



Faculté de Génie
Département de génie civil et du bâtiment

Valorisation des sables de dragage des îles-de-la-Madeleine et des carapaces de crustacés dans une matrice cimentaire

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie civil

Oumaima Ben khalifa

Jury : Patrice Rivard (Directeur)
Mathieu Robert (Rapporteur)
Saeed Kharagani (Évaluateur externe)

Résumé

Ce projet de recherche fait partie de la thématique de valorisation des déchets pour la fabrication de matériaux de construction plus écologiques. D'une part les sédiments de dragage et les résidus de produits de transformation de la pêche comme les carapaces de crustacés sont souvent jetés dans la nature, ce qui a des effets néfastes sur l'environnement. D'autre part le sable ordinaire est en pénurie mondiale, l'industrie cimentaire est une industrie énergivore et polluante, et le transport des matériaux de construction vers les îles de la Madeleine (IDM) coûte cher. Ces différents soucis nous ont motivés à chercher un moyen pour valoriser ces résidus marins dans la construction. Ce projet vise à étudier la possibilité de remplacer le sable ordinaire par le sable de dragage et le ciment par les carapaces de crustacés issus des îles de la Madeleine pour formuler des matrices cimentaires.

Pour atteindre notre objectif, nous avons suivi un plan expérimental composé de quatre phases. La première phase consistait à analyser chimiquement le sable de dragage et la poudre de carapaces de crustacés à utiliser, par diffraction aux rayons X (DRX) et fluorescence aux rayons X (FRX). La poudre a été obtenue par la calcination à 800°C, puis le broyage des carapaces de crustacés selon une procédure bien étudiée.

La deuxième phase consiste à étudier l'effet du taux de remplacement et de la finesse de la poudre de carapaces sur les propriétés mécaniques des pâtes de ciment. On a constaté que plus le taux de remplacement du ciment par la poudre augmente, plus la résistance des pâtes diminue. Un taux de 5% de poudre de finesse inférieure à 80µm améliore légèrement les résistances à la compression, tandis qu'un taux de 15% ou plus réduit significativement les résistances. Une finesse inférieure à 80µm est meilleure que celle égale à 80µm.

La troisième phase se résume à étudier l'influence du lavage de sable de dragage sur les résistances à la compression. On a comparé des mortiers à base du sable de dragage ordinaire des IDM à des mortiers à base du sable de dragage lavé. La première façon était de laver le sable à l'aide d'un jet d'eau et la deuxième façon était de le tremper 72 heures dans l'eau puis l'étuver. Cette dernière a donné les meilleurs résultats, elle a augmenté la résistance de 22% à 28 jours et de 44% à 91 jours.

La quatrième phase portait sur l'étude de l'effet des différents paramètres sur les propriétés mécaniques de différentes formulations de mortiers. Les paramètres étudiés sont les taux de remplacement en sable et en poudre de carapaces, finesse de la poudre et procédure de lavage en présence de la poudre. Le mélange qui a donné les meilleurs résultats était celui contenant 8% de poudre de carapaces de finesse <80µm et 50% de sable de dragage trempé 72 heures dans l'eau. Ce mélange a testé $f'_{c28} = 33$ MPa et pourrait être considéré comme le mélange optimal de valorisation. Ainsi, ce mortier peut servir pour la fabrication de plusieurs types d'ouvrages.

Résumé

Ce travail constitue une bonne alternative de valorisation des résidus marins pourrait être étudié d'avantage en passant à une échelle béton pour réaliser plus d'ouvrages en génie civil.

Mots-clés : valorisation, ciment, poudre de carapaces de crustacés, sable de dragage, sédiments, calcination, traitement du sable, pâtes, mortiers, béton, résistance à la compression, propriétés mécaniques.

Remerciements

Je tiens à remercier vivement mon cher professeur Patrice Rivard, Ingénieur, Ph.D. et Professeur titulaire en Génie Civil à la Faculté de Génie de l'Université de Sherbrooke, Québec, Canada, pour l'accueil chaleureux et la confiance qu'il m'a témoignée en acceptant la direction scientifique de mes travaux tout au long de ce projet de maîtrise. Je lui suis reconnaissante de m'avoir fait bénéficier tout au long de ce travail de sa grande compétence, de sa rigueur intellectuelle, de son dynamisme, et de son efficacité certaine que je n'oublierai jamais. Soyez assuré de mon attachement et de ma profonde gratitude.

Mes sincères remerciements vont à Mr Stéphane Guetirrez de m'avoir accompagné dans la phase de caractérisation chimique de mes échantillons et qui m'a permis de bénéficier des conseils et compétences scientifiques et de m'avoir témoigné une grande confiance.

Je suis très honorée à remercier les membres du jury d'avoir accepté l'évaluation de mon mémoire.

Je remercie infiniment Dr Younes Zouaoui pour son aide et pour le temps qu'il m'a consacré, des nombreux conseils et connaissances scientifiques qu'il m'a apporté. Je le remercie aussi pour son soutien moral, son encouragement et surtout de l'aide considérable qu'il m'a apportée au cours de la rédaction.

J'adresse des remerciements particuliers à mes collègues du groupe de recherche dirigé par Mr P. Rivard (Serge, Suran, Chouaib, Parisa, ...) et les techniciens de notre équipe Jean-Christophe et Danick ainsi que tous les techniciens du laboratoire de l'Université de Sherbrooke. Cette collaboration s'est déroulée dans une ambiance amicale que j'ai vraiment appréciée.

A titre plus personnel, je remercie chaleureusement papa et la plus belle des mamans Naima Ben Ali et ma chère sœur Khouloud Ben Khalifa pour la grande patience, le support, l'encouragement et la confiance qu'elles m'ont témoignée.

Finalement, je tiens à remercier ma famille, mes professeur(e)s et mes ami(e)s pour leur soutien moral ininterrompu et leurs nombreux conseils qui m'ont été bien utiles tout au long de mon parcours.

Tables des matières

Chapitre 1 : Introduction	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Problématique.....	3
1.3 Question de recherche	3
1.4 Objectif de recherche.....	4
1.5 Objectif spécifique	4
1.6 Organisation du mémoire.....	4
Chapitre 2 : Revue de littérature	5
2.1 Le ciment portland	5
2.2 Les sédiments de dragage.....	10
2.3 Gestion des sédiments de dragués	11
2.4 Aspect réglementaire	12
2.5 Valorisation des sédiments de dragage.....	13
2.5.1 Sédiment en substitution des granulats.....	16
2.5.2 Sédiments en substitution du ciment	17
2.5.3 Coquillages et sédiments en substitution du ciment et des granulats.....	18
2.6. Les carapaces de crustacés	20
2.6.1 Le Homard	21
2.6.2 Les scénarios de valorisation possibles	21
2.6.2.1 Chitosan et Chitine.....	23
2.7 Conclusion.....	27
Chapitre 3 : Méthodologie.....	28
3.1 Phase 1 : Caractérisation chimique des résidus maritimes	29
3.1.1 Phase 1.1 : Préparation et caractérisation des poudres de crustacés	30
3.1.2 Phase 1.1 : Caractérisation du sable de dragage	32
3.1.2 Phase 1.1 : Caractérisation du sable de dragage	32
3.2 Phase 2 : Pâtes cimentaires à base de la poudre des carapaces de crustacés et étude de leur effet sur les propriétés mécaniques des mélanges.....	33
3.2.1 Caractérisation des pâtes.....	36
3.2.1.1 États frais.....	36
3.2.1.2 États durcis.....	36
3.3 Phase 3 : Mortiers à base du sable de dragage et étude de l'influence du lavage des sédiments.....	39

Table des matières

3.3.1 Préparation des mélanges	39
3.3.2 Caractérisation des mortiers	44
3.4 Phase 4 : Mortiers à base du sable de dragage et de poudre de carapaces	44
3.4.1 Préparation des mélanges... ..	44
Chapitre 4 : Résultats et discussions.....	49
4.1 Résultats et interprétations des essais de la première phase	49
4.1.1 Caractérisation de la poudre de carapaces de crustacés calcinée.....	49
4.1.1.1 Résultats de la DRX de la poudre	49
4.1.1.2 Résultats de la FRX de la poudre	50
4.1.2 Caractérisation du sable de dragage de Millerand (IDM).....	51
4.1.2.1 Résultats de la DRX du sable brut.....	52
4.1.2.2 Résultats de la FRX du sable brut	52
4.1.2.3 Résultat de la DRX du sable trempé dans l'eau.....	53
4.1.2.4 Résultats de la FRX du sable trempé dans l'eau.....	54
4.2 Résultats et interprétations des essais de la deuxième phase.....	55
4.2.1 A l'état frais : Affaissement et étalement	56
4.2.2 A l'état durci	56
4.2.2.1 Vitesse Ultrasonore	56
4.2.2.2 Résistivité électrique	57
4.2.2.3 Résistance à la compression	58
4.2.2.4. Courbes comparatives	59
4.3 Résultats et interprétations des essais de la troisième phase.....	61
4.4 Résultats et interprétations des essais de la quatrième phase	63
4.4.1 À l'état frais : Affaissement et étalement	65
4.4.2 À l'état durci	65
4.4.2.1 Vitesse Ultrasonore	65
4.4.2.2 Résistivité électrique	67
4.4.2.3 Résistance à la compression	68
4.4.2.4 Courbes comparatives	70
4.4.2.5 Microscopie électronique à balayage	702
4.5 Conclusion.....	76
Chapitre 5 : Conclusion et recommandations	77
5.1 Conclusion générale	77
5.2 Recommandations	80

Table des matières

Références	87
Annexe A.....	87
Annexe B.....	92

Liste des figures

Liste des figures

Figure 2. 1: Processus de fabrication du ciment portland	5
Figure 2. 2 : flux de chaleur d'hydratation du ciment portland (Tagnit-Hamou, 2014)	6
Figure 2. 3: C-S-H externe cristallisé par précipitation (Tagnit-Hamou, 2013)	8
Figure 2. 4 : Cristaux de portlandite (Tagnit-Hamou, 2013)	8
Figure 2. 5: Cristaux d'ettringite dans une pâte de ciment hydraté à l'âge de 3 jours (Tagnit-Hamou, 2013).....	9
Figure 2. 6: Cristaux monosulfoaluminate (Tagnit-Hamou, 2013).....	9
Figure 2. 7: Schéma synthétique des principales étapes et composantes de la gestion Fdes sédiments (Bel Hadj Ali et al., 2013).....	13
Figure 2. 8: Piste cyclable du Mont-Saint-Michel élaborée à l'aide de 70 000 m3 de sédiments (Anger et al., 2014)	15
Figure 2. 9: Vue aérienne du site de remblaiement expérimental de la ballastière d'Yville sur Seine en France (Journal Nature, 2013).	16
Figure 2. 10: Exemples de mobilier urbain élaboré à partir de sédiments (Hayet et al. 2017)	17
Figure 2. 11: Composition estimée des apports de MR putrescibles issus des industries de transformation des produits de la mer de 2008 à 2010 (Durbecq et al., 2012)	22
Figure 2. 12: Structure chimique de la chitine (à gauche) et du chitosan (à droite) (Mohanasrinivasan et al., 2013).....	25
Figure 3. 1: Programme expérimental.....	29
Figure 3. 2: Calcination de carapaces de crustacés	31
Figure 3. 3différentes étapes pour l'obtention de la poudre calcinée des carapaces de crustacés.	32
Figure 3. 4: Localisation approximative des échantillonnages (Pellerin, 2017)	33
Figure 3. 5: Pycnomètres remplis des échantillons de sable et d'eau	34
Figure 3. 6: Malaxage des pâtes.....	36
Figure 3. 7: Mise en place des pâtes dans les moules en cubes et compactage.....	36
Figure 3. 8: Placement des pâtes formulées dans la chaux puis leur stockage dans la chambre humide.....	37

Liste des figures

Figure 3. 9: Étalement des mélanges de pâte	37
Figure 3. 10: Essai de mesure de la vitesse ultrasonore des cubes.....	38
Figure 3. 11: Mesure de la résistivité électrique des échantillons en cubes	39
Figure 3. 12: Essai de la résistance à la compression des cubes de pâte.....	40
Figure 3. 13: Lavage au jet d'eau du sable de dragage	41
Figure 3. 14: Lavage du sable pendant 72h dans l'eau et étuvage du sable de dragage ...	42
Figure 3. 15: Sable de dragage des IDM.....	42
Figure 3. 16: Malaxage et compactage des mortiers	44
Figure 3. 17: Les cubes de mortiers des trois formulations.....	45
Figure 3. 18: Les cubes de mortiers des différentes formulations.....	48
Figure 4. 1: Les résultats de la DRX de la poudre calcinée puis broyée.....	51
Figure 4. 2: Les résultats de la DRX du sable brut de Millerand (IDM).....	53
Figure 4. 3: Les résultats de la DRX du sable dragué (IDM) trempé 72h dans l'eau	55
Figure 4. 4: Graphe de l'affaissement et étalement en fonction des formulations (phase 2)	56
Figure 4. 5: Graphe de la vitesse ultrasonore des pâtes (phase 2).....	58
Figure 4. 6: Graphe de la Résistivité électrique des pâtes (phase 2).....	59
Figure 4. 7 : Graphe des résistances à la compression uniaxiale $f'c$ des pâtes (phase 2) .	60
Figure 4. 8: Courbes comparatives de $f'c = f$ (v.u.) à 7 et 28 jours (phase 2).....	61
Figure 4. 9: Courbes comparatives de $\rho = f$ (v.u.) à 7 et 28 jours (phase 2)	61
Figure 4. 10: Courbes comparatives de $\rho = f$ ($f'c$) à 7 et 28 jours (phase 2).....	62
Figure 4. 11: Résistance à la compression uniaxiale des mortiers (phase 3)	64
Figure 4. 12: Graphe de l'étalement et l'affaissement des mortiers (phase 4).....	66
Figure 4. 13: Vitesse ultrasonore des mortiers à 28 jours (phase 4).....	68
Figure 4. 14: Résistivité électrique des mortiers à 28 jours (phase 4).....	69
Figure 4. 15: Résistance à la compression uniaxiale des mortiers à 28 jours (phase 4)....	71
Figure 4. 16: Vitesse ultrasonore en fonction de la résistance à la compression des mortiers à 28 jours (phase 4).....	72
Figure 4. 17: Résistivité électrique en fonction de la vitesse ultrasonore des mortiers à 28 jours (phase 4).....	72

Liste des figures

Figure 4. 18: Résistivité électrique en fonction de la résistance à la compression des mortiers à 28 jours (phase 4).....	73
Figure 4. 19: MEB de l'échantillon 1 (référence).....	74
Figure 4. 20: MEB de l'échantillon 10 (optimal).....	75
Figure 4. 21: MEB de l'échantillon 12 (moins résistant).....	76

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 2- 1 : Phases d'hydratation du ciment portland.....	7
Tableau 2- 2 : Volume des matériaux dragués dans les ports du Québec (Safhi et al., 2019)	12
Tableau 2- 3 : Résultats de l'essai de lixiviation (Ben Othman et al., 2014).....	20
Tableau 2- 4 : Teneur en chlorure des sables et propriétés mécaniques du béton à l'état durci (Tang & Cui et al., 2017).....	21
Tableau 2- 5 : Liste des scénarios de valorisation identifiés pour les carapaces de homard et de crabe (Légaré Bilodeau, 2011)	23
Tableau 3- 1: Mesure de taux d'absorption à l'eau du sable de dragage	34
Tableau 3- 2: Composition chimique du ciment utilisé	35
Tableau 3- 3: Formulations de mélanges de pâtes cimentaires (36 échantillons cubiques)	35
Tableau 3- 4: Procédure de lavage du sable de dragage et nomenclature des cubes de mortier	43
Tableau 3- 5: Formulations de mélanges de mortiers cimentaires (18 échantillons cubiques)	43
Tableau 3- 6: matériaux principalement utilisés dans la phase 4 et leurs propriétés.....	46
Tableau 3- 7: Composition de la première série de formulations	46
Tableau 3- 8: Composition de la deuxième série de formulations	47
Tableau 3- 9: Composition de la troisième série de formulations.....	47
Tableau 3- 10: Composition de la quatrième série de formulations.....	47
Tableau 3- 11: Les procédures de lavage des sédiments des mélanges 16	48
Tableau 3- 12: Essais réalisés dans la phase 4	49
Tableau 4- 1: Les résultats de la FRX de la poudre calcinée puis broyée.....	52
Tableau 4- 2: Les résultats de la FRX du sable brut de Millerand (IDM).....	54
Tableau 4- 3: Les résultats de la FRX du sable de Millerand (IDM) trempé 72h dans l'eau	56
Tableau 4- 4: Les procédures de lavage appliqué sur le sable dragué (phase 3).....	63
Tableau 4- 5: Composition des formulations de la phase 4	65
Tableau 4- 6: Les essais réalisés dans la phase 4	65

Chapitre 1 : Introduction

1.1 Mise en contexte

Le matériau le plus utilisé au monde est le béton, avec près de 10 milliards de tonnes consommées chaque année (Glavind, 2009). Cette importante consommation du béton s'accompagne d'une forte demande en ciment qui est considéré comme le constituant essentiel pour fabriquer ce matériau. Il s'agit de l'élément responsable de l'adhérence entre les différents autres constituants du béton (liant hydraulique) et par conséquent du développement des résistances à court et à long terme.

Le procédé de production cimentière est très énergivore. La quantité d'énergie nécessaire pour fabriquer une tonne de ciment est d'environ 4200 kJ (Ez-Zaki, 2016), notamment en raison de la température élevée (de 800 à 1450°C) requise pour sa fabrication. De plus, le procédé de fabrication émet d'importantes quantités de CO₂ : l'analyse de cycle de vie (ACV) a indiqué que la production de 1 t de ciment génère 0,8 t de CO₂ (Flower & Sanjayan, 2007). La production de ciment participe à près de 5% de l'émission globale annuelle de CO₂ (Novae Communications, 2020). C'est donc un matériau de construction a priori polluant et coûteux.

L'industrie de béton et donc de ciment participe beaucoup dans le développement mondial mais aussi dans la pollution et l'émission des gaz à effet de serre ce qui cause le changement climatique, les maladies engendrées par l'air pollué qu'on respire et plein d'autres effets néfastes. Cependant, on doit donc développer des solutions pour réduire la quantité de ciment dans le béton. D'ailleurs il existe des solutions proposées par des chercheurs et qui sont devenues normalisées, à titre d'exemple les fillers calcaires, les pouzzolanes et les ajouts minéraux (poudre de verre, fumé de silice, et la plus récente c'est la cendre volante). Ces ajouts ont prouvé leur impact positif non seulement sur l'environnement, mais aussi sur le développement des résistances grâce à leur activité pouzzolanique. Une réaction pouzzolanique c'est le fait que l'élément ou la pouzzolane réagit avec le Ca(OH)₂ et l'eau pour former du gel de C-S-H. Ce dernier est le produit d'hydratation principal du ciment qui est responsable au développement des résistances. On parle d'une réaction lente qui se développe à une température ambiante.

Une pouzzolane peut être soit naturelle (tufs et cendres volcaniques, zéolite) soit artificielle (fumée de silice, cendres volantes, écorces de riz calcinées, metakaolin, argiles et schistes calcinés).

En plus des problèmes environnementaux causés par le ciment, la confection du béton nécessite d'importantes quantités de granulats (gravier, sable). Plus de 15 milliards de

tonnes de sable sont consommées annuellement, ce qui en fait la seconde ressource naturelle la plus exploitée après l'eau (Delestrac, et al. 2019). Considérant que les ressources mondiales de sable sont estimées à 120 millions de milliards de tonnes, on envisage une pénurie de sable au cours des prochaines années. Ainsi, cette importante demande a conduit à rechercher à trouver des alternatives au sable naturel (sables de carrière et alluvionnaires), parmi lesquelles le sable de dragage.

Le sable provenant des opérations de dragage est considéré comme un résidu, le plus souvent rejeté dans l'environnement en grandes quantités (Achour, 2013). Les opérations de dragage et de transformation de la pêche génèrent des quantités énormes de résidus marins solides (soit des sables de dragage, des coquilles de palourdes ou des carapaces de crustacés, etc.). Les sables de dragage sont retournés dans la mer, et les résidus de transformation de la pêche comme les carapaces de crustacés étaient autrefois jetées dans les dépotoirs, mais maintenant c'est devenu interdit d'où la nécessité de chercher une manière pour les valoriser. Surtout que ces résidus ayant des effets néfastes (pollution, mauvaises odeurs, etc.) posent un problème environnemental. Les sables de dragages ont été valorisés dans plusieurs domaines de construction notamment géotechnique routière (Dubois, 2006 ; Tran, 2009 ; Dubois et al., 2009 ; Zentar et al., 2009 ; Miraoui, 2010 ; Dia, 2013), pour fabriquer des granulats (Brakni, 2008), en remplacement du sable standard (Zri, 2010 ; Achour, 2013) et aussi pour la fabrication de briques (Mezencevova, et al., 2012 ; Hamer et al., 2002).

L'archipel des îles de la Madeleine (IDM) au Québec, étant donné sa nature insulaire, doit importer du continent la quasi-totalité de ses matériaux de construction, dont les granulats et le ciment, ce qui engendre des coûts importants et génèrent des gaz à effets de serre. En revanche, l'archipel dispose d'une grande quantité de sédiments (sable fin) dragués de la mer. Ces sédiments non contaminés sont rejetés en mer. Par ailleurs, l'industrie de transformation des produits de la pêche, activité économique majeure très présente aux IDM, génère des quantités appréciables de résidus, principalement des carapaces de crustacés et des coquilles de palourdes. Ces résidus de pêche étaient autrefois jetés dans les dépotoirs. Toutefois, il est maintenant interdit de les enfouir, d'où la nécessité de trouver une voie de valorisation. Dans ce sens, cette étude et plusieurs autres ont été réalisées principalement par l'équipe du Pr Rivard à l'Université de Sherbrooke visant à incorporer le sable dragué (Achour 2013, Safhi 2020, etc.) et les déchets marins dans les bétons, en remplacement des matériaux de construction ordinaire. À titre d'exemple, la valorisation des coquilles de palourde et du sable de dragage dans les matériaux cimentaires (Ben Khalifa, 2019 ; Djebali, 2020) et aussi l'étude du potentiel des carapaces de crustacés pour la fabrication des bétons à base de sédiments de dragage (Ben Abdeljelil, 2020).

En raison de ces différents enjeux, des réflexions ont été élaborées pour exploiter ces résidus marins dans l'industrie de construction. Cette solution contribue à la diminution de

fabrication de ciment et donc l'émission de CO₂ ainsi qu'à la valorisation de ces résidus marins. Cela pourrait être aussi une solution pour le coût élevé des matières premières de construction et leur coût de transport élevé vers les îles de la Madeleine.

Enfin, il faut être conscient des conséquences de l'activité des humains sur le réchauffement climatique, ce qui amène à mettre en question tout le modèle de croissance des industries dans le secteur du bâtiment qui est basé sur le béton et donc sur le ciment. Ainsi, le choix du sujet n'est pas anodin. En effet, cette thématique de recherche entre dans le cadre de la nouvelle politique mondiale axée sur la protection de l'environnement, et du développement des nouveaux matériaux écologiques et économiques avec un faible taux d'émissions du carbone.

1.2 Problématique

Ce projet de recherche entre dans le cadre de développement de nouveaux matériaux à faible impact environnemental.

L'idée est de substituer partiellement le sable ordinaire qui est en pénurie par du sable de dragage qui est un résidu, et le ciment ordinaire par la poudre de carapaces de crustacé (qui est un déchet de l'industrie de transformation de la pêche). Ceci permettra de réduire la consommation mondiale du sable qui est en pénurie et aussi du ciment et par conséquent, de réduire l'émission de CO₂.

Les résidus marins, soit la poudre de carapaces de crustacés, peut-être utile dans des matrices cimentaires. Dans cette recherche on va étudier les proportions de cette poudre, son potentiel et ses influences exactes sur les propriétés des matériaux cimentaires qu'on confectionnera. Toutefois, on va étudier le comportement d'un produit cimentaire qui contient à la fois la poudre de carapaces et les sédiments de dragage, à savoir les possibilités et les traitements préalables pour enlever les sels contenus dans ce sable.

Cette alternative peut-être une bonne solution surtout que l'utilisation des carapaces, que ce soit en tant que filler calcaire ou pouzzolane, offre un potentiel intéressant dans les matrices cimentaires, mais pour être valide, deux enjeux se posent. À savoir les taux optimaux de remplacement du ciment par ces fillers ou par la poudre calcinée et la viabilité d'incorporer cette poudre et les sédiments dragués dans un matériau cimentaire.

1.3 Question de recherche

La question de recherche issue de la problématique sera : est-ce qu'on peut produire un béton viable à partir de résidus de transformation de la pêche et de sable de dragage ?

1.4 Objectif général

Cette étude vise à déterminer la faisabilité des matrices cimentaires contenant à la fois du sable de dragage et de la poudre de carapaces de crustacés des IDM et d'améliorer ses propriétés mécaniques le plus possible pour obtenir un mélange de valorisation résistant. Nous chercherons ainsi à proposer une formulation de mélange cimentaire incorporant des carapaces de crustacés et des sédiments de dragage et dont les propriétés mécaniques sont comparables à un mélange ordinaire.

1.5 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Étudier l'influence de l'ajout de poudre, de sable, puis de l'effet combiné de poudre carapaces de crustacés et de sable de dragage à la fois dans une matrice cimentaire.
- Déterminer les taux de substitution optimaux des carapaces de crustacés et sables de dragage des IDM, de façon à obtenir des propriétés mécaniques du béton fait à base de liants/granulats alternatifs, très proches de celles du mélange conventionnel.
- Caractériser les performances mécaniques des formulations.

1.6 Organisation du mémoire

Ce mémoire de fin de maîtrise est constitué de cinq chapitres, décrit ci-dessous :

- Le premier chapitre consiste en une introduction dans laquelle la mise en contexte, la problématique, la question de recherche et les objectifs du présent travail sont présentés.
- Le deuxième chapitre est consacré à une revue de la littérature sur les carapaces et les quantités produites des sédiments de dragage, des règlements adoptés pour leur réutilisation ainsi que les différents domaines de leur application.
- Le troisième chapitre décrit les différents protocoles expérimentaux utilisés et les essais au laboratoire qu'on a effectué, selon une méthodologie bien déterminée.
- Le quatrième chapitre englobe tous les résultats obtenus à partir des différents mélanges préparés ainsi que leurs analyses et interprétations.
- Le cinquième chapitre présente enfin une conclusion générale et des perspectives et recommandations

Chapitre 2 : Revue de littérature

2.1 Le ciment portland

Le béton est un composite formé de granulats fins et grossiers, relié par une pâte de ciment, eau et adjuvants ou ajouts. Le ciment est un liant hydraulique fabriqué à base de calcaire et d'argile broyé et cuit à une température énorme de 1450 °C, selon la procédure illustrée à la figure 2. 1.

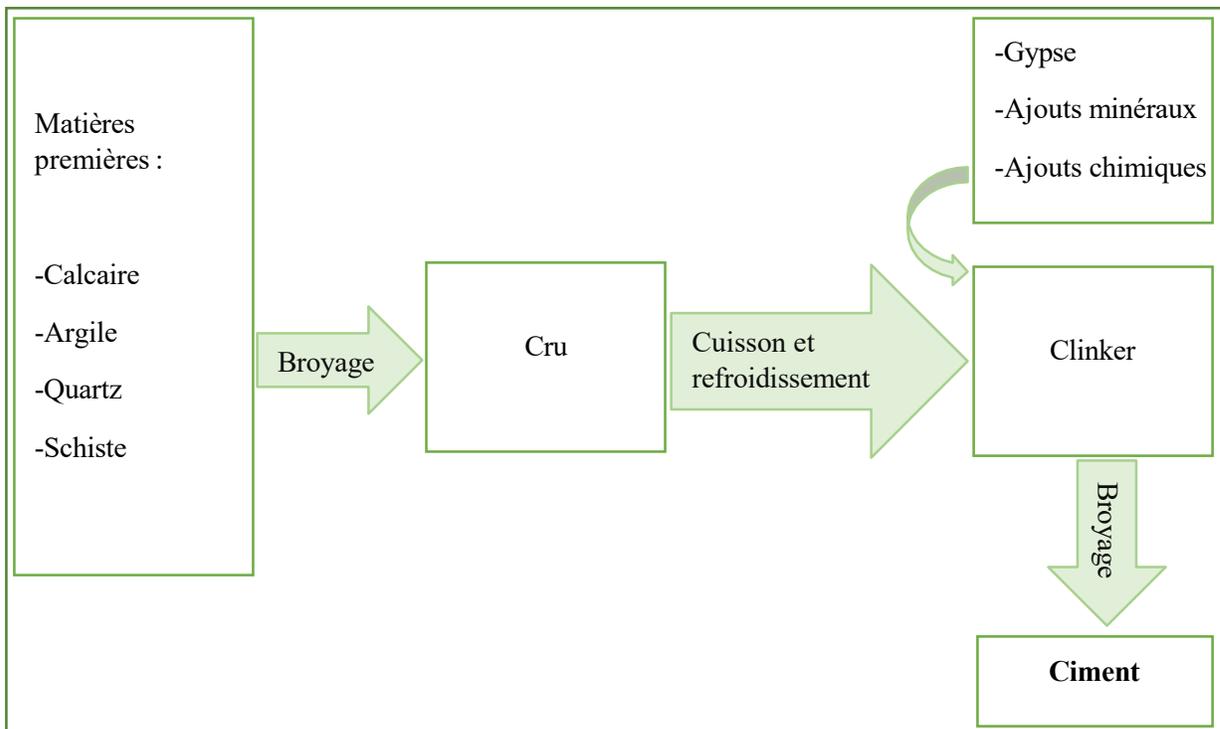


Figure 2. 1 : Processus de fabrication du ciment portland

Le ciment portland est composé principalement de quatre phases majeures :

- C3S ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) : Silicate tricalcique (45 à 65%)
- C2S ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) : Silicate bicalcique (15 à 25%)
- C4AF ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) : Alumino-ferrite tétracalcique (0 à 10%)
- C3A ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) : Aluminate tricalcique (0 à 15%)

Les variations de ces pourcentages ainsi que les pourcentages des phases mineurs dépendent du type de ciment portland en question. Lors de la mise en contact du ciment avec l'eau, commence le processus d'hydratation qui est responsable au durcissement et développement des résistances du mélange. L'évolution de l'hydratation est accompagnée

par un dégagement d'un flux de chaleur qui peut être mesuré à l'aide d'un calorimètre. La figure 2. 2 montre que l'hydratation du ciment est composée de quatre phases essentielles, présentées dans le tableau 2- 1.

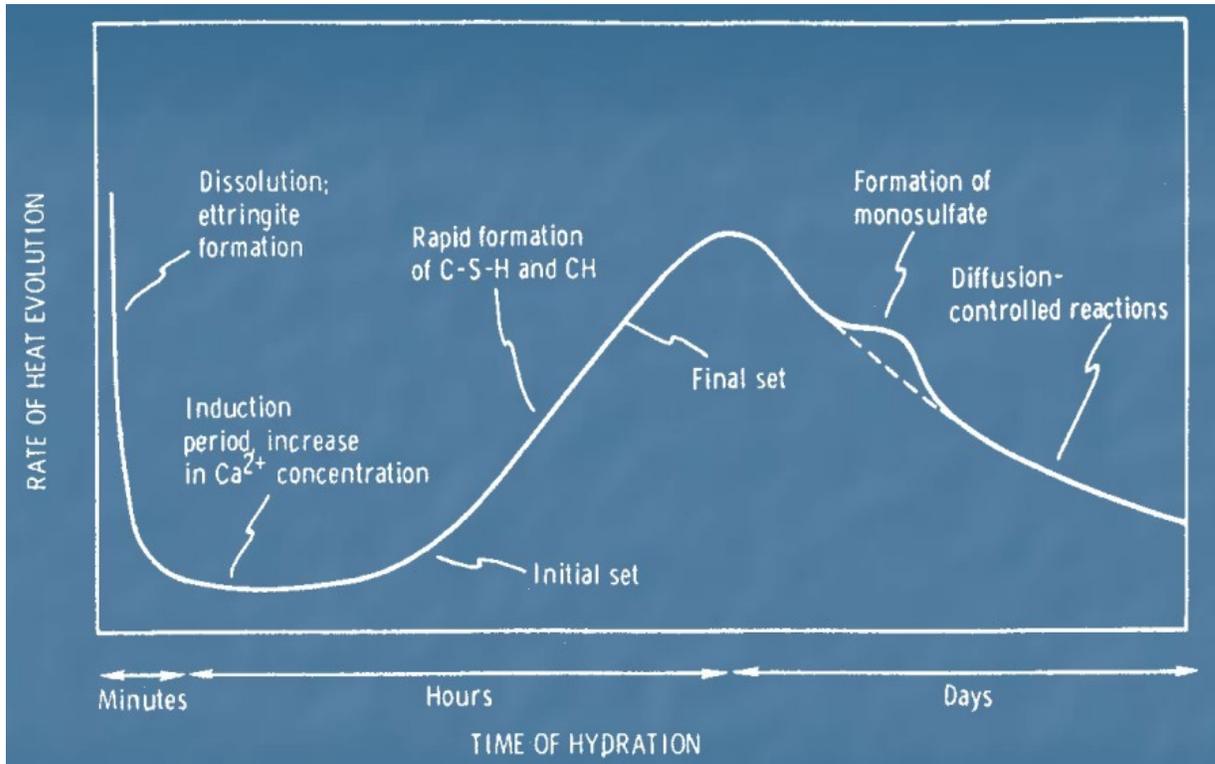


Figure 2. 2 : flux de chaleur d'hydratation du ciment portland (Tagnit-Hamou, 2014)

Tableau 2- 1 : Phases d’hydratation du ciment portland

Phase	Durée	Description
Phase 1	Quelques minutes	Une grande chaleur qui accompagne le début de formation des ettringites, ceci est causé par les premières réactions chimiques qui commencent dès le premier contact des particules de ciment avec l’eau.
Phase 2 (période dormante)	1 à 4 heures	Durant cette phase il y a peu d’activités chimiques et donc peu de chaleur dégagée.
Phase 3	8 à 12 heures	Début de prise à la suite du nouveau déclenchement des réactions et l’accélération de l’hydratation, cependant, les produits d’hydratation commencent à se former et relier les grains de ciment. Deux pics sont observés.
Phase 4	1 an	La pâte durcit et devient plus résistante, grâce aux produits d’hydratation qui occupent l’espace microstructural entre les grains.

