage destiné à l'usage des déchets de marbre dans des travaux génie civil sur la base (a) des travaux déjà publiés (b) recherches récentes (en cours d'évaluation) [144].

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'utilisation des déchets dans les matériaux cimentaires et les bétons, et ont montré les avantages qu'ils procurent sur le plan économique, technique et environnemental. L'étude réalisée par El-Sayed et al [145] a montré que l'addition de seulement 5% de déchets de marbre pour la fabrication des ciments OPC par trois cimenteries en Egypte pourrait économiser chaque année jusqu'à 275 millions/an pour l'industrie cimentaire de la région. Vardhanet et al [146] ont montré que la substitution à 10% d'un ciment OPC avec de la poudre de marbre provenant de l'industrie de marbre indienne, n'affecte pas les résistances mécaniques. Cependant, au-delà de ce taux de substitution, une dégradation de la microstructure accompagnée d'une augmentation de la porosité et une diminution des résistances est remarquée.

Monica et al [147] ont validé le remplacement de 50% du sable naturel par le sable de marbre pour l'élaboration des mortiers, ceci donne de meilleures résistances à la compression, à la traction indirecte et aux attaques sulfatiques. Le même comportement a été observé par un remplacement de sable naturel avec les déchets de marbre provenant de la carrière de Fil-Fila dans la wilaya de Skikda, avec des taux de remplacement de l'ordre de 25 et 50% pour

l'élaboration du béton. Cependant, le remplacement total du sable naturel a conduit à la diminution des performances mécaniques [148].

4. Acceptabilité environnementale pour l'application des sédiments, des laitiers de hauts-fourneaux et des déchets de marbre en techniques routières [149]

Le domaine routier, étant le plus absorbant de granulats et de tous types de matériaux de construction, est considéré comme une filière adaptée à la valorisation des déchets, à condition d'aller au-delà de leurs caractéristiques mécaniques et géotechniques. Il est donc nécessaire de faire recours à des mesures spécifiques, aux regards desquelles serait jugée l'acceptabilité environnementale de ces déchets¹ avant leur utilisation en tant que matériau alternatif² en techniques routières. À cet égard, un référentiel méthodologique a été fourni et mis à disposition des industriels et des professionnels des travaux publics par le Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements « SETRA ». En fait, cette démarche a pour finalité d'évaluer l'innocuité environnementale des matériaux alternatifs élaborés à partir des déchets et destinés à être utilisés comme matériau routier³, excluant ici les déchets dangereux ou incluant une substance radioactive. Tout type de matériaux issus d'un ou plusieurs déchets, présentant des performances mécaniques, géotechniques et hydrauliques adéquates aux usages envisagés : granulat, graves, sols, fillers ou liants.

¹ Sont concernés par ce guide méthodologique SETRA [149], les déchets qui ne disposent pas d'un guide d'application, notamment les sédiments et les déchets de marbre abordés dans le présent document.

² La définition proposée par SETRA à ce terme est tout matériau élaboré à partir d'un déchet non dangereux, seul ou conjointement avec d'autres matériaux alternatifs ou non pour un usage routier.

³ Il s'agit d'un matériau alternatif ou mélange de celui-ci avec d'autres matériaux, alternatifs ou non, répondant à un usage routier, c-à-d, apte à quitter une installation d'élaboration pour être mis en œuvre en l'état sur les chantiers routiers.

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

Cette démarche d'évaluation de risque vis-à-vis de l'environnement se compose des trois étapes suivantes (comme illustré sur la **Figure 1- 21**) :

1. **Étape 1** : la description du déchet à l'origine du matériau alternatif et de son gisement.
2. **Étape 2** : description de la méthodologie d'élaboration du matériau alternatif et du matériau routier associé ainsi que l'usage routier envisagé.
3. **Étape 3** : caractérisation environnementale du matériau alternatif et du matériau routier associé pour l'usage routier envisagé.

Afin de s'assurer de la compatibilité des émissions des matériaux alternatifs et des matériaux routiers associés avec le respect des objectifs de qualité des eaux retenues, elle comprend trois niveaux d'investigation selon le degré de contamination :

1. **Niveau 1** : une valorisation en usage routier est justifiée acceptable, seulement si, la teneur en contaminants (en lixiviation, conformément à la norme NF EN 12457-2,4 et en contenu total) respecte les valeurs seuils limites récapitulés dans le **Tableau 1- 12**. Dans le cas contraire, une caractérisation de niveau 2 est indispensable.

Une évaluation environnementale au niveau 1 est nécessaire.

2. **Niveau 2** : dans ce niveau l'acceptabilité environnementale est jugée en faisant appel aux essais de percolation (conformément à la norme NF CEN/TS 14405). Similairement au niveau 1, si au moins un seul dépassement aux valeurs limites est constaté, le passage à une caractérisation de niveau 3 doit être effectué.
3. **Niveau 3** : une étude spécifique suivant la norme méthodologique NF EN 12920-2 est menée si l'évaluation aux niveaux 1 et 2 ne répond pas aux valeurs limites.

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

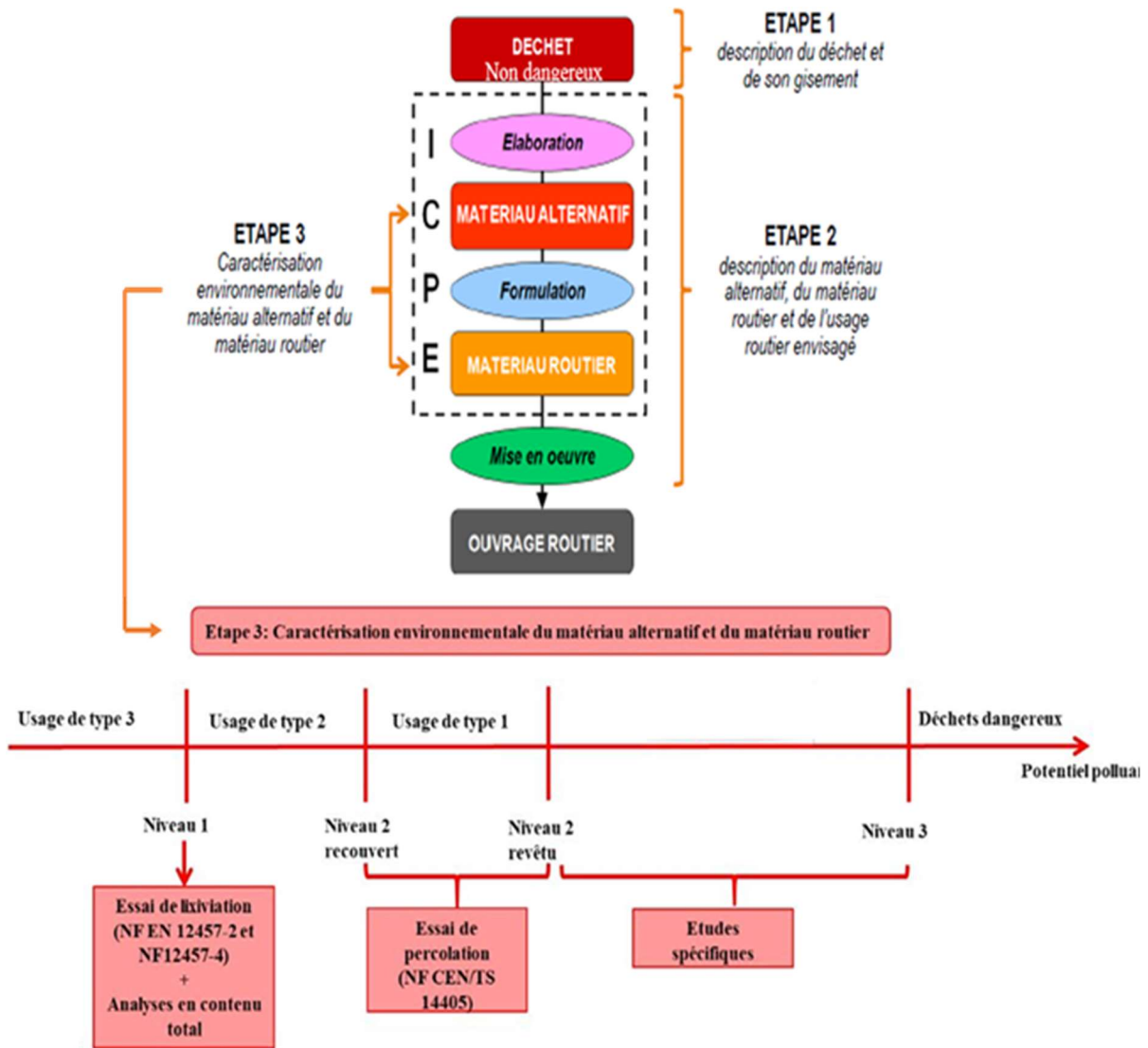


Figure 1- 21. Démarche d'évaluation environnementale [150,151] .

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

Tableau 1- 12. Valeurs limites à ne pas dépasser en lixiviation pour être candidat à une utilisation en technique routière [149].

Paramètre	Quantité relarguée à L/S = 10 l/kg (Essai de lixiviation NF EN 12457-2 ou NF EN 12457-4)			
	Ensemble de valeurs à respecter par au moins (mg/kg de matière sèche)			Quantité relarguée à L/S = 10 l/kg (Essai de lixiviation NF EN 12457-2 ou NF EN 12457-4)
	80% des échantillons	95% des échantillons	100% des échantillons	
As	0,5	1	1,5	2
Ba	20	40	60	100
Cd	0,04	0,08	0,12	1
Cr total	0,5	1	1,5	10
Cu	2	4	6	50
Hg	0,01	0,02	0,03	0,2
Mo	0,5	1	1,5	10
Ni	0,4	0,8	1,2	10
Pb	0,5	1	1,5	10
Sb	0,06	0,12	0,18	0,7
Se	0,1	0,2	0,3	0,5
Zn	4	8	12	50
Fluorures	10	20	30	150
Chlorures*	800	1 600	2 400	15 000
Sulfates*	1 000	2 000	3 000	20 000
Fraction soluble*	4 000	8 000	12 000	60 000

5. Bilan de l'état de l'art

Cette partie a permis de mettre l'accent sur la problématique d'envasement des barrages et les différentes techniques pour lutter contre ce phénomène. Un aperçu sur l'origine et les différentes phases entrantes dans la composition des sédiments, matrices complexes, a été présenté pour mieux appréhender leur comportement. La présence des matières organiques, des contaminants (éléments traces) et leurs effets néfastes sur l'écosystème ont été également abordés. De ce fait, le statut déchet est attribué aux sédiments, dès lors leur dépôt sur terre. Les filières de valorisation les plus fréquentes dans la littérature ont été présentées. Par ailleurs, pour pouvoir orienter ses sédiments dans des voies de valorisation, ces déchets nécessitent une meilleure connaissance. Il serait donc indispensable d'évaluer leur conformité technique et le risque environnemental qui peuvent engendrer. C'est pourquoi le cadre réglementaire vis-à-vis

* Concernant les chlorures, les sulfates et la fraction soluble, il convient, pour être jugé conforme, de respecter soit les valeurs associées aux chlorures et aux sulfates, soit de respecter les valeurs associées à la fraction soluble.

Chapitre 1. Etats des connaissances et synthèse bibliographique.

de leur gestion a été évoqué dans ce **Chapitre 1**. Les déchets de marbre et le laitier de hauts fourneaux font partie intégrante de cette partie. Leur composition, les différents domaines de valorisation et leur acceptabilité environnementale pour une utilisation en travaux routiers ont été présentés.

Chapitre 2.

Caractérisation des sédiments de Barrage de Zardezas : physicochimique, minéralogique et mécanique

Introduction

Dans le cadre de ce travail, une approche méthodologique de valorisation a été proposée en vue d'un réemploi des sédiments dragués en-amont du barrage de Zardezas (Skikda, Algérie) en tant que matériaux de remplacement en techniques routières. Cette approche consiste d'abord à caractériser les sédiments et à définir leurs propriétés physicochimiques, minéralogiques, environnementales et mécaniques. Ceci, afin d'optimiser le choix des voies de valorisation comme matières premières secondaires.

Dans ce **Chapitre 2.**, les essais de caractérisation physico-mécaniques des sédiments bruts de dragage ont été effectués selon les recommandations du Guide Techniques de réalisation des Remblais et des couches de formes GTR [30]. Les essais de caractérisation environnementale ont été réalisés afin de déterminer les concentrations en éléments chimiques les plus répondus (éléments traces, sulfates, chlorures et fluorures). Concernant la partie caractérisation minéralogique des sédiments, des essais de diffraction des rayons X et la spectrométrie de fluorescence des rayons X ont été également effectués. Le tableau de référence des normes correspondantes à chaque type d'essai utilisé est présenté en annexe.

1. Origine des sédiments et présentation du site de prélèvement

La présente étude, porte sur les sédiments issus du barrage de Zardezas situé dans la région de Skikda. Un prélèvement représentatif d'environ deux cent kilogrammes a été effectué en amont du barrage, en novembre 2016, à l'aide d'une pelle manuelle sur différentes profondeurs, allant de 0 jusqu'à 50-70 cm environ (**Figure 2- 1**).

Les sédiments ont été ensuite transportés au laboratoire dans des sacs hermétiques en plastique. Une fois au laboratoire les sédiments ont été déposés dans des plateaux pour un premier séchage à l'air libre puis ont été introduits dans une étuve à une température ne dépassant pas les 50°C pour éviter toute modification ou altération de leurs composantes chimiques notamment organiques.

Le barrage de Zardezas, construit de 1926 à 1945, était le seul barrage en exploitation de la wilaya de Skikda. Se trouvant à une trentaine de kilomètres au sud de la région de Skikda, et à 35 Km au Nord-est de Constantine (**Figure 2- 2**). Le barrage de Zardezas sert à stocker les eaux de Oued Saf-Saf, de permettre l'alimentation en eau potable (AEP) de la région de Skikda ainsi que l'irrigation des terres agricoles situées à l'aval du barrage. Le barrage de Zardezas est un barrage de type poids béton de 242 m de longueur crête avec une capacité de 32 hm³ (après les travaux de surélévation). La superficie du bassin versant de l'oued Saf-Saf en amont du barrage est de 345 km³.

Le niveau de la vase accumulé dans le fond de la retenue du barrage augmente et la capacité de stockage n'était plus que de 9 millions de m³ en 1967, pour une capacité initiale de 15 millions de m³, ce qui a amené à la surélévation du niveau de la digue de barrage pendant la période allant de 1971 à 1976. Aujourd'hui, le barrage de Zardezas affronte le risque d'un comblement total à court terme. En effet, la capacité de sa retenue ne dépasse pas plus un quard de sa capacité initiale.



Figure 2- 1. Mode de prélèvement des sédiments en amont du barrage de Zardezas.

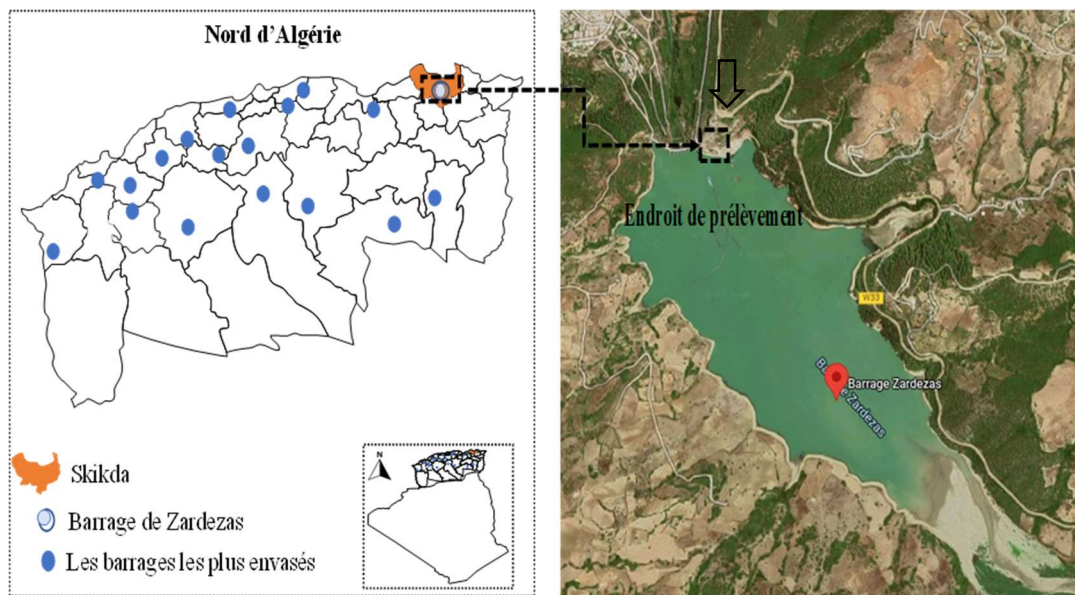


Figure 2- 2. Lieu de prélèvement des sédiments.

2. Caractérisation physique et chimique des sédiments

Une campagne d'essai de caractérisation en laboratoire a été entreprise sur ces échantillons prélevés. Les valeurs communiquées pour chaque essai représentent la moyenne de trois mesures. L'objectif d'une caractérisation est de savoir si une valorisation potentielle des sédiments est envisageable après l'identification des principales caractéristiques de sédiments à partir d'échantillons [69]. Avant de procéder à un ensemble d'essais de caractérisation, les sédiments ont été désagrégés puis homogénéisés.

2.1 La teneur en eau naturelle (W_{nat})

La teneur en eau varie d'un matériau à l'autre. En effet plusieurs facteurs peuvent avoir un impact direct sur la quantité d'eau présente dans des sédiments, comme : le caractère de rétention d'eau qui est intimement liée au pourcentage des particules fines et à la teneur en matière organique qu'ils renferment [25]. Mais également, cette teneur varie selon la technique de dragage adoptée.

La détermination de la teneur en eau naturelle des sédiments a été effectuée conformément à la norme NF P94-050 [152]. Une quantité renseignée des sédiments dans leur état naturel est introduite dans une étuve à une température entre 40 et 50°C jusqu'à stabilisation de sa masse, la différence entre deux mesures qui se suivent doit être inférieure à 0,002 (pas moins de 48 H). La teneur en eau est le rapport massique entre la quantité d'eau contenu dans un échantillon et de la masse des particules solides du même échantillon. La teneur en eau est donnée en pourcentage et calculée par la formule (7) suivante :

$$W(\%) = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (7)$$

2.2 Distribution granulométrique

Il s'agit de la détermination de la répartition pondérale des différents grains d'un échantillon, en fonction de la taille des particules constituant les sédiments étudiés. Deux méthodes ont été utilisées, la première est une combinaison de deux essais selon les normes françaises XP P94-041 [153] et NF P94-057 [154]: tamisage par voie humide pour les éléments de diamètre supérieur à 80 micromètres et sédimentométrie quant aux éléments avec un diamètre inférieur à 80 μm . La deuxième méthode plus rapide, s'appuie sur une technique beaucoup plus précise que le tamisage ou la décantation, il s'agit de l'analyse granulométrique par diffraction laser.

o Principe et protocole d'essai

2.2.1 Par tamisage analytique (par voie humide et sédimentométrie)

Le principe de cette méthode consiste au tamisage tamis par tamis suivant la norme XP P94-041 [153]. Pour ce faire, une étape de trempage total d'une certaine masse (environ 500 g) des sédiments dans de l'eau pour au moins 24h précède l'opération du tamisage, pour permettre la désagglomération des grains. Un tamisage sous un flux d'eau est effectué, à travers une série

Chapitre 2. Caractérisation des sédiments de Barrage de Zardezas : physico-chimique, minéralogique et mécanique.

de tamis emboîtable de tailles décroissantes du haut vers le bas, avec des ouvertures de 2 mm, 1 mm, 400 μm , 200 μm , 100 μm et 80 μm , en faisant des mouvements circulaires à la main sur les matériaux retenus sur chaque tamis de la colonne, jusqu'à ce que l'eau coulante du lavage soit bien claire, et ainsi de suite. Puis, le refus de chaque tamis est récupéré, séché à l'étuve et enfin, pesé.

Le pourcentage massique des passants au travers le tamis 80 μm obtenu pour les sédiments de Zardezas est de 97,48%, une analyse granulométrique par sédimentométrie selon la norme NF P94-057 [154] s'impose sur ces éléments, pour compléter la partie tamisage (**Figure 2- 3**). Les diamètres équivalents sont obtenus selon le principe de la loi de Stokes, qui se base sur l'hypothèse que le grain est de forme sphérique.



Figure 2- 3. Étapes de préparation des échantillons pour l'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie.

2.2.2 Granulométrie à diffraction laser

Cette méthode réalisée par le granulomètre laser de la marque Beckman Coulter LS13320 (**Figure 2- 4**), mesure la distribution granulométrique des particules en suspension, tout en utilisant le principe de diffusion de la lumière (ISO 13320-1 [155]). Elle s'applique à des sols fins dont la taille maximale (D_{max}) n'excède pas les 2 mm. Les résultats obtenus seront donc représentés sur un graphique semi-logarithmique, noté « courbe granulométrique ».



Figure 2- 4. Granulomètre laser utiliser.

○ **Résultats et interprétations**

Les résultats obtenus sur des échantillons analysés par granulométrie par tamisage par voie humide et sédimentométrie, et par granulo-laser sont présentés sur la **Figure 2- 5**.

Le **Tableau 2- 1** résume la nature granulométrique du sédiment selon les résultats obtenus par les deux méthodes. D’abord, on constate que l’analyse granulométrique obtenue par les 2 méthodes montre un écart dans les résultats de répartition de la taille des particules, ceci peut être expliqué par la différence dans le principe (notamment pour la sédimentométrie qui repose sur la loi de Navier Stokes qui donne une relation entre le diamètre et la vitesse de décantation des grains de forme sphériques, alors que les particules d'argile se présentent sous forme de feuillets et non pas sous forme de grains sphériques) et les conditions de déroulement de chaque essai, d’une part, et d’autre part à la variabilité naturelle de la taille des grains et aussi aux différents points de prélèvement. Mais également, à la présence de la matière organique MO qui ralentit la vitesse de décantation des particules dans la méthode par sédimentométrie [156].

Aussi, la granulométrie laser fournit des résultats en pourcentages volumiques alors que les résultats tamisage sont exprimés en pourcentages pondéraux.

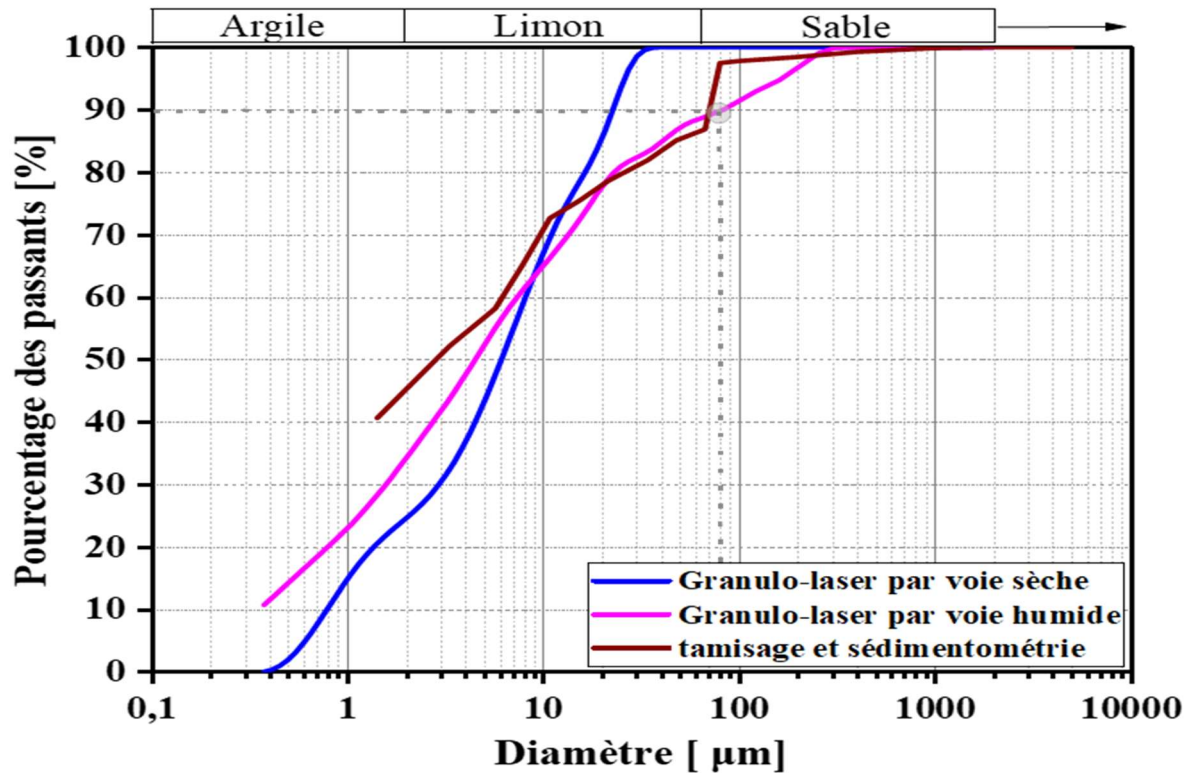


Figure 2- 5. Distribution granulométrique des sédiments de Zardezas.

La forme de la courbe permet de déterminer le degré d'étalement du squelette granulaire et son uniformité, également. Cette uniformité est exprimée par le coefficient d'uniformité dit encore coefficient de HAZEN « C_u » défini par le rapport [25]:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \text{ dy : dimension du tamis correspondant à n\% de tamisats.}$$

Si $C_u > 6$: la granulométrie est dite étalée (ou variée),

Si $C_u < 6$: la granulométrie est dite uniforme (ou serrée).

Le coefficient de courbure est déterminé par l'expression suivante [25]:

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \cdot d_{60}}$$

Si :

$1 < C_c < 3$, est dit bien gradué,

$C_c < 1$ ou $C_c > 3$, le sédiment mal gradué.

Chapitre 2. Caractérisation des sédiments de Barrage de Zardezas : physico-chimique, minéralogique et mécanique.

Tableau 2- 1. Tableau récapitulatif des différentes caractéristiques obtenues par l'analyse granulométrique.

Méthode d'analyse	Tamisage + Sédimentométrie	Granulométrie laser	
		Par voie humide	Par voie sèche
D < 2 µm (fraction argileuse) (%)	45,25	34,24%	24,50%
2 µm < D < 63 µm (fraction silteuse) (%)	40,5	54%	75,5%
63 µm < D < 2 mm (fraction sableuse) (%)	14,25	11,75%	00%
Teneur en fines (% < 80 µm)	98%	90%	100%
D₁₀ (µm)		0,4	0,8
D₃₀ (µm)		1,6	2,9
D₆₀ (µm)	6	7,2	8,1
C_u		18	10,12
C_c		0,89	1,30

Une prédominance de la fraction fine (argiles et limons) est constatée. En effet, plus de 90% des particules rentrant dans la composition granulométrique des sédiments de Zardezas ont un diamètre inférieur à 80 µm pour les différents types de méthodes d'analyse adoptés, les mêmes résultats ont été obtenues sur plusieurs sédiments de barrage rencontrés dans la littérature (sédiments de barrage de Bakhadda [157], sédiment de barrage d'El Merdja Sidi Abed [23], sédiments de barrage de Cheurfas [22], sédiments de barrage de l'Oued Fodda [158]). Cependant, la fraction sableuse ne dépasse pas 15% pour l'ensemble des techniques d'analyse utilisées.

D'autre part, le coefficient de courbure C_c et le coefficient d'uniformité C_u ont été également calculés, il est constaté d'après le coefficient d'uniformité C_u largement supérieur à 6, que la répartition granulométrique est très étalée. Le coefficient de courbure C_c inférieur à 1 pour la granulo-laser par voie humide, signifie que la granulométrie est mal graduée, la continuité est mal répartie.

Selon le diagramme triangulaire textural de la **Figure 2- 6**, les sédiments de Zardezas se classent dans la famille des sols fins pour les différentes méthodes appliquées. Les classes suivantes ont été attribuées aux sédiments de barrage : argile sableuse, limon argileux fin et limon fin, pour les analyses réalisées par granulo-laser par voie humide, par voie sèche et par tamisage et sédimentométrie, respectivement.

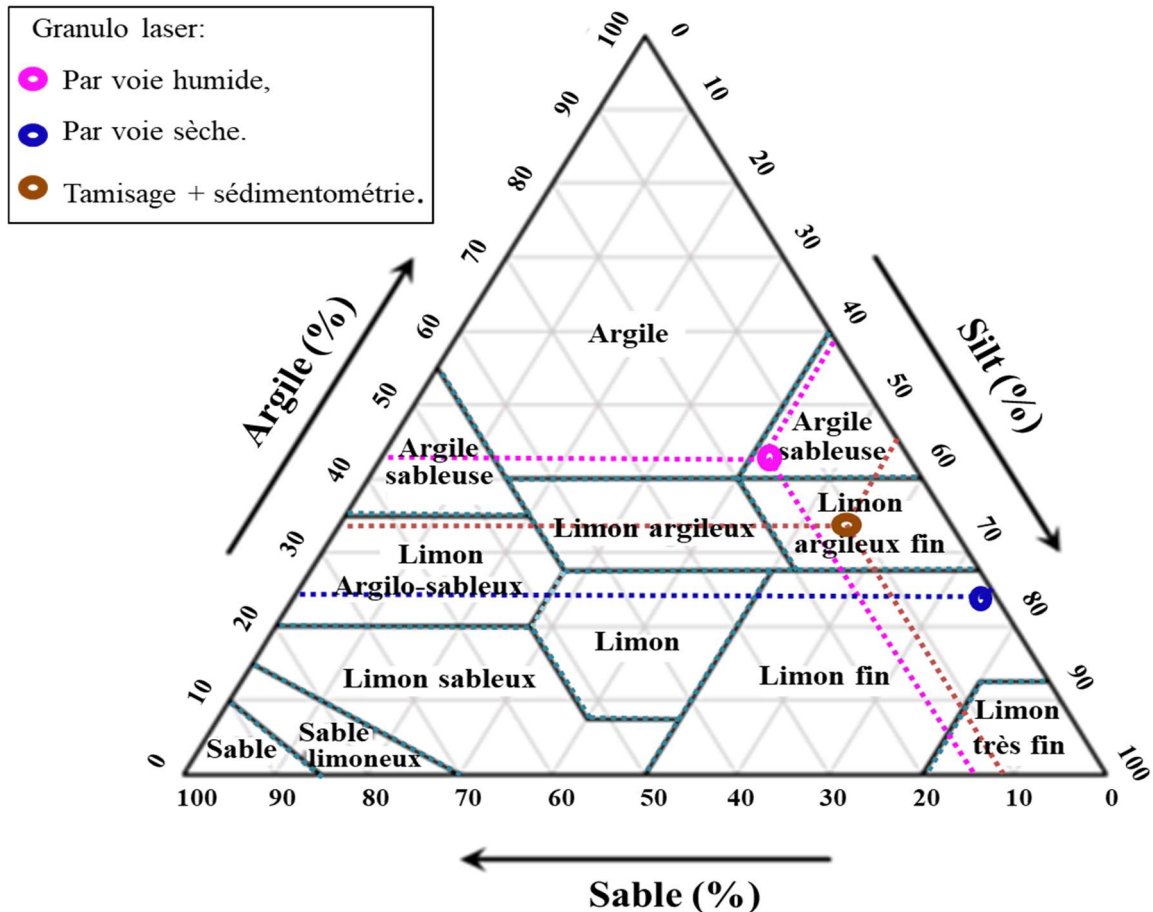


Figure 2- 6. Diagramme triangulaire textural.

2.3 Masse volumique des particules solides (ρ_s),

○ Principe et protocole d'essai

La masse volumique absolue des sédiments a été déterminée par le pycnomètre à hélium Micromeritics AccuPyc 1330 montré sur la **Figure 2- 7**, en appliquant le principe d'Archimède, selon les spécifications de la norme NF EN 1097-7 [159].

Le pycnomètre à hélium permet de déterminer la masse volumique absolue d'un solide de masse connue, en déterminant le volume réel du squelette solide par déplacement d'un gaz inerte, l'hélium, capable de pénétrer dans les moindres vides présents entre les particules de l'échantillon. Ce dispositif de mesure comporte deux chambres de volume connu, la première est réservée à l'échantillon et une deuxième, dite chambre d'expansion.



Figure 2- 7. Pycnomètre à hélium pour la mesure de la masse volumique absolue.

Une quantité d'environ 1,5 g (au moins 2/3 du volume de la cellule) de sédiments préalablement séchée à 40°C et broyée est introduite dans la cellule, puis placée dans la chambre d'échantillon. L'hélium est injecté à une pression donnée dans cette dernière pour occuper l'espace libre autour de l'échantillon puis étendu dans la chambre d'expansion, **Figure 2- 8**. La variation de pression entre les deux chambres est alors déterminée, et le volume réel occupé par les sédiments est ensuite déduit par la loi des gaz parfaits.

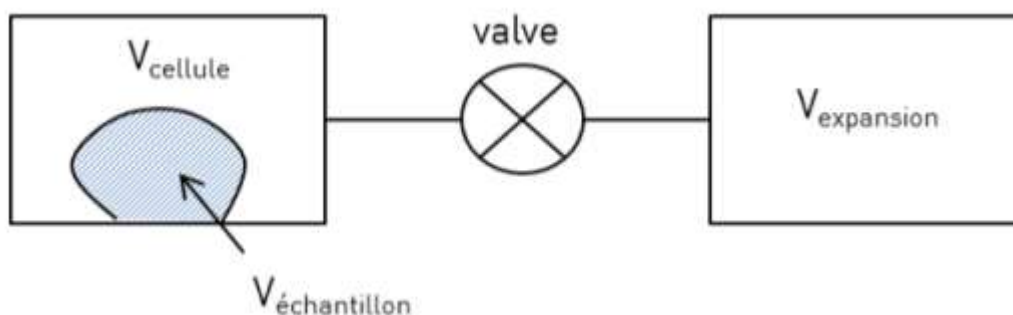


Figure 2- 8. Principe de la mesure.

La masse volumique des sédiments est exprimée par le rapport entre la masse et le volume occupé par le même échantillon.

$$\text{Masse volumique (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{Masse des séiments (g)}}{\text{Volume absolu des grains solides (cm}^3\text{)}}$$

○ **Résultats et interprétations**

La valeur obtenue est la moyenne de vingt mesures réalisées sur le même échantillon, elle est de : $2,63 \text{ g/cm}^3$. Il est constaté que la valeur de la masse volumique absolue des sédiments de Zardezas semble bien s'accorder avec les valeurs des masses volumiques rencontrées pour la catégorie des sols minéraux comprises entre $2,6$ et $2,7 \text{ g/cm}^3$.

Cette valeur est proche de celles trouvées, par Anger [32] pour les sédiments fluviaux de la Garonne avec $2,65 \text{ g/cm}^3$, pour les sédiments de barrage de Bakhada avec $2,64\text{-}2,66 \text{ g/cm}^3$ [157], les sédiments prélevés du canal de Calais et Neufossé avec $2,65$ et $2,66 \text{ g/cm}^3$ respectivement [51], Barrage de Bou Hanifia avec $2,6 \text{ g/cm}^3$ [75] et le sédiments du barrage de Fergoug avec $2,67 \text{ g/cm}^3$ [3]. L'écart en valeurs des masses volumiques absolues des différents sédiments peut être lié à la nature de chaque sédiment, aussi, à la présence de la matière organique au sein des sédiments à différentes teneurs, du fait que, cette dernière possède des valeurs de masse volumique absolue comprises entre $1,2$ et $1,5 \text{ g/cm}^3$. En effet, plus la teneur en matière organique augmente, plus la masse volumique des grains solides baisse, comme il a été évoqué par plusieurs auteurs [25,26,36,160].

2.4 Mesure de la surface spécifique BET

○ **Principe et protocole d'essai**

La mesure de la surface spécifique BET a été réalisée à l'aide de l'appareil de mesure Micromeritics 3Flex 3500, conformément à la norme NF EN ISO 18757 [161].

Par définition, la surface spécifique est la surface réelle d'un échantillon par unité de masse. La méthode BET consiste à mesurer la quantité de gaz adsorbée par les particules et le gaz pouvant pénétrer dans tous les vides (le gaz employé ici est l'Azote). En effet, la connaissance de la quantité d'Azote adsorbée, déterminée selon la loi des gaz parfaits, permet alors de calculer la surface spécifique de l'échantillon selon le modèle de Brunauer, Emmet et Teller (BET).

La mesure de la surface spécifique permet d'avoir une indication sur la finesse des sédiments. Cela va nous servir au prochain chapitre.

○ **Résultats et interprétations**

La valeur obtenue sur les sédiments bruts de Zardezas est de l'ordre de $25,08 \text{ m}^2/\text{g}$. Ceci peut être accordé aux minéraux argileux présents dans les sédiments: la Kaolinite, la chlorite et

l'illite, dont leurs surfaces spécifiques sont comprises entre 10-20 m²/g, 80-100 m²/g et 80 m²/g, respectivement [162].

2.5 Teneur en matière organique et perte au feu

La matière organique peut causer des effets indésirables sur le comportement, la stabilité volumique et les performances mécaniques des sédiments, à la suite de son caractère de rétention d'eau et sa forte capacité d'interagir avec les contaminants présents dans les sédiments.

En effet, sa présence dans les sédiments joue un rôle primordial dans le déroulement du phénomène d'hydratation, la prise hydraulique ou pouzzolanique des mélanges même à faible teneur [31,33,47]. D'où la nécessité de sa quantification dans les sédiments.

2.5.1 Teneur en matière organique par calcination (M.O.C)

o Principe et protocole d'essai

La teneur en matière organique des sédiments de Zardezas à 450°C a été déterminée conformément à la norme XP P 94-047 [163].

Une prise d'essai d'environ 50 g préalablement séchée à 40°C a été placée dans un creuset de masse (m_0), l'ensemble (m_1) a été ensuite introduit dans un four à calcination réglé à 450°C pendant 3h. Le creuset a été placé dans un dessiccateur jusqu'à refroidissement puis pesé (m_2).

La teneur en matière organique a été ensuite calculée par l'équation (8) :

$$C_{\text{MOC}}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \quad (8)$$

2.5.2 Perte au feu (W_{LOI})

o Principe et protocole d'essai

La perte au feu des sédiments de Zardezas à 550 ± 25°C a été déterminée conformément à la norme NF EN 15169 [46].

Une prise d'essai a été premièrement séchée à 40°C pour une durée minimale de 48h, jusqu'à stabilisation de sa masse sèche, broyée puis introduite dans des creusets adaptés à la

température de mesure et placés par la suite dans un four à calcination réglé à $550^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ pendant 3 h (Figure 2- 9).



Figure 2- 9. Détermination de la perte au feu des sédiments.

La valeur de la perte au feu des sédiments représente la variation de masse avant et après le chauffage, elle est exprimée en pourcentage par rapport à la masse de matière sèche et calculée par l'équation (9), ci-après :

$$(\%) \text{ Perte au feu} = \frac{m_c - m_d}{m_c - m_a} \times 100 \quad (9)$$

m_c : Masse du creuset comportant l'échantillon séché (g).

m_d : Masse du creuset comportant l'échantillon calciné (g).

m_a : Masse du creuset vide (g).

o Résultats et interprétations

Le résultat obtenu est la moyenne de 4 mesures, la teneur en matière organique des sédiments de Zardezas est de 3,67%. Selon le Guide Technique dédié à la réalisation de Remblais et des couches de forme GTR [30], les sédiments de Zardezas se classent dans la classe F des sols organiques et des sous-produits industriels. Cependant, cette valeur demeure appartenir à l'intervalle $3 \% < M.O < 10 \%$ et la sous-classe F11 des matériaux naturels renfermant une faible teneur en matière organique.

D'autre part, la valeur donnée par la méthode de perte au feu à 550°C , est supérieure à la teneur en matière organique par calcination à 450°C . Ceci peut être attribué à la présence

éventuelle de certaines matières organique qui se décomposent à une température au-delà de 450°C, mais également, à la déshydroxylation des minéraux argileux qui se produit dans l'intervalle compris entre 350°C et 800°C (voir **Chapitre 3.**) [36,82].

La teneur en matière organique et la perte au feu des sédiments de Zardezas obtenues par les deux méthodes sont rapportées dans le **Tableau 2- 2**.

Tableau 2- 2. Teneur en matière organique et perte au feu.

Matière organique par calcination M_{MOC} (%)	3,67
Perte au feu M.O (%)	6,29

2.6 Détermination de l'argilosité

L'argilosité est un paramètre indispensable, permettant l'identification des sédiments.

2.6.1 Par la valeur au bleu de méthylène

o Principe et protocole d'essai

La valeur du bleu de méthylène des sédiments dépend intimement de la surface spécifique de leurs particules fines. En effet, ces particules possèdent une grande affinité avec l'eau grâce à leur structure en feuillet, cette dernière pourrait être à l'origine de divers phénomènes (gonflement, retrait,...) [131].

Afin d'évaluer la sensibilité à l'eau et d'apprécier l'activité argileuse des sédiments de Zadezas, l'essai à la tâche a été effectué en suivant les spécifications de la norme NF P 94-068 [164], **Figure 2- 10**. Cet essai consiste en l'aptitude des sédiments à fixer sur leurs surfaces une quantité de bleu de méthylène. Pour ce faire, une prise d'essai d'environ 30 g a été mise en suspension dans 500 ± 10 cm³ d'eau déminéralisée et maintenue en agitation à une vitesse de 700 ± 100 tr/min pendant au moins 5 min (jusqu'à désagglomération totale des particules).

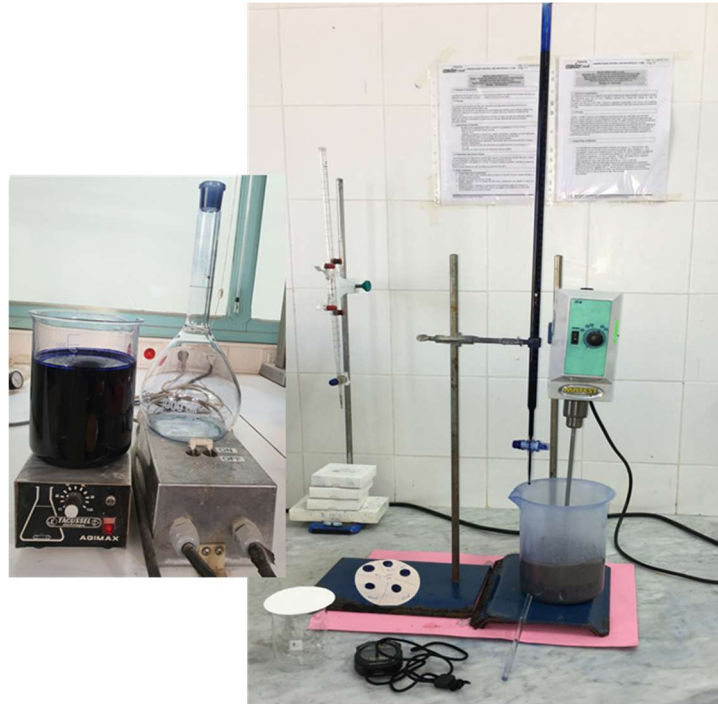


Figure 2- 10. Dispositif de mesure de la valeur au bleu (VBS).

La vitesse d'agitation a été ensuite diminuée à 400 ± 100 tr/min, et des doses de la solution de bleu de méthylène ont été injectées successivement par pas de 5 à 10 cm^3 (selon l'argilosité du matériau) jusqu'à saturation des sédiments. Cet essai est réalisé sur la fraction de dimension (0/2 mm).

