

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil

Potentiel des carapaces de crustacés pour la fabrication des bétons à base de sédiments de dragage

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie civil

Jihene Ben Abdeljelil

Jury: Patrice Rivard (Directeur)
Mathieu Robert (Rapporteur)
Saeed Kharaghani (Évaluateur)
Audrey Mercier Rémillard (Évaluateur)

Sherbrooke (Québec) Canada, Décembre 2020

Résumé

La possibilité de valorisation des sédiments de dragage peut être une alternative aux matières premières utilisées dans le domaine du génie civil. Leur utilisation a été démontrée par des recherches menées dans ce sens comme matériaux de construction (granulats artificiels, briques...). Quant aux carapaces de crustacés, des résidus provenant des usines de transformation des produits de la pêche, leur utilisation comme ajout cimentaire n'a pas encore été étudiée.

Ce projet a été basé sur l'utilisation potentielle des sédiments de dragage et des carapaces de crustacés dans la formulation d'un béton et dans l'expectative que les mélanges formulés possèdent un comportement mécanique proche de celui d'un béton d'usage normal. Ce projet avait pour objectif spécifique d'étudier différentes formulations de pâtes de ciment et de mortiers en faisant varier quatre paramètres, soit le taux de remplacement du ciment par la poudre de crustacés, la finesse de la poudre, la présence ou non de matière organique dans la poudre et l'effet de la calcination de la poudre.

Les sédiments des Îles-de-la-Madeleine ont été utilisés comme sable dans les mortiers et la poudre de carapaces de crustacés comme ajout cimentaire dans les pâtes et les mortiers. La poudre a été utilisée sous plusieurs formes : brute, tamisée et ensuite calcinée.

L'effet du taux de remplacement, de la finesse et de la calcination de la poudre sur les résistances à la compression a été noté. Pour les pâtes réalisées avec la poudre brute, plus le taux de remplacement augmente, plus la résistance diminue. Pour les pâtes réalisées avec la poudre tamisée, plus la finesse de la poudre augmente, plus la résistance diminue. Ces résultats suggèrent que l'utilisation de poudre brute, tamisée ou non, ne constitue pas une voie de valorisation viable pour la fabrication de matériaux cimentaires. Pour les pâtes réalisées avec la poudre calcinée, il n'y avait pas une relation linéaire entre la résistance et la finesse. Une augmentation de la résistance pour la finesse 80 μm et une diminution pour les finesses <80 μm et 160 μm ont été notées.

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 de ciment. 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.

Mots clés : sédiments, poudre, carapaces de crustacés, propriétés mécaniques, pâtes, mortiers.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance à mon directeur de recherche, le professeur Patrice Rivard, pour son soutien pédagogique, financier, moral et la qualité d'encadrement.

Je tiens encore à remercier l'équipe du groupe mécanique des roches ; Amine, Samuel, Adrien, Suren, Mahmoud, Nicolas, Chouaib, Hamza, Chiraz et Rabeb avec qui j'ai partagé des moments agréables dans une ambiance conviviale et chaleureuse.

Mes remerciements sont ensuite portés aux techniciens du laboratoire mécanique des roches : Danick Charbonneau et Jean-Christophe Lacasse et aux professionnels de la PRAM : Stéphane Gutierrez et Sonia Blais. Je n'aurais pas réussi mes travaux de maîtrise sans leur aide précieuse.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers ma famille et mes amis pour leur amour et leur soutien moral inconditionnel.

Je remercie également le CERMIM, FRQNT et MITACS pour le financement de ce projet.

Je tiens finalement à adresser mes vifs remerciements aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Table des matières

Résumé.....	II
Remerciements.....	III
Liste des tableaux.....	VII
Liste des figures.....	VIII
Chapitre 1 : Introduction.....	1
1.1. Mise en contexte.....	1
1.2. Objectif général.....	2
1.3. Objectifs spécifiques.....	2
1.4. Organisation du mémoire.....	2
Chapitre 2 : Revue de littérature.....	4
2.1. Caractéristiques fondamentales du béton.....	4
2.1.1. Définition.....	4
2.1.2. Ciment Portland.....	4
2.1.2.1. Fabrication.....	4
2.1.2.2. Composition.....	5
2.1.2.3. Types du ciment Portland.....	5
2.1.2.4. Hydratation du ciment Portland.....	6
2.1.3. Ajouts cimentaires.....	7
2.1.3.1. Les pouzzolanes.....	8
2.1.3.2. Le laitier de haut fourneau.....	8
2.1.3.3. Les fillers calcaires.....	9
2.1.4. Résistance à la compression uniaxiale.....	10
2.2. Sédiments de dragage.....	11
2.2.1. Définition.....	11
2.2.2. Composition.....	11
2.2.3. Granulométrie.....	12
2.2.4. Pollution.....	13
2.2.4.1. Polluants organiques.....	13
2.2.4.2. Métaux lourds.....	14
2.2.5. Traitement.....	15
2.2.5.1. Les prétraitements.....	15
2.2.5.2. Les traitements physico-chimiques.....	15

2.2.5.3.	Les traitements thermiques	15
2.2.5.4.	Les traitements biologiques	16
2.2.5.5.	Le procédé NOVOSOL	16
2.2.6.	Aspect réglementaire.....	19
2.2.6.1.	Convention OSPAR (1992)	19
2.2.6.2.	Protocole de Londres	19
2.2.6.3.	Convention de Barcelone.....	19
2.2.6.4.	Réglementation dans le domaine du génie civil	19
2.2.7.	Valorisation des sédiments de dragage dans le domaine du génie civil	20
2.2.7.1.	Valorisation en technique routière.....	20
2.2.7.2.	Valorisation en granulats artificiels	20
2.2.7.3.	Valorisation dans le secteur briqueterie.....	21
2.2.7.4.	Valorisation en production de mortier et de béton	21
2.3.	Carapaces de homard et crabe	25
2.3.1.	Crabes des neiges	25
2.3.2.	Homard.....	26
2.3.3.	Scénarios de valorisation	27
2.3.3.1.	Poudres et carapaces sèches.....	27
2.3.3.2.	Chitine.....	28
2.3.3.3.	Bioséchage	29
2.3.3.4.	Biométhanisation	29
2.3.3.5.	Compostage	29
2.3.3.6.	Gazéification.....	30
2.3.3.7.	Incinération	30
2.3.3.8.	Pyrolyse	30
2.3.3.9.	Enrichisseur de moulée pour animaux.....	31
2.4.	Conclusion.....	31
Chapitre3 : Méthodologie		33
3.1.	Caractérisation des deux poudres	34
3.2.	Calcination de la poudre.....	35
3.3.	Programme expérimental : essais sur pâtes et mortiers.....	36
3.3.1.	Pâtes de ciment avec poudre non tamisée non calcinée.....	37
3.3.2.	Pâtes de ciment avec poudre tamisée non calcinée.....	38
3.3.3.	Pâtes de ciment avec poudre tamisée calcinée.....	39

3.3.4.	Mortiers de ciment avec poudre tamisée non calcinée	39
3.3.5.	Mortiers de ciment avec poudre tamisée calcinée	40
3.4.	Préparation des mélanges	40
3.5.	Résistance à la compression sur cubes de mortier	41
3.6.	Caractérisation des sédiments	42
3.6.1.	Introduction.....	42
3.6.2.	Description des échantillons	42
3.6.2.1.	Localisation.....	42
3.6.3.	Essais de caractérisation.....	44
3.6.3.1.	Caractérisation physique.....	44
3.6.3.2.	Caractérisation chimique	46
3.7.	Conclusion.....	47
Chapitre 4 :	Présentation des résultats et interprétations	49
4.1.	Caractérisation des deux poudres	49
4.1.1.	Analyse Granulométrique par tamisage.....	49
4.1.2.	Analyse chimique.....	50
4.1.2.1.	Diffraction des rayons X.....	50
4.1.2.2.	Fluorescence X	51
4.2.	Résistances à la compression uniaxiale des mélanges	55
4.2.1.	Pâtes de ciment avec poudre non tamisée non calcinée : effet de la matière organique 55	
4.2.2.	Pâtes de ciment avec poudre tamisée non calcinée: effet de la finesse.....	57
4.2.3.	Pâtes de ciment avec poudre tamisée calcinée : effet de la finesse.....	57
4.2.4.	Mortiers avec poudre tamisée non calcinée	59
4.2.5.	Mortiers de ciment avec poudre tamisée calcinée	61
4.3.	Discussion	64
4.4.	Conclusion.....	67
Chapitre 5 :	Conclusion.....	69
Références.....		72
Annexes.....		76

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Composition chimique(en pourcentage massique) d'un ciment GU(Laldji, 2015)	5
Tableau 2.2 : Différents types de ciment Portland(Laldji, 2015).....	6
Tableau 2.3 : Classification granulométrique LCPC(Moussa, 2013)	12
Tableau 2.4 : Métaux fréquemment retrouvés dans les sédiments et leur origine(Moussa, 2013)....	14
Tableau 2.5 : Scénarios de valorisation des carapaces de homard et crabe (Légaré Bilodeau, 2011)	27
Tableau 3.1 : Programme expérimental	37
Tableau 3.2 : Formulations de pâtes de ciment avec poudre non tamisée non calcinée	38
Tableau 3.3 : Formulations de pâtes de ciment avec poudre tamisée non calcinée avec un taux de remplacement de 5%.....	38
Tableau 3.4 : Formulations de pâtes de ciment avec poudre tamisée calcinée avec un taux de remplacement de 5%.....	39
Tableau 3.5 : Formulations de mortiers de ciment avec poudre tamisée non calcinée	40
Tableau 3.6 : Formulations de mortiers de ciment avec poudre tamisée calcinée	40
Tableau 3.7 : Résultats de l'analyse granulométrique des sédiments(Pellerin, 2017).....	44
Tableau 3.8 : Résultats de la perte au feu des sédiments(Pellerin, 2017)	46
Tableau 3.9 : Composition chimique des sédiments obtenue par fluorescence X (% massique)(Pellerin, 2017)	46
Tableau 4.1 : Analyse granulométrique de la poudre 1 des carapaces de crustacés	49
Tableau 4.2 : FRX de la poudre 1 non calcinée	52
Tableau 4.3 : FRX de la poudre 2 non calcinée	53
Tableau 4.4 : FRX de la poudre 1 calcinée	54
Tableau 4.5 : Effet du taux de remplacement de la poudre 1 des carapaces de crustacés	55
Tableau 4.6 : Effet du taux de remplacement de la poudre 2 des carapaces de crustacés	56
Tableau 4.7 : Effet de la finesse de la poudre de crustacés non calcinée pour un taux de remplacement de 5%.....	57
Tableau 4.8 : Effet de la finesse de la poudre de crustacés calcinée pour un taux de remplacement de 5%.....	58
Tableau 4.9 : Effet de la poudre de crustacés non calcinées ur les mortiers.....	59
Tableau 4.10 : Effet de la finesse <80 µm de la poudre de crustacés non calcinée sur les mortiers .	60
Tableau 4.11 : Effet de la poudre de crustacés calcinée sur les mortiers.....	62
Tableau 4.12 : Effet de la finesse <80 µm de la poudre de crustacés calcinée sur les mortiers	62
Tableau 4.13 : Caractéristiques normalisées des fillers	65

Liste des figures

Figure 2.1 : Fabrication du ciment Portland(Technologie du béton : guf\formation\beton\technobeton v05_01-BETON DegussaConstructionChemicals France).....	4
Figure 2.2 : Flux thermique durant l'hydratation du ciment Portland (Tagnit-Hamou, 2014a)	6
Figure 2.3 : Effet des ajouts cimentaires sur la résistance à la compression(Laldji, 2015)	7
Figure 2.4 : Quantité maximale (en % massique) des fillers calcaires dans les ciments standards(John et al., 2018).....	10
Figure 2.5 : Effet du rapport E/C sur la résistance à la compression à 28j(Laldji, 2015).....	11
Figure 2.6 : Procédé NOVOSOL pour le traitement des sédiments(Kribi, 2005)	18
Figure 2.7 : Synoptique du procédé NOVOSOL(Agostini, 2006).....	19
Figure 2.8 : Piste cyclable du Mont-Saint-Michel réalisée avec 70 000 m ³ de sédiments(Hayet et al.,2017)	20
Figure 2.9 : Granulats à base de sédiments marins(Achour, 2013)	21
Figure 2.10 : Briques à base des sédiments du Savannah(Achour, 2013)	21
Figure 2.11 : Morphologie de surface de la coquille de crabe(Hanana et al, 2018)	26
Figure 2.12 : Les quatre principales espèces commerciales de homard(Nguyen et al., 2017)	27
Figure 2.13 : Carapaces de crabe et de homard séchées(Légaré Bilodeau, 2011).....	28
Figure 3.1 : Plan expérimental et essais réalisés	33
Figure 3.2 : Figure synthèse des différents mélanges réalisés	34
Figure 3.3 : Les deux types de carapaces de crustacés	35
Figure 3.4 : Broyeur à boulets.....	35
Figure 3.5 : Four Thermolyne modèle 30400	36
Figure 3.6 : Finesses < 80µm, 80µm et 160µm de la poudre de crustacés non calcinée	38
Figure 3.7 : Poudre de crustacés calcinée de finesse 160µm.....	39
Figure 3.8 : Huilage des moules.....	41
Figure 3.9 : Malaxeur Petit Hobart/Compactage mécanique par table à choc.....	41
Figure 3.10 : Salle de mûrissement.....	41
Figure 3.11 : Essai de compression sur cubes de mortier	42
Figure 3.12 : Localisation des échantillonnages des IDM(Pellerin, 2017).....	43
Figure 3.13 : Baril des sédiments propres de la Pointe-Basse des IDM(Pellerin, 2017).....	43
Figure 3.14 : Analyse granulométrique des sédiments(Safhi, 2020)	45
Figure 3.15 : Diffraction des rayons X des sédiments(Pellerin, 2017).....	47
Figure 4.1 : Courbe granulométrique de la poudre 1 des carapaces de crustacés.....	49
Figure 4.2 : DRX des deux poudres de crustacés non calcinées.....	50