L’ensemble des réactions chimiques qui se déroulent durant l’hydratation du ciment donnent naissance à des produits d’hydratation à l’origine des résistances développées au fur et à mesure du durcissement du mélange. Ces éléments peuvent être observés à l’aide d’un MEB (microscope électronique à balayage), il s’agit de gel de C-S-H (silicate de calcium hydraté), cristaux de portlandite, d’ettringite et de monosulfoaluminate.

- Le C-S-H (calcium silicate hydrate) est le produit principal d’hydratation, ce gel est quasiment amorphe, ayant la forme de très fines fibres visible par MEB illustré dans la figure 2. 3.
- La portlandite CH ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$, est le composant qui participe aux résistances à jeunes âges, il s’agit de la phase majeure d’hydratation, ayant la forme des feuillettes (figure 2. 4).
- L’ettringite, provenant des réactions entre les phases sulfate du ciment et les aluminates de calcium, ce sont des cristaux sous forme d’aiguilles distribuées autour des particules de ciment anhydres (figure 2. 5).
- Le monosulfoaluminate de calcium hydraté (Afm) qui sont des cristaux éparpillés sur les fibres de CSH, ayant la forme des plaquettes hexagonales tel que montré dans la figure 2. 6.

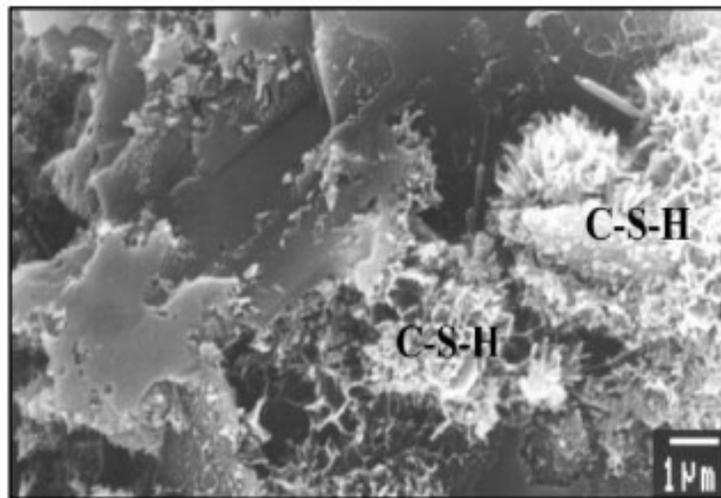


Figure 2. 3: C-S-H externe cristallisé par précipitation (Tagnit-Hamou, 2013)

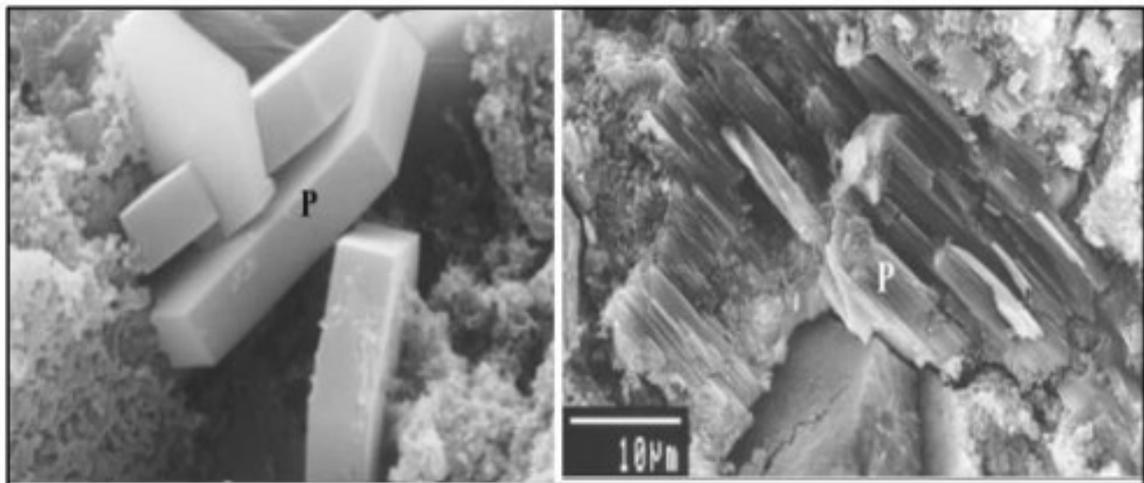


Figure 2. 4 : Cristaux de portlandite (Tagnit-Hamou, 2013)

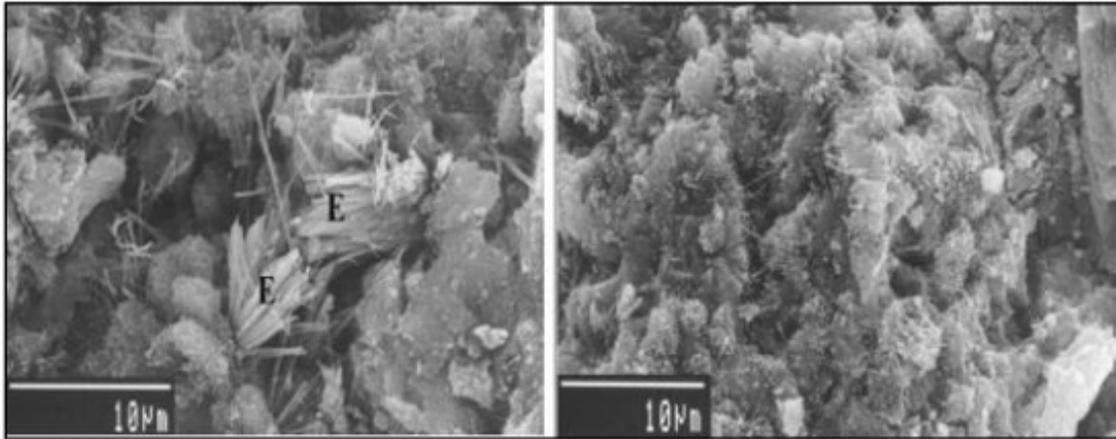


Figure 2. 5: Cristaux d'ettringite dans une pâte de ciment hydraté à l'âge de 3 jours (Tagnit-Hamou, 2013)

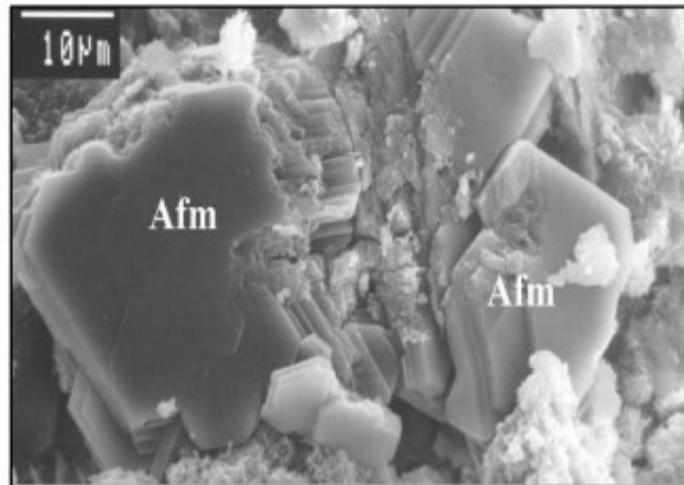


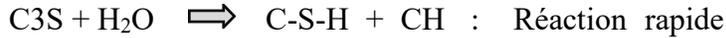
Figure 2. 6: Cristaux monosulfoaluminate (Tagnit-Hamou, 2013)

Les ajouts cimentaires :

Les ajouts cimentaires sont des composants (généralement des sous-produits industriels) utilisés en remplacement partiel ou en addition. Leur exploitation dans des matrices cimentaires permet d'améliorer certaines propriétés tout en gardant un volet économique et écologique. Il existe trois types d'ajouts, des pouzzolanes, des laitiers et des fillers (Tagnit-Hamou, 2014b). D'autres chercheurs essaient de créer des nouveaux ajouts à base des déchets, à titre d'exemple des résidus maritimes comme les coquillages (Adewuyi et al. 2015 ; Wang et al. 2019 ; Djebali et al. 2020 ; etc.), les carapaces de crustacés (Ben

- Les pouzzolanes :

Les pouzzolanes sont des éléments qui donnent naissance à des CSH en réagissant avec la portlandite et l'eau, selon la réaction suivante :



La réaction pouzzolanique lente se déroule à une température ambiante, le dégagement de chaleur qui accompagne cette réaction et les résistances développées sont également lents. Les résistances du béton en milieu acide peuvent s'améliorer à la suite de la consommation de la chaux par les pouzzolanes. En effet, la transformation des gros cristaux de CH en produit d'hydratation faiblement cristallisé qui remplissent les pores capillaires permet d'augmenter les résistances et l'imperméabilité des mélanges cimentaires par affinage de ces pores.

Les pouzzolanes peuvent être naturelles (cendres volcaniques, zéolite, tufs volcaniques) ou artificielles (fumée de silice, cendres volantes, metakaolin, écorces de riz calcinées, argile et schistes calcinés). Parmi toutes ces pouzzolanes, les plus connus et utilisés sont la fumée de silice et les cendres volantes. La fumée de silice est la plus récente dans les normes, c'est un sous-produit de fabrication du silicium et de différents alliages de ferro-silicium obtenu par la réduction d'un quartz très pur par le charbon dans un four à arc à 2000 °C. Les cendres volantes proviennent de la combustion des charbons dans les centrales thermiques, elles sont classées selon leur teneur en CAO en deux catégories, classes F et C (Tagnit-Hamou, 2014b).

- Le laitier de haut fourneau :

Le laitier est un sous-produit de l'industrie de fonte, il est obtenu à partir du charbon, d'un agent fondant, du minerai de fer et d'impuretés. L'effet du laitier sur la résistance commence à partir de 7 jours. Le taux de remplacement du ciment portland par le laitier peut aller jusqu'à 95%, mais le taux de substitution et la finesse affecte la qualité du béton.

Un taux qui dépasse 50% réduit la résistance à 24h et la quantité de chaleur significativement, augmente l'imperméabilité du mélange et améliore la résistance aux ions sulfates et à l'eau de mer, et diminue les risques de réactions alcalis-granulats (Tagnit-Hamou, 2014b).

- Les fillers calcaires :

Les fillers minéraux sont des matériaux presque inertes lorsqu'ils sont mis dans la matrice cimentaire. Ces matériaux sont obtenus par broyage, suivis ou pas d'un traitement. Cependant, ces particules fines, de même taille ou plus petites que le ciment, lorsqu'ils sont introduits dans le ciment, ils permettent d'obtenir la même quantité de produit cimentier

final, tout en réduisant la quantité de substances réactives dans la matrice. Ceci permet la réduction des gaz à effet de serre et de la pollution engendrée par les cimenteries. Par ailleurs, on utilise les fillers dans plusieurs industries pour des buts écologiques, techniques et économiques (John et al., 2018). L'utilisation d'un filler calcaire implique généralement une dilution physique du liant, causé par la formation des hydrates d'aluminates de carbone et du carbosilicate de calcium, d'où la réduction des résistances si on garde la même teneur en eau. Cependant, les normes ont limité les taux de remplacement mondial des différents ajouts, pour les fillers calcaires c'est 7% environ.

Les limites de pourcentages des fillers diffèrent selon les pays et les normes, elles sont en train d'augmenter au fil de temps surtout en Europe, à titre d'exemple, en France c'est jusqu'à 35% de substitution selon la norme (John et al., 2018). En Amérique du Nord, la limite adoptée du calcaire dans le ciment portland depuis 1983 c'est de 5% (CAN3-A5-M83).

2.2 Les sédiments de dragage

Les sédiments sont définis comme étant des particules fines issues de l'usure des roches qui décantent dans le fond. Ces sédiments peuvent être d'origine naturelle ou d'origine anthropique. Le prélèvement des sédiments du fond des cours d'eau et des bassins hydrauliques est appelé dragage et a pour but :

- ✓ D'aménager et nettoyer les aires portuaires, d'approfondir, ou d'entretenir certaines zones de navigation ;
- ✓ D'améliorer la capacité de déchargement des cours d'eau et d'éviter les inondations.
- ✓ De construire des ouvrages comme des barrages, des digues ou remblais ;
- ✓ De créer des fondations sous-marines ;
- ✓ De permettre l'emplacement des pipelines et des éléments immergés ;
- ✓ De récupérer les minéraux et les métaux précieux ;
- ✓ De maintenir la capacité de stockage en eau.

2.3 Gestion des sédiments dragués

Le tableau 2- 2 présente une estimation quantitative du volume des matériaux dragués durant les dernières années pour les grands ports du Québec.

Tableau 2- 2: Volume des matériaux dragués dans les ports du Québec (Safhi et al., 2019)

Ports	Périodes	Volumes totaux (m3)
Port de Québec	1969-1976	5 141 270
Port de Sorel	1970-1978	213 800
Port de Trois-Rivières	1967-1977	249 150
Port de Montréal	1956-1975	3 766 050

La gestion des sédiments dragués (sites de stockage) constitue un problème économique et écologique. D'une part, la mise en dépôt terrestre ou en mer de sédiments pollués, sans aucune protection du site, menace l'environnement initialement exempt de pollution. D'autre part, les solutions qui prévoient de protéger le site de dépôt des sédiments, par un confinement, sont assez coûteuses (Desrosiers et al. 2008).

Ainsi, les gestionnaires des opérations de dragage ont été amenés, depuis l'administration des conventions et des critères réglementant la gestion des sédiments (considérés comme des déchets), à trouver de nouvelles solutions écologiques. Donc la dépollution ou l'inertage des sédiments par des procédés de traitement se présente comme une alternative écologique prometteuse. Néanmoins, les coûts exorbitants des procédés de traitement ont incité les chercheurs et les industriels à recycler les sédiments en vue de rentabiliser cette solution.

Plusieurs chercheurs et industriels ont étudié la faisabilité d'incorporer les sédiments marins ou fluviaux dans différents matériaux de construction : matériaux cimentaires (mortiers, béton auto compactant), briques, matériaux routiers ou même dans la composition du ciment (Anger et al., 2014 ; Hayet et al. 2017 ; Safhi et al., 2019 etc.).

Parmi les différents modes de gestion, seuls deux modes ont été retenus : le rejet en eau libre et le dépôt terrestre. Ces deux modes représentent la très grande majorité des options choisies au Québec pour la gestion des sédiments de dragage. Les autres modes de gestion restant encore marginale à l'heure actuelle.

Le dépôt en eau libre concerne à lui seul 90 % du volume de sédiments dragués dans l'ensemble du système hydrique de la province (DDH Environnement limitée, 2003). De

plus, les projets de dragage supervisés par travaux publics et services gouvernementaux Canada (TPSGC) dans les secteurs des îles de la Madeleine et de la Gaspésie entre 1989 et 2008, soit 253 projets, ont tous suivi une gestion des sédiments soit par dépôt en eau libre, soit par dépôt terrestre (Desrosiers et al. 2008). La figure 2.7 synthétise les principales étapes de gestion du sable de dragage.

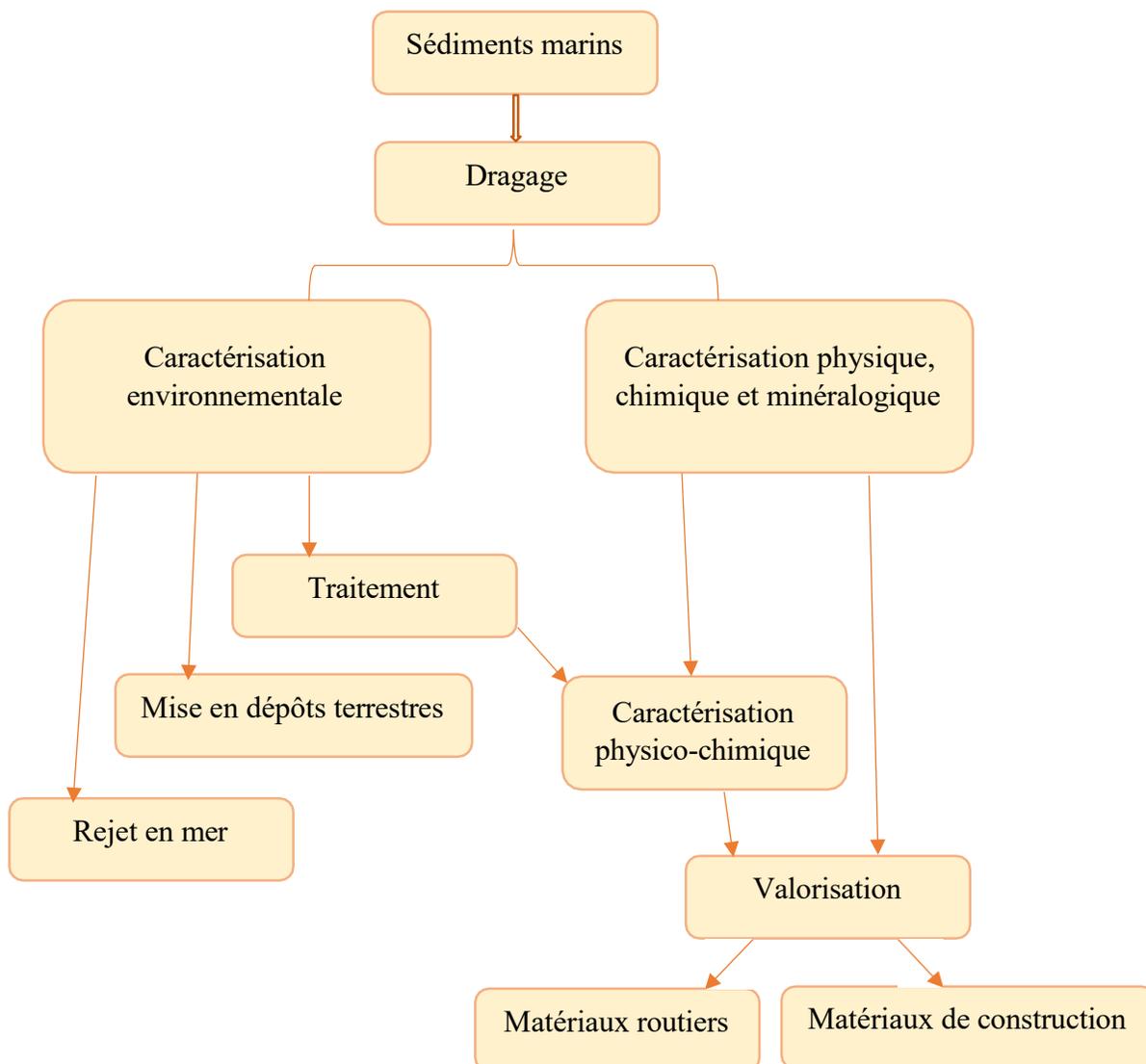


Figure 2. 7: Schéma synthétique des principales étapes et composantes de la gestion des sédiments (Bel Hadj Ali et al., 2013).

2.4 Aspect réglementaire

Les opérations de dragage résultent des sédiments qui doivent subir certaines exigences données par la politique de protections de l'environnement au Québec (Gamsonré, 2014), il s'agit de quelques règlements environnementaux qui permettent de choisir une méthode de gestion des résidus dragués.

Au Québec, le ministère de l'environnement du Québec en collaboration avec le centre Saint-Laurent, a défini quelques critères pour évaluer la qualité des sédiments, dans le cadre de la gestion du fleuve de Saint-Laurent (Rieussec et al., 2008).

2.5 Valorisation des sédiments de dragage

Les sédiments de dragage peuvent être extraits des ports maritimes, voies de navigation ou amont des barrages, etc. Par la suite, ils sont déposés dans les fonds des mers, dans le cadre d'une opération de dragage ayant pour but de :

- ✓ Construire des fondations sous-marines ;
- ✓ Récupérer les métaux précieux et les minéraux ;
- ✓ Bâtir des structures maritimes (barrages, digues, remblais, etc.) ;
- ✓ Conserver la capacité de stockage en eau ;
- ✓ Mettre en place des éléments immergés et des pipelines ;
- ✓ Éviter les inondations et optimiser la capacité de déchargement des cours d'eau.

D'une manière générale, la valorisation consiste au réemploi, recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie.

Si les sédiments ne sont pas dangereux, ils peuvent être valorisés dans l'une de ces quatre filières (Zentar et al. 2009).

- ✓ L'agriculture pour l'amendement des sols : la valorisation agricole a pour objectif l'amélioration de la structure du sol ou de ses qualités fertilisantes. Cette filière est possible si les sédiments ne forment pas de danger sur la santé ni sur l'environnement, mais plutôt présentent un intérêt agronomique.
- ✓ La réhabilitation de sites naturels (habitats aquatiques ou terrestres) : si des études prouvent que les sédiments sont inertes ou ne contiennent pas de mauvais impact sur la santé et l'environnement, on pourra l'exploiter pour aménager des zones de loisirs ou des espaces naturels.
- ✓ Le génie civil et les travaux publics : dans ce domaine, il existe plusieurs études qui portent sur les sédiments valorisables en technique routière (sous réserve d'une conformité à certaines prescriptions géotechniques et environnementales) (Hayet, et al., 2017).
- ✓ Plusieurs filières de valorisation ont été développées à la suite d'études paramétriques, ces études mènent à trouver une nouvelle formulation du matériau avec le bon pourcentage de sédiments incorporé. En fait, les sédiments ont permis de substituer dans quelques recherches, des argiles, des sables ou des matières premières du clinker, avec des pourcentages allant de 0% à 100%.

La valorisation des sédiments de dragage touche plusieurs domaines tels que les techniques routières, les granulats artificiels, le secteur de briqueterie, la fabrication de mortier et de béton, etc. D'autres techniques de valorisation de sédiments de dragages sont décrites ci-dessous :

➤ Valorisation en techniques routières :

Il existe différents exemples de valorisation de sédiments en technique routière en France. En 2005, à Dunkerque (Nord) une planche expérimentale routière utilisant des sédiments a été mise en place (Rozière et al., 2015). Puis en 2012 une route expérimentale de 600 mètres, dite route du quai « Freycinet 12 » a été construite (Sedilab et al., 2011 ; Anger et al., 2014). Cette route conçue pour supporter un trafic moyen de 100 poids lourds par jour et d'une durée de vie de 15 ans, sa construction a nécessité l'utilisation de 450 m³ de sédiments secs soit 1 800 m³ de sédiments dragués (Herman et al., 2014). En Basse-Normandie (port de Bessin), une plateforme expérimentale a également été réalisée à partir de sédiments marins (Silitonga E., 2010). En Lorraine (Dombasle), une route test de 100 m² a été réalisée en 2005 à l'aide de sédiments. Une piste cyclable de 35 km a été réalisée à proximité du Mont-Saint-Michel à l'aide de 70 000 m³ de sédiments carbonatés (tangue) (Anger et al., 2014) et est présentée à dans la figure 2. 8.



Figure 2. 8 : Piste cyclable du Mont-Saint-Michel élaborée à l'aide de 70 000 m³ de sédiments (Anger et al., 2014)

➤ Valorisation en remblaiement de carrières :

Pour l'optimisation des accès maritimes, plusieurs voies de valorisation des sédiments dragués en fonction de leurs natures ont été élaborées par HAROPA-Port de Rouen, Seine-Maritime, Normandie, France. Cependant, de 2000 à 2008, l'opération « les tas dans les trous », a élaboré environ un million de m³ de sédiments de dragage dans le remblayage d'une ancienne ballastière de carrières appelée ballastière d'Yville sur Seine entre Rouen

et Tancarville, en aval de Rouen (CBN filiale Eurovia) présenté dans la figure 2. 9. À partir de là, la valorisation des sédiments marins comme étant un remblaiement est déclaré dans la charte 2001/2011 du PNR des Boucles de Seine Normande (Hayet, A. et al., 2017).

On peut citer le projet Predis comme un autre exemple, qui vise à utiliser des sédiments de dragage issus du port de Gravelines au nord de France, en tant que coulis pour combler des réseaux désaffectés à titre d'exemple les réseaux de charbonnage, d'où la valorisation de ces sédiments (Sedilab et al., 2011).



Figure 2. 9 : Vue aérienne du site de remblaiement expérimental de la ballastière d'Yville sur Seine en France (Journal Nature, 2013)

➤ Valorisation en génie côtier :

Dans le but de valoriser des sédiments marins, les laboratoires de l'École des mines, SITA Nord et Néo Éco ont utilisé des sédiments fluviaux et des matériaux minéraux recyclés, pour confectionner un béton pour des mobiliers urbains (jardinière, bancs, bordures de trottoir, support de vélo modulable, balconnières...). Des brises vagues ont été également fabriquées en 2013 pour la digue des Huttes au port de Dunkerque, basé sur les sédiments provenant du chenal de Broucqaire et Darse 6, France. Une autre réalisation dans le même contexte, c'était les acropodes de Toulon, confectionnés aussi à base des sédiments dragués (Hayet, et al., 2017). Voici ces différents projets illustrés dans la figure 2. 10 :



Acropodes

Blocs béton / brises vagues

Support de vélo modulable

Figure 2 : 10: Exemples de mobilier urbain élaboré à partir de sédiments
(Hayet et al. 2017)

➤ Valorisation dans le secteur de briqueterie :

En général, les plus anciens et en même temps les plus avancés travaux de valorisation des sédiments de dragage dans la briqueterie, ont été élaborés en Allemagne. À titre d'exemple, l'entreprise Hanseatentstein Ziegelei GmbH (HZG), et après plus de 10 ans de recherche dans ce domaine, elle a pu fabriquer des briques contenant jusqu'à 70% de sédiments dragués provenant du port de Hambourg et traités dans la plate-forme « METHA » (Detzner et al., 1998), en remplacement de l'argile ordinaire. Cependant, ils ont construit une usine pour ces briques, qui a été mise en service en 1996. Cette firme a permis de diminuer le volume de sédiments de dragage (30000 tonnes de sédiments dans 4 ans), et de persévérer les ressources limitées en argiles et elle a donné naissance à des briques de qualité presque similaire à celle des briques ordinaires ou traditionnelles (Anger, 2014). Entre autres, le côté négatif de ce projet est le coût de la fabrication de ce produit, ainsi que l'acceptabilité sociale (convaincre les consommateurs que ce type de brique est d'une qualité aussi bonne que les briques ordinaires même s'il provient de la valorisation d'un déchet).

2.5.1 Sédiments en substitution des granulats

Les sédiments de dragages présentent une bonne alternative pour substituer les granulats naturels. Plusieurs recherches ont été effectuées afin d'élaborer des bétons avec des sédiments de dragage (Amar, M. et al., 2016 ; Tran N., 2009 ; Zentar R. et al., 2009 ; Safhi et al., 2019 ; Achour, R., 2013 ; etc.). En effet (ZRI et al, 2010) ont étudié la faisabilité des bétons avec des sédiments de dragages déposés à la Capitainerie Ouest du Port de Dunkerque pour confectionner un béton de sable. Ces travaux ont abouti à un béton à base de sable de dragage (avec des pourcentages de remplacement allant jusqu'à 20%) contenant des ajouts cimentaires (le laitier de haut fourneau, la fumée de silice et les cendres volantes). Cependant, le béton de sable obtenu présentait une bonne maniabilité (fluide à plastique) et des résistances mécaniques performantes. Ceci indique la fiabilité d'un béton

de sable de dragage, et aussi l'intérêt d'impliquer des ajouts cimentaires dans les formulations contenant du sable de dragage.

2.5.2 Sédiments en substitution du ciment

(Zhao et al. 2018) ont étudié l'effet de l'utilisation de 10 %, 20 % et 30 % de remplacement du ciment de sédiments non contaminés sur les propriétés des mélanges de mortier et de béton. Les résultats rapportés ont montré que les sédiments séchés et finement broyés peuvent être utilisés comme substituts partiels du ciment à hauteur de jusqu'à 20% sans nuire aux propriétés mécaniques des mélanges. De plus les chercheurs (Zhao et al., 2018) ont étudié l'effet du sable de dragage non contaminé, séché et broyé de provenance du port Dunkerque (en France). Les chercheurs ont substitué partiellement le ciment par le sable de dragage lors de la formulation des mortiers et bétons. Leurs résultats ont montré une meilleure résistance à la flexion des mortiers formulés avec du sable de dragage comparativement à d'autres mortiers contenant des fillers calcaires.

Certaines études de valorisation de sédiments de dragage dans les matrices cimentaires ont détaillé les traitements que peuvent subir ses sédiments. À titre d'exemple (Benzerzour et al., 2017) ont utilisé des traitements physiques en broyant puis séparant les sédiments afin d'obtenir des fractions variées par voie humide (250 µm et 120 µm) et voie sèche (1mm, 250 µm, 120 µm) (Benzerzour et al., 2017). L'étape suivante était d'activer chimiquement les sédiments par décarbonatation ou par activation pouzzolanique du matériau en appliquant un traitement thermique à 650°C, 750°C et à 850°C durant différentes périodes d'une heure jusqu'à trois heures. Les résistances à la compression ont été mesurées à 7, 14, 28 et 60 jours en utilisant le ciment CEM I 52.5 N dans les mortiers. Les taux de remplacement du ciment étaient de 0, 8 et 15 %. Plusieurs paramètres ont été étudiés dont les plus importants étaient le taux de substitution, la finesse, la température et le temps de calcination. Le meilleur mélange était celui de 8 % de sédiments bruts broyés et tamisés à 120 µm ayant subi un traitement thermique d'une heure à 850°C. Ce mélange a obtenu une résistance à la compression à 28 jours de 63 MPa, qui était supérieure à la référence (56 MPa). Quant aux sédiments bruts, compte tenu de leurs performances par rapport à leur coût de transport et de traitement modéré ils peuvent être incorporés en tant qu'ajouts cimentaires dans les mortiers (Benzerzour et al., 2017).

Dans un autre contexte des sédiments dragués, d'autres chercheurs ont travaillé sur le béton auto- plaçant (BAP) ou "self-compacting concrete (SCC)". En effet (Safhi et al., 2019), ont formulé trois mélanges différents de SCC avec un remplacement en masse de ciment de 0%, 10%, et 20% par des sédiments traités. Les composites formulés ont été soumis à différents régimes de durcissement et une large campagne de caractérisation a été accomplie.

Les résultats obtenus ont montré que les mélanges SCC optimisés présentaient des caractéristiques d'auto-consolidation adéquates. La taille des particules et l'activité

chimique élevée des sédiments ont conduit à l'affinement des micropores, et à l'augmentation de l'humidité et de la température. De plus, un raffinement des micropores, une densité accrue, et une microstructure améliorée et une réduction des microfissures des mélanges SCC étudiés ont été observés. D'autre part, l'utilisation d'un maximum de 20% de sédiments traités a permis d'obtenir une résistance à la compression de 66 ± 1 MP.

2.5.3 Coquillages et sédiments en substitution du ciment et des granulats

Dans un contexte semblable (Ez-zaki et al., 2016) ont testé les performances d'un béton à base des coquilles d'huîtres et des sédiments marins. L'idée était de préparer des mortiers en utilisant les sédiments dragués et la poudre des coquilles d'huîtres en remplacement du ciment à 6, 16 et 33%. Les chercheurs ont testé la perméabilité au gaz ainsi que les résistances à la compression et à la carbonatation accélérées, etc. Ces mortiers réalisés en exploitant des résidus de pêche sont faisables et ont de bonnes performances mécaniques et hydrauliques (Ez-zaki et al., 2016).