Le volume de bleu nécessaire à la saturation totale a été déterminé à l'aide d'une tige en verre, en déposant une goutte de la solution en agitation sur un papier filtre, de minute en minute jusqu'à l'apparition d'une auréole périphérique bleu clair. Il est estimé que le test est positif si l'apparition de l'auréole persiste après la 5^{ème} tache sans ajout de bleu.

La valeur de bleu de méthylène est exprimée en g de bleu par 100 g de sédiments secs par l'équation (10) suivante :

$$\text{VBS} = \frac{B}{m_0} \times 100 \quad (10)$$

D'où :

B : masse de bleu introduite (dosé à 10g/l),

$$B = V \times 0,01$$

Chapitre 2. Caractérisation des sédiments de Barrage de Zardezas : physico-chimique, minéralogique et mécanique.

m_0 : masse sèche de la prise d'essai,

V : volume de bleu de méthylène cm^3 .

La surface spécifique totale des sédiments et la capacité d'échange cationique peuvent être obtenues en fonction de la valeur de bleu par les équations (11) citées par Bourabah [22] et l'équation (12) citée par Maherzi [25]:

$$\text{SST (m}^2/\text{g)} = 21 \times \text{VBS} \quad (11)$$

$$\text{C.E.C (meq/100g)} = 1000 \times \frac{\text{Vbs (g/100g)}}{374} \quad (12)$$

Le **Tableau 2- 3** ci-dessous définit les seuils retenus séparant les différentes classes des sédiments selon leurs valeurs de bleu :

Tableau 2- 3. Classes de sédiments en fonction de leurs VBS d'après le Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de formes « GTR ».

Seuils retenus	Classes des sédiments
0,1	Seuil supérieur déterminant l'insensibilité à l'eau.
0,2	Seuil au-dessus duquel apparaît la sensibilité à l'eau.
1,5	Seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux.
2,5	Seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne.
6	Seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux.
8	Seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

o **Résultats et interprétations**

La valeur de bleu de méthylène obtenue pour les sédiments de Zardezas est la moyenne de trois mesures obtenues. Le **Tableau 2- 4** récapitule les résultats obtenus et la classe à laquelle appartiennent les sédiments :

Tableau 2- 4. Paramètres d'argilosités obtenus par l'essai de bleu.

Valeur de bleu (g/ 100g)	4,41
Surface spécifique totale (m^2/g)	92,61
C.E.C (meq/ 100g)	11,79

Les sédiments de Zardezas appartiennent à la classe des sols limoneux-argileux de plasticité moyenne avec une valeur de 4,41 g/100g de sédiments (voir **Figure 2- 11**), selon la classification du Guide de Réalisation des Remblais et des couches de formes [30]. La même classe a été établie pour les sédiments du barrage de kherrata avec une valeur de 2,55 g/ 100g

Chapitre 2. Caractérisation des sédiments de Barrage de Zardezas : physico-chimique, minéralogique et mécanique.

[21], barrage Cheurfas avec une valeur de 3,22 g/ 100g [22], barrage Fergoug avec 5,4 g/ 100g [24], barrage de l'Oued Fodda avec 5,66 g/ 100g [158] et du barrage de Bakhadda avec 5,91 g/ 100g [157].

● Barrage de Zardezas, ◆ Barrage cheurfas, ◆ Barrage Bakhadda, ◆ Barrage del'Oued Fodda, ◆ Barrage de Kherrata, ◆ Barrage Bou-Hanifia, ◆ Barrage d'El Merdja, ◆ Barrage Fergoug.

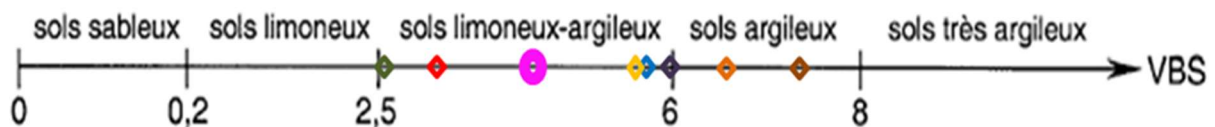


Figure 2- 11. Classification des sédiments de Zardezas en fonction de leur valeur au bleu (VBS).

D'après la valeur de la surface spécifique totale et de la capacité d'échange cationique, les sédiments de Zardezas viennent se positionner entre les kaolinites et les illites selon les valeurs données par Morel [165].

2.6.2 Par les limites d'Atterberg

○ Principe et protocole d'essai

L'effet de l'eau sur le comportement des sols fins a été souligné précédemment, d'où l'importance de déterminer la quantité d'eau présente dans les sédiments et de la situer sur une échelle.

Dépendamment de la teneur en eau dans un sol, nous distinguons trois états de consistance (**Figure 2- 12**) : état solide, état plastique et état liquide dont chaque état est délimité par des teneurs en eau de référence dites « limites d'Atterberg appelées aussi limites de consistance » :

- La limite de liquidité (W_L) est la teneur en eau pour laquelle le sol passe d'un état liquide à un état plastique.
- La limite de plasticité (W_P) est la teneur en eau pour laquelle le sol passe d'un état plastique à un état solide.

- L'indice de plasticité (I_p) est l'étendu du domaine plastique, il est défini par la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité et déterminé par l'équation (13) suivante :

$$I_p (\%) = W_L - W_P \quad (13)$$

La détermination de ces limites est un indicateur qui permet de prévoir le comportement des sédiments soumis aux variations hydriques et lorsqu'ils sont sous sollicitation. En outre, la relation entre le taux d'argilosité présent dans les sédiments et leur plasticité est proportionnelle [23]. En effet, la plasticité est fonction de l'argilosité des sédiments mais également de la nature des minéraux qui les composent [66].

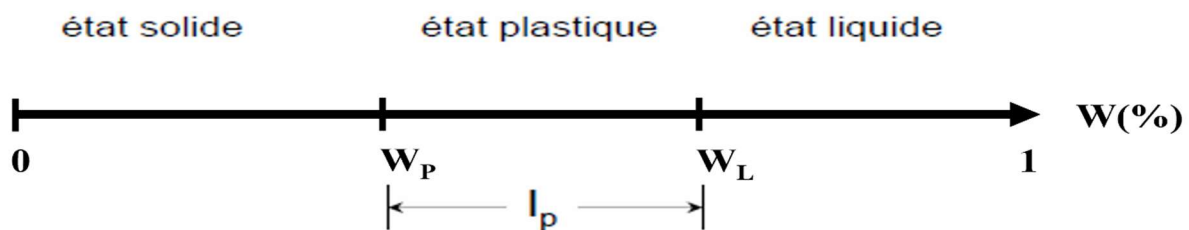


Figure 2- 12. Schéma représentant les trois états de consistance d'un sol.

La Figure 2- 13 montre les étapes de détermination des limites d'Atterberg des sédiments de Zardezas conformément à la norme NF P94-051 [166] pour la limite de liquidité à la coupelle de Casagrande et la limite de plasticité au rouleau et à la norme NF P94-052-1 [167] pour la limite de liquidité au cône de pénétration. Le présent essai est effectué sur la fraction inférieure à $400 \mu\text{m}$.

Après échantillonnage et homogénéisation des sédiments, une prise d'essai a été mise à tremper dans l'eau à température ambiante. Après 24h, les sédiments ont été tamisés par voie humide au travers le tamis $400 \mu\text{m}$, l'eau de lavage et le tamisât ont été recueillis dans un bac. L'eau claire a été ensuite siphonnée, après une durée de décantation de 12h, puis l'ensemble a été introduit dans une étuve à 40°C jusqu'à séchage complet des sédiments.

La totalité des tamisâts a été d'abord concassée à l'aide d'un pilon et un mortier puis malaxée avec de l'eau jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène presque fluide.

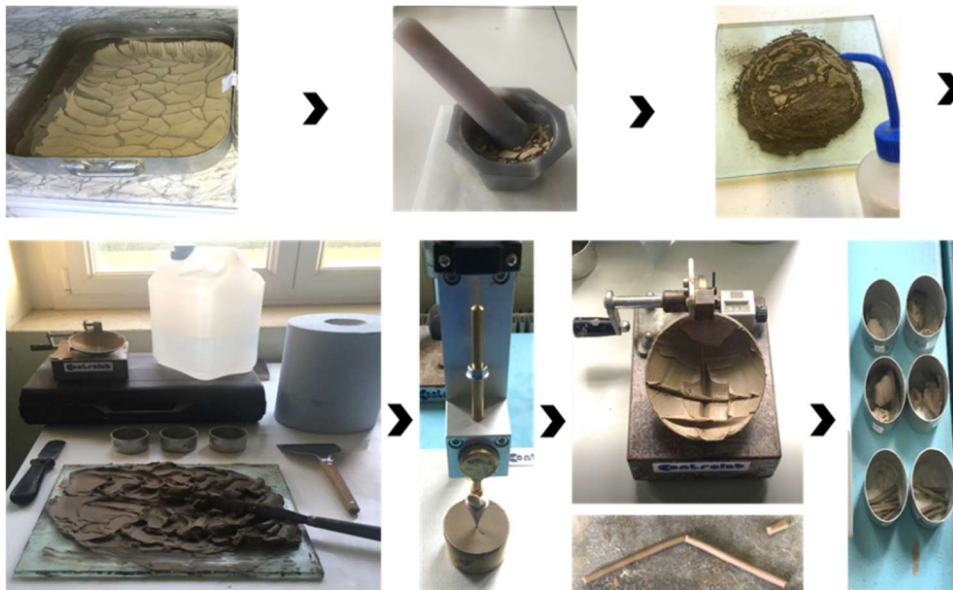


Figure 2- 13. Etapes de préparation de la pâte pour la mesure des limites d'Atterberg.

Le coefficient d'activité d'une Argile de Skempton est donné par le rapport de l'équation (14) ci-après :

$$A = \frac{I_p}{\text{Fraction argileuse}} \quad (14)$$

Ce paramètre peut servir à classer la fraction argileuse présente dans les sédiments comme inactive si $A < 0,75$, normale si $0,75 < A < 1,25$ et active si $A > 1,25$ [168].

Il a été signalé par Holtz et al [168] qu'une corrélation existe entre l'activité d'une argile et le type du minéral argileux, le **Tableau 2- 5** représente le coefficient d'activité d'une sélection de minéraux donnés par Skempton, 1953 et Mitchell, 1976 [169,170].

Tableau 2- 5. Activité argileuse en fonction du type de minéral [168].

Type du minéral	Activité
Montmorillonite de sodium	4-7
Montmorillonite de calcium	1,5
Illite	0,5-1,3
Kaolinite	0,3-0,5
Halloysite (déshydratée)	0,5
Halloysite (hydratée)	0,1
Attapulgite	0,5-1,2
Allophane	0,5-1,2
Mica (Muscovite)	0,2
Calcite	0,2
Quartz	0

➤ **Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande**

La pâte précédemment préparée a été étalée sur le fond de la coupelle en plusieurs couches pour éviter l'emprisonnement des bulles d'air présentes, puis une entaille à l'aide d'un outil de rainure a été réalisée. La coupelle a été ensuite soumise à un nombre de coups à une cadence de 2 coups par seconde, jusqu'à ce que les lèvres de la rainure se convergent sur une longueur d'environ 1 cm. L'essai est poursuivi uniquement si N (le nombre de coups) est compris entre 15 et 35. L'opération complète a été effectuée au moins 4 fois sur la même pâte, avec différentes teneurs en eau à chaque fois.

La limite de liquidité est la teneur en eau pour laquelle la fermeture de la rainure s'effectue après 25 coups et elle est déterminée par projection sur une courbe de teneurs en eau en fonction de nombre de coups.

➤ **Limite de liquidité au cône de pénétration**

Pareillement à la limite de liquidité réalisée sur la coupelle de Casagrande, le récipient a été rempli jusqu'à l'obtention d'une surface lisse en évitant d'emprisonner les bulles d'air. La pointe du cône a été ajustée à la surface du récipient de façon à affleurer la surface de la pâte, puis, le cône a été libéré avant qu'il soit bloqué après $5s \pm 1$.

L'enfoncement du cône se situe entre 12 et 25 mm et l'écart entre deux mesures successives doit être entre 2 et 5 mm au moins 4 fois sur la même pâte, avec différentes teneurs en eau à chaque fois.

La limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à un enfoncement du cône sur une profondeur de 17 mm, elle est déterminée par projection sur une courbe de teneurs en eau en fonction des profondeurs de pénétration.

➤ **Limite de plasticité au rouleau**

La limite de plasticité a été déterminée sur un rouleau de pâte préparé comme mentionné précédemment puis asséché par malaxage manuel ou par application d'un flux d'air à température ne dépassant pas les 50°C. La limite de plasticité est obtenue lorsque le rouleau se fissure et que son diamètre atteint 3 mm et sa longueur 10 cm, concurremment.

o Résultats et interprétations

Selon le diagramme de plasticité présenté sur la **Figure 2- 14** les sédiments de Zardezas font partie des argiles très plastiques (At). Cette même classe a été obtenue par Benaissa [24] pour les sédiments du barrage Fergoug, par Serbah [157] pour les sédiments du barrage de Bakhadda et par Seklaoui [23] pour les sédiments du barrage d’El Merdja.

En outre, d’après la valeur obtenue pour l’activité argileuse exprimée sur le **Tableau 2- 6**, les sédiments de Zardezas peuvent être considérés comme une illite d’activité normale.

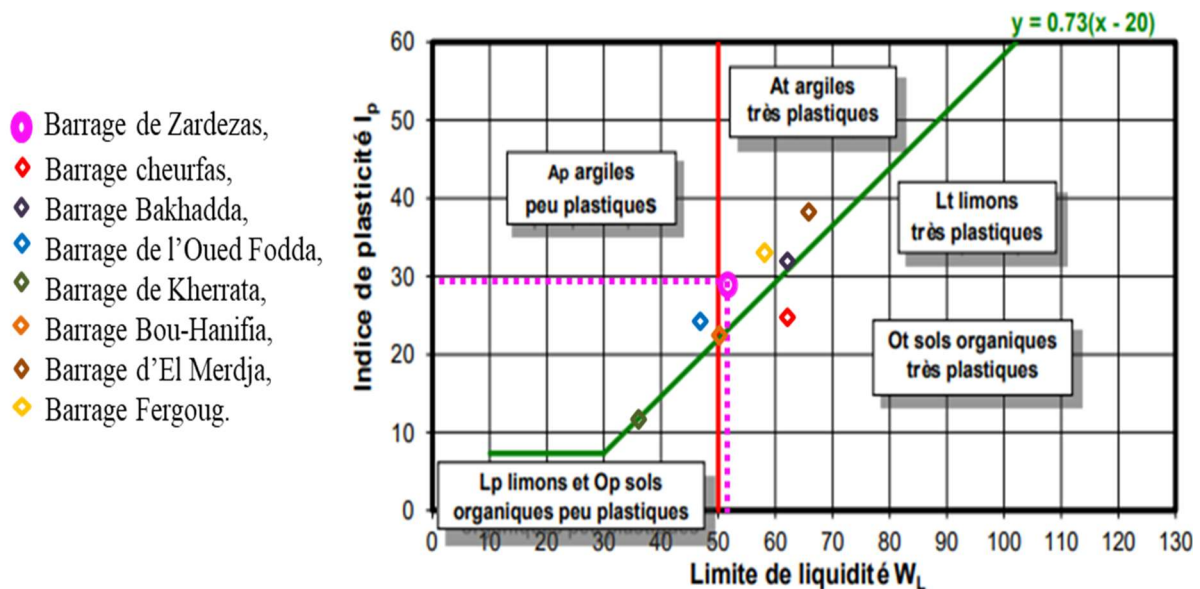


Figure 2- 14. Disposition des sédiments de Zardezas par rapport aux différents sédiments des barrages Algériens dans l’abaque de CASAGRANDE.

Tableau 2- 6. Limites de consistance par Atterberg des sédiments.

Méthode	Limites de liquidité (%)	Limite de plasticité (%)	Indice de plasticité (%)	A
A la coupelle	52,1	22,2	29,9	0,87
Au cône	54,30	22,2	32,1	0,94

2.7 Classification selon le guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme [30]

En vue d’une valorisation des sédiments de Zardezas en techniques routières, une classification selon les spécifications du guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme est primordiale, à cet égard.

Relativement à leur composition granulométrique, les sédiments de Zardezas renferment une teneur en fine ($\% < 80 \mu\text{m}$) supérieur à 35%, ceci leur permet de se positionner

Chapitre 2. Caractérisation des sédiments de Barrage de Zardezas : physico-chimique, minéralogique et mécanique.

en classe A des matériaux avec un $D_{max} \leq 50$ mm, et plus précisément en classe A3, en fonction de leurs plasticités (**Figure 2- 15**). Similairement, la même classe a été retrouvée pour les sédiments de barrage de Bakhadda, d'El Merdja, et des sédiments de barrage Fergoug.

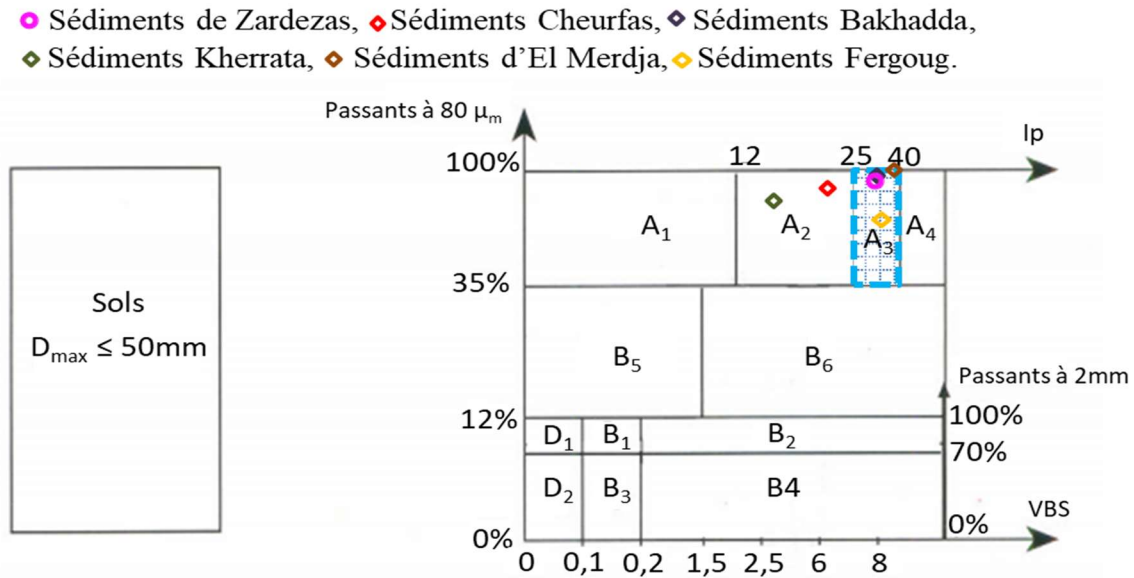


Figure 2- 15. Disposition des sédiments de Zardezas sur le tableau synoptique de classification selon le GTR.

Le **Tableau 2- 7** reprend les principales caractéristiques géotechniques des sédiments de Zardezas, sur lesquelles nous s'appuyant pour les placer dans la classe adéquate.

Selon leur teneur en matière organique (3,67%) les sédiments de barrage appartiennent à la classe F des matériaux organiques et des sous-produits industriels. Néanmoins, cette valeur reste incluse dans l'intervalle compris entre 3 et 10% des sous-classes faiblement organiques F11.

Tableau 2- 7. Récapitulatif des caractéristiques géotechniques des sédiments de Zardezas.

D < 2 µm (fraction argileuse) (%)	34,24
2 µm < D < 63 µm (fraction silteuse) (%)	54
63 µm < D < 2 mm (fraction sableuse) (%)	11,75
Teneur en fines (% < 80 µm) (%)	90
ρs (g/cm ³)	2,63
M.M.O.C (%)	3,67
P.A.F (%)	6,29
VBS (g/100g)	4,41
W _L	52,1
W _P	22,2
IP	29,9
Classe GTR	A3 F11

2.8 Teneur en CaCO₃

o Principe et protocole d'essai

La mesure des carbonates présents dans les sédiments a été effectuée selon la norme NF P 94-048 [171] à l'aide d'un calcimètre de Bernard, **Figure 2- 16**, en mesurant le gaz CO₂ dégagé par attaque des sédiments à l'acide chlorhydrique suivant la réaction **(15)**:



Figure 2- 16. Mesure du CaCO₃ au calcimètre de Bernard.

L'essai a été réalisé sur 1 g de sédiments broyés et séchés, le volume de CO₂ dégagé a été converti en pourcentage de CaCO₃ contenu dans l'échantillon. La teneur en carbonates est déterminée, dans des conditions standards, par la formule **(16)** suivante :

$$(\%) \text{CaCO}_3 = V \times 0,4. \quad (16)$$

D'où ;

V : Volume de dégagement gazeux en ml sous pression constante.

Les différentes classes de sédiments en fonction du pourcentage massique en carbonates sont présentées dans le **Tableau 2- 8**.

Tableau 2- 8. Classification des sédiments en fonction de leur teneur en CaCO_3 par la norme NF P94-048.

Teneur en CaCO_3 (%)	Classification des sédiments
< 10	Non calcaire : argile, sable silicieux...
10 à 29	Peu calcaire : marne
30 à 69	Moyennement calcaire : marne...
70 à 89	Fortement calcaire : calcaire marneux...
≥ 90	Calcaire : calcaire

○ **Résultats et interprétations**

La valeur des carbonates présents dans les sédiments de Zardezas est de 15,55%, ils sont classés en tant que marne calcaire. Ceci correspond à la classe trouvée pour les sédiments de barrage Cheurfas.

2.9 Mesure de la valeur du pH

○ **Principe et protocole d'essai**

La détermination de la valeur du pH des sédiments a été déterminée en suivant la norme en vigueur NF ISO 10390 [172]. À cet effet, une prise d'essai a été mise en suspension dans un volume d'eau avec un rapport L/S = 5. Le tout a été maintenu en agitation pour une heure. La mesure du pH a été effectuée directement après la fin de l'agitation à l'aide d'un pH-mètre (Figure 2- 17).

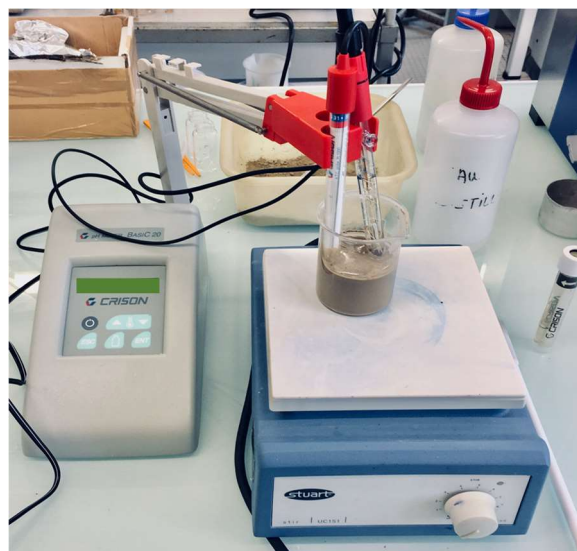


Figure 2- 17. Mesure de la valeur du pH au pH-mètre.

○ **Résultats et interprétations**

La valeur obtenue sur les sédiments de Zardezas est égale à 8,31, cette valeur est en concordance avec les valeurs trouvées pour les sédiments du barrage Fergoug et des sédiments du barrage d'El Mrdja avec des valeurs aux alentours de 8,4.

3. Caractérisation mécanique

3.1 Essai Proctor et portance des sédiments de Zardezas

○ **Principe et protocole d'essai**

Le principe de l'essai Proctor consiste en l'application d'une énergie mécanique définie conformément à la norme NF P94-093 [173], sur un échantillon de sol humidifié à plusieurs teneurs en eau, afin de déterminer sa masse volumique sèche maximale ρ_{dmax} pour une teneur en eau optimale W_{OPN} .

➤ **Essai Proctor miniature**

Un format miniature de l'appareil Proctor classique a été proposé dans plusieurs études antérieures [174–176]. Un Proctor miniature a été utilisé pour définir les paramètres de densification des sédiments de Zardezas dans la présente étude. Ses avantages sont la rapidité de l'opération et la faible quantité de sol utilisée, qui ne dépasse pas 1 kg par essai. Ceci assure donc un gain de temps et de matériaux et permet d'obtenir les caractéristiques recherchées en peu de temps. Il est aisé de répéter l'essai de manière à mieux définir la courbe de compactage. Le dispositif Proctor miniature se compose de 3 parties amovibles : l'embase, le moule et la partie supérieure qui fixe le moule à l'embase. En plus, une tige support avec une masse tombante fixée sur une mini dame cylindrique en pied de la tige. Une vis de blocage permet de régler la hauteur de chute de la masse. L'énergie de référence du Proctor miniature correspond à celle de l'essai Proctor normal estimée à 587.86 kN.m/m^3 (énergie par unité de volume, $\frac{E_{PN}}{V}$). Pour rappel l'énergie délivrée est donnée par l'équation (17):

$$E_{PN} = m \times g \times h \times N \times n. \quad (17)$$

Avec les notations et caractéristiques suivantes :

m : Masse de la dame (2490 g) ;

g : Pesanteur (9,81 m/s²) ;

Chapitre 2. Caractérisation des sédiments de Barrage de Zardezas : physico-chimique, minéralogique et mécanique.

h : Hauteur de chute (305 mm) ;

N : Nombre de coups par couche (25 coups) ;

n : Nombre de couches (3 couches) ;

V : Volume du moule ($946,69 \text{ cm}^3$).

Quant à la procédure relative au Proctor miniature, elle consiste à placer l'échantillon à l'intérieur du moule en deux couches (**Figure 2- 18**), à compacter à l'aide d'une dame cylindrique et appliquer sur la surface de l'échantillon 6 séries de 7 coups par couche.

Les caractéristiques de compactage inhérentes sont les suivantes :

- Hauteur de chute de 50 mm,
- Une masse tombante de 1.043 kg,
- 42 coups par couche et un nombre de couches de 2.

Pour ce faire, les échantillons de sédiments ont été d'abord humidifiés à plusieurs teneurs en eau et conservés dans des sacs hermétiques pour une durée de 24 h. Les sédiments ont été ensuite placés dans un moule œdométrique en 2 couches, et compactés selon la procédure détaillée précédemment.

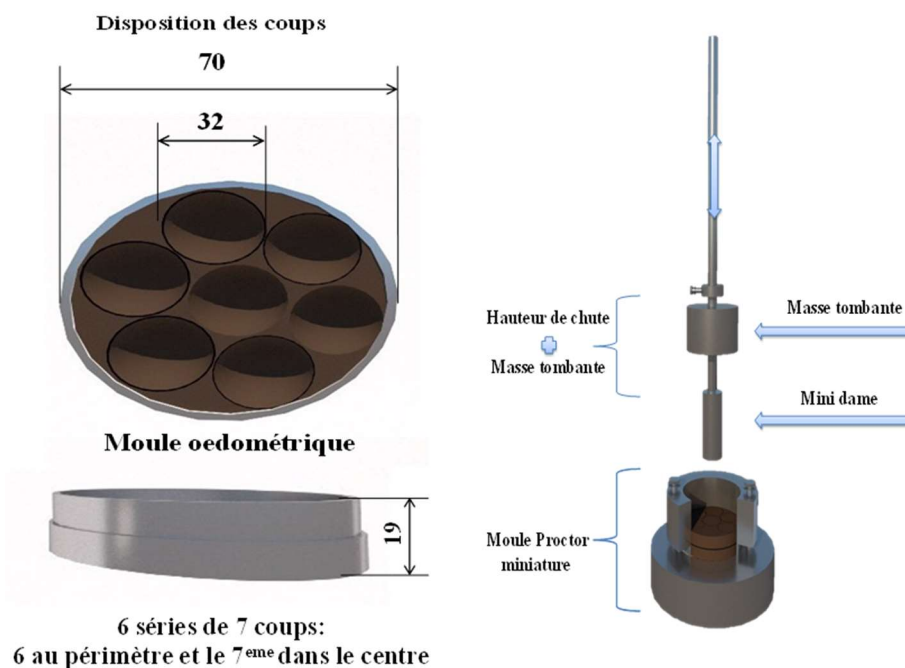


Figure 2- 18. Essai de compactage à énergie équivalente à l'énergie Proctor normal.

➤ **Essai de poinçonnement (IPI)**

L'indice de portance immédiat a été déterminé selon la norme NF P94-078 [177] pour évaluer l'aptitude des sédiments à supporter les charges appliquées par la circulation des engins lors de la phase du chantier. L'essai Proctor normal a été tout d'abord effectué sur les sédiments de Zardezas, les sédiments ont été donc humidifiés tels que l'échantillon préparé pour le Proctor miniature à teneur en eau optimale pendant 24h. La totalité de l'échantillon a été ensuite divisée en trois parties.

Le compactage s'est effectué en trois couches, chaque couche a subi 25 coups. Des rayures ont été réalisées entre chaque deux couches, pour assurer un meilleur accrochage des couches lors du compactage (**Figure 2- 19**). Une fois le compactage a été terminé, l'éprouvette a été mise sous chargement à vitesse constante correspondante à $1,27 \pm 0,1$ mm/min d'un piston cylindrique de section égale à $19,32 \text{ cm}^2$. L'indice de portance immédiat a été déterminé à partir de la courbe effort-déformation aux enfoncements 2,50 et 5,00 mm par les formules **(18)** et **(19)**:

$$\frac{\text{Effort de pénétration à un enfoncement de 2,5 mm (en KN)}}{13,35 \text{ (en kN)}} \quad (18)$$

$$\frac{\text{Effort de pénétration à un enfoncement de 5 mm (en KN)}}{19,93 \text{ (en kN)}} \quad (19)$$

Avec ;

13,35 : Effort de pénétration correspondant à un enfoncement de 2,5 mm,

19,93 : Effort de pénétration correspondant à un enfoncement de 5 mm.



Figure 2- 19. Protocole de conservation et de réalisation de l'essai de poinçonnement sur les sédiments de Zardezas.

○ Résultats et interprétations

Les paramètres de densifications obtenus pour les sédiments bruts sont explicités dans le **Tableau 2- 9**. Ces derniers montrent une teneur en eau optimale (W_{OPN}) de 23% pour une masse volumique sèche maximale ρ_d de 1,58 Mg/m^3 . Ces valeurs se retrouvent au même rang de celles obtenues par Seklaoui sur les sédiments de barrage d'El Merdja Sidi Abed [20%, 1,57 Mg/m^3] [23], par Benaissa [24] pour les sédiments de barrage de Fergoug [17,73%, 1,49 Mg/m^3], par Bourabah [22] sur les sédiments de Cheurfas [23,3%, 1,55 Mg/m^3] ainsi que celles obtenues par Khezami [160] sur des sédiments fluviaux provenant du lac artificiel bras des Près du HEM situé au nord de la France [21,5%, 1,56 Mg/m^3].

Tableau 2- 9. Paramètres de compactage des sédiments bruts.

ρ_d (Mg/m^3)	1,58
W_{OPN} (%)	23,00%
IPI à W_{OPN}	7,11

L'allure de la courbe Proctor normal des sédiments (**Figure 2- 20**) représente un maximum assez prononcé, cela témoigne la présence d'une argile plastique et la sensibilité des sédiments à l'eau.

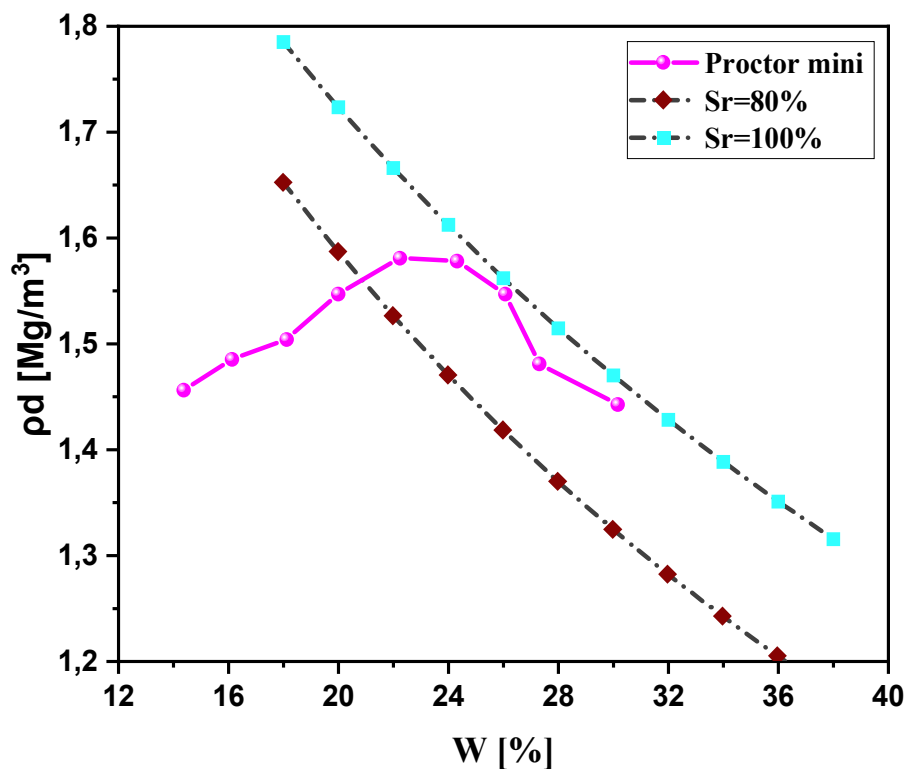


Figure 2- 20. Courbes Proctor des sédiments de Zardezas.

D'autre part, la valeur de la masse volumique maximale obtenue paraît inférieure aux matériaux généralement utilisés pour la réalisation des remblais et des couches de forme. Cela est traduit par un indice de plasticité élevé, d'après Holtz et al [168], plus la plasticité dans un sol augmente, plus la masse volumique maximale après le compactage diminue.

En ce qui concerne l'indice de portance immédiat, la valeur obtenue de 7,11 ne répond pas aux exigences souhaitées prescrites par le Guide Technique de réalisation des Remblais et des couches de formes [30]. Un indice portant immédiat minimal de 10 est requis par le GTS [31] pour les matériaux de la classe A3, dans le but d'une application en couche de forme.

4. Caractérisation chimique et environnementale

4.1 Analyse chimique par fluorescence X (FX)

o Principe et protocole d'essai

L'ensemble des éléments chimiques présents dans les sédiments a été déterminé par fluorescence aux rayons X en utilisant le spectromètre de fluorescence X S4 PIONEER de la marque BRUKER. Les échantillons ont été d'abord séchés puis finement broyés avant de passer à l'analyse.

o Résultats et interprétations

Le **Tableau 2- 10** et le diagramme circulaire présenté sur la **Figure 2- 21**, illustrent les différents éléments chimiques rentrant dans la composition chimique des sédiments de Zardezas. Ils sont composés essentiellement d'aluminosilicates (SiO_2 et AlO_3), de l'oxyde de fer (FeO_3), cela confirme la présence des minéraux argileux, de la calcite (CaCO_3 et CaO), de l'oxyde de potassium K_2O , manifestant la présence de l'illite ainsi qu'une faible proportion de MgO , Na_2O et TiO_2 . Avec la présence en trace des sulfates SO_3 .

Tableau 2- 10. Eléments chimiques par Fluorescence aux rayons X.

Propriétés Chimiques	Sédiments bruts
CaCO_3	15.55
SiO_2	48.27
Al_2O_3	17.73
FeO_3	6.26
CaO	9.35
MgO	2.11
SO_3	Traces
K_2O	2.25
Na_2O	0.36
TiO_2	0.81

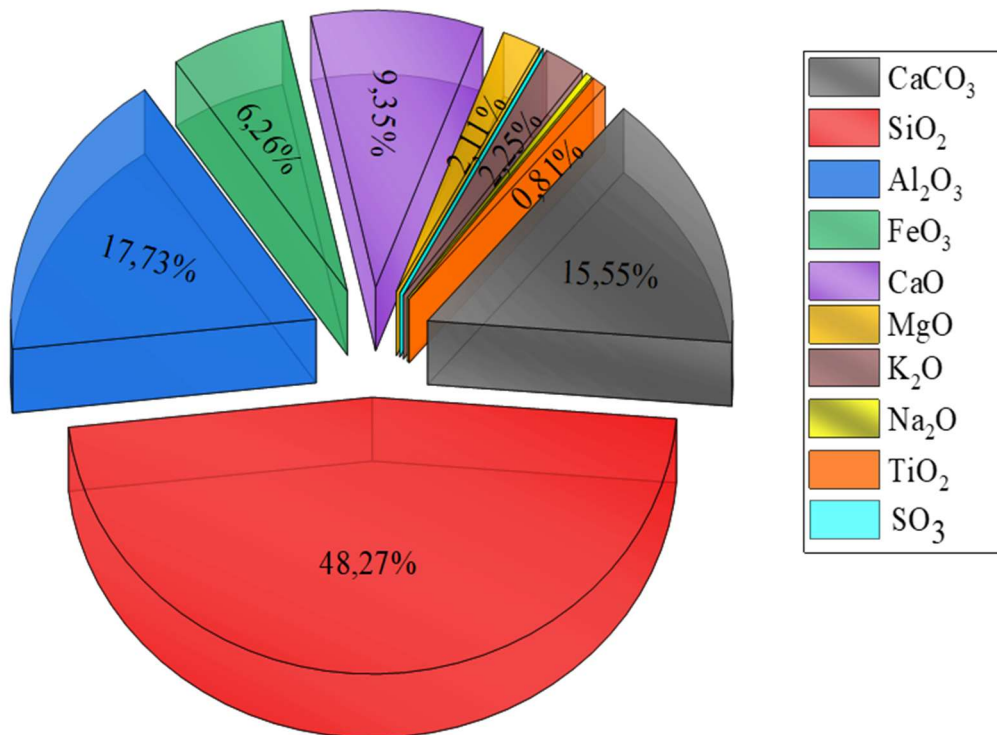


Figure 2- 21. Composition chimique des sédiments de Zardezas.

4.2 Essai de lixiviation

La remobilisation des contaminants dans les sédiments peut être entraînée par les opérations de dragage [25]. Il est également important de noter que la mobilisation des métaux lourds au sein d'une matrice est fonction de sa composition minéralogique [178]. Cette dernière peut donc, influencer favorablement ou défavorablement leur relargage et la migration des contaminants dans l'eau, étant donné que l'eau représente le principal vecteur de migration des éléments toxiques pouvant, éventuellement, être lixiviés.

L'évaluation de l'impact environnemental est alors indispensable avant de décider du devenir des sédiments (élimination ou valorisation). À cet égard, des tests de lixiviation ont été menés sur les sédiments de Zardezas selon la norme EN 12457-2 [79], afin de déterminer leur concentration en contaminants.

o Principe et protocole d'essai

Une prise d'essai d'environ 90 g a été mise en agitation dans de l'eau ultrapure avec un rapport L/S égale à 10 pour une durée de 24h. Après cette durée, la solution a été laissée décanter 15 minutes et l'éluat a été ensuite récupéré par filtration à travers un filtre-seringue à membrane en acétate de cellulose de 0,45 μm comme montré dans la **Figure 2- 22**. Par ailleurs,

Chapitre 2. Caractérisation des sédiments de Barrage de Zardezas : physico-chimique, minéralogique et mécanique.

le pH, la conductivité ionique et la valeur de la fraction soluble ont été déterminés. Il convient d'acidifier la solution à un pH compris entre 1 et 2 avec 2% d'acide nitrique (HNO_3 à 65%) pour éviter que certains éléments se précipitent et quittent la phase dissoute avant le moment de l'analyse, pour l'échantillon dédié à l'analyse des éléments-traces par ICP.

Un deuxième échantillon pour la détermination de la concentration en anions (Chlorure, Fluorure et Sulfate) par chromatographie ionique sans ajout de HNO_3 a été également préparé de la même manière.

Les dispositifs de mesure utilisés sont un spectromètre ICP-OES 5110 par Agilent Technologies pour l'analyse ICP et un chromatographe ionique du type Dionex ICS-6000 pour la détermination des anions.



Figure 2- 22. Protocole de préparation des échantillons pour la détermination de la teneur en contaminants.

o Résultats et interprétations

Les résultats obtenus en termes de pH et de conductivité électrique, sont illustrés dans le **Tableau 2- 11**. Nous constatons que les teneurs en métaux lourds obtenues sont en conformité avec les seuils de référence prescrits par l'arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux Installations de Stockage des Déchets Inertes.

Tableau 2- 11. Concentration en contaminants des sédiments bruts comparée aux valeurs limites à respecter ISDI.

Elements	Sédiments bruts (mg/kg MS)	ISDI (mg/kg MS)
As	<0,11	0,5
Ba	0,57	20
Cd	<0,009	0,04
Cr	<0,004	0,5
Cu	0,064	2
Mo	<0,088	0,5
Ni	<0,047	0,4
Pb	<0,023	0,5
Sb	<0,057	0,06
Se	<0,083	0,1
Zn	0,02	4
Chlorure	39,50	800
Fluorure	7,15	10
Sulfate	515	1000
Fraction Soluble	1000	4000
PH	8,35	[5,5-12,5]
Conductivité ionique ($\mu\text{s/cm}$)	292	

5. Caractérisation minéralogique par diffraction aux rayons X (DRX)

o Principe et protocole d'essai

L'identification des phases cristallines des sédiments de Zardezas a été déterminée au diffractomètre à rayons X BRUKER D8 Focus équipé d'une source de rayonnement $\text{CuK}\alpha$ avec une longueur d'onde de $\lambda_{\text{K}\alpha} = 1,74 \text{ \AA}$, sur une plage angulaire 2θ comprise entre 5 et 80° avec un pas d'environ $0,02^\circ$ et un temps d'acquisition d'une seconde. Une tension de 40 kV est générée pour une intensité de 30 mA .

o Résultats et interprétations

Le diffractogramme obtenu sur la **Figure 2- 23** montre que les sédiments de Zardezas se composent principalement des trois phases suivantes : les silicates (quartz (SiO_2)), les carbonates (la calcite (CaCO_3) et la dolomite) et des argiles (kaolinite, albite, chlorite et de l'illite), c'est ce qui explique vraisemblablement, leur plasticité élevée. Ceci s'accorde avec l'analyse chimique réalisée par la technique de diffraction aux rayons X (FX).

Des phases cristallines similaires ont été trouvées par Remini [87] sur les mêmes sédiments de barrage.