Figure 4.3 : DRX de la poudre 1 de crustacés calcinés.....	51
Figure 4.4 : Influence du taux de remplacement de la poudre 1 des carapaces de crustacés.....	55
Figure 4.5 : Influence du taux de remplacement de la poudre 2 des carapaces de crustacés.....	56
Figure 4.6 : Influence de la finesse de la poudre de crustacés non calcinée pour un taux de remplacement de 5%.....	57
Figure 4.7 : Influence de la finesse de la poudre de crustacés calcinée pour un taux de remplacement de 5%.....	58
Figure 4.8 : Comparaison entre les résistances des poudres non calcinées (PNC) et calcinées (PC) à 28j pour un taux de remplacement de 5%.....	59
Figure 4.9 : Effet de la poudre de crustacés sur les mortiers	60
Figure 4.10 : Effet de la poudre de crustacés non calcinée <80 µm sur les mortiers.....	61
Figure 4.11 : Effet de la finesse sur la résistance des mortiers à 28j pour 5% de poudre non calcinée	61
Figure 4.12 : Effet de la poudre de crustacés calcinée mélange de 3 finesses sur les mortiers	62
Figure 4.13 : Effet de la poudre de crustacés calcinée <80 µm sur les mortiers.....	63
Figure 4.14 : Effet de la finesse et de la calcination sur les résistances à la compression à 28j des mortiers pour un taux de remplacement de 5%.....	64

Chapitre 1 : Introduction

La réduction de la pollution de l'environnement est devenue aujourd'hui un souci majeur qui doit être considéré lors de la fabrication du béton. Étant un composant principal du béton, le sable joue un rôle très important, car il agit à la fois sur les propriétés du béton à l'état frais (rhéologie) et à l'état durci (résistance mécanique et durabilité). Avec la réduction des réserves naturelles de sable, il est nécessaire de s'orienter dès aujourd'hui vers l'utilisation des sables recyclés, dans le but de fabriquer des bétons économiques et durables.

L'impact carbone du béton est principalement associé au ciment qui est le liant hydraulique du béton assurant la cohésion des composants. La fabrication du ciment génère à elle seule 5% des émissions mondiales de gaz à effet de serre chaque année (Novae Communications, 2020), ajoutée à cela une quantité d'énergie importante pour intégrer le ciment dans le béton. Par conséquent, les additions minérales sont devenues le moyen commun utilisé pour réduire l'impact environnemental de la fabrication du ciment. Ces additions sont également reconnues pour améliorer les propriétés du béton ainsi que sa durabilité.

Les tendances de la technologie du béton sont actuellement orientées vers l'approvisionnement en matériaux durables alternatifs afin de minimiser le recours excessif aux ressources naturelles. Plusieurs matériaux de substitution utilisés pour la production de béton vert sont des matériaux recyclés obtenus à partir de déchets industriels et de sous-produits. Les carapaces de homard et de crabe, issues de la transformation des produits de la pêche, font partie des matières résiduelles critiques qui possèdent un potentiel de valorisation intéressant (Légaré Bilodeau, 2011). Une solution prometteuse au défi de la gestion des déchets consisterait à les utiliser dans la fabrication de béton et autres matériaux cimentaires. Les industries produisant ces résidus doivent actuellement payer des frais de transport et d'enfouissement pour s'en débarrasser. Le but est donc de diminuer l'utilisation du ciment en visant des additions écologiques et peu coûteuses comme la poudre des carapaces de crustacés qui est principalement formée de chaux (CaO). Le but est donc de connaître le comportement des résidus de carapaces dans le béton, à la fois comme filler calcaire et comme ajouts minéraux ainsi que le type de traitement à faire.

1.1. Mise en contexte

Les carapaces de homard et de crabe font partie des matières résiduelles critiques qui ont été définies en partenariat avec la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine et le CERMIM (Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes). Ces matières sont considérées comme problématiques pour le Centre de gestion de matières résiduelles (CGMR) des Îles-de-la-Madeleine et possèdent un potentiel de valorisation intéressant. Les carapaces de homard et de crabe sont d'environ 1 300 tonnes par année. Elles proviennent des entreprises de transformation des produits de la mer. En outre, il faut ajouter à cela le prix élevé du béton aux Îles-de-la-Madeleine en raison des frais de transport supplémentaires (Légaré Bilodeau, 2011).

1.2. Objectif général

Ce projet de recherche consiste à évaluer le potentiel de valorisation des carapaces de crustacés pour la fabrication des matériaux cimentaires à base de sédiments de dragage. L'objectif principal de ce projet est d'étudier différentes formulations de pâtes de ciment et de mortiers en faisant varier quatre paramètres, soit le taux de remplacement du ciment par la poudre de crustacés, la finesse de la poudre, la présence ou non de matière organique dans la poudre et l'effet de la calcination de la poudre. Cette étude permettra ainsi de proposer des pistes de solution pour ultimement fabriquer un béton écologique à base de poudre de crustacées et de sable de dragage ayant des propriétés mécaniques et un comportement proche de celui d'un béton conventionnel.

1.3. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques sont :

- Caractériser la poudre des carapaces physiquement et chimiquement;
- Déterminer l'activité pouzzolanique de la poudre des carapaces;
- Optimiser la finesse et le taux de remplacement des poudres;
- Déterminer quels traitements devront subir les carapaces pour leur usage dans le béton.

1.4. Organisation du mémoire

Ce mémoire comporte cinq chapitres. Le premier chapitre est une introduction générale abordant la problématique et les objectifs. Le deuxième chapitre est consacré à une revue de littérature sur les sédiments de dragage (origine, composition, granulométrie, pollution, traitement, exploitation en génie civil) et les carapaces de crustacés (composition, caractéristiques, scénarios de valorisation). Le troisième chapitre concerne la méthodologie de travail : les étapes de fabrication et de préparation des échantillons et présente les propriétés physiques et chimiques des sédiments des Îles-de-la-Madeleine. Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus ainsi que les interprétations. Le dernier chapitre donne une conclusion générale.

Chapitre 2 : Revue de littérature

2.1. Caractéristiques fondamentales du béton

2.1.1. Définition

Le béton peut être défini comme un matériau composite aggloméré formé par des granulats durs de dimensions variées liés par un liant. Il s'agit d'un mélange de granulats (sable et gravier) et de la pâte formée par de l'eau, du ciment et des adjuvants. La distribution des composants est la suivante :

- 30 à 40% : Pâte formée par : 7% à 15% par volume de ciment Portland et 14% à 21% par volume d'eau
- 60% à 80% de granulats (gros granulats et granulats fins)
- Adjuvants chimiques (Laldji, 2015)

2.1.2. Ciment Portland

2.1.2.1. Fabrication

La fabrication du ciment Portland commence par la cuite dans un four rotatif à température très élevée (1450°C) d'un mélange de pierre calcaire broyée et d'argile ou de matériaux similaires. La pierre calcaire donne la chaux et l'argile donne essentiellement la silice et l'alumine. On obtient le clinker à la sortie du four. On ajoute au clinker pulvérisé (particules de 1 à 80µm) une petite quantité de gypse d'environ 5%. La figure 2.1 illustre une description du processus de fabrication(Laldji, 2015).

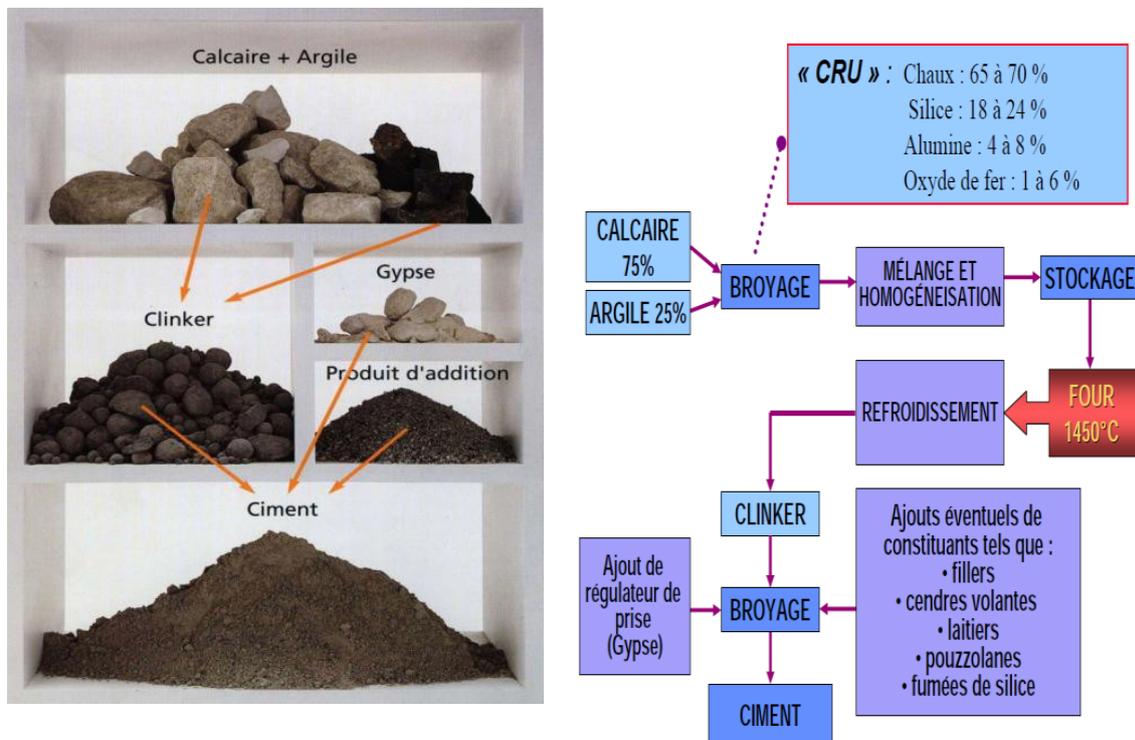


Figure 2.1 : Fabrication du ciment Portland(Technologie du béton : gulf\formation\beton\technobeton v05_01-BETON DegussaConstructionChemicals France)

2.1.2.2. Composition

Le ciment Portland est formé par quatre phases minérales :

- C_3S ($3CaO.SiO_2$): Silicate tricalcique (45 à 65%)
- C_2S ($2CaO.SiO_2$): Silicate bicalcique (15 à 25%)
- C_4AF ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) : Alumino-ferrite tétracalcique (0 à 10%)
- C_3A ($3CaO.Al_2O_3$) : Aluminate tricalcique (0 à 15%)

La composition chimique du ciment Portland GU est donnée dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Composition chimique(en pourcentage massique) d'un ciment GU(Laldji, 2015)

Oxyde de calcium total (CaO)	63,27
Oxyde de magnésium (MgO)	1,78
Trioxyde de soufre (SO ₃)	3,34
Oxyde de potassium (K ₂ O)	0,91
Oxyde de sodium (Na ₂ O)	0,14
Chlore (Cl)	0,05
Bioxyde de titane (TiO ₂)	0,19
Pentoxyde de phosphore (P ₂ O ₅)	0,16
Oxyde de strontium (SrO)	0,11
Trioxyde de manganèse (Mn ₂ O ₃)	0,06
Trioxyde de chrome (Cr ₂ O ₃)	0,01
Oxyde de zinc (ZnO)	0,03
Perte au feu	2,27
Silicate tricalcique (C ₃ S)	56,71
Silicate bicalcique (C ₂ S)	15,11
Aluminate tricalcique (C ₃ A)	9,59
Ferroaluminate tétracalcique (C ₄ AF)	7,20

2.1.2.3. Types du ciment Portland

Au Canada, on trouve 5 types de ciment Portland (tableau 2.2).

Tableau 2.2 : Différents types de ciment Portland(Laldji, 2015)

Norme en vigueur: CSA-A3000-98			Nouvelle édition: CSA-A3000-03		
Norme applicable	Nom	Type	Nomenclature	Type	Nom
CAN/CSA-A5	Ciment portland normal	10	GU	GU	Ciment hydraulique à usage général
	Ciment portland modéré	20	MS	MS	Ciment hydraulique à résistance modérée aux sulfates
			MH	MH	Ciment hydraulique à chaleur d'hydratation modérée
	Ciment portland à haute résistance initiale	30	HE	HE	Ciment hydraulique à haute résistance initiale
	Ciment portland à faible chaleur d'hydratation	40	LH	LH	Ciment hydraulique à faible chaleur d'hydratation
	Ciment portland résistant aux sulfates	50	HS	HS	Ciment hydraulique à haute résistance aux sulfates

2.1.2.4. Hydratation du ciment Portland

La réaction d'hydratation est une succession de réactions chimiques qui transforment les phases anhydres du clinker en phases hydratées. Par conséquent, il y aura une apparition d'une structuration mécanique et une progression de la pâte hydratée (perte de maniabilité, gain de résistance mécanique), une libération de chaleur, des changements volumétriques et une diminution de la conductivité électrique de la solution interstitielle(Tagnit-Hamou, 2014a).La figure 2.2 représente la courbe du flux thermique durant la réaction d'hydratation du ciment Portland.