Dans la même thématique, une étude réalisée par (Eziefula et al., 2018), qui se porte sur la substitution des granulats de béton par les résidus de coquillages. Des propriétés mécaniques, physico-chimiques et de durabilité ont été analysés, aux différents états, frais et durci. Une réduction au niveau des propriétés physiques et mécaniques a été constatée à cause de l'ajout des coquillages. En récapitulation, le remplacement partiel jusqu'à 50 % des granulats grossiers par des coquillages, donne un béton de poids ordinaire pour des applications structurelles à faible résistance ou bien des applications non structurelles (Eziefula et al., 2018). D'autres chercheurs ont travaillé sur la valorisation des sédiments de rivières. En effet (Beddaa et al., 2020) ont étudié la possibilité de l'utilisation des granulats ou sables grossiers des sédiments de rivière en remplacement partiel des granulats ordinaires. L'analyse de la composition de ses sédiments a montré qu'ils contiennent 30 % de sable qui pourra substituer les granulats dans un béton. Cependant, les sédiments ont été séparés en trois lots : fines, sables et granulats grossiers. Lorsqu'ils ont substitué en volume 30 % des granulats conventionnels par des granulats de sédiments ayant de faibles teneurs en limon et matière organique, ils ont remarqué un retard de prise d'environ trois heures lors de l'hydratation de la matrice cimentaire, une évolution de 15% de la contrainte en retrait, ainsi qu'une réduction de la résistance en compression de 10 %. On en déduit que ces sédiments peuvent agir comme des fillers dans la matrice cimentaire, en gardant des taux de substitution mineurs surtout dans les bétons perméables ou en général les bétons qui nécessitent beaucoup de fines (Beddaa et al., 2020).

Pour des productions de matériaux de construction à base de géopolymères, des chercheurs ont lancé une approche multidisciplinaire à l'université italienne Federico II de Naples (Lirer et al., 2017). Des cendres volantes industrielles des centrales électriques situées à la région de sud italien ont été exploitées avec les sédiments qui proviennent du port de Naples. Pour la fabrication des géocomposites de références (inertes), ils ont utilisé des

sables siliceux. Les résultats de cette recherche montrent l'efficacité des cendres volantes dans l'amélioration des propriétés mécaniques des sédiments de dragage, il en résulte des géocomposites ayant de bonnes propriétés mécaniques. La microstructure observée dans les géopolymères à base de sédiments de dragage était plus compactée et meilleure que celle des géopolymères de référence. En revanche, le module d'Young des échantillons de références était supérieur à celui des matériaux composites à base de sable dragué. Cette étude a mené à des résultats qui encourage à avancer et valoriser les sédiments dragués pour la fabrication des géocomposites (Lirer et al., 2017).

(Limeira et al. 2012) ont valorisé le sable de dragage en provenance du port Saint-Charles de Rapita, Tarragone, Espagne. Les résultats de cette étude ont montré que la composition et le degré de contamination du sable dragué dépendent de son emplacement. De plus, les chercheurs ont enregistré une énorme perte de fluidité pour les bétons contenant 50 % du sable de dragage utilisé, toutefois, les propriétés mécaniques ont été pareil pour les deux types de bétons formulés.

D'autres chercheurs ont étudié la faisabilité des bétons routiers à partir de sable de dragage. À titre d'exemple, en Tunisie (Ben Othman et al. 2014) ont utilisé deux types de sable de dragage dans le béton de sable compacté au rouleau pour le corps de chaussées, avec des pourcentages respectifs de 60% et 40%. Dans cette étude, les chercheurs ont utilisé deux types de sables dont le premier était en provenance du port de la Goulette-Radés (c'est le port ayant la quantité majeure de sédiments tunisiens, et les moins contaminés sans traitements). L'autre sable provient de la carrière de Djebel Oust située au nord de la Tunisie. Des essais de lixiviation ont été réalisés en vue d'étudier le risque de lixiviation des éléments toxiques. Les résultats trouvés ont respecté les exigences des normes en vigueur et sont présentés dans le tableau 2- 3.

Tableau 2- 3 : Résultats de l'essai de lixiviation (Ben Othman et al., 2014)

Élément	Cadmium	Cuivre	Plomb	Nickel	Zinc	Chrome	Arsenic	Mercuré
Quantité (mg/l)	<0,005	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,01	<0,0002
Limite (mg/l)	0,005	0,5	0,1	0,2	5	0,5	0,05	0,001

De plus, les résultats obtenus ont montré que les bétons formulés ont des résistances mécaniques presque similaires aux bétons conventionnels.

(Tang & Cui et al., 2017) ont travaillé avec des sables dragués en provenance de deux différents ports locaux (SD-1 et SD-2). Ils ont lavé quelques échantillons à l'eau douce durant 60 minutes dans une cuve, pour réduire la quantité de sel. Les mélanges ont été confectionnés en utilisant du sable ordinaire, du sable dragué lavé et non lavé, pour

comparer. Les essais réalisés dans cette étude étaient : la résistance à la compression uniaxiale à plusieurs âges (7, 28 et 56 jours), le module d'élasticité ainsi que la résistance en traction à 28 jours.

Les résultats récoltés (tableau 2- 4) montrent bien que la résistance à la compression à 56 jours du béton à base du sable de dragage a dépassé celle du béton conventionnel de 2 à 20 %. Quant à la résistance à la traction du béton contenant le SD-1 (lavé ou pas), était inférieure à celle du béton normal, de 5 %, tandis que pour le béton de sable SD-2, elle était supérieure à celle du béton ordinaire d'environ 22 %. Le module d'élasticité était compris entre 27,0 et 28,5 GPa (peu de variation).

Pour la teneur en chlorure, elle a augmenté comparativement aux échantillons de sable ordinaire. Elle était plus élevée dans les échantillons de sable dragué non lavé de 180 à 375 fois, et dans les échantillons de sable SD-2 dragué lavé de 35 fois. Ceci prouve l'effet positif du lavage prolongé sur la réduction de la teneur en chlorure. Par ailleurs, on constate l'efficacité du lavage des sédiments de dragage par rapport au risque de corrosion des armatures associée aux ions chlorures.

Tableau 2- 4: Teneur en chlorure des sables et propriétés mécaniques du béton à l'état durci (Tang & Cui et al., 2017)

Sable utilisé	Teneur en chlorure (%)	Résistance à la compression f_c			Résistance à la traction f_t	Module d'élasticité (GPa)
		7 jours	28 jours	56 jours		
Sable ordinaire	0,006	32	44	46	3,35	27,8
SD-1-NL	1,080	33	46	47	3,30	27,5
SD-1-L	0,036	31	43	48	3,20	27
SD-2-NL	2,250	40	52	56	3,95	28,5
SD-2-L	0,214	38	51	53	3,9	28,2

2.6 Les carapaces de crustacés

Un des plus importants résidus maritimes qui proviennent de la transformation des produits de pêche des Îles-de-la-Madeleine est les carapaces de homard et crabe. La figure 2. 11 présente la composition des MR produites par le secteur de la transformation des produits maritimes.

Composition des MR produites par le secteur de la transformation des produits de la mer

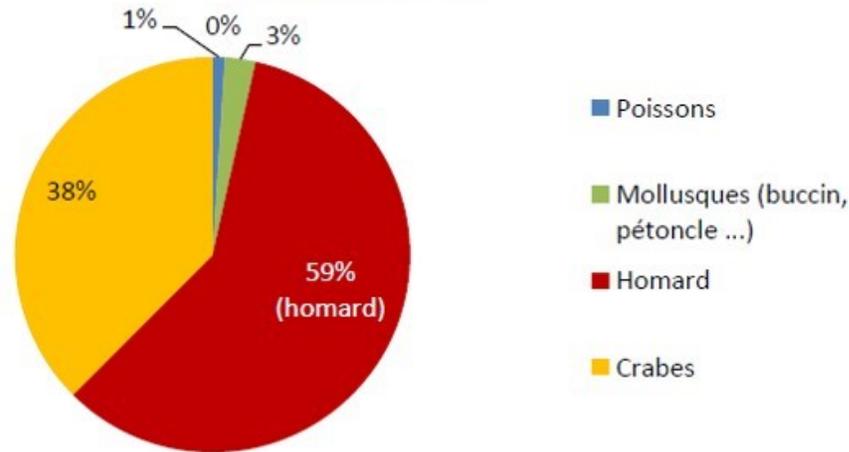


Figure 2. 11: Composition estimée des apports de MR putrescibles issus des industries de transformation des produits de la mer de 2008 à 2010 (Durbecq et al., 2012)

2.6.1 Le Homard

Les homards sont répartis un peu partout dans le monde. Cependant, de grandes quantités de homard sont localisées surtout au Canada (34% de la production mondiale), puis aux États-Unis (29%) et en Australie (11%) (Tselikis et al., 2006). Toutefois, la carapace du homard est considérée comme déchets et par conséquent, elle est jetée dans la nature, on doit donc penser à leurs valorisations. D'un point de vue quantitatif la production mondiale du homard en 2004 était de l'ordre de 165 367 tonnes ce qui correspond à une valeur 3.32 milliards de dollars sur le marché mondial (Holmyard et Franz, 2016). Avec le développement des méthodes de pêches et d'élevage, la production mondiale du homard a atteint 304 000 tonnes en 2012 (Sabatini et al., 2015).

2.6.2 Les scénarios de valorisation possibles

Légaré-Bilodeau et al., ont identifié des scénarios de valorisation des résidus marins des IDM, les résultats de cette étudesont illustrés dans le tableau 2- 5.

Tableau 2- 5 : Liste des scénarios de valorisation identifiés pour les carapaces de homard et de crabe (Légaré Bilodeau, 2011)

Matières critiques	Scénarios de valorisation
Carapaces de homard et de crabe	Enrichisseur de moulée pour animaux
	Bioséchage
	Biométhanisation
	Compostage
	Poudres et carapaces sèches
	Gazéification
	Incinération
	Pyrolyse
	Chitine

Ces scénarios de valorisations peuvent être expliqués de la façon suivante :

- Enrichisseur de moulée pour animaux : tel que son nom le décrit, en effet, on peut utiliser les matières résiduelles comme étant des matériaux enrichisseurs de moulée pour animaux (Bilodeau et al., 2011).
- Le bioséchage : c'est un processus qui a pour but de minimiser la biodégradation et la teneur en eau (qu'on trouve toujours dans les résidus marins), à titre d'exemple, le BÉFOR (bioénergie fabriquée à partir de matières organiques résiduelles) qu'on pourra utiliser en tant que combustible (Bilodeau et al., 2011).
- La biométhanisation est un autre processus qui sert à décomposer les matières organiques dans un milieu sans oxygène. Ceci nous permet d'avoir un biogaz qui peut être valorisé énergétiquement, et des matières organiques résiduelles qu'on pourra utiliser en tant que compost, fertilisant, etc. (Bilodeau et al., 2011).
- Le compostage est un processus de transformation des déchets organiques en présence d'eau et d'oxygène par le biais de micro-organismes. Le compost améliorer la qualité du sol et il peut aussi être utilisé pour les plantes d'intérieur. Selon (Stewart et al., 2010), on peut obtenir un très bon compost du point de vue de la qualité en mélangeant un tiers de carapaces de crabe et deux tiers de composés carbonés comme les copeaux de bois (Bilodeau et al., 2011).
- Les poudres et carapaces sèches proviennent bien évidemment d'une procédure de broyage, cuisson et séchage à une température entre 200 et 400 °C des carapaces de crustacés (Stewart et al., 2010). Ces poudres sont connues par leurs valeurs nutritives, ce qui rend ces poudres utiles dans le domaine de l'aquaculture et aussi en tant qu'engrais dans les aromes asiatiques. En génie civil, et précisément dans la thématique de notre projet, on étudie la possibilité de l'utilisation de ces poudres dans les pâtes cimentaires ou les mortiers.
- La gazéification est en fait un système de traitement qui valorise énergétiquement les matières résiduelles. Ce procédé a des produits qui peuvent être utilisés en tant que source d'énergie externe, recyclés ou valorisés dans le domaine de construction

(Bilodeau et al., 2011).

- L'incinération a pour principe de brûler les matières résiduelles et valoriser la chaleur de combustion générée. Les cendres qui en résultent peuvent être utiles dans certains cas en tant que sous-couche routière, matériau de remblais, ou amendement (Légaré Bilodeau, 2011).
- La pyrolyse est un processus de décomposition de la partie organique des matières résiduelles, afin de produire un syngaz, qui peut être valorisé sous forme d'électricité ou de vapeur.
- La formule chimique de la chitine est $C_8H_{13}NO_5$, elle se trouve surtout dans les carapaces de homard, crabe et crevette, d'une valeur de 20 à 30 % (Marquis-Duval et al., 2008). Ces carapaces vont subir un broyage, une déminéralisation en milieu acide, et une protéinisation en milieu basique. La chitine est utilisée dans beaucoup de produits dérivés que ce soit du domaine de médecine ou d'agroalimentaire, grâce à ses propriétés d'agent antifongique, agent antibactérien et stimulateur immunitaire, etc. (Stewart et al., 2010). L'implication de la Chitine et d'autres biopolymères dans des mortiers et bétons, pour améliorer leurs propriétés physiques et caractéristiques de lixiviations, a été étudiée par M Olivia et al. en 2018 (M Olivia et al 2018).

2.6.2.1 Chitosan et chitine

De nombreux travaux de recherche ont montré que la chitine existe dans les carapaces de crustacés, et dans beaucoup d'autres biopolymères. L'effet de cette molécule a été étudié lors de son association à un composite cimentaires (Olivia et al., 2018 ; Lyazzat et al., 2020 ; Kim, 2004 ; José, 2021 ; Vyšvaril et Zizlavský., 2017 ; Bezerra et al., 2011 ; Azmana et al., 2021 ; Yadav et al., 2019 ; Lasheras-Zubiate et al., 2012).

À titre d'exemple (Olivia et al., 2018) ont étudié l'amélioration des propriétés physiques et des caractéristiques de lixiviation dans les mortiers et les bétons grâce aux biopolymères (Olivia et al., 2018). Un biopolymère est l'ensemble de monomères naturels synthétisés par des plantes ou d'autres organismes. Parmi les biopolymères qui ont été étudiés dans cet article c'était le chitosan, la gomme xanthane et la gomme guar qui sont de bons viscosants (M Olivia et al 2018). En effet, le chitosan est dérivé de la chitine par un processus connu sous le nom de désacétylation (Kim, 2004). La chitine provient des carapaces de crustacés (crabes et homards) (Olivia et al., 2018). La figure 2. 12 suivante montre la structure chimique du chitosan et de la chitine.

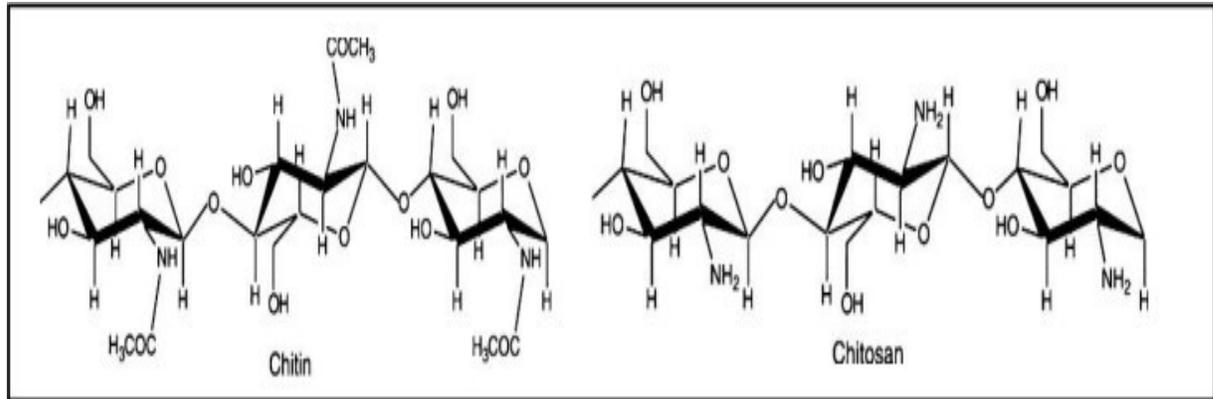


Figure 2. 12: Structure chimique de la chitine (à gauche) et du chitosan (à droite)
(Mohanasrinivasan et al., 2013)

Une étude menée par (Lasheras-Zubiate M. et al., 2012) a montré que le chitosan ajouté au mortier contenant des métaux lourds Pb, Cr et Zn conduit à réduire l'impact négatif sur l'environnement. Il s'agit d'un processus connu sous le nom d'encapsulation ou d'immobilisation des métaux lourds dans un mortier. Les résultats de l'expérience ont montré que l'ajout de chitosan améliore les caractéristiques rhéologiques, mécaniques et de lixiviation du mortier. Les résultats du test d'affaissement indiquent que le chitosan réduit l'impact délétère de l'encapsulation des métaux lourds (Pb et Cr) sur les caractéristiques de maniabilité du mortier à l'état frais. L'ajout de chitosan neutralise l'influence de l'encapsulation des métaux lourds sur le temps de prise du mortier, mais n'affecte pas de manière significative la caractéristique de rétention d'eau du mortier. Les résultats de l'analyse DRX ont également montré que les métaux lourds n'étaient pas simplement encapsulés dans le système de matrice du mortier ; au contraire, ils ont formé de nouvelles structures de silicate et d'aluminosilicate qui ne sont pas rapidement libérés des mortiers (Lasheras-Zubiate et al., 2012).

Les métaux lourds encapsulés dans le mortier peuvent être libérés dans un milieu liquide spécifique. Ce processus est appelé lixiviation. Les résultats des tests de lixiviation ont montré que le système de mortier encapsule efficacement les métaux lourds. La lixiviation cumulée de Pb et Zn au 64^e jour est de 58 mg/m² et 15 mg/m², ce qui est inférieur à la valeur maximale autorisée de 400 mg/m² et 800 mg/m², respectivement pour Pb et Zn. Pour le Cr, la valeur de rétention est plus faible (70-75 %) en raison de la formation de composés chromatiques plus faibles que les composés silicatés formés par le Pb et le Zn. D'autre part, l'ajout d'autres types de chitosan produit une valeur de rétention plus faible par rapport aux échantillons de mortier sans chitosan. Ainsi, on peut conclure que l'ajout de chitosan, de gomme de xanthane et de gomme de guar est capable de modifier et d'améliorer les caractéristiques rhéologiques, mécaniques et de lixiviation des mortiers qui encapsulent les métaux lourds (Olivia et al., 2018).

Le développement rapide de l'industrie de la construction a récemment attiré l'attention des ingénieurs sur les besoins de durabilité et l'utilisation de matériaux respectueux de l'environnement. Les biopolymères renouvelables, durables et biodégradables ont un grand potentiel pour être utilisés comme adjuvants dans les mélanges de mortier et de béton. Des études antérieures ont montré que l'utilisation de chitosan, de gomme de xanthane et de gomme de guar comme adjuvant améliore les propriétés des mortiers d'encapsulation des métaux lourds. L'ajout de chitosan neutralise l'impact négatif de l'encapsulation des métaux lourds sur les propriétés du mortier, telles que la maniabilité, le temps de prise et la résistance à la compression. Les caractéristiques de réticulation entre la gomme de xanthane et la gomme de guar (+ acide borique) dans le système de matrice du mortier augmentent la résistance à la compression du mortier jusqu'à 30% et réduisent la caractéristique de lixiviation cumulative des métaux lourds à moins de 0,001 mg/L. Le lignosulfonate, en tant que plastifiant, améliore la maniabilité du mortier à l'état frais. L'ajout d'éthers de cellulose dans le mélange de mortier améliore la capacité de rétention d'eau du mortier frais jusqu'à 98,8 %. Sur la base des faits mentionnés ci-dessus, on peut résumer que l'utilisation de biopolymères améliore certainement les caractéristiques physiques et de lixiviation du mortier et du béton (Olivia et al., 2018).

Une étude réalisée par (José, 2021) présente les résultats préliminaires d'un nouvel agent modificateur de la viscosité basé sur un biopolymère (chitosan) trouvé dans les résidus de l'industrie de la pêche. Les effets du produit ont été testés dans des pâtes de ciment au moyen d'essais d'écoulement typiques et de mesures rhéologiques. Le nouvel adjuvant favorise une augmentation de la viscosité plastique et de la limite d'élasticité des pâtes de ciment fluides, ce qui permet d'obtenir des mélanges stables et fluides (José, 2021).

Une nouvelle solution polymérique basée sur les déchets de l'industrie de la pêche a été présentée comme un agent alternatif de modification de la viscosité. L'utilisation de techniques rhéologiques et de techniques dites traditionnelles s'est avérée appropriée lorsqu'elle est combinée pour l'évaluation des effets du Biopolymère (BP) dans les pâtes de ciment. Les limitations de l'équipement dans les tests rhéologiques ont été compensées par les autres méthodes de test, et les résultats ont montré la même tendance de comportement dans les deux méthodes. L'ajout de BP dans les mélanges jusqu'à un dosage de 0,2% a montré le comportement attendu d'un modificateur de viscosité. L'augmentation de la viscosité plastique et de la limite d'élasticité est des caractéristiques souhaitables lorsqu'il s'agit de béton autoplaçant. Cela signifie que le BP pourrait être particulièrement bénéfique pour la production de compositions de béton très fluides, mais stables ; de plus, le nombre de matériaux de remplissage pourrait être réduit. Avec des dosages supérieurs à 0.2%, les effets épaississants étaient très prononcés si l'on vise la production d'un mélange autonivelant. Cependant, le comportement présenté dans les mélanges avec des dosages de 0.3% et 0.5% (plus forte réduction de l'étalement de l'écoulement, mais pas beaucoup de changement dans le temps d'écoulement) peut être intéressant quand il s'agit de mélanges

pour des applications de pompage. L'étape suivante de cette recherche consiste à étudier les effets du BP dans les compositions de béton. L'efficacité du BP en tant qu'AMV doit être comparée aux produits disponibles dans le commerce, et ses effets sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton sont en cours d'évaluation. La pertinence de ce travail en termes d'innovation et de contribution doit être soulignée non seulement pour le marché local du béton, mais aussi pour le marché local de la pêche, qui pourrait bénéficier de la transformation de ses résidus en un sous-produit de valeur. Les résultats obtenus à l'issue de la recherche ont servi de base à une demande de brevet auprès de l'office national de la propriété industrielle et intellectuelle du Brésil (José, 2021).

Il existe une étude qui se porte sur la modification du chitosan comme adjuvant chimique pour les pâtes de ciment. (Lyazzat B. et al., 2020) ont greffé le chitosan (Ch) à l'acide acrylique (AA), trois différents rapports de composition de chitosan-g-acide acrylique, P[Ch-g-AA] ont été préparés (65:35, 50:50 et 35:65) en présence de persulfate de potassium comme initiateur en utilisant la technique des radicaux libres. Les copolymères greffés ont été caractérisés chimiquement. Les résultats ont montré que ces copolymères greffés ont une transition vitreuse unique indiquant que ces copolymères peuvent former une phase miscible. Les P[Ch-g-AA] présentent une stabilité thermique. L'observation au microscope électronique à balayage (MEB) des copolymères greffés n'a montré aucune séparation de phase, en comparaison avec le Ch pur. L'effet des copolymères greffés sur les propriétés physico-mécaniques des pâtes de ciment a été étudié. L'ajout d'eau mélangée à un copolymère greffé au ciment améliore les propriétés des pâtes de ciment. Au fur et à mesure que les ratios d'AA dans le copolymère greffé augmentent, le ratio eau/ciment (WC), le temps de prise ainsi que l'absorption d'eau diminuent en raison du fait qu'une grande quantité d'air est entraînée dans le ciment à cause d'une action du polymère contenu dans le ciment. Alors que la résistance à la compression a fortement augmenté à presque tous les âges d'hydratation (1, 3, 7 et 28 jours). Le copolymère greffé d'AA et de chitosan agit comme un modificateur de rhéologie lorsqu'il est mélangé aux pâtes de ciment.

Une autre étude réalisée en 2020 sur le potentiel des carapaces de crustacés des îles de la madeleine, ainsi des analyses chimiques et minéralogiques de la poudre de crustacés ont été faites. Une étude a montré que la poudre des carapaces de crustacés comporte surtout des phases cristallines majoritairement formées par des carbonates de calcium (mais moins de 90%) (Ben Abdeljelil et al., 2020). La poudre de carapaces de crustacés utilisée ici possède une granulométrie serrée avec un $D_{50}=180 \mu\text{m}$ et un coefficient d'uniformité $C_u=4.6$ constaté à partir de l'analyse granulométrique par tamisage (Ben Abdeljelil et al., 2020). Les résistances des pâtes et des mortiers qui ont été déterminées pour un mélange à base d'une poudre non calcinée n'étaient pas satisfaisantes, en fait, une baisse importante a été enregistrée, allant de 40% jusqu'à 71%, en raison de la présence de la matière organique qui agit négativement sur la réaction d'hydratation ce qui affecte les caractéristiques mécaniques du matériau. Pour enlever la matière organique, la poudre a été calcinée en suivant ce cycle : montée à 500°C en 2h, palier de 1h à 500°C, montés à 800°C en 2h, palier

de 1h à 800°C et retour à la température pièce en fermant le four en le gardant fermé toute la nuit. Les résultats indiquent que l'utilisation de poudre brute, tamisée ou non, ne constitue pas une voie de valorisation viable, cependant ceux qui sont obtenus avec la calcination étaient encourageants. En effet, il y avait eu une augmentation des propriétés mécaniques par rapport aux mélanges réalisés avec la poudre non calcinée, voire un dépassement de la résistance du mélange témoin pour les pâtes et aussi pour les mortiers (Ben Abdeljelil et al., 2020). Les résultats obtenus ont montré qu'il n'y avait pas une relation linéaire entre la résistance et la finesse. Lors de l'utilisation de la finesse de 80 µm, la résistance à la compression a augmenté, tandis que pour des finesses <80 µm et 160 µm, il y a eu une réduction de la résistance. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec un taux de remplacement de 5% avec une poudre de crustacés calcinée de finesse 80 µm qui a donné une résistance à la compression à 28j de 60,1 MPa dans le cas des pâtes déciment. Pour les mortiers, un effet remarquable de la calcination sur les résistances a été noté. Les diminutions passaient de 71 % avec 5% de remplacement à 17% avec 10% de remplacement. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec 10% de remplacement incorporant les trois finesses qui a donné une résistance à la compression à 28j de 28,8 MPa et avec 5% de remplacement avec la finesse <80 µm donnant une résistance à la compression à 28j de 33,3 MPa (Ben Abdeljelil et al., 2020). L'incorporation des trois finesses assure la variation des dimensions et donc la réduction des pores et vides, ou aussi l'utilisation de la plus petite finesse <80 µm, permet la poudre de remplir le maximum de vides, d'où l'augmentation des résistances dans ces deux cas. Un taux de remplacement entre 5% et 10% semble donc intéressant à étudier.

2.7 Conclusion

Plusieurs scénarios et processus de valorisation des sédiments de dragage ont été présentés, du sable de dragage, ses modes de gestion et comportements dans un mélange cimentier dans plusieurs secteurs de génie civil, allant jusqu'aux résidus marins (carapaces de crustacés) et leur étude bibliographique. Cette revue a mis en lumière les différentes manières d'exploitation de ces matériaux comme des produits alternatifs en génie civil.

Plusieurs travaux de recherche ont montré que la substitution du sable ordinaire par le sable de dragage pourrait être une bonne alternative, à savoir le taux optimal selon le type de sable et d'ouvrage. En outre, il existe de nombreuses études qui démontrent que l'incorporation des déchets maritimes en général, et des carapaces de crustacés en particulier (en fonction de leur teneur en chitine), dans des matrices cimentaires, semble être une bonne solution pour valoriser ces résidus, et ainsi réduire la pollution résultant de leur rejet dans la nature.

Chapitre 3 : Méthodologie

Dans ce chapitre, nous présentons la méthodologie suivie dans cette étude. La figure 3. 1 illustre le programme expérimental constitué de quatre phases.

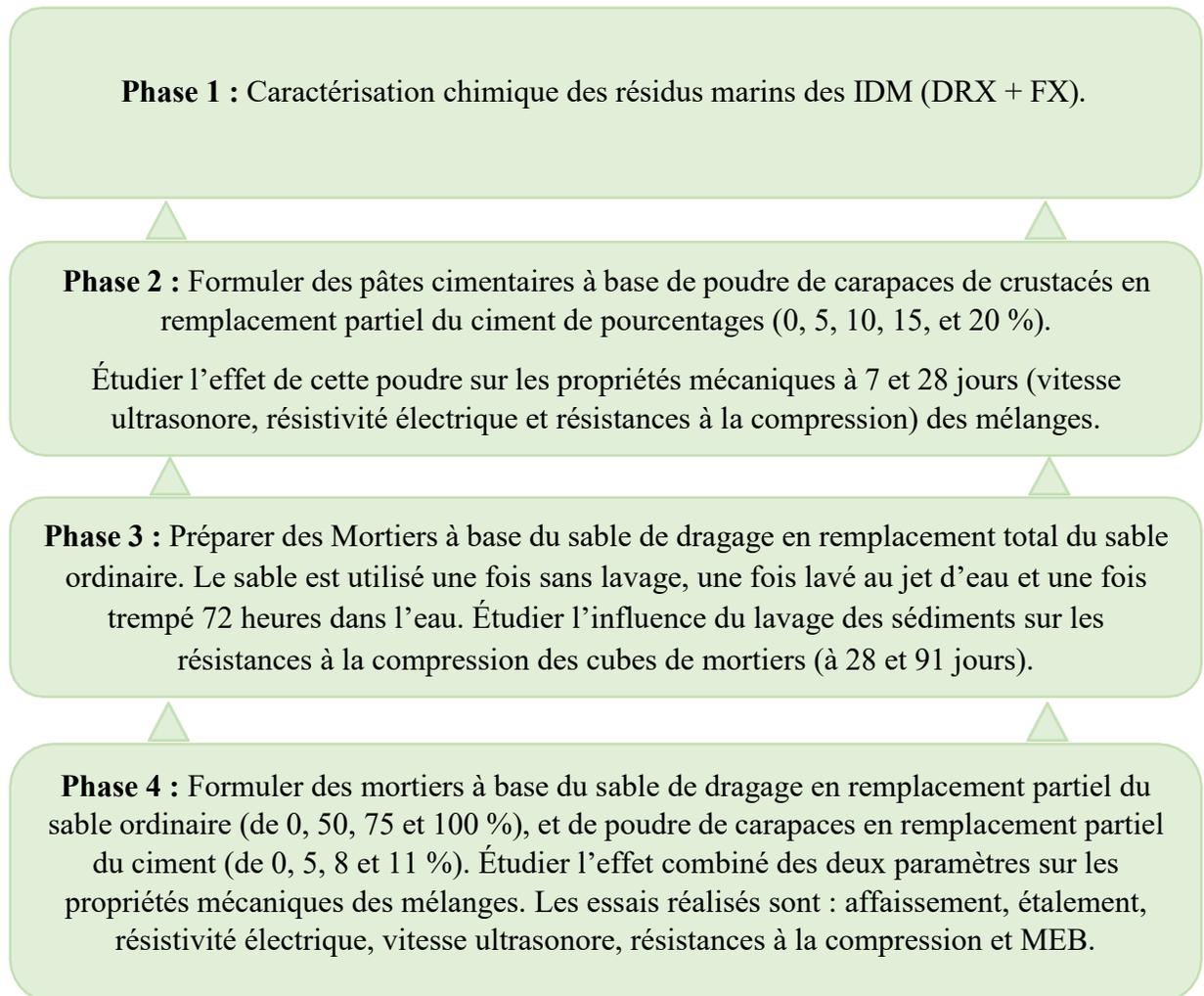


Figure 3. 1: Programme expérimental

Matériaux utilisés :

Durant la réalisation de ces quatre phases expérimentales, on a utilisé les matériaux suivants :

- **Sable ordinaire :** le sable ordinaire du laboratoire, utilisé en construction.
- **Ciment de type GU :** le ciment ordinaire ou à usage général.

- **Sable de dragage** : Les résidus maritimes en l'occurrence le sable de dragage en provenance du port Millerand situé aux Îles de la Madeleine (IDM), ont été récupérées, fournies et transportées par l'entreprise de dragage IM, une division de l'entreprise CTMA (Coopérative de Transport Maritime et Aérien).
- **Carapaces de crustacés** : les carapaces de homard et de crabe utilisées dans ce projet proviennent des IDM en partenariat avec le CERMIM (Centre de Recherche sur les Milieux Insulaires et Maritimes) qui les fournit et ramène ces carapaces. Le projet est financé par CRSNG (Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie) et réalisé au sein des laboratoires de l'Université de Sherbrooke.
- **Eau** : l'eau ordinaire à température ambiante du laboratoire.
- **Chaux** : on a utilisé l'eau saturée en chaux pour conserver les échantillons de pâte et de mortier dans une cure humide.
- **Four** : four de marque Thermolyne.
- **Moules cubiques** : des moules de dimensions 50*50*50 mm.