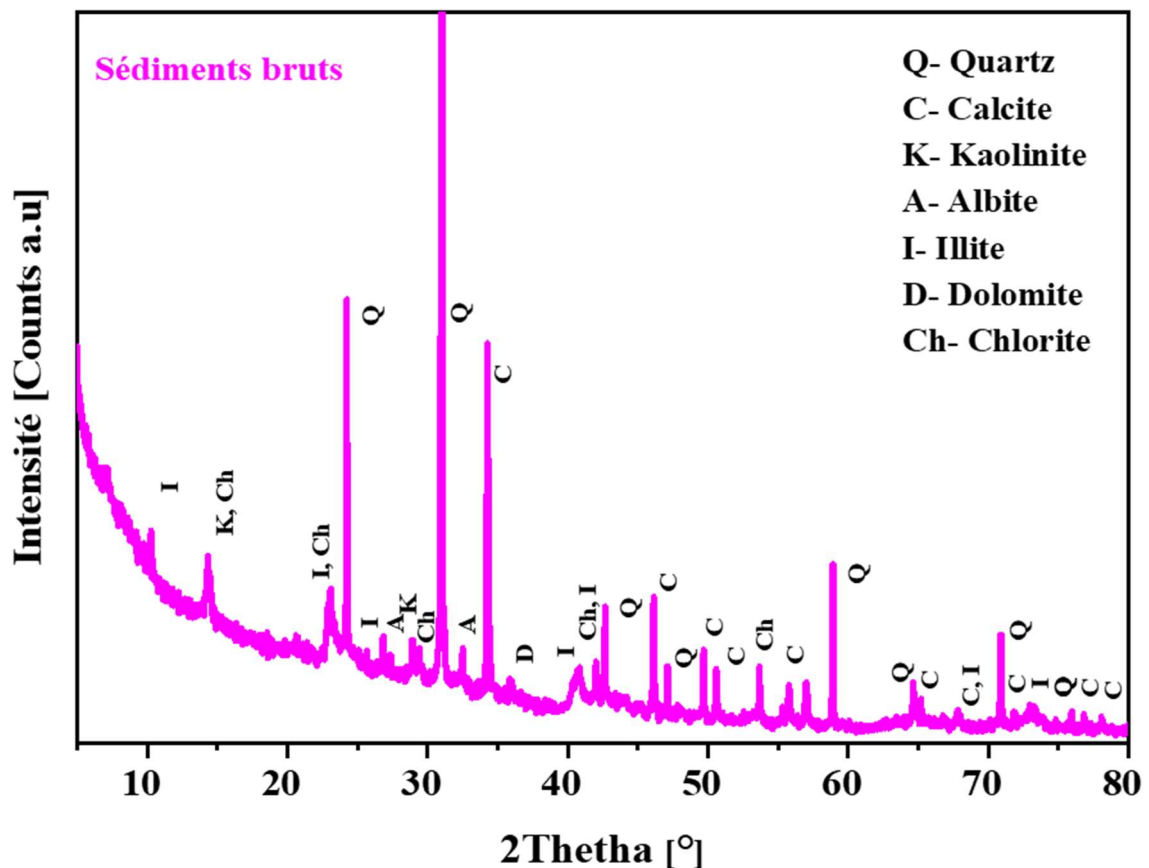


Figure 2- 23. Spectres de diffraction des sédiments de Zardezas.

6. Microscopie optique (MO) et électronique à balayage (MEB)

o Phase de préparation des échantillons pour une observation au MEB

Une couche de sédiments bruts désagrégés d'environ 2 mm a été introduite dans le fond d'un moule en silicone préalablement graissé, puis recouverte en résine et placée à l'intérieur d'une chambre à vide de l'appareil d'imprégnation Struers Epovac afin de permettre le dégazage optimal de l'échantillon. Après durcissement de la résine dans un four à 40°C pendant au moins 48h, le polissage de la section a été effectué à l'aide de l'appareil Struers Tergamin en deux étapes, un polissage grossier et un polissage fin.

Afin de rendre l'échantillon conducteur et afin d'éviter les effets de charges lors des observations, la section polie a été traitée d'une couche mince de Carbone à l'aide d'un métalliseur de la marque Polaron CC7650. Le métalliseur Or Agar Sputter Coater a été également utilisé pour l'échantillon en poudre destiné à l'imagerie par contraste topographique (SE). L'imagerie en mode BSE et SE a été réalisée à l'aide d'un microscope électronique à

Chapitre 2. Caractérisation des sédiments de Barrage de Zardezas : physico-chimique, minéralogique et mécanique.

balayage couplé à un analyseur EDS et avec une tension d'accélération de 20.0 et de 5.0 Kv et une distance de travail de 8.0 mm. (Figure 2- 24).

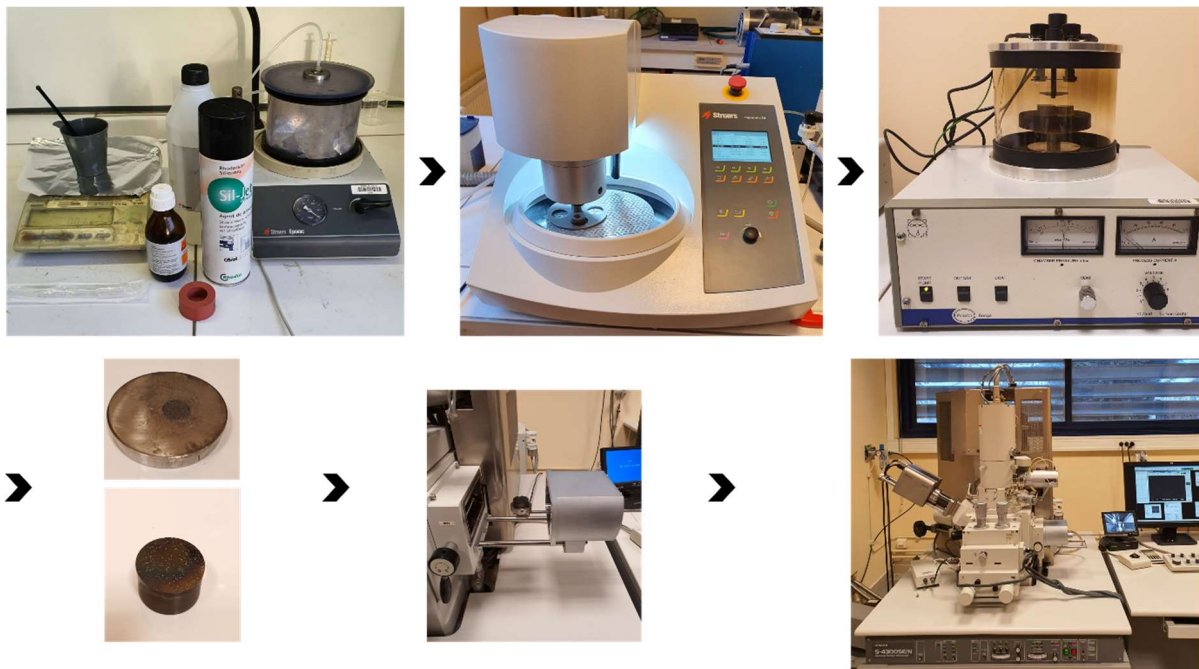


Figure 2- 24. Etapes de préparation des échantillons pour des observations au MEB (BES et SE).

o Résultats obtenus par imagerie et interprétation

Les images obtenues sur les sédiments bruts de Zardezas par microscope électronique à balayage en électrons rétrodiffusés ont permis de mettre en évidence la présence de la pyrite framboïdale dans leur composition minéralogique comme exposé sur la **Figure 2- 25**. Ceci est venu en complément aux études antérieures pour confirmer les minéraux identifiés dans des sédiments marins et fluviaux [35,131,150,179]. En application de traitements hydrauliques pour la valorisation des sédiments et en présence d'aluminate et de silicates de calcium hydratés, la pyrite peut être à l'origine de formation des éléments expansifs notamment l'ettringite et la thaumasite [25]. La **Figure 2- 26** illustre la morphologie des particules, des agglomérats de particules fines poreuses et la structure en feuillet des argiles présente dans les sédiments bruts de Zardezas.

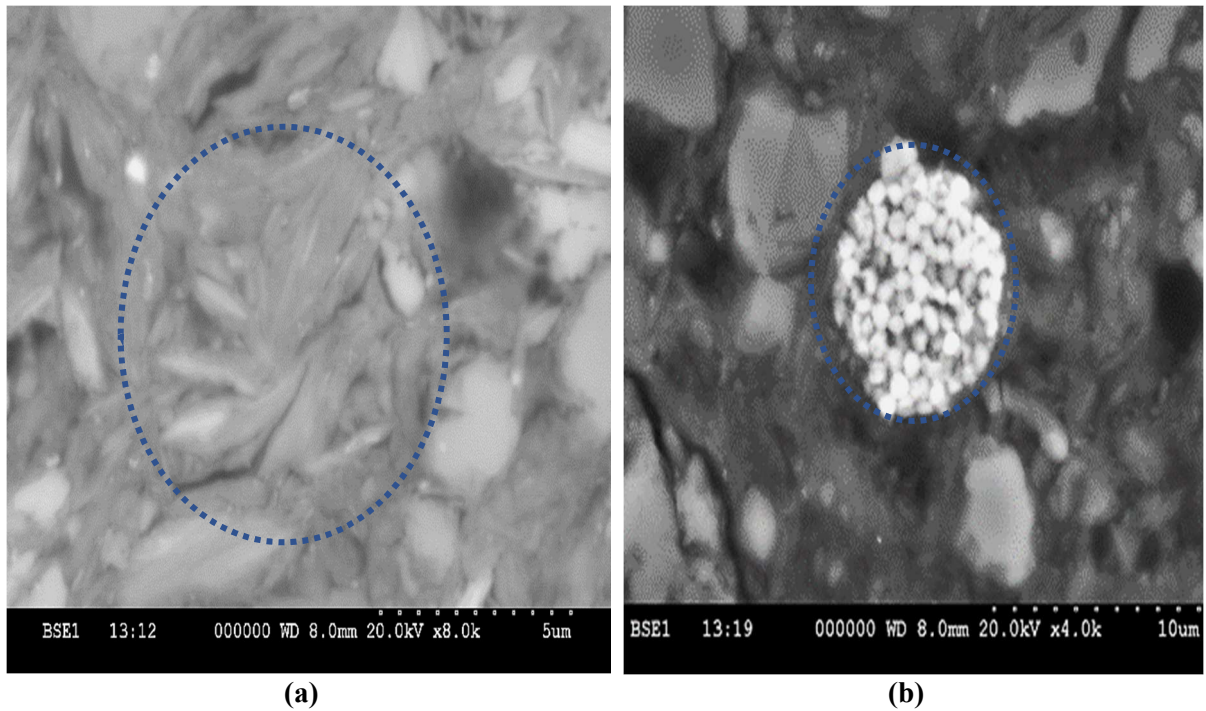


Figure 2- 25. Observation MEB, mode BSE (a) structure en feuillet des argiles (b) Fromboïde de Pyrite.

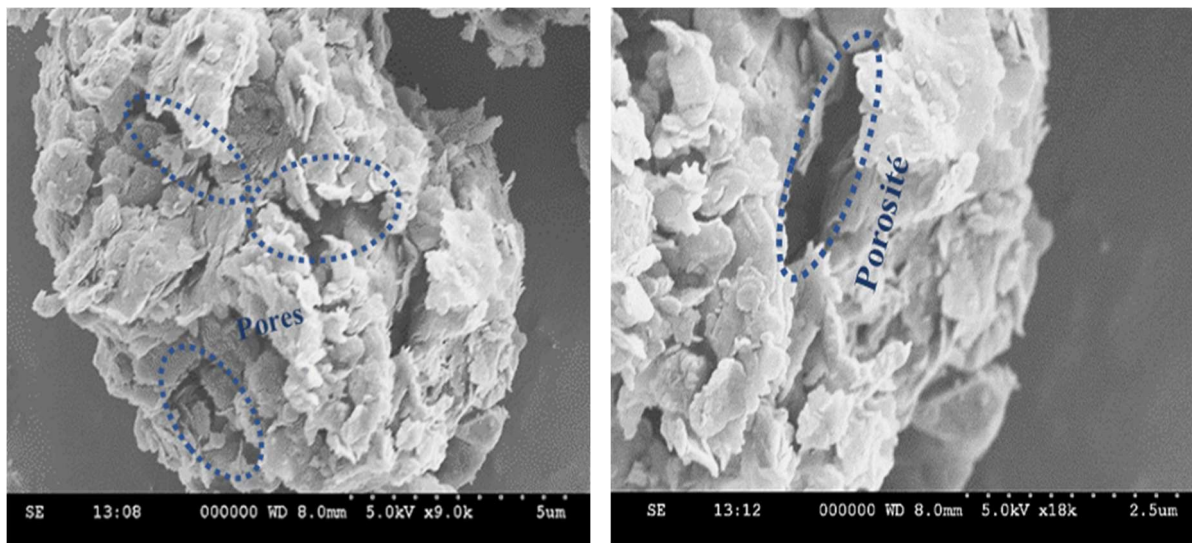


Figure 2- 26. Clichés au MEB en électrons secondaires (SE), sur les sédiments bruts de Zardezas.

7. Conclusion

Cette étude a permis de mener une caractérisation physico-chimique, environnementale, minéralogique et une connaissance de l'aptitude au compactage des sédiments du barrage de Zardezas. La teneur en constituants a montré une prédominance de la fraction fine avec un pourcentage de 90%. Les sédiments s

Chapitre 2. Caractérisation des sédiments de Barrage de Zardezas : physico-chimique, minéralogique et mécanique.

ont qualifiés comme des argiles limoneuses très plastiques selon les valeurs élevées des limites d'Atterberg. Aussi, une teneur en matière organique supérieure à 3% mais inférieure à 10% a été enregistrée. Cette présence de matière organique pourrait perturber les réactions d'hydratation, la prise hydraulique ou pouzzolanique des mélanges [31], même si ces sédiments sont en sous-classe F11 correspondante aux matériaux faiblement organique. Par ailleurs, en se référant à la distribution granulométrique, les sédiments font partie de la classe A3 (**A3 F11**). L'étude du comportement au compactage des sédiments bruts a été menée à l'aide d'un Proctor miniature. L'utilisation de ce dispositif miniature a permis de gagner du temps et de réduire la quantité de sédiments nécessaire à l'étude. D'autres part, la portance des sédiments bruts obtenue est très faible, et n'atteint pas la valeur limite inférieure fixée à 10 requise par le guide GTS [31]. De ce fait, les sédiments ne sont pas aptes en leur état brut pour une utilisation en tant que matériau routier. La sensibilité à l'eau et la plasticité élevée des sédiments impliquent l'utilisation d'un traitement pour une valorisation en couche de forme en techniques routières, suivant les prescriptions du guide GTR [30].

Chapitre 3.

Optimisation de liants hydrauliques routiers à base des sédiments de barrage et de laitier de hauts-fourneaux [82]

Le présent chapitre est une version traduite de l'article publié le 28 Septembre 2021 dans la revue Buildings de MDPI (Impact Factor **2,648**), intitulé « Optimization of an Eco-Friendly Hydraulic Road Binders Comprising Clayey Dam Sediments and Ground Granulated Blast-Furnace Slag » [82].

Introduction

Aujourd'hui, l'industrie cimentaire représente une source majeure d'émission de CO₂. En effet, elle est responsable de 5 à 8% des émissions mondiales de gaz à effet de serre, annuellement [6,7]. Cependant, devant la nécessité de couvrir les besoins croissants du marché, la production du ciment pourrait atteindre ou même dépasser les 7 milliards de tonnes/an d'ici 2050 [11]. Ces dernières années, et au regard du développement économique et industriel que le monde connaît, l'approvisionnement en ressources naturelles est devenu de plus en plus difficile. Face à cette problématique, les industriels ont eu recours de plus en plus aux matières premières secondaires (cendres volantes, laitiers de hauts-fourneaux, mâchefers, déchets du BTP, etc..) issues des sous-produits industriels pour combler ce manque. En parallèle, beaucoup de travaux de recherches scientifiques ont été initiés afin d'explorer et de valider l'utilisation d'autres déchets (sédiments, cendres de biomasse, déchets de verre, etc.) dans une logique d'économie circulaire et de développement de nouvelles ressources alternatives aux ressources naturelles. L'incorporation des sédiments dans les matrices cimentaires offre des perspectives innovantes économique et écologique pour les années à venir. Par conséquent, cette démarche vise non seulement à l'élimination de déchets générés et stockés en décharge et la préservation de ressources naturelles mais aussi à la diminution de l'impact environnemental par la réduction de l'empreinte carbone.

Cette partie a été consacrée à l'étude du potentiel de substitution partielle du ciment portland (CEM I 42,5N) par des sous-produits issus de l'industrie sidérurgique (laitier de hauts-fourneaux), et des additions minérales (sédiments de barrage calcinés), en provenance de la région de Skikda. L'objectif était de formuler des liants hydrauliques routiers (LHR) selon les prescriptions de la norme NF EN 13282-2-Partie 2: « liants hydrauliques routiers à durcissement normal - Composition, spécifications et critères de conformité ». La méthodologie adoptée pour l'optimisation des pourcentages des différents constituants est celle des plans de mélange, à l'aide du logiciel Design-Expert.

Dans un premier temps, une caractérisation physico-chimique et minéralogique des différentes additions a été réalisée. Ceci, afin d'optimiser leur incorporation dans les formulations de LHR. Dans un deuxième temps et afin de s'assurer de la conformité des liants élaborés par rapport aux exigences prescrites par la norme NF 13282-2 [125], des essais de caractérisation sur les différents mortiers formulés ont été menées, à l'état frais : l'étalement à

la table à choc, le temps de prise, l'expansion (Le Chatelier), comme à l'état durci : performances mécaniques (compression et flexion), porosité accessible au mercure (PIM) et des essais complémentaires : des analyses par microscopie électronique à balayage ainsi que l'évaluation de l'impact environnemental par le test de lixiviation. Le tableau de référence des normes correspondantes à chaque type d'essai utilisé est présenté en annexe.

1. Matériaux et méthodes

1.1.1 Ciment (C)

Le ciment utilisé est un CEM I 42,5N composé de 95% à 100% de clinker et de 0 à 5% de constituants secondaires. Avec un temps de début de prise supérieur à 60 min et une valeur d'expansion inférieure à 10 mm, conformément à la norme européenne NF EN 197-1 [128]. La résistance à la compression simple à 28 jours, réalisée selon la norme EN 196-1 [129], était comprise dans l'intervalle de résistance entre 42,5 et 62,5 MPa. Le **Tableau 3- 1** ci-dessous, récapitule les propriétés physico-chimiques du ciment employé dans ce travail. La distribution granulométrique de ses particules solides est montrée sur la **Figure 3- 1**.

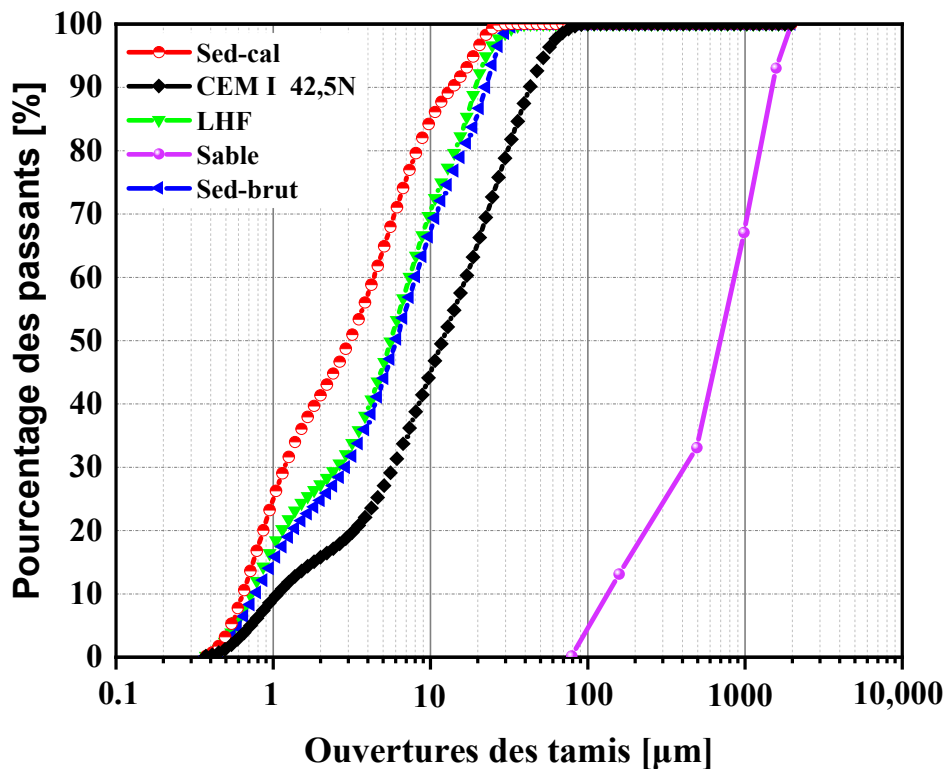


Figure 3- 1. Courbe granulométrique des différents constituants.

Tableau 3- 1. Caractéristiques physiques et chimiques du ciment.

Propriétés physiques	Valeurs	Eléments majeurs	Pourcentages (%)
SS BET (cm ² /g)	9194	SiO ₂	17.13
Densité (g/cm ³)	3.16	Al ₂ O ₃	4.51
D10 (µm)	1.09	FeO ₃	2.95
D50 (µm)	12.09	CaO	60.13
D90 (µm)	43.50	MgO	0.78
		SO ₃	4.09
		K ₂ O	1.01
		Na ₂ O	0.29
		TiO ₂	0.32
		MnO	Traces
		BaO	Traces
		SrO	Traces
		OF ₂	---

1.2 Laitier de hauts-fourneaux (LHF)

Le laitier de hauts-fourneaux (LHF) utilisé a été collecté du complexe sidérurgique d'El Hadjar situé dans la wilaya d'Annaba au nord-est de l'Algérie. La production de l'acier dans ce complexe génère environ 500 000 t/an de LHF, environ 60% de ces résidus subissent un refroidissement rapide à la sortie de hauts-fourneaux, ils se solidifient ensuite pour former un matériau vitreux sous forme d'un sable, dont le diamètre de ses particules solides est compris entre 0 et 5 mm [143]. Le LHF a été ensuite finement broyé au niveau du laboratoire à l'aide d'un vibro-broyeur à disques RS 200 de Retsh. Les différentes caractéristiques du LHF sont présentées dans la **Figure 3- 2** et le **Tableau 3- 2** ci-après.

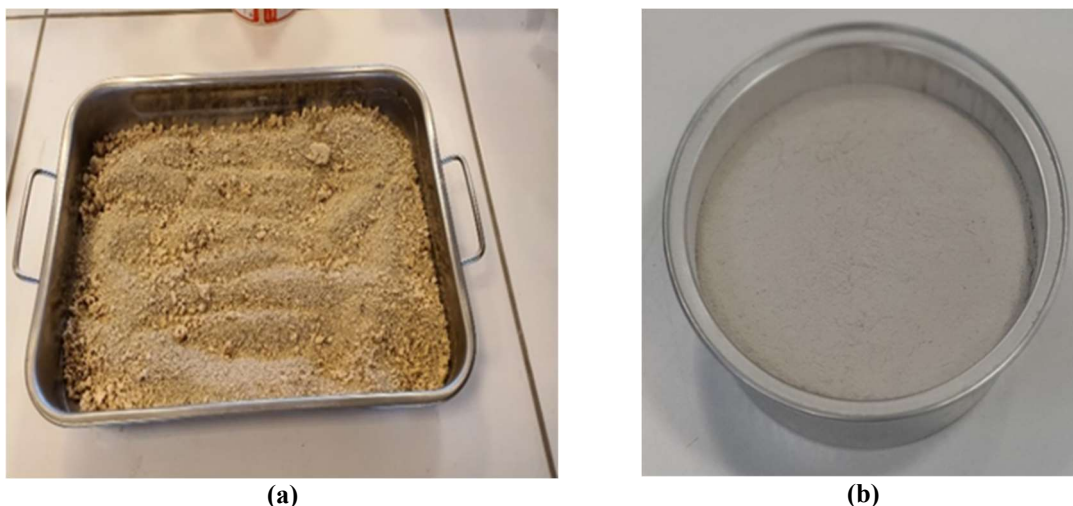


Figure 3- 2. Laitier de hauts-fourneaux provenant d'El Hadjar (a) granulé et (b) finement broyé.

Tableau 3- 2. Caractéristiques physico-chimiques du LHF.

Propriétés physiques	Valeurs	Éléments majeurs	Pourcentages (%)
SS BET (cm ² /g)	9171	SiO ₂	34.35
Densité (g/cm ³)	2.95	Al ₂ O ₃	7.83
D10 (µm)	0.73	FeO ₃	0.76
D50 (µm)	5.70	CaO	41.47
D90 (µm)	20.09	MgO	4.09
		SO ₃	1.56
		K ₂ O	1.19
		Na ₂ O	0.26
		TiO ₂	0.27
		MnO	1.48
		BaO	1.56
		SrO	0.24
		OF ₂	0.82

1.3 Sable

Un sable normalisé CEN, avec une teneur en silice de 98%, au moins, et de diamètre maximal de 2 mm a été utilisé pour la formulation des mortiers selon la norme EN 196-1 [129]. La distribution granulométrique du sable est présentée sur la **Figure 3- 1**.

1.4 Sédiments de barrage

Les sédiments employés comme matériau de substitution au ciment pour l'élaboration de LHR sont les sédiments du barrage de Zardezas de la région de Skikda. Le mode de prélèvement, de transport, de conservation ainsi que leur caractérisation ont été abordés de façon détaillée dans le chapitre précédent (cf. **Chapitre 2.**).

1.5 Optimisation du traitement thermique pour l'activation des sédiments

La température de calcination optimale a été déterminée par analyse thermogravimétrique (ATG) à l'aide d'un instrument de mesure de la marque NETZSCH- QMS 403D sous un flux d'argon avec un débit de 60 ml/min. Cette technique consiste en la mesure des variations massiques d'un échantillon en fonction d'un cycle thermique sous atmosphère contrôlée.

L'analyse ATG a été réalisée sur les sédiments de Zardezas, dans le but d'observer leurs différentes phases de décomposition pendant un cycle thermique compris entre 35°C et 1000°C, avec une montée en température de 2°C/min, de 35 à 40°C et de 3°C, de 40°C jusqu'à 1000°C.

Les quatre phases observées (apparition des pics) sont illustrées sur la **Figure 3- 3** :

- L'intervalle variant entre 40°C et 225°C : correspondant principalement à l'évaporation de l'eau liée et l'eau adsorbée [19,180];
- Entre 225°C et 320°C : ceci peut être attribué à la décomposition de L'hydroxyde de fer [180] ;
- Entre 225°C et 320°C : la décomposition de la matière organique prend place dans cet intervalle [19] ;
- Entre 550°C et 800°C : cette phase représente la décomposition des carbonates CaCO_3 (décarbonation) [181].

Par ailleurs, la déshydroxylation des minéraux argileux présents dans les sédiments de Zardezas a été observée dans l'intervalle de variation de température compris entre 350°C et 800°C. D'après ces résultats, la température de calcination permettant d'avoir une **activation thermique optimale** des sédiments est de **800°C**. Ce traitement thermique permet de garantir une réactivité pouzzolanique optimale des sédiments.

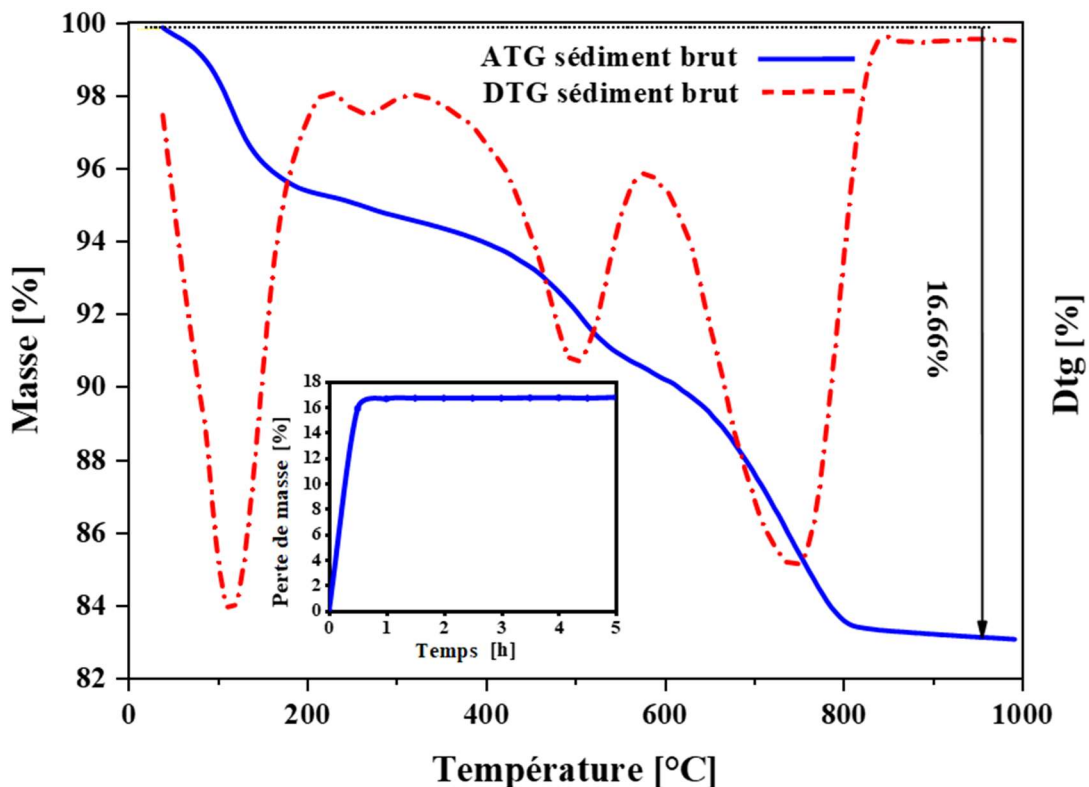


Figure 3- 3. Perte de masse des sédiments en fonction du temps et de la température.

Afin de définir le temps **nécessaire/optimal** à la calcination des sédiments, un suivi de perte de masse à 800°C des sédiments a été réalisé. Le protocole consistait en un suivi de l'évolution de la perte de masse en fonction de la durée de calcination. Les étapes sont illustrées sur la **Figure 3- 4**.



Figure 3- 4. Détermination de la durée optimale de calcination.

La **Figure 3- 3** montre que la perte de masse devient négligeable (presque égale à zéro) après 1h de traitement thermique (calcination). Cette stabilisation de la masse peut être traduite par la décomposition totale des éléments/composés présents dans les sédiments (matières organiques, déshydroxylation des minéraux argileux et la décarbonatation de la calcite) [4,83]. D'après ces résultats, une calcination à 800°C pour une durée de 1h, a été considérée comme le temps nécessaire pour une calcination optimale [4]. Ce traitement thermique permet la destruction partielle de la matière c-à-d la création d'une structure désordonnée amorphe. Cette dernière confère aux sédiments un caractère pouzzolanique qui conduit à la formation des composés hydratés de silicates de calcium et d'aluminates de calcium, en réagissant avec la portlandite produite par le ciment, en présence d'eau [128]. La **Figure 3- 5** illustre bien l'aspect visuel des sédiments avant et après traitement thermique et physique. La présence de fer dans les sédiments se manifeste par une couleur rougeâtre après calcination. D'après la littérature, cette couleur apparaît même à une faible teneur en fer [15].

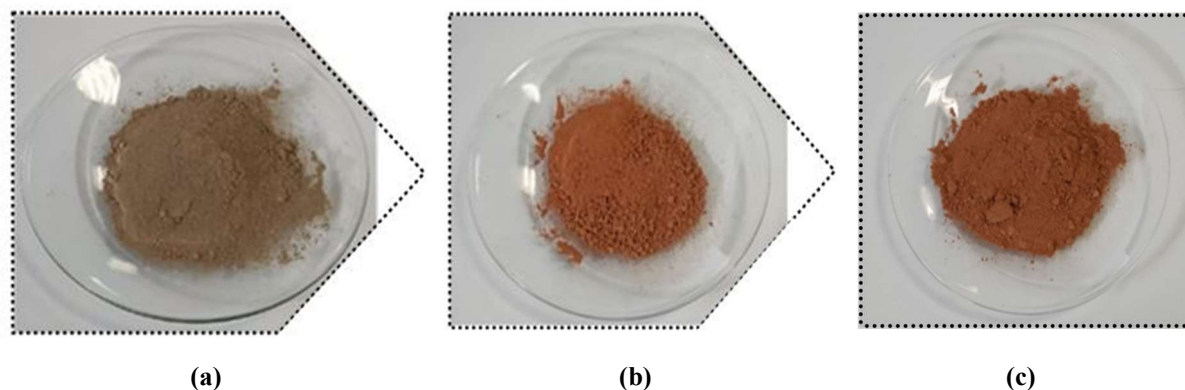


Figure 3- 5. Aspect visuel des (a) sédiments bruts séchés et concassés, (b) sédiments calcinés, (c) sédiments calcinés broyés.

1.6 Composition chimique et minéralogique des sédiments bruts et des différentes additions

La composition chimique des matériaux utilisés dont les valeurs sont reportées dans le **Tableau 3- 1**, **Tableau 3- 2** et **Tableau 3- 3**, a été déterminée par un spectromètre de Fluorescence X de type S4 PIONEER. Le pourcentage de SiO_2 (silice), Al_2O_3 (alumine) et Fe_2O_3 (hématite) présent dans la composition chimique des sédiments calcinés est de 77,99%, ce qui est supérieur à la valeur de référence de 70%, pour les matériaux pouzzolaniques selon la norme ASTM C618A. La faible teneur en SO_3 (sulfate) dans les sédiments calcinés peut être expliqué par la décomposition des matières organiques à la suite du traitement thermique [4].

Tableau 3- 3. Caractéristiques physico-chimiques des sédiments calcinés.

Propriétés	Sédiments bruts	Sédiments calcinés
SS BET (m^2/g)	25,08	30,73
Densité (g/cm^3)	2.63	2,75
Fraction argileuse	23,6	39,57
$D_{\text{max}} < 2\mu\text{m}$ (%)		
Fraction silteuse	76.4	60.43
$2\mu\text{m} < D_{\text{max}} < 63\mu\text{m}$ (%)		
SiO_2	48.27	51.84
Al_2O_3	17.73	19.23
FeO_3	6.26	6.92
CaO	9.35	10.2
MgO	2.11	2.41
SO_3	---	0.28
K_2O	2.25	2.47
Na_2O	0.36	0.38
TiO_2	0.81	0.9

L'identification des différentes phases minéralogiques présentes dans les matériaux utilisés a été réalisée à l'aide d'un diffractomètre à rayon X (DRX). Les spectres de diffraction

de chaque matériau sont représentés dans la **Figure 3- 6**. Les structures cristallines du LHF et des sédiments ont été déterminées à l'aide d'un diffractomètre BRUKER D8 Focus, avec une radiation $CuK\alpha$, de longueur d'onde $\lambda_{K\alpha}$ de 1,74 Å. Une plage d'angles 2θ allant de 5 à 80° a été utilisée par pas de 0,02° et un temps de comptage d'une seconde par pas. Une intensité de courant de 30 mA et une tension d'accélération de 40 kV ont également été utilisés. Les sédiments de Zaderas sont composés principalement de trois phases, à savoir les silicates (Quartz), des carbonates (calcite ($CaCO_3$) et dolomite) et les minéraux argileux (Kaolinite, Albite, Chlorite et Illite), comme abordé dans le chapitre précédent (cf. **Chapitre 2**).

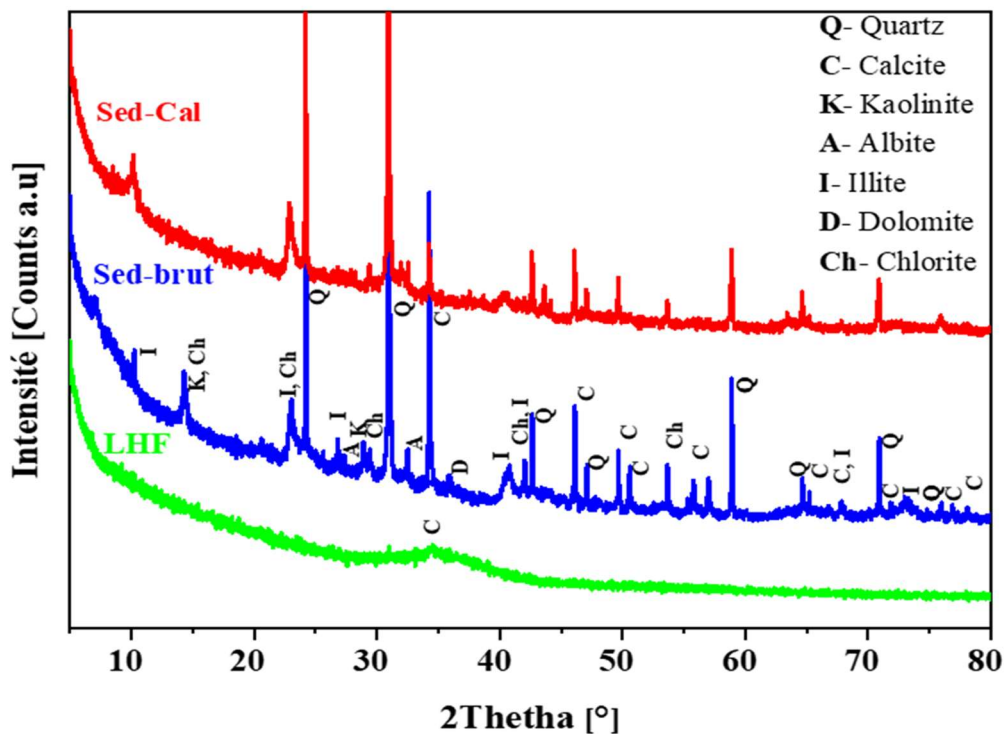


Figure 3- 6. Spectres de diffraction des sédiments et du LHF.

La présence de la kaolinite dans les sédiments du barrage de Zardezas présente un indicateur du potentiel pouzzolanique de ces derniers. Les spectres de diffraction des sédiments bruts et calcinés ont montré que le pic de la kaolinite disparaît complètement après calcination, en raison de la déshydroxylation et de la transformation de la kaolinite en métakaolin dans la plage des températures comprises entre 650° et 850°[3]. Alujas et al. [180] et Avet et al [182] ont montré que la réactivité d'une argile dépend en majeure partie de la quantité de kaolinite qu'elle renferme. Les auteurs ont montré également que les résistances à la compression simple d'un mortier contenant 40 % de kaolinite, 50 % de clinker et 30 % d'argile calcinée sont du même ordre que celle d'un mortier de référence (à base de ciment Portland).

1.7 Optimisation des formulations utilisant la méthodologie des plans d'expérience (Plan de mélange)

Les plans de mélange permettent d'évaluer simultanément les effets des facteurs (variables d'entrée) sur les réponses du système (variables de sortie) à l'aide de la méthodologie de surface de réponse (MSR) [183]. Les Plans de mélange permettent un gain considérable de temps et de coûts, car ils présentent l'avantage d'obtenir un maximum d'informations pour un nombre réduit d'expériences. Fatemi et al [184] ont utilisé la méthode des plans de mélange pour l'optimisation d'une peinture durable pour marquage routier. Li et al [185] ont également opté pour les plans d'expériences en utilisant la méthode de plans composites centrés afin d'évaluer l'effet d'interaction de ces quatre paramètres : la teneur en MgO, la teneur en SO₃, la température et le temps de frittage durant le processus de frittage du clinker. Imanzadeh et al [186] ont étudié l'impact simultané de quatre composants : le limon, la chaux, le ciment et de l'eau sur la résistance à la compression simple d'un béton de terre en faisant appel à la méthode de plan de mélange. D'autres se sont également intéressés à l'utilisation des plans d'expériences dans le domaine du génie civil [51,85,183].

Dans le cadre de cette étude un plan de mélange a été conçu pour l'optimisation de liants hydrauliques routiers [186]. Le logiciel Design expert a été utilisé afin d'évaluer l'effet du ciment (C) (X1), du laitier de hauts-fourneaux (LHF) (X2) et de sédiments calcinés (SC) (X3) sur la résistance à la compression simple du mortier après 28 jours de cure normale. Il est à noter que la somme des composantes (X1, X2 et X3) est égale à 1 (équation (20)). En outre, la méthode des plans de mélange permet de spécifier des limites inférieures et supérieures pour chaque facteur ou paramètre d'entrée (X1, X2 et X3). Ces limites doivent se situer entre 0 et 1 (0 à 100 %), telles que résumées dans le **Tableau 3- 4**.

$$\sum_{i=1}^{i=n} X_i = 1, \text{ avec } 0 < X_i < 1 \tag{20}$$

Tableau 3- 4. Valeurs limites des facteurs du plan de mélange.

Valeurs limites	X ₁ (C)	X ₂ (LHF)	X ₃ (SC)
Inférieures	50	0	0
Supérieures	100	50	30

Le domaine expérimental obtenu est montré sur la **Figure 3- 7**, il a été construit à partir d'un modèle polynomial quadratique à l'aide du logiciel Design Expert. Les points rouges représentent les 11 mélanges proposés pour être testés.

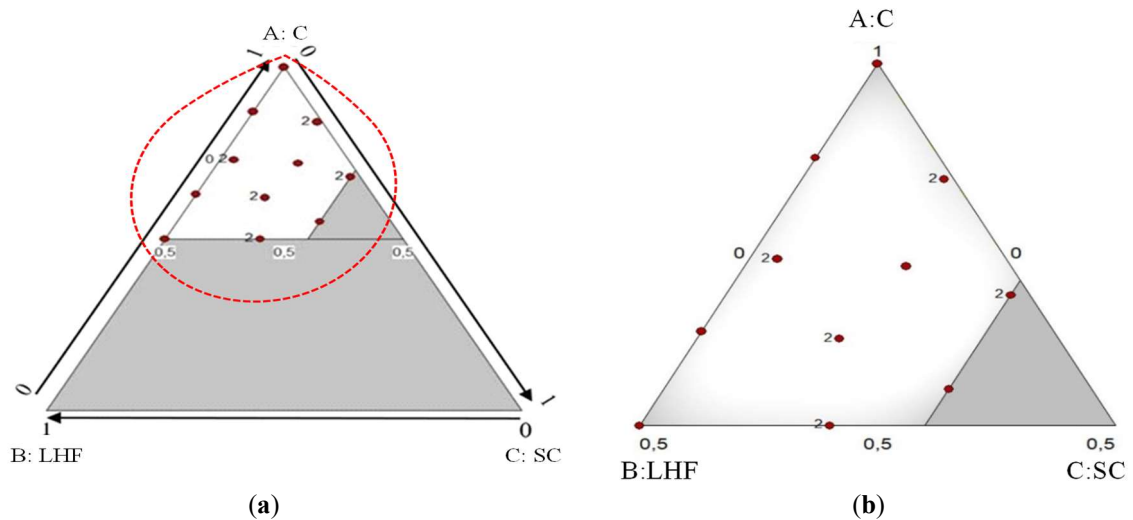


Figure 3- 7. (a) domaine expérimental, (b) distribution des formulations à tester dans le domaine expérimental.

1.8 Protocole expérimental

1.8.1 Préparation des éprouvettes

Les mortiers formulés (

Tableau 3- 5) étaient composés d'une part de liant, trois parts de sables normalisés et une demi part d'eau, selon la norme NF EN 196-1 [129]. Des éprouvettes prismatiques de dimension 4x4x16 cm ont été confectionnées et conservées dans l'eau à 20°C jusqu'à la date de l'essai. La **Figure 3- 8** ci-après, illustre le protocole de préparation de l'ensemble des éprouvettes pour la réalisation des essais mécaniques.



Figure 3- 8. Etapes de préparation des mortiers pour écrasement.

Tableau 3- 5. Les formulations de mortiers proposées par le plan de mélange.