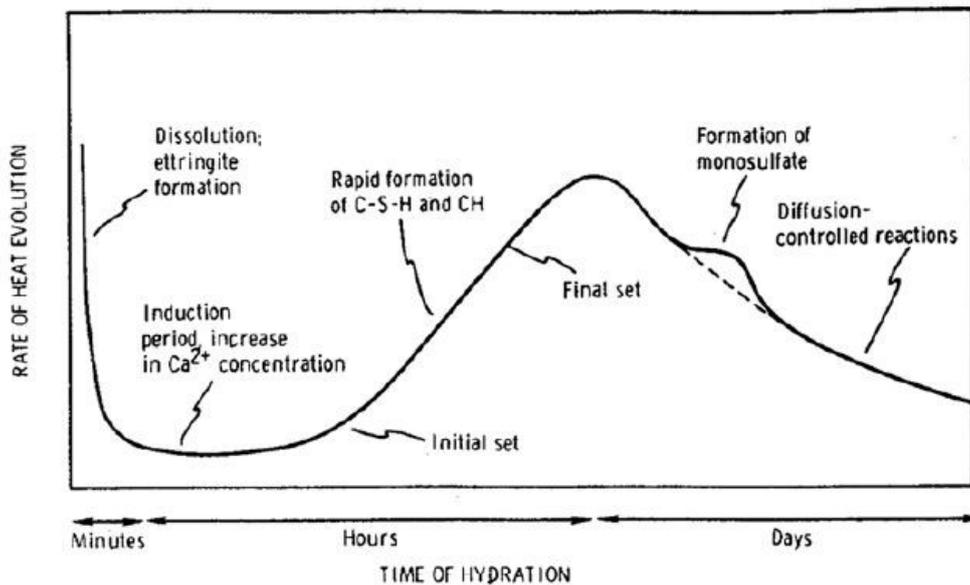


Figure 2.2 : Flux thermique durant l'hydratation du ciment Portland (Tagnit-Hamou, 2014a)

Quand le ciment Portland entre en contact avec l'eau, il y a un dégagement de chaleur qu'on peut mesurer par calorimétrie pour suivre l'évolution de l'hydratation dans le temps. Les quatre étapes caractérisant la réaction d'hydratation sont :

- 1^{ère} étape : dure quelques minutes après le malaxage. Une réaction initiale entre l'eau et le ciment caractérisée par une activité chimique intense, un grand dégagement de chaleur et la formation d'ettringite.

- 2^e étape : dure entre une heure et 4 heures en fonction de la consistance des pâtes. Cette étape, appelée période dormante, est caractérisée par une activité chimique modérée et un dégagement de chaleur faible.
- 3^e étape : dure entre 8 et 12 heures. L'activité chimique reprend et l'hydratation s'accélère. La prise se fait et les produits de l'hydratation se mettent à former des ponts entre les particules de ciment.
- 4^e étape : dure un an et le durcissement prend lieu. Les produits de l'hydratation remplissent l'espace entre les grains de ciment. La pâte devient plus dense et plus résistante et le rythme des réactions diminue(Tagnit-Hamou, 2019).

2.1.3. Ajouts cimentaires

On appelle « ajouts cimentaires » les sous-produits de différentes industries utilisés en supplément ou en remplacement partiel du ciment pour des fins écologiques, économiques et fonctionnelles. Ils sont classés en trois catégories : laitiers, matériaux pouzzolaniques et fillers(Tagnit-hamou, 2014b). Les ajouts cimentaires ont un bénéfice fonctionnel, car ils augmentent la maniabilité grâce aux particules fines, ils réduisent la demande en eau (sauf pour les ajouts avec une grande finesse) et donc améliorent les propriétés mécaniques. L'ajout d'une quantité de fine poudre à un béton permet de diminuer le ressuage et la ségrégation en diminuant le volume des vides ce qui améliore la durabilité. Il réduit la chaleur d'hydratation (sauf pour les laitiers) donc diminue la fissuration d'origine thermique. Sur le plan économique, étant des sous-produits de différentes industries, leur coût correspond au coût du transport plus la manipulation, et vu que la production du ciment est considérée comme un grand consommateur d'énergie, le remplacement du ciment par des ajouts minéraux permettra de réduire le prix du béton. Sur le plan écologique, l'utilisation des ajouts cimentaires permet d'éliminer les sous-produits de la nature et de réduire les émissions du CO₂(Tagnit-Hamou, 2014b). Les ajouts cimentaires peuvent aussi améliorer les résistances des bétons à moyen et à long terme(Laldji, 2015) (figure 2.3).

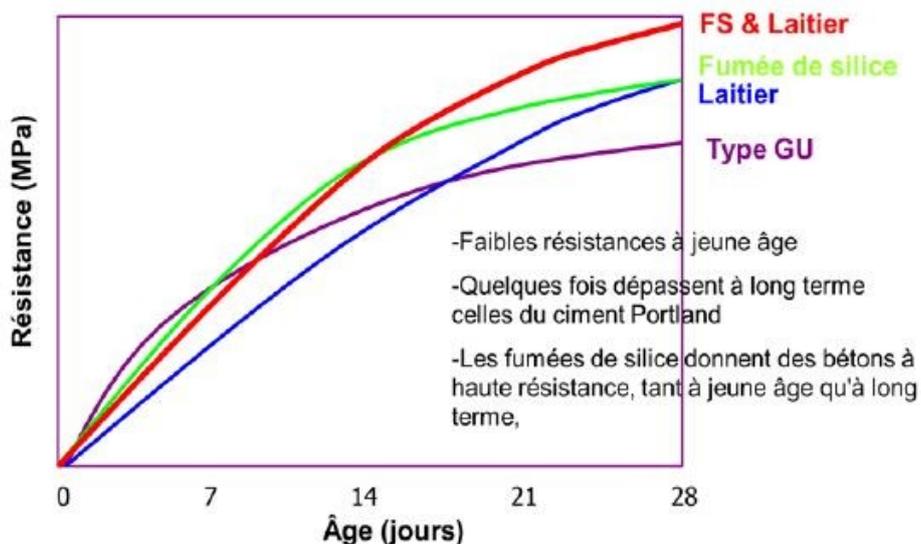


Figure 2.3 : Effet des ajouts cimentaires sur la résistance à la compression(Laldji, 2015)

2.1.3.1. Les pouzzolanes

Les pouzzolanes réagissent avec le Ca(OH)_2 et l'eau pour donner le C-S-H qui est le produit d'hydratation du ciment. C'est une réaction lente à température ambiante. Il existe deux types de pouzzolanes (naturelles et artificielles).

-Naturelles : cendres volcaniques, tufs volcaniques, zéolite.

-Artificielles : cendres volantes, fumée de silice, argile et schistes calcinés, metakaolin, écorces de riz calcinées.

- Cendres volantes : Elles ont comme origine le charbon. Le carbone et les composants volatiles provenant de la combustion du charbon sont brûlés et les impuretés minérales (argile, quartz, feldspath) passent en fusion et sont transportées vers une zone froide où elles se transforment en des petites sphères de verre. Ces sphères sont transportées par le courant gazeux vers l'extérieur et ensuite récupérées dans un précipitateur électrostatique.

Elles peuvent avoir différentes compositions chimiques et physiques dépendamment des impuretés contenues dans le charbon. Selon la norme ASTM C618-94a, il y a deux catégories de cendres volantes selon leur teneur en CAO :

-Classe F : Silico-alumineuse : Grande proportion de silice et d'alumine, contient moins de 10% de CAO, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$. C'est un produit de combustion de l'antracite et du charbon bitumineux.

-Classe C : contient entre 15% et 35% de CAO, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 < 70\%$. C'est un produit de combustion du lignite et il est plus réactif que la classe F.

Les cendres volantes sont formées de 60% à 85 % de verre (phase amorphe), de 10% à 30% de phases cristallines et de 10% de carbone non calciné. Les cendres volantes sont des petites sphères de diamètre allant de 1 μm à 100 μm . La forme et la granulométrie ont un effet important sur l'ouvrabilité et la demande en eau des bétons frais. L'ajout des cendres volantes augmente la maniabilité du béton.

- Fumée de silice : c'est un sous-produit de fabrication du silicium et de différents alliages de ferrosilicium obtenu par la réduction d'un quartz très pur par le charbon dans un four à arc à 2000 °C. Il s'agit de fines particules sphériques de diamètre moyen 0.1 μm ce qui fait d'elle le plus fin ajout cimentaire. Elle a une surface spécifique entre 20 m^2/g et 25 m^2/g . Cette grande finesse lui donne un effet filler qui permet au béton d'obtenir d'excellentes propriétés de durabilité. C'est un produit très réactif grâce à sa finesse et sa forme vitreuse (contient entre 75% et 95% de silice vitreuse)(Tagnit-Hamou, 2014b).

2.1.3.2. Le laitier de haut fourneau

C'est un produit obtenu à partir du charbon, d'un agent fondant, du minerai de fer et d'impuretés. Les éléments Ca, Mg, Si et Al sont présents sous forme de phases non cristallines. Les laitiers sont broyés entre 400 m^2/kg et 500 m^2/kg ce qui leur permet de développer de bonnes propriétés cimentaires. Leurs propriétés varient en fonction du type du charbon utilisé et leur composition minéralogique dépend du mode de refroidissement; plus le refroidissement est rapide, plus le laitier est vitreux. Comparés aux cendres volantes de classe C, les laitiers s'hydratent de la même manière, mais leur effet sur la résistance commence à partir du jour 7 contrairement aux cendres volantes de classe C dont l'effet commence à partir de la 4^e semaine. L'effet du laitier sur la qualité du béton dépend du taux de substitution dans le mélange et de sa finesse. On peut remplacer jusqu'à 95% de

ciment Portland par un laitier. De manière générale, l'utilisation du laitier diminue la résistance à 24h, diminue la quantité de chaleur de manière plus significative quand le dosage dépasse 50% et réduit les réactions alcalis-granulats. Elle augmente aussi l'imperméabilité de la matrice cimentaire, ainsi que la résistance aux sulfates et à l'eau de mer(Tagnit-Hamou, 2014b).

2.1.3.3. Les fillers calcaires

L'utilisation d'un filler calcaire en remplacement partiel a été normalisée depuis les années 80. La substitution du clinker réduit les émissions de CO₂ dans la production du ciment, presque proportionnellement au remplacement, car les fillers ne nécessitent pas de calcination. Le filler calcaire influence les taux d'hydratation précoce et réagit en formant du carbosilicate de calcium et hydrates d'aluminates de carbone. Cependant, l'effet majeur du filler calcaire est une dilution physique du liant. Pour cette raison, il a tendance à diminuer la résistance si la teneur en eau reste inchangée. Par conséquent, le taux de remplacement moyen mondial du clinker par un filler calcaire est resté faible, à environ 7%, mais reste un taux supérieur au laitier (5%) ou cendres volantes (4%)(John *et al.*, 2018).

La technologie consiste à remplacer le clinker et les autres réactifs rares des matériaux cimentaires supplémentaires (SCM) par des fillers minéraux «inertes». Il n'y a pas de définition unique et universelle pour les fillers. Ils peuvent être définis comme des particules fines qui sont inertes ou presque chimiquement inertes lorsqu'elles sont mélangées avec le ciment. Ils sont produits par broyage avec ou sans traitement de surface. Ils sont utilisés en remplacement partiel du clinker ou d'autres matériaux cimentaires supplémentaires (SCM) réactifs. Une autre définition des fillers minéraux inertes peut être des particules de même taille que le ciment, ou des particules plus fines que le ciment. Le mélange des fillers avec du ciment est une stratégie de dilution qui augmente le volume et la masse du produit en réduisant la concentration des ingrédients réactifs dans la matrice de la pâte de ciment. Les fillers sont utilisés pour des raisons économiques, techniques et environnementales dans l'industrie du ciment ainsi que dans d'autres industries. Pour l'industrie du ciment, l'utilisation des fillers permet de réduire l'énergie thermique et les émissions du CO₂(John *et al.*, 2018).

Le Canada a adopté une limite de 5% pour le calcaire dans un ciment Portland normal en 1983 (CAN3-A5-M83), et en 1988, les Européens étaient déjà en train de rédiger des propositions pour permettre 20% de remplissage des ciments Portland. Actuellement, plusieurs normes nationales et internationales incluent les fillers, la norme française EN 197-1 permet jusqu'à 35% de substitution des fillers calcaires dans les ciments (figure 2.4)(John *et al.*,2018).