Pour effectuer quelques essais au laboratoire, on a utilisé :

- **Diffraction aux rayons X (DRX)** : Panalytical X'pert PRO.
- **Fluorescence aux rayons X (FRX)** : Panalytical AXIOS.
- Les instruments de mesure de l'affaissement (mini cône d'Abrams) et l'étalement ordinaires.
- **Appareil de mesures de vitesse des ondes ultrasonores** : appareil de type Pundit Lab + de la marque Proceq.
- **Appareil de mesure de résistivité électrique** : résistivimètre électrique RCON2 pour béton de la marque GIATEC SCIENTIFIC.
- **Presse mécanique pour mesurer les résistances à la compression** : presse de marque Riehli et de capacité de 210 000 livres.
- **Équipement de microscopie électronique à balayage (MEB) de haute résolution S-4700** de marque Hitachi.

3.1 Phase 1 : Caractérisation chimique des résidus maritimes

La caractérisation des résidus a été faite en deux étapes. La première étape consistait à préparer et caractériser les poudres de crustacé, la seconde partie était consacrée à la caractérisation du sable de dragage.

3.1.1 Phase 1.1 : Préparation et caractérisation des poudres de crustacés

Afin d'obtenir la poudre de carapace de crustacés, nous avons d'abord calciné les carapaces de crustacés dans le four de marque Thermolyne (Figure 3. 2). La procédure de calcination est décrite comme suit :

- Montée à 500°C en 2h ;
- Palier de 1h à 500°C (pour éviter le volume important de fumée dans le laboratoire suite à la carbonatation) ;
- Montée à 800°C en 2h ;
- Palier de 1h à 800°C ;
- Retour à la température ambiante (fermer le four et le garder fermé toute la nuit).

N.b : Il est toujours recommandé de choisir des températures de calcination dans ces alentours, car la décomposition est totale à 700°C et l'importante phase de décomposition se produit entre 400°C et 700°C, peu importe la quantité de matière organique (Ramaroson, 2008).

Une fois les carapaces de crustacés calcinées, nous avons procédé au broyage de ces dernières et la poudre obtenue a été tamisée jusqu'à l'obtention d'une finesse inférieure à 80µm.

Les différentes étapes de calcination et de broyage des carapaces sont présentées à la figure 3. 3.



Figure 3. 2: Calcination de carapaces de crustacés



Calcination des poudres



Broyage des carapaces



Tamisage des poudres

Figure 3. 3 : différentes étapes pour l'obtention de la poudre calcinée des carapaces de crustacés

Avant la substitution des poudres de carapaces de crustacés dans le ciment, nous avons procédé à une analyse par diffraction aux rayons X (DRX) pour connaître les phases cristallines présentes dans la poudre. Aussi, nous avons effectué une analyse de fluorescence aux rayons X (FRX) pour déterminer la composition chimique des constituants.

3.1.2 Phase 1.2 : Caractérisation de sable de dragage

Le sable de dragage utilisé vient du port de Millerand aux IDM (Figure 3. 4). Avant son utilisation dans les différentes formulations des mortiers, nous avons procédé à la mesure de son taux d'absorption à l'eau.

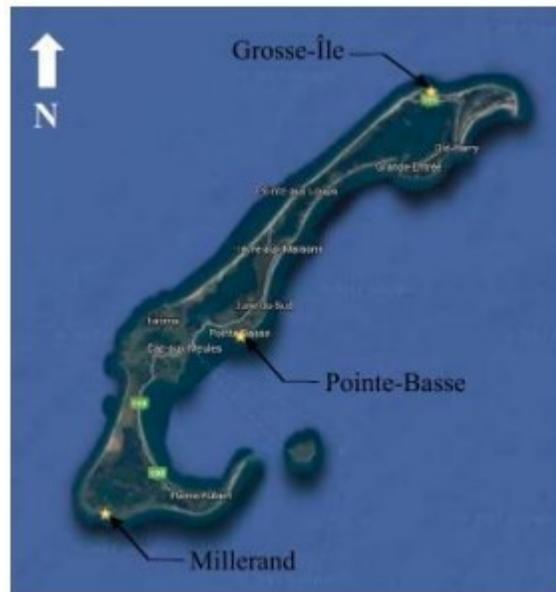


Figure 3. 4: Localisation approximative des échantillonnages (Pellerin, 2017)

- **Mesure de l'absorption à l'eau (Abs) :**

La mesure du taux d'absorption à l'eau du sable de dragage a été réalisée à l'aide de deux pycnomètres (figure 3. 5) selon la norme ASTM C128.



Figure 3. 5 : Pycnomètres remplis des échantillons de sable et d'eau

La valeur du taux d'absorption à l'eau a été prise en selon la moyenne de deux essais (tableau 3- 1).

Tableau 3- 1: Mesure de taux d'absorption à l'eau du sable de dragage

Masse de sable SSS (pycno 1) = 503,3g	Masse de sable SSS (pycno 2) = 509,6g
Masse de sable sec (pycno 1) = 500,9g	Masse de sable sec (pycno 2) = 507,1g
Absorption (pycno 1) = 0,48%	Absorption (pycno 2) = 0,49%

Le taux d'absorption à l'eau du sable de dragage est donc de **0,49%**.

3.2 Phase 2 : Pâtes cimentaires à base de la poudre des carapaces de crustacés et étude de leur effet sur les propriétés mécaniques des mélanges

Cette phase consiste à substituer une partie de la matrice cimentaire par de la poudre de carapaces des crustacés. Le ciment utilisé est un ciment à usage général (GU) et sa composition chimique est présentée au tableau 3- 2 Pour tous les mélanges fabriqués, le liant peut être ciment ou bien ciment et poudre, mais le rapport E/L est toujours de 0,45. La finesse des poudres utilisées est égale ou inférieure à 80 μ m. Plusieurs pourcentages de poudres de carapaces ont été utilisés en remplacement partiel du ciment (tableau 3- 3).

Tableau 3- 2: Composition chimique du ciment utilisé

Ciment GU	(%)
SiO ₂	20,4
TiO ₂	0,2
Al ₂ O ₃	4,4
Fe ₂ O ₃	2,5
MgO	2,1
CaO	62,0
Na ₂ O	0,0
K ₂ O	0,8
SO ₃	3,8
Other oxides	0,2
Total	100,0

Tableau 3- 3: Formulations de mélanges de pâtes cimentaires (36 échantillons cubiques)

ID	Référence	5% =	5% <	10 %	15 %	20 %
Taux de remplacement	0 %	5 %	5 %	10 %	15 %	20 %
Finesse	-	= 80µm	< 80µm	< 80µm	< 80µm	< 80µm

NB : on a préparé 3 échantillons pour chaque un des deux âges (7 et 28 jours), pour chacune des 6 formulations qu'on a présenté dans le tableau 3- 3.

Avant le malaxage des mélanges, nous avons procédé à la réparation des moules en appliquant un léger film d'huile pour faciliter le démoulage. Par la suite, les pâtes ont été préparées à l'aide d'un malaxeur petit Hobart à axe vertical de capacité de 5 litres (figure 3. 6).

Les mélanges formulés ont été placés dans des moules cubiques de dimensions de 50*50*50 mm³, par la suite un compactage mécanique a été effectué à l'aide d'une table à choc (figure 3. 7).



Figure 3. 6 : Malaxage des pâtes



Figure 3. 7 : Mise en place des pâtes dans les moules en cubes et compactage

Une fois l'étape de la mise en place achevée, les moules ont été couverts avec du papier film afin d'éviter l'évaporation de l'eau. Après 24 heures du coulage des pâtes, nous avons procédé aux démoules des cubes. Par la suite, les cubes ont été placés dans un bac contenant de l'eau saturée en chaux pour être ensuite stockés dans une chambre à humidité et température contrôlée (figure 3. 8).



Figure 3. 8 : Placement des pâtes formulées dans la chaux puis leur stockage dans la chambre humide

3.2.1 Caractérisation des pâtes

3.2.1.1 État frais

- **Affaissement et étalement :**

L'affaissement et l'étalement des mélanges ont été mesurés afin d'évaluer l'ouvrabilité des pâtes formulées. L'essai de l'étalement a été réalisé à l'aide d'un cône tronconique comme montré dans la figure 3. 9.



Figure 3. 9 : Étalement des mélanges de pâte

3.2.1.2 À l'état durcis

- **Vitesse ultrasonore**

Cet essai non destructif permet de nous donner une idée sur la qualité du mélange sur le plan des propriétés mécaniques. L'essai a été réalisé à l'aide d'un appareil de type Pundit Lab + de la marque Proceq (figure 3. 10). L'essai a été exécuté conformément à la norme ASTM C597.

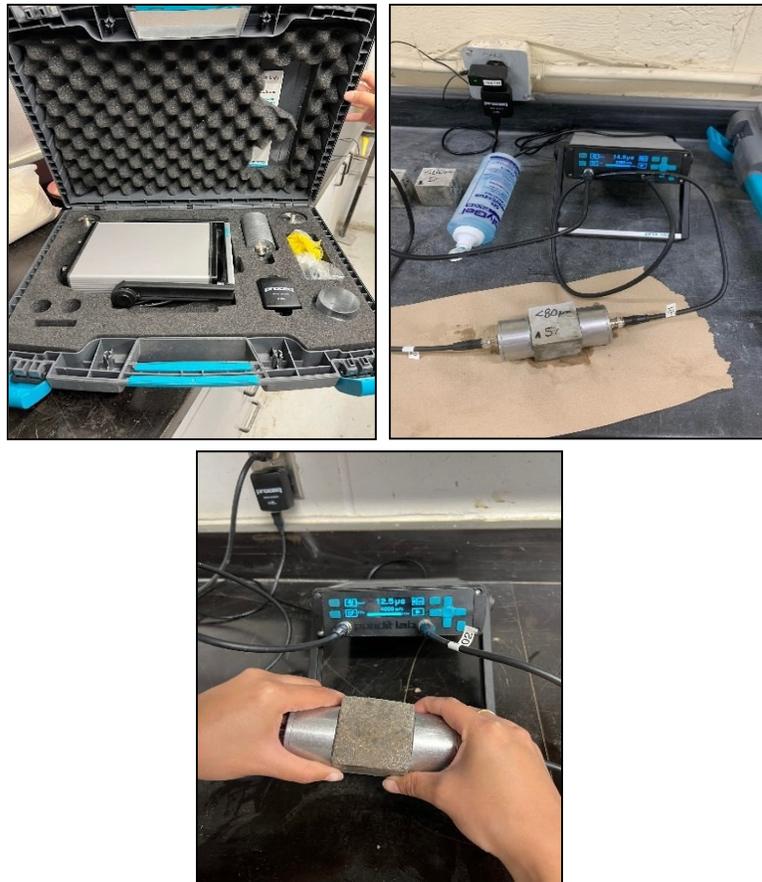


Figure 3. 10 : Essai de mesure de la vitesse ultrasonore des cubes

- **Résistivité électrique**

La résistivité électrique est un paramètre important qui nous indique la continuité du milieu cimentaire, et de sa teneur en eau et en ions dissouts. Ce paramètre a été mesuré au laboratoire à l'aide du résistivimètre électrique RCON2 pour béton de la marque GIATEC SCIENTIFIC (figure 3. 11). L'essai a été effectué conformément à la norme ASTM C1876.

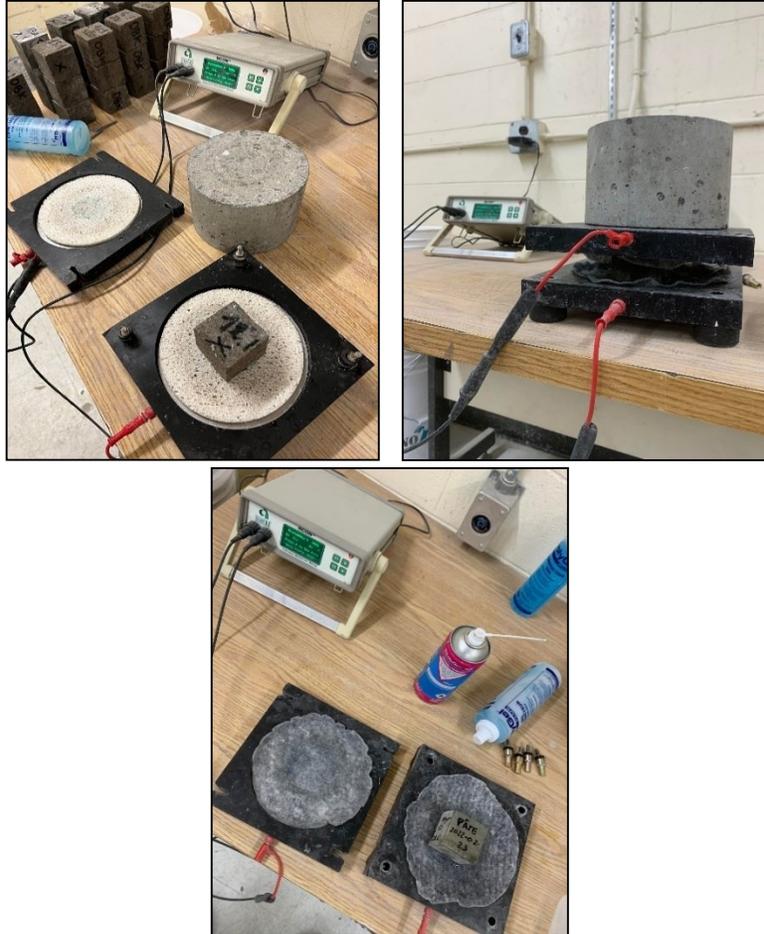


Figure 3. 11 : Mesure de la résistivité électrique des échantillons en cubes

- **Résistance à la compression**

La résistance à la compression uniaxiale a été déterminée à l'aide d'une presse de marque Riehli et de capacité de 210 000 livres (figure 3. 12). L'essai a été réalisé conformément à la norme ASTM C109.

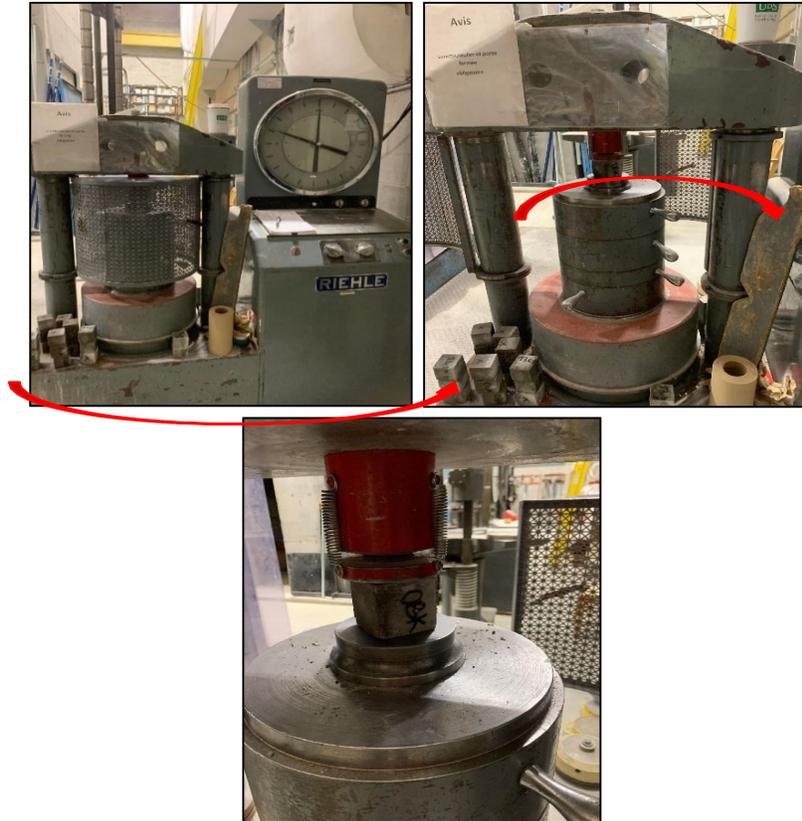


Figure 3. 12 : Essai de la résistance à la compression des cubes de pâte

3.3 Phase 3 : Mortiers à base du sable de dragage et étude de l'influence du lavage des sédiments

3.3.1 Préparation des mélanges

- **Formulations des mortiers**

Dans cette phase, l'effet du lavage des sédiments de dragage non contaminé sur les propriétés mécaniques des mortiers a été étudié. Avant son utilisation, le sable a été lavé de deux façons différentes, puis ajouté au mélange en substitution total du sable ordinaire. Les deux procédures du lavage sont décrites comme suit :

1)- Lavage avec le jet d'eau :

Afin de pouvoir laver le sable avec le jet d'eau, on a pris une quantité de sable non contaminé provenant de port de Millerand, IDM, à son état naturel. Ce sable a été placé dans un bac en acier, par la suite le sable a été lavé avec un jet d'eau à température ambiante et filtré à l'aide d'un tamis de 80 μ m. L'opération a été reconduite plusieurs fois, et il a été observé qu'au fur et à mesure que l'opération se répète, la couleur de l'eau devenait plus

claire, ce qui a montré l'efficacité du lavage pour enlever des impuretés résiduelles. La figure 3. 13 montre le lavage du sable de dragage par jet d'eau.



Figure 3. 13 : Lavage au jet d'eau du sable de dragage

2)- Sable ayant passé 72 heures dans l'eau :

Cette méthode de lavage a consisté à immerger le sable dans l'eau durant 72 heures, puis le filtrer à l'aide d'un tamis de 80 μ m, et le placer immédiatement dans l'étuve dans une température de 105°C pendant une durée de 24h. Une fois cette période est achevée, le sable a été récupéré et gardé à température ambiante du laboratoire pendant 24 heures. Les différentes étapes du lavage du sable sont présentées à la figure 3. 14.



Figure 3. 14 : Lavage du sable pendant 72h dans l’eau et étuvage du sable de dragage

Les différents mélanges ont été préparés à l’aide du sable de dragage lavé et naturel. Au total trois formulations ont été préparées ; une formulation avec du sable naturel et deux autres formulations avec du sable lavé (figure 3. 15).



Figure 3. 15 : Sable de dragage des IDM

Le ciment utilisé pour la formulation des mélanges est un ciment de type GU à usage général, tandis que les rapports E/C et C/S respectivement étaient de 0,45 et 0,4. Les différentes formulations préparées dans cette phase sont présentées dans le tableau 3- 4.

Tableau 3- 4: Procédure de lavage du sable de dragage et nomenclature des cubes de mortier

Identification	Procédure de lavage appliquée
SDO	Sable de dragage ordinaire sans lavage
S-JE	Sable lavé au jet d'eau dans un tamis
S-72h	Sable ayant passé 72 heures dans l'eau

Cependant, dans la phase 3, on a préparé 18 échantillons cubiques de mortier à base du ciment GU, eau et sable de dragage de Millerand, IDM. C'était 3 échantillons pour chacun des deux âges (28 et 91 jours), pour chacune des 3 formulations illustrés dans le tableau 3- 5.

Tableau 3- 5: Formulations de mélanges de mortiers cimentaires (18 échantillons cubiques)

ID	SDO	SD-JE	S-72h
Taux de sable de dragage	100 %	100 %	100 %
Type de sable de dragage	Sable de dragage ordinaire	Sable de dragage lavé au jet d'eau	Sable de dragage trempé 72 heures dans l'eau
Nombre d'échantillons	6	6	6

- **Malaxage et coulage des mélanges**

La séquence de malaxage des mortiers formulés a été suivie conformément à la norme ASTM C305. Cette dernière est décrite comme suit :

- Introduction de l'eau dans la cuve.
- Verser ensuite le liant ou ciment.
- Mettre en marche le malaxeur à la vitesse lente (vitesse1) pendant 30 secondes.
- Introduire régulièrement le sable pendant les 30s suivantes.
- Mettre le malaxeur à sa vitesse moyenne (vitesse2) durant 30s.

- Arrêter le malaxeur pour 1 min 30 s, pendant les 15 premières secondes, enlever en repoussant vers le milieu de la cuve, tout le mélange collé sur les côtés et au fond de cette dernière, à l'aide d'une raclette.
- Reprendre le malaxage pendant 60 s à une vitesse rapide (vitesse3).

Une fois la séquence de malaxage achevée, les mortiers ont été placés dans des moules cubiques de dimensions de $50*50*50\text{mm}^3$. Le remplissage des moules s'est fait en deux couches. Pour chaque couche, on a effectué un compactage manuel de 16 coups (4 dans chaque sens). La figure 3. 16 montre la mise en place des mortiers formulés.



Figure 3. 16 : Malaxage et compactage des mortiers

Le démoulage a été effectué 24 heures après le coulage des mortiers. La méthode de conservation des cubes est la même que celle décrite dans la section 3.2.

Les différents cubes démoulés sont présentés dans la figure 3. 17.



Figure 3. 17 : Les cubes de mortiers des trois formulations

3.3.2 Caractérisation des mortiers

- **Résistance à la compression**

La résistance à la compression des cubes a été mesurée après 28 jours et 91 jours de conservation dans la chambre humide du laboratoire. L'essai a été réalisé conformément à la norme ASTM C109.

3.4 Phase 4 : Mortiers à base du sable de dragage et de poudre de carapaces

Dans cette phase, nous avons étudié l'effet combiné du sable de dragage et des carapaces de crustacés calcinés sur les propriétés mécaniques des mortiers. Une partie du sable naturel a été substitué par le sable de dragage, tandis qu'une partie du liant a été remplacée par de la poudre de carapaces de crustacés.

3.3.1 Préparation des mélanges

- **Formulations des mortiers**

En se basant sur les deux phases précédentes et leurs résultats, on a décidé de formuler des mortiers avec plusieurs taux de poudres de carapaces de crustacés et de sable de dragages. Pour les différentes formulations, nous avons opté pour les matériaux décrits dans le tableau 3- 6 :

Tableau 3- 6: matériaux principalement utilisés dans la phase 4 et leurs propriétés

Matériau utilisé	Propriétés
Ciment	Type GU
Poudre de carapaces de crustacés	- Calcinée puis broyée - Finesse <80µm (sauf pour un mélange comparatif décrit plus tard)
Sable	Sable ordinaire utilisé en construction
Sable de dragage des IDM	Trempé 72 heures dans l'eau puis rincé et déshydraté (sauf pour un mélange comparatif de procédures de lavage présenté plus tard)

Le rapport E/L est de 0,45 (le liant est composé de ciment et poudre de carapaces), tandis que le rapport L/S est de 0,4 (le sable S est la somme du sable ordinaire et dragué).

Les taux de remplacement du ciment par la poudre de carapaces sont de : 0%, 5%, 8% et 11%. Concernant les sédiments de dragages, leurs taux de remplacements du sable naturel sont les suivants : 0%, 50%, 75% et 100%. Tous les taux de substitution utilisés sont en pourcentage massique. Cependant, on a confectionné 60 échantillons cubiques, c'était 3 échantillons de chacune des 20 formulations préparées. Les quatre séries des différentes formulations réalisées dans cette phase sont présentées dans les tableaux 3- 7 à 3- 10.

Tableau 3- 7: Composition de la première série de formulations

Première série				
Mélange	Taux de poudre de carapaces %	Taux de ciment GU %	Taux de sédiment drg. %	Taux de sable ordinaire %
1 ou réf	0	100	0	100
2	0	100	50	50
3	0	100	75	25
4	0	100	100	0

Tableau 3- 8: Composition de la deuxième série de formulations

Deuxième série				
Mélange	Taux de poudre de carapaces %	Taux de ciment GU %	Taux de sédiment drg. %	Taux de sable ordinaire %
5	5	95	0	100
6	5	95	50	50
7	5	95	75	25
8	5	95	100	0

Tableau 3- 9: Composition de la troisième série de formulations

Troisième série				
Mélange	Taux de poudre de carapaces %	Taux de ciment GU %	Taux de sédiment drg. %	Taux de sable ordinaire %
9	8	92	0	100
10	8	92	50	50
11	8	92	75	25
12	8	92	100	0

Tableau 3- 10 : Composition de la quatrième série de formulations

Quatrième série				
Mélange	Taux de poudre de carapaces %	Taux de ciment GU %	Taux de sédiment drg. %	Taux de sable ordinaire %
13.a (=80µm)	11	89	0	100
13.b (<80µm)	11	89	0	100
13.c (2 finesses)	11	89	0	100
14	11	89	50	50
15	11	89	75	25
16. SDO	11	89	100	0
16. JE	11	89	100	0
16. 72h	11	89	100	0

Toutes les poudres de carapaces de crustacés possèdent une finesse $<80\mu\text{m}$ à l'exception des mélanges 13, qui ont les finesesses suivantes :

- 13.a : 5% de poudre de carapace à une finesse $=80\mu\text{m}$.
- 13.b : 5% de poudre de carapace à une finesse $<80\mu\text{m}$.
- 13.c : 5% de poudre de carapace à une finesse mélangée à proportions égales (c.-à-d. 2.5% $=80\mu\text{m}$ et 2.5% $<80\mu\text{m}$).

Toutes les formulations contenant du sable de dragage ont un sable ayant passé 72 heures dans l'eau puis nettoyé dans un tamis et étuvé, à l'exception des mélanges 16, ces derniers contiennent différents types de sables pour étudier l'effet du lavage des sédiments en présence des poudres de carapaces de crustacés sur les matrices cimentaires. L'identification de ces mélanges est présentée dans le tableau 3- 11 :

Tableau 3- 11: Les procédures de lavage des sédiments des mélanges 16

Mélange	Procédure de lavage des sédiments dragués
16. SDO	100% de sable de dragage de Millierand IDM ordinaire sans lavage.
16. JE	100% du même sable dragué, mais qui a été lavé au jet d'eau.
16. 72h	100% de sable trempé 72 heures dans l'eau puis rincé et déshydraté.

Les différents mélanges ont été préparés et conservés de la même façon qu'indiquée à la section 3.2.

La figure 3. 18 présente quelques mortiers préparés lors de cette phase expérimentale.



Figure 3. 18: Les cubes de mortiers des différentes formulations

Les différents essais réalisés dans cette phase sont résumés dans le tableau 3- 12 :

Tableau 3- 12: Essais réalisés dans la phase 4

	Essais
À l'état frais	Étalement
	Affaissement
À l'état durci (28 jours)	Résistivité électrique
	Vitesse ultrasonore
	Résistance à la compression
	Observations microscopiques MEB

Chapitre 4 : Résultats et discussions

Ce chapitre englobe tous les résultats des essais qu'on a réalisés au laboratoire sur les différentes formulations des matrices cimentaires confectionnées tel que décrit dans le chapitre précédent. On commence par les résultats de la caractérisation de la poudre de carapaces de crustacés et du sable de dragage (phase 1). Par la suite on aborde les résultats des essais réalisés sur les pâtes formulées à base de la poudre de carapaces (phase 2). Subséquemment, on présentera les résultats des essais effectués sur les mortiers contenant du sable de dragage lavé de plusieurs façons (phase 3). Enfin, on présentera les résultats des essais réalisés sur les cubes de mortiers composés de la poudre de carapaces et du sable dragué à la fois (phase 4).

4.1. Résultats et interprétations des essais de la première phase

La première phase expérimentale a permis de découvrir les propriétés physico-chimiques et la composition de la poudre de carapaces de crustacés et du sable de dragage des IDM, qui forment les deux paramètres principaux de cette recherche. Ceci a permis d'anticiper leur comportement dans les mélanges de ciment et de planifier les trois autres phases pour étudier les propriétés mécaniques des pâtes et des mortiers préparés et d'optimiser certains paramètres.

4.1.1. Caractérisation de la poudre de carapaces de crustacés calcinée

4.1.1.1. Résultats de la DRX de la poudre

Avant de commencer les mélanges, on a préparé les carapaces (calcination puis broyage), puis des analyses physico-chimiques ont été réalisées (DRX et FX). La diffraction aux rayons X est une analyse qualitative. Cette analyse est nécessaire pour déterminer les phases minéralogiques présentes dans la poudre de carapaces de crustacés, calcinée à 800°C selon une procédure bien déterminée puis broyée. Le résultat de la DRX est illustré dans la figure 4. 1. Ce graphe montre :

- Une présence majoritaire du carbonate de calcium (CaCO_3) sous forme de calcite, donc la poudre n'est pas totalement décarbonatée.
- Une présence secondaire de la lime ou la chaux vive (CaO), qui est le produit de la calcination du carbonate de calcium. Il s'agit de la transformation de CaCO_3 en CaO et CO_2 par calcination.
- Une existence du calcium phosphate et de périclase (MgO) est aussi indiquée.

Cette composition de poudre de carapaces calcinée, très riche en carbonate de calcium et en chaux, pointe vers une utilisation dans la matrice cimentaire comme filler calcaire.

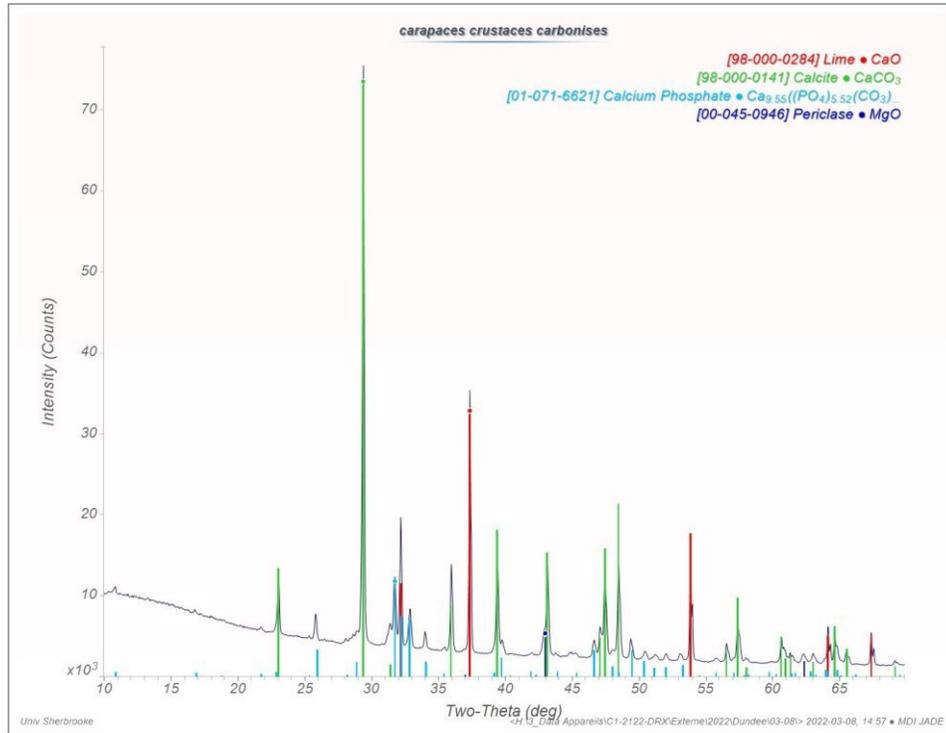


Figure 4. 1: Les résultats de la DRX de la poudre calcinée puis broyée

4.1.1.2. Résultats de la FRX de la poudre

Le tableau 4- 1 présente les résultats donnés par la FRX de la composition de la poudre de carapaces, on en déduit :

- La présence majoritaire de la chaux vive CaO qui justifie l'implication de cette poudre dans le ciment.
- Des taux minimes de : P_2O_5 , Na_2O , SrO et SO_3 . La poudre de carapaces calcinée contient 0,7% de SO_3 , cette valeur ne dépasse pas 3% et se situe donc dans l'intervalle recommandée ou acceptable par l'ASTM.
- Les éléments les plus trouvés sont : le calcium (42,9 %), suivi du phosphore (3,1%) et du magnésium (2,5 %). Ces éléments sont nécessairement formés par la chaux vive (CaO), le pentoxyde de phosphore (P_2O_5) et la périclase (MgO).
- Des traces de S, Na et Sr (0,3 à 0,5 %).

La perte au feu (PAF) est égale à 26%. Ceci montre que la matière organique n'est pas complètement décomposée lors de la calcination. Toutefois, cette valeur de PAF de la poudre de carapaces calcinée à 800°C, est bien réduite comparativement à la poudre brute des carapaces seulement broyées (64,6%), ce qui montre la forte présence de la matière organique dans ce résidu et l'importance de sa calcination (Ben Abdeljelil, 2020). Entre outre, on remarque que la valeur de la PAF de la poudre calcinée puis broyée (26,3%) est

inférieure à la valeur de la PAF trouvée pour la poudre broyée puis calcinée (28,3%). Ainsi, la meilleure procédure pour la poudre de carapaces consiste à la calciner puis la broyer.