Formulations	Ciment (C)		LHF		Sédiments calcinés (SC)	
	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)
84C01LHF15SC	84	378	01	5	15	68
68C02LHF30SC	68	306	02	09	30	135
72C11LHF17SC	72	324	11	50	17	77
55C15LHF30SC	55	248	15	68	30	135
73C24LHF03SC	73	329	24	108	03	14
63C37LHF00SC	63	284	37	167	00	00
100C00LHF00SC	100	450	00	00	00	00
87C13LHF00SC	87	392	13	59	00	00
50C30LHF20SC	50	225	30	135	20	90
62C23LHF15SC	62	279	23	104	15	68
50C50LHF00SC	50	225	50	225	00	00

1.8.2 Consistance normalisée - Demande en eau

L'état de consistance d'une pâte de ciment est associé à sa fluidité et sa capacité de déformation [181]. La demande en eau de la pâte de ciment a été réalisée avant de procéder à l'essai de prise suivant la norme NF EN 196-3 [187] à l'aide d'un appareil de Vicat. Le but est de définir la quantité d'eau nécessaire permettant la pénétration d'une sonde normalisée d'une longueur de 45 mm et d'un diamètre de 10 mm ± 0,05 sur une profondeur de 6 mm ± 2, entre la plaque de base et la surface inférieure de la sonde. Pour ce faire, une quantité de ciment est gâchée en variant le dosage en eau, puis mélangée au moyen d'un malaxeur. La pâte est ensuite introduite dans un moule tronconique préalablement graissé, placé sur une plaque de base, en évitant tout tassement ou vibration excessifs, puis, l'excès de la pâte est arasé à l'aide d'une spatule plate afin d'obtenir une surface lisse. La sonde est maintenue en contact avec la surface de la pâte pendant 1 ou 2 secondes, puis lâchée sans vitesse initiale et laissée pénétrer verticalement au centre de la pâte. L'essai est reproduit jusqu'à la détermination de la quantité d'eau correspondante à une pénétration de la sonde à 6 mm ± 2 (**Figure 3- 9**).



Figure 3- 9. Détermination de la consistance normalisée de la pâte de ciment.

1.8.3 Consistance du mortier frais

L'essai de l'étalement à la table à choc (**Figure 3- 10**) a permis de déterminer la consistance du mortier frais à 0 min, 30 min, 60 min et 90 min. Le mortier préparé comme spécifié précédemment (voir **1.8.1**) est introduit en deux couches égales, dans un moule tronconique avec un diamètre inférieur de 100 mm, un diamètre supérieur de 70 mm et une hauteur de 60 mm, chaque couche doit recevoir 10 coups à l'aide d'une mini-dame. L'excès de la matière est arasé, la table est nettoyée puis le moule est soulevé verticalement. Le diamètre en mm de l'échantillon (d_1 et d_2) est mesuré dans les deux sens parallèles aux pourtours de la table après l'application de 15 coups à la table à chocs selon la NF EN 1015-3 [188]. Les mélanges ont été conservés dans des sacs en plastique fermés à 20 °C pour la préservation de l'humidité des mortiers.



Figure 3- 10. Mesure de l'étalement à la table à choc des mortiers.

1.8.4 Mesure du Temps de prise

La détermination du temps de début et de fin de prise a été réalisée à l'aide d'un appareil Vicat automatique de la marque Vicatronic (**Figure 3- 11**). La pâte de ciment de consistance normale, préparée conformément à la norme NF EN 196-3 [187], a été introduite dans un moule tronconique, puis, l'ensemble a été placé sous l'aiguille de Vicat.

Le temps de début de prise correspond au temps où l'aiguille atteint une distance de $6 \text{ mm} \pm 3$ de la plaque de base de l'appareil Vicat. Cependant, le temps de fin de prise est atteint

lorsque l'aiguille s'enfonce dans la pâte de ciment sur une profondeur de seulement 0,5 mm par rapport à la surface du moule.



Figure 3- 11. Détermination du temps de prise pour la pâte de ciment.

1.8.5 Mesure de l'expansion (essai Le Chatelier)

Afin de s'assurer de la stabilité volumique des liants hydrauliques routiers élaborés, l'expansion volumique, réalisée et mesurée avec l'appareil «Le Chatelier» a été déterminée conformément à la norme NF EN 196-3 [187]. Une pâte de consistance normale a été préparée dans un mini-malaxeur, puis placée à la main dans un moule «Le Chatelier» légèrement huilé sans compactage ni vibration excessive, l'excédent de pâte est arasé à l'aide d'une spatule à bord droit. Le moule est ensuite recouvert d'une plaque en verre, sur les deux côtés supérieurs et inférieurs et un poids supplémentaire est ajouté. Le dispositif a ensuite été placé dans de l'eau à 20 °C, comme montré dans la **Figure 3- 12**. Après 24h, l'appareil Le Chatelier a été retiré de l'eau et l'espacement entre les deux aiguilles du moule a été mesuré, puis immergé dans un bain thermostatique à ébullition pendant 3h.

Après refroidissement, l'espacement entre les deux aiguilles du moule a été mesuré à nouveau. L'expansion volumique des différentes pâtes de ciment est la différence entre les deux mesures pour chaque mélange.



Figure 3- 12. Mesure d'expansion des différentes pâtes de ciment.

1.8.6 Résistances mécaniques

Les résistances à la compression et à la flexion (R_c et R_f) ont été déterminées sur des éprouvettes de $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 16\text{ cm}$ conformément à la norme NF EN 196-1 [129] après 7, 28, 56 et 90 jours de cure dans l'eau à $20\text{ }^\circ\text{C}$. Chaque résultat présenté correspond à la moyenne de trois mesures.

1.8.7 Mesure de la Porosité par intrusion de mercure

La porosité est un facteur responsable du comportement mécanique et de la durabilité des mortiers durcis en raison de sa capacité à interagir avec l'environnement externe à travers les pores existants [4,83]. Les mesures de la porosité totale et de la distribution des tailles de pores ont été réalisées par la méthode de porosimétrie par intrusion de mercure (PIM) conformément à la norme ISO 15901-1 :2016, au moyen d'un porosimètre de la marque Micromeritics AutoPore V 9600 (Figure 3- 13). Cet instrument de mesure est capable d'effectuer des mesures en basse pression, comprises entre 0 et 50 psi (345 KPa) sur des tailles de pore allant de 360 jusqu'à $3,6\text{ }\mu\text{m}$ et à haute pression, allant de l'atmosphérique jusqu'à 33,000 psi (228 MPa) sur des tailles de 6 à $0,005\text{ }\mu\text{m}$. Ces mesures ont été effectuées sur des petits fragments de mortiers après un arrêt d'hydratation par séchage à $40\text{ }^\circ\text{C}$ sur toutes les échéances 7, 28, 56 et 90 jours.



Figure 3- 13. Porosimètre à mercure.

1.8.8 Quantification de la portlandite

Les analyses thermogravimétriques ont été réalisées sur environ 200 mg du mortier finement broyé à 7, 28, 56 et 90 jours de cure pour quantifier leur teneur en hydroxyde de calcium. La quantité d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) produite lors de l'hydratation du ciment correspond à la quantité d'eau libérée par la portlandite lors de sa phase de décomposition (déshydratation) multipliée par un rapport de **74/18** selon l'équation suivante (21) [39].



La quantité de portlandite par pourcentage massique a été calculée par la méthode de perte de masse dans la plage de température comprise entre 400 à 550 °C à partir de l'équation suivante (22) :

$$\% \text{Ca(OH)}_2 = \frac{\Delta(m_{400^\circ\text{C}}, m_{550^\circ\text{C}}) \times 74}{18} \quad (22)$$

D'où :

74 : masse molaire de CH (portlandite),

18 : masse molaire de H_2O ,

$\Delta(m_{400^{\circ}C}, m_{550^{\circ}C})$: perte de masse entre 400°C et 550°C.

1.8.9 Microscopie électronique à balayage (MEB)

Des observations au microscope électronique rétrodiffusée (BSE) ont été réalisées sur des échantillons de section polie de 1 cm³, imprégnés de résine Epofix par Struers. Un appareil d'imprégnation sous vide de Struers Epovac a été utilisé pour évacuer toutes les bulles d'air avant et après l'enrobage à la résine pendant environ 5 min. Les échantillons ont été placés à l'intérieur d'un four à 40 °C pendant au moins 48 h pour permettre à la résine de durcir avant l'étape de polissage. Le polissage réalisé avec Struers Tergamin 20 en deux étapes successives. La première consiste en un polissage grossier à l'aide des disques abrasifs diamanté MD-piano avec des grains de l'ordre de 80, 220, 500 et 1200 et un lubrifiant à l'éthanol. La deuxième étape consiste en un polissage fin avec des disques MD Dac, diamants avec une granulométrie de 6, 4 et 1 µm et un lubrifiant brun DP.

Le mode BSE sur des échantillons polis et métallisés (recouverts d'une fine couche conductrice de carbone) a été utilisé pour identifier les différentes phases d'hydratation du mortier de ciment en distinguant différentes nuances de gris. Le mode d'imagerie électronique secondaire (SE) sur des fractures métallisées (recouvertes d'une fine couche conductrice en or) a été utilisé pour réaliser des images de morphologie des particules à un voltage d'accélération de 5,0 Kv et 15,0 Kv et à des distances de travail de 10 et 15 mm. La **Figure 3- 14** montre les morphologies des grains CS et LHF.

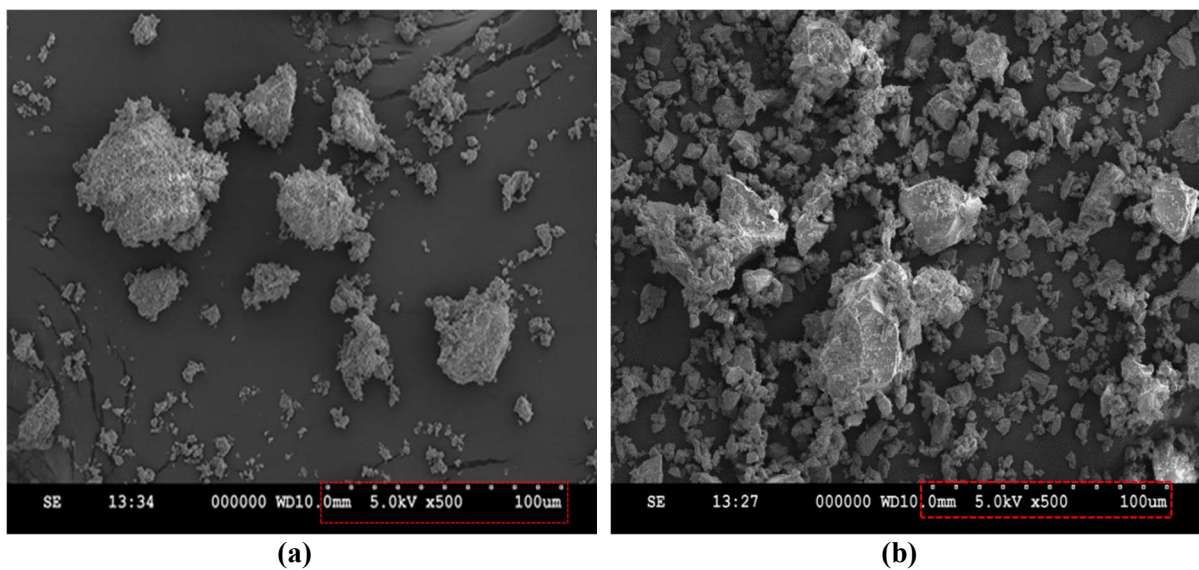


Figure 3- 14. (a) morphologie des sédiments calcinés ; (b) morphologie des particules de LHF.

2. Résultats et discussion

2.1 Validation du modèle de prédiction

Les résistances à la compression simple des 11 formulations ont été obtenues par écrasement après 28 jours de cure. Ces résistances ont été par la suite modélisées par l'application d'un modèle de régression polynomiale du second degré de Scheffé, comme suggéré par le logiciel Design-Expert. La sélection du modèle de régression polynomiale a été effectuée en se basant sur les résultats de l'analyse statistique (**Tableau 3- 6**).

Tableau 3- 6. Le modèle suggéré par le logiciel Design-Expert.

Modèle de régression	p-valeur	R ² Ajusté	R ² Prédite	
Linéaire	0,0002	0,6783	0,4926	
Quadratique	0,0004	0,9283	0,8678	Suggérer
Spécial Cubique	0,4379	0,9258	0,8431	
Cubique	0,0013	0,9905	-462,7017	Suggérer
Sp Quartique vs Quadratique	0,2112	0,9441	-2,2042	

Le modèle quadratique a été sélectionné à la place du modèle cubique spécial car il représente le modèle le plus approprié basé sur les valeurs de la valeur P, R² ajusté et R² prédite, conformément aux indications. La valeur P était statistiquement significative et inférieure à 0,05 tandis que les R² ajustés et prédits étaient très proches de 1 et leur différence était inférieure à 0,2.

Les surfaces graphiques en 2D et en 3D illustrées sur la **Figure 3- 15** montrent la surface de réponse avec différentes nuances de couleurs, allant du bleu foncé correspondant aux faibles résistances, à l'orange correspondant aux résistances les plus élevées. Les équations **(23)** et **(24)** représentent modèle de régression sélectionnés qui relient la résistance à la compression simple aux trois variables de l'étude : ciment, LHF et SC.

$$R_{C28} \text{ (MPa)} = C \times \beta_1 + \text{LHF} \times \beta_2 + \text{SC} \times \beta_3 + C \times \text{LHF} \times \beta_{12} + C \times \text{SC} \times \beta_{13} + \text{LHF} \times C \times \beta_{23} \quad (23)$$

Où :

β_1 , β_2 , β_3 , β_{12} , β_{13} et β_{23} représentent les coefficients du modèle de régression.

$$R_{C28}(\text{MPa}) = C \times 41.73 + \text{LHF} \times (-29.17) + \text{SC} \times (-105.83) + C \times \text{LHF} \times 120.9 + C \times \text{SC} \times 165.16 + \text{LHF} \times C \times 133.24 \quad (24)$$

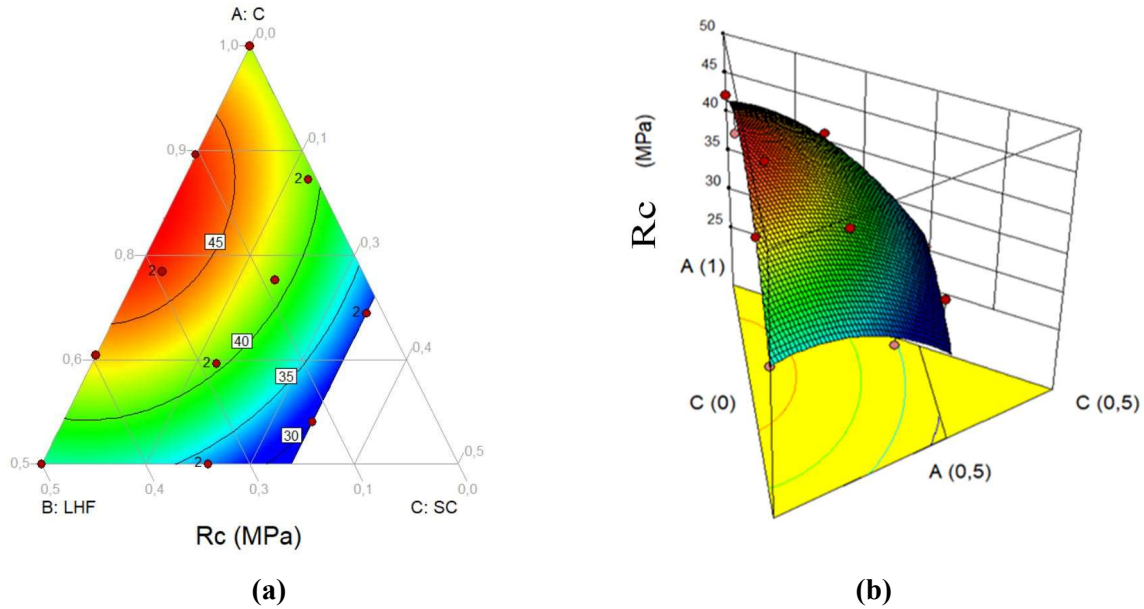


Figure 3- 15. Surfaces de réponse (a) en 2D et (b) en 3D.

Afin de valider le modèle de régression sélectionné, deux formulations ont été choisies, et leur résistance à la compression simple a été testée, après 28 jours de cure à 20°C. Le **Tableau 3- 7** montre que les résistances à la compression des mélanges, déterminées expérimentalement, sont bien comprises dans l'intervalle de confiance à 95 %. Cela confirme bien l'adéquation du modèle sélectionné.

Tableau 3- 7. Valeurs de la résistance à la compression prédite et déterminée expérimentalement après 28 jours de cure.

Formulation	Valeurs de Rc prédites (MPa)	95% IC (MPa)	Valeur expérimentale de Rc (MPa)
50C35LHF15SC	35.32	[33.37, 37.32]	35.17
80C10LHF10SC	44.10	[42.69, 45.54]	45.18

2.2 Consistance normalisée - Demande en eau

Les consistances normales des différentes pâtes de ciment exprimées par un rapport E/C sont présentées dans le **Tableau 3- 8** suivant :

Tableau 3- 8. Demande en eau de la pâte de ciment avec ou sans additions.

Pate de ciment	Rapport E/C
CEM I 42,5N	0,332
80C10LHF10SC	0,323
50C35LHF15SC	0,334

Il apparaît clairement que plus le taux de substitution du ciment par des sédiments calcinés augmente, plus la demande en eau de la pâte de ciment est grande. Ceci peut être attribué à la surface spécifique élevée des sédiments calcinés et broyés.

2.3 Consistance du mortier frais

La **Figure 3- 16** représente le diamètre moyen à l'état frais, en fonction du temps, du mortier de référence 100C0LHF0SC et les deux formulations avec l'ajout du LHF et de SC à différentes proportions, 50C35LHF15CS et 80C10LHF10SC. La valeur de l'étalement initiale (à $t = 0$ min) du mortier de référence, mesurée conformément à la norme EN 1015-3 [188], était de 227,5 mm. Tandis que le diamètre moyen mesuré pour 50C35LHF15SC et 80C10LHF10SC, était de 216,5 mm et 214 mm, respectivement. Ce qui correspond à 5% et 6% de perte en ouvrabilité par rapport au mortier de référence. Par conséquent, les deux formulations 80C10LHF10SC et 50C35LHF15SC représentent quasiment la même ouvrabilité, avec une différence d'environ 2 mm (1 %). Shanmuga Priya et al [18] ont également enregistré une perte d'ouvrabilité avec le remplacement de ciment par du LHF avec des pourcentages de l'ordre de 10 %, 20 % et 30 %. Cette perte de consistance peut être attribuée à la différence de finesse des matériaux utilisés. En effet, plus le matériau est fin, plus sa surface spécifique est élevée, induisant avec une demande en eau plus élevée. Hormis la finesse, plusieurs facteurs peuvent aussi être liés à l'interprétation des différents états de consistance d'une pâte de ciment, entre autres, le rapport E/C, la forme des particules, ainsi que le degré d'hydratation [29,189]. Par ailleurs, l'eau liée libérée par les argiles lors du traitement thermique des sédiments, augmente la demande en eau [3]. En effet, la forme angulaire des particules (**Figure 3- 14**) peut également contribuer à cette diminution d'ouvrabilité [83]. D'après ces valeurs d'étalement, le comportement à l'état frais du mortier témoin et des deux formulations étudiées 50C35LHF15SC et 80C10LHF10SC peut être qualifié de plastique même après 90 min avec un diamètre moyen de 191 mm, 185 mm et 181 mm respectivement (> 140 mm) [190]. La substitution du ciment par des matériaux supplémentaires peut entraîner une diminution d'ouvrabilité, comme l'ont montré les études précédentes [29,179], mais cette diminution demeure négligeable.

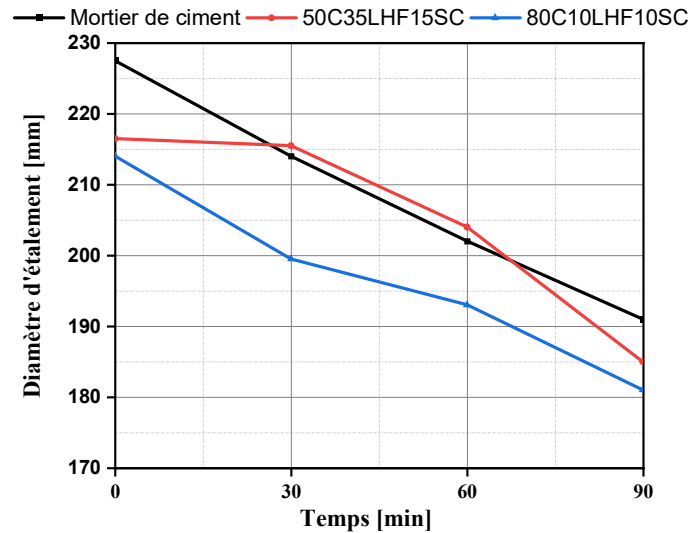


Figure 3- 16. Evolution de l'étalement en fonction du temps des mortiers étudiés.

2.4 Temps de début et de fin de prise des liants

La Figure 3- 17 présente les temps de début et de fin de prise des différentes formulations. Les deux formulations 100C0LHF0SC et 50C35LHF15SC avaient un temps de début de prise de 250 min. Alors que la formulation 80C10LHF10SC avait un temps de début de prise de 230 min. Par conséquent, la substitution de 20 % de ciment par du laitier et des sédiments calcinés a entraîné une diminution du temps de début de prise de 8 % par rapport à la formulation de référence. Le temps de fin de prise était semblable pour les formulations 100C0LHF0SC et 50C35LHF15SC et était égal à 360 min. Cependant, il était de 330 min pour la formulation 80C10LHF10SC. En effet, le temps de prise a été raccourci suite au remplacement de 20% de ciment par des ajouts minéraux. Samet et al [191] ont montré que la substitution du ciment par une kaolinite calcinée augmente le taux d'hydrolyse des silicates tricalciques présents dans le ciment et des aluminates présentes dans de l'argile calcinée. Cela conduit à une diminution du temps de fin de prise.

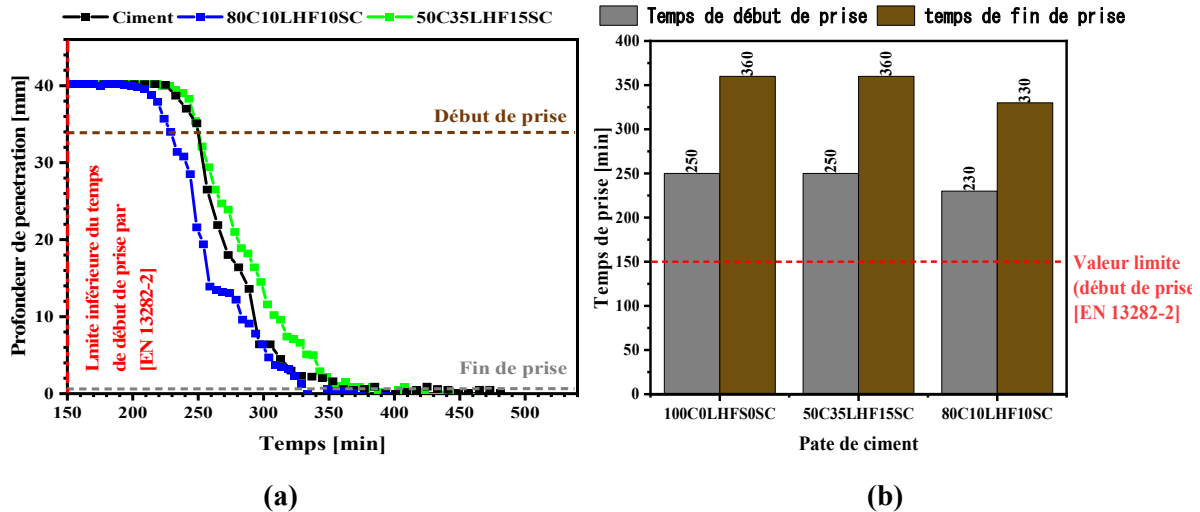


Figure 3- 17. (a) Détermination du temps de prise ; (b) temps du début et de fin de prise pour les pates de ciment.

De plus, il a été rapporté par Wang et al [192] que la diminution du temps de prise des ciments LC3 est attribuée à la surface spécifique (SS) élevée des argiles calcinées, ce qui réduit la quantité d'eau libre disponible dans les matrices. L'augmentation du temps de prise des mortiers 50C35LHF15SC par rapport au mortier 80C10LHF10SC peut être liée au retard de déclenchement de la réaction pouzzolanique [192]. D'autre part, quelques métaux lourds présents dans les sédiments, tels que le zinc ou le nickel, peuvent contribuer au retard de la prise des liants [20]. Dans notre cas, le temps de prise n'a pas été influencé par la présence des métaux lourds, car les sédiments de l'étude ne présentent pas des concentrations importantes en métaux lourds. Selon la norme EN 13282-2 [125], le temps de prise obtenu est convenable pour les liants hydrauliques routiers, car il est supérieur à 150 min. Ces résultats sont en concordance avec ceux rapportés dans les études précédentes [191,192].

2.5 Finesse et teneur en SO_3

Les refus en masse à 90 μm pour tous les mélanges ont été déterminés par analyse granulométrique. Le **Tableau 3- 9** montre que le pourcentage des refus en masse à 90 μm des différents mélanges était négligeable (Presque nul), il diminue avec l'augmentation des pourcentages d'ajouts des différentes additions. À titre d'illustration, le refus en masse à 90 μm des deux formulations 50C35LHF15SC et 80C10LHF10SC, enregistre une baisse de 50% et 20%, respectivement par rapport au témoin composé du ciment seul sans ajouts. Ces résultats concordent avec ceux de Stevulova et al [29]. Les deux liants de cette étude ont satisfait aux

exigences de la norme EN 13282-2 spécifiques aux liants hydrauliques routiers à durcissement normal, qui limite le pourcentage de refus en masse à 90 µm à moins de 15 %.

Le **Tableau 3- 9** résume également les pourcentages en masse des sulfates présents dans les différentes formulations. Ces concentrations ont été déterminées par spectrométrie de fluorescence X.

Tableau 3- 9. Refus en masse à 90 µm et teneur en sulfate.

	50C35LHF15SC	80C10LHF10SC	CEM I 42,5N	Valeur limite [EN 13282-2][125]
Refus à 90 µm (%)	0.18	0.28	0.35	15
Teneur en sulfate (%)	2.63	3.46	4.09	4

La teneur en sulfate des deux formulations 80C10LHF10SC et 50C35LHF15SC est égale à 2,63 % et 3,46 %, respectivement. Il est à noter que ces valeurs sont inférieures à celle du mélange témoin, qui est égale à 4,09 %. Par conséquent, la teneur en sulfates des deux liants est bien inférieure à la valeur limite de 4 %, définis par la norme EN 13282-2 [125] des liants hydrauliques routiers à durcissement normal. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par Stevulova et al [29].

2.6 Mesure de l'expansion (essai Le Chatelier)

Les propriétés mécaniques des matrices cimentaires peuvent être affectées par une excessive instabilité/expansion volumétrique, qui peut entraîner des dommages matériels [193]. Cette instabilité volumétrique est principalement induite par les réactions chimiques des produits d'hydratation du ciment (Ca(OH)₂, ettringite primaire, etc..) avec les éléments chimiques apportés par les agrégats et/ou l'environnement externe. Par ailleurs, la présence de plus de 5% de MgO peut générer des instabilités volumétriques durant la période de durcissement, entraînant des fissures dans les matrices cimentaires. De plus, la teneur en chaux libre (CaO) présente le risque d'un changement de volume lorsqu'elle s'hydrate. Le **Tableau 3- 10** et la **Figure 3- 18** récapitule les valeurs de mesure de l'expansion des trois liants. Le remplacement du ciment par du LHF et des sédiments argileux calcinés a provoqué une augmentation de la valeur d'expansion volumétrique.

Tableau 3- 10. Valeurs d'expansion des différentes formulations

Formulation	100C0LHF0SC	50C35LHF15SC	80C10LHF10SC
Expansion (mm)	0.330	1.280	0.740
Ecart type (mm)	0.014	0.021	0.028

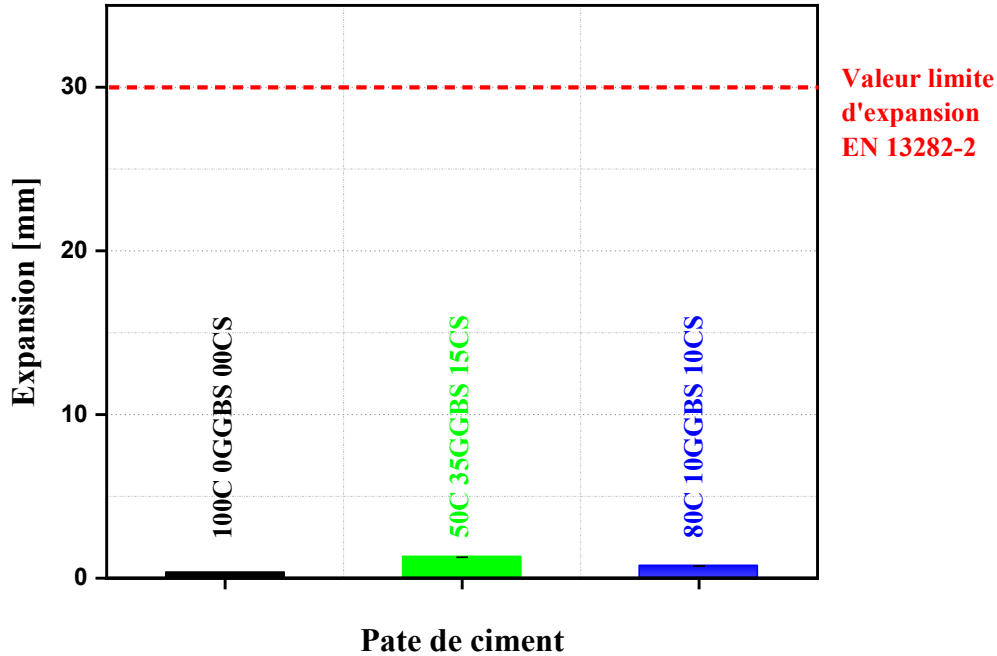


Figure 3- 18. Valeurs d'expansion pour les différentes formulations.

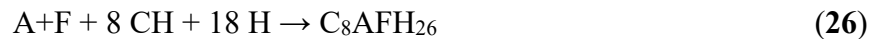
La valeur d'expansion du liant 80C10LHF10SC (0,74 mm) était deux fois supérieure à celle du témoin (0,33 mm). L'expansion volumétrique du liant 50C35LHF15SC était de 1,28 mm, soit plus de quatre fois supérieure à celle du témoin. Cela peut être expliqué par la teneur en MgO dans les LHF (4,09%) et dans les SC (2,41%) comparé à du ciment (0,78%). De même, ceci peut être attribué à la formation probable de la Brucite ($Mg(OH)_2$), engendrée par l'hydratation de MgO (périclase) et la teneur en chaux libre. Cependant, ces valeurs d'expansion restent très faibles et peu significatives par rapport à la valeur limite de 30 mm pour les liants hydrauliques routiers à durcissement normal conformément à la norme EN 13282-2 [125].

2.7 Performances mécaniques (Rc et Rf)

La Figure 3- 19 résume les valeurs de résistance à la compression et à la flexion obtenues sur des échéances de 7, 28, 56 et 90 jours pour les trois mélanges. Après 28 jours de cure, les résistances à la compression obtenues sur les mélanges 50C35LHF15SC et 80C10LHF10SC étaient de 28,82 % et 8,56 %, ces valeurs sont inférieures à celles obtenues sur le mortier témoin. Cependant, la perte de résistances avait tendance à diminuer avec le

temps. À long terme, les mélanges 50C35LHF15SC présente des valeurs de résistance à la compression plus élevées que celle du mortier de référence.

L'accroissement significatif des résistances à la compression pour les mélanges qui renferment des additions minérales (LHF et des SC) sont dues principalement aux réactions pouzzolaniques. La réaction de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) avec les phases d'aluminosilicates réactives du LHF et des sédiments argileux calcinés, a permis la formation supplémentaire du gel C-S-H (voir les équations (25) et.(26)). En outre, la formation de nouveaux gels C-S-H a réduit la porosité des matrices cimentaires, ce qui a conduit à l'amélioration des performances mécaniques des mélanges. Plusieurs études antérieures ont abordé le rôle des réactions pouzzolaniques dans l'amélioration de la résistance à la compression et de la durabilité des matrices cimentaires [3,4,6,19,20].



D'où :

$\text{CH} = \text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{S} = \text{SiO}_2$, $\text{A} = \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{F} = \text{Fe}_2\text{O}_3$ et $\text{H} = \text{H}_2\text{O}$.

Les deux liants routiers appartiennent à la catégorie des liants hydrauliques à durcissement normal, figurant dans la classe mécanique N4. Selon la norme EN 13282-2, la résistance à la compression simple après 56 jours de cette classe se situe entre 32,5 et 52,5 MPa. Tous les mélanges ont donné des valeurs de résistance après 56 jours suffisantes, répondant aux exigences de la résistance mécanique pour une utilisation en construction routières (voir **Figure 3- 19**). Ces résultats concordent avec ceux de Stevulova et al [29].

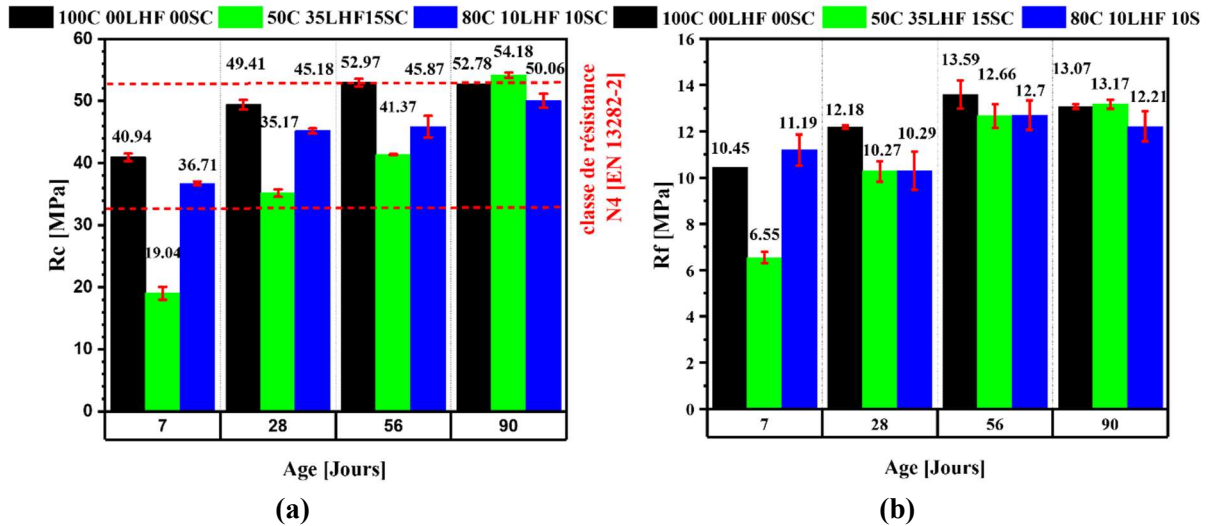


Figure 3-19. (a) résistance à la compression et (b) résistance à la flexion à 7, 28, 56, et 90 jours de cure.

De même pour la résistance à la flexion, elle augmente avec le temps. Après 28 jours, les résistances à la flexion des mélanges 50C35LHF15SC et 80C10LHF10SC étaient de 10,27 MPa et 10,29 MPa, respectivement. Après 90 jours, les résistances à la flexion atteignent 13,17 et 12,21 MPa, respectivement.

2.8 Porosimétrie par intrusion de mercure

La durabilité des mélanges est liée à leur perméabilité et leur porosité ouverte, aussi dite « porosité accessible ». De plus, les propriétés de résistance mécanique et la résistance au gel-dégel dépendent fortement de leur système/réseau poreux [4,83]. D'après le **Tableau 3- 11**, il apparaît que la porosité a diminué avec le temps de cure. Les porosités des formulations se situaient entre 12% et 14%, 11% et 13%, 9% et 10% et 7% et 11% après 7, 28, 56 et 90 jours de durcissement, respectivement. Berodier et Scrivener [194] ont également signalé qu'à long terme, la porosité pourrait atteindre une valeur inférieure ou égale à celle du mortier de ciment (mortier de référence). Par ailleurs, il a été observé que le remplacement du ciment par des matériaux supplémentaires a entraîné une diminution de la porosité et un accroissement de la résistance mécanique.

Tableau 3- 11. Pourcentage de la Porosité totale des différentes formulations.

Age	100C0LHFS0SC	50C35LHF15SC	80C10LHF10SC
7 jours	14.25%	14.84%	12.62%
28 jours	13.62%	12.43%	10.88%
56 jours	9.85%	10.89%	10.74%
90 jours	6.91%	11.02%	10.10%

Est illustrée sur la **Figure 3- 20** la distribution des tailles des pores à 28, 56 et 90 jours pour les différents mélanges, sur laquelle est montré l'effet de la substitution du ciment par les matériaux supplémentaires sur la structure des pores.

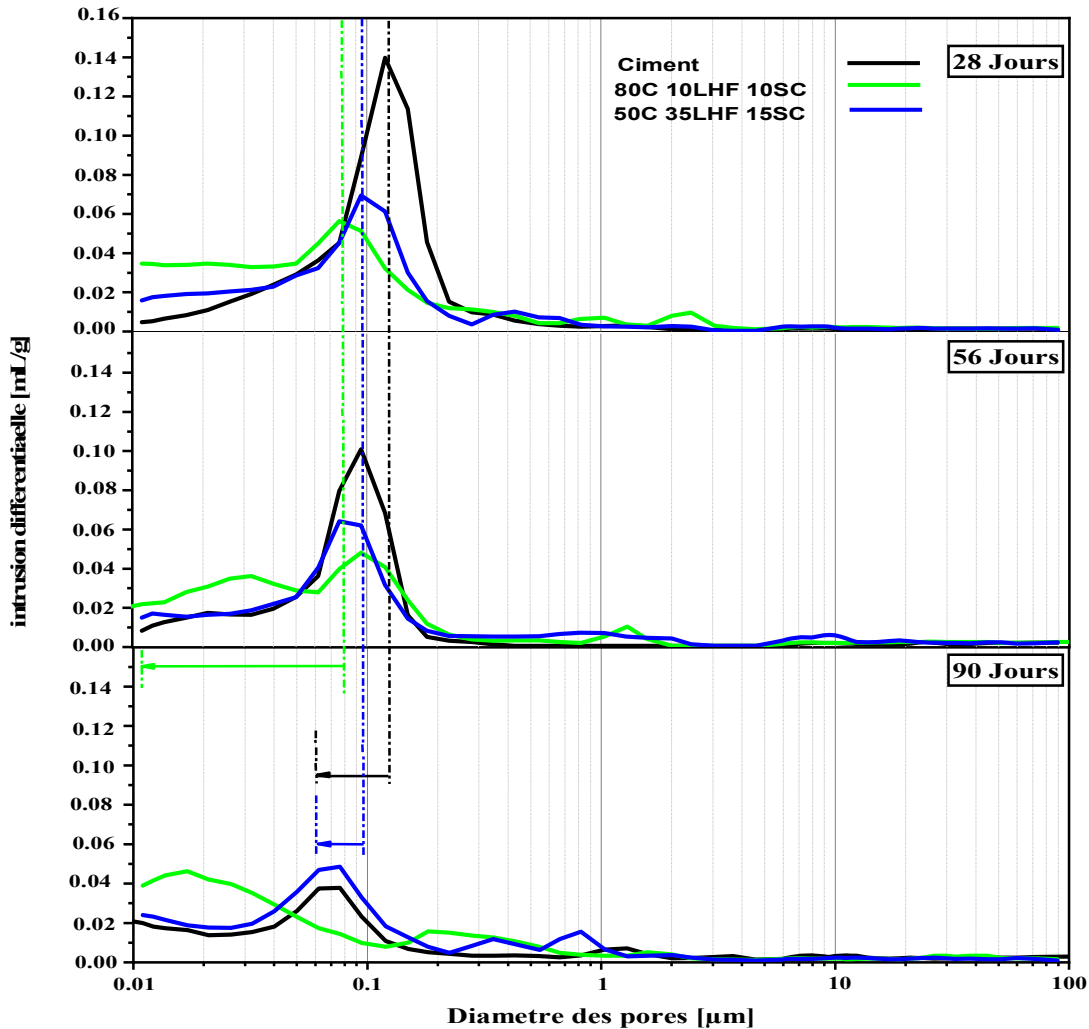


Figure 3- 20. Structure du réseau poreux à 28, 56 et 90 jours.

La formulation contenant 10 % de LHF et 10% de SC a présenté un diamètre critique (0,095 µm) proche de celui du mortier témoin (0,125 µm) à 28 jours. Après 56 jours, la taille maximale des pores a diminué pour tous les mélanges. Au fil du temps, la distribution des tailles de pores dans les deux mélanges contenant du LHF et du CS est améliorée comparé à celle du témoin, les pics se trouvant sur la droite des courbes pourraient être attribués aux hydrates qui se sont formés au jeune âge. En revanche, le plateau qui comprend une large gamme de pores (sur la gauche de la courbe) semble être le résultat de réactions des LHF et des SC [195]. Berodier et Scrivener [194] ont indiqué que la réduction de la taille maximale des pores dans

les mélanges contenant des additions minérales, est due à la continuité de la production d'hydrates dans les pores par l'activité pouzzolanique.

Selon le diamètre deux familles de porosités sont distinguées (**Figure 3- 21**): pores capillaires, avec les plus grandes tailles et pores d'hydrates, représente la microporosité avec les plus petites tailles. La porosité déterminée par intrusion de mercure permet de caractériser seulement une partie de la microstructure, des pores capillaires avec des diamètres d'environ 0,5 μm et des pores des hydrates avec des diamètres d'entrées d'environ 10 nm [196]. Cette classification peut présenter une indication sur la durabilité des mélanges. La Figure 5 montre que plus le taux de substitution par des additions augmente, moins les pores capillaires sont importants et plus la porosité fine est importante. Cette porosité ne permet pas la pénétration des agents extérieurs agressifs. En revanche, des pressions de cristallisations peuvent apparaître au niveau de ces nanoporosités et induire des fissures dans le système [197].

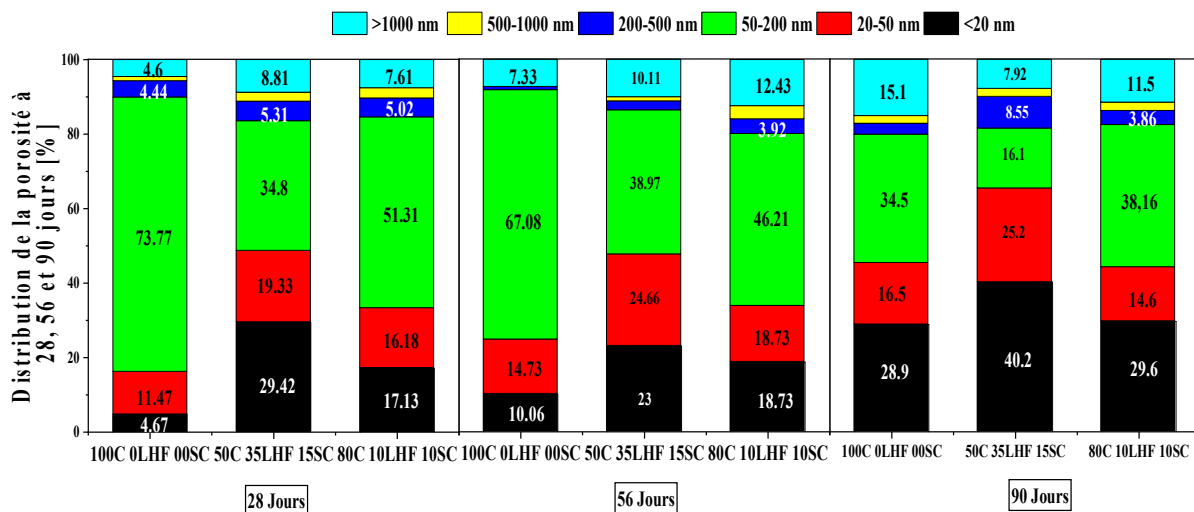


Figure 3- 21. Distribution de la porosité.