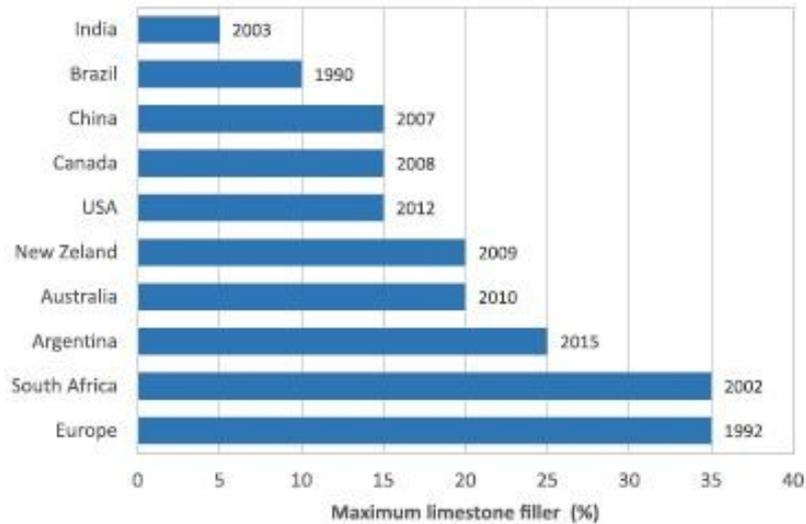


Figure 2.4 : Quantité maximale (en % massique) des fillers calcaires dans les ciments standards(John et al., 2018)

2.1.4. Résistance à la compression uniaxiale

On définit par résistance à la compression la contrainte maximale que peut subir une éprouvette de béton avant sa rupture. C'est l'un des paramètres fondamentaux qui permet d'évaluer sa qualité. Cette importance est liée à trois raisons :

- C'est un bon indicateur de la qualité du béton, car elle est en relation directe avec les propriétés de la pâte de ciment hydratée ;
- Il s'agit d'élément essentiel dans la conception structurelle et pour assurer la conformité ;
- Elle est directement liée à plusieurs autres propriétés du béton, telles que les résistances en tension, en flexion et le module d'élasticité(Muraz, 2015).

La résistance à la compression est évaluée sur le béton 28 jours après le moulage comme spécifié par la norme ASTM C109 pour vérifier la qualité du béton produit. Le rapport E/C est parmi les facteurs les plus importants dans la formulation du béton, car il affecte considérablement la résistance finale du béton. Pour avoir de bonnes propriétés mécaniques, on doit baisser le rapport E/C sans perdre au niveau de la maniabilité (figure 2.5).

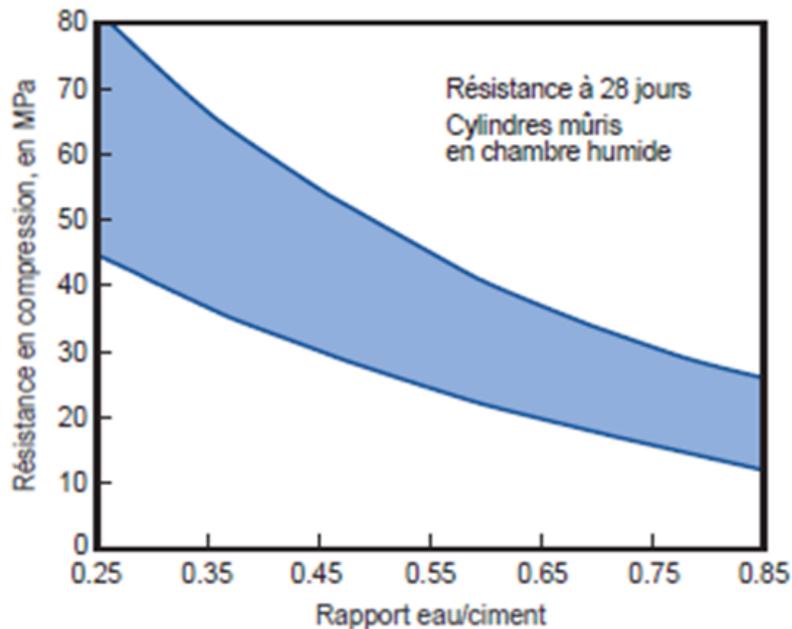


Figure 2.5 : Effet du rapport E/C sur la résistance à la compression à 28j(Laldji, 2015)

2.2. Sédiments de dragage

2.2.1. Définition

On appelle sédiments les matériaux détritiques organiques et inorganiques formés par sédimentation dans les cours d'eau, les barrages, les canaux, les plans d'eau et les ports fluviaux et maritimes. Le dragage est l'opération qui consiste à extraire ces sédiments dans le but de rétablir un tirant d'eau pour la navigation ou prévenir les risques d'inondation. Les sédiments peuvent être des sables, des silts (ou limons) ou des argiles. Ils sont principalement sableux en entrée de port et davantage argileux et limoneux en fond de darse. Les sédiments de canaux sont généralement caractérisés par une faible granulométrie. On distingue les sédiments marins issus des estuaires et des ports, des sédiments continentaux issus des canaux, plans d'eau, cours d'eau, retenues d'eau et zones portuaires fluviales(Benard, 2014).

2.2.2. Composition

La matrice sédimentaire est généralement très hétérogène et est constituée de matériaux détritiques organiques et inorganiques(Power, 1992). Les trois phases constituant les sédiments de dragage sont :

- **La phase eau**

C'est une fraction qui varie et dépend de plusieurs facteurs, comme les conditions de dragage et la position des dépôts. On distingue l'eau libre, l'eau colloïdale, l'eau capillaire, et l'eau pelliculaire (Marot, 1998). Dans les vases, la teneur en eau varie de l'ordre de 50 à 300 % par rapport à la matière sèche.

- **La phase inorganique**

Elle est principalement composée de minéraux issus de l'écorce terrestre et de débris coquilliers. Elle est formée essentiellement par des argiles, des carbonates et des silicates. Les particules inorganiques sont enrobées par des hydroxydes de fer, de manganèse et des substances organiques et possèdent donc une grande capacité d'adsorption des contaminants. Sa matrice est formée principalement par le quartz, le feldspath, et les argiles(Moussa, 2013).

- **La phase organique**

Les composés organiques qu'on retrouve dans les sédiments sont généralement d'origines naturelles(Vermeulen, 2003). Ils ont comme origine, les débris végétaux, les micro-organismes, ou les colloïdes humiques. Deux catégories d'acides caractérisent cette phase :

-Les acides non humiques : les acides organiques, les acides aminés, glucides, protéines.

-Les acides humiques : C'est la partie majoritaire de la matière organique(Baldock, 2004). Ils peuvent représenter entre 80 et 90 % de la fraction organique totale(Colin, 2003).

Plusieurs paramètres autres que la composition complexe et variable des sédiments, tels que leur pH, leur potentiel redox, leur salinité, leur teneur en oxygène et en sulfure, gèrent la répartition des contaminants entre les différentes phases d'un sédiment, ainsi que leur biodisponibilité(Moussa, 2013).

2.2.3. Granulométrie

La granulométrie des sédiments varie en fonction de l'origine du point de prélèvement. Elle varie du bloc à la boue argileuse. Parmi les nombreuses classifications qui ont été proposées dans les différents domaines d'étude des matériaux granulaires, on trouve la classification LCPC qui est présentée dans le tableau 2.3. Des changements de propriétés physiques et mécaniques peuvent être associés aux limites entre les catégories distinguées.

Tableau 2.3 : Classification granulométrique LCPC(Moussa, 2013)

Taille	Dénomination
>20 mm	Cailloux
2mm à 20mm	Graviers
63 µm à 2mm	Sables (Grossiers et fins)
2 µm à 63 µm	Limons (ou silt)
< 2 µm	Argiles

Les fractions des sédiments de taille supérieure à 63 µm correspondent à un sable et un matériau inorganique silicaté. Elles présentent une faible cohésion, une surface de contact peu importante et ont alors un faible pouvoir absorbant vis-à-vis des contaminants. Les particules de tailles inférieures à 63 µm sont constituées d'ultra fines ou « colloïdes » de dimensions inférieures à 0,2 µm, d'une fraction argileuse comprise entre 0,2 et 2 µm et de limon ayant un diamètre compris entre 2 et 63 µm. Cette fraction de fines peut également contenir de la matière organique ce qui explique la présence de la majorité des polluants dans cette fraction. En effet, les particules fines possèdent un grand pouvoir adsorbant vis-à-vis des contaminants métalliques grâce à leur nature cohésive et l'importance de leur surface de contact(Moussa, 2013).

2.2.4. Pollution

L'évolution de l'industrie et de l'agriculture est la cause principale de la pollution des cours d'eau par des substances toxiques. On distingue les métaux lourds (Cd, Cr, Cu, Hg, N, Pb, Zn) des composés organiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP))(Babut, 1999). La concentration des métaux peut être 1 à 3 fois plus élevée dans les sédiments qu'à la surface de l'eau (Bubb, 1974). Les polluants s'accumulent suivant les mécanismes suivants : l'adsorption, la précipitation et la complexation organique et inorganique(Liang et Wong, 2003).

La plupart des polluants se localisent essentiellement dans les particules fines des sédiments de taille inférieure à 63 µm vu leur surface spécifique élevée. Lorsqu'on extrait le sédiment de son environnement naturel pour le dragage et le stockage, l'émission des polluants peut être stimulée par la modification des propriétés physico-chimiques. La nature marine des sédiments peut impliquer la présence de sels marins tels que NaCl, KCl, qui, si utilisés pour faire des bétons, provoquent un retard dans le processus de prise du ciment(Minocha et al., 2003). En effet, l'eau de mer est formée par différents types de sels dissous : NaCl (30g/L), MgCl₂ (3,8g/L), MgSO₄ (1,7g/L), CaSO₄ (1,3g/L) et Na₂SO₄ (0,9g/L). La présence de ces sels peut avoir un effet sur la durabilité de la matrice cimentaire. Lorsque l'eau de mer dans le béton s'évapore, le chlorure de sodium forme des cristaux qu'on appelle halite et qui causent une augmentation des contraintes dans le béton. Les chlorures de sodium et de magnésium réagissent avec la Portlandite Ca(OH)₂ pour former des chlorures de calcium qui sont très solubles. La matrice cimentaire peut se fragiliser. Le chlorure de calcium peut aussi réagir avec l'aluminate tricalcique pour donner le monochloroaluminate de calcium hydraté appelé aussi sel de Friedel. Ce composé n'altère pas les propriétés de la matrice cimentaire, mais se combine avec les sulfates ce qui peut provoquer un caractère expansif de la matrice cimentaire qui affectera ses propriétés mécaniques. Le magnésium aussi peut réagir avec le gel CSH(Silicate de calcium hydraté le produit d'hydratation du ciment qui développe la résistance de la pâte (Tagnit-hamou, 2014a)) pour donner des silicates de magnésium hydratés MSH qui est un composé moins cohérent que le CSH, mais qui aura une influence sur la résistance mécanique du béton(Cazalet, 2012). Finalement, la présence de sels dans la matrice cimentaire contribue à l'accélération de la corrosion des armatures dans le cas des éléments en béton armé.

2.2.4.1. Polluants organiques

Les polluants organiques sont composés de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote. Ils sont très toxiques, solubles ou absorbés par les matières en suspension. On distingue trois grandes familles de composés organiques : les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) comme le naphthalène et le phénanthrène, les PCB (Polychlorobiphényles) et les TBT (Tri-Butyl-Etain) (Achour, 2013).

La plupart de ces molécules sont cancérigènes et présentent un réel danger. En effet, ces polluants ne sont pas biodégradables et ont par conséquent une longue durée de vie. Ces hydrocarbures proviennent des apports anthropiques, des apports pétroliers, des produits de combustion incomplète et des incendies de forêts et d'herbes(Bel Hadj Ali, 2013).

2.2.4.2. Métaux lourds

Les métaux sont à l'état naturel et en se basant sur leur concentration, ils sont classés selon leur caractère essentiel ou non. Les métaux essentiels sont au nombre de dix-sept, dont quatre (sodium(Na), potassium(K), calcium(Ca) et magnésium(Mg)) sont présents en grande quantité (supérieurs à > 1 mmole/kg de poids frais), et treize sont présents à l'état de traces (0,001 à 1 mmole/kg de poids frais), ou d'ultra-trace (< 1 µmol/kg de poids frais)(Mason, 1995). Les métaux non essentiels n'ont actuellement aucun rôle biologique connu. C'est le cas du mercure (Hg), arsenic (As), cadmium (Cd), chrome (Cr) et plomb (Pb)(Mason, 1995). Ils entraînent un effet biologique néfaste à très faible concentration, ils sont non biodégradables et leur durée de vie est infinie. Le tableau 2.4 présente les métaux qu'on peut trouver dans les sédiments.

Tableau 2.4 : Métaux fréquemment retrouvés dans les sédiments et leur origine(Moussa, 2013)

Métal	Source de pollution
Mercure	Produits pharmaceutiques ou domestiques ; appareils électriques ; produits électrolytiques ; du chlore et de la soude ; peinture ; pâte à papier fabrication de chlorures de vinyles et d'uréthane.
Arsenic	Pesticides; herbicides; fongicides; insecticides; conservateurs du bois; cellule solaire; semi-conducteurs; catalyse; céramique; produits pharmaceutiques; durcissement du cuivre et du plomb .
Cadmium	Engrais phosphatés ; industries de stabilisation des matières plastiques ; fabrication des accumulateurs et des radiateurs automobiles ; fabrication de caoutchouc ; colorants eau de ruissellement des voies de circulation.
Chrome	Tannerie ; fabrication d'alliages spéciaux ; industries de traitement de surface.
Plomb	Canalisation d'eau ; peintures ; additifs pour l'essence ; eau de ruissellement des voies de circulation ; industries pharmaceutiques et sidérurgiques ; télévision et ateliers photographiques.
Nickel	Fabrication d'acier et d'alliage spéciaux ; recouvrement de surface par électrolyse ; fabrication de peinture de la laque et de produits cosmétiques.
Sélénium	Fabrication de peintures et de colorants ; verre ; semi-conducteurs ; insecticides ; alliages.
Zinc	Produits pharmaceutiques ou domestiques ; conduites d'eau ; peinture ; piles ; traitement de surface.
Cuivre	Canalisation d'eau ; fils électriques ; radiateurs automobiles ; appareils de chauffage ; traitement de surface.