Tableau 4- 1 : Les résultats de la FRX de la poudre calcinée puis broyée

Oxyde	(% massique)	Élément	(% massique)
Al ₂ O ₃	0,0	Al	0,0
BaO	0,0	Ba	0,0
CaO	60,0	Ca	42,9
Co ₃ O ₄	0,0	Co	0,0
Cr ₂ O ₃	0,0	Cr	0,0
CuO	0,0	Cu	0,0
Fe ₂ O ₃	0,0	Fe	0,0
HfO ₂	0,0	Hf	0,0
K ₂ O	0,0	K	0,0
MgO	4,1	Mg	2,5
Mn ₂ O ₃	0,0	Mn	0,0
Na ₂ O	0,6	Na	0,4
NiO	0,0	Ni	0,0
P ₂ O ₅	7,1	P	3,1
PbO	0,0	Pb	0,0
SO ₃	0,7	S	0,3
SiO ₂	0,0	Si	0,0
SrO	0,6	Sr	0,5
TiO ₂	0,0	Ti	0,0
V ₂ O ₅	0,0	V	0,0
WO ₃	0,0	W	0,0
ZnO	0,0	Zn	0,0
ZrO ₂	0,0	Zr	0,0

4.1.2. Caractérisation du sable de dragage de Millerand (IDM)

Dans cette partie on a utilisé le sable de dragage non contaminé de Millerand aux IDM, sous deux formes :

- Le sable dragué à son état brut.
- Le sable dragué après l'avoir trempé 72 heures dans l'eau et étuvé.

On rappelle que l'absorption du sable était de 0,49%.

4.1.2.1. Résultats de la DRX du sable brut

La DRX du sable brut a donné sa composition cristalline illustrée dans la figure 4. 2. Le sable de dragage brut contient par ordre décroissant :

- Le quartz ou silicate (SiO_2) en majorité, qui est le composant majeur d'un sable ordinaire aussi.
- Le microcline (KAlSi_3O_8) en minorité.
- L'anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) en très petite quantité.

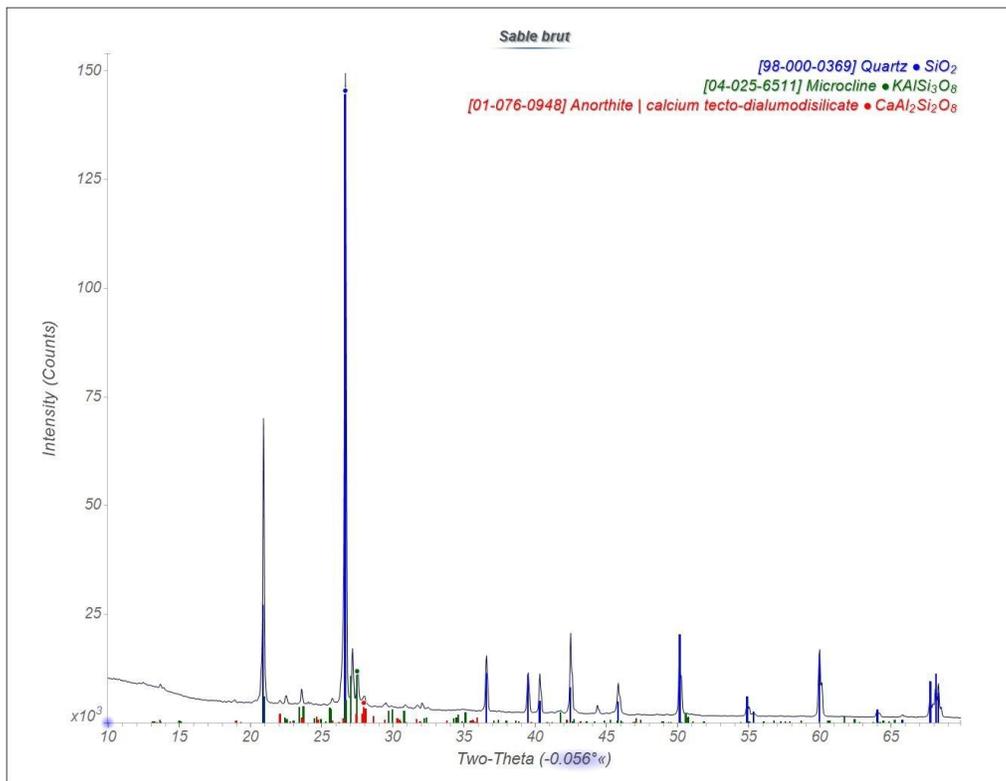


Figure 4. 2: Les résultats de la DRX du sable brut de Millerand (IDM)

4.1.2.2. Résultats de la FRX du sable brut

Le résultat de l'analyse par fluorescence aux rayons X du sable brut non contaminé des IDM, présenté dans le tableau 4- 2, montre que :

- Conformément à la DRX, l'oxyde majoritaire c'est le SiO_2 (94.6%).
- La présence minimale d' Al_2O_3 et de K_2O , et des traces de CaO , Fe_2O_3 , Na_2O , MgO , TiO_2 .

L'élément le plus présent dans le sable brut est le silicium (44,2%, puis l'aluminium (1,4%) et le potassium (1,1%), il existe aussi une quantité minime de Ca, Fe, Na, Mg, et des traces de Ti.

La perte au feu est de 1,2%.

Tableau 4- 2 : Les résultats de la FRX du sable brut de Millerand (IDM)

Oxyde	(% massique)	Élément	(% massique)
Al ₂ O ₃	2,6	Al	1,4
BaO	0,0	Ba	0,0
CaO	0,5	Ca	0,4
Co ₃ O ₄	0,0	Co	0,0
Cr ₂ O ₃	0,0	Cr	0,0
CuO	0,0	Cu	0,0
Fe ₂ O ₃	0,5	Fe	0,4
HfO ₂	0,0	Hf	0,0
K ₂ O	1,3	K	1,1
MgO	0,3	Mg	0,2
Mn ₂ O ₃	0,0	Mn	0,0
Na ₂ O	0,5	Na	0,4
NiO	0,0	Ni	0,0
P ₂ O ₅	0,0	P	0,0
PbO	0,0	Pb	0,0
SO ₃	0,0	S	0,0
SiO ₂	94,6	Si	44,2
SrO	0,0	Sr	0,0
TiO ₂	0,1	Ti	<0,1
V ₂ O ₅	0,0	V	0,0
WO ₃	0,0	W	0,0
ZnO	0,0	Zn	0,0
ZrO ₂	0,0	Zr	0,0
PAF = 1,2 %			

4.1.2.3. Résultat de la DRX du sable trempé dans l'eau

Le résultat de la DRX du sable ayant passé 72 heures dans l'eau puis étuvé, est illustré dans la figure 4. 3, permettra de le comparer avec le sable brut. Pareillement au sable brut, ce sable trempé dans l'eau puis étuvé contient beaucoup de quartz (SiO₂).

En deuxième lieu, une présence moyenne de l'anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) est notée, plus que dans le sable brut. Il existe aussi un peu d'anorthoclase ($(\text{Na}, \text{K})(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$) dans ce sable, par contre il ne contient pas de microcline (KAISi_3O_8).

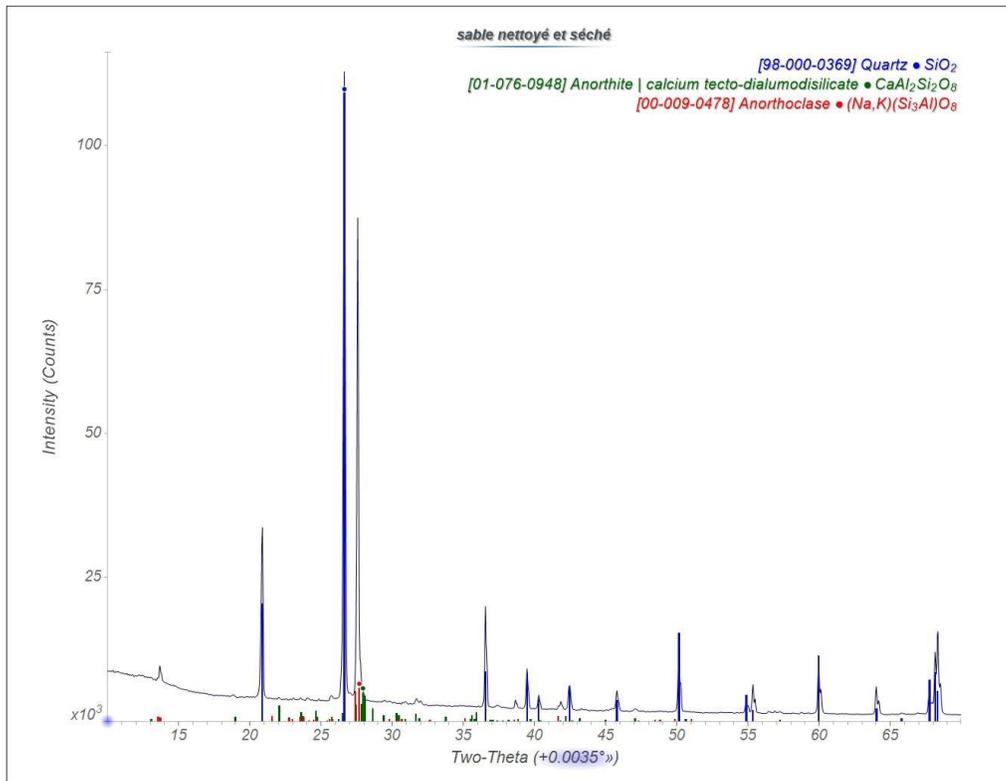


Figure 4.3 : Les résultats de la DRX du sable dragué (IDM) trempé 72h dans l'eau

4.1.2.4. Résultats de la FRX du sable trempé dans l'eau

Conformément à la FRX du sable brut, et à la DRX de ce sable trempé dans l'eau, la FRX de ce dernier prouve que l'oxyde majoritaire est le SiO₂ (94,9%). Une présence d'Al₂O₃ et de K₂O est aussi notée, avec des traces de CaO, Fe₂O₃, Na₂O, MgO, TiO₂. Ces oxydes ont des pourcentages légèrement différents par rapport au sable brut. L'élément le plus présent dans ce sable est le silicium (44,4%), puis l'aluminium (1,4%) le potassium (1,1%). La perte au feu est de 1,3% (légèrement plus élevée que la PAF du sable brut qui était de 1,2%).

Tableau 4- 3 : Les résultats de la FRX du sable de Millerand (IDM) trempé 72h dans l'eau

Oxyde	(% massique)	Élément	(% massique)
Al ₂ O ₃	2,7	Al	1,4
BaO	0,0	Ba	0,0
CaO	0,6	Ca	0,4
Co ₃ O ₄	0,0	Co	0,0
Cr ₂ O ₃	0,0	Cr	0,0
CuO	0,0	Cu	0,0
Fe ₂ O ₃	0,6	Fe	0,4
HfO ₂	0,0	Hf	0,0
K ₂ O	1,4	K	1,1
MgO	0,3	Mg	0,2
Mn ₂ O ₃	0,0	Mn	0,0
Na ₂ O	0,6	Na	0,4
NiO	0,0	Ni	0,0
P ₂ O ₅	0,0	P	0,0
PbO	0,0	Pb	0,0
SO ₃	0,0	S	0,0
SiO ₂	94,9	Si	44,4
SrO	0,0	Sr	0,0
TiO ₂	0,1	Ti	<0,1
V ₂ O ₅	0,0	V	0,0
WO ₃	0,0	W	0,0
ZnO	0,0	Zn	0,0
ZrO ₂	0,0	Zr	0,0
PAF = 1,3%			

4.2. Résultats et interprétations des essais de la deuxième phase

Dans la deuxième phase, on a confectionné des pâtes cimentaires à base de la poudre de carapaces de crustacés pour étudier leur effet sur les propriétés mécaniques de ces mélanges. Dans ce but, différents essais ont été réalisés à l'état frais (affaissement et étalement) et à l'état durci (non destructifs et destructifs).

Tel que décrit au chapitre précédent, les formulations confectionnées varient selon le pourcentage de poudre de carapaces en remplacement partiel massique du ciment (5, 10, 15 et 20 %). Dans toutes ces formulations, on a utilisé une finesse inférieure à 80 μ m, sauf pour

le taux de 5% où on a fait varier la finesse (une fois égale à 80µm et une fois inférieure à 80µm).

4.2.1. A l'état frais : Affaissement et étalement

Les valeurs d'affaissement sont entre 11,3 et 12,4 cm et les valeurs de l'étalement sont entre 13.5 et 15.6 cm. Les valeurs des différents mélanges sont illustrées dans l'annexe A, et présentées dans la figure 4. 4. On remarque que :

- Les valeurs s'améliorent en rajoutant plus de poudre (< 15%), mais elles sont toujours proches, que ce soit pour l'affaissement ou pour l'étalement.
- Le pourcentage de remplacement et la finesse affectent légèrement l'ouvrabilité des pâtes.
- La poudre de carapaces a un léger effet plastifiant, surtout à 10% de remplacement.

En somme, les valeurs s'améliorent en rajoutant plus de poudre (< 15%), mais elles sont toujours proches, que ce soit pour l'affaissement ou pour l'étalement, donc le pourcentage de remplacement et la granulométrie affectent légèrement l'ouvrabilité des pâtes. La poudre de carapaces a un effet plastifiant surtout à 10% de remplacement.

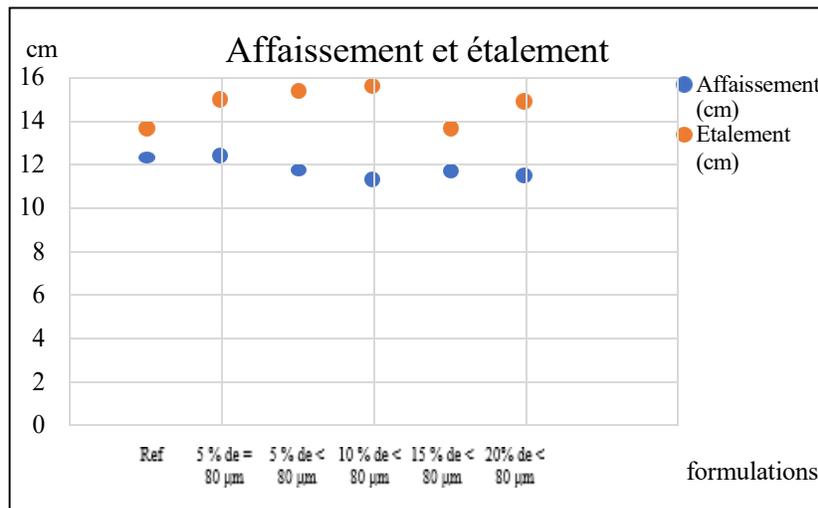


Figure 4. 4 : Affaissement et étalement en fonction des formulations (phase 2)

4.2.2. A l'état durci

4.2.2.1. Vitesse Ultrasonore

La vitesse d'impulsion ultrasonique nous informe sur l'homogénéité et la compacité de la matrice cimentaire. D'après les résultats illustrés dans l'annexe A et représentés dans la figure 4. 5, on remarque que plus on augmente le pourcentage de poudre

de carapaces, plus la vitesse ultrasonore diminue, à cause vraisemblablement de l'augmentation de porosité, surtout pour un taux de remplacement de 20 % pour les deux âges.

La vitesse des échantillons de 5 % est très proche de celle de la référence (moins de 1%). La finesse (= 80 μm et < 80 μm) influe très légèrement la vitesse à 7 jours d'environ 1% et presque elle n'a pas d'influence à 28 jours. Les mélanges entre 5 et 10 % sont plus homogènes et compacts. Les résultats donnés par la mesure des vitesses ultrasonores à différents âges, sont illustrés à la figure 4. 5 :

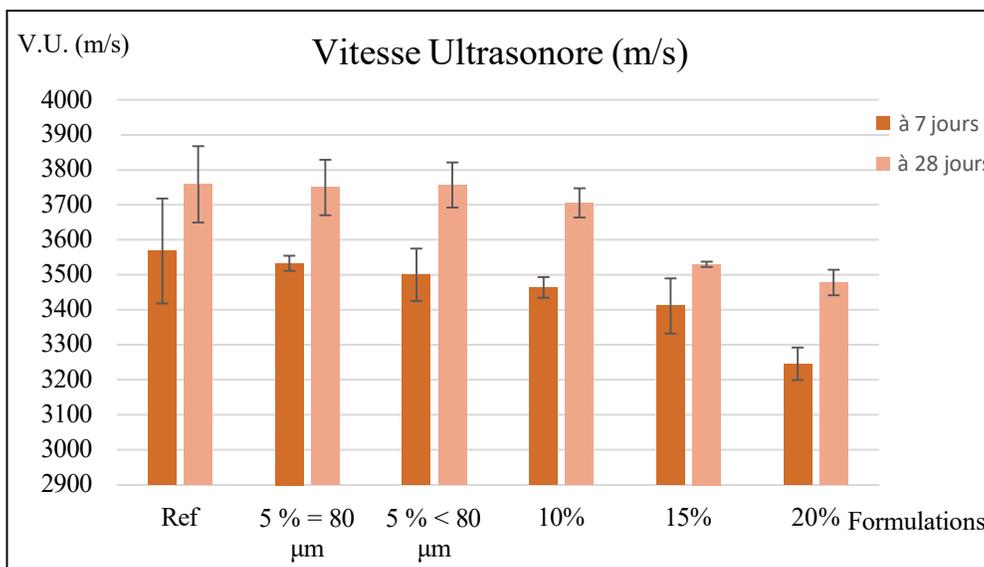


Figure 4. 5: Graphe de la vitesse ultrasonore des pâtes (phase 2)

4.2.2.2. Résistivité électrique

Dans les résultats présentés dans l'annexe A et la figure 4. 6, on remarque qu'en général, la variation de la résistivité est légère, surtout pour des taux de remplacement allant jusqu'à 10 %, particulièrement à 7 jours.

À 7 jours, l'échantillon de 5 % de poudre moins fine (= 80 μm) a une résistivité légèrement moins que celle de finesse < 80 μm (de 1,6%), contrairement à 28 jours la résistivité de la poudre la plus fine dépasse de 3,8% celle de la poudre de finesse égale à 80 μm , donc à long terme la finesse inférieure à 80 μm donne une résistivité plus légèrement plus élevée que celle égale à 80 μm , vu qu'elle laisse moins de vides dans le mélange.

La résistivité à 28 jours augmente de valeur généralement grâce à l'avancement de l'hydratation qui évapore l'eau dans les pores et rend l'échantillon de plus en plus compact.

La résistivité électrique diminue en augmentant le pourcentage de poudre surtout pour 15 et 20%. Cependant, les mélanges qui contiennent entre 5 et 10 % de poudre sont les meilleurs.

Les valeurs de la résistivité électrique des différents échantillons sont présentées dans la figure 4. 6.

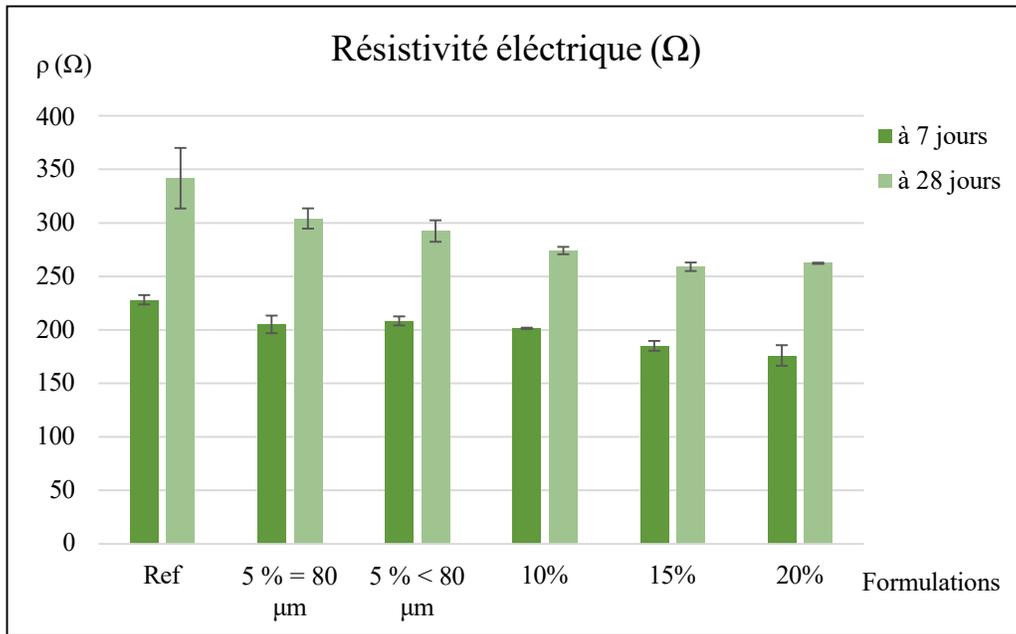


Figure 4. 6: Graphe de la Résistivité électrique des pâtes (phase 2)

4.2.2.3. Résistance à la compression

D’après les résultats de l’essai de compression uniaxial réalisé à 7 et à 28 jours, illustré dans l’annexe A et la figure 4. 7 qui suit ce paragraphe, on remarque que plus on augmente le taux de remplacement du ciment par la poudre de carapaces, plus la résistance à la compression aux différents âges diminue et surtout pour un taux de 20%.

Les résistances à la compression uniaxiale à 28 jours augmentent par rapport à 7j. Une finesse de poudre égale à 80μm donne une résistance à la compression à 7 jours qui dépasse légèrement la référence, et qui est supérieure de 10% à la résistance donnée par la poudre de finesse inférieure à 80μm. Contrairement à 7 jours, une granulométrie inférieure à 80μm correspond à une résistance à la compression légèrement supérieure à celle qui a une finesse égale à 80μm (de 5 MPa ou 9,3%), et aussi légèrement sup à la référence de 7% (à 28 jours). A noter que la finesse égale à 80μm est plus difficile à obtenir comparativement à la poudre trop fine (de finesse inférieure à 80μm).

Un taux de remplacement de 5% présente une bonne résistance, très proche de celle de 10 % qui est intéressant aussi (inférieure à la référence de 6,6%), mais elle diminue pour des taux de 15 et 20 % respectivement de 16% et 30% par rapport à la référence (mais ça peut être utile pour certains ouvrages qui n’exigent pas une bonne résistance). On en déduit que

la marge entre 5 et 10% de contenance en poudre est très intéressante, car elle contient l'optimum. Les résistances à la compression mesurées sont représentées sous forme d'histogrammes dans la figure 4. 7.

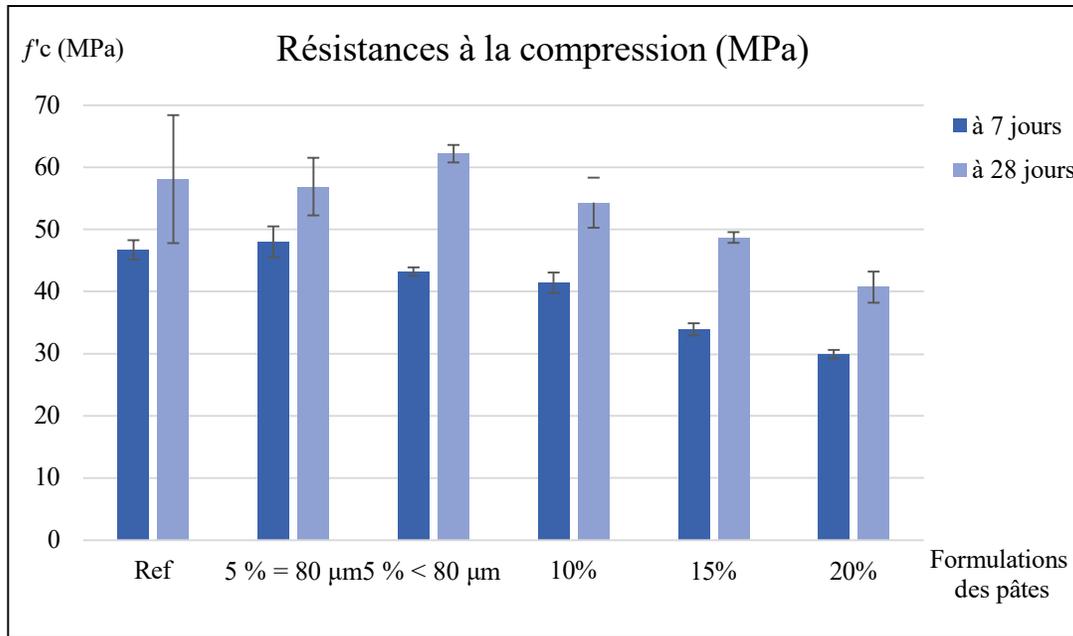


Figure 4. 7 : Graphe des résistances à la compression uniaxiale $f'c$ des pâtes (phase 2)

4.2.2.4. Courbes comparatives

Pour observer la cohérence des différents essais et résultats obtenus, on a tracé quelques courbes comparatives de :

- La résistance à la compression en fonction de la vitesse ultrasonore à 7 et 28 jours.
- Résistivité électrique en fonction de la vitesse ultrasonore à 7 et 28 jours.
- Résistivité électrique en fonction de la résistance à la compression à 7 et 28 jours.

Les courbes présentent un nuage de point croissant qui indique une cohérence entre les différents paramètres des essais (vitesse ultrasonore, résistivité électrique et résistance à la compression, à 7 et 28 jours).

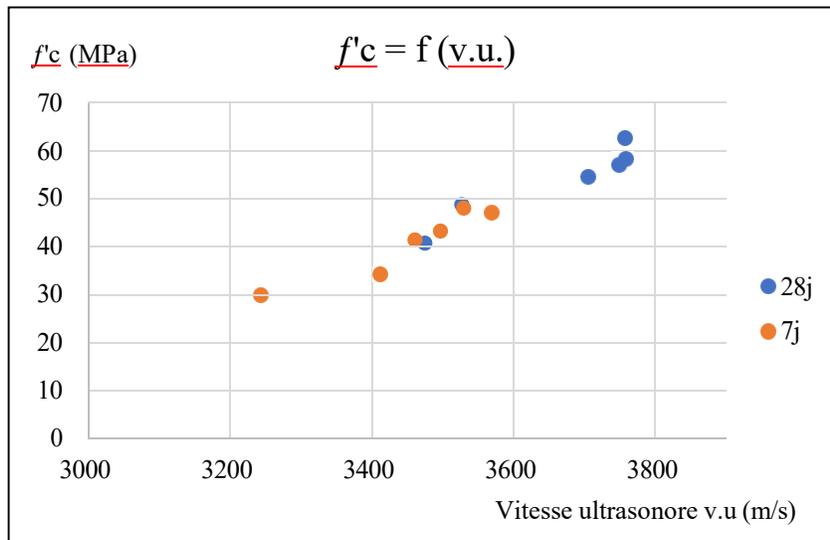


Figure 4. 8: Courbes comparatives de $f'c = f(v.u.)$ à 7 et 28 jours (phase 2)

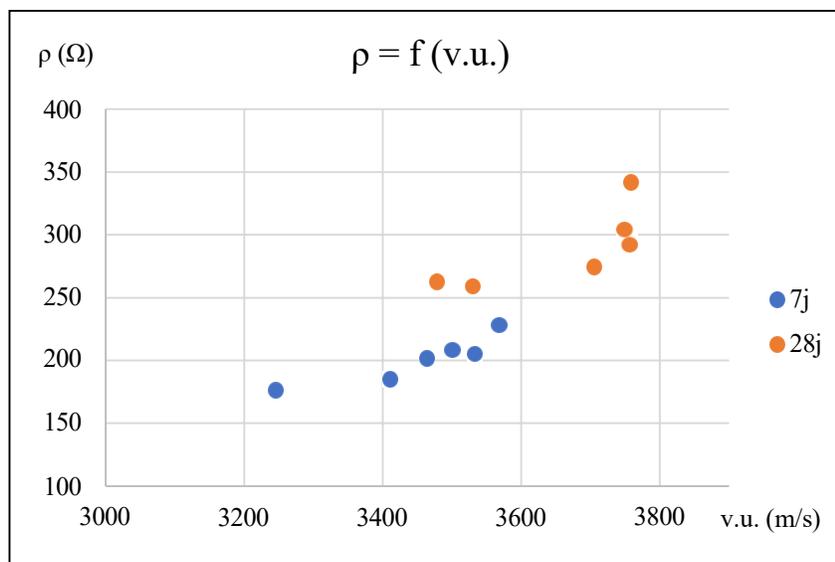


Figure 4. 9: Courbes comparatives de $\rho = f(v.u.)$ à 7 et 28 jours (phase 2)

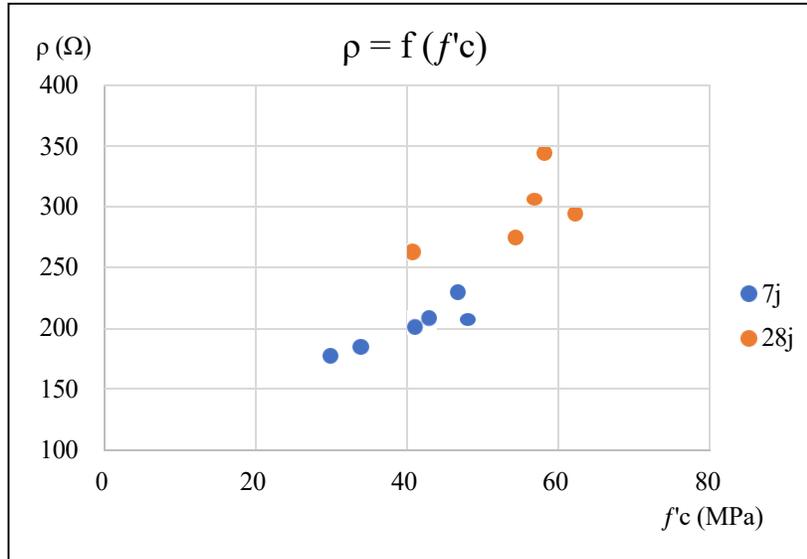


Figure 4.10 : Courbes comparatives de $\rho = f(f'c)$ à 7 et 28 jours (phase 2)

On conclut que :

- ✓ La poudre de carapaces de crustacés à un effet filler qui pourrait être étudié davantage.
- ✓ La poudre à finesse plat (<80 μ m) agit sur des résistances à long terme. Il semble intéressant de travailler avec cette granulométrie.
- ✓ La résistance en compression diminue pour des taux de 15 et 20 %, mais elle peut être utile pour certains ouvrages qui ne sont pas exigeants en ce qui concerne les résistances.
- ✓ Les mélanges de 5 % sont les plus résistants contenant la poudre, étant donné que le taux de 10% présente une bonne résistance, très proche de celle de 5 %. Donc la marge entre 5 et 10% est très intéressante, car probablement elle contient l'optimum. Ceci est à considérer dans les prochaines formulations.

4.3. Résultats et interprétations des essais de la troisième phase

On rappelle que dans cette phase, des mortiers à base du sable de dragage ont été confectionnés dans le but d'étudier l'influence du lavage des sédiments dragués des IDM non contaminé, sur les performances mécaniques (résistance en compression) de ces cubes de mortier à différents âges. Les mélanges de mortier préparés contiennent 100% du sable de dragage décrit dans le tableau 4- 4. On rappelle aussi que le ciment utilisé est de type GU, et les rapports E/C et C/S sont respectivement de 0,45 et 0,40.

Tableau 4- 4 : Les procédures de lavage appliqué sur le sable dragué (phase 3)

Nom de l'échantillon	Procédure de lavage appliquée
SDO	Sable de dragage ordinaire sans lavage
S-JE	Sable lavé au jet d'eau dans un tamis
S-72h	Sable ayant trempé 72h dans l'eau puis rincé dans un tamis

Des essais de résistance à la compression uniaxiale ont été réalisés à 28 et 91 jours. Les valeurs obtenues sont présentées dans l'annexe A et l'histogramme de la figure 4. 11. On remarque que :

- La résistance à la compression à 28 jours des échantillons du sable lavé au jet d'eau (S-JE) est presque similaire à celle des échantillons du sable ordinaire (SDO), par contre f'_{c28} des échantillons du sable trempé 72 heures dans l'eau (S-72h) augmente d'environ 22% par rapport à l'ordinaire.
- Les résistances à 91 jours sont plus élevées que celles à 28 jours et surtout pour les échantillons du sable lavé en général.
- A 91 jours, la résistance à la compression des échantillons à base du sable lavé au jet d'eau (S-JE) augmente de 80%, et celle des échantillons à base du sable trempé dans l'eau (S-72h) augmente de 44% par rapport aux mortiers ordinaires (SDO).

On constate que le lavage au jet d'eau n'a presque pas d'effet à 28 jours, mais il a un effet important à long terme (91 jours), cependant le trempage 72 heures dans l'eau a un effet même à 28 jours qui continue d'évoluer au fil du temps. Par ailleurs, le lavage, que ce soit au jet d'eau ou en trempant le sable dans l'eau durant 72 heures, améliore les résistances à la compression aux deux âges comparativement au sable de dragage ordinaire. Cela permet d'enlever le sel et les impuretés résiduelles. Les résistances à la compression obtenues à 28 et 91 jours sont illustrées dans la figure 4. 11.