2.9 Quantification de la portlandite

L'analyse thermogravimétrique a permis de déterminer la quantité de portlandite consommée par la matrice cimentaire de tous les mélanges tout au long du processus d'hydratation. Les mélanges ont d'abord été séchés jusqu'à stabilisation de leurs masses. Ensuite, leurs granulométries a été réduite en fraction fine en utilisant le vibro-broyeur à disques RS 200 par Retsch. La décomposition de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) se produit dans un intervalle de température compris entre 400 et 550 $^{\circ}\text{C}$ [198]. La **Figure 3- 22**, **Figure 3- 23** et le

Tableau 3- 12 montrent une diminution significative (plus de 50 %) de la teneur en portlandite des mélanges 80C10LHF10SC et 50C35LHF15SC. Après 7 jours de cure, la teneur en portlandite était de 10,50 % et de 13,91 % pour les formulations 50C35LHF15SC et 80C10LHF10SC, respectivement. Cependant, ces quantités ont diminué à 2,88 % et 0,82 % après 90 jours de cure. Cette diminution peut être liée au caractère pouzzolanique déclenché par la réaction des aluminosilicates présents dans le LHF et les SC, qui réagissent avec le $(Ca(OH)_2)$ fournit par l'hydratation du ciment.

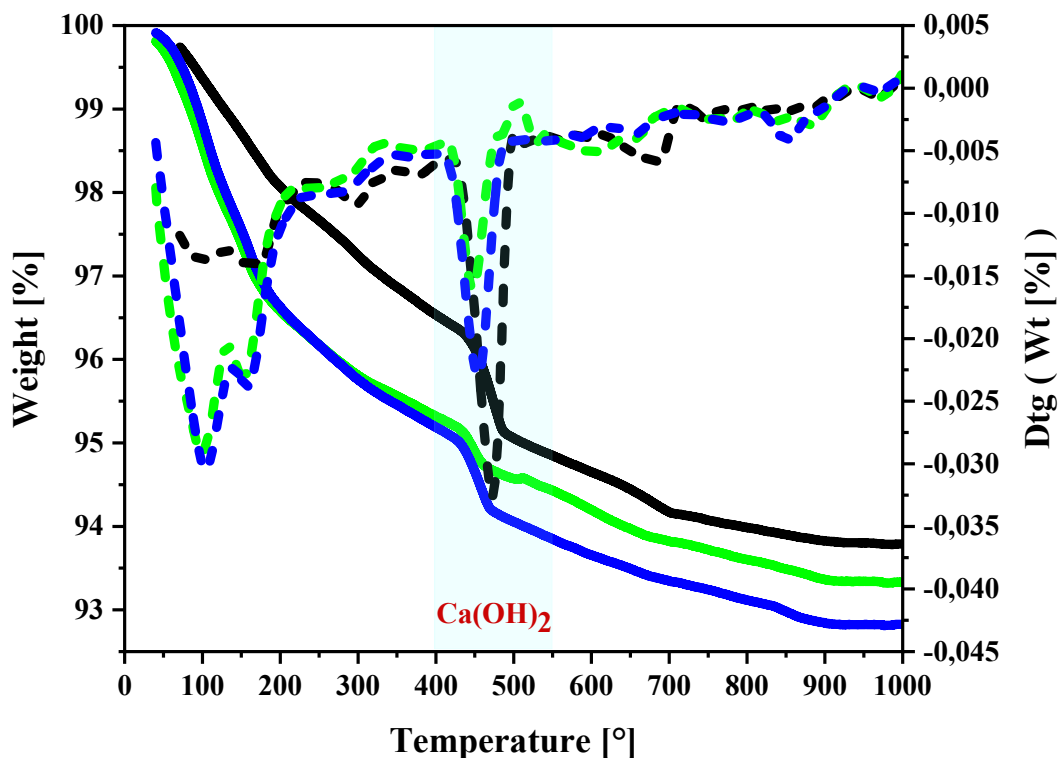


Figure 3- 22. Analyse thermogravimétrique à 7 jours.

Ces réactions pouzzolaniques génèrent des C-S-H supplémentaires, contribuant à l'amélioration des performances mécaniques des mélanges à base des deux liants. Toutefois, la teneur en portlandite du mortier de référence, qui est relativement constante sur les différentes échéances, était égale à 6,54 %, 6,96 %, 6,54 % et 5,52 % après 7, 28, 56 et 90 jours, respectivement. La consommation de l'hydroxyde de calcium dans les mortiers formulés avec les deux LHR est une bonne indication du potentiel pouzzolanique des matériaux de substitution utilisés (SC et LHF) [198]. Plusieurs études précédentes ont évoqué des comportements similaires [195,198,199].

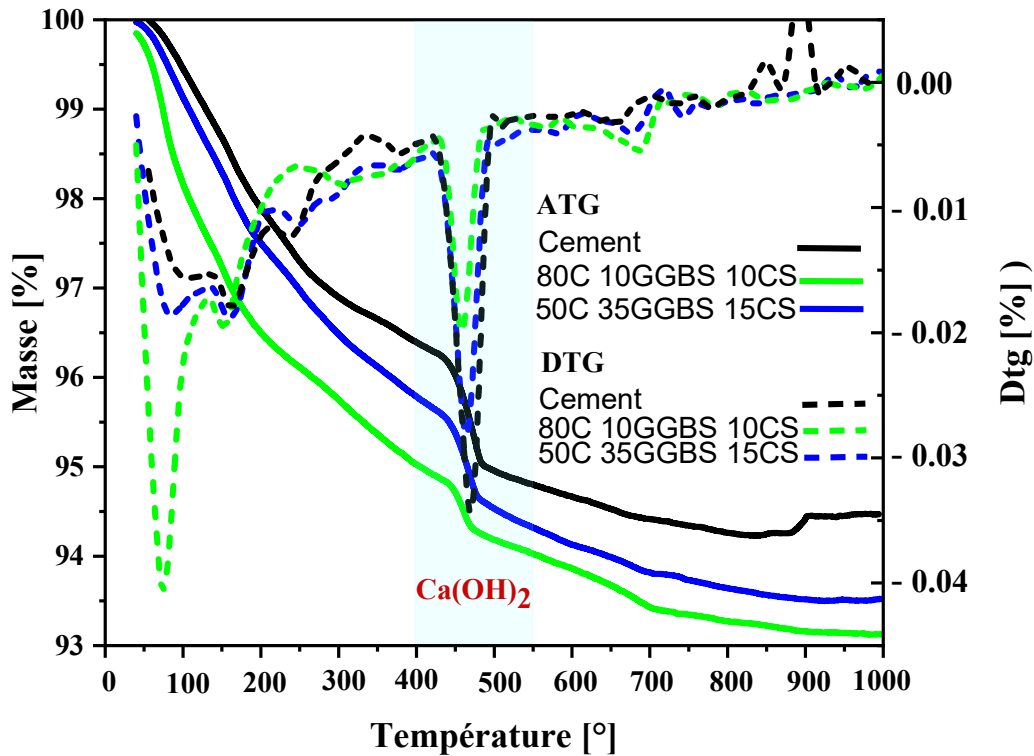


Figure 3- 23. Analyse thermogravimétrique à 56 jours.

Tableau 3- 12. Teneur en portlandite à 7, 28, 56 et 90 jours des différentes formulations.

Nombre de jour	100C0LHF0SC	50C35LHF15SC	80C10LHF10SC
7 jours	6.54%	10.50%	13.91%
28 jours	6.96%	3.62%	5.43%
56 jours	6.54%	4.07%	5.97%
90 jours	5.52%	2.88%	0.82%

2.10 Microscopie électronique à balayage (MEB)

La Figure 3- 24, Figure 3- 25 et Figure 3- 26 montrent la microstructure du mortier témoins composé de 100% de ciment et des deux mortiers formulés à partir du liant 50C35LHF15SC et 80C10LHF10SC à 56 jours. La Figure 3- 24 et la Figure 3- 25 illustrent bien les différents produits d'hydratation. En effet, les silicates de calcium hydratés apparaissent sous forme de couronnes de couleur grise claire (uniforme) entourant les grains de ciment anhydre. Les zones hétérogènes en gris et noire (zones poreuses), représentent également des C-S-H, qui viennent remplir les vides présents entre les grains [200]. Ces dernières, sont composés de porosité, du gel C-S-H précipité, d'ettringite (AFt) et de monosulfate (AFm). Quant à la portlandite (CH), elle est représentée en gris légèrement plus clair que celui des C-S-H.

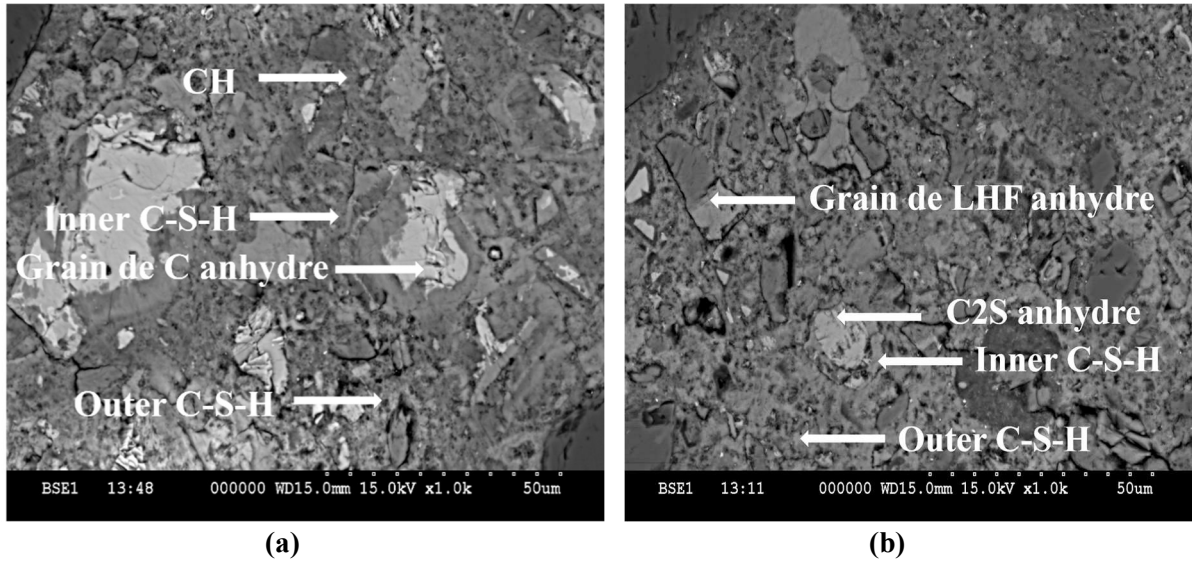


Figure 3- 24. Observations MEB (BSE) à 56 Jours sur (a) le mortier de référence et (b) la formulation 50C35LHF15SC.

La **Figure 3- 24(b)**, **Figure 3- 25(b)** et **Figure 3- 26(a)** montrent des zones de C-S-H plus denses et plus homogènes que celles de la **Figure 3- 24(a)** et **Figure 3- 25(a)**. Ceci peut être attribué au processus d'hydratation, qui continue à combler les vides entre les grains avec de nouveaux hydrates [19,138,139], en particulier pour les formulations 50C35LHF15SC et 80C10LHF10SC en raison de leur potentiel pouzzolanique.

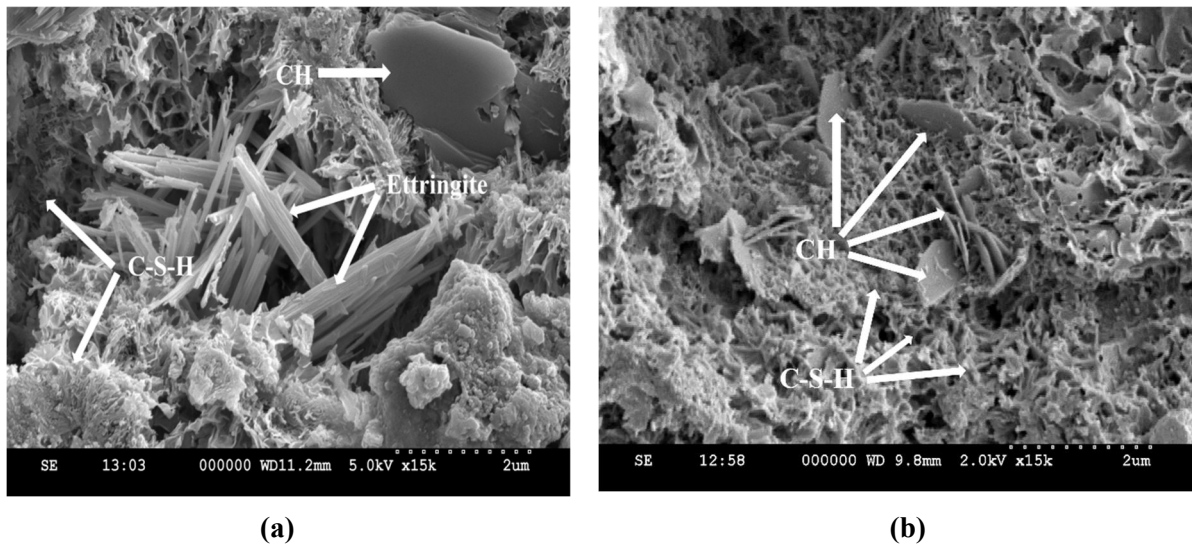


Figure 3- 25. Observations MEB (SE) à 56 jours sur (a) le mortier de référence et (b) la formulation 50C35LHF15SC.

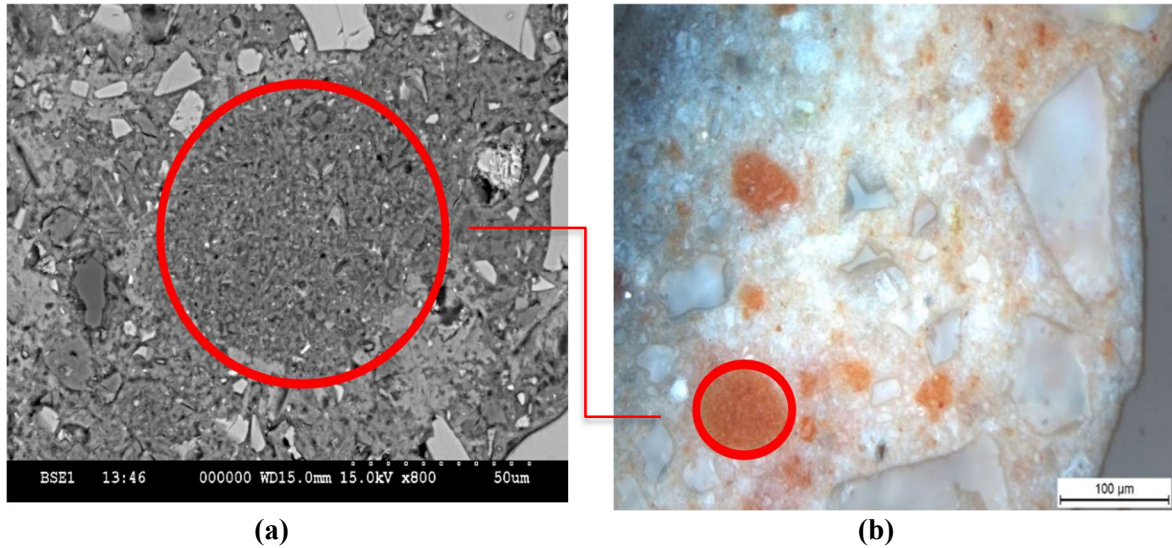


Figure 3- 26. (a) Observation MEB et (b) observation MO sur la formulation 80C10LHF10SC à 56 jours.

2.11 Essai de lixiviation sur les différentes formulations

L'impact environnemental des LHR a été évalué afin de déterminer les éléments traces pouvant être lixiviés et remobiliser dans l'eau et par conséquent polluer les milieux naturels et les eaux souterraines. La durabilité des bétons et des mortiers est influencée par certains paramètres et leurs combinaison, c'est pour cela que, la connaissance et l'identification de ces éléments est essentielle pour prolonger leur durée de vie [201]. Les essais de lixiviation ont été effectués sur les formulations 100C00LHF00SC, 50C35LHF15SC et 80C10LHF10SC après 56 jours de cure, conformément à la norme NF EN 12457-2. La quantification des éléments traces a été réalisée sur des éluâts à travers des filtres de 0,45 µm. Ces éluâts ont été obtenus par lixiviation sur des fragments de mortier ayant un D_{max} inférieur ou égale à 4 mm, et qui ont été maintenus en agitation dans l'eau pendant 24 heures, avec un rapport liquide/solide de 10. Le **Tableau 3- 13** résume les concentrations en éléments traces présents dans les différentes formulations. La concentration en métaux lourds reste inférieure aux seuils préconisés par l'arrêté du 12 décembre 2014, et aux valeurs obtenues sur les sédiments bruts, également. De plus, la concentration en anions (chlorure, fluorure et sulfate) respecte les valeurs seuils pour les déchets inertes. Par ailleurs, la concentration en sulfates dans le mortier témoin (22 mg/kg MS) est supérieure à celle des deux autres formulations à base de LHF et de SC. Cela peut être expliqué par la substitution du ciment par du LHF et du SC, et la participation des sulfates à l'éventuelle formation de nouvelle ettringite.

Chapitre 3. Optimisation de liants hydrauliques routiers à base des sédiments de barrage et des laitiers de hauts-fourneaux.

Les liants hydrauliques routiers étudiés peuvent être qualifiés comme inertes car leur concentration en métaux lourds est inférieure aux seuils fixés par la directive française relative aux installations de stockage de déchets inertes (directive Française du 14 décembre 2014).

Tableau 3- 13. Concentration en contaminants des différentes formulations comparée aux valeurs limites à respecter ISDI.

Eléments	100C0LHF00SC	50C35LHF15SC	80C10LHF10SC	ISDI (mg/kg)
As	<0.110	<0.110	<0.110	0.500
Cd	<0.009	<0.009	<0.009	0.040
Cr	0.031	<0.004	<0.004	0.500
Cu	<0.021	<0.021	<0.021	2.000
MO	<0.088	<0.088	<0.088	0.500
Ni	<0.047	<0.047	<0.047	0.400
Pb	<0.032	<0.032	<0.032	0.500
Sb	<0.057	<0.057	<0.057	0.060
Se	<0.083	<0.083	<0.083	0.100
Zn	<0.010	<0.010	<0.010	4.000
Chloride	43	42	45	800
Fluoride	4	4	3	10
Sulfate	22	13	13	1000

3. Conclusion

Ce chapitre a porté sur le potentiel de réutilisation des sédiments calcinés (SC) provenant du barrage de Zerdezas et du laitier de haut-fourneaux d'El-Hadjar (LHF) situé dans le nord de l'Algérie, comme substituants partiels au ciment (C) dans des liants hydrauliques routiers à durcissement normal. Deux liants hydrauliques routiers ont été optimisés, en utilisant la méthode des surfaces de réponses (MSR). Le premier liant, 50C35LHF15SC, composé de 50% de ciment, de 35% de laitier de hauts-fourneaux et de 15% de sédiments calcinés. Le deuxième liant, 80C10LHF10SC composé de 80% de ciment, de 10% de laitier de hauts-fourneaux et de 10% de sédiments calcinés. Différents essais ont été effectués pour s'assurer de la compatibilité des deux liants pour la réalisation de travaux dédiés à la construction routière, l'étalement à la table à choc, le temps de début et de fin de prise, l'expansion (Le Chatelier), la résistance à la compression et à la flexion, essai de lixiviation ainsi que des analyses de la microstructure (porosimétrie par intrusion de mercure, ATG, MEB). Les deux liants remplissent parfaitement toutes les exigences requises relatives aux liants hydrauliques routiers spécifiées dans la norme EN 13282-2 [125]. Les conclusions suivantes peuvent être dressées :

1. Le comportement à l'état frais des deux liants ternaires a été considéré comme plastique. En effet, l'étalement des deux formulations étaient supérieures à la valeur limite de

140 mm [202]. La substitution du ciment par des additions minérales a entraîné une faible diminution d'ouvrabilité par rapport au mélange témoin.

2. La valeur de début de prise pour les deux liants dépasse largement la valeur limite fixée à 150 min. Donc, les deux liants sont adaptés en tant que liants hydrauliques routiers à durcissement normal.

3. Les deux liants correspondent aux exigences de la norme EN 13282-2 [125], en termes de teneur en sulfate. Ils étaient en dessous de la limite supérieure requise, de 4%.

4. La valeur d'expansion volumétrique était supérieure à celle du liant de référence (0.33 mm). Cependant, demeure inférieure à 30 mm, valeur limite exigée pour les liants hydraulique routiers à durcissement normal (EN 13282-2).

5. Les performances mécaniques appartenant à la classe N4 pour les liants hydrauliques routiers à durcissement normal, avec des résistances à la compression comprise entre 32.5 et 52.5 MPa à 56 jours ont été atteintes par les deux liants conformément à la norme EN 13282-2.

6. Le remplacement du ciment par les additions minérales permet le développement d'un réseau poreux moins dense avec une réduction de la taille des pores ainsi que l'accroissement des performances mécaniques.

7. Les concentrations des métaux lourds et en anions (chlorure, fluorure, et sulfates) obtenues, suites aux essais de lixiviations, des deux LHR restent inférieures aux seuils prescrits des Installations de Stockage de Déchets Inertes par la directive Française du 14 décembre 2014.

8. La réutilisation du LHF et des sédiments calcinés contribuera à une meilleure élimination de sédiments de barrages et de déchets de l'industrie sidérurgique. Ceci permettra également à la réduction de l'impact environnemental induit par la production du clinker en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

Les deux liants hydrauliques élaborés ont été qualifiés de liants hydrauliques routiers à durcissement normal avec les désignations suivantes, conformément à la norme EN 13282-2 :

HRB N 4-C 50, LHF 35, SC 15 pour le mélange 50C35LHF15SC, et **HRB N 4-C 80, LHF 10, SC 10** pour le mélange 80C10LHF10SC. Par conséquent, leur intégration dans le traitement de sédiments bruts pour une utilisation en construction routière fera l'objet du prochain chapitre (cf. **Chapitre.4.**).

Chapitre.4.

Co-valorisation des sédiments de Zardezas et déchets de carrière de marbre en couche de forme.

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'évaluation de l'effet de l'apport de déchets de marbre sur la matrice sédimentaire combiné à l'ajout d'un traitement mixte à la chaux aérienne et aux deux liants hydrauliques routiers à durcissement normal formulés dans le chapitre précédent.

Dans un premier temps une optimisation d'un mélange composé de sédiments et de déchets de marbre a été réalisée. La méthodologie de l'étude s'est basée sur une approche semi-empirique de Talbot-Fuller-Thompson. Le mélange est ainsi classé selon le guide GTR en classe **A3 F11**.

Selon les spécifications du guide GTS, le mélange a nécessité l'application d'un traitement mixte à la chaux et aux liants hydrauliques. Le pourcentage de liants utilisé a été déterminé selon les recommandations du GTS et le protocole établi par Eades et Grim [203]. Deux pourcentages de LHR ont été adoptés : 7 et 10%. Concernant le pourcentage de chaux, il a été fixé à 1% de Ms et huit formulations ont été mises en œuvre.

En dernier lieu, les performances à court terme : l'aptitude des mélanges au traitement, le critère de traficabilité (R_e), la sensibilité à l'immersion (R_{ci}) et la résistance au gel (R_{it}) et les performances mécaniques à long terme : (E , R_t) permettant de classer les différentes formulations dans le diagramme de classification mécanique ont été étudiés. Le tableau de référence des normes correspondantes à chaque type d'essai utilisé est présenté en annexe.

1. Méthodologie d'optimisation du squelette granulaire des sédiments de barrage et traitement aux liants

1.1 Description du choix et du dosage des produits de traitement

1.1.1 Correcteur granulométrique

En raison de la prédominance de la fraction fine $\leq 63 \mu\text{m}$ dans la composition du squelette granulaire des sédiments, ces derniers présentent généralement des caractéristiques mécaniques et géotechniques médiocres. D'après la littérature, les sédiments traités avec un liant seul peuvent atteindre une porosité de 50%, cela peut justifier leurs faibles performances mécaniques [204]. L'utilisation de liants seuls en traitement des sédiments, nécessite donc d'aller jusqu'à des taux élevés pour assurer l'efficacité du traitement, ce qui est inadmissible du point de vue économique [32]. Cependant, l'apport d'un correcteur granulométrique en complément aux liants hydrauliques, contribue à l'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques des sédiments [25,26,37,49,121,130,150]. En effet, l'utilisation d'un correcteur granulaire permet de diminuer la porosité du mélange et d'avoir un squelette granulaire le plus compact possible [130,204].

Dans le présent chapitre, l'optimisation du squelette granulaire de la formulation retenue pour la suite de cette étude a été effectuée suivant la méthode semi-empirique Talbot-Fuller-Thompson (T-F-T). L'objectif ici est d'atteindre des performances mécaniques adéquates et requises pour une utilisation en couche de forme, tout en minimisant la teneur en liant utilisés [21,36,54]. Les courbes granulométriques qui se positionnent à l'intérieur du fuseau optimal T-F-T, délimitées par les deux courbes théoriques obtenues pour des valeurs de n de l'ordre de 0,25 et 0,45, présentent une bonne répartition granulométrique. Ceci se traduit par une meilleure compacité. Les courbes de référence de T-F-T sont définies par la formule (27) présentée ci-dessous [25,150,205] :

$$P = \left[\frac{d}{D} \right]^n \quad (27)$$

D'où :

- P : passants au tamis d'ouverture d (%),
- d : diamètre de particules (mm),
- D : diamètre maximale des grains (mm),
- n : paramètre variable d'ajustement compris entre 0,25 et 0,45.

Le choix du correcteur granulaire s'est porté sur le sable de marbre provenant d'une carrière de marbre de Skikda, avec une granulométrie de l'ordre de 0-2 mm, plus grossière que celle des sédiments. La **Figure 4- 1** montre les différentes morphologies et tailles du sable de marbre obtenues par microscopie électronique à balayage.

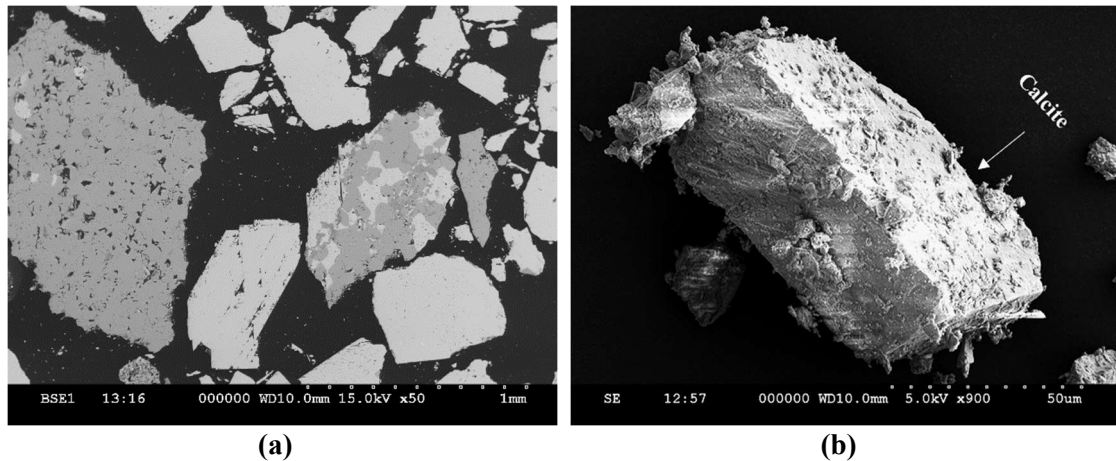


Figure 4- 1. Clichés obtenus par MEB sur le sable de marbre (a) mode BSE, (b) mode SE.

Bien que les mélanges composés de 60%, 70% et 40%, 30% de sable de marbre et des sédiments, respectivement, appartiennent au fuseau optimal de Fuller (**Figure 4- 2**). Le mélange composé de 50% de sable de marbre et de 50% de sédiments se trouvant en partie à l'intérieur du fuseau T-F-T a été choisi dans l'optique de recyclage maximale de ces deux déchets.

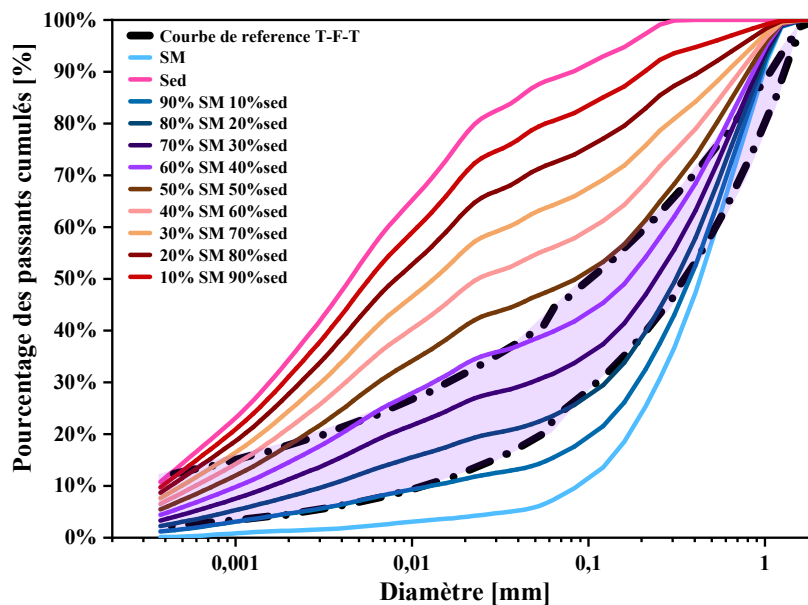


Figure 4- 2. Distribution granulométrique des différents mélanges composés de sédiments et du sable de marbre.

o **Caractérisation et classification de la formulation optimisée**

Les différentes propriétés physiques obtenues de la formulation optimale 50% de sable de marbre et 50% de sédiments bruts, sont reprises dans le **Tableau 4- 1**. En plus des modifications apportées au niveau du squelette granulaire, le sable de marbre joue le rôle d'un diluant, en modifiant les paramètres de nature des sédiments [50].

Tableau 4- 1. Ensemble des caractéristiques géotechniques obtenues sur le mélange 50% SM+50% Sed.

Teneur en fines (% < 80 µm)	48%
ρ _s (g/cm ³)	2,67
M _{M.O.C} (%)	2,72
P.A.F (%)	4,07
VBS (g/100g Ms)	3,92
WL (%)	40,47
WP (%)	13,25
IP (%)	27,22
Classe GTR	A3 F11

Il apparaît que le remplacement des sédiments de Zardezas à hauteur de 50% par le déchet de marbre a entraîné une légère modification des propriétés géotechniques. D'après la classification GTR [30] et la NF P 11-300 [117], les sédiments appartiennent toujours à la classe **A3 F11 (Figure 4- 3)**.

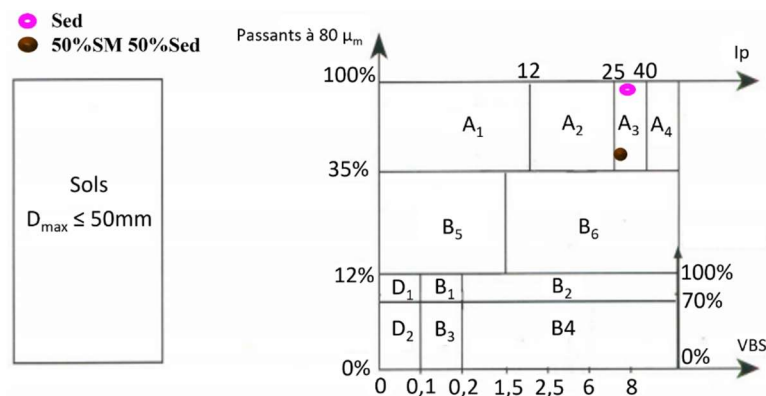


Figure 4- 3. Tableau synoptique de classification selon le GTR [30] et la NF P 11-300 [117].

1.1.2 Chaux aérienne

1.1.3 Détermination du point de fixation de la chaux (PFC)

La chaux aérienne utilisée est du type CL 90-S du fabricant Saint-Astier, avec une masse volumique absolue égale à 2,31 g/cm³. Elle présente une granulométrie très fine, avec un D₁₀ de 0,7 µm, un D₅₀ de 4 µm et un D₉₀ de 20 µm. La totalité des particules passe au travers le tamis 80 µm, comme montré sur la **Figure 4- 4**. La teneur en chaux libre (CaO) est supérieure

à 90% et la teneur en oxyde de magnésium (MgO) est inférieure à 5%, conformément à la norme EN 459-1 [206] et la norme NF P98-101 [207].

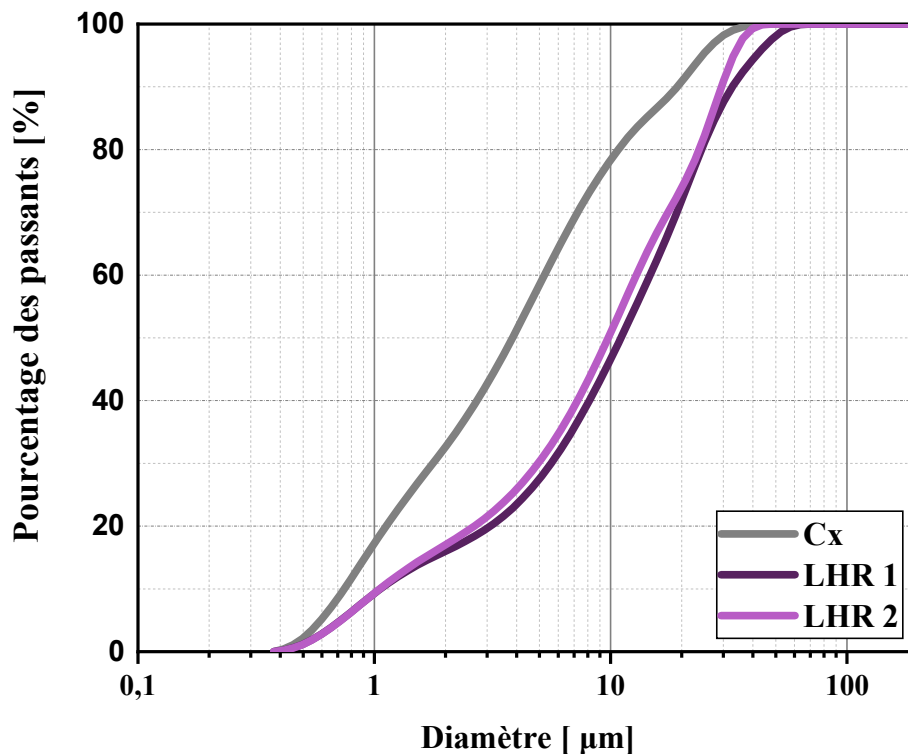


Figure 4- 4. Distribution granulométrique de la chaux et des liants hydrauliques routiers.

o Principe et protocole d'essai

Le point de fixation de la chaux a été déterminé suivant le procédé proposé par Eades et Grim [203] et la norme NF ISO 10390 [172]. Le principe de cet essai consiste à évaluer l'action de la chaux sur les sédiments et le mélange de 50% Sed + 50% SM, afin de déterminer la quantité de chaux nécessaire pour atteindre une valeur de pH favorisant l'activation de la réaction pouzzolanique et la production des hydrates [25]. Cette méthode a été adoptée par plusieurs auteurs [25,26,32,38,131] pour la détermination du taux adéquat de la chaux à ajouter pour le traitement des sédiments.

La mesure du pH des sédiments à différents dosages de chaux a été réalisée sur une suspension de prise d'essai représentative préparée dans cinq fois son volume d'eau. Dans un premier temps, différents pourcentages de chaux ont été ajoutés aux sédiments préalablement humidifiés (24h à l'avance) à 23% de teneur en eau. Un temps de réaction d'une heure a été respecté, puis une quantité d'eau complémentaire est rajoutée de nouveau pour atteindre un rapport Solide/Liquide égale à 5, comme représenté sur la **Figure 4- 5**.

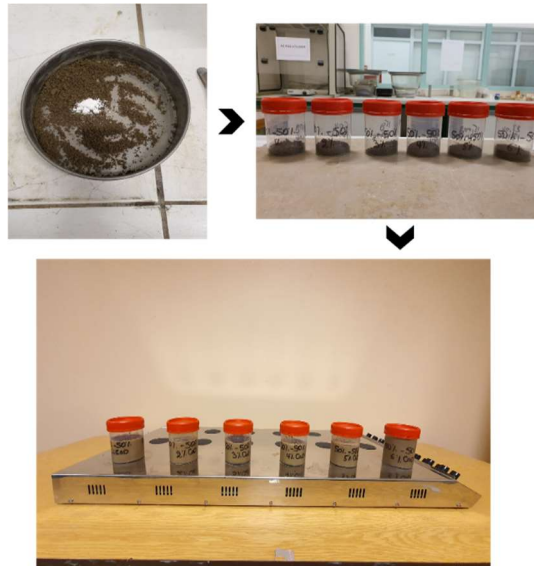


Figure 4- 5. Préparation des sédiments à différents dosages en chaux pour la détermination du point de fixation de la chaux.

Les solutions préparées précédemment sont d’abord, mises en agitation pour une durée d’une heure, ensuite la mesure du pH est effectuée à l’aide d’un pH-mètre étalonné pendant ou en fin de la mesure à 20°C. L’équilibre est atteint lorsque la valeur du pH ne varie plus de 0.02 en un intervalle d’une minute. La lecture est donc considérée comme stable et la valeur du pH est notée à la deuxième décimale.

○ Résultats et interprétations

La **Figure 4- 6** ci-dessous représente l’évolution du pH des mélanges en fonction de la teneur en chaux. Nous observons qu’à partir d’un pourcentage de 1% de chaux, la valeur du pH se stabilise. Ceci traduit l’état saturé du milieu en chaux. La portlandite produite, suite à l’hydratation de la chaux, permet la combinaison avec les alumino-sillicates pour former de nouveaux produits d’hydratation. L’élévation du pH engendrée par la saturation en chaux contribue dans ces réactions [50,131].

Dans le cadre de cette étude la teneur en chaux a été fixée à 1% de la masse sèche des matériaux traités.

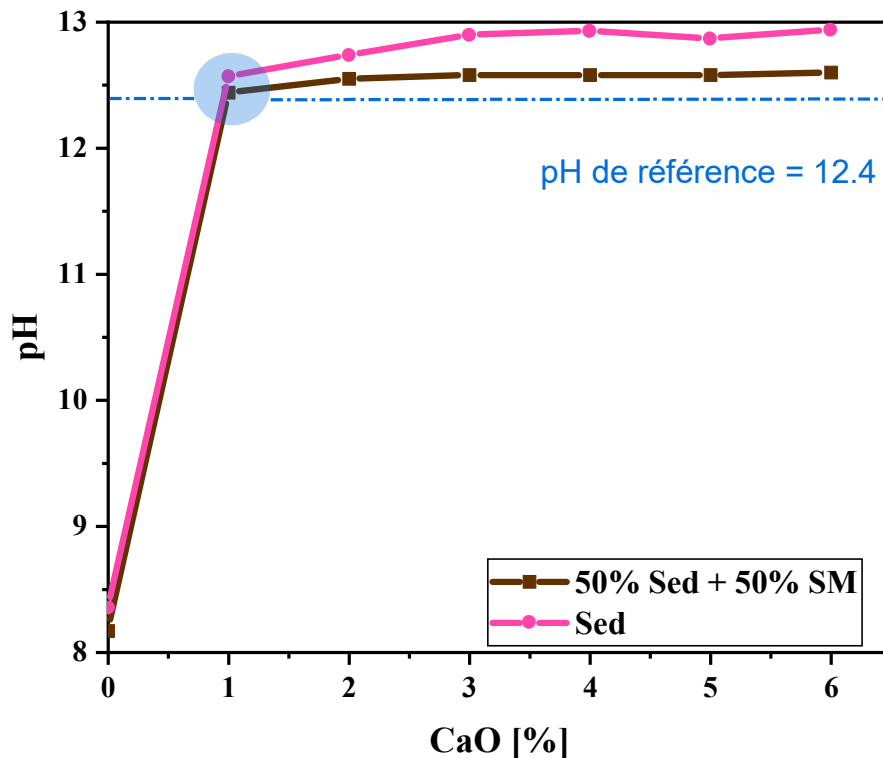


Figure 4- 6. Évolution du pH en fonction du taux de chaux incorporée.

1.1.4 Liants hydrauliques routiers

Les principales caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des deux liants hydrauliques routiers utilisés ont été évaluées dans le Chapitre 3. Ces derniers satisfont aux exigences requises par la norme NF EN 13282-2 [125] spécifique aux liants hydrauliques routiers à durcissement normal. Les deux liants sont référencés LHR 1, pour le liant contenant 80% de ciment, 10% de laitier de hauts-fourneaux et 10% de sédiments calcinés et LHR 2 pour le liant comportant 50% de ciment, 35% de laitier et 15% de sédiments calcinés. La **Figure 4-4** représente la distribution granulométrique des deux liants hydrauliques routiers. Il apparaît que le liant LHR 2 présente une granulométrie légèrement plus fine que celle du liant LHR 1. Ceci peut être interprété par le fait que le liant LHR 2 contient une proportion plus élevée de sédiments calcinés finement broyés (15% au lieu de 10%), avec une distribution granulométrique moins grossière que celles du ciment et du LHF. Selon les spécifications du guide GTR [30], les sédiments appartenant à la classe A3 peuvent être traités à la chaux et aux liants hydrauliques pour une utilisation en techniques routières. Le pourcentage préconisé des deux liants est de l'ordre de 2% pour la chaux et de l'ordre de 6-7% pour le ciment CEM II 32,5. Pour des raisons économiques et afin d'assurer l'efficacité du traitement, le pourcentage de chaux a été déterminé par l'essai de PFC, comme indiqué ci-dessus, et a été fixé à 1%.

Quant au dosage en liants hydrauliques routiers, deux taux ont été sélectionnés (7 et 10%), en pourcentage massique par rapport à la masse sèche de l'échantillon [54]. Les différentes formulations adoptées sont reprises dans le **Tableau 4- 2**.

Tableau 4- 2. Composition des formulations de l'étude traités aux liants avec ou sans l'ajout du correcteur granulométrique.

Formulations	S7-1	S7-2	S10-1	S10-2	SS7-1	SS7-2	SS10-1	SS10-2
Sédiments	100%	100%	100%	100%	50%	50%	50%	50%
Sable de marbre	0%	0%	0%	0%	50%	50%	50%	50%
Chaux	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
80C10LHF10SC	7%	0%	10%	0%	7%	0%	10%	0%
50C35LHF15SC	0%	7%	0%	10%	0%	7%	0%	10%

2. Détermination des caractéristiques de densification et de portance des formulations optimisées

o Principe et protocole d'essai

L'aptitude des mélanges proposés pour une utilisation en couche de forme est évaluée à travers l'essai de compactage et l'essai de portance immédiat. Les caractéristiques Proctor normal et de portance ont été déterminées suivant le protocole du Proctor miniature et l'essai de portance immédiat, selon la norme NF P94-093 [173] et la norme NF P94-078 [177]. Les modalités en détail de ces deux essais ont été bien expliquées dans le Chapitre 2.