2.2.5. Traitement

Les techniques de traitement des sédiments sont nombreuses avec un domaine d'application qui est souvent limité, parfois spécifique à un seul type de sédiment. Le but est l'étude de l'évolution des caractéristiques physiques et chimiques des sédiments depuis leur extraction jusqu'à leur valorisation.

2.2.5.1. Les prétraitements

Les prétraitements permettent de nettoyer les sédiments des gros débris et de les déshydrater. Ce sont des opérations physiques ou physico-chimiques dont le principe est de réduire le volume des sédiments, diminuer la teneur en eau et de séparer la phase fine porteuse de polluants de la phase grossière. Ils sont peu coûteux. Deux techniques sont généralement utilisées :

- 1) La déshydratation : permet d'abaisser jusqu'à 50 % l'eau interstitielle contenue dans le sédiment. Elle peut être réalisée par filtration en utilisant des filtres-presses, par des bassins de décantation ou par évaporation. Un procédé de prétraitement a été utilisé pour la déshydratation des sédiments du port de Sorel (Canada). Le procédé utilise une presse rotative, avec ajout d'additifs.
- 2) Le tri granulométrique qui permet de dissocier les fractions fines par hydro-cyclonage. Ces techniques permettent de préparer les sédiments au stockage, traitement ou valorisation (Hayet et al., 2017).

2.2.5.2. Les traitements physico-chimiques

Ces traitements utilisent des techniques qui sont basées sur des principes physiques ou chimiques. Sachant que la majorité des polluants sont fixés sur les particules fines (Kribi, 2005), les techniques de séparation consistent à enlever la fraction fine du sédiment afin d'éliminer les contaminants.

On peut citer les techniques souvent employées :

- La centrifugation : Fait tourner les éléments solides en suspension à grande vitesse pour les isoler.
- L'hydrocyclonage : Se fait dans une chambre cylindrique sous pression afin de séparer les particules les plus denses des plus fines sous l'effet de la force centrifuge.
- Le lessivage : Enlève les contaminants liés physiquement aux particules par l'action mécanique de l'eau et des agents d'extraction (acides, bases, chélateurs).
- La flottation : Permet de concentrer les polluants en se basant sur la différence de densité, le caractère hydrophobe ou hydrophile des solides et l'ajout d'additifs chimiques (Hayet et al., 2017)

2.2.5.3. Les traitements thermiques

Ils constituent des techniques d'inertage qui fixent les contaminants dans la matière pour qu'ils soient immobiles (Agostini, 2006). Parmi les techniques de traitement thermique, on cite :

- La désorption thermique à 600°C : L'eau s'évapore et la matière organique naturelle s'oxyde.

- L'incinération de 800 à 1200°C : entraîne une évaporation de l'eau, destruction de la matière organique et oxydation des éléments traces métalliques.

On peut donc obtenir des graviers qui peuvent être vitrifiés dans lesquels les éléments traces métalliques sont immobilisés(Hayet et al., 2017).

2.2.5.4. Les traitements biologiques

Ces traitements sont basés sur l'utilisation des organismes vivants (bactéries, champignons, végétaux...). On distingue :

- La bioremédiation in situ : désigne les processus de dégradation des polluants par des méthodes biologiques utilisant le potentiel métabolique des micro-organismes pour détériorer des composés organiques variés.
- La phytoremédiation : a recours aux végétaux pour dégrader ou fixer les contaminants organiques, absorber les contaminants métalliques par l'intermédiaire des racines des végétaux terrestres ou la paroi cellulaire des algues. Cette technique est basée sur trois phénomènes naturels :
 - La phytoextraction : utilise des plantes dites hyperaccumulatrices dans le but de traiter des sols pollués généralement par les éléments traces métalliques ETM.
 - La phytodégradation: permet d'accélérer la dégradation des composés organiques polluants (pesticides, hydrocarbures, explosifs...) à l'aide des plantes. Cette dégradation peut se faire à l'aide de l'activité des micro-organismes de l'environnement des racines (rhizosphère), ou dans la plante après que le composé soit absorbé puis dégradé dans les cellules.
 - La phytostabilisation : tend à immobiliser la pollution en installant un couvert végétal avec des espèces tolérant les polluants. Ces plantes permettent de réduire l'érosion et le ruissellement des particules contenant les polluants et d'éviter leur propagation en profondeur. L'efficacité de ce processus dépend des caractéristiques des plantes et du sol à traiter(Hayet et al., 2017).

Les techniques organiques peuvent être utilisées comme complément des traitements physico-chimiques(Hayet et al., 2017). Les traitements cités ont pour objectif la destruction, la transformation ou la stabilisation des contaminants. Les traitements physico-chimiques sont efficaces, mais présentent des coûts élevés qui peuvent entraver le dragage. Les traitements thermiques sont efficaces pour l'immobilisation des polluants, mais ils sont très énergivores et coûteux. Les traitements biologiques sont plus écologiques et peu coûteux, mais nécessitent des délais de réalisation longs pouvant s'étendre sur plusieurs années(Hayet et al., 2017).

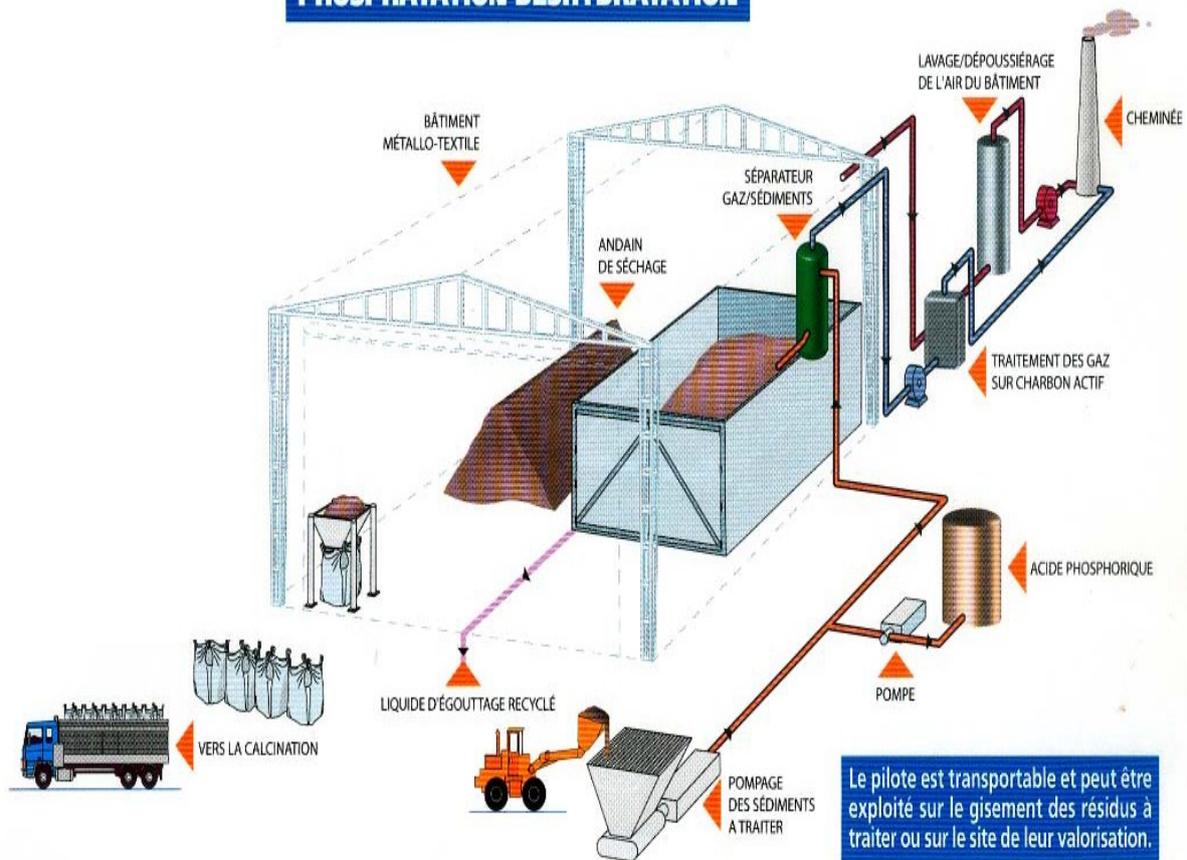
2.2.5.5. Le procédé NOVOSOL

Le procédé NOVOSOL a été développé par l'entreprise Solvay. Il s'agit d'une combinaison des techniques chimique et thermique qui permettra de traiter les deux types de pollution organique et inorganique. Il a le même objectif que le procédé RIVASOL développé en 1992 par la même entreprise qui est la stabilisation des métaux lourds, mais pour d'autres types de déchets tels que les sédiments de dragage, les sols, les résidus de broyage automobiles contrairement aux cendres volantes pour le RIVASOL. Les sédiments de dragage n'ont pas les mêmes propriétés physiques et chimiques que les cendres volantes donc leur comportement sera différent. Par conséquent, le procédé RIVASOL a été adapté pour aboutir aux étapes suivantes :

- Le traitement à l'acide phosphorique du sédiment dans un mélange tubulaire sans ajout d'eau vu le taux d'humidité souvent élevé des sédiments.
- Le séchage du sédiment phosphaté à l'air libre pour réduire le taux d'humidité et la maturation des sédiments.
- La calcination dans un four rotatif qui permettra la dégradation de la matière organique dans le sédiment et la stabilisation des phosphates métalliques néoformés pendant la phosphatation(Kribi, 2005).

Le procédé NOVOSOL est composé de deux unités (figure 2.6) munies d'un dispositif de traitement des gaz : l'unité (A) pour la phosphatation et le séchage et l'unité (B) pour la calcination. Concernant l'unité (A), il s'agit des produits de la réaction chimique de l'acide phosphorique avec les carbonates et les sulfures dans les sédiments avec dégagement du CO₂ et H₂S d'une odeur perceptible. Pour l'unité (B), il s'agit des produits de calcination de la matière organique pour traiter les gaz et prévenir une éventuelle évaporation des métaux lourds comme les volatils non stabilisés. À la sortie de cette unité, on obtient les résidus solides stables et d'intéressantes propriétés d'usage qui sont prêts à être valorisés dans le domaine du génie civil(Kribi, 2005). La figure 2.7 schématise le procédé NOVOSOL.

UNITÉ A PHOSPHATATION-DÉSHYDRATATION



UNITÉ B CALCINATION

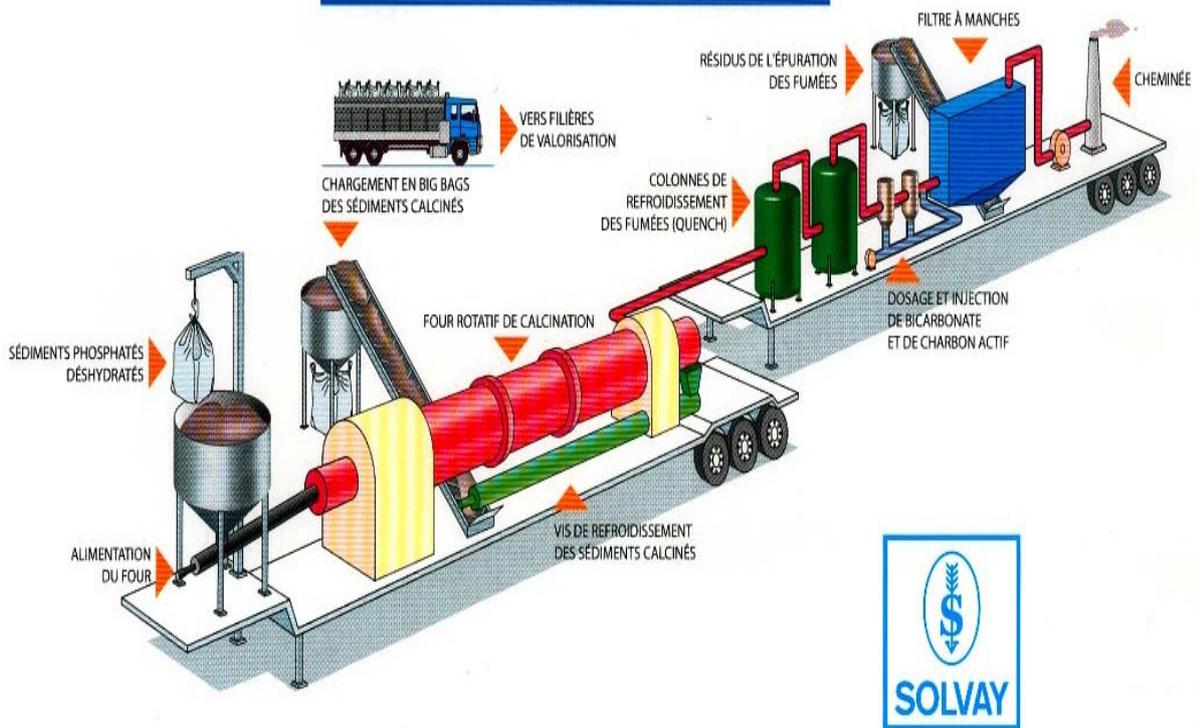


Figure 2.6 : Procédé NOVOSOL pour le traitement des sédiments (Kribi, 2005)

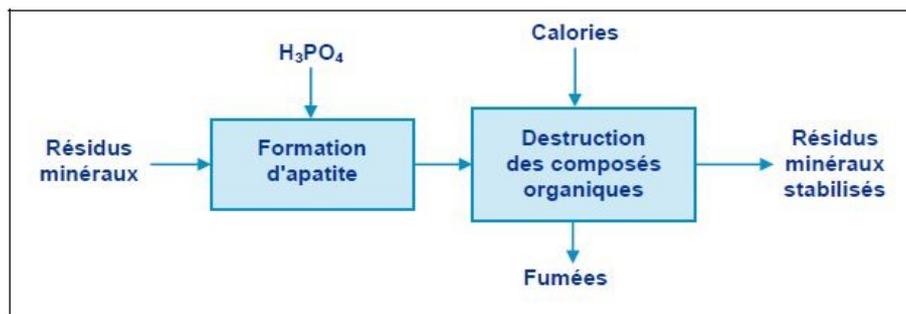


Figure 2.7 : Synoptique du procédé NOVOSOL(Agostini, 2006)

2.2.6. Aspect réglementaire

Le dragage des sédiments et leur gestion sont soumis à des conventions internationales qui sont essentiellement les suivantes.