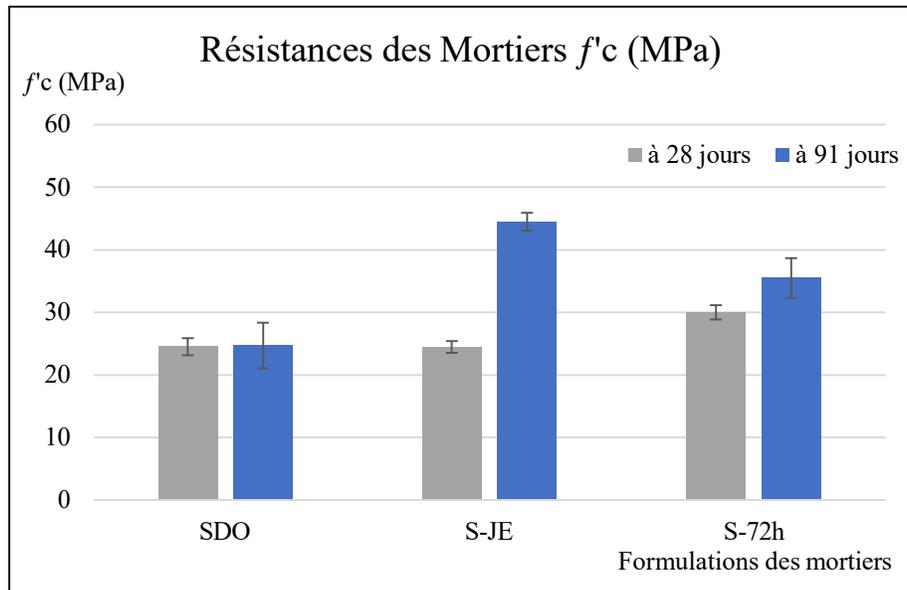


Figure 4. 11 : Résistance à la compression uniaxiale des mortiers (phase 3)

On conclut:

- ✓ Les deux procédures de lavage présentent un bon impact sur les résistances. Un lavage au jet d'eau reste plus simple et écologique. D'une manière générale, il serait intéressant d'appliquer l'une de ces deux façons de lavage du sable dragué avant de l'utiliser prochainement pour enlever le sel et les impuretés et donc améliorer les résistances et optimiser les formulations.

4.4. Résultats et interprétations des essais de la quatrième phase

Dans cette dernière phase, on a préparé des mortiers à base du sable de dragage des IDM et de poudres de carapaces de crustacés, pour étudier l'effet combiné de ces deux paramètres sur les propriétés mécaniques des mélanges, et déterminer la formulation idéale d'un mortier contenant ces deux résidus.

Pour atteindre cet objectif, on a confectionné des cubes de mortiers contenant plusieurs pourcentages de poudre de carapaces de crustacés en remplacement partiel massique du ciment GU (0, 5, 8 et 11 %) et à chaque fois on a varié le taux de sable dragué en remplacement du sable ordinaire (0, 50, 75 et 100%). Cette large gamme expérimentale a été bien décrite dans le chapitre précédent, mais on peut récapituler la composition de chacune des 20 formulations dans le tableau 4- 5

Tableau 4- 5 : Composition des formulations de la phase 4

Série	Échantillons	poudre %	Ciment %	sable drg. %	sable ord %	
1	1 (ou réf)	0	100	0	100	
	2			50	50	
	3			75	25	
	4			100	0	
2	5	5	95	0	100	
	6			50	50	
	7			75	25	
	8			100	0	
3	9	8	92	0	100	
	10			50	50	
	11			75	25	
	12			100	0	
4	13.a (finesse _p =80µm)	11	89	0	100	
	13.b (finesse _p <80µm)					
	13.c (les 2 fineses)					
	14			50	50	
	15			75	25	
	16. SDO			100	SDO	0
	16. JE				S-JE	
	16. 72h				S-72h	

Par la suite ces différentes formulations ont subi un ensemble d'essais au laboratoire à l'état frais et durci (tableau 4- 6).

Tableau 4- 6 : Les essais réalisés dans la phase 4

	Essais	Âge à l'essai (jours)
A l'état frais	Étalement	0
	Affaissement	0
A l'état durci	Résistivité électrique	28
	Vitesse ultrasonore	28
	Résistance à la compression	28
	MEB	130

4.4.1. A l'état frais : Affaissement et étalement

Les valeurs de l'affaissement sont comprises entre 8,0 et 8,5 cm et les valeurs de l'étalement varient entre 7,0 et 7,5 cm. Ces valeurs des différents mélanges sont détaillées dans l'annexe A, et présentées dans la figure 4. 12.

Généralement les valeurs obtenues sont bien logiques, et très proches (dans un intervalle à 0,5 cm près), et les mélanges obtenus sont considérés consistant. Cependant, plus le pourcentage de la poudre est élevé plus de l'affaissement et de l'étalement augmentent légèrement, même au laboratoire on remarque que la présence du sable de dragage diminue la maniabilité tandis que la présence de la poudre l'augmente. Par ailleurs, la présence de la poudre de carapaces favorise un peu la maniabilité du mélange et par conséquent, améliore son ouvrabilité.

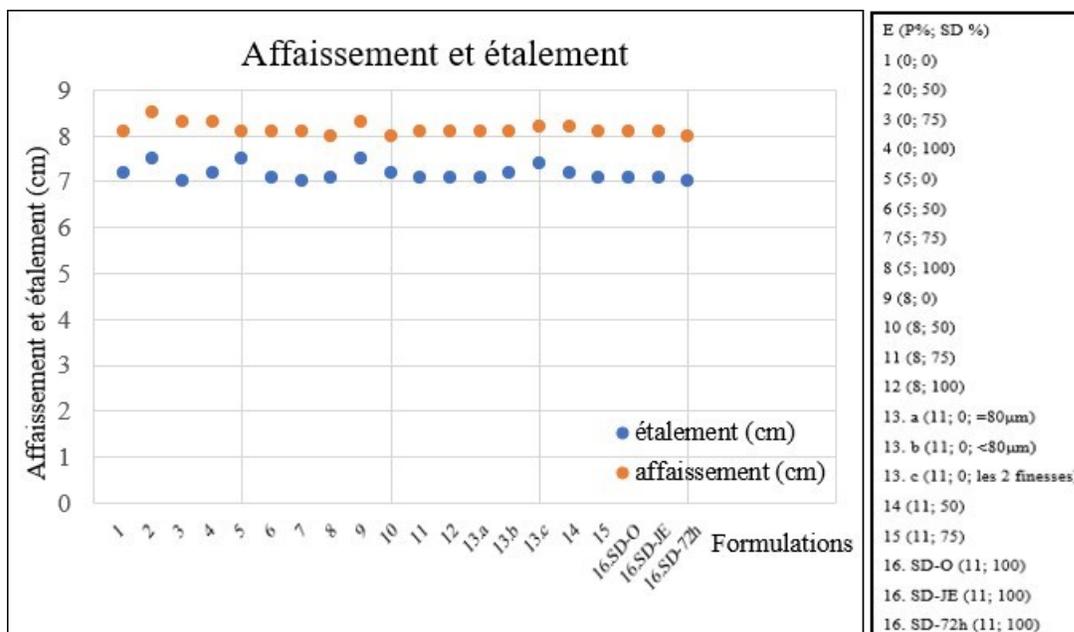


Figure 4. 12 : Graphe de l'étalement et l'affaissement des mortiers (phase 4)

4.4.2. A l'état durci

A 28 jours, on a mesuré la vitesse ultrasonore, la résistivité électrique et la résistance à la compression, pour 3 cubes de chacune des formulations des mortiers. Les valeurs sont présentées dans l'annexe A.

4.4.2.1. Vitesse Ultrasonore

Quand on observe bien les résultats de mesure de la vitesse ultrasonore des différentes formulations, illustrés dans la figure 4. 13, on remarque que :

- Généralement, les mélanges contenant 11% de pourcentage de poudre et ayant 0%

de sable de dragage montrent une vitesse plus importante comparativement aux mortiers références et aux autres types de mortiers. L'augmentation du pourcentage des poudres réduit considérablement la porosité de ces composites et donne un milieu plus homogène, ce qui se traduit par une vitesse d'onde plus importante.

- Les mélanges contenant 75% et surtout 100% de sable de dragage ont les vitesses ultrasonores les plus réduites. Dans l'ensemble, plus on augmente le taux de sable de dragage plus la vitesse ultrasonore diminue surtout en présence de poudre.
- Le mélange 13.a (de finesse égale à $80\mu\text{m}$) a une vitesse minimale, qui augmente légèrement de 1,4% dans le mélange 13.b (de finesse inférieure à $80\mu\text{m}$), et augmente de 1,7% pour le mélange 13.c (de finesse mélangée). Les 3 mélanges ont des vitesses ultrasonores proches, mais la finesse mélangée a donné le meilleur résultat (et très proche du résultat donné par 11% de poudre de finesse plat). Ceci peut être expliqué par le fait que la finesse soit mélangée, ce qui implique que les particules les plus fines rentrent entre les particules les plus grandes et remplissent plus de vides. Généralement une petite finesse reste mieux qu'une grande finesse puisqu'elle permet de remplir plus de pores. En effet, quand la finesse diminue, la porosité diminue et la vitesse des ondes ultrasonore augmente (**rôle filler**).
- Le sable SD-72h a donné une meilleure vitesse (qui dépasse la vitesse donnée par SD-O de 1,6%), en deuxième lieu ici SD-O et enfin c'est SD-JE (sa vitesse diminue de 3,3% par rapport à SD-O). Ces petites variations peuvent être expliquées par le fait que le trempage dans l'eau enlève les impuretés telles que le sel et le restant des algues, mais le lavage au jet d'eau enlève en plus de ça les argiles résiduelles collées sur les surfaces des grains de sable.
- Parmi les mélanges qui contiennent 50% de sable dragué, le mélange 2 a la vitesse la plus haute, elle dépasse légèrement la référence de 1,3%, mais ce mélange contient 0% de poudre de carapaces, puis ça vient le mélange 10.
- Le mélange 10 contenant 8% de poudre ($<80\mu\text{m}$) et 50% de sable (SD-72h) a donné une vitesse très proche de la référence, donc il a une bonne vitesse ultrasonore compte tenu des taux de remplacement par rapport aux résultats, cependant il est homogène et compact.

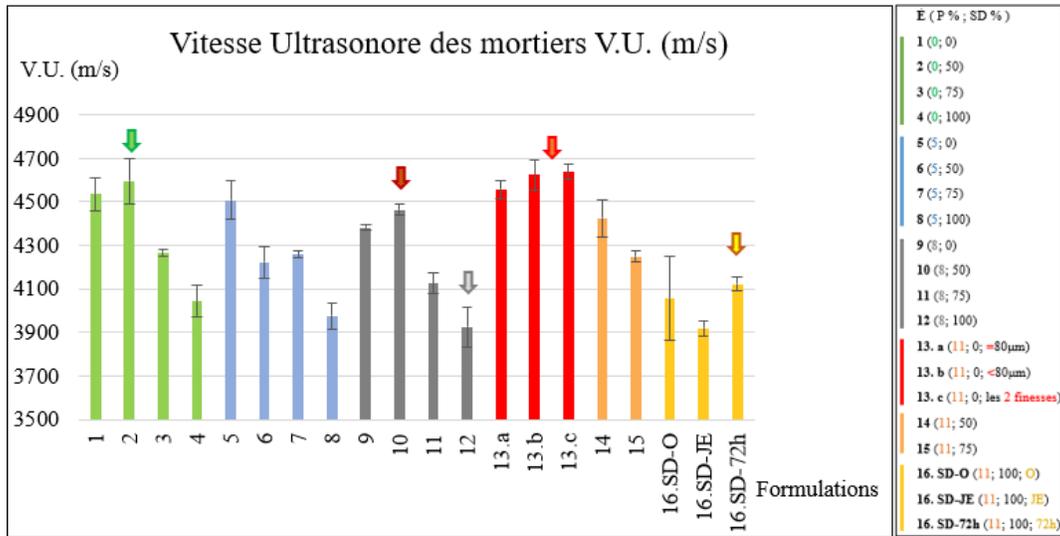


Figure 4. 13: Vitesse ultrasonore des mortiers à 28 jours (phase 4)

4.4.2.2. Résistivité électrique

En regardant les résultats donnés par l'essai de la résistivité électrique illustré dans la figure 4. 14, on constate que :

- En général, plus on rajoute du sable de dragage et/ou de la poudre de carapaces, plus la résistivité électrique du mélange diminue.
- La résistivité électrique maximale c'est celle du mélange 6 contenant 5% de poudre et 50% de SD-72h elle dépasse un peu la référence de 2,3%, pour le mélange 10 contenant 50% de sable et 8% de poudre, la résistivité diminue d'environ 14% par rapport à la référence.
- La résistivité du mélange 4 (0% poudre et 100% SD-72h) augmente considérablement (de 23,3%) par le fait de rajouter 5% de poudre dans le mélange 8, en contrepartie elle diminue un peu (de 11,7%) pour l'ajout de 8 % de poudre (mélange 12).
- Parmi les trois finesesses étudiées, l'échantillon de la poudre de finesse de 80 μm a donné une résistivité qui dépasse celle de la poudre de finesse inférieure à 80 μm de 3%, et cette dernière dépasse la résistivité de la poudre mélangée de 2,8% : la variation de la résistivité en fonction de la finesse est minime.
- Pour 11% de poudre et 100% de sables, la meilleure valeur était celle du sable lavé au jet d'eau (16.SD-JE) qui diminue de 8% pour donner la résistivité du sable trempé 72 heures dans l'eau (16.SD-72h) qui à son tour se réduit 8,7% pour le sable ordinaire (16.SD-O) et d'ailleurs c'était la valeur minimale de tous les mélanges.
- Le mélange 11 a donné un bon résultat proche de la référence (moins de 9,8%) et le mélange 7 aussi (moins de 7% que la référence), donc ici jusqu'à 75% de SD-72h est

un bon taux que ce soit avec 5% ou 8% de poudre, cependant, avec 11% de poudre ça serait relativement beaucoup.

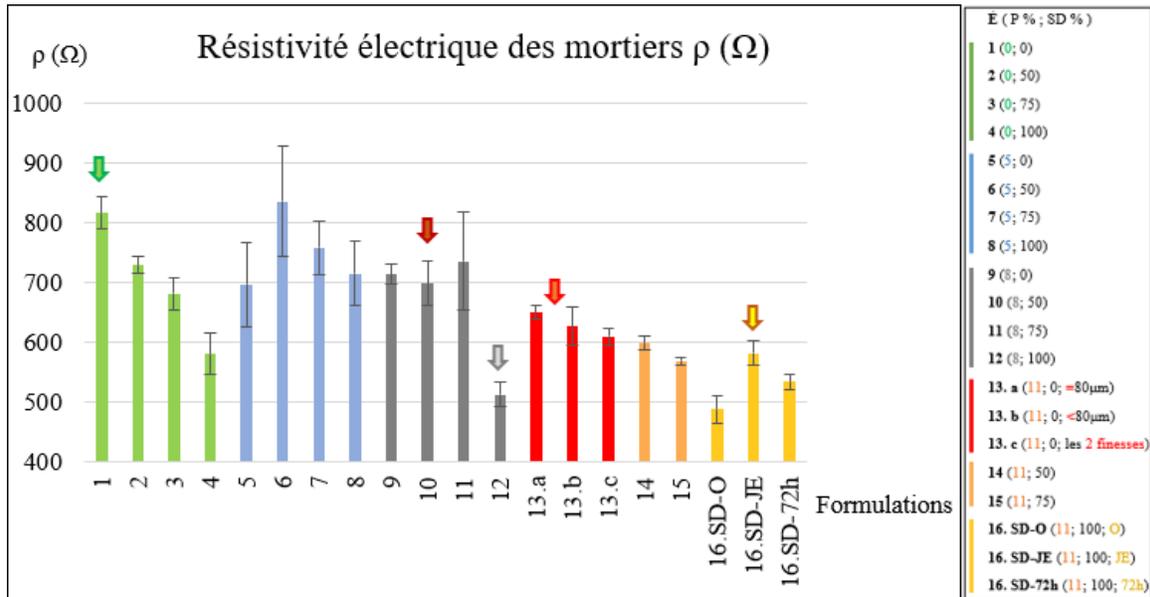


Figure 4. 14: Résistivité électrique des mortiers à 28 jours (phase 4)

4.4.2.3. Résistance à la compression

Analyses et interprétations :

Les résultats de résistance à la compression des différentes formulations sont présentés dans la figure 4. 15. On remarque que :

- D'une manière générale, plus on augmente le pourcentage de sable de dragué dans les mortiers plus la résistance à la compression diminue, même en absence de poudre. Cependant, le sable de dragage affecte beaucoup la résistance surtout pour 100%.
- La meilleure finesse est celle inférieure à $80\mu\text{m}$ (déjà choisie pour tous les mélanges à part les mélanges 13 comparatifs de finesse), puis le mélange comportant des quantités égales des deux fineses. Ceci peut être expliqué par le fait que les particules fines remplissent plus de petits pores : diminution de la porosité, d'où l'augmentation légère de la résistance. Et enfin vient la finesse plus grande qui est égale à $80\mu\text{m}$ (c'est semblable aux résultats de la phase expérimentale N°2, mais à 28 jours, contrairement à j7), donc la meilleure finesse est la minimale (inférieure à $80\mu\text{m}$ qui a déjà était choisie pour tous les autres mélanges). Entre outre les variations des résistances de ces mélanges comparatifs de finesse (13.a, 13.b et 13.c) sont légères (de moins de 3,5%), donc la finesse n'influe pas considérablement la résistance à la compression.
- Concernant le mélange comparatif des procédures de lavage en présence de 11%

- de poudre, le mélange qui contient du sable trempé 72 heures dans l'eau (16.SD-72) a donné une résistance plus élevée de 47,8% que celle du sable ordinaire sans lavage (16.SD-O), ce dernier à son tour donne une résistance qui dépasse le mortier de sable lavé au jet d'eau (16.SD-JE) de 28,3 % (c'était d'ailleurs la résistance minimale de tous les mélanges). Par ailleurs la meilleure façon de laver le sable c'est de le tremper 72 heures dans l'eau (qui a déjà été choisie pour tous les autres mélanges), ça permet de se débarrasser des impuretés (sel et algues) sans affecter les propriétés mécaniques, par contre le lavage au jet d'eau affecte les résistances, peut-être à cause des forces appliquées à par le jet d'eau qui n'enlève pas seulement le sel et les résidus d'algues, mais enlève aussi l'argile restante sur la surface des grains de sable et elle devient plus lisse.
- L'effet négatif de la poudre sur les résistances des mortiers apparaît en présence combinée avec le sable de dragage et devient plus remarquable.
 - Le mélange 5 (contenant 5% de poudre) et 9 (contenant 8% de poudre) dépassent la référence de 13,3% et 11,7% respectivement, et elle diminue légèrement d'environ 1,2% par rapport à la référence lors de l'ajout de 11% de poudre. Ces mélanges ont 0% de sable dragué, donc en absence de sable de dragage, l'ajout d'un pourcentage allant jusqu'à 8% de poudre améliore les résistances des mortiers, et même 11% est le maximum de poudre qui n'affecte pratiquement pas les résistances.
 - Les mélanges qui contiennent 50% SD et 0 et 8% de poudre (mélanges 2 et 10 respectivement) ont donné des bonnes résistances qui sont moins de la référence de 8,7% et 22,6% respectivement. Bizarrement la résistance se réduit considérablement de plus que la moitié (60% par rapport à la référence) quand on rajoute 5% de poudre (mélange 6). Le taux de 75 et 100% de sable affecte tous les mélanges tandis qu'un taux de 50% de sable de dragage a affecté les mélanges contenant 5% de poudre plus que les mélanges contenant 0 et 8% de poudre.
 - Pour les mélanges 10, 11 et 12, contenant les trois 8% de poudre et respectivement 50%, 75% et 100% de sable dragué, on remarque que f_{c28} diminue énormément pour mélanges 11 et 12 par rapport à la référence (de 71,4% et 75,5% respectivement), pourtant pour le mélange 10, elle ne diminue que de 22,6%. Cependant, le meilleur mélange le plus résistant contenant les deux paramètres étudiés ou les deux types de résidus à valoriser (sable de dragage et poudre de carapaces crustacés) c'est bien le mélange 10.
 - En optimisant les deux composants de ce projet (sable de dragage et poudre de carapaces) et en étudiant leurs influences sur la résistance, on pourra considérer le mélange 10 (qui comporte 8% de poudre de finesse inférieure à 80 μm et 50% de sable dragué trempé 72 heures dans l'eau) comme étant un mélange **optimal**.

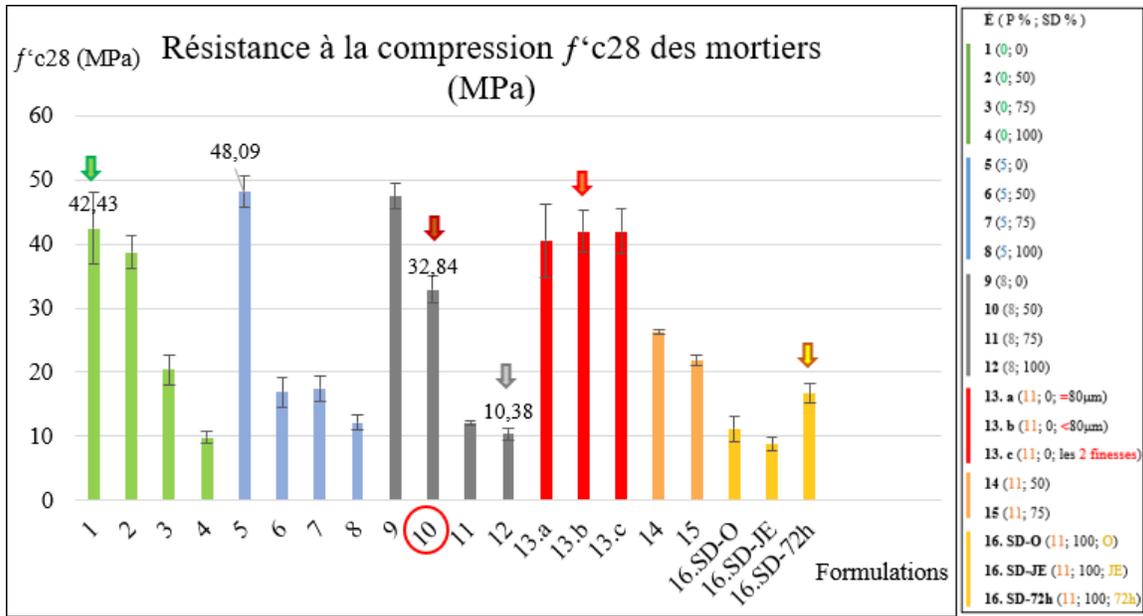


Figure 4. 15: Résistance à la compression uniaxiale des mortiers à 28 jours (phase 4)

4.4.2.4. Courbes comparatives

Afin d'observer la cohérence des résultats des différents paramètres mesurés à l'état durci (vitesse ultrasonore (U.S.), résistivité électrique (ρ) et résistance à la compression à 28j (f'_{c28})), les figures 4. 16 à 4. 18 illustrent les courbes comparatives de :

- La vitesse ultrasonore en fonction de la résistance à la compression à 28 jours.
- La résistivité électrique en fonction de la vitesse ultrasonore à 28 jours.
- La résistivité électrique en fonction de la résistance à la compression à 28 jours.

Ces trois courbes présentées sous forme des nuages de points ont une forme croissante qui montre la cohérence entre les résultats des essais de résistivité électrique, de vitesse ultrasonore et des résistances à la compression mesurés à 28 jours.

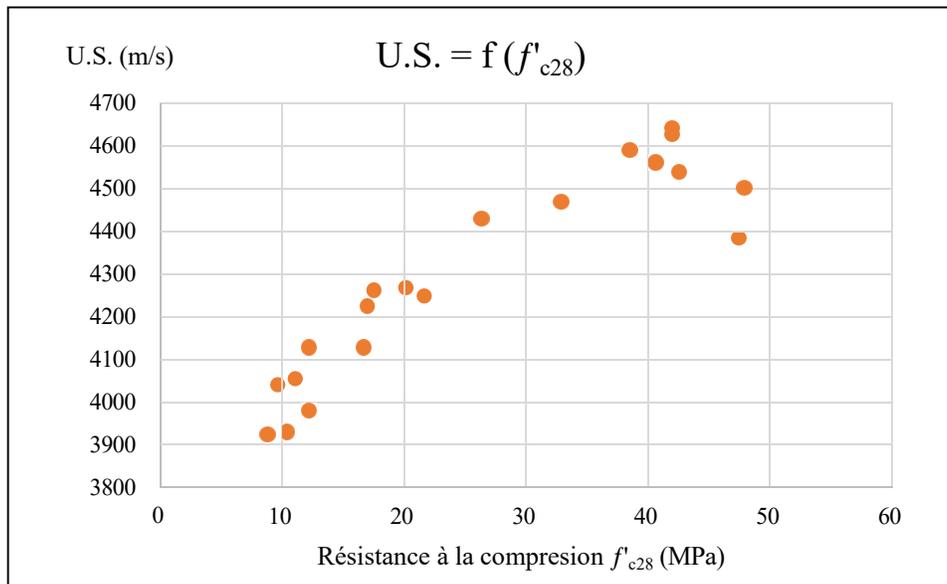


Figure 4. 16: Vitesse ultrasonore en fonction de la résistance à la compression des mortiers à 28 jours (phase 4)

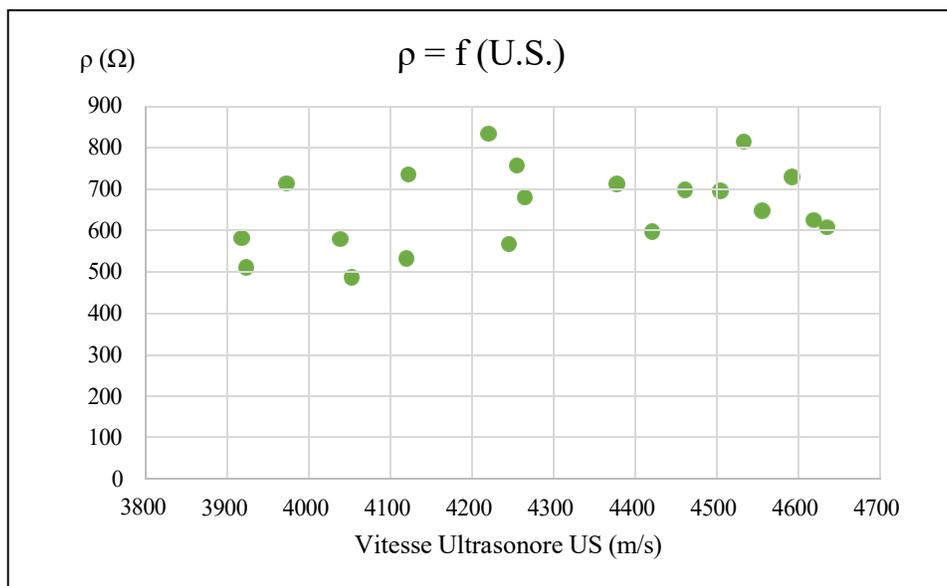


Figure 4. 17: Résistivité électrique en fonction de la vitesse ultrasonore des mortiers à 28 jours (phase 4)

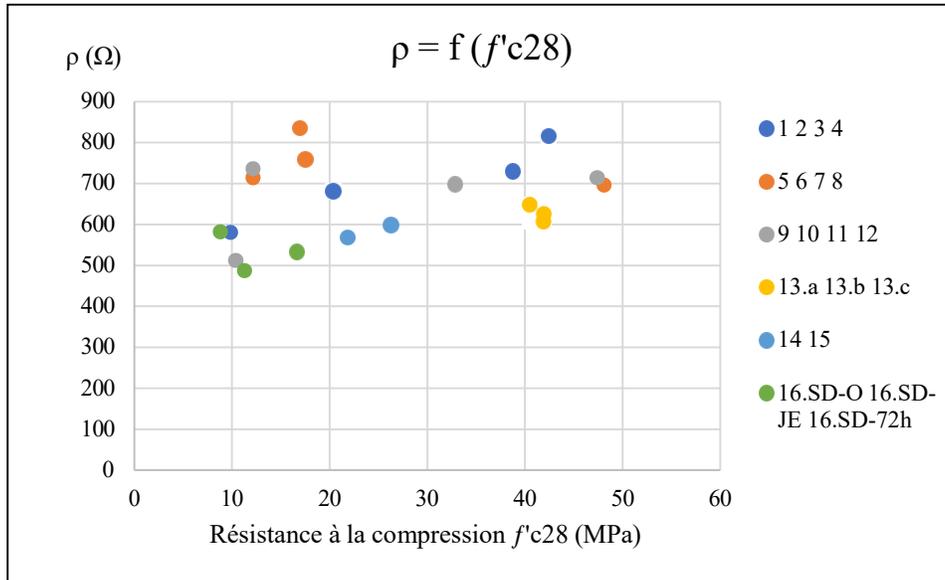


Figure 4. 18 : Résistivité électrique en fonction de la résistance à la compression des mortiers à 28 jours (phase 4)

4.4.2.5. Microscopie électronique à balayage

La microscopie électronique à balayage (MEB) permet de visualiser la microstructure de la pâte de ciment hydratée à une échelle de micromètres près. On a choisi des morceaux de quelques échantillons pour être observé à l'état durci (à 130 jours), après 28 jours de cure humide poursuit de 102 jours de conservation à l'air libre. Les échantillons choisis sont les suivants :

- Le mélange de référence (numéro 1).
- Le mélange 10 qu'on peut considérer comme optimal puisque c'était le meilleur mélange contenant les deux paramètres (8% de poudre de carapaces de finesse $<80\mu\text{m}$ et 50% de sable dragué trempé 72 heures dans l'eau).
- Le mélange 12 était le moins résistant (contient 8% de poudre et 100% de sable dragué).

- **MEB de l'échantillon 1 (référentiel) :**

En observant le premier échantillon du mélange de référence à l'aide de l'équipement de microscopie électronique à balayage, on a remarqué :

- Présence de plaquettes de portlandite ou chaux éteinte ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) symbolisée CH, ayant une forme hexagonale présentée dans la figure 4. 19.
- Des formes d'aiguilles d'ettringite enchevauché et bien développé autour des

granulats (figure 4. 19).

- Un peu de gel de CSH (silicate de calcium hydraté), il s'agit d'un réseau de fibres très fines distribué dans la matrice cimentaire, c'est le principal produit d'hydratation (figure 4. 19).
- ZTI (zone de transition d'interface) qui relie le granulat fin à la matrice cimentaire illustré dans la figure 4. 19 est considérée comme petite.