Le mode opératoire du malaxage adopté est proche de celui utilisé par Silitonga [50]. Les sédiments ou le mélange de 50% Sed+50% SM ont été humidifiés à différents teneurs en eau, malaxés à l'aide d'un malaxeur automatique jusqu'à homogénéisation et conservés dans des sacs en plastique bien scellés pendant 24h minimum. Le mélange a été ensuite placé dans la cuve du malaxeur, mélangé à la chaux pendant environ 3 minutes puis laissé agir pour une durée d'une heure. Le liant hydraulique routier est incorporé et le tout mélangé durant 5 minutes puis versé dans le moule Proctor et compacté à l'énergie Proctor normal, comme illustré sur la **Figure 4- 7** et la **Figure 4- 8**.

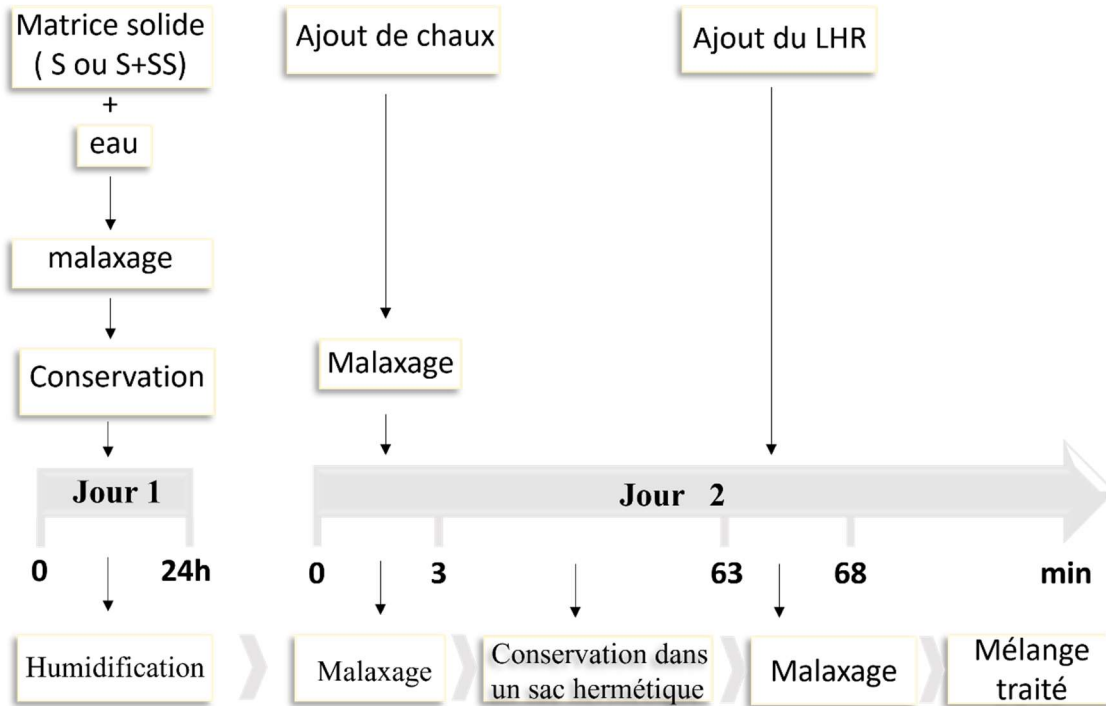


Figure 4- 7. Protocole de malaxage des mélanges traités aux liants hydrauliques.

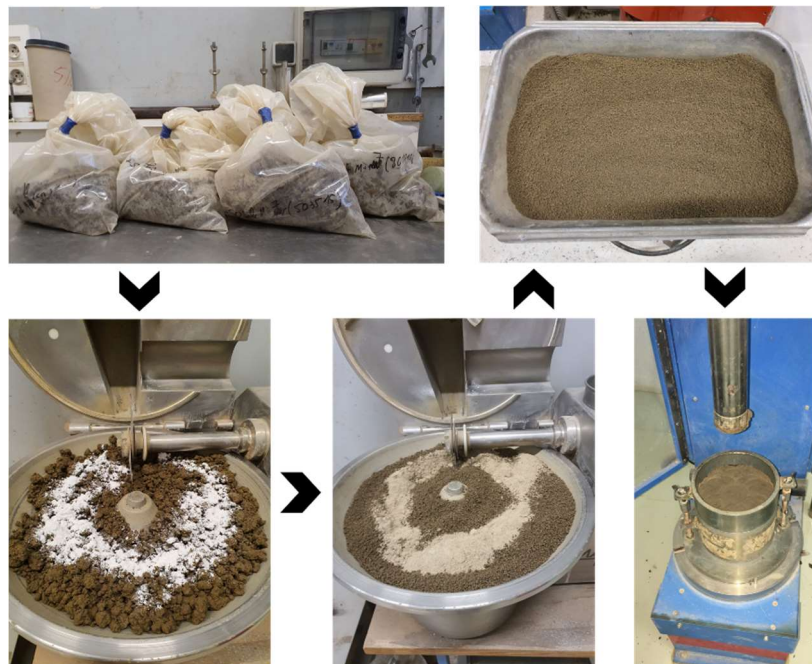


Figure 4- 8. Étapes de préparation des échantillons et compactage à énergie Proctor normal des éprouvettes destinées à l'essai IPI.

o Résultats et interprétations

Les courbes de compactage obtenues pour les sédiments traités et à titre de comparaison celles des sédiments bruts (Sed), sont présentées dans la Figure 4- 9.

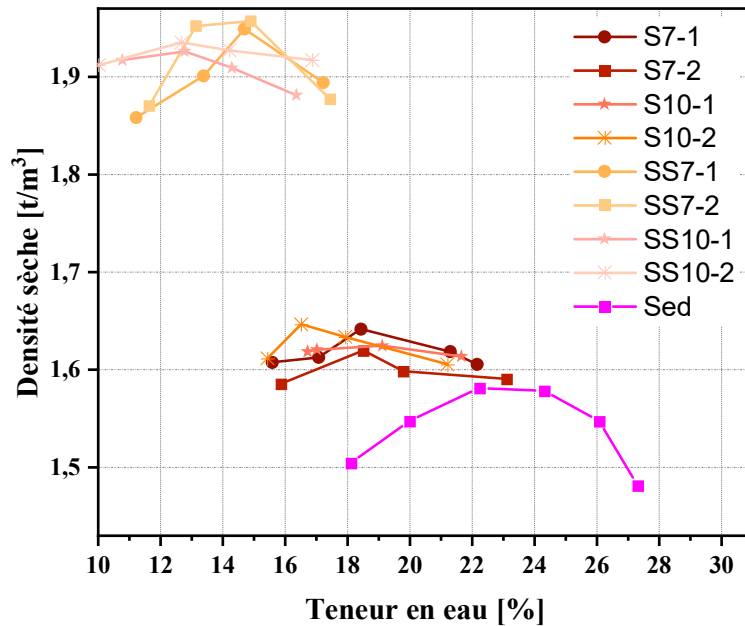


Figure 4- 9. Courbes Proctor normal pour les différentes formulations.

Les courbes relatives aux mélanges avec ou sans l'ajout de sable de marbre (SM) s'inscrivent au-dessus et à gauche de la courbe Proctor (coté sec) des sédiments bruts. Une diminution de la teneur en eau optimale W_{opt} accompagnée d'une augmentation de la valeur de la masse volumique sèche ρ_d , a été clairement observée, particulièrement pour les formulations composées de 50% de sable de marbre. La masse volumique sèche varie entre 1,62 et 1,65 Mg/m^3 pour les sédiments seuls traités et entre 1,93 et 1,96 Mg/m^3 pour les mélanges comportant 50% de sable de marbre. Ceci est dû à l'influence des liants d'une part, et de l'ajout du correcteur granulométrique d'autre part, qui contribuent à la diminution des vides et à l'amélioration de la compacité des mélanges [38]. Il est également constaté que moins les sédiments sont présents dans le mélange, moins la teneur en eau optimale est importante et plus la densité sèche maximale est importante. Ceci est dû à leur forte teneur en fraction fine, dont la demande en eau est plus importante. D'après Fleureau et al [208], l'optimum Proctor d'un sol est fonction de sa limite de liquidité. Ceci peut être confirmé par la valeur de la limite de liquidité obtenue sur les sédiments bruts (52,10%) qui est supérieure à celle obtenue sur le mélange 50% Sed+50% SM (40,47%).

Par ailleurs, l'augmentation du pourcentage de sable peut, cependant, avoir un effet sur la perméabilité du mélange et également sur la résistance à la compression [209].

Les résultats obtenus sur les différentes formulations sont consignés dans le **Tableau 4-3**. Les indices IPI obtenus pour toutes les formulations avec ou sans ajout de sable de marbre

ou/et de liants sont conformes aux exigences requises par le guide GTS [31] pour une utilisation en couche de forme, avec une valeur minimale requise de 10, à la mise en œuvre.

Tableau 4- 3. Paramètres de densification et de portance pour les formulations proposées.

Formulation	ρ_d (Mg/m ³)	W _{OPN} (%)	Indice IPI
S7-1	1,64	18,5	18,73
S7-2	1,62	18,7	14,23
S10-1	1,63	19	16,46
S10-2	1,65	16,7	10,04
SS7-1	1,95	14,7	18,73
SS7-2	1,96	14,2	15,73
SS10-1	1,93	12,6	25,09
SS10-2	1,94	13	22,47

3. Evaluation de l’aptitude des sédiments de Zardezas au traitement

Cet essai consiste à évaluer l’aptitude des sédiments ou le mélange 50% sed + 50%SM au traitement à la chaux ou/et liants hydrauliques. Il permet de vérifier s’ils présentent une stabilité volumique ainsi que des performances mécaniques adéquates. Ces essais sont réalisés dans un délai réduit, inférieur à deux semaines, et dans des conditions de cure particulières afin d’accélérer le phénomène d’hydratation. L’essai de l’évaluation de l’aptitude de l’ensemble des formulations de l’étude a été conduit suivant les spécifications de la norme NF P94-100 [210].

3.1 Essai de gonflement volumique et essai de traction indirecte après 7 jours d’immersion

o Principe et protocole d’essai

Des éprouvettes d’élancement 1 destinées à l’essai d’aptitude au traitement, de diamètre et de hauteur égales à 50 mm, ont été confectionnées par compression statique à une densité égale à $0,96 \times \rho_d^4$ conformément aux spécifications de la norme NF EN 13286-53 [211] et de la norme NF P 98-114-3 [212]. La quantité nécessaire à la fabrication de l’éprouvette a été calculée par l’équation (28) :

$$M = 1000V \times \rho_d \frac{100 + W}{100} \quad (28)$$

⁴ Densité sèche à l’optimum Proctor Normal.

D'où :

M : la masse totale humide à introduire dans le moule (g),

V : le volume de l'éprouvette (mm³),

ρ_d : la masse volumique sèche déterminée pour la confection de l'éprouvette (Mg/m³),

W : la teneur en eau du mélange, calculée par rapport à la matière sèche (%).

Le protocole de malaxage adopté est le même que celui utilisé pour l'essai Proctor, détaillé dans la section précédente.

Dans un premier temps, des cales d'espacement (n° 1) ont été placées entre le corps du moule et l'embase. La prise d'essai est introduite dans le moule par l'application d'une légère pression, puis les cales (n° 1), ont été remplacées par les cales (n° 2) et une charge axiale à vitesse constante et lente est appliquée jusqu'à ce que le piston supérieur de la presse soit en contact avec le moule. À ce moment-là, la pression a été relâchée, et les cales (n° 2) ont été remplacées par les cales (n° 3). Le compactage statique a été recommencé de nouveau en laissant pénétrer le piston inférieur pour une durée d'au moins 10 s. Les cales (n° 3) ont été retirées et la même opération a été répétée. En fin d'essai, l'éprouvette a été démoulée par extrusion à vitesse lente.

Trois éprouvettes ont été réalisées pour chaque type d'essai. Les éprouvettes destinées à l'essai du gonflement sont entourées sur les côtés latéraux de bandelettes perméables fixés avec des bracelets élastiques sans contraintes excessives afin de permettre la pénétration de l'eau et maintenir l'état de l'échantillon. Il est à noter qu'avant de procéder à l'immersion des éprouvettes, le diamètre moyen et de la hauteur moyenne doivent être mesurés (**Figure 4- 10**) pour le calcul de leur volume initial selon la formule (29) suivante :

$$V_0 = \frac{\pi}{4} \times \left[\frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} \right]^2 \times \frac{h_1 + h_2 + h_3}{3} \quad (29)$$

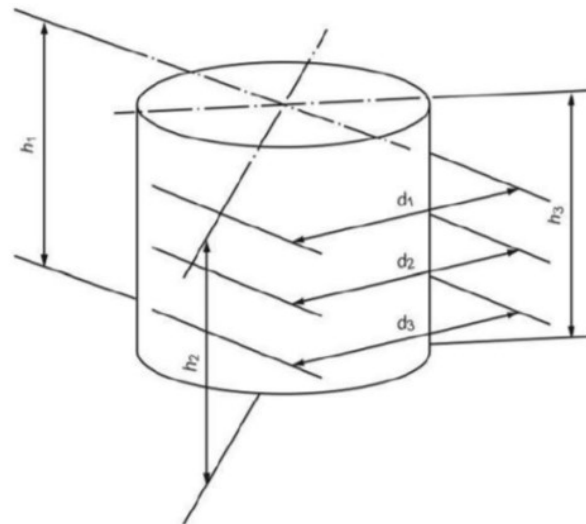


Figure 4- 10. Mesure de la hauteur moyenne et du diamètre moyen de l'éprouvette pour le calcul de V_0 .

Les éprouvettes destinées à la mesure de la résistance à la traction indirecte sont enveloppées sur les côtés latéraux par un film imperméable, comme montré sur la **Figure 4- 11**. Les modalités de conservation sont explicitées en fonction du type de traitement dans le **Tableau 4- 4**.

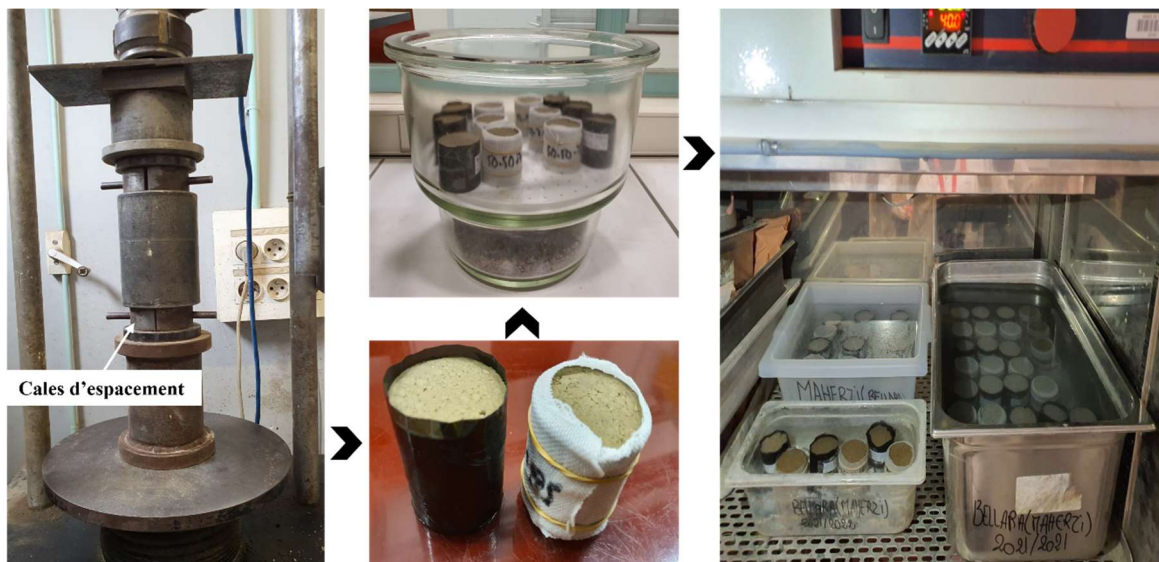


Figure 4- 11. Etapes de confection, de cure et de mise en immersion des éprouvettes.

Tableau 4- 4. Modalités de déroulement de l’essai d’aptitude au traitement en fonction du type de traitement appliqué [31].

Type de traitement	Temps de cure ⁵ et délai d’immersion ⁶
Traitement à la chaux seule	3 jours ± 4 heures à 20°C ± 2 et à plus de 90% de degré hygrométrique puis immersion totale dans de l’eau à 40°C ± 2 pendant 7 jours ± 4 heures
Traitement mixte	4 heures ± 15 min à 20°C ± 2 et à plus de 90% de degré hygrométrique puis immersion totale dans de l’eau à 40°C ± 2 pendant 7 jours ± 4 heures

Une fois la période spécifiée pour l’immersion écoulée, les éprouvettes destinées à la mesure du gonflement volumique sont retirées de l’eau et la masse des éprouvettes est directement déterminée par pesée hydrostatique. Les éprouvettes sont ensuite essuyées délicatement puis pesées à l’air libre.

Le gonflement volumique exprimé en pourcentage est donc calculé suivant les formules (30) et (31) ci-dessous :

$$G_v = \frac{[V_1 - V_2] + V_0}{V_0} \quad (30)$$

Avec :

$$V_1 = \frac{m_2 - m_1}{\rho_w^7} \quad (31)$$

m_1 : la masse déjàugée de l’ensemble (éprouvette + bandes + bracelets),

m_2 : la masse de l’ensemble à l’air libre (éprouvette + bandes + bracelets),

V_2 : volume de l’ensemble (bandes + bracelets).

⁵ Le temps de cure correspond à l’espace de temps entre la fin de préparation de l’éprouvette et sa mise en immersion.

⁶ Correspond à la période durant laquelle, les éprouvettes sont totalement immergés dans l’eau.

⁷ ρ_w : masse volumique de l’eau, égale à 1 Mg/m³.

Quant aux éprouvettes destinées à la mesure de la résistance à la traction indirecte, après la période de cure de 7 jours, le film couvrant l'éprouvette a été retiré et la compression diamétrale a été effectuée selon les spécifications de la norme NF EN 13286-42 [213]. La charge appliquée doit être continue et uniforme, et la montée en charge ne doit pas dépasser les 0,2 MPa/ sec.

La résistance à la traction indirecte a été déterminée suivant la formule (32) ci-après :

$$R_{it} = \frac{2F}{\pi HD} \quad (32)$$

D'où :

R_{it} : est la résistance à la traction indirecte [MPa],

F : est la charge maximale appliquée à la rupture [N],

L : est la longueur de l'éprouvette [mm],

D : est le diamètre de l'éprouvette [mm].

o Résultats et interprétations

Les résultats des mesures du gonflement exprimés en pourcentage (%) et de la résistance à la compression diamétrale en MPa, sont la moyenne de trois mesures pour l'ensemble des formulations par chaque type d'essai et sont présentés dans la **Figure 4- 12** et la **Figure 4- 13**.

Il a été observé que plus le taux de substitution du ciment par des sédiments calcinés et du LHF augmente, moins le gonflement volumique est important. Ceci peut être lié à la composition chimique du ciment renfermant une quantité de sulfate (SO_3 de l'ordre de 4,09%) plus importante que celle présente dans la composition du LHF (1,56%) ou des sédiments calcinés. Cela peut être à l'origine de la formation des ettringites. Par ailleurs, il a été constaté que les formulations composées de 50% de sable de marbre + 50% de sédiments présentent des gonflements volumiques moins importants par rapport à ceux obtenus avec les formulations constituées de seulement des sédiments bruts traités.

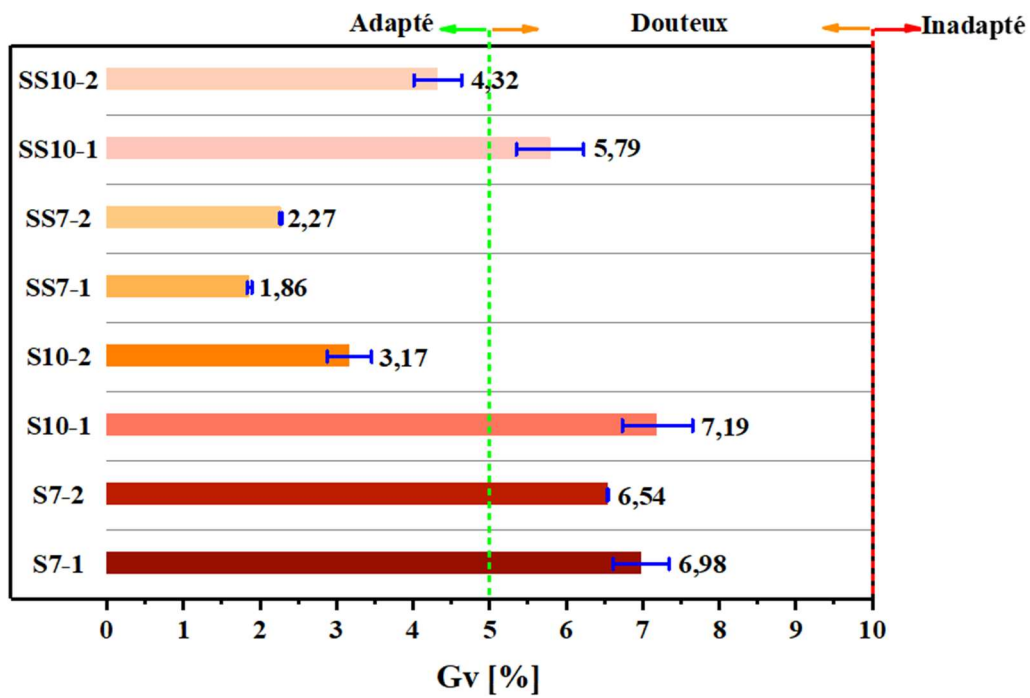


Figure 4- 12. Gonflement volumique mesuré après 7 jours d’immersion.

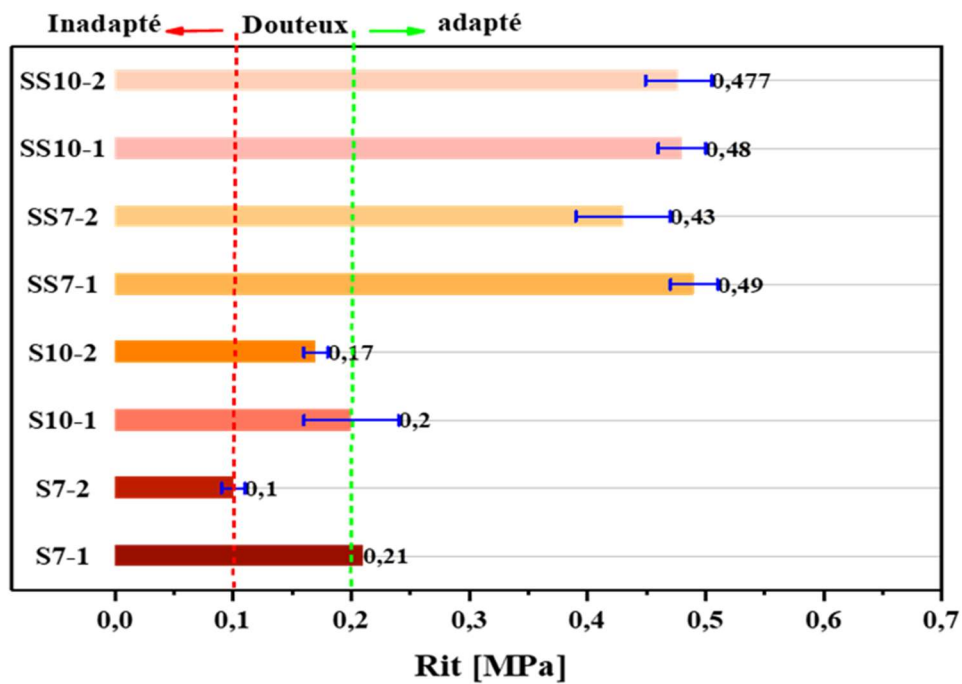
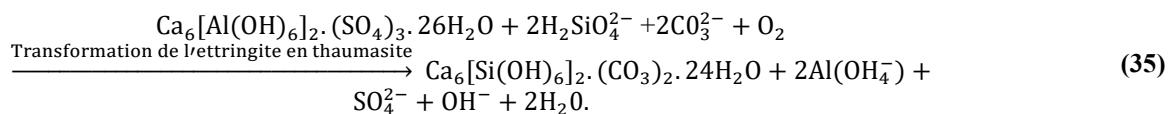
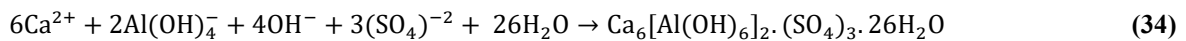
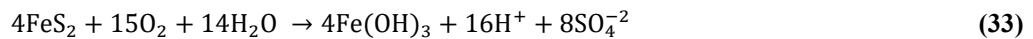


Figure 4- 13. Mesure de la résistance à la traction diamétrale après 7 jours d’immersion.

Ceci peut être attribué à la limite de liquidité des sédiments (52,1%) qui est supérieure à celle du mélange 50%-50% (40,47%). En effet, en raison de leur teneur en fine plus élevée, qui en présence d’eau réagit pour créer un film d’eau entourant la particule, provoquant ainsi un gonflement [28]. D’après Fleureau et al [208] le gonflement volumique des échantillons, est proportionnel à sa limite de liquidité et à sa porosité intergranulaire. Le traitement aux LHR

seul pour ce type de matériau, n'est pas suffisant pour atteindre des seuils de gonflement admissibles pour une utilisation en couche de forme [28]. Également, la composition minéralogique des sédiments et la présence de la pyrite dans ces derniers, conduit à la précipitation des sulfates à la suite de son altération par oxydation dans un milieu alcalin, favorisée par divers critères, notamment le pH, les conditions de cure et les caractéristiques physiques de l'échantillon [25,214]. En effet, la combinaison des sulfates avec de l'ettringite primaire déjà présente ou des C-S-A-H produites par l'hydratation des liants dans le milieu permet la formation de nouveaux produits sulfatés gonflants : ettringite et/ou thaumasite⁸ [215], causant ainsi l'apparition des fissures et donc la destruction de l'échantillon [179]. Ces transformations ont été résumées par Hunter [216] et cité par Maherzi et al [179], suivant les réactions (33),(34) et (35) :



Les images présentées dans les **Figure 4- 14**, **Figure 4- 15**, **Figure 4- 16** et **Figure 4- 17** ont été obtenues par observation au microscope électronique à balayage. Les détails de conditions d'analyse et de grossissement sont mentionnés en bas des images. Ces clichés illustrent bien la présence des produits sulfatés expansifs sous forme d'aiguilles ou de fibres, de manière plus intense pour les mélanges qui ont le plus subit une instabilité volumique : **S7-1**, **S7-2** et **S10-1** et moins pour les matériaux qui ont le moins gonflé, notamment **SS7-1**. En effet, ceci vient confirmer les hypothèses avancées pour interpréter les gonflements volumiques des mélanges étudiés.

⁸ **Thaumasite** : est un carbo-sulfo-silicate et/ou silico-aluminate de calcium hydraté, espèce minérale sous forme d'aiguilles.

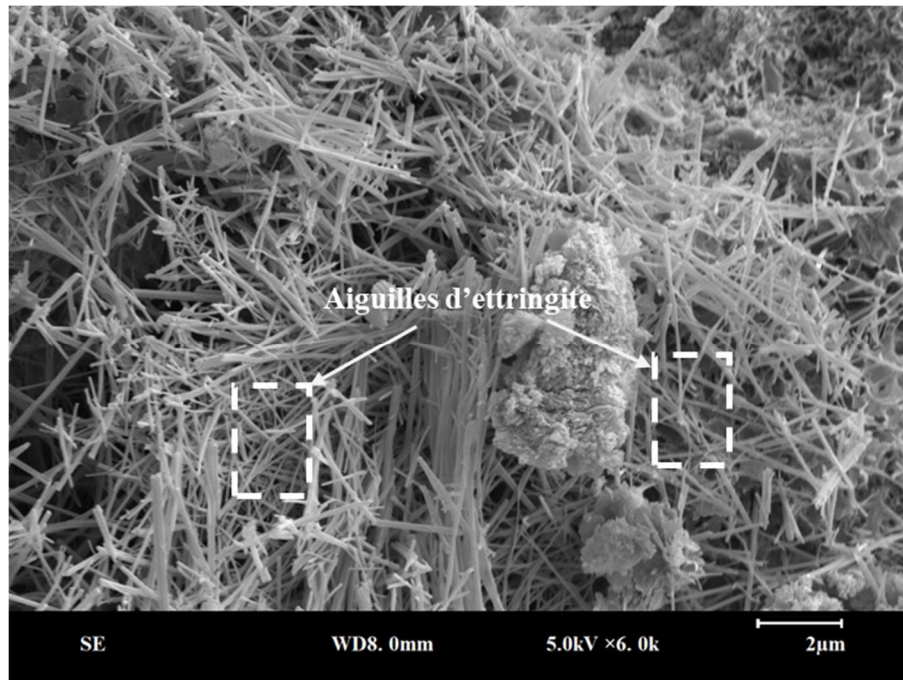


Figure 4- 14. Observation au MEB en électrons secondaires (SE) de la formulation S7-1.

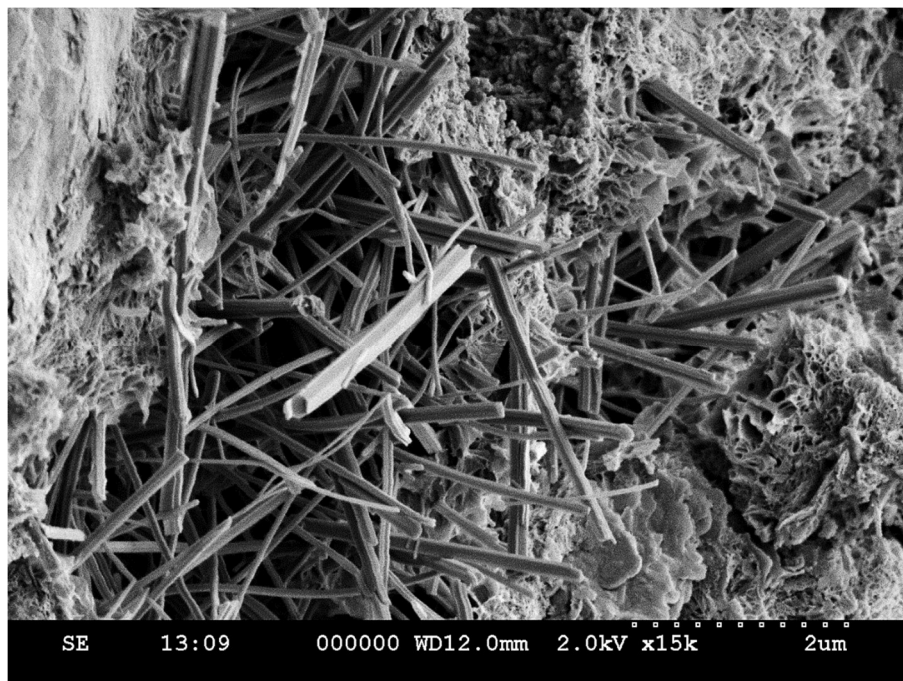


Figure 4- 15. Observation au MEB en électrons secondaires (SE) de la formulation SS7-1.

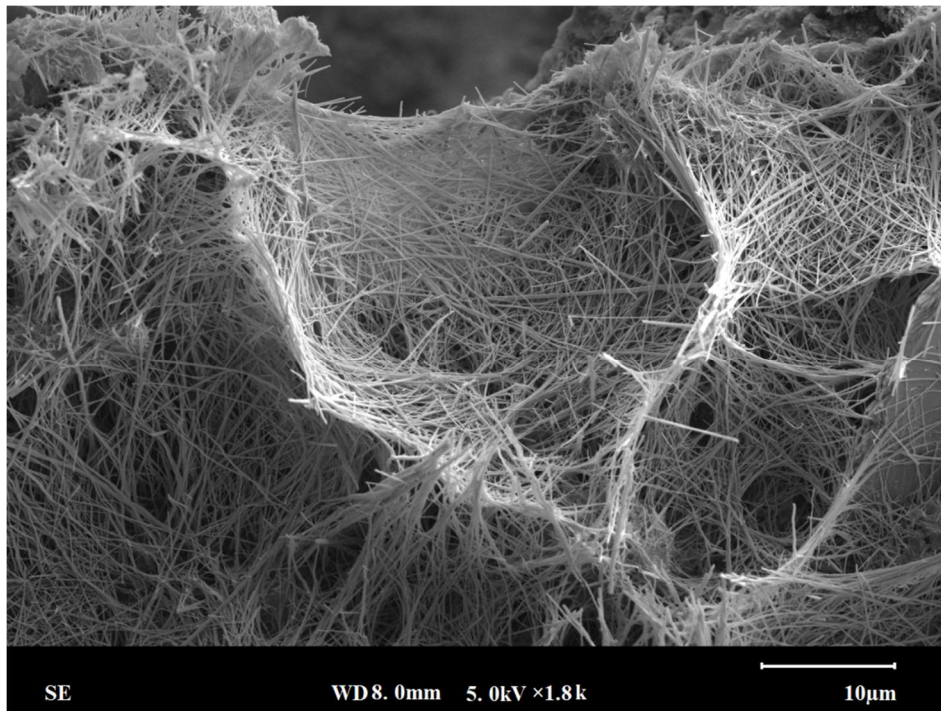


Figure 4- 16. Observation au MEB en électrons secondaires (SE) de la formulation S10-1.

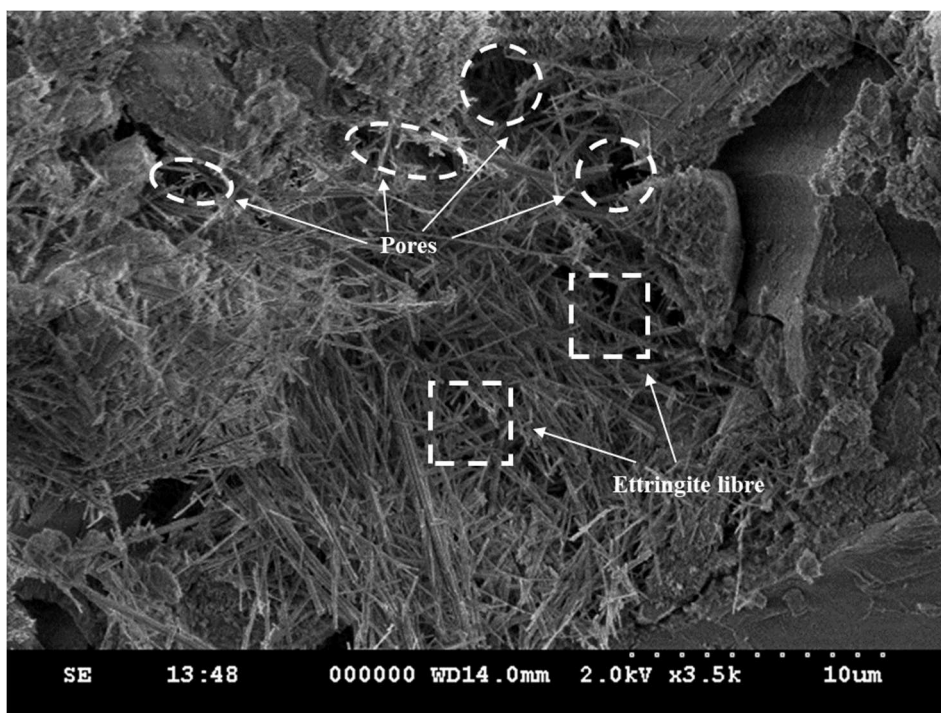


Figure 4- 17. Observation au MEB en électrons secondaires (SE) de la formulation SS10-1.

Par ailleurs, les formulations composées du mélange 50%Sed + 50%SM, présentent des résistances à la traction indirecte meilleures que celles avec des sédiments bruts traités.

Selon les critères de jugement pour l'évaluation des sédiments ou du mélange au traitement précisés dans le **Tableau 4- 5**. Il ressort que seules les trois formulations : **SS7-1**,

SS7-2 et SS10-2 sont aptes au traitement aux liants hydrauliques routiers associé à la chaux.

Tableau 4- 5. Critères de jugement pour l'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé ou non à la chaux [31].

Type de traitement	Aptitude du sol au traitement	Paramètres considérés	
		GV (%)	Rit (MPa)
Traitement à la chaux seule	Adapté	≤ 5	Paramètre non considéré pour ce type de traitement du fait de la lenteur de la prise pouzzolanique
	Douteux	$5 \leq GV \leq 10$	
	Inadapté	≥ 10	
Traitement mixte	Adapté	≤ 5	$\geq 0,2$
	Douteux	$5 \leq GV \leq 10$	$0,1 \leq Rit \leq 0,2$
	Inadapté	≥ 10	$\leq 0,1$

La validation de ces formulations nécessite l'évaluation d'autres performances à travers une campagne d'essai à court et à long terme, présentée dans les sections à venir.

4. Evaluation du comportement mécanique des sédiments de Zardezas

4.1 À court terme

4.1.1 Critères de traficabilité : détermination de la résistance à la compression simple (R_c)

Le critère de traficabilité correspond à l'âge autorisant la circulation des engins sur une couche de forme traitée. L'appréciation de ce critère s'effectue à travers des essais de compression simple. Selon le GTS [31], le critère de traficabilité est jugé satisfaisant à partir du moment où la résistance à la compression dépasse le 1 MPa.

o Principe et protocole d'essai

L'essai de compression simple a été réalisé sur l'ensemble des formulations selon la norme NF EN 13286-41 [217]. À cet égard, 3 éprouvettes d'élanement 2 avec un diamètre de 50 mm et une hauteur de 100 mm ont été confectionnées à 98,5% ρ_d , à 14, 56 et 90 jours, afin d'estimer le temps nécessaire pour atteindre le critère de traficabilité. Le mode de confection adopté est par compression statique, similaire à celui utilisé pour les éprouvettes 50*50 destinées à l'essai d'aptitude au traitement. Une fois compactées et démoulées, les éprouvettes ont été pesées, recouvertes d'un film en plastique imperméable pour éviter toute perte d'humidité puis conservées dans une salle à 20°C jusqu'au jour de l'écrasement (**Figure 4- 18**). Une perte d'au-delà de 2% entre le jour de la confection et le jour de l'écrasement peut conduire au rejet des résultats obtenus. La vitesse de chargement doit être adaptée avant de procéder à

l'essai, pour que l'écrasement s'effectue entre 30-60 s, à partir du moment de l'application de la charge. La résistance à la compression simple est calculée à partir de la charge maximale appliquée au moment de la rupture par la formule (36):

$$R_c = \frac{F}{AC} \quad (36)$$

Avec :

R_c : résistance à la compression de l'éprouvette traitée [MPa],

F : est la charge maximale appliquée à la rupture [N],

AC : section transversale de l'éprouvette [mm²].

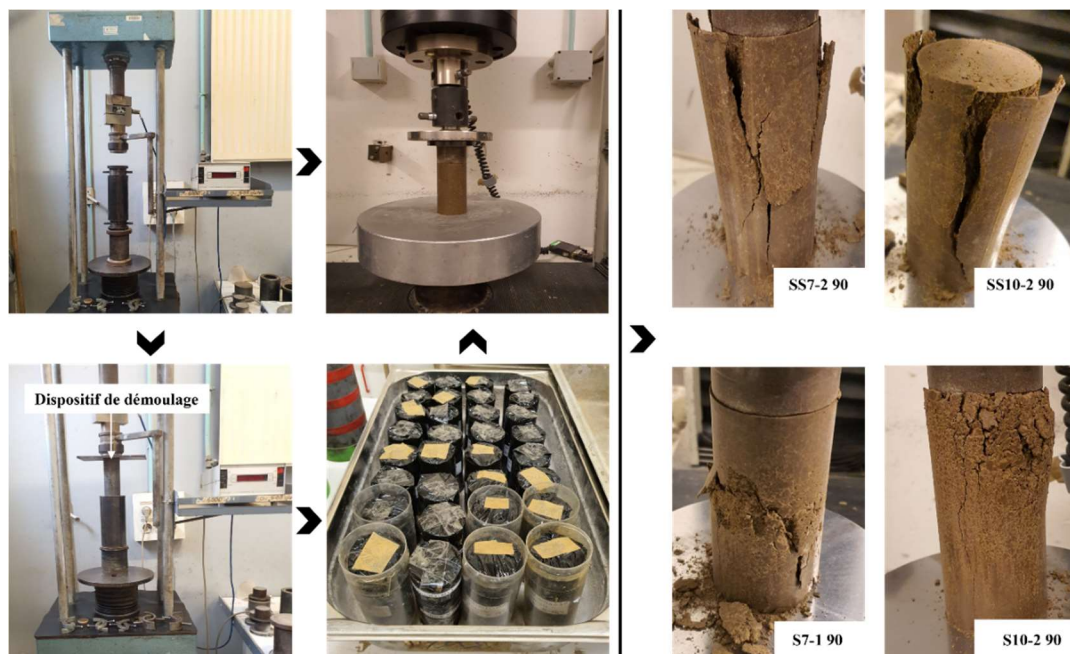


Figure 4- 18. Confection, conservation et écrasement des éprouvettes destinées à l'essai de compression simple.

o Résultats et interprétations

L'évolution temporelle de la résistance à la compression à 14, 28, 56 et 90 jours des différentes formulations est illustrée sur l'histogramme présenté sur la **Figure 4- 19**. Le résultat obtenu pour chaque échéance est la moyenne de deux mesures réalisées sur deux éprouvettes. Entre 14 et 28 jours, une augmentation de la résistance à la compression simple en fonction du pourcentage de liants est constatée pour l'ensemble des formulations à l'exclusion de **S10-2**.

Elle varie entre 1,11 et 2,12 MPa pour les formulations composées des sédiments seuls traités et entre 1,95 et 3,95 MPa pour les mélanges 50% Sed + 50% SM. Cette augmentation peut être liée à la production des hydrates C-A-S-H engendrée par le phénomène d'hydratation des liants et les réactions chimiques qui se produisent entre les sédiments ou le mélange et les liants. Ces derniers conduisent au remplissage des vides intergranulaires [82]. Une légère diminution est ensuite observée entre 28 et 56 jours sauf pour les deux formulations **SS7-2** et **SS10-2**. En effet, le comportement de cinétiques de prise des liants peut être perturbé par la présence des substances chimiques et de la matière organique du milieu [25]. La résistance à la compression entre 56 et 90 jours augmente de nouveau pour tous les mélanges traités. Par conséquent, la reprise de l'accroissement et l'amélioration de la résistance se traduisent par la continuité de formation de nouveaux hydrates grâce aux réactions pouzzolaniques, ce qui mène à une matrice plus dense, avec moins de porosité.

En outre, il a été constaté que l'évolution de la résistance à la compression pour les mélanges 50% Sed + 50% SM est beaucoup plus rapide que les formulations composées seulement des sédiments traités pour toutes les échéances et tous les taux de liants. A titre d'exemple la formulation **SS10-1** présente une résistance à la compression, deux fois plus importante comparée à **S10-1**. Ceci confirme les résultats obtenus par Boutouil et al [130] sur la correction de la granulométrie des sédiments par l'ajout de deux types de sable à différents pourcentages. Ces résultats ont conduit à une amélioration considérable de la compression simple.

La résistance à la compression simple de toutes les formulations dépasse le critère de résistance minimal autorisant la circulation sur la couche de forme fixée à 1 MPa, des 14 jours. Selon les spécifications du guide GTS [31], la couche de forme peut être circulée à partir du 14^{ème} jour. La détermination de la résistance à la compression à 7 jours peut être envisagée afin de déterminer l'âge minimal autorisant la circulation sur la couche de forme.