2.2.6.1. Convention OSPAR (1992)

C'est une convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique Nord-est. La commission OSPAR a publié en 2009 un guide qui illustre les points essentiels pour la gestion des matériaux de dragage dans le but de lutter contre la pollution, selon l'annexe II, et de protéger les espèces et habitats de la zone maritime OSPAR, selon l'Annexe V. Les éléments à prendre en considération dans la caractérisation chimique, physique et biologique des matériaux de dragage sont indiqués dans ce guide en plus d'une annexe technique qui donne les normes d'analyse nécessaires à son application(Hayet et al., 2017).

2.2.6.2. Protocole de Londres

Publié en 1996, c'est une version actualisée de la Convention de Londres destinée à lutter contre la pollution des mers provenant de l'immersion de déchets. Ce protocole incite les pays signataires à s'unir pour contrôler la pollution des mers causée par les navires et les plateformes qui éliminent leurs déchets dans la mer(Hayet et al., 2017).

2.2.6.3. Convention de Barcelone

Cette Convention a pour but la protection de la Mer Méditerranée contre la pollution. Les pays signataires s'engagent à faire tout le nécessaire afin de protéger le milieu marin dans la zone de la mer Méditerranée dans l'intention de participer à son développement durable et pour réduire la pollution dans cette zone(Hayet et al., 2017).

2.2.6.4. Réglementation dans le domaine du génie civil

L'évaluation de l'impact environnemental des sédiments de dragage en technique routière est faite selon les seuils de la directive n°1999/31/CE du 26 avril 1999(décision européenne 2003/33/CE).

Puis en 2009, une version provisoire d'acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière a été mise en place par le ministère responsable du développement durable en France. Finalement, en 2010 une version définitive de ce guide propose trois étapes d'étude :

- 1) Description du déchet et de son gisement

- 2) Description du matériau alternatif, du matériau routier et de l'usage envisagé
- 3) Caractérisation environnementale du matériau routier alternatif(Moussa, 2013)

2.2.7. Valorisation des sédiments de dragage dans le domaine du génie civil

2.2.7.1. Valorisation en technique routière

Plusieurs études ont été faites sur la valorisation des sédiments de dragage en technique routière. Parmi les différents exemples on trouve, à Dunkerque (France), une planche expérimentale routière en 2005, une route expérimentale en 2012 de 600 mètres dite route du quai « Freycinet 12 » a été réalisée pour supporter un trafic moyen de 100 poids lourds par jour et d'une durée de vie de 15 ans construite avec 1800 m³ de sédiments dragués. Un autre exemple à citer, une piste cyclable de 35 km a été également construite à proximité du Mont-Saint-Michel avec 70 000 m³ de sédiments carbonatés (figure 2.8). Mais reste à vérifier l'adaptabilité des tests environnementaux, la dangerosité, les contaminations multiples et le comportement à long terme(Hayet et al., 2017).



Figure 2.8 : Piste cyclable du Mont-Saint-Michel réalisée avec 70 000 m³ de sédiments(Hayet et al.,2017)

2.2.7.2. Valorisation en granulats artificiels

L'orientation vers la substitution des granulats provenant des gisements terrestres par des granulats marins (sables et sédiments marins) est causée par la demande croissante des granulats et les difficultés d'accès à ces gisements. Ces granulats ont des caractéristiques semblables à celles des granulats des roches meubles issues des carrières. La fraction sableuse peut être utilisée directement comme granulat et les sédiments fins seront utilisés pour la fabrication des granulats. Les sédiments sont mélangés avec l'eau et le ciment pour obtenir une matrice cimentaire (figure 2.9). Les granulats artificiels obtenus seront utilisés sous forme de couche d'usure ou de sous-couche routière, pour lutter contre l'érosion ou encore pour la protection des pieds de jetées et digues(Achour, 2013).



Figure 2.9 : Granulats à base de sédiments marins(Achour, 2013)

2.2.7.3. Valorisation dans le secteur briqueterie

La fabrication des briques peut être réalisée par des sédiments de dragage par traitement thermique grâce à leur potentiel minéral. En Wallonie, en Belgique, plusieurs tests ont été réalisés. Le but est d'obtenir un matériau ayant une faible teneur en eau pour éviter le gonflement pendant la phase du chauffage et la fissuration des briques. Aux États-Unis, au laboratoire de génie civil et environnemental à Georgia Tech, des travaux de recherche ont été menés pour produire des briques en utilisant comme matière première les sédiments du port de Savannah(Achour, 2013)(figure 2.10).



Figure 2.10 : Briques à base des sédiments du Savannah(Achour, 2013)

2.2.7.4. Valorisation en production de mortier et de béton

Plusieurs études étaient concentrées sur la possibilité d'utilisation des sédiments dans le béton, parmi lesquelles on peut citer « *Use of uncontaminated marine sediments in mortar and concrete by partial substitution of cement* » par Zhao et al. Cette étude a montré que les sédiments non contaminés dragués dans le port de Dunkerque (France) ont été séchés et broyés puis utilisés en substitution partielle du ciment dans la fabrication de mortiers et de bétons et qu'ils semblent être un constituant très intéressant pour substituer partiellement jusqu'à 20% du ciment dans le béton et que son efficacité dépasse le filler calcaire(Zhao *et al.*, 2018).

Une étude menée par Safhiet al.(2019) a montré la possibilité d'utilisation des sédiments comme matériau de substitution du ciment avec un pourcentage volumétrique des sédiments allant jusqu'à 14% avec un rapport S/C=0,14(Safhi *et al.*, 2019). Il y a aussi une étude qui a été faite sur la combinaison des sédiments avec les coquilles d'huîtres dans le béton(Ez-zaki *et al.*, 2016). Des mortiers ont été réalisés avec des sédiments de dragage marins et de la poudre des coquilles d'huîtres comme substitution du ciment suivant 3 pourcentages de masse : 8, 16 et 33%. Plusieurs propriétés ont été calculées telles que la résistance à la compression, à la carbonatation accélérée, la perméabilité au gaz... L'intégration des résidus marins dans le mortier est non seulement techniquement réalisable, mais elle permet également d'obtenir un mortier à hautes performances hydrauliques et mécaniques(Ez-zaki *et al.*, 2016).

Une autre étude a été menée sur la gestion des déchets de coquillage en les utilisant comme matériaux de remplacement des granulats dans le béton(Uchechi, 2018). L'étude a été réalisée sur les propriétés physiques, chimiques et mécaniques des coquillages suivies par une discussion des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton constitué des granulats des coquillages à l'état frais et durci. L'inclusion de granulats de coquillages réduit les propriétés physico-mécaniques du béton. Cependant, l'utilisation de certains coquillages comme granulats grossiers partiels à un niveau de substitution pouvant atteindre 50%, peut produire un béton de poids normal pour fonctions non structurelles et structurelles à faible résistance(Uchechi, 2018).

Les sédiments de rivière dragués peuvent potentiellement être réutilisés comme granulats dans la production du béton. La variabilité de ces sédiments a été quantifiée par la mesure de leurs concentrations en métaux lourds, la présence de plusieurs polluants distincts, leurs fractions granulaires spécifiques et leur contenu organique à divers endroits du bassin versant de la Seine sur une durée totale de trois ans (2015-2017). Le dépôt des sédiments n'a pas évolué de manière significative d'une année à l'autre, tandis que le contenu organique qui retarde l'hydratation du ciment se concentre dans la fraction la plus fine qui peut être éliminée par tamisage. De plus, 30% du volume des sédiments est principalement du sable et facilement réutilisable sous forme de granulats de béton. Divers sédiments ont été ainsi tamisés à granulats grossiers, sables et fines pour formuler des bétons. En remplaçant 30% du volume des granulats par les granulats ou les sables grossiers résultants des sédiments appauvris en limon et en matière organique, ces granulats ont affecté légèrement l'hydratation, ont prolongé le temps de prise à un peu moins de 3h, ont diminué la résistance à la compression de 10% et ont augmenté la contrainte de retrait de 15%. En ce qui concerne leur utilisation dans des matériaux cimentaires, ces particules pourraient être considérées comme des fillers, mais avec un faible taux de substitution en particulier pour les bétons nécessitant des fines comme le béton perméable(Beddaa *et al.*, 2020).

Le sable de dragage du port d'Agadir au Maroc, considéré comme déchet, a été utilisé dans les formulations de béton avec un ciment qui durcit à l'eau de mer et un adjuvant de 3^e génération. Des bétons dosés avec 300 kg de ciment ont été réalisés. Les différents mélanges réalisés ont été basés sur l'utilisation du sable de dragage non traité entier ou en pourcentage avec du sable concassé. Les mélanges Fi bis sont dépourvus de graviers de (2,5/10 mm) et contiennent le gravier GI (8/16mm) et ont été préparés pour les comparer avec les mélanges Fi qui contiennent du gravier (2,5/10mm) et le gravier GI (8/16mm). Cette comparaison tend à évaluer le rôle de la continuité des courbes granulaires. Les mélanges Fis ne contiennent aucun adjuvant et ont été développés pour les comparer avec les mélanges Fi afin d'évaluer le rôle du sable et les améliorations possibles qu'il

peut apporter aux formulations testées. Les mélanges Fi, Fis et Fi bis contiennent le même pourcentage de sable.

En comparant les formules F1, F2 et F3 avec respectivement 100% de sable de dragage, 70% de sable de dragage + 30% de sable concassé, 50% de sable de dragage + 50% de sable concassé, on a trouvé que la meilleure résistance à la compression à 28j est obtenue avec le mélange F3 (34MPa). Les bétons formulés à partir de F1, F2 et F3 donnent de meilleurs résultats que les mélanges F1 bis, F2 bis et F3 bis sans graviers de (2,5/10mm) ce qui est dû à la continuité granulométrique des constituants du béton F1, F2 et F3. L'utilisation du mélange a considérablement amélioré la résistance à la compression du béton et sa résistance à la traction(Hassoune *et al.*, 2020).

Une autre étude porte sur l'utilisation des sédiments comme matière première secondaire en substitution du ciment après avoir subi un traitement préalable(Benzerzour et al., 2017). Ce traitement consistait en un traitement physique par broyage et séparation pour avoir différentes fractions par voie sèche (1mm, 250 μ m, 120 μ m) et par voie humide (250 μ m et 120 μ m). Vient ensuite le traitement thermique à des températures de 650°C, 750°C et 850°C pendant 1 heure et 3 heures, pour les activer chimiquement soit par décarbonatation soit par activation pouzzolanique du matériau. Une détermination des caractéristiques physiques et chimiques principales a été réalisée. Les résistances à la compression ont été effectuées conformément à la norme NF EN 196-1 à 7, 14, 28 et 60j sur les mortiers à base de 100 % de ciment CEM I 52.5 N, ceux substitués par les sédiments traités à des taux de 8% et 15%. Cette étude a mis en évidence certains paramètres qui peuvent être considérés comme dominants dans les processus de traitement, de formulation et d'hydratation comme la finesse, le taux de substitution, le temps de calcination, la température...L'optimum était le traitement thermique du sédiment brut, broyé et tamisé à 120 μ m à 850°C pendant 1h. Les mortiers à partir de ce sédiment avec un taux de remplacement de 8% présentaient des performances mécaniques intéressantes (63 MPa) qui dépassaient celles du mortier de référence (56 MPa) à 28j. Les sédiments bruts aussi ont un potentiel d'utilisation dans les mortiers et bétons grâce à leur coût modéré de transport et de traitement et leurs performances mécaniques relativement importantes qui permettent leur utilisation en tant qu'ajouts à la matrice cimentaire. Les sédiments calcinés à 650°C pendant 1h semblent allier les performances mécaniques et économiques pour être une addition minérale efficace. Les sédiments lavés présentent aussi une solution, car ils présentent des performances similaires aux mortiers à base de sédiments bruts(Benzerzour et al., 2017).