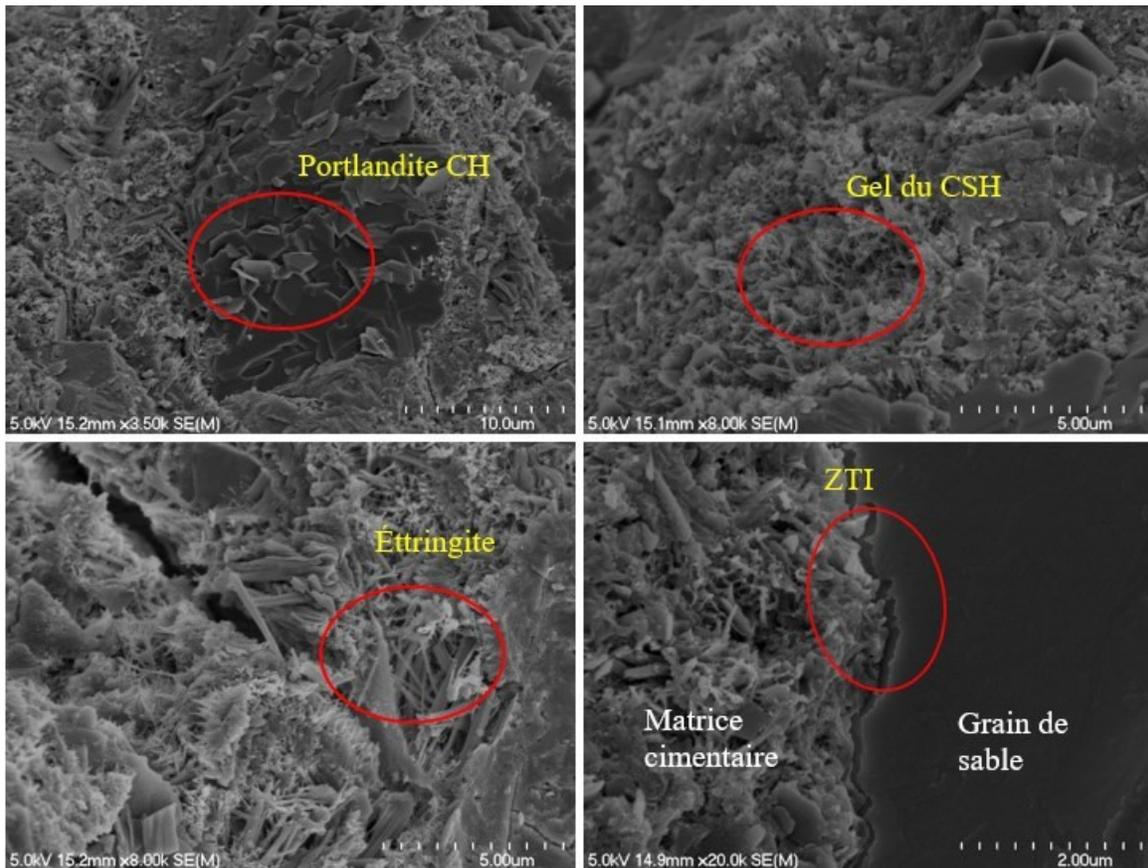


Figure 4. 19: MEB de l'échantillon 1 (référence)

• **MEB de l'échantillon 10 (optimal) :**

L'échantillon 10 est considéré comme optimal, puisqu'il est obtenu après l'optimisation du taux de poudre de carapaces (8%) et du taux de sable dragué (50%) contenu sans qu'on affecte trop les résistances. Comparativement au mélange de référence, celui est moins résistant (de 22,6 %), mais il reste bon puisque sa résistance à la compression à 28 jours est presque de 33 MPa. En observant ce spécimen, on remarque l'existence de :

- Beaucoup de gel de CSH dans ce mélange par rapport à la référence.
- Des aiguilles d'ettringite sont éparpillées dans ce spécimen.
- Contrairement à la référence, ici il y a peu de portlandite CH, d'ailleurs on a trouvé

seulement celle présentée dans la figure 4. 20.

- Présence de quelques pores d'où la diminution de la résistance ici (figure 4. 20).
- La zone de transition (ZTI) est un peu faible, ce qui affaiblit l'adhérence entre les granulats fins et la pâte de ciment, cependant la résistance est réduite comparativement à la référence.
- La ZTI est plus apparente ici, car elle est plus grande de taille, d'où la diminution de l'adhérence et par la suite de la résistance. Cette zone est illustrée dans la figure 4.20.

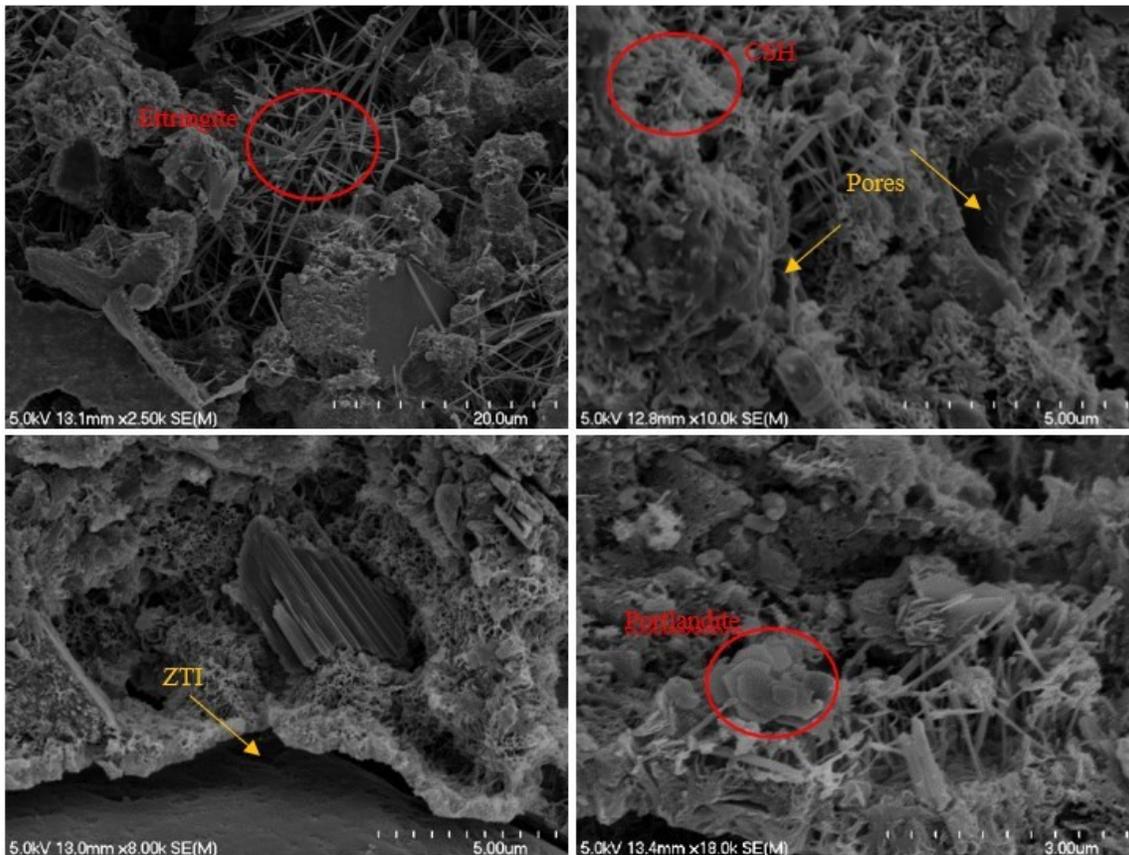


Figure 4. 20 : MEB de l'échantillon 10 (optimal)

• **MEB de l'échantillon 12 (le moins résistant) :**

Concernant le mélange 12, contenant 11 % de poudre de carapaces et 100% de sable dragué, il est le moins résistant (10,4 MPa qui est presque le un quart de la résistance de référence), lors de l'analyse de sa microstructure observée par la MEB on a remarqué :

- L'existence d'importante quantité de portlandite (figure 4. 21).
- La présence de beaucoup d'ettringite pareillement aux autres échantillons analysés.
- Presque pas de CSH dans cette matrice (ou traces), qui est un produit d'hydratation principal et un élément essentiel responsable au développement des résistances, d'où

la réduction énorme de résistance dans ce spécimen.

- Beaucoup trop de pores de différentes tailles sont détectés dans la matrice cimentaire de cet échantillon, ce qui explique aussi la chute de résistance par rapport à la référence d'environ 76% (figure 4. 21)
- La zone de transition (ZTI) est encore plus grande ou apparente ici, d'où la faible adhérence entre le granulat et la matrice cimentaire, en effet la pâte cimentaire n'est pas bien collée aux granulats ce qui cause la faiblesse de la résistance. Ceci est bien visible dans la figure 4. 21.

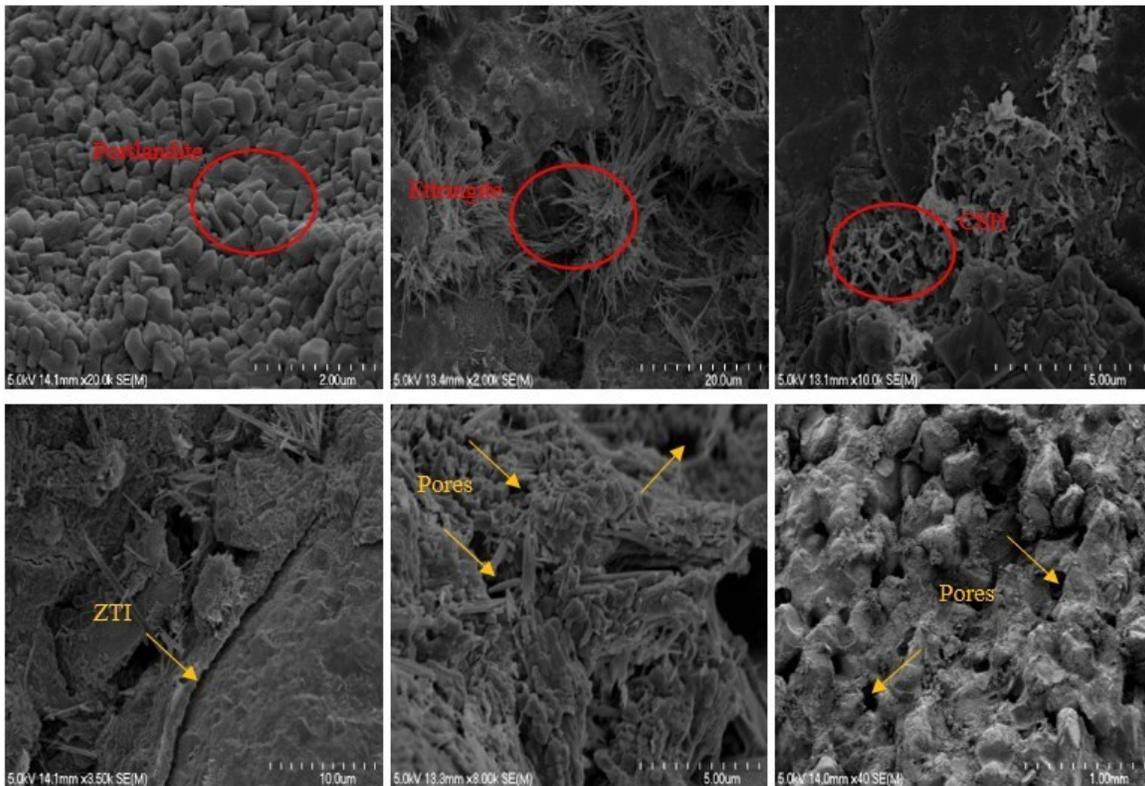


Figure 4. 21 : MEB de l'échantillon 12 (moins résistant)

NB : D'autres photos de la MEB des trois échantillons sont disponibles en annexe B.

En conclusion :

- ✓ L'imagerie MEB a permis de bien visualiser la microstructure des mélanges ainsi que leurs défauts, pour en déduire leurs conséquences sur les propriétés mécaniques. On a ainsi pu faire le lien entre ce qui se passe à l'intérieur de la matrice formulée et les résistances obtenues pour les mélanges les plus importants.

4.5. Conclusion

Le sable de dragage de Millerand (IDM) affecte considérablement les propriétés mécaniques, surtout à des pourcentages élevés.

La meilleure procédure à appliquer toujours avant d'utiliser le sable dragué c'est de le tremper 72 heures dans l'eau puis l'étuver, ça enlève les impuretés restantes et améliore le mélange sans changer les propriétés de la surface des grains de sable.

La poudre a un bon effet filler surtout avec une finesse plus inférieure à $80\mu\text{m}$, mais si c'est combiné avec le sable de dragage dans le mélange il faut tenir compte du seuil critique de 8% de poudre et un seuil de sable d'environ 50%.

Les résultats donnés par les essais de résistivités électrique, vitesse ultrasonore et résistances à la compression, à 28 jours sont cohérents.

Le mélange 10 contenant 8% de poudre (de finesse inférieure à $80\mu\text{m}$) et 50% de sable de dragage trempé 72 heures dans l'eau (noté SD-72h) est l'optimal de valorisation, compte tenu des taux de remplacement des deux paramètres par rapport à tous les résultats et à la référence dans cette étude. Ce mélange est compact, homogène et résistant ($f'_{c28} = 33\text{MPa}$), de point de vue microstructural, il est riche en gel de CSH et en ettringite par contre ce mélange contient très peu de portlandite.

Chapitre 5 : Conclusion et recommandations

5.1 Conclusion générale

Dans la thématique de valorisation des déchets dans le secteur des matériaux de construction, on a réalisé cette étude qui consistait à l'exploitation du sable de dragage provenant du port de Millerand (Iles de la Madeleine, Québec) et des carapaces de crustacés, qui est un résidu de transformation de la pêche.

Ce projet visait à valoriser ces matières résiduelles dans une matrice cimentaire en étudiant les possibilités de remplacement du sable ordinaire par le sable de dragage des IDM et du ciment par la poudre de carapaces de crustacés. Pour ce fait, la composition chimique de ces ingrédients a été étudiée. Par la suite, plusieurs formulations ont été préparées, en faisant varier différents paramètres : la finesse de la poudre de carapaces, la procédure de lavage du sable dragué, les taux de remplacements de ces deux constituants. Ces paramètres ont été étudiés séparément, puis ensemble, pour connaître non seulement l'effet de chacun, mais aussi comment ils réagissent les uns sur les autres, ainsi que l'influence de l'ensemble sur les propriétés mécaniques des mélanges cimentaires. Ceci a été réalisé par étapes, sous forme de quatre phases principales.

La première phase expérimentale consistait à caractériser la composition chimique des résidus à valoriser, afin de prévoir la possibilité de les impliquer dans la matrice cimentaire. La diffraction aux rayons X est la technique utilisée pour déterminer la structure cristalline de la poudre de carapaces calcinée à 800°C selon une procédure déterminée avant le broyage, pour se débarrasser de la matière organique présente dans ces carapaces. En outre la fluorescence aux rayons X nous a montré les éléments chimiques et les phases oxydes présents dans cette même poudre calcinée puis broyée. La procédure de calcination consiste à monter le four jusqu'à 500°C puis palliers pendant 1 heure à cette température, ensuite monter encore le four jusqu'à 800°C et enfin éteindre le four sans l'ouvrir jusqu'au lendemain. Il en résulte que :

- ✓ La poudre de carapaces est composée majoritairement du carbonate de calcium (CaCO_3), cette poudre contient 60% de CaO, ceci justifierait l'utilisation de cette poudre en tant que filler calcaire.
- ✓ Le sable à l'état brut contient du quartz majoritairement (SiO_2) 95% avec un peu de microcline (KAISi_3O_8) et des traces d'anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). La forte présence de quartz dans le sable de dragage des IDM de façon générale rend possible de travailler sur son incorporation dans les mélanges cimentaires.

Chapitre 5 : Conclusion et recommandations

La deuxième phase consistait à étudier l'effet du taux de remplacement du ciment par la poudre de carapaces de crustacés, sur les résistances mécaniques des mélanges. Dans ce but on a confectionné des pâtes de ciment qui comportent des taux de poudre de carapaces en remplacement massif du ciment, de 0 jusqu'à 20% avec un pas de 5%. La poudre utilisée était de finesse inférieure à 80 μ m, sauf pour le mélange contenant 5 % de poudre où on a préparé deux mélanges comparatifs de finesses, dont un contenant cette poudre et l'autre contenant une poudre de finesse égale à 80 μ m. Les essais réalisés sont l'affaissement et l'étalement (à l'état frais), et la vitesse ultrasonore, la résistivité électrique et la résistance à la compression (à l'état durci à 7 et 28 jours). Les résultats obtenus ont suggéré que :

- ✓ La poudre de carapaces pouvait être utilisée comme filler.
- ✓ Les pourcentages de 5 et 10% de poudre sont les plus appropriés, la marge entre 5 et 10% étant une marge intéressante. En effet, 5% de poudre inférieure à 80 μ m améliore la résistance à 28 jours d'environ 7%, et 10% de cette poudre réduit la résistance à la compression à 28 jours de 6,6%.
- ✓ Un pourcentage de 15 ou 20% semble inapproprié car il réduit beaucoup les résistances mécaniques (réduction par rapport à la référence de 16 et 30% respectivement).
- ✓ La finesse inférieure à 80 μ m est intéressante surtout pour des résistances à long terme,
- ✓ mais son influence reste minime.

La troisième phase portait sur l'étude de l'influence de lavage de sable seul sur les propriétés mécaniques des mortiers. Dans cette vision des cubes de mortiers ont été confectionnés à base de 100% de sable de dragage des IDM et de ciment sans poudre. Le premier mélange était à base de sable de dragage ordinaire, le deuxième était à base de sable de dragage lavé par un jet d'eau, et le troisième était à base de sable de dragage trempé 72 heures dans l'eau. Ces deux derniers sables ont été étuvés à 105°C pendant 24 heures pour enlever le surplus d'eau. Les résistances à la compression ont été testées à 28 et 91 jours pour ces cubes de mortiers. On a constaté que

- ✓ Le trempage du sable dans l'eau augmente la résistance à 28 jours de 22% et à 91 jours de 44% par rapport au sable dragué ordinaire.
- ✓ Le lavage au jet d'eau augmente la résistance à 91 jours de 80% par rapport à l'ordinaire, mais il n'a aucun impact à 28 jours.
- ✓ En gros, les résultats ont montré l'importance du lavage et que ces deux procédures de lavages ont eu un impact significatif sur les résistances des mélanges permettant d'enlever le sel et les impuretés résiduelles. Cependant, dans les prochaines formulations, un lavage du sable de dragage sera nécessaire avant son utilisation.

La quatrième phase consistait à varier tous les paramètres cités précédemment dans une nouvelle gamme de formulations en se basant sur les trois phases expérimentales précédentes. Cette étape consistait à fabriquer des cubes de mortiers incluant la poudre de carapaces et le sable de dragage à différents pourcentages, Les taux de remplacement du ciment par la poudre de carapaces dans les mélanges de mortier étaient de 0, 5, 8 et 11 %,

tandis que les taux de remplacement du sable ordinaire par le sable de dragage étaient de 0, 50, 75 et 100% pour chaque pourcentage de poudre. Les carapaces de crustacés étaient calcinées à 800°C, puis broyées pour obtenir la poudre de la même façon que dans les anciennes phases. Cette poudre avait une finesse inférieure à 80µm pour toutes les formulations, sauf les mélanges contenant 11% de poudre et 0% de sable dragué. Dans ces derniers, on a utilisé une fois la poudre de finesse inférieure à 80µm, une autre fois la poudre de finesse égale à 80µm et enfin la poudre de finesse mélangée des deux finesses précédentes à proportions égales. Concernant le sable de dragage, dans tous les mélanges, on a utilisé le sable trempé 72 heures dans l'eau puis étuvé, sauf pour les mélanges comparatifs de procédures de lavage, celui contenant 11% de poudre et 100% de sable de dragage pour savoir l'effet du lavage en présence de la poudre. Dans ces mélanges on a utilisé une fois le sable trempé 72 heures dans l'eau, puis le sable lavé au jet d'eau et enfin le sable de dragage sans lavage.

A l'état frais, les essais réalisés dans cette phase étaient l'affaissement et l'étalement. A l'état durci, c'étaient la vitesse ultrasonore, la résistivité électrique et la résistance à la compression à 28 jours. Plus tard on a observé à l'aide du MEB quelques échantillons à 130 jours. Les résultats obtenus de ces différents essais sont cohérents, ils ont montré que :

- ✓ Le sable de dragage diminue les résistances mécaniques surtout à des pourcentages élevés (75 et 100%) de sable dragué, ça réduit la résistance de plus de la moitié pour différents pourcentages de poudre (de 0 à 11%).
- ✓ La poudre a un effet filler intéressant, surtout avec une finesse inférieure à 80µm, mais en présence du sable de dragage on note un seuil critique de 8% de poudre et un seuil de sable d'environ 50%. Il est à noter que l'effet de la finesse est minime (moins que 4%), pour ces finesses proches étudiées (inférieure à 80µm, égale à 80µm et le mélange des deux).
- ✓ La meilleure procédure de lavage parmi celles appliquées était le trempage du sable durant 72 dans l'eau, pour se débarrasser des impuretés et du sel.
- ✓ Parmi toutes les formulations préparées, on peut considérer le mélange 10 contenant 8% de poudre (de finesse inférieure à 80µm) et 50% de sable de dragage trempé 72 heures dans l'eau (noté SD-72h) comme étant l'optimal de valorisation, compte tenu des taux de remplacement des deux paramètres par rapport à tous les résultats et à la référence dans cette étude. Ce mélange est compact, homogène et résistant ($f'_{c28} = 33\text{MPa}$). D'un point de vue microstructural, ce mélange est riche en gel de CSH et en ettringite, mais il contient très peu de portlandite.

En récapitulation, le sable de dragage affecte significativement les propriétés mécaniques des mortiers. En effet, au-delà de 50% de sable de dragage, les résistances mécaniques diminuent significativement. Cependant, à un certain pourcentage élevé on enregistre une nette réduction de la résistance à la compression.

Tremper le sable dragué dans l'eau pendant 72 heures a donné une meilleure performance mécanique comparativement aux autres types lavages étudiés.

Les poudres ayant une finesse plate ($<80\mu\text{m}$) ont présenté un bon effet filler.

Les poudres utilisées ont permis d'améliorer les résistances mécaniques $f'c$ des composites, surtout à long terme (en développant des réactions pour former du gel de CSH). Cependant, à un certain pourcentage, les poudres n'ont présenté aucun effet important sur les propriétés mécaniques (seuil critique de poudre d'environ 8% en présence de SD).

Les mélanges contenant 8% de poudre inférieure à $80\mu\text{m}$ et 50% de sable de dragage trempé ont présenté la meilleure $f'c$ ou le meilleur comportement mécanique. Il s'agit du mélange optimal souhaité dans cette étude pour valoriser ces résidus marins.

5.2 Recommandations

En se basant sur cette étude, et pour aller plus loin dans ce projet au futur, il est recommandé de :

- ⇒ Formuler des mortiers valorisant du sable de dragage et de la poudre de carapaces tout en ajoutant des ajouts pouzzolaniques (poudre de verre, fumée de silice, etc.) pour augmenter leurs performances.
- ⇒ Le mélange contenant 8% de poudre et 50% de sable de dragage, pourrait être utilisé pour quelques applications (roches artificielles etc.). Passer à une échelle béton pour élargir son domaine d'application et passer éventuellement à une grande échelle sur terrain (trottoirs, béton de masse, etc.).
- ⇒ Diminuer le pourcentage du sable de dragage (surtout en présence de poudre) dans des prochaines formulations en rajoutant du sable ordinaire pour augmenter la distribution granulométrique. Quand ces deux résidus sont étudiés dans la même matrice, un seuil d'environ 10% de poudre et d'environ 50% de sable de dragage est recommandé dans des prochains mélanges.
- ⇒ Changer la procédure de calcination des poudres pour enlever plus de matière organique sans trop endommager la nature pour garder l'aspect écologique du projet.
- ⇒ Une analyse de cycle de vie (ACV) sera intéressante et un bilan énergétique, ceci permettra d'évaluer ce projet et son impact sur l'environnement pour s'assurer de son côté écologique.

Références

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

Adewuyi P. A., O. Franklin, S., et A. Ibrahim, K., (2015) Utilization of Mollusc Shells for Concrete Production for Sustainable Environment. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(9).

Amar M., Benzerzour M., Abriak N.E., Maherzi W., (2016) Étude de valorisation des sédiments de dragage. *Academic Journal of Civil Engineering*, 34(1), 882-889. <https://doi.org/10.26168/ajce.34.1.107>

Anger B., (2014) Caractérisation des sédiments fins des retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière, thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, 316 p

Asphama A. I., Amir F., Malina A. C., Fujaya Y., (2015) Habitat Preferences of Blue Swimming Crab (*Portunus pelagicus*) Species Complex, *Aquacultura Indonesiana*, 16(1), pp. 10–15. doi: 10.21534/ai.v16i1.10.

ASTM C109 (2010) 'Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) 1', *Chemical Analysis*, (C109/C109M – 11b), pp. 1–9. DOI: 10.1520/C0109.

ASTM C305 (2015) 'Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars', *ASTM Standard Book*, pp. 14–16. DOI: 10.1520/C0305-14.2.

ASTM C128 (2015) Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate DOI: 10.1520/C0128-15.

ASTM C597 (2016) Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete DOI: 10.1520/C0597-16.

ASTM C1876 (2019) Standard Test Method for Bulk Electrical Resistivity or Bulk Conductivity of Concrete DOI: 10.1520/ C1876-19

Azmana M., Mahmood S., Hilles A.R., Rahman A., Arifin M.A.B., Ahmed S., (2021) A review on chitosan and chitosan-based bionanocomposites: Promising material for combatting global issues and its applications, *International Journal of Biological Macromolecules*, Elsevier.

Beddaa H., Ouazi I., Ben Fraj A., Lavergne F., Torrenti J. M., (2020) 'Reuse potential of dredged river sediments in concrete: Effect of sediment variability', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 265, p. 121665. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121665.

Références

Bel Hadj Ali I. (2013), Contribution à l'étude des sédiments marins tunisiens: cas des ports de Radès et de Gabès, thèse de doctorat, page 33/219.

Ben Abdeljelil J., (2020) Potentiel des carapaces de crustacés pour la fabrication des bétons à base de sédiments de dragage, mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke.

Ben Khalifa O., (2019) Valorisation des sédiments de dragage en génie civil, mémoire de projet de fin d'études du premier cycle, ENIG.

Ben Othman R., El Euch, S., et Neji, J., (2014) Béton de sable de dragage fibré. JSFM-CMC.

Benzerzour, M., Amar, M. et Abriak, N. E. (2017) New experimental approach of the reuse of dredged sediments in a cement matrix by physical and heat treatment, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 140, pp. 432–444. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.142.

Bezerra U.T., Ferreira R.M., Castro-Gomes J.P., (2011) The effect of latex and chitosan biopolymer on concrete properties and performance, Federal Institute of Education (Brésil), University of Minho (Guimarães, Portugal), University of Beira Interior (Covilhã, Portugal), *Key Engineering Materials* Vol 466 pp 37-46.

Brakni S., (2008) Première approche vers une valorisation de granulats artificiels à base de sédiments de dragage, Thèse de doctorat, École des mines de Douai, 182 pages.

Delestrac D., N Vergeron N., (2019) Le monde dans un grain de sable, *Diplomatie*, JSTOR

DDH Environnement limitée (2003) Portrait des activités de dragage sur le Saint-Laurent. Les aspects administratifs, économiques et sociaux. Rapport préparé pour Transports Québec, 113 p.

Desrosiers M., (2008) Communication personnelle. Service environnement, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada.

Dia M., (2013) Traitement et valorisation de sédiments de dragage en technique routière, Thèse de Doctorat, École des mines de Douai, 169 pages.

Djebali C., (2020) Valorisation des coquilles de palourde et du sable de dragage dans les matériaux cimentaires, mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke 2020.

Dubois V., (2006) caractérisation physico chimiques et environnementale des sédiments marins. Application en technique routière, Thèse de Doctorat, École des mines de Douai, 291 pages.

Dubois V., Abriak N.E., Zentar R., Ballivy G. (2009) The use of marine sédiments as a pavement base material, *Waste Management*, Elsevier, Volume 29, Issue 2,2009, Pages 774-782.

Durbecq T., Thibodeau M., Hubert J., et Tita G., (2012) Gestion des matières résiduelles

aux Îles-de-la-Madeleine: Profil quantitatif et caractéristique page 39.

Eziefula U.G., Ezech J.C., Eziefula B.I., (2018) Properties of seashell agregate concrete, 192, pp. 287–300.

Ez-Zaki H., Diouri A., Kamali-Bernard S., Sassi O., (2016) Composite cement mortars based on marine sediments and oyster shell powder, 66(321), DOI: <https://doi.org/10.3989/mc.2016.01915>.

Ez-Zaki H., (2016) Valorisation de sous-produits marins dans l'élaboration de mortiers composites à base de sédiments et poudres de coquillage, thèse, P17.

Flower D. J. M., et Sanjayan, J. G., et al. (2007) Green house gas emissions due to concrete manufacture. The International Journal of Life Cycle Assessment, 12, 282-288.

Ferraro V., Cruz I.B., Jorge R.F., Malcata F.X., Pintado M.E., Castro P.M.L., (2010) Valorisation of natural extracts from marine source focused on marine byproducts : A review, FRIN. Elsevier Ltd, 43(9), pp. 2221–2233. doi: 10.1016/j.foodres.2010.07.034.

Gamsonre C., (2014) Gestion terrestre des sédiments de dragage et processus biophysicochimiques impliqués. <https://archipel.uqam.ca/6547/1/d2662.pdf>

Glavind M., (2009) Sustainability of cement, concrete and cement replacement materials in construction, in: Sustainability of Construction Materials, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, pp. 120–147. <https://doi.org/10.1533/9781845695842.120>

Hamer K., Karius V., (2002) Brick production with dredged harbour sédiments. An industrialscale experiment, Waste Management, Volume 22, Issue 5, pages 521-530, [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(01\)00048-4](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(01)00048-4)

Hayet A., Deram, A. et Bohain, D., (2017) Contexte et cadre réglementaire de la gestion des sédiments de dragage. Impacts écologiques de sédiments pollués extraits et déposés en milieux terrestres.' p. 49.

Herman S., Glaser D., Pieters A., Grégoire P., Priez C., Desmoulin D., et Guglielmetti D., (2014) Cinq ans de valorisation des sédiments contaminés extraits du Port de Dunkerque (France). Xiiième Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil, Dunkerque, 2-4 Juillet 2014. [Http://doi.org/10.5150/jngcgc.2014.109](http://doi.org/10.5150/jngcgc.2014.109)

Holmyard N., et Franz N., (2016) Lobster Markets

Ilangumaran G., Stratton G., Ravichandran S., Shukla P.S., Potin P., Asiedu S., Prithiviraj B., (2017) Microbial Degradation of Lobster Shells to Extract Chitin Derivatives for Plant Disease Management, pp. 1–14. doi: 10.3389/fmicb.2017.00781.

John V.M., Damineli B.L., M Quattrone M., Pileggi R.G., (2018) Cement and Concrete Research Fillers in cementitious materials Experience, recent advances and future

Références

potential, *Cement and Concrete Research*. Elsevier 114(March), pp. 65–78. doi: 10.1016/j.cemconres.2017.09.013.

Journal Nature, (2013) Une ancienne ballastière devient un site écologique exemplaire dans une boucle de la Seine. *Le.journal.nature.com*, 9. Retrieved from <http://www.lejournalnature.com/ljnblogmain/?p=163>

José R. (2021) Développement d'un nouvel agent modificateur de viscosité pour les matériaux cimentaires : Étude préliminaire, ASCE.

Hanan M.R.A., Nasution A.K., Hussain R., Saidin S., (2018) fabrication of poly (lactic-co- glycolic acid)/calcium phosphate bone cement composite : synthesization of calcium phosphate from crab shells, *Jurnal Teknologi*, 4, pp. 103–109.

Kim D., (2004) Study of Biopolymer-Modified Concrete System : Geopolymerization of Biopolymers (Los Angeles : University of Southern California)

Lasheras-Zubiate M. Navarro-Blasco I., Fernández J.M., et Álvarez J.I., (2012) Effect of the addition of chitosan ethers on the fresh state properties of cement mortars, *Cement & Concrete Composites*, Elsevie.

Légaré B. C., (2011) Identification de scénarios de valorisation des matières résiduelles critiques aux Îles-de-la-Madeleine Rapport de stage en gestion des matières résiduelles.

Limeira J., Agulló, L., et Etxeberria, M. (2012) Dredged marine sand as construction material. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(8), 906–918.

Lirer S., Liguori B., Capasso I., Flora A., Caputo D., (2017) Mechanical and chemical properties of composite materials made of dredged sediments in a fly-ash based geopolymer, *Journal of Environmental Management*. Elsevier Ltd, 191, pp. 1–7. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.01.001.

Lyazzat B., El-Sayed N., Yeligbayeva G. Zh., et Eshmaiel G., (2020) Modification of Chitosan as Chemical Admixture for Cement Pastes, *Egypt. J. Chem.* Vol. 63, No. 4, pp.1497-1508.

Lydon D., (2003) *Homarus americanus* (On-line), *Animal Diversity Web*. Available at: https://animaldiversity.org/accounts/Homarus_americanus/ (Accessed: 3 June 2020).

Marot, F. (1998) *Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques*. Paris BRGM. Paris.

Marquis-Duval F. O., (2008) *Isolation Et Valorisation Des Constituants De La Carapace De La Crevette Nordique*.

Mezencevova A., Yeboah N.N., Burns S.E., Kahn L.F., et Kurtis K.E., (2012) Utilization of savannah harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick, *Journal of Environmental Management* 113- 128- 136.

Références

Miraoui M., (2010) Prétraitement et traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans le génie civil, Thèse Doctorat, Mines de Douai, 210pp.

Mohanasrinivasan V., Mishra M., Paliwal J. S., Singh S. Kr., Selvarajan E., Suganthi E., et Devi C. S. (2013) 3 Biotech 4 167

Moussa D., (2013) Traitement et Valorisation de Sédiments de Dragage Phosphatés en Technique Routière. Génie civil et environnemental. Mines Douai, Centre RAPSODEE UMR CNRS 5302 Ecole des Mines d'Albi Ecole Doctorale SPI 072 (Artois).

Nguyen T.T., Barber A.R., Corbin K., Zhang W., (2017) Lobster processing by - products as valuable bioresource of marine functional ingredients, nutraceuticals, and pharmaceuticals, Bioresources and Bioprocessing. Springer Berlin Heidelberg, pp. 1–19. doi: 10.1186/s40643-017-0157-5.