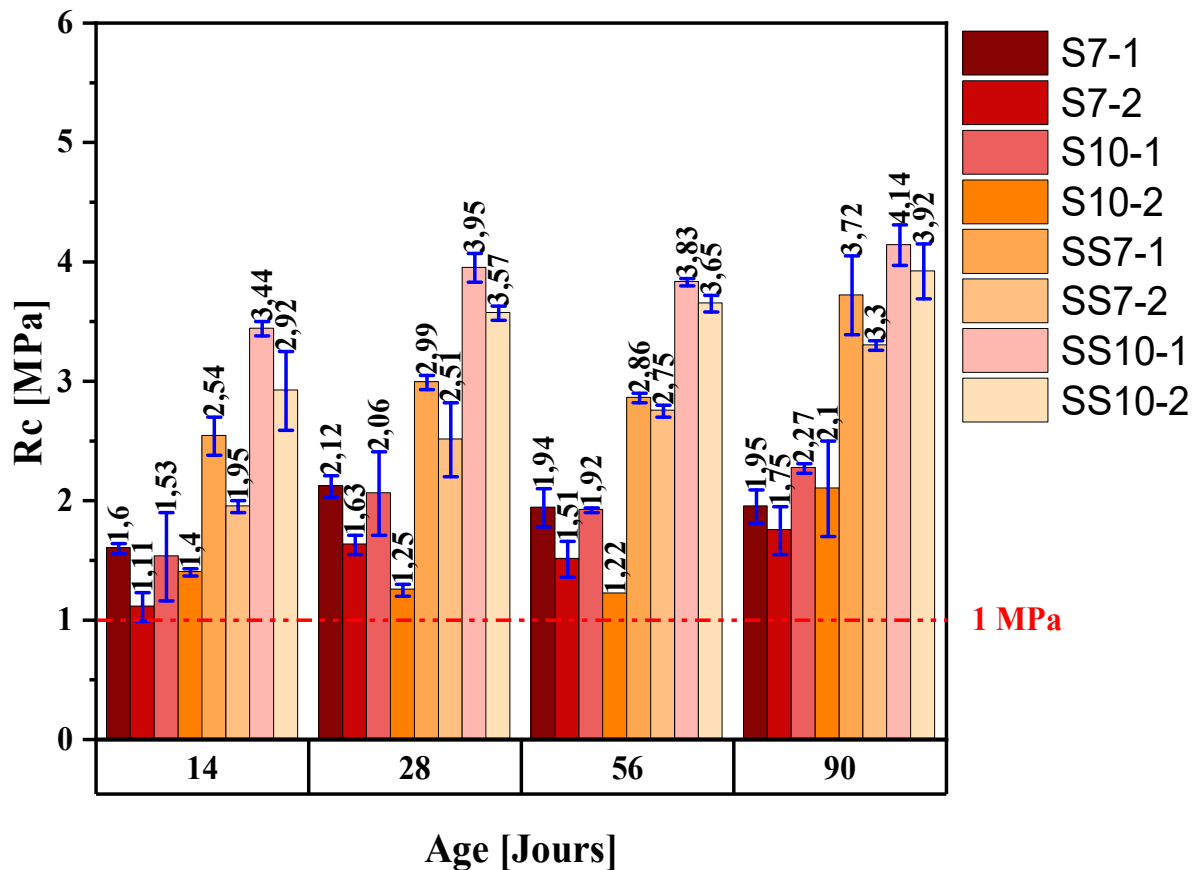


Figure 4- 19. Évolution de la résistance à la compression simple dans le temps en fonction des différents types de traitements appliqués.

4.1.2 Critère de résistance à l’immersion au jeune âge (R_{ci})

o Principe et protocole d’essai

Le mode de préparation et de confection des éprouvettes destinées à la mesure de la résistance à l’immersion au jeune âge (R_{ci}) est identique à celui utilisé pour la préparation des éprouvettes pour l’essai de la résistance à la compression (R_c). Seules les conditions de cure sont différentes ici. Dans un premier temps, les éprouvettes ont été enveloppées d’un film en plastique imperméable et placées dans une salle ayant une température réglée à 20°C pour une durée de 28 jours (cure normale). Dans un second temps, le film en plastique a été retiré et les éprouvettes ont été disposées dans un bac rempli d’eau à 20°C pendant 32 jours (Figure 4- 20). Le jour « j » les échantillons ont été égouttés et leur surface a été essuyée délicatement avec du papier, puis, l’écrasement s’est déroulé de la même manière que pour la résistance à la compression simple, c’est ainsi que la valeur R_{ci60} a été obtenue. Le résultat obtenu est la moyenne de deux éprouvettes.



Figure 4- 20. Mode de conservation et écrasement des éprouvettes destinées à l’essai de résistance à l’immersion.

Le rapport R_{ci60}/R_{c60} , permet d’apprécier la sensibilité à l’eau des différentes formulations. En effet, Trois classes peuvent être accordées à ces dernières en fonction de leurs résistances à l’immersion et du rapport R_{ci60}/R_{c60} d’après la norme NF P94-102-1 [218] (**Tableau 4- 6**).

Tableau 4- 6. Classes de résistance à l'immersion au jeune âge selon la NF P94-102-1 [218].

Valeur du bleu	Classe $R_{im 1}$	Classe $R_{im 2}$	Classe $R_{im 3}$
VBS $\leq 0,5$	$R_{ci60}/R_{c60} > 0,9$	$0,9 \geq R_{ci60}/R_{c60} \geq 0,8$	$0,8 > R_{ci60}/R_{c60} \geq 0,7$
VBS $> 0,5$	$R_{ci60}/R_{c60} > 0,8$	$0,8 \geq R_{ci60}/R_{c60} \geq 0,6$	$0,6 > R_{ci60}/R_{c60} \geq 0,5$

D’après le GTS [31], il est considéré que la résistance à l’immersion au jeune âge satisfait aux exigences pour une utilisation en couche de forme, lorsque le rapport R_{ci60}/R_{c60} , correspond aux valeurs suivantes :

$$R_{ci60}/R_{c60} \geq 0,80 \text{ si VBS} < 0,5$$

$$R_{ci60}/R_{c60} \geq 0,60 \text{ si VBS} > 0,5$$

o **Résultats et interprétations**

Sur la **Figure 4- 21** et le **Tableau 4- 7**, sont donnés les résultats obtenus à partir de l’essai de la résistance à l’immersion au jeune âge, après 28 jours de cure normale et 32 jours d’immersion dans l’eau. Les valeurs notées dans le tableau sont, pour chaque formulation, la moyenne de deux mesures effectuées sur deux éprouvettes.

Il est clairement observé, que les résistances obtenues après l’immersion sont inférieures aux résistances trouvées sur les éprouvettes qui ont subi une cure normale. Cette baisse peut être engendrée par la pénétration de l’eau dans les pores [44].

D’après les spécifications de la norme NF P94-102-1 [218], les formulations **SS7-2** et **S10-1** appartiennent à la classe de résistance à l’immersion $R_{im} 1$, **S7-1**, **S7-2**, **S10-2**, **SS7-1**, **SS10-1** et **SS10-2** font partie de la classe $R_{im} 2$.

La résistance à l’immersion au jeune âge de toutes les formulations dépasse la limite seuil inférieure de 0,6 spécifiée par le GTS [31]. La tenue à l’immersion à l’eau est donc jugée satisfaisante. Cela veut dire que toutes les formulations ne présentent aucune sensibilité à l’eau.

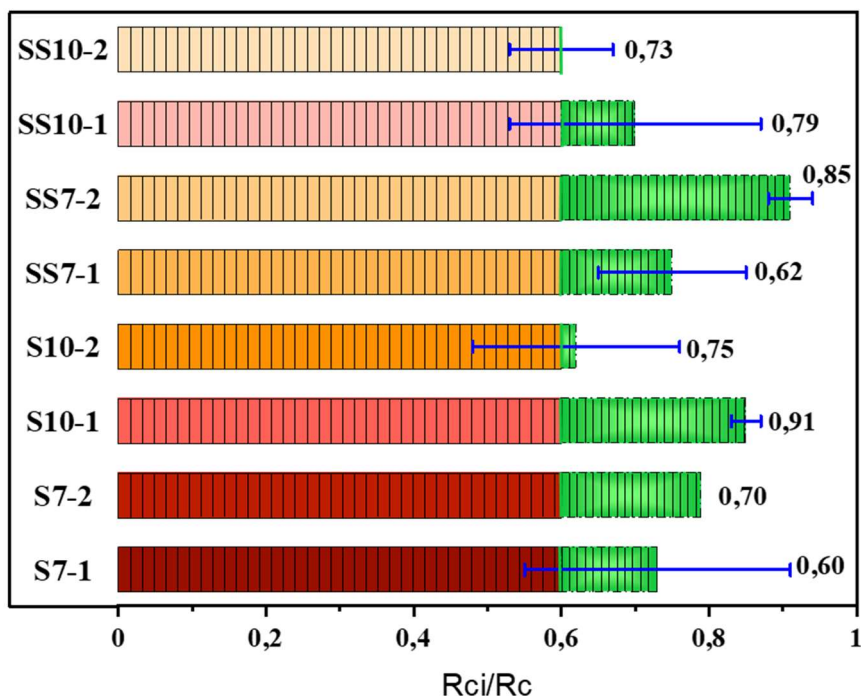


Figure 4- 21. Résistance à l’immersion au jeune âge de l’ensemble des formulations.

Tableau 4- 7. Rc et Rci après 28 jours de cure normale et 32 jours d’immersion.

Formulation	Rci (MPa)	Ecart type	Rc (MPa)	Rci/Rc
S7-1	1,41	0,23	1,94	0,73
S7-2	1,19	0,11	1,51	0,79
S10-1	1,63	0,02	1,92	0,85
S10-2	0,76	2,13	1,22	0,62
SS7-1	2,13	0,24	2,86	0,75
SS7-2	2,51	0,03	2,75	0,91
SS10-1	2,27	0,09	3,83	0,70
SS10-2	2,51	0,23	3,65	0,60

4.1.3 La résistance au gel : détermination de la résistance à la compression diamétrale

En vertu des difficultés rencontrées généralement lors de la réalisation des essais de traction directe, la résistance au gel dans notre cas est évaluée au travers les essais de compression indirecte réalisés conformément aux prescriptions de la norme NF EN 13286-42 [213]. La résistance à la compression directe est ensuite estimée grâce à l'équation suivante (37):

$$R_t = 0,8R_{it} \quad (37)$$

Avec,

R_t : Résistance à la traction estimée à partir de R_{it} (MPa),

R_{it} : Résistance à la compression diamétrale (MPa).

o Principe et protocole d'essai

La quantité nécessaire à la confection des éprouvettes, le mode de malaxage et de préparation sont les mêmes utilisés précédemment pour la préparation des éprouvettes destinées à l'essai de l'aptitude au traitement (éprouvettes cylindriques d'éclatement 1, $D \times L = 50 \times 50$ mm), en suivant la norme NF EN 13286-53 [211]. Les éprouvettes ainsi préparées à 96% ρ_d ont été par la suite entourées d'un film imperméable pour conserver leur humidité, et placées dans une salle climatisée réglée à 20°C jusqu'au jour de l'écrasement. Deux éprouvettes ont été préparées par échéance (14, 28, 56 et 90 jours), comme illustré sur la **Figure 4- 22**.

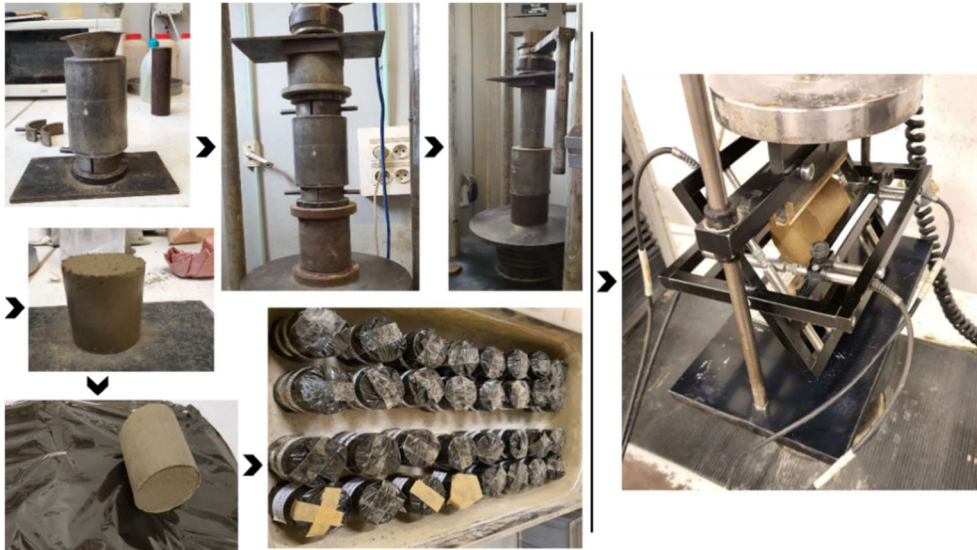


Figure 4- 22. Modalités de préparation, de conservation et de d'écrasement des éprouvettes 50××50 pour la détermination de la résistance à la compression diamétrale.

La détermination de la résistance à la compression indirecte a été effectuée comme décrit dans le paragraphe 3.1, selon la norme 13286-42 [213] (**Figure 4- 23**), à l'aide d'une presse mécanique de la marque INSTRON-série 5500R, modèle 4206-006. Cet équipement a une capacité allant jusqu'à 150 kN. La montée en charge a été fixée à 0,20 MPa/sec.

D'après le guide GTS [31], l'âge à partir duquel le matériau est jugé résistant au gel correspond à l'âge de l'obtention d'une résistance en traction directe supérieure ou égale à 0,20 MPa, ou une résistance en compression diamétrale supérieure ou égale à 0,25 MPa.

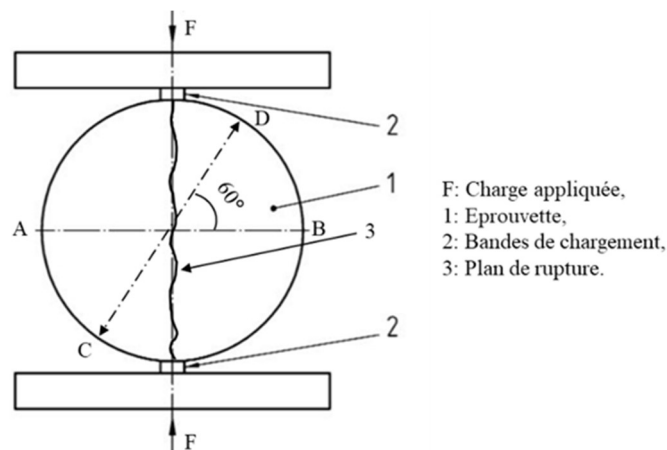


Figure 4- 23. Principe de détermination de la résistance à traction indirecte.

○ **Résultats et interprétations**

Le résultat obtenu pour chaque échéance est la moyenne de deux mesures effectuées sur deux éprouvettes. La **Figure 4- 24** présente les résultats des évolutions des résistances à la traction des formulations étudiées. Il a été constaté qu’entre 14 et 28 jours, la résistance à la compression diamétrale enregistre une diminution, particulièrement pour les formulations composées de sédiments seuls traités aux liants. Pour la période entre 28, 56 et 90 jours toutes les formulations reprennent leur rythme d’évolution d’accroissement de la résistance à la traction indirecte, excepté les formulations avec sédiments seuls qui restent plus ou moins stables à 90 jours.

À partir du 14^{ème} jour, toutes les formulations 50%Sed + 50% SM, ont développées des résistances au gel, qui satisfont les exigences requises par le GTS [31] ($R_{it} \geq 0,25$ MPa). Ces résistances varient entre 0,35 et 0,42 MPa. Ceci rejoint les travaux menés par Boutouil et al [130] et Maherzi [25], sur l’effet de l’ajout du correcteur granulaire sur les performances mécaniques du mélange. Concernant les mélanges à base de sédiments seuls traités, seule la formulation **S10-1** passe à l’âge de 14 jours puis elle a diminué. Elle a repris ensuite son évolution pour atteindre la valeur seuil à 90 jours. La formulation **S7-1** atteint une valeur de 0,25 MPa à partir de 28 jours et la **S10-2** après 56 jours. En revanche, la formulation **S7-2** ne répond pas aux exigences sur toutes les échéances.

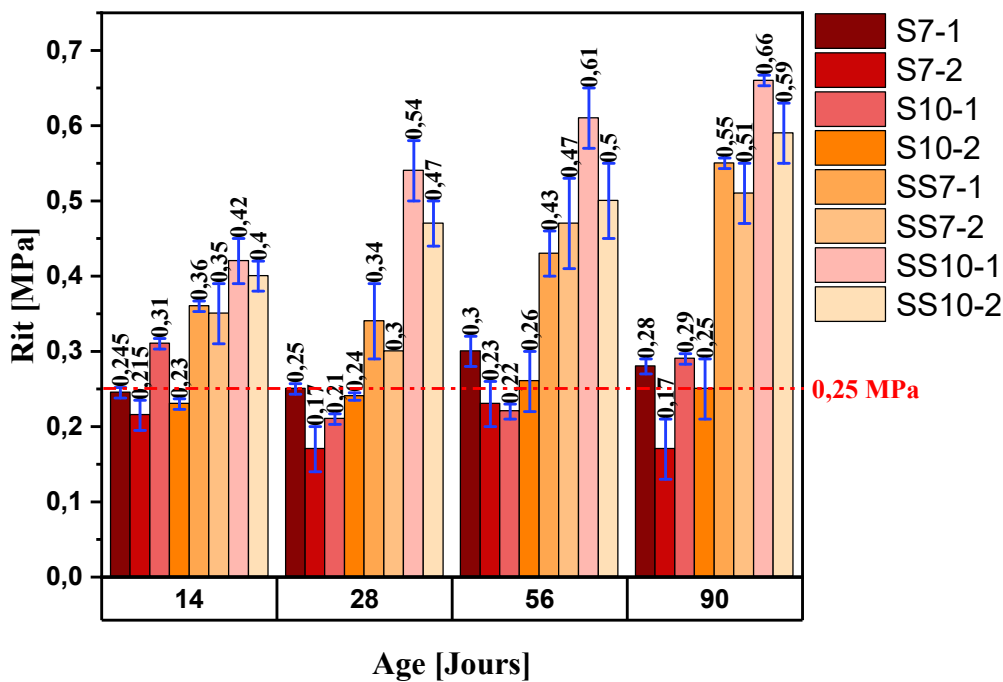


Figure 4- 24. Résultats des résistances à la traction indirecte des formulations étudiées

4.2 À long terme

L'évaluation des performances mécaniques à long terme s'est effectuée par la détermination du couple : résistance à la traction et du module d'élasticité (E , R_t) à 360 jours. Lorsque les délais sont restreints, la détermination de ces deux paramètres peut être réalisée à 28, 60 ou 90 jours en fonction du type de traitement (traitement mixte dans notre cas), et l'estimation à 360 jours peut être déduite par l'utilisation des coefficients empiriques à partir des équations (38) et (39) suivantes proposées par la norme NF P98-114-2 [219]:

$$\frac{R_t}{R_{t360}} = 0,70 \quad (38)$$

$$\frac{E_t}{E_{t360}} = 0,75 \quad (39)$$

De même pour le module d'élasticité, il a été déterminé par l'essai de compression diamétrale suivant la norme NF EN 13286-43 [220]. L'allongement horizontal et la variation de la longueur du diamètre à 60° de l'horizontal sont mesurés à l'aide de quatre capteurs de charge. Le module d'élasticité est estimé à 30% de la contrainte maximale de rupture est calculé par les équations (40) et (41) suivantes :

$$v = \frac{1 + 0,40 \Theta}{1,73 - 1,07 \Theta} \quad (40)$$

$$E_{it} = (0,273 + v + 0,726v^2) \times \frac{0,3 F_r}{H} \times \frac{1}{\Delta\phi_0} \quad (41)$$

v : coefficient de poisson,

Θ : rapport de déformation entre le plan horizontal et le plan à 60°,

E_{it} : module d'élasticité à la compression indirecte [MPa],

F_r : la force maximale provoquant la rupture [N],

H : longueur de l'éprouvette [mm],

$\Delta\phi_{60}$: la déformation du diamètre horizontal de l'éprouvette AB, à 30% de la force à la rupture,

$\Delta\phi_{60}$: La déformation du diamètre CD formant un angle de 60° avec le plan horizontal, à $F=0,3F_r$.

Le **Tableau 4- 8** ci-dessous représente les cinq classes mécaniques définies par le GTR [30] et la norme NF P94-102-1 [218].

Tableau 4- 8. Classes attribuées aux sols destinés à une utilisation en couche de forme selon le couple (Rt,E) [218].

Position dans l'abaque	Zone 1	Zone2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
Classe $P_{méc}$	Classe $P_{méc1}$	Classe $P_{méc2}$	Classe $P_{méc3}$	Classe $P_{méc4}$	Classe $P_{méc5}$

Selon les spécifications de la norme NF P94-102-1 [218], un matériau est jugé apte à être utilisé en couche de forme, doit au moins être classé dans la classe de performances mécaniques $P_{méc4}$. Les résultats du module d'élasticité et de la résistance à la traction directe obtenues à 90 jours et convertis à 360 jours sont reportés sur le diagramme de classification (**Figure 4- 25**).

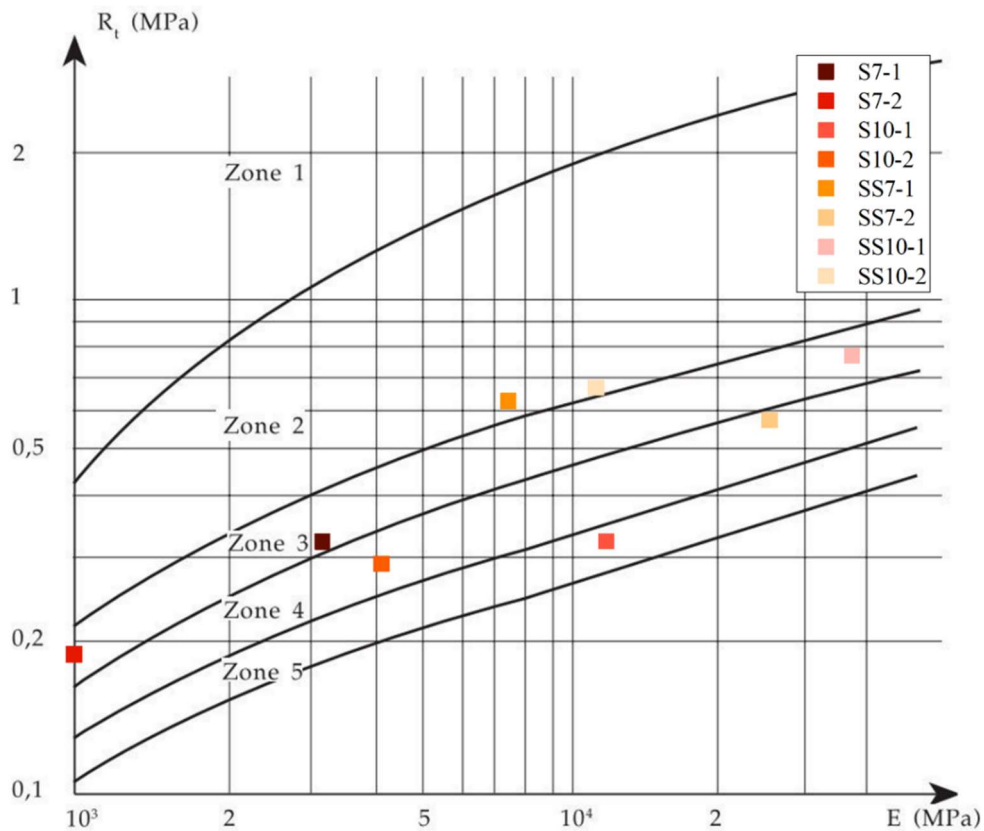


Figure 4- 25. Classification des différentes formulations en fonction des critères à long terme (E,Rt) selon le GTR [31] et de la norme NF P94-102-1 [218].

D'après le diagramme de classification en fonction du couple (Rt, E), il ressort que, toutes les formulations se classent au-delà de la zone 5, hormis la formulation **S10-1** qui se situe en zone cinq.

Les deux formulations **SS10-2** et **SS7-1** font partie de la zone 2 correspondante à la classe mécanique $P_{méc} 2$, suivie par **S7-1**, **S7-2** et **SS10-1** en zone 3 (classe mécanique $P_{méc} 3$), **S10-2** et **SS7-2** en zone 4 (classe mécanique $P_{méc} 4$). L'ensemble des formulations répond favorablement aux exigences définies par la norme NF P94-102-1[218], permettant une utilisation en couche de forme selon la classe mécanique à long terme, déterminée en fonction du couple (Rt, E).

5. Evaluation environnementale

Des essais de lixiviation ont été effectués sur l'ensemble des formulations conformément à la norme NF EN 12457-2 [79]. Les échantillons ont été réalisés sur des échantillons de granulométrie réduite à 4 mm, avec un rapport liquide solide (L/S) égal à 10, comme déjà détaillé dans le Chapitre 2. Les concentrations en anions (chlorure, fluorure, et sulfates) ont été mesurées par chromatographie ionique et les éléments traces métalliques par ICP. Les résultats sont présentés dans le **Tableau 4- 9**, **Tableau 4- 10** et **Tableau 4- 11**.

D'après ces résultats, les concentrations mesurées ne présentent aucun dépassement des seuils limites spécifiés par le guide SETRA [149]. Toutes les formulations sont conformes pour une utilisation en couche de forme, d'un point de vue environnemental.

Tableau 4- 9. Essais de lixiviation sur toutes les formulations à 14 jours.

Eléments	mg/kg de matière sèche								Seuils N1
	S7-1	S7-2	S10-1	S10-2	SS7-1	SS7-2	SS10-1	SS10-2	
As	< 0.1	< 0.15	< 0.1	0.12	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	1,5
Ba	0,86	0,64	1,2	0,77	3,1	3,5	3,1	1,1	60
Cd	< 0.009	< 0.009	< 0.01	< 0.009	< 0.012	< 0.01	< 0.009	0.011	0,12
Cr	0,89	0,68	1	0,78	0,45	0,57	0,52	0,76	1,5
Cu	1,6	1,3	1,3	1,3	0,76	0,85	0,77	0,87	6
Mo	0,27	0,24	0,25	0,25	0,15	0,17	0,14	0,19	1,5
Ni	0,31	0,2	0,33	0,19	0,25	0,24	0,25	0,27	1,2
Pb	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	1,5
Sb	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	0,18
Se	< 0.08	0.084	< 0.08	< 0.08	< 0.08	< 0.08	< 0.08	< 0.08	0,3
Zn	< 0.01	0,01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	12
Fluorures	27	30	26	28	22,0	22	23,0	22,0	30
Chlorures	40	45	60	48	27,0	20	36	28,0	2 400
Sulfates	734	888	391	850	100	403	97	295	3 000

Tableau 4- 10. Essais de lixiviation sur toute les formulation à 28 jours.

mg/kg de matière sèche									
Eléments	S7-1	S7-2	S10-1	S10-2	SS7-1	SS7-2	SS10-1	SS10-2	Seuils N1
As	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	1,5
Ba	0,691	0,69	1,403	1,305	1,982	3,121	4,957	5,03	60
Cd	< 0.009	< 0.009	< 0.009	< 0.009	< 0.009	< 0.009	< 0.009	< 0.009	0,12
Cr	0,669	0,54	1,173	0,684	0,586	0,496	0,329	0,449	1,5
Cu	1,292	1,133	0,838	1,232	0,773	0,741	0,575	0,629	6
Mo	0,238	0,227	0,223	0,247	0,126	0,161	< 0.09	0,154	1,5
Ni	0,277	0,196	0,263	0,246	0,256	0,196	0,222	0,17	1,2
Pb	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	1,5
Sb	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	0,18
Se	< 0.08	< 0.08	< 0.08	< 0.08	< 0.08	< 0.08	< 0.08	< 0.08	0,3
Zn	< 0.01	0,016	0,026	0,014	< 0.01	0,017	0,015	0,012	12
Fluorures	11	13	11	12	7,0	7,0	7,0	9,0	30
Chlorures	65	59	74	66	28,0	27	33	37,0	2 400
Sulfates	760	810	330	870	260	260	670	120	3 000

Tableau 4- 11. Essais de lixiviation sur toute les formulation à 90 jours.

mg/kg de matière sèche									
Eléments	S1	S2	S3	S4	SS1	SS2	SS3	SS4	Seuils N1
As	< 0.1	< 0.14	< 0.1	0.12	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	1,5
Ba	0,87	1,4	1,8	1,4	2,3	6,1	5,0	5,5	60
Cd	< 0.009	< 0.009	< 0.009	0,01	0.009	< 0.009	0.013	< 0.009	0,12
Cr	0,1	0,46	0,86	0,69	0,82	0,76	0,38	0,73	1,5
Cu	1,6	1,4	1,5	1,6	1	0,95	0,68	0,92	6
Mo	0,28	0,25	0,31	0,29	0,21	0,21	0,14	0,2	1,5
Ni	0,4	0,29	0,37	0,36	0,41	0,3	0,25	0,28	1,2
Pb	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	1,5
Sb	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.06	0,18
Se	< 0.08	< 0.08	< 0.08	< 0.08	< 0.08	< 0.08	< 0.08	< 0.08	0,3
Zn	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	12
Fluorures	33,0	33,0	34,0	36,0	25,0	27,0	23,0	24,0	30
Chlorures	57,0	55,0	91,0	60,0	21,0	30	35	29,0	2 400
Sulfates	669	748	212	905	356	453	300	289	3 000

6. Conclusion

Dans le présent chapitre, l'évaluation de l'aptitude d'utilisation des sédiments de barrage de Zardezas en couche de forme a été menée en plusieurs phases conformément aux prescriptions du guide GTS [31]. Tout d'abord, une reconstitution du squelette granulaire des sédiments par l'apport de déchets de marbre a été effectuée. Le mélange 50% sédiments + 50% sable de marbre a été sélectionné reposant sur le fuseau délimité par les courbes de référence de Talbot-Fuller-Thompson. Ensuite, huit mélanges (avec ou sans l'apport du correcteur granulaire) ont été choisis par l'application d'un traitement mixte à base de chaux aérienne et

de liants hydrauliques routiers élaborés dans le **Chapitre 3**. Les pourcentages des liants ont été fixés selon les recommandations du guide GTS [31].

L'effet du traitement a été apprécié à travers la détermination des performances mécaniques à court et à long terme, l'impact environnemental ainsi que des observations de la microstructure.

L'essai de l'aptitude aux traitements aux liants hydrauliques éventuellement associés à la chaux sur l'ensemble des formulations a révélé que seulement, les formulations **SS7-1**, **SS7-2** et **SS10-2** sont aptes aux traitements appliqués. Ceci a été attribué, entre autres, à l'apport bénéfique du sable de marbre, qui a conduit non seulement à l'amélioration des caractéristiques physiques (compacité et porosité) mais également, il a joué le rôle d'un diluant vis-à-vis des réactions chimiques qui peuvent se produire.

La résistance à la compression autorisant la circulation sur la couche traitée a été jugée satisfaisante dès le 14^{ème} jour pour toutes les formulations. La tenue à l'immersion a été également jugée satisfaisante pour l'ensemble des formulations. Quant aux résistances aux gel, il a été montré que toutes les formulations à base de 50% sédiments + 50% de sable de marbre développe une résistance au gel à partir du 14^{ème} jour. Par ailleurs, les images obtenues par microscope électronique à balayage ont montré une structure moins poreuse avec une présence moindre de produits sulfatiques expansives pour les formulations composées de 50% sédiments + 50% de sable de marbre. Les résistances au gel pour les mélanges composés de sédiments seuls traités n'atteignent pas la valeur limite minimale, à l'exception de **S7-1** à partir du 28^{ème} jour, **S10-2** à partir du 56^{ème} jour et **S10-1** à partir du 90^{ème} jour.

En se basant sur les différents résultats obtenus par la campagne d'essais mécaniques réalisés sur l'ensemble des formulations, le diagramme de classification en fonction du couple (R_t , E) ainsi que l'évaluation environnementale, seulement **SS7-1**, **SS7-2** et **SS10-2** se sont révélés intéressantes et aptes pour une utilisation en couche de forme.

Conclusions générales et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Les quantités colossales de sédiments draguées chaque année continuent d'être un véritable enjeu non résolu pour les gestionnaires des infrastructures hydrauliques. L'orientation de ces produits de dragage vers des filières de valorisation, tels que le génie civil est devenu un besoin impérieux. Cependant, ayant une matrice hétérogène avec des paramètres complexes, la conformité technique, l'innocuité environnementale et l'aspect économique de la gestion de ces sédiments doivent être pris en compte.

En parallèle, la surexploitation des ressources naturelles, la pénurie des matériaux de construction et la demande croissante de ces matériaux, d'une part et l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre et leur impact néfaste sur le changement climatique, d'autre part, nécessitent une profonde réflexion.

À l'égard de ce défi scientifique et industriel, l'objectif de ce travail de recherche était de mettre en lumière les travaux déjà réalisés sur la valorisation des différents sédiments de dragage dans diverses filières du génie civil ainsi que de proposer de nouvelles perspectives intéressantes pour les travaux routiers. Ce travail de thèse s'est articulé autour de deux principaux objectifs :

❖ Premier objectif :

L'élaboration de liants hydrauliques routiers à base sédiments de dragage calcinés et des sous-produits industriels locaux par l'application de la méthode des plans de mélange à l'aide d'un outil destiné à la conception des plans de mélange, le traitement et l'analyse des résultats.

❖ Deuxième objectif

L'amélioration des caractéristiques physiques, géotechniques et des performances mécaniques, en vue d'une utilisation en techniques routières, par :

- La reconstitution et l'optimisation du squelette granulaire des sédiments de Zardezas par l'apport du sable de marbre provenant de la carrière de Fil-Fila située dans la wilaya de Skikda, selon la méthode T-F-T.
- L'application d'un traitement mixte à base de chaux aérienne associé aux liants hydrauliques routiers développés dans la première étape.

Dans un premier lieu, l'identification des sédiments de dragage issus du barrage de Zardezas était nécessaire afin de vérifier leur qualité technique selon le guide GTR [30] et environnementale pour une utilisation en couche de forme. La caractérisation physique des sédiments a révélé un pourcentage très élevé de fraction fine (passants à $80\mu\text{m} \geq 90\%$) et une faible teneur en matières organiques ($3 \leq 3,67 \leq 10$). Ce qui a permis d'expliquer leur grande plasticité ($I_p = 29,9$). Ces paramètres ont permis d'établir une classification aux sédiments selon le guide de réalisation de remblai et de couche de forme [30]. La classe **A3 F11** a été attribuée aux sédiments étudiés.

L'indice portant immédiat obtenu sur les sédiments bruts a montré une faible valeur qui ne permet pas leur utilisation en couche de forme à l'état brut. Par ailleurs, l'acceptabilité environnementale a été approuvée par des tests de lixiviation.

Dans un second temps, un traitement thermique par calcination et broyage effectués sur les sédiments bruts ont été optimisés afin de les activer et faire ressortir leur caractère pouzzolanique. La durée et la température de calcination ont été fixées à 1 heure et 800°C , respectivement.

Dans le but de déterminer des pourcentages de substitution optimaux, la conception de plan de mélange a été menée au moyen du logiciel Design-expert. Ceci a conduit à sélectionner deux mélanges : **80C10LHF10SC** et **50C35LHF15SC**. Le choix de ces deux formulations a été fait en fonction des performances mécaniques obtenues par la méthode des surfaces de réponses et confirmé par l'expérimentation.

Les deux formulations ont présenté des temps de prise supérieurs aux valeurs limites spécifiées par la norme NF 13282-2 [125], 150 min. De même, les LHR ont une finesse et une teneur en SO_3 compatibles aux exigences requises par le cahier des charges. Par ailleurs, bien que l'ajout des additions minérales agit sur la stabilité et augmente l'expansion, cette dernière reste très faible par rapport à la valeur limite préconisée (30 mm) par la norme NF 13282-2 [125]. En outre, il a été remarqué que les deux liants présentent des résistances à la compression supérieures à 32,5 MPa après 28 jours. À 90 jours, les résistances à la compression simple obtenues avec le liant 50C35LHF15SC sont supérieures à celles du mortier témoin et les résistances obtenues avec le liant 80C10LHF10SC sont proches de celles du mortier de référence. Par conséquent, les deux LHR présentent des résistances à la compression simple qui permettent de les qualifier dans la classe de résistance mécanique N4. D'après ces résultats, nos deux liants ont été référencés comme suit :

- **HRB N 4-C 80, LHF 10, SC 10** pour le liant 00C10LHF10SC,
- **HRB N 4-C 50, LHF 35, SC 15** pour le liant 50C35LHF15SC.

Du point de vue environnemental, les deux liants présentent un caractère inerte et sont donc aptes pour une utilisation en technique routière. Aussi, L'analyse de la microstructure (PIM, ATG) et l'imagerie MEB ont confirmé l'action du potentiel pouzzolanique des deux liants hydrauliques routiers.

Dans un deuxième temps et au regard des résultats obtenus dans la partie de caractérisation, un traitement mixte composé de chaux aérienne et de liants hydrauliques routiers développés dans le troisième chapitre s'est avéré nécessaire. L'optimisation du squelette granulaire à partir de plusieurs mélanges composés de sédiments bruts et du sable de déchets de marbre a été d'abord menée en se basant sur la méthode semi-empirique de Talbot-Fuller-Thompson. Le mélange optimal constitué de 50%sed + 50%SM est ensuite traité par l'ajout d'un liant mixte (chaux et LHR) afin d'améliorer les caractéristiques géotechniques et mécaniques du mélange. Huit formulations ont été sélectionnées et les performances mécaniques à court et à long terme ont été déterminées en suivant les spécifications du guide GTS [31].

L'essai de l'aptitude au traitement conduit sur l'ensemble des formulations a révélé que le gonflement apparu au niveau des formulations est plus important pour les formulations à base des sédiments seules traités. Ceci a été attribué d'une part à la présence de la pyrite au sein des sédiments qui peut apporter des perturbations au niveau du traitement. Aussi à la teneur en sulfate plus élevé dans le ciment par rapport aux LHF et SC.

Concernant les performances mécaniques à court et à long terme, il a été observé que l'apport du sable de marbre a été bénéfique à l'obtention de meilleures résistances. Ceci a été attribué à l'effet de dilution mais aussi à la diminution des vides/porosité des mélanges.

Seules trois formulations **SS7-1**, **SS7-2** et **SS10-2** ont satisfait les critères requis par le guide de traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme, GTS [31]. L'innocuité environnementale de ces trois formulations a été vérifiée, selon les préconisations du guide SETRA [149]. Les trois formulations **SS7-1**, **SS7-2** et **SS10-2** présentent un potentiel de valorisation encourageant et sont donc susceptibles à être utiliser en couche de forme.

Comme perspectives à ce travail, il peut être envisageable les points suivants :

Afin de valider ce travail de recherche et afin de mieux cerner le comportement complexe des sédiments traités, il serait intéressant d'effectuer une étude plus approfondie par la réalisation des essais de durabilité qui tiennent en compte les différentes classes d'exposition.

Il serait également pertinent de réaliser un bilan environnemental plus large en intégrant une analyse de cycle de vie (ACV) qui couvre toutes les étapes, du dragage jusqu'au moment de l'exploitation et la gestion en fin de vie de l'ouvrage à base de sédiments de dragage.

Passage à l'échelle plus importante (échelle 1) industriel pour les liants hydrauliques routiers. Réalisation d'une planche expérimentale avant de passer à l'échelle réelle pour l'application en couche de forme.

Références

Références

1. Toumi A; Remini B ZARDEZAS (ALGERIA): a dam that is silting up? LARHYSS J. P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782 **2020**, 43, 181–196.
2. Scrivener, K.L.; John, V.M.; Gartner, E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cem. Concr. Res.* **2018**, 114, 2–26, doi:10.1016/j.cemconres.2018.03.015.
3. Laoufi, L.; Senhadji, Y.; Benazzouk, A. Valorization of mud from Fergoug dam in manufacturing mortars. *Case Stud. Constr. Mater.* **2016**, 5, 26–38, doi:10.1016/j.cscm.2016.06.002.
4. Benzerzour, M.; Maherzi, W.; Amar, M.A.A.; Abriak, N.E.; Damidot, D. Formulation of mortars based on thermally treated sediments. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* **2018**, 20, 592–603, doi:10.1007/s10163-017-0626-0.
5. Segui, P.; Aubert, J.E.; Husson, B.; Measson, M. Utilization of a natural pozzolan as the main component of hydraulic road binder. *Constr. Build. Mater.* **2013**, 40, 217–223, doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.09.085.
6. Yu, J.; Wu, H.L.; Mishra, D.K.; Li, G.; Leung, C.K. Compressive strength and environmental impact of sustainable blended cement with high-dosage Limestone and Calcined Clay (LC2). *J. Clean. Prod.* **2021**, 278, 123616, doi:10.1016/j.jclepro.2020.123616.
7. Hameed, R.; Seo, J.; Park, S.; Amr, I.T.; Lee, H.K. Co₂ uptake and physicochemical properties of carbonation-cured ternary blend portland cement–metakaolin–limestone pastes. *Materials (Basel)*. **2020**, 13, 4656, doi:10.3390/ma13204656.
8. Juenger, M.C.; Snellings, R.; Bernal, S.A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cem. Concr. Res.* **2019**, 122, 257–273.
9. IEA-CSI Technology Roadmap for Cement - Low-Carbon Transition in the Cement Industry.; 2018;
10. Pade, C.; Guimaraes, M. The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective. *Cem. Concr. Res.* **2007**, 37, 1348–1356, doi:10.1016/j.cemconres.2007.06.009.
11. Rivera, R.A.; Sanjuán, M.Á.; Martín, D.A. Granulated blast-furnace slag and coal fly ash ternary portland cements optimization. *Sustain.* **2020**, 12, 5783, doi:10.3390/su12145783.

12. Li, J.; Tharakan, P.; Macdonald, D.; Liang, X. Technological, economic and financial prospects of carbon dioxide capture in the cement industry. *Energy Policy* **2013**, *61*, 1377–1387, doi:10.1016/j.enpol.2013.05.082.
13. Shanks, W.; Dunant, C.F.; Drewniok, M.P.; Lupton, R.C.; Serrenho, A.; Allwood, J.M. How much cement can we do without? Lessons from cement material flows in the UK. *Resour. Conserv. Recycl.* **2019**, *141*, 441–454, doi:10.1016/j.resconrec.2018.11.002.
14. Dixit, A.; Du, H.; Pang, S.D. Carbon capture in ultra-high performance concrete using pressurized CO₂ curing. *Constr. Build. Mater.* **2021**, *288*, 123076, doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123076.
15. Scrivener, K.; Martirena, F.; Bishnoi, S.; Maity, S. Calcined clay limestone cements (LC3). *Cem. Concr. Res.* **2018**, *114*, 49–56.
16. Menéndez, G.; Bonavetti, V.; Irassar, E.F. Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag. **2003**, *25*, 61–67.
17. Bágel, L. Strength and pore structure of ternary blended cement mortars containing blast furnace slag and silica fume. *Cem. Concr. Res.* **1998**, *28*, no 7., 1011-1022.
18. Priya, D.S.; Sakthieswaran, N.; Babu, O.G. Experimental study on mortar as partial replacement using sawdust powder and GGBS. *Mater. Today Proceedings.* **2021**, *37*, 1051-1055., doi:10.1016/j.matpr.2020.06.292.
19. Hadj Sadok, R.; Maherzi, W.; Benzerzour, M.; Lord, R.; Torrance, K.; Zambon, A.; Abriak, N. Mechanical Properties and Microstructure of Low Carbon Binders Manufactured from Calcined Canal Sediments and Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS). *Sustainability.* **2021**, *13*, 9057.
20. Benzerzour, M.; Amar, M.; Abriak, N.E. New experimental approach of the reuse of dredged sediments in a cement matrix by physical and heat treatment. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *140*, 432–444, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.142.
21. BANOUNE, B. Comportement mécanique et durabilité des matériaux routiers à différents dosages en sédiments fins, thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne, **2016**.
22. BOURABAH, A.M. Comportement mécanique des sols fins Application à la valorisation des sédiments de barrages en technique routière., thèse de doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen, **2012**.