Les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons fabriqués avec du sable marin dragué en remplacement partiel du sable brut (de 15% à 50% par masse de sable brut) destiné aux chaussées portuaires ont été étudiées. Trois échantillons des sédiments ont été extraits du port de Barcelone. Les sédiments ont été stockés à l'air libre et aucun processus de lavage, de séchage ou de décontamination n'a été effectué. Les propriétés minéralogiques, chimiques et physiques des sédiments ont été déterminées. Huit mélanges différents ont été produits incorporant trois types de sédiments en remplacement partiel du sable brut de calcaire concassé. Le béton a été soumis à des essais de compression après 7 et 28j de durcissement humide, des tests de densité, résistance à l'abrasion, aspiration capillaire, pénétration d'eau sous pression, vitesse d'impulsion ultrasonique après 28j de séchage humide. Les résultats ont démontré que les sédiments contenaient une quantité de matière fine et que plus de 70 % du matériau passait à travers le tamis 250 μ m. Ils ont une forme angulaire et une porosité faible comparativement au sable de calcaire concassé. Ils sont composés majoritairement par la silice et la calcite. Leur teneur en contaminants est faible et respecte les

limites imposées par la norme. Certains échantillons ont dépassé les limites de chlorures donc doivent être mélangés avec des granulats bruts pour respecter les exigences de la norme pour le béton. À l'état frais, les bétons incorporant les sédiments en substitution partielle du sable 0/4 mm ont présenté des propriétés similaires à celles du béton témoin avec la consistance sèche requise pour la conception des trottoirs en béton. La teneur en sel n'a pas affecté la maniabilité. À l'état durci, les bétons à base de sédiments ont présenté une légère diminution de densité alors que l'absorption est maintenue ou réduite en comparaison avec le béton de référence, quel que soit le taux de remplacement. Quant aux propriétés mécaniques (résistance à la compression, à la traction et à la flexion), elles ont été similaires à celles du béton de référence (42 MPa pour la résistance à la compression à 28j). La résistance à la flexion satisfaisait aux exigences standards de 4 MPa. La présence des sédiments a légèrement augmenté la résistance à l'abrasion du béton. Pour les essais de durabilité, tous les bétons produits avec les sédiments ont obtenu des propriétés adéquates pour l'essai déterminant la profondeur de pénétration d'eau sous pression en exposition à un environnement marin. Par conséquent, le sable marin dragué du port de Barcelone peut être utilisé comme granulats fins pour la production du béton de 30 MPa exposé à un environnement marin vu qu'il répond à la propriété principale requise par la norme espagnole pour la construction de chaussée portuaire(Limeira *et al.*, 2011).

Une approche multidisciplinaire a été développée à l'université Federico II de Naples (Italie) visant à avoir un aperçu de la possibilité d'utiliser des sédiments dragués en combinaison avec des cendres volantes dans la production de matériaux de construction à base de géopolymères. Les sédiments ont été extraits du port de Naples et les cendres volantes industrielles ont été produites par une centrale électrique au sud de l'Italie. Certains géocomposites étaient préparés à l'aide d'un sable siliceux et considérés comme un matériau de référence inerte. Les résultats expérimentaux ont mis en évidence que l'utilisation des cendres volantes peut améliorer les propriétés mécaniques des sédiments dragués conduisant à des matrices géopolymères avec des propriétés mécaniques intéressantes. Les matériaux composites fabriqués avec les sédiments dragués présentent une microstructure plus compacte que celle des matériaux composites fabriqués avec du sable. Seulement le module d'Young du géocomposite avec du sable était supérieur à celui du géocomposite avec le sable de dragage. La méthodologie proposée lors de cette étude pourrait représenter une base pour l'étude d'éventuelles utilisations bénéfiques des sédiments pollués dans les matrices géopolymères(Lirer *et al.*, 2017).

Une étude visant à optimiser la composition d'un nouveau béton écologique constitué de sol excavé valorisé a été menée. Plusieurs mélanges de béton de sol composés de cinq matériaux différents : sol argileux, sol sableux, ciment, chaux et fibres de chanvre ont été testés. Le ciment et la chaux ont été ajoutés pour stabiliser le sol et augmenter la résistance à la compression. Les résultats de cette étude ont montré que la résistance à la compression du béton testé a diminué avec l'augmentation de la proportion de fibre de chanvre et de sol argileux ce qui pourrait être lié à l'augmentation de la porosité du béton de sol. Cela peut être aussi dû à la faible densité et au changement de la structure du béton avec l'introduction des vides et la création d'une discontinuité. La résistance à la compression a varié de 1 MPa à 5 MPa après 6 mois ce qui était suffisant pour l'application de remplissage d'un mur de bâtiment à ossature. L'affaissement était supérieur à 6,5 cm. La vitesse d'impulsion ultrasonique a diminué avec l'ajout du sol argileux et des fibres de chanvre ce qui a présenté une bonne corrélation avec la résistance à la compression. Le retrait au séchage a augmenté avec le taux de sol argileux et a atteint des valeurs importantes pour le béton avec 40% 5 à 6 fois

plus élevées que celle obtenue avec le béton de 0% de sol argileux. Une valeur de 1,2% d'ajout de fibres a influencé légèrement l'amplitude du retrait avec 0% et 20 % de sol argileux, mais a augmenté l'amplitude avec 40% de sol argileux. Ceci est dû au changement de la porosité qui modifie la vitesse d'évaporation et par conséquent le taux de retrait. En ce qui concerne les tests de durabilité, l'incorporation des fibres pour la réduction de la densité et l'amélioration des propriétés thermiques et acoustiques a conduit à une augmentation de l'absorption d'eau d'environ 9% pour le béton avec 20 % de sol argileux. Cette étude a cependant des limites puisque le sol argileux a été incorporé sans additifs. Reste à voir l'effet de l'argile minéralogique et d'autres ajouts tels que les plastifiants sur les propriétés mécaniques et physiques du sol(Ngo *et al.*, 2020).

2.3. Carapaces de homard et crabe

Les carapaces de homard et crabe utilisées dans le cadre de cette étude proviennent des Îles-de-la-Madeleine.

2.3.1. Crabes des neiges

Le crabe est classé dans le groupe des crustacés qui possèdent une coquille épaisse d'exosquelette. Cette créature vit dans l'eau de mer, l'eau douce et en partie sur terre(Asphama *et al.*, 2015). La carapace de crabe est un déchet, car elle ne se mange pas. Ainsi, elle est largement accessible et disponible. C'est l'une des ressources naturelles riches en carbonate de calcium(CaCO_3)(Xu *et al.*, 2008). Les crabes des neiges, *Chionoecetes opilio*, se trouvent dans tout l'Atlantique Nord-Est (du Groenland au golfe du Maine), le nord pacifique, mer de Béring, océan Arctique et mer du Japon. La pêche de ce crustacé a commencé en 1966 après que des relevés exploratoires aient permis de découvrir les premiers stocks importants de crabes des neiges dans le golfe du Saint-Laurent. Depuis lors, de nouveaux stocks ont été localisés presque chaque année. Les principaux lieux de pêche se trouvent du sud-est de la Gaspésie Péninsule (Québec) aux Îles-de-la Madeleine du golfe, autour de l'île du Cap-Breton et dans le sud-ouest de la Nouvelle-Écosse. Il y a aussi des lieux de pêche autour de la Terre-Neuve. Les pays ayant enregistré les captures les plus importantes de cette espèce selon la FAO pour l'année 1999 étaient le Canada (95 000 t) et le Saint-Pierre-et-Miquelon (589 t). Le volume de crabes des neiges pour le Canada en 2004 était de 103 000 t et en 2006 de 90 000 t. La quantité de crabes des neiges débarquée et exportée du Canada vers le reste du monde est restée stable ces dernières années (entre 90 000 et 100 000 tm débarquées et environ 50 000 tm exportées), et les principaux marchés sont les États-Unis et le Japon. Le crabe a une taille de coquille d'environ 11 cm de largeur et 0,5 kg de poids sec. Les coquilles femelles atteignent rarement la taille de 9,5 cm et un mâle adulte est environ deux fois plus grand atteignant une largeur de coque maximale de 14 cm(Lage-Yusty *et al.*, 2011). L'exploitation du crabe des neiges génère des volumes importants des sous-produits qui constituent de précieuses sources de composants et une nouvelle source industrielle(Ferraro *et al.*, 2010). On peut voir sur la figure 2.11 la morphologie de surface de la coquille de crabe.

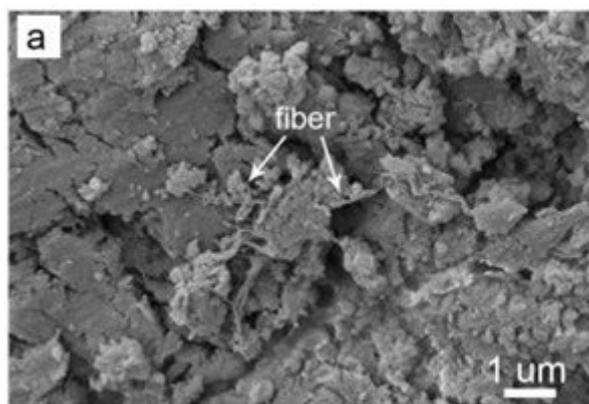


Figure 2.11 : Morphologie de surface de la coquille de crabe(Hanana et al, 2018)

2.3.2. Homard

En 2004, la production mondiale du homard était de 165 367 tonnes(Holmyard et Franz, 2016) qui avaient une valeur estimée à 3,32 milliards de dollars. Ces chiffres ont augmenté pour atteindre 304 000 tonnes en 2012(Sabatini, 2015).La production du homard se trouve un peu partout dans le monde, mais la majorité de la production est concentrée seulement dans trois pays : Canada (34%), les États-Unis (29%) et Australie (11%)(Tselikis et Mccarron, 2006). Les quatre principales espèces commerciales sont : le homard américain (*Homarus Americanus*), le homard tropical ou épineux, la langouste et le homard européen (*Homarus gammarus*). L'espèce la plus abondante produite dans le monde est le homard américain qui est principalement récolté au Canada et aux États-Unis(Tselikis et Mccarron, 2006)(Figure2.12). En 2012, le Canada et les États-Unis ont produit 140 000 tonnes de homards(Therriault et al., 2013). Le homard américain se trouve le long de la côte atlantique de l'Amérique du Nord dans la région du Labrador, au Canada, à la Caroline du Nord, aux États-Unis. Ils sont plus répandus le long de la côte de la Nouvelle-Angleterre. Le homard américain se trouve dans les eaux peu profondes, mais il est plus abondant dans les eaux plus profondes et peut vivre jusqu'à 365 m de profondeur(Walsh, 2000). Le homard américain est la plus grande espèce de homard et peut atteindre une longueur de 1,1m et un poids de 20 kg. Cependant, la taille d'un homard couramment pêché est environ 25 cm de long et 0,5 kg de poids(Lydon, 2003).L'exosquelette du homard américain est composé de chitine, de protéines, de calcium, de caroténoïdes et de traces d'autres minéraux et composés organiques. Les homards sont transformés en produits (viande cuite ou crue) ou vendus directement. Le traitement commence par le retrait de la carapace dure. Par conséquent, d'énormes volumes sont générés lors du traitement. La plupart des carapaces sont généralement déversées dans la mer ou dans les décharges le long du littoral ce qui dépasse le taux de recyclage naturel et menace l'équilibre des zones côtières en raison de l'odeur nauséabonde et la libération des amines biogéniques par décomposition. Les pratiques actuelles de gestion des déchets posent un sérieux défi environnemental aux usines de transformation des crustacés(Ilangumaran *et al.*, 2017).