Novae Communications, (2020) <https://novae.ca/un-beton-sans-beton-et-ecologique/>.

Olivia M., Jingga H., Toni N., et Wibisono G., (2018) Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Riau, Pekanbaru 28293 Indonesia, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 345

Pellerin Renée (2017) : Rapport de caractérisation des sédiments de dragage, valorisation des sédiments de dragage portuaire aux îles-de-la-madeleine, mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke.

Rieussec E., (2008) analyse comparative des différents modes de gestion des sédiments de dragage en milieux terrestre et marin. repere a https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/essais2008/rieussec_erwan.pdf

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

Sabatini P., (2015) Comodity Update – Lobster

Safhi A. el M., Benzerzour M., Rivard P, Abriak N.E., (2019) Feasibility of using marine sediments in SCC pastes as supplementary cementitious materials, 344, pp. 730–740.

Safhi A. el M., (2020) Valorisation des sédiments de dragage dans les bétons autoplacants : Optimisation de la formulation, Thèse en cotutelle franco-canadienne, IMT Lille Douai, Université de Sherbrooke.

Schneider G., (2001) Boues de curage des cours d'eau. Le Courrier de l'Environnement de l'INRA, 43, 146-147.

SEDILAB, (2011) Journées nationales des sédiments - synthèse. Congrès Europeen EcoTechnologies pour Le Futur - Journées Nationales Sédiments 8 et 9 juin 2011, 28 p.

Références

Silitonga E., (2010) Valorisation des sédiments marins contaminés par solidification/stabilisation à base de liants hydrauliques et de fumée de silice. Thèse de doctorat, Université de Caen Basse - Normandie, 229 p.

Stewart G., et Noyes-Hull G., (2010) Feasibility of producing value added products from snow crab processing waste in Cape Breton, Nova Scotia, The Gulf Aquarium and Marine Station Cooperative.

Tagnit-hamou A., (2014) chapitre IV : Hydratation du ciment Portland chapitre VI Hydratation du ciment Portland, université de Sherbrooke.

Tagnit-hamou A., (2014) Chapitre VIII : Les ajouts cimentaires, université de Sherbrooke.
Tagnit-hamou, (2019) Chapitre VI : L'hydratation du ciment Portland, université de Sherbrooke.

Theriault G., Hanlon J., et Creed L., (2013) Report of the Maritime Lobster Panel. Available at: http://www.gov.pe.ca/photos/original/FARD_LobPan13.pdf

Tran N. T., (2009 : valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière, Thèse de doctorat, École des mines de Douai 189 pages.

Tselikis A., Maine L. A., et Mccarron P., (2006) Lobster Market Overview, Usda. Available at: <http://taatrain.cffm.umn.edu/publications/LobsterMrktOverview.pdf>.

VitaMines, (2012) Recycler sédiment fluviaux et déchets minéraux dans le mobilier urbain, c'est possible avec le département GCE, n° 87.

Vyšvaril M., et Zizlavský T., (2017) Effect of chitosan ethers on fresh state properties of lime mortars, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology, Veveří 331/95, Brno 602 00, Czech Republic, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 251, IMST.

Walsh R., (2000) The Lobster Pickle, *Natural History*, 109(6), pp. 72–74

Wang J., Liu E., Li L., (2019) Characterization on the recycling of waste seashells with Portland cement towards sustainable cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 220, 235-252.

Xu Y., Gallert C., et Winter J., (2008) Chitin Purification from Shrimp Wastes by Microbial Deproteination and Decalcification, *Appl Microbiol Biotechnol*, 79, pp. 687–697.

Yadav M., Goswami P., Paritosh K., Kumar M., Pareek N., Vivekanand V., (2019) Seafood waste : a source for preparation of commercially employable chitin/chitosan materials, *Bioresources and Bioprocessing*.

Zentar R., Abriak N.E., Dubois V., (2009) Effects of salts and organic matter on Atterberg limits of dredged marine sédiments, *Applied Clay Science* 42, 2009, pages 391-397.

Références

Zhao Z., Benzerzour M., Abriak N.E., Damidot D., Courard L., Wang D., (2018) Use of uncontaminated marine sediments in mortar and concrete by partial substitution of cement, 93, pp. 155–162.

Zri A., Abriak N.E., Benzerzour M., (2009) Étude de formulations d'un béton de sable à base de sable de dragage. Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime Édition 1, Hammamet, Tunisie (p. 4).

Zri, A., (2010) Mise en place d'une nouvelle approche de formulation d'une matrice cimentaire à base de sable de dragage : application aux bétons de sables et de granulats, Mines de Douai, 223 pages.

Annexe A

- Les résultats de l'affaissement et l'étalement des pâtes (phase 2)

Échantillon	Affaissement (cm)	Étalement (cm)
Réf	12,2	13,5
5 % de = 80 μm	12,4	15,0
5 % de < 80 μm	11,8	15,3
10 % de < 80 μm	11,3	15,6
15 % de < 80 μm	11,7	13,6
20 % de < 80 μm	11,5	14,9

- Résultats des vitesses ultrasonores (V.U.) des pâtes (phase 2)

Échantillons (formulations)	À 7 jours		À 28 jours	
	Vitesse (m/s)	Écart type σ	Vitesse (m/s)	Écart type σ
Réf	3568	149,7	3758	109,2
5 % de = 80 μm	3533	21,6	3749	79,4
5 % de < 80 μm	3500	74,8	3756	64,6
10 % de < 80 μm	3464	29,5	3705	41,8
15 % de < 80 μm	3411	78,8	3530	7,6
20 % de < 80 μm	3246	46,3	3478	36,5

- Les résultats de la résistivité électrique (ρ) des pâtes (phase 2)

Échantillons (formulations)	À 7 jours		À 28 jours	
	Résistivité ρ ($\Omega \cdot m$)	Écart type σ	Résistivité ρ ($\Omega \cdot m$)	Écart type σ
Réf	228	4,4	342	28,3
5 % de = 80 μm	205	8,2	304	9,5
5 % de < 80 μm	208	4,2	292	10,01
10 % de < 80 μm	201	0,6	274	3,5
15 % de < 80 μm	185	4,6	259	4
20 % de < 80 μm	176	9,6	262	0,6

- Les résultats de la résistance à la compression ($f'c$) des pâtes (phase 2)

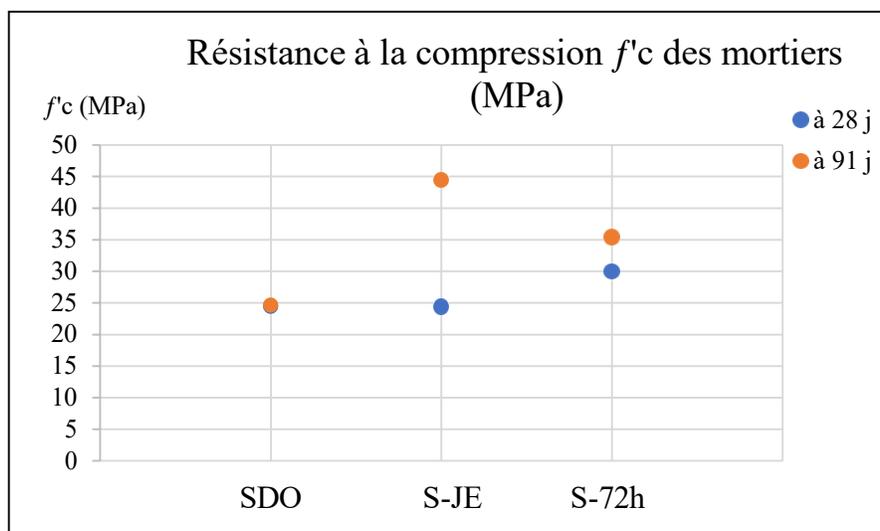
Échantillons (formulations)	À 7 jours		À 28 jours	
	$f'c$ (MPa)	Écart type σ	$f'c_{28}$ (MPa)	Écart type σ
Réf	46,7	1,6	58,1	10,3
5 % de = 80 μm	48,0	2,5	56,9	4,6
5 % de < 80 μm	43,2	0,7	62,2	1,4
10 % de < 80 μm	41,4	1,7	54,3	4,0
15 % de < 80 μm	33,9	1,0	48,7	0,9
20 % de < 80 μm	29,9	0,7	40,7	2,5

- Les résistances à la compression ($f'c$) des mortiers à 28 et 91 jours (phase 3)

Échantillons (formulations)	À 28 jours		À 91 jours	
	$f'c_{28}$ (MPa)	Écart type σ	$f'c_{91}$ (MPa)	Écart type σ
SDO	24,5	1,37	24,7	3,7
S- JE	24,5	0,95	44,5	1,4
S-72h	30,0	1,15	35,5	3,2

L'allure des points de la courbe comparative des résistances à la compression aux deux âges est cohérente :

- Courbe comparative des résistances à la compression ($f'c$) à 28 et 91 jours (phase 3)



- Affaissement et étalement des mortiers (phase 4)

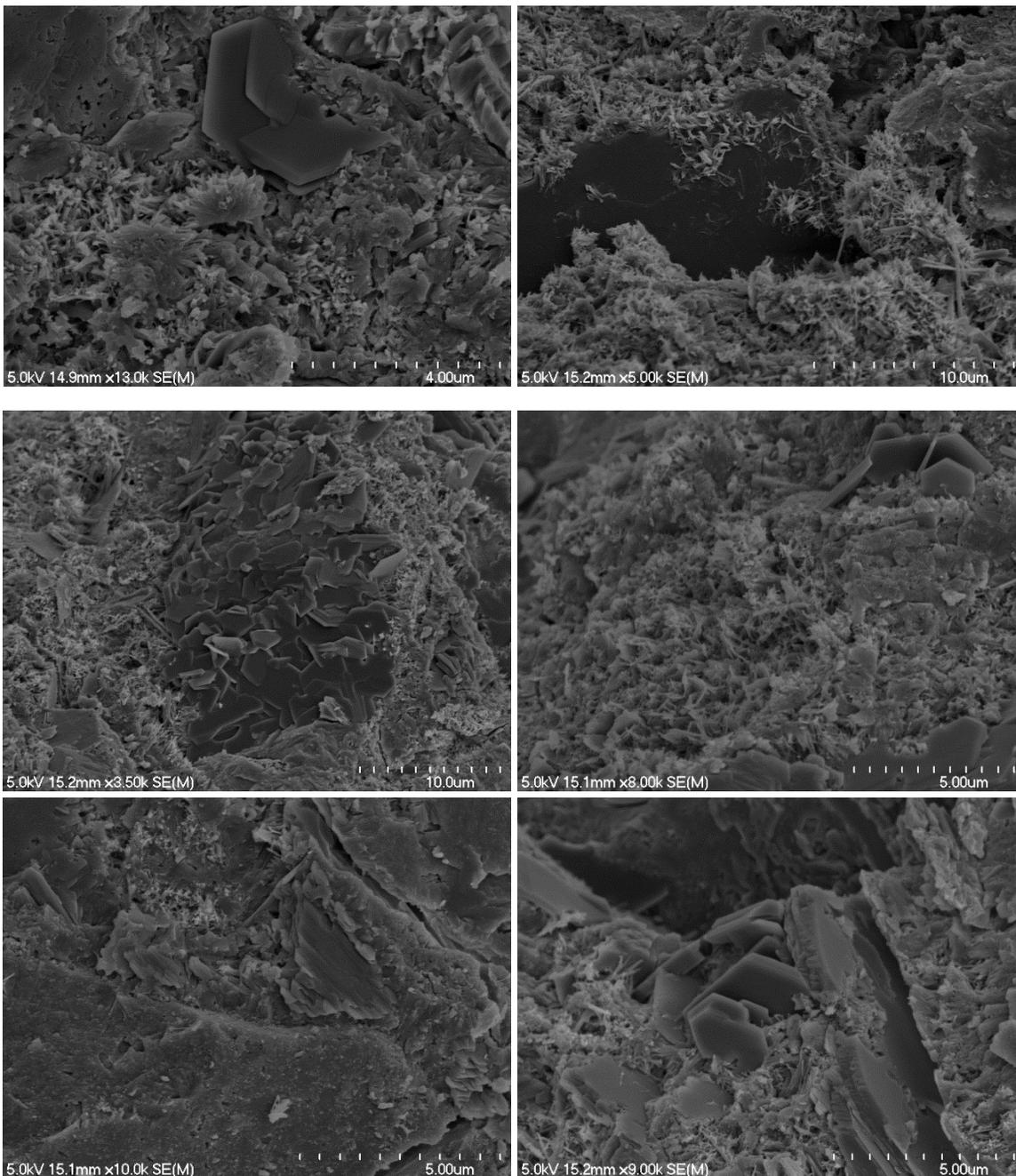
Mélange	Affaissement (cm)	Étalement (cm)
1	8,1	7,2
2	8,5	7,5
3	8,3	7,0
4	8,3	7,2
5	8,1	7,5
6	8,1	7,1
7	8,1	7,0
8	8,0	7,1
9	8,3	7,5
10	8,0	7,2
11	8,1	7,1
12	8,1	7,1
13.a	8,1	7,1
13.b	8,1	7,2
13.c	8,2	7,4
14	8,2	7,2
15	8,1	7,1
16.SD-O	8,1	7,1
16.SD-JE	8,1	7,1
16. SD-72h	8,0	7,0

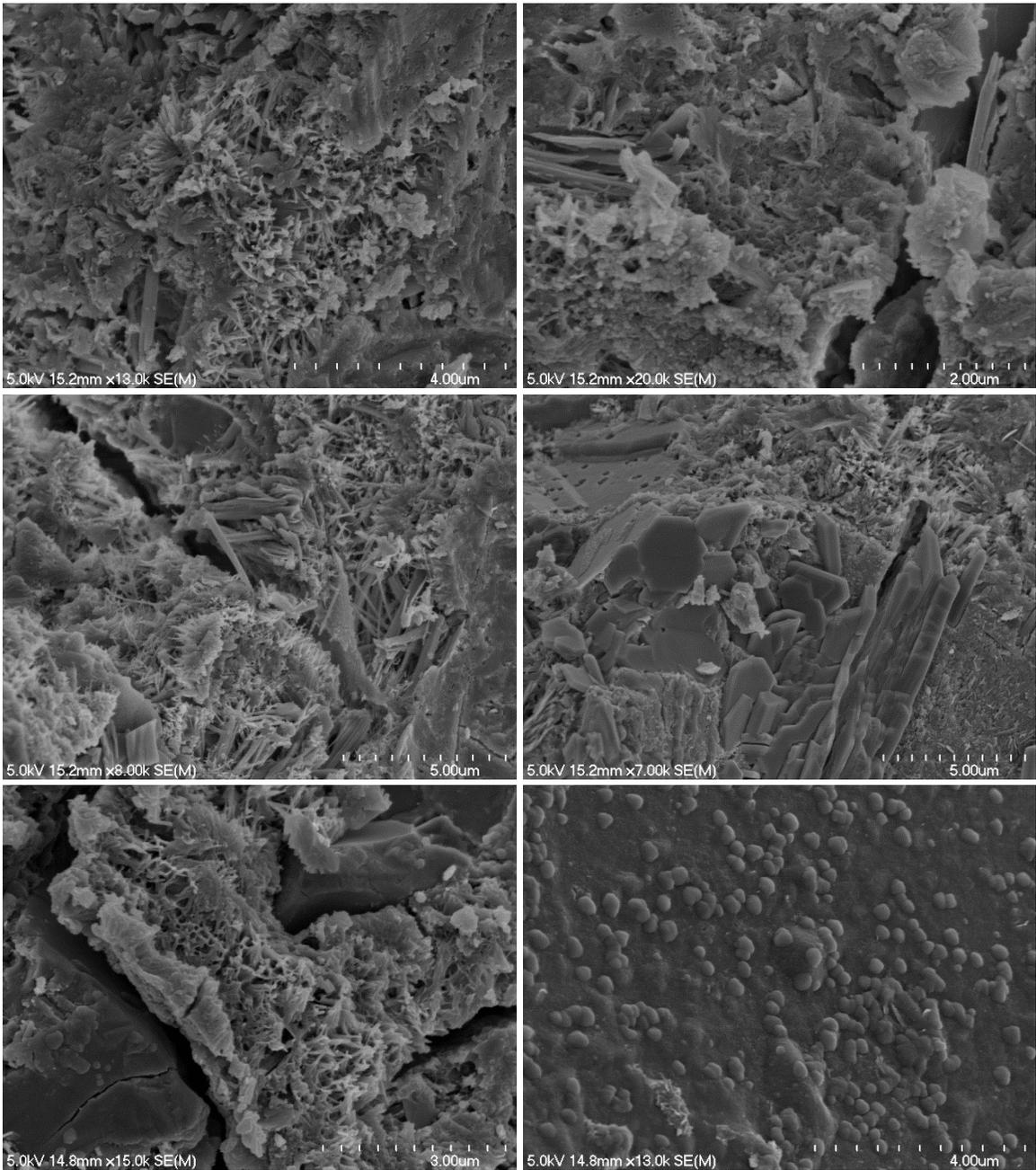
- Résistivité électrique, vitesse ultrasonore, résistance à la compression et leurs écarts types (phase 4)

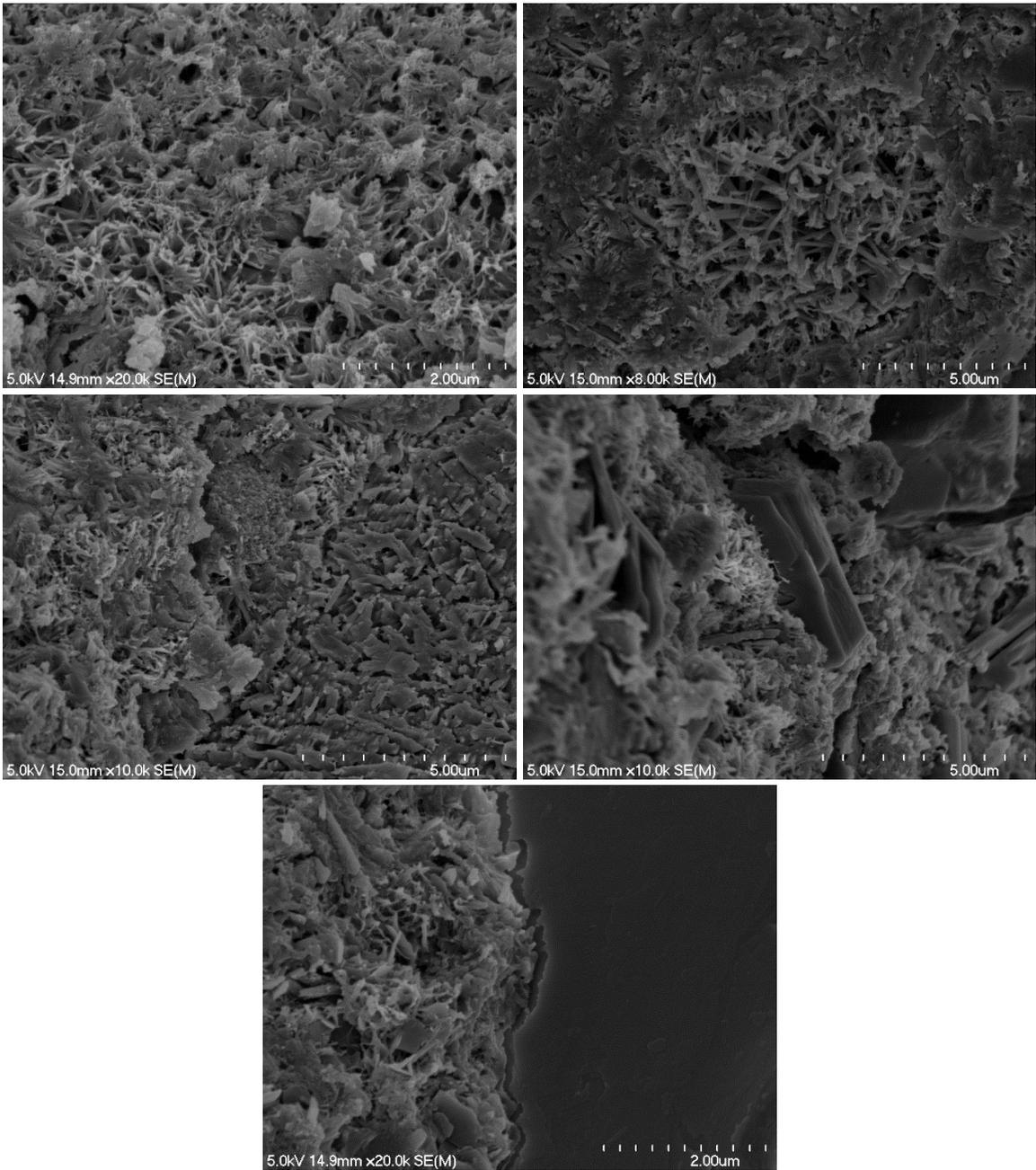
Échantillon	ρ (Ω)	σ de ρ	V. U. (m/s)	σ de v. u.	$f'c28$ (MPa)	σ de $f'c28$
1	815,33	26,84	4536,66	76,51	42,43	5,68
2	728,67	14,84	4596,07	105,5	38,72	2,54
3	681	26,91	4268,06	15,78	20,35	2,34
4	579,33	34,43	4041,15	72,82	9,84	0,96
5	695,67	70,51	4507,81	86,41	48,09	2,46
6	834,67	92,52	4222,89	72,41	16,94	2,31
7	757,67	44,97	4258,06	13,98	17,49	1,99
8	714,33	53,2	3975,13	58,47	12,15	1,14
9	713	16,64	4381,02	12,81	47,39	2,03
10	697,67	37,07	4464,51	25,63	32,84	2,08
11	735	81,18	4125,07	45,98	12,15	0,4
12	511,67	20,82	3925,81	92,86	10,38	0,88
13.a	648,33	11,55	4558,65	41,48	40,51	5,74
13.b	626	32,05	4622,91	69,72	41,91	3,22
13.c	608,67	14,29	4638,04	34,49	41,89	3,48
14	597,67	11,59	4424,15	86,4	26,28	0,46
15	567,67	7,09	4248,33	25,91	21,85	0,72
16.SD-O	487	22,52	4055,47	193,13	11,25	1,98
16.SD-JE	581,33	20,74	3920,3	34,71	8,77	1
16. SD-72h	533,33	13,32	4122,48	32,53	16,63	1,51

Annexe B

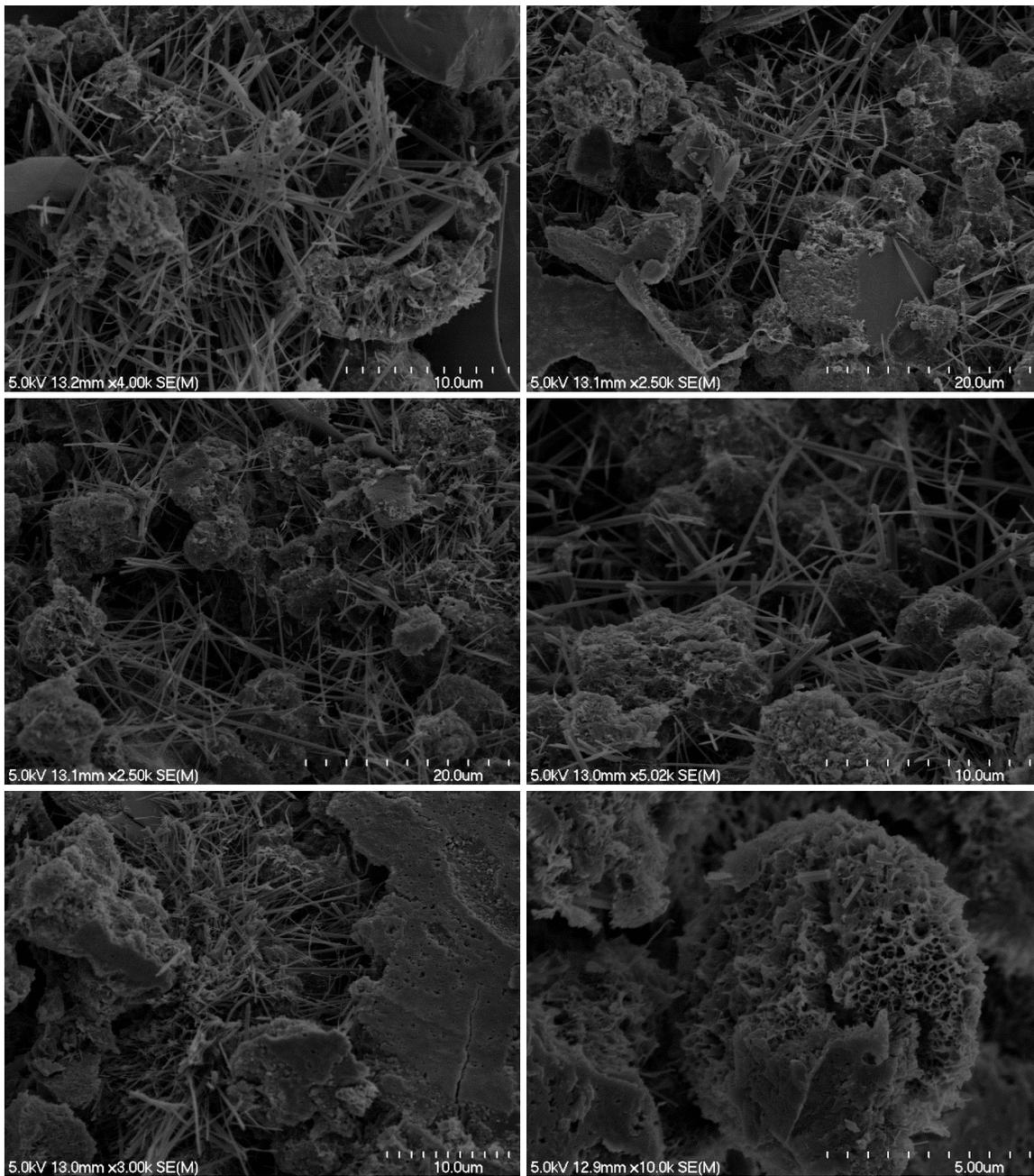
- MEB (le restant des images obtenues) de l'échantillon de référence (échantillon 1, phase 4)

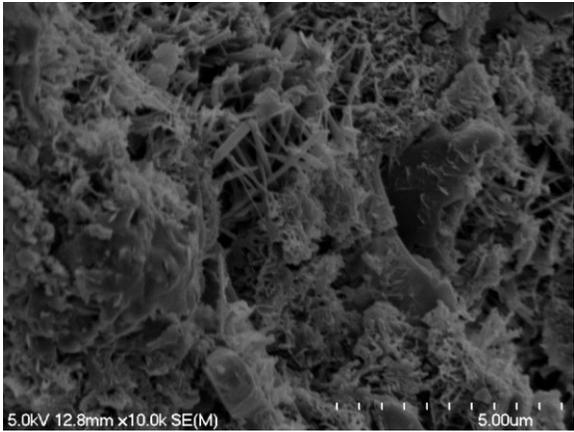
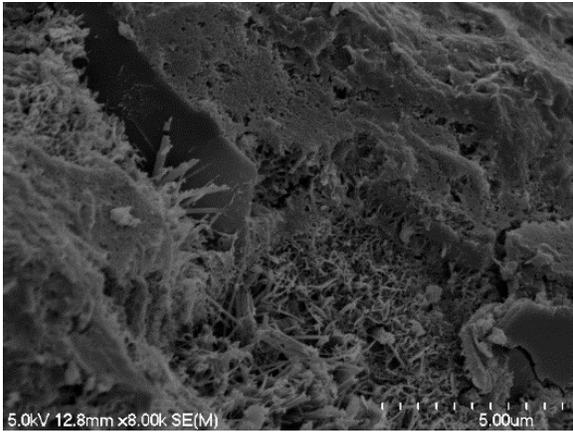
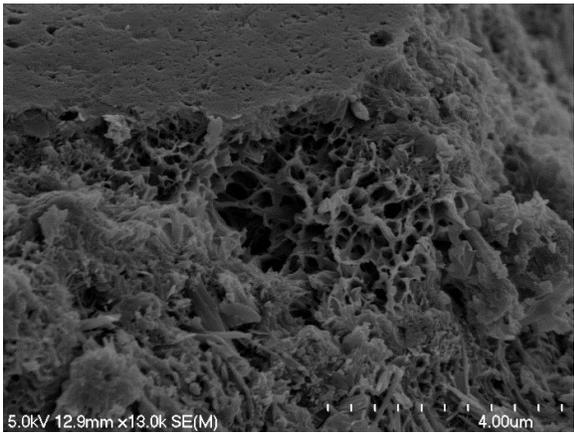
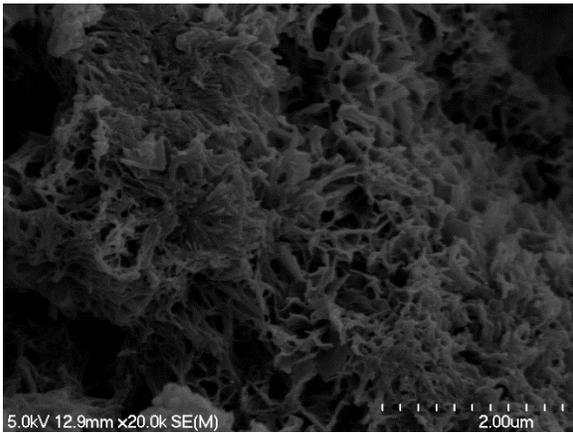


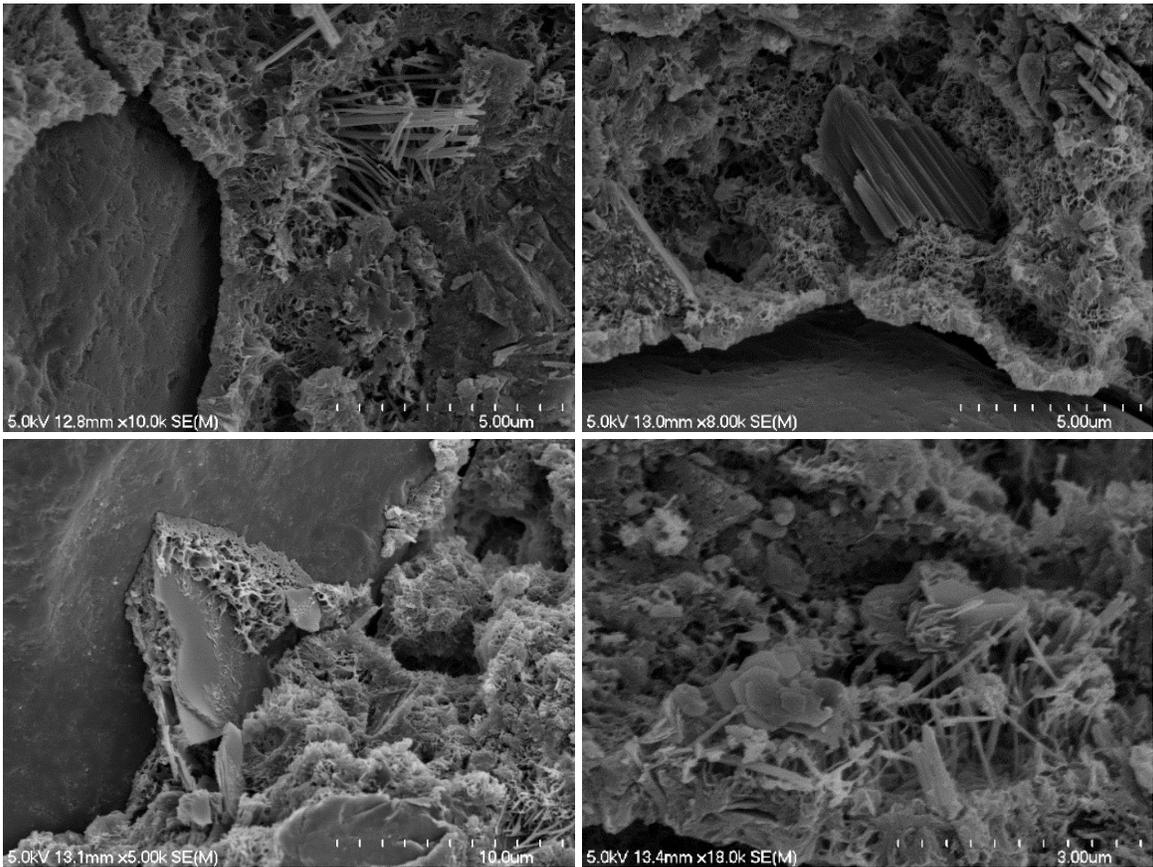




- MEB (le restant des images obtenues) de l'échantillon optimal formulé (échantillon 10, phase 4)







- MEB (le restant des images obtenues) de l'échantillon le moins résistant (échantillon 12, phase 4)