23. SEKLAOUI-OUKID, O. Valorisation des sediments du barrage d ' el merdja sidi abed : etude technico-economique, thèse de doctorat, Mouloud mammeri de Tizi-Ouzou, **2016**.
24. BENAÏSSA, A. Valorisation de la vase pour l'utilisation dans la technique routière, thèse de doctorat, Université El Djillali Sidi Bel Abbes, **2016**.
25. Maherzi, W. Valorisation des Sédiments de dragage Marins bruts et/ou traités aux liants hydrauliques pour une application en technique routière, thèse de doctorat, ESITC Caen, **2013**.
26. Kasmi, A. Prétraitement et traitement des sédiments fluviaux en vue d ' une valorisation en technique routière, thèse de doctorat, Université de Lille 1, **2014**.
27. REKIK, B. Proprietes geotechniques des sediments de dragage traites au ciment, thèse de doctorat, Université de Lille 1, **2007**.
28. MOGHRABI, I. Modélisation du comportement mécanique des sédiments traités et étude d'une nouvelle voie de leur valorisation par des géopolymères, thèse de doctorat, Université de Nantes, **2018**.
29. Stevulova, N.; Strigáč, J.; Junak, J.; Terpakova, E.; Holub, M. Incorporation of cement bypass dust in hydraulic road binder. *Materials (Basel)*. **2020**, 14, 41, doi:10.3390/ma14010041.
30. LCPC-SETRA Réalisation des remblais et des couches de forme, Fascicule I 2000, 102.
31. LCPC-SETRA Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme. *Bull. des Lab. des Ponts Chaussees* **2000**, 240.
32. Anger, B. Caractérisation de sédiments fins de retenues hydroélectriques en vue d ' une orientation vers des filières de valorisation matière, thèse de doctorat, Université de Caen, **2014**.
33. Schneider, G. Le curage des sédiments des cours d'eau. *Curr. l'environnement l'INRA* **2001**, 146–147.
34. Neto, M. Scénarios de gestion de boues de dragage de cours d'eau : Rôle des bactéries dans la mobilité des polluants métalliques, thèse do doctorat, Université de Lyon, **2007**.
35. Samara, M. Valorisation des sédiments fluviaux pollués après inertage dans la brique cuite, thèse de doctorat, Université de Lille, **2007**.
36. Tran, N.T. Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière, Université d'Artois, 2009.

37. Mamindy-Pajany, Y. Contribution à la gestion environnementale des sédiments marins non-immérgeables provenant de sites portuaires : Approche couplée (Géo)-chimie-Ecotoxicologie-Génie civil; mémoire HDR, **2018**;
38. Dubois, V. Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins – Valorisation en technique routière, thèse de doctorat, Université d'ARTOIS, 2006.
39. Marot, F. Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques, thèse de doctorat, Université du Havre Normandie, **1997**.
40. Cauzzi, N. Evaluation de l' éco-compatibilité de sédiments contaminés , traités ou non par un procédé physico-chimique , dans le cadre d' un scénario de dépôt en gravière Etude en microcosmes aquatiques, thèse de doctorat, Université de de Lyon, **2007**.
41. SERBAH, B. Cartographie des sédiments de dragage des barrages de l' ouest Algérien : Une solution de valorisation en BTC, Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid, 2018.
42. SAFHI, A. el M. Valorisation des sédiments de dragage dans des bétons autoplaçants : optimisation de la formulation et étude de la durabilité, thèse de doctorat, Université de Lille et de Sherbrooke, **2020**.
43. Gosselin, A.; Blackburn, D.; Bergeron, M. Protocole d'évaluation de la traitabilité des sédiments, des sols et des boues à l'aide des technologies minéralurgiques; **1999**;
44. Wang, D. Solidification et valorisation des sédiments du port de Dunkerque en travaux routiers, thèse de doctorat, Université de Lille 1, **2011**.
45. AMAR, M.A.A. Traitement des s'édiments de dragage pour une valorisation dans les matrices cimentaires, thèse de doctorat, Universit' e de Lille 1, **2017**.
46. NF EN 15169 Caractérisation des déchets - Détermination de la perte au feu des déchets, des boues et des sédiments **2007**.
47. Hamouche, F. Influences des matières organiques sur les propriétés physiques et le comportement mécanique des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans les travaux publics, thèse de doctorat, Université de Lille, 2018.
48. Mustin, M. Le compost: gestion de la matière organique; **1987**;
49. COLIN, D. Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière, thèse de doctorat, Université de Caen Normandie, **2003**.

50. Silitonga, E. Valorisation des sédiments marins contaminés par solidification / stabilisation à base de liants hydrauliques et de fumée de silice, thèse de doctorat, Université de Caen Normandie, **2010**.
51. Zeraoui, A. Approche opérationnelle pour une gestion durable des sédiments de dragage dans des filières de génie civil : mise en place d'un outil d'aide à la décision, thèse de doctorat, Université de Lille 1, **2021**.
52. Maherzi, W.; Abdelghani, F. Ben Dredged Marine Raw Sediments Geotechnical Characterization for their Reuse in Road Construction. *Eng. J.* **2014**, 18, 27–37, doi:10.4186/ej.2014.18.4.27.
53. Zentar, R.; Abriak, N.E.; Dubois, V. Effects of salts and organic matter on Atterberg limits of dredged marine sediments. *Appl. Clay Sci.* **2009**, 42, 391–397, doi:10.1016/j.clay.2008.04.003.
54. Liang, Y. Co-valorisation de sédiments et de sols fins par apport de liants et de fibres, thèse de doctorat, Université de Caen Normandie, **2012**.
55. LEE, H. A clam's eye view of the bioavailability of sediment-associated contaminants., Organic substances and sediment in water, Biological, Baker R. *Nuevos Sist. Comun. e Inf.* **1990**.
56. McDonald, W.P. Influence of organic matter on the geotechnical properties and consolidation characteristics of Northern Oregon continental slope sediments, Ph.D thesis, Oregon State University, **1982**.
57. Remini, B.; Leduc, C.; Hallouche, W. Évolution Des Grands Barrages En Régions Arides : Quelques Exemples Algériens. *Sécheresse* **2009**, 20, 096–105, doi:10.1684/sec.2009.0172.
58. Remini, B.; Hallouche, W. La sédimentation dans les barrages algériens. **2004**, 90, 60–64, doi:10.1051/lhb.
59. Bougamouza, A.; Remini, B.; Sakhraoui, F. Analytical Study of Sediment Evolution in the Lake of the Fom El Gherza Dam (Biskra , Algeria). *LARHYSS J.* P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782 **2020**, 169–179.
60. Demmak, A. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale, thèse de doctorat, Université de pierre et Marie Curie, Paris, **1982**.

61. Global Environment Facility (GEF) . Rapport «Évaluation du portefeuille du Pays: Maroc 1997-2015»; **2016**; Vol. 1;.
62. Mammou, A. Ben; Louati, M.H. Évolution temporelle de l'envasement des retenues de barrages de Tunisie. Rev. des Sci. l'eau **2007**, 20, 201–210, doi:10.7202/015813ar.
63. Hallouche, W. Prév́ision du transport solide et sé́dimentation des barrages, thèse de doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra, **2007**.
64. REMINI, B. The raising of the dams : a technique of fight against the sedimentation. Algerian examples. Houille blanche (Grenoble) **2008**, 94, 103–108, doi:DOI 10.1051/lhb:2008063.
65. Beddaa, H. Effet de l' incorporation des sédiments fluviaux sur les propriétés physico-chimiques , mécaniques et de durabilité des bétons, thèse de doctorat, Université de Paris-Est, **2021**.
66. Scordia, P. Caractérisation et valorisation de sédiments uviaux polluées et traitées dans les matériaux routiers, thèse de doctorat, Université de Lille 1, **2008**.
67. Lemay, M. Etude de l' impact de différents scénarios de gestion à terre des sédiments fluviaux sur le comportement à la lixiviation des éléments traces métalliques et métalloïdes, thèse de doctorat, Université de Lille 1, 2020.
68. La Convention OSPAR Available online: <https://www.milieumarinfrance.fr/Nos-rubriques/Cadre-reglementaire/Conventions-des-mers-regionales/Convention-OSPAR>.
69. AGOSTINI, F. Inertage et valorisation des sédiments de dragage marin, thèse de doctorat, Université de Lille 1, 2006.
70. Lecompte, T. Évaluation environnementale des sédiments de dragage et de curage dans la perspective de leur valorisation dans le domaine du génie civil, Université de Lille 1, 2018.
71. GEODE; MEDDE Suivis environnementaux des opérations de dragage et d' immersion. **2012**.
72. European Union EU Legislation Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=LEGISSUM%3A128059>.
73. Fedlex Fédéral, La plateforme de publication du droit Available online: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2004/347/fr>.
74. Ministère de l'écologie et du développement durable Arrêté du 9 août 2006 relatif aux

niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux relevant respectivement des rubriques 2.2.3.0, 4.1.3.0 et 3.2.1.0 d. **2020**, 0–4.

75. Maarouf, H. Valorisation des sédiments issus du dragage du barrage de Bouhanifia et du port d'Oran, thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, **2018**.

76. Pandard, P. Evaluation de l'écotoxicité des déchets - Synthèse des résultats obtenus - Propositions de seuils de classement -Optimisation de la batterie de bioessais, rapport intermédiaire, INERIS; **2000**;

77. Pandard, P.; Devillers, J.; Charissou, A.-M.; Poulsen, V.; Jourdain, M.-J.; Féraud, J.-F.; Grand, C.; Bispo, A. Selecting a battery of bioassays for ecotoxicological characterization of wastes. *Sci. Total Env.* **2006**, 363, 114–125, doi:doi:10.1016/j.scitotenv.2005.12.016.

78. Mouvet, C. Protocole pour l'évaluation de l'écotoxicologie de sédiments destinés à une gestion à terre. Rapport final. **2012**.

79. NF EN 12457-2 Caractérisation des déchets - Lixiviation - Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues - Partie 2 : essai en bâchée unique avec un rapport liquide-solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 4 mm (sans ou avec réduction) **2002**.

80. Geretto, P. Caractérisations et analyses réglementaires sur les sédiments de dragage, **2020**, Available online: <http://doc.lerm.fr/caracterisations-et-analyses-reglementaires-sur-les-sediments-de-dragage/>.

81. Illiesse, D. Etude du potentiel local en granulats pour une utilisation optimale, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, **2012**.

82. Bellara, S.; Hidjeb, M.; Maherzi, W.; Mezazigh, S.; Ahmed, S. Optimization of an Eco-Friendly Hydraulic Road Binders Comprising Clayey Dam Sediments and Ground Granulated. *buildings* **2021**, 11, 443, doi:<https://doi.org/10.3390/buildings11100443>.

83. Bouchikhi, A.; Maherzi, W.; Benzerzour, M.; Mamindy-Pajany, Y.; Peys, A.; Abriak, N.E. Manufacturing of low-carbon binders using waste glass and dredged sediments: Formulation and performance assessment at laboratory scale. *Sustain.* **2021**, 13, 4960, doi:10.3390/su13094960.

84. MAHERZI, W.; SEBAIBI, N.; BENZERZOUR, M.; NGUYEN, D.H.; ABRIAK, N.-E.; BOUTOUIL, M. Valorisation des sédiments en travaux publics maritimes: Réalisation de

la phase II de Sédimentaires TP maritimes. XVèmes Journées, La Rochelle **2018**, 675–682, doi:10.5150/jngcgc.2018.078.

85. El Mahdi Safhi, A.; Benzerzour, M.; Rivard, P.; Abriak, N.E. Feasibility of using marine sediments in SCC pastes as supplementary cementitious materials. *Powder Technol.* **2019**, 344, 730–740, doi:10.1016/j.powtec.2018.12.060.

86. Larouci, A.; Senhadji, Y.; Laoufi, L.; Benazzouk, A. Dredged dam raw sediments geotechnical characterization for beneficial use in road construction. *Int. J. Eng. Res. Africa* **2021**, 57, 81–98, doi:10.4028/www.scientific.net/JERA.57.81.

87. Remini, B. Valorisation de la vase des barrages quelques exemples algériens. *Larhyss J.* **2006**, 5, 75–89.

88. Remini, B, Kenai, S. L'utilisation de la vase du barrage d'oued lekhel pour la fabrication de la brique. *Revue marocaine Génie Civil* N° 90, **2000**.

89. Labiod, Z.; Remini, B.; Belaredj, M. Traitement de la vase du barrage de bouhanifia en vue de sa valorisation. *LARHYSS J.* P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782 **2004**.

90. CemWeek Algeria Cement Market & Forecast Report - 2020 edition. *CW Res.* **2020**.

91. Redjeb, Y.; Kaabeche-Djerafi, K. Thermodynamic Optimization of an Air bottoming Cycle for Waste Heat Recovery from Preheater Tower in a Cement Industry. *Alger. J. Renew. Energy Sustain. Dev.* **2021**, 03, 97–103, doi:10.46657/ajresd.2021.3.1.10.

92. Van Bunderen, C.; Benboudjema, F.; Snellings, R.; Vandewalle, L.; Cizer, Ö. Experimental analysis and modelling of mechanical properties and shrinkage of concrete recycling flash calcined dredging sediments. *Cem. Concr. Compos.* **2021**, 115, 103787, doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103787.

93. Snellings, R.; Cizer, Ö.; Horekmans, L.; Durdziński, P.T.; Dierckx, P.; Nielsen, P.; Van Balen, K.; Vandewalle, L. Properties and pozzolanic reactivity of flash calcined dredging sediments. *Appl. Clay Sci.* **2016**, 129, 35–39, doi:10.1016/j.clay.2016.04.019.

94. Van Bunderen, C.; Snellings, R.; Vandewalle, L.; Cizer, Ö. Early-age hydration and autogenous deformation of cement paste containing flash calcined dredging sediments. *Constr. Build. Mater.* **2019**, 200, 104–115, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.090.

95. Fernandez, R.; Scrivener, K. Des argiles calcinées comme substitut au ciment. *Bull. Tech. la Suisse Rom.* **2011**, 137, 11–14.

96. Safhi, A. el M.; Rivard, P.; Yahia, A.; Benzerzour, M.; Khayat, K.H. Valorization of dredged sediments in self-consolidating concrete: Fresh, hardened, and microstructural properties. *J. Clean. Prod.* **2020**, *263*, 121472, doi:10.1016/j.jclepro.2020.121472.
97. Safhi, A. el M.; Rivard, P.; Yahia, A.; Benzerzour, M.; Khayat, K.H. Valorization of dredged sediments in self-consolidating concrete: Fresh, hardened, and microstructural properties; **2020**; Vol. 263; ISBN 0959652620.
98. Benasla, M.; Hadjel, M.; Ouhba, L.B.K. Caractérisation de sédiments du barrage de l'Oued Fodda et leur valorisation comme un ajout artificiel dans le ciment. *Matériaux Tech.* **2016**, *104*, 304, doi:10.1051/mattech/2016025.
99. Cherif, B.A.; Ali, F.; Tarek, M.; Massouh, F. Mechanical behavior of the extraction mud dam for use in the manufacture of CEB. *Civ. Eng. J.* **2021**, *7*, 1774–1786, doi:10.28991/cej-2021-03091759.
100. Hussain, M.; Levacher, D.; Leblanc, N.; Zmamou, H.; Djeran-Maigre, I.; Razakamanantsoa, A.; Saouti, L. Reuse of harbour and river dredged sediments in adobe bricks. *Clean. Mater.* **2022**, *3*, 100046, doi:10.1016/j.clema.2022.100046.
101. BEN ALLAL, L.; AMMARI, M.; AZMANI, A.; LAMRANI, S.; FRAR, I. Valorisation des sédiments de dragage portuaire du nord du Maroc dans des matériaux de construction en terre cuite. *Conférence Méditerranéenne Côtière Marit. Ed. 2, TANGER, MAROC* **2011**, 133–136, doi:10.5150/cmcm.2011.028.
102. Benyerou, D.; Boudjenane, N.; Belhadri, M. Influence chimique et minéralogique des sédiments de dragage portuaire dans le cadre de leur valorisation dans la fabrication des briques. *Déchets, Sci. Tech.* **2019**, *81*, 3–16, doi:10.4267/dechets-sciences-techniques.4137.
103. Slimanou, H.; Eliche-quesada, D.; Kherbache, S.; Bouzidi, N.; Tahakourt, A.K. Harbor Dredged Sediment as raw material in fired clay brick production: Characterization and properties. *J. Build. Eng.* **2020**, *28*, 101085, doi:10.1016/j.job.2019.101085.
104. Benyerou, D. Caractérisation et valorisation des sédiments marins dans la fabrication des briques, thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Oran (USTOMB), **2017**.
105. Serbah, B.; Abou-bekr, N.; Bouchemella, S.; Eid, J.; Taibi, S. Dredged sediments valorisation in compressed earth blocks : Suction and water content effect on their mechanical properties. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *158*, 503–515, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.10.043.

106. XP P 13-901 Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons; **2001**;
107. Brakni, S.; Abriak, N.E.; Hequette, A. Formulation of artificial aggregates from dredged harbour sediments for coastline stabilization. *Environ. Technol.* **2009**, 30, 849–854, doi:doi:10.1080/09593330902990154.
108. Ennahal, I. Valorisation des sédiments de dragage dans des matrices polymères, thèse de doctorat, Université de Lille 1, **2020**.
109. Said, I.; Missaoui, A.; Lafhaj, Z. Reuse of Tunisian marine sediments in paving blocks : factory scale experiment. *J. Clean. Prod.* **2015**, 102, 66–77, doi:10.1016/j.jclepro.2015.04.138.
110. Kazi Aoual-Benslafa, F.; Kerdal, D.; Mekerta, B.; Semcha, A. The Use of Dredged Sediments as Sand in the Mortars for Tunnel Lining and for Environmental Protection. *Arab. J. Sci. Eng.* **2014**, 39, 2483–2493, doi:10.1007/s13369-013-0805-9.
111. Ennahal, I.; Maherzi, W.; Benzerzour, M.; Mamindy, Y.; Abriak, N.E. Performance of Lightweight Aggregates Comprised of Sediments and Thermoplastic Waste. *Waste and Biomass Valorization* **2021**, 12, 515–530, doi:10.1007/s12649-020-00970-1.
112. Achour, R.; Zentara, R.; Abriaka, N.-E.; Patrice, R.; Pascal, G. Durability study of concrete incorporating dredged sediments. *Case Stud. Constr. Mater.* **2019**, 11, e00244.
113. Ministère de l'Énergie et des Mines Ensemble, préparons l'énergie de demain. **2010**.
114. UNICEM L'industrie Française des granulats-édition 2021. **2021**.
115. Madani, A. L'acceptabilité sociale des projets miniers en Algérie: Cas de Ain Defla et Bejaia. *Eur. Sci. J.* **2015**, 11.
116. Mengue, E.; Mroueh, H.; Lancelot, L.; Medjo, R.; Mengue, E.; Mroueh, H.; Lancelot, L.; Medjo, R.; Dimensionnement, E. Dimensionnement d'une assise de chaussée à base d'un sol latéritique traité au ciment à différents dosages. 33èmes Rencontres l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, 27 au 29 mai **2015**, 9.
117. NF P 11-300 Exécution des terrassements -Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. **1992**.
118. Maherzi, W.; Saussaye, L.; Boutouil, M. Aptitude au traitement et comportement mécanique des sédiments de dragage. XIIèmes Journées Natl. Génie Côtier – Génie Civ. Cherbourg, 12-14 juin **2012**, 1059–1069, doi:10.5150/jngcgc.2012.116-M.
119. SCHAEFFNER, M.; PHILIPPE, A. Abaissement de la teneur en eau d'un sol par

addition de chaux vive. Bull. liaison des Lab. des Ponts Chaussées, 49, novembre-décembre **1970**.

120. Cazalet, M.L. Caractérisation physico-chimique d ' un sédiment marin traité aux liants hydrauliques – Évaluation de la mobilité potentielle des polluants inorganiques., thèse de doctorat, Université de LYON - INSA, **2012**.

121. MIRAOUÏ, M. Mise en œuvre d ' une démarche de prétraitement et de traitement des sédiments de dragage en vue d ' une valorisation dans le génie civil, thèse de doctorat, Université de Lille 1, **2010**.

122. Baroghel-Bouny, V. Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances., Marne-la-vallée, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées., **1994**.

123. Centre de Recherche Routières CRR Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques; p. 22;.

124. ABDO, J. liants-hydrauliques-routiers. Tech. l'ingénieur **2009**.

125. NF EN 13282-2 Liants hydrauliques routiers — Partie 2 : Liants hydrauliques routiers à durcissement normal — Composition, spécifications et critères de conformité; **2015**;

126. NF EN 13282-1 Liants hydrauliques routiers — Partie 1 : Liants hydrauliques routiers à durcissement rapide — Composition, spécifications et critères de conformité; **2014**;

127. Belhaj, E. Valorisation des laitiers d ' aciérie de conversion dans les liants hydrauliques routiers, thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy 1, **2010**.

128. NF EN 197-1 Ciment -Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants; **2012**;

129. NF EN 196-1 Méthodes d'essais des ciments — Partie 1 : Détermination des résistances; **2016**;

130. BOUTOUÏL, M.; SAUSSAYE, L. Influence de l'ajout d'un correcteur granulométrique sur les propriétés des sédiments traités aux liants hydrauliques. Rev. Paralia **2011**, 15, 229–238, doi:10.5150/revue-paralia.2011.008.

131. Achour, R. Valorisation et caractérisation de la durabilité d ' un matériau routier et d ' un béton à base de sédiments de dragage, thèse de doctorat, Université de Lille et l'université de université de SHERBOOKE, **2013**.

132. Rossi, P.; Gavois, L.; Raoul, G. Laitiers de haut-fourneau - Origine, production et caractéristiques. *Tech. l'ingénieur* **2014**, 33.
133. REDIS Nord Pas De Calais Améliorer la valorisation des déchets industriels en BTP;
134. Jacquemot, F. Accélération du durcissement des liants à base de laitier de haut fourneau pour les produits en béton., thèse de doctorat, Université de Lille 1, **2014**, 104.
135. Piantone, P. Contribution du BRGM au projet OFRIR - Rapport final; **2005**;
136. Le Cornec, D. Étude de la structure des laitiers vitrifiés de hauts-fourneaux et de leur réactivité à l'eau en milieu basique., thèse de doctorat, Université de Sorbonne, **2019**.
137. Bougara, A.; Lynsdale, C.; Milestone, N.B. The influence of slag properties, mix parameters and curing temperature on hydration and strength development of slag/cement blends. *Constr. Build. Mater.* **2018**, 187, 339–347, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.166.
138. Hadj sadok, A. Effect of the microstructure of mortars with low hydraulicity slag on their behavior in aggressive environments. *MATEC Web Conf.* **2018**, 149, 01025, doi:10.1051/mateconf/201814901025.
139. Hadj-Sadok, A.; Kenai, S.; Courard, L.; Darimont, A. Microstructure and durability of mortars modified with medium active blast furnace slag. *Constr. Build. Mater.* **2011**, 25, 1018–1025, doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.077.
140. Adu-Amankwah, S.; Black, L.; Skocek, J.; Ben Haha, M.; Zajac, M. Effect of sulfate additions on hydration and performance of ternary slag-limestone composite cements. *Constr. Build. Mater.* **2018**, 164, 451–462, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.165.
141. Monshi, A.; Asgarani, M.K. Producing portland cement from iron and steel slags and limestone. *Cem. Concr. Res.* **1999**, 29, 1373–1377, doi:10.1016/S0008-8846(99)00028-9.
142. Durdziński, P.T. Hydration of multi-component cements containing clinker, slag, calcareous fly ash and limestone, thèse de doctorat, EPF Lausanne, Switzerland, **2016**.
143. Behim, M.; Cyr, M.; Clastres, P. Physical and chemical effects of el hadjar slag used as an additive in cement-based materials. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* **2011**, 15, 1413–1432, doi:10.1080/19648189.2011.9723352.
144. Papatzani, S. A review on the valorization of marble dust/solids or slurry: Classification, current trends and potentials. *Indian Concr. J.* **2019**, 93, 36–54.
145. El-Sayed, H.A.; Farag, A.B.; Kandeel, A.M.; Younes, A.A.; Yousef, M.M.

Characteristics of the marble processing powder waste at Shaq El-Thoaban industrial area, Egypt, and its suitability for cement manufacture. *HBRC J.* **2018**, 14, 171–179, doi:10.1016/j.hbrcj.2016.06.002.

146. Vardhan, K.; Goyal, S.; Siddique, R.; Singh, M. Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement. *Constr. Build. Mater.* **2015**, 96, 615–621, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.071.

147. Monica, M.; Dhoka, C. Green concrete: Using industrial waste of marble powder, quarry dust and paper pulp. *Int. J. Eng. Sci. Invent.* **2013**, 2, 67–70.

148. Belachia, M.; Hebhouh, H. Valorization of marble waste in the manufacture of concrete. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2018**, 431, 032005, doi:10.1088/1757-899X/431/3/032005.

149. SETRA Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière - Evaluation environnementale; **2011**;

150. MKAHAL, Z. Co-valorisation des matériaux alternatifs en technique routière : faisabilité technique et environnementale des usages en remblais et liants hydrauliques routiers, thèse de doctorat, Université de Lille, **2021**.

151. Trielli, E. Acceptabilité environnementale en technique routière - Journée CoTiTa 19 mai; Aix-en-Provence, **2015**;

152. NF P94-050 Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage 1995.

153. XP P94-041 Sols : reconnaissance et essais - Identification granulométrique - Méthode de tamisage par voie humide 1995.

154. NF P94- 057 Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation 1992.

155. NF ISO 13320-1 Analyse granulométrique - Méthodes par diffraction laser - Partie 1 : principes généraux 2000.

156. ZRI, A. Mise en place d'une nouvelle approche de formulation d'une matrice cimentaire à base de sable de dr agage : application aux bétons de sables et granulats, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Douai Université de lille 1, **2010**.

157. SERBAH, B. Etude et valorisation des sédiments de dragage du barrage Bakhadda Tialet, thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen, **2011**.

158. Benasla, M. Caractérisation de la vase de dragage du barrage de l'Oued Fodda et valorisation en tant que matériau de construction, thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohamed Boudiaf, **2015**.
159. NF EN 1097-7 Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 7 : détermination de la masse volumique absolue du filler - Méthode au pycnomètre **2008**.
160. KHEZAMI, I. Approche expérimentale de valorisation des sédiments de dragage dans des applications de Génie Civil, thèse de doctorat, Université de Lille 1, **2014**.
161. NF EN ISO 18757 Céramiques techniques - Détermination de la surface spécifique (aire massique) des poudres céramiques par adsorption de gaz à l'aide de la méthode BET. **2006**.
162. SELMANI, S. Formulation de liants aluminosilicates à partir de différentes argiles tunisiennes, Université de Sfax (Tunisie), **2015**.
163. XP P 94-047 Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un matériau - Méthode par calcination **1998**.
164. NF P 94-068 Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache **1998**.
165. MOREL, R. Les sols cultivés. **1996**, 384.
166. NF P94-051 Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau **1993**.
167. NF P94-052-1 Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Partie 1 : limite de liquidité - Méthode du cône de pénétration **1995**.
168. Holtz, R.D.; Kovacs, W.D. Introduction à la géotechnique; **1991**;
169. Mitchell Fundamentals of soil behavior; Mitchell, J.K., Ed.; New York, 1976;
170. Skempton The colloidal activity of clays. In Proceedings of the Proceedings of the third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering; **1953**; Vol. 1, pp. 57–61.
171. NF P 94-048 Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en carbonate - Méthode du calcimètre **1996**.
172. NF ISO 10390 Qualité du sol-Détermination du pH **2005**.

173. NF P94-093 Sols : Reconnaissance et essais —Détermination des références de compactage d'un matériau — Essai Proctor Normal —Essai Proctor modifié **2014**.
174. Ferber, V.; Auriol, J.C.; Cui, Y.J.; Magnan, J.P. On the swelling potential of compacted high plasticity clays. *Eng. Geol.* **2009**, 104, 200–210, doi:10.1016/j.enggeo.2008.10.008.
175. Seifi, S.; Sebaibi, N.; Levacher, D.; Boutouil, M. Mechanical performance of a dry mortar without cement, based on paper fly ash and blast furnace slag. *J. Build. Eng.* **2019**, 22, 113–121, doi:10.1016/j.jobbe.2018.11.004.
176. Kouassi, P.; Breysse, D.; Girard, H.; Poulain, D. A new technique of kneading compaction in the laboratory. *Geotech. Test. J.* **2000**, 23, 72–82.
177. NF P 94-078 Sols : reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR. **1997**.
178. Mkahal, Z.; Mamindy-Pajany, Y.; Maherzii, W.; Abriak, N.E. Recycling of Mineral Solid Wastes in Backfill Road Materials: Technical and Environmental Investigations. *Waste and Biomass Valorization* **2022**, 13, 667–687, doi:10.1007/s12649-021-01544-5.
179. Maherzi, W.; Benzerzour, M.; Mamindy-Pajany, Y.; van Veen, E.; Boutouil, M.; Abriak, N.E. Beneficial reuse of Brest-Harbor (France)-dredged sediment as alternative material in road building: laboratory investigations. *Environ. Technol. (United Kingdom)* **2018**, 39, 566–580, doi:10.1080/09593330.2017.1308440.
180. Alujas, A.; Fernández, R.; Quintana, R.; Scrivener, K.L.; Martirena, F. Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. *Appl. Clay Sci.* **2015**, 108, 94–101, doi:10.1016/j.clay.2015.01.028.
181. Nozahic, V. Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant / végétal : application à des granulats de chenevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce /, thèse de doctorat, Université BLAISE Pascal – CLERMONT II, **2012**.
182. Avet, F.; Snellings, R.; Alujas Diaz, A.; Ben Haha, M.; Scrivener, K. Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cem. Concr. Res.* **2016**, 85, 1–11, doi:10.1016/j.cemconres.2016.02.015.

183. Herrero, A.; Ortiz, M.C.; Sarabia, L.A. D-optimal experimental design coupled with parallel factor analysis 2 decomposition a useful tool in the determination of triazines in oranges by programmed temperature vaporization-gas chromatography-mass spectrometry when using dispersive-solid phase ex. *J. Chromatogr. A* **2013**, 1288, 111–126, doi:10.1016/j.chroma.2013.02.088.
184. Fatemi, S.; Varkani, M.K.; Ranjbar, Z.; Bastani, S. Optimization of the water-based road-marking paint by experimental design, mixture method. *Prog. Org. Coatings* **2006**, 55, 337–344, doi:10.1016/j.porgcoat.2006.01.006.
185. Li, X.; Huang, H.; Xu, J.; Ma, S.; Shen, X. Statistical research on phase formation and modification of alite polymorphs in cement clinker with SO₃ and MgO. *Constr. Build. Mater.* **2012**, 37, 548–555, doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.099.
186. Imanzadeh, S.; Hibouche, A.; Jarno, A.; Taibi, S. Formulating and optimizing the compressive strength of a raw earth concrete by mixture design. *Constr. Build. Mater.* **2018**, 163, 149–159, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.088.
187. NF EN 196-3 Méthodes d'essai des ciments — Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité **2017**.
188. NF EN 1015-3 Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 3 : détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses) 1999.
189. Bouchikhi, A.; Benzerzour, M.; Abriak, N.E.; Maherzi, W.; Mamindy-Pajany, Y. Study of the impact of waste glasses types on pozzolanic activity of cementitious matrix. *Constr. Build. Mater.* **2019**, 197, 626–640, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.180.
190. Mobili, A.; Belli, A.; Giosuè, C.; Bellezze, T.; Tittarelli, F. Metakaolin and fly ash alkali-activated mortars compared with cementitious mortars at the same strength class. *Cem. Concr. Res.* **2016**, 88, 198–210, doi:10.1016/j.cemconres.2016.07.004.
191. Samet, B.; Mnif, T.; Chaabouni, M. Use of a kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements: Formulation of blended cement. *Cem. Concr. Compos.* **2007**, 29, 741–749, doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.04.012.
192. Wang, L.; Ur Rehman, N.; Curosu, I.; Zhu, Z.; Beigh, M.A.B.; Liebscher, M.; Chen, L.; Tsang, D.C.W.; Hempel, S.; Mechtcherine, V. On the use of limestone calcined clay cement (LC3) in high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC). *Cem. Concr. Res.* **2021**, 144, doi:10.1016/j.cemconres.2021.106421.

193. Kuri, J.C.; Khan, M.N.N.; Sarker, P.K. Fresh and hardened properties of geopolymer binder using ground high magnesium ferronickel slag with fly ash. *Constr. Build. Mater.* **2021**, *272*, 121877, doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121877.
194. Berodier, E.; Scrivener, K. Evolution of pore structure in blended systems. *Cem. Concr. Res.* **2015**, *73*, 25–35, doi:10.1016/j.cemconres.2015.02.025.
195. Zhou, Y. fan; Li, J. shan; Lu, J. xin; Cheeseman, C.; Poon, C.S. Sewage sludge ash: A comparative evaluation with fly ash for potential use as lime-pozzolan binders. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *242*, 118160, doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118160.
196. Ollivier, J.-P.; Torrenti, J.-M. *La durabilité des bétons*, Chapitre 3; Ollivier, J.P., Vichot, A., Eds.; Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, **2008**;
197. Thiebaut, Y. *Évaluation des structures en béton armé atteintes de réaction sulfatique interne* Yvan Thiebaut To cite this version : HAL Id : tel-02087795 DOCTORAT DE L ' UNIVERSITÉ DE TOULOUSE Evaluation des structures en béton armé atteintes de réaction sulfatique int. **2018**.
198. Fernandez, R.; Scrivener, K. Calcined clayey soils as a potential replacement for cement in developing countries. Ph.D Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. **2009**, 4302, 178.
199. Briki, Y.; Avet, F.; Zajac, M.; Bowen, P.; Haha, M. Ben; Scrivener, K. Understanding of the factors slowing down metakaolin reaction in limestone calcined clay cement (LC3) at late ages. *Cem. Concr. Res.* **2021**, *146*, 106477, doi:10.1016/j.cemconres.2021.106477.
200. Scrivener, K.L. Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: Understanding and quantification. *Cem. Concr. Compos.* **2004**, *26*, 935–945, doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.02.029.
201. Lehner, P.; Ghosh, P.; Konečný, P. Statistical analysis of time dependent variation of diffusion coefficient for various binary and ternary based concrete mixtures. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *183*, 75–87, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.048.
202. RS, Ic. *Geopolymers: The route to eliminate waste and emissions in ceramic and cement manufacturing*; Cristina L.; **2015**;
203. Eades, J.; Grim, R. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. *Environ. Sci.* **1966**.

204. Levacher, D.; Colin, D.; Perroni, A.C.; Duan, Z.; Sun, L. Recyclage et valorisation de sédiments fins de dragage à usage de matériaux routiers. IXèmes. Journées Natl. Génie Civil–Génie Côtier, Fr. **2006**, doi:10.5150/jngcgc.2006.058-1.
205. Zdiri, M.; Neji, J.; Ouezdou, M. Ben Formulation et simulation des bétons compactes au rouleau : formulation et simulation des bétons compactes au rouleau : application aux matériaux de gisements locaux. Colloq. Méditerranéen sur les Matériaux (CMEDIMAT 2005) **2005**, 6–7.
206. NF EN 459-1 Chaux de construction — Partie 1 : Définitions, spécifications et critères de conformité. **2015**.
207. NF P98-101 Assises de chaussées - Chaux aérienne calcique pour sols et routes - Spécifications **1991**.
208. Fleureau, J.-M.; Verbrugge, J.-C.; Huergo, P.; Al Aspects of the behaviour of compacted clayey soils on drying and wetting paths. Can. Geotech. J. **2002**, 39, 1341–1357.
209. BELLARA, S.; LEVACHER, D.; MEZAZIGH, S.; HIDJEB, M. Valorisation des sédiments du barrage de Zardezas (Algérie): Caractérisation et aptitude au compactage des sédiments. XVIèmes Journées Natl. Génie Côtier – Génie Civil, Le Havre **2020**, 571–580, doi:10.5150/jngcgc.2020.064.
210. NF P94-100 Sols : Reconnaissance et Essais —Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques — Essais d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement **2015**.
211. NF EN 13286-53 Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Partie 53 **2015**.
212. NF P98-114-3 Assises de chaussées Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques **2001**.
213. NF EN 13286-42 Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques-Partie 42 **2003**.
214. Davy, J. Etude des risques d'oxydation de la pyrite dans le milieu basique du béton. **1996**, 97–107.
215. Le Roux, A.; Orsetti, S. Les réactions sulfatiques : Conditions de formation, structure et expansion des minéraux secondaires sulfatés. Bull. des Lab. des Ponts Chaussees **2000**, 41–50.
216. Hunter, R.D. The Geochemistry of Lime-Induced Heave in Sulfate Bearing Clay Soils,

Ph.D Thesis, University of Nevada, **1989**.

217. NF EN 13286-41 Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Partie 41 2003.

218. NF P94-102-1 Sols : reconnaissance et essais - Sol traité au liant hydraulique, éventuellement associé à la chaux, pour utilisation en couche de forme - Partie 1 : définition - Composition - Classification **2001**.

219. NF P98-114-2 Assises de chaussées - Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques - Partie 2. **1994**.

220. NF EN 13286-43 Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 43 : méthode d'essai pour la détermination du module d'élasticité des mélanges traités aux liants hydrauliques **2003**.

Annexe

Fiche technique de la chaux utilisée.



DECLARATION DES PERFORMANCES

N° DoP-CL 90-S A-004

Code d'identification unique: CHAUX CALCIQUE EN 459-1 CL-90 S

Usage prévu: Applications ou matériaux pour la construction : bâtiment et génie civil

Fabricant: CHAUX ET ENDUITS DE SAINT ASTIER
La Jarthe - 24110 SAINT-ASTIER

Systèmes d'évaluation et de vérification de la constance des performances: Niveau 2+

Norme harmonisée:

L'organisme notifié de certification du contrôle de la production en usine n° 0333 a effectué l'inspection initiale de l'établissement de fabrication et du contrôle de la production en usine, ainsi que la surveillance, l'évaluation et l'appréciation permanentes du contrôle de la production en usine relevant du système 2+, puis délivré le certificat de conformité n° 0333-CPR-33403 du contrôle de la production en usine.

Performances déclarées:

Caractéristiques Essentielles:	Performances	Spécifications techniques harmonisées
CaO + MgO	satisfait à l'exigence	EN 459-1 : 2015
MgO	satisfait à l'exigence	
CO ₂	satisfait à l'exigence	
SO ₃	satisfait à l'exigence	
Chaux libre	satisfait à l'exigence	
Stabilité	satisfait à l'exigence	
Finesse	satisfait à l'exigence	

Les performances du produit identifié ci-dessus sont conformes aux performances déclarées.
Conformément au règlement (UE) n°305/2011, la présente déclaration des performances est établie sous la seule responsabilité du fabricant mentionné ci-dessus.

Signé pour le fabricant et en son nom par:

Le Directeur Technique
Laurent TEDESCHI
A Saint-Astier le 12/01/2016

Tel : + 33 (0)5 53 54 11 25
Fax : + 33 (0)5 53 04 67 91

Chaux et Enduits de Saint-Astier
28 bis route de Mantanceix
La Jarthe, 24110 Saint-Astier

www.saint-astier.com
contact@saint-astier.com

S.A.S. ex. septefice 40 000 € - T.O.S. Belgique - 0412 000 017 - 01et. 412 000 017 00017 - Code NAF 4072 A - N° TVA intracommunautaire : FR 54 412 000 017

Tableau. Les différentes normes adoptées.

Chapitre 2	
Essais d'identification	Norme correspondante
Teneur en eau	NF P94-050
Analyse granulométrique :	
Tamisage par voie humide	XP P94-041
Sédimentométrie	NF P94-057
Granulométrie laser	ISO 13320-1
Masse volumique absolue	NF EN 1097-7
Teneur en matière organique	XP P 94-047
Perte au feu	NF EN 15169
Valeur de bleu de méthylène	NF P 94-068
Limites d'Atterberg :	
Limite de liquidité à la coupelle	NF P94-051
Limite de plasticité au rouleau	NF P94-051
Limite de liquidité au cône de pénétration	NF P94-052-1
Teneur en CaCO ₃	NF P 94-048
Mesure du PH	NF ISO 10390
Essai Proctor normal	NF P94-093
Indice de portance immédiat	NF P94-078
Essai de lixiviation	EN 12457-2
Chapitre 3	
Détermination des résistances	NF EN 196-1
Détermination du temps de prise et de la stabilité	NF EN 196-3
Détermination de la consistance du mortier frais	NF EN 1015-3
Porosimétrie à mercure	ISO 15901-1
Chapitre 4	
Essai Proctor normal	NF P94-093
Indice de portance immédiat	NF P94-078
Aptitude au traitement aux LHR	NF P94-100
Confection des éprouvettes	NF EN 13286-53
Mesure de Rc	NF EN 13286-41
Mesure de Rit	NF EN 13286-42
Mesure du module E	NF EN 13286-43

Résumé

L'intégration des déchets comme matières premières secondaires fait désormais l'objet de réflexion de plusieurs scientifiques et industriels. La substitution du ciment par des additions minérales a suscité plusieurs études ces dernières années. En effet, elle représente une solution prometteuse pour un avenir plus écologique. Cependant, les quantités disponibles de ces matériaux restent limitées au regard de la demande croissante du marché.

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre d'une démarche d'économie circulaire et de développement durable, elle vise à optimiser les filières de valorisation des matériaux fins (sédiments de dragage et de déchets de marbre) dans les secteurs de la construction. Ceci permettra à terme de réduire les émissions des gaz à effet de serre et la préservation des ressources naturelles.

Deux volets ont été abordés : le premier volet concernait l'élaboration d'éco-liants ternaires à base de sédiments de dragage et de sous-produits industriels locaux et le deuxième concernait le traitement des sédiments de dragage aux liants hydrauliques optimisés, pour une éventuelle valorisation en couche de forme. Dans un premier temps, deux liants hydrauliques routiers à durcissement normal ont été optimisés par la méthode des surfaces de réponse (MSR). Le premier, référencé 50C35LHF15SC, était composé de 50% de ciment (C), 35% de laitier (LHF) et de 15% de sédiments calcinés (SC) et le deuxième LHR 80C10LHF10SC. Des essais physico-chimiques et mécaniques ont été conduits à cet égard pour s'assurer de leur conformité aux exigences prescrites par la norme EN 13282-2. Dans un deuxième temps, plusieurs mélanges de sédiments de dragage et de déchets de marbres ont été traités avec différents pourcentages des liants ternaires optimisés dans la première phase de l'étude. Les différents mélanges ont été caractérisés vis-à-vis de leurs performances mécaniques à court et à long terme, la microstructure et l'aspect environnemental ont été également appréciés à travers des observations au microscope électronique à balayage, ainsi que des essais de lixiviation à différentes échéances.

Mots clés : Sédiments de barrage, liants hydrauliques routiers, déchets de marbre, techniques routières, matériaux de substitution au ciment.