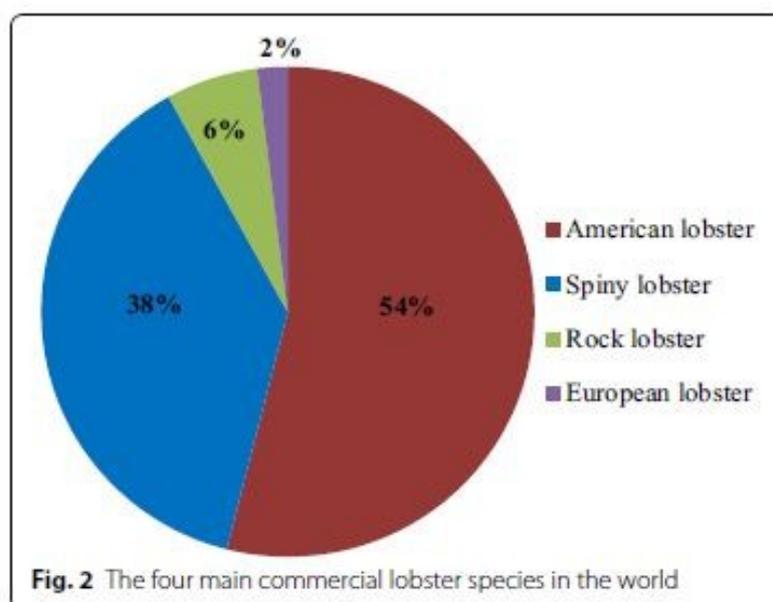


Figure 2.12 : Les quatre principales espèces commerciales de homard (Nguyen et al., 2017)

2.3.3. Scénarios de valorisation

Les études sur la valorisation des carapaces de crustacés dans le secteur de construction sont au stade préliminaire. Une étude a été menée en Corée du Sud sur l'incorporation de la forme de la structure biomimétique des carapaces de crustacés comme méthode permettant d'améliorer la capacité d'absorption d'énergie des composites de ciment renforcés par des fibres (Kwon et al., 2018). Trois types de panneaux préfabriqués de formes différentes ont été utilisés pour la fabrication d'échantillons flexibles multicouches. Un test de flexion a été réalisé pour évaluer le comportement en flexion et la capacité d'absorption d'énergie des échantillons. Les scénarios de valorisation des carapaces de homard et crabe sont présentés dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5 : Scénarios de valorisation des carapaces de homard et crabe (Légaré Bilodeau, 2011)

Matière résiduelle critique	Scénarios de valorisation
Carapace de homard et crabe	Poudres et carapaces sèches
	Chitine
	Bioséchage
	Biométhanisation
	Compostage
	Gazéification
	Incinération
	Pyrolyse
	Enrichisseur de moulée pour animaux

2.3.3.1. Poudres et carapaces sèches

Les carapaces de crustacés sont broyées, cuites, séchées et ensuite mises dans un emballage spécifique. Elles sont riches en nutriments comme par exemple les résidus de crabe des neiges séchés qui sont composés de 43 % de protéines, 15 % de lipides, 26 % de minéraux et 16 % de chitine. La poudre est souvent appelée *meal*, ou farine, et doit subir un séchage convenable pour

bloquer la croissance des micro-organismes et garder sa valeur nutritive. Le séchage se fait généralement par l'intermédiaire d'un séchoir rotatif, à des températures entre 200 et 400°C (Stewart et Noyes-Hull, 2010). La poudre de crabe et de homard peut être utilisée dans des domaines multiples grâce à ses propriétés nutritionnelles. Par exemple, la poudre est utilisée comme engrais dans les arômes asiatiques, comme additif nutritionnel dans la nourriture animale et en aquaculture. Dans le cadre de ce projet, elle sera ajoutée comme addition dans le mortier. Les prix varient en fonction de l'application et de l'uniformité des produits. La tonne métrique de la poudre de crabe et de homard se vend autour de 800\$ et celle des carapaces séchées se vend environ 770\$ selon St. Laurent Gulf Products Ltd (figure 2.13). On trouve aussi des compagnies qui vendent des engrais à base de carapaces de crabe des neiges séchées pour 50\$ le sac de 9kg (Stewart et Noyes-Hull, 2010).



Figure 2.13 : Carapaces de crabe et de homard séchées (Légaré Bilodeau, 2011)

2.3.3.2. Chitine

La chitine, $C_8H_{13}NO_5$, se retrouve dans l'endosquelette et l'exosquelette d'animaux marins, la paroi cellulaire des champignons, des levures, des bactéries et certaines algues. L'exosquelette des invertébrés marins est d'une manière générale formé de 30 à 40 % de protéines, 30 à 50 % de carbonate de calcium et de 20 à 30 % de chitine (Marquis-Duval, 2008). À l'échelle mondiale, les sources principales de chitine sont les carapaces de crevette, de homard et de crabe.

La première étape de production de la chitine est le broyage des carapaces de crustacés. Ensuite, une déminéralisation est faite permettant de solubiliser le contenu minéral des résidus dans une solution acide, généralement de l'acide chlorhydrique. Puis, une déprotéinisation est réalisée dans un milieu basique à de hautes températures afin de solubiliser le contenu en protéines. Un lavage et une filtration entre chaque étape permettent d'extraire les éléments solubilisés, soit les protéines et les minéraux (Marquis-Duval, 2008).

En tenant compte de ses propriétés d'agent antibactérien, d'agent antifongique, de stimulateur immunitaire, etc., la chitine est utilisée dans plus de 200 produits dérivés (Stewart et Noyes-Hull, 2010). Elle peut être utilisée dans le domaine de l'agroalimentaire, l'environnement et la médecine. On peut aussi fabriquer un produit nommé chitosane à partir du groupement acétyle qui est un groupement acyle de l'acide acétique extrait de la chitine. C'est ce qu'on appelle la désacétylation de la chitine qui s'effectue généralement dans une solution d'hydroxyde de sodium. Actuellement, le Japon est le leader dans la production et l'utilisation de chitine et de chitosane (Marquis-Duval, 2008).

2.3.3.3. Bioséchage

Plusieurs matières résiduelles ont une forte teneur en eau et peuvent difficilement être valorisées énergétiquement. Le bioséchage permet de produire des matières solides ayant une haute teneur énergétique. Un procédé de biooxydation est utilisé pour sécher un mélange de résidus organiques de sources multiples sous plusieurs conditions contrôlées comme l'aération, l'activité microbienne et le temps de résidence. L'énergie thermique utilisée dans le processus de bioséchage est générée par l'activité microbienne. Le séchage final se fait à l'aide d'un séchoir à bandes en utilisant la chaleur dégagée par l'activité microbienne et récupérée par un système de récupération. Une déshydratation, une stabilisation partielle et une hygiénisation des matières se produiront pendant le temps de résidence. Les objectifs du bioséchage sont la minimisation de la teneur en eau et la biodégradation minimale afin de produire un substrat ayant une haute valeur énergétique (Légaré Bilodeau, 2011).

Les extrants sont le BÉFOR (**bio**énergie **f**abriquée à partir de matières **o**rganiques **r**ésiduelles), qui peut être valorisé sous forme de combustible pour produire de l'énergie thermique, de l'électricité et de l'éthanol cellulosique, des sous-produits de réaction et des émissions atmosphériques (Légaré Bilodeau, 2011).

2.3.3.4. Biométhanisation

Il s'agit d'un processus de décomposition des matières organiques dans un milieu sans oxygène à travers quatre phases : l'hydrolyse, la fermentation, l'acétogénèse et la méthanogénèse (Légaré Bilodeau, 2011). En effet, à l'intérieur du biodigesteur on introduit les matières putrescibles broyées pour une durée qui dépend du mode de digestion. À la sortie du biodigesteur, on récupère un biogaz et des matières organiques résiduelles qu'on appelle un digestat. On peut valoriser le biogaz énergétiquement par une production d'énergie thermique, de gaz naturel ou d'électricité. Pour le digestat, on peut le valoriser sous forme de matière organique comme le compost, des fertilisants, etc. La biométhanisation diminue la charge organique, le potentiel infectieux des matières putrescibles et les odeurs et produit une forme d'énergie renouvelable. Généralement, de point de vue environnemental, cette technologie est considérée comme avantageuse (Légaré Bilodeau, 2011).

2.3.3.5. Compostage

Il s'agit d'un processus naturel de biodégradation aérobie de la matière organique par l'intermédiaire des micro-organismes. Plusieurs méthodes de compostage existent avec des variantes en termes d'installations, de coûts, de main-d'œuvre requise, etc. D'abord, une activité biologique intense enclenche la décomposition. Ensuite, il y aura une période de stabilisation

pendant laquelle l'activité biologique diminue progressivement. Enfin, une phase de maturation aura lieu(Desjardins et Forcier, 2007).Le processus de compostage peut être appliqué à des matières organiques de différentes sources. Cependant, les applications du compost généré diffèrent en fonction de la nature des intrants. Les matières critiques ciblées sont les résidus de l'industrie de la pêche, le carton, le papier, le bois et les branches. Un compost d'excellente qualité, selon Stewart et Noyes-Hull(2010), peut se faire avec un tiers de carapaces de crabe et deux tiers de composés carbonés comme les copeaux de bois(Légaré Bilodeau, 2011).

2.3.3.6. Gazéification

La gazéification est un système de traitement global qui sert à valoriser énergétiquement les matières résiduelles. Les procédés de gazéification les plus connus sont ceux à haute température, au plasma et à lit fluidisé(Desjardins et Forcier, 2007). En premier lieu, un prétraitement est appliqué aux matières en fonction du type de gazéification utilisé. En second lieu, elles sont introduites dans un réacteur déjà chauffé à de très hautes températures. En dernier lieu, les matières résiduelles se transforment en gaz de synthèse, en matières vitreuses et en composés métalliques. Le gaz de synthèse produit peut être réintroduit dans le système ou valorisé comme source d'énergie externe, le vitrifiât peut être utilisé dans le domaine de construction et les composés métalliques peuvent être recyclés(Légaré Bilodeau, 2011).

2.3.3.7. Incinération

Brûler les matières résiduelles et valoriser la chaleur de combustion générée sont les principes de l'incinération avec récupération d'énergie. Généralement, le processus de combustion est démarré par un brûleur, par la suite autoalimenté par l'apport de matières résiduelles dans l'incinérateur. L'énergie thermique produite est transmise à une turbine ou un fluide caloporteur afin de produire de l'électricité ou chauffer des bâtiments. Sur le marché, différents types d'incinérateurs sont offerts : grille fixe, grille mobile, foyer multiple, lit fluidisé, rotary-kiln, etc.(Desjardins et Forcier, 2007). L'incinération produit principalement, à part l'énergie thermique, des cendres, des émissions atmosphériques et des eaux de lavage. Dans certains cas, les cendres peuvent être valorisées comme sous-couche routière, matériau de remblais, ou amendement(Légaré Bilodeau, 2011).

2.3.3.8. Pyrolyse

La pyrolyse permet de décomposer la partie organique des matières résiduelles pour produire un syngaz. Il existe plusieurs chambres de pyrolyse comme Rotating Kiln, tubes chauffés, contact de surface, etc. Un prétraitement est d'abord appliqué aux matières résiduelles en fonction du type de pyrolyse utilisée. Ensuite, les matières sont introduites dans le réacteur de pyrolyse en absence d'oxygène et à hautes températures. Les matières résiduelles sont ainsi transformées en syngaz, en cendres, en émissions atmosphériques diverses et en eaux de lavage(Desjardins et Forcier, 2007).On peut valoriser le syngaz sous forme d'électricité ou de vapeur. Dans certains cas, les cendres peuvent être valorisées comme sous-couche routière, matériau de remblais, etc.(Légaré Bilodeau, 2011).

2.3.3.9. Enrichisseur de moulée pour animaux

On peut valoriser les matières résiduelles sous forme d'enrichisseur de moulée pour animaux. Les deux techniques principales qui sont pratiquées sont la valorisation directe des matières résiduelles en moulée ou le mélange des matières résiduelles avec une moulée préexistante. En fonction du type d'intrants et de l'application visée, un prétraitement de broyage, un séchage et une cuisson sont parfois nécessaires. On peut utiliser la moulée produite dans les exploitations agricoles comme les fermes porcines et avicoles(Légaré Bilodeau, 2011).

2.4. Conclusion

Le développement durable et la stratégie écologique de conception des structures sont aujourd'hui d'une importance majeure dans l'industrie de la construction. Ainsi, des matériaux alternatifs tels que les sédiments de dragage et les carapaces de crustacés sont de plus en plus utilisés. L'objectif de production du béton écologique est de réduire la consommation du ciment donc l'émission du CO₂, assurer une alternative à la rareté des matières premières et réduire l'énergie de consommation dans le processus de production. L'utilisation des sédiments de dragage dans le domaine du génie civil s'effectue sous plusieurs formes : en technique routière, en granulats artificiels, en briqueterie et en production de mortier et de béton. Avant l'incorporation de ces matériaux, il faut vérifier leur état de contamination et dans le cas où ils sont contaminés, il faut prévoir un traitement dans le but d'éliminer les polluants qui peuvent être de nature organique, des métaux lourds ou encore du sel marin qui a une influence sur la prise du ciment et donc sur les propriétés mécaniques.

Parmi les méthodes de traitement, on trouve le prétraitement, le traitement physico-chimique, le traitement thermique et le traitement organique. Le procédé NOVOSOL constitue une combinaison de techniques chimique et thermique permettant ainsi de traiter les deux types de pollution. Les carapaces de homard et de crabe, étant des matières résiduelles critiques, possèdent un potentiel de valorisation important. Elles peuvent être transformées en poudre et carapaces sèches, peuvent subir un bioséchage, une biométhanisation, un compostage et peuvent être utilisées comme enrichisseur de moulée pour animaux.

Récemment, de nombreux changements ont été observés dans les méthodes de construction dans le but de remplacer le béton traditionnel par des matériaux de construction alternatifs tels que le béton contenant une forte proportion de divers composants écologiques tout en conservant des propriétés acceptables pour leur application. Dans ce contexte, plusieurs études ont été menées dans le but d'incorporer les sédiments de dragage comme sable dans le béton soit en remplacement partiel soit en totalité. Ce travail de recherche étudie la possibilité d'incorporer les carapaces de crustacés partiellement dans la formulation des bétons verts.

Chapitre3 : Méthodologie

Afin d'étudier le potentiel de la poudre de crustacés comme ajout cimentaire en remplacement du ciment, la démarche expérimentale a d'abord consisté à caractériser les carapaces pour connaître leur composition chimique et minéralogique. Ensuite, l'influence de quatre paramètres (finesse de la poudre, taux de remplacement, présence de matière organique et effet de la calcination) a été étudiée en fabriquant différents mélanges (pâte de ciment et mortier) et en déterminant les résistances à la compression à 7j et à 28j. La figure 3.1 schématise l'approche expérimentale préconisée dans ce projet et la figure 3.2 présente une synthèse des différents mélanges ainsi que le nombre d'échantillons avec les différentes variantes.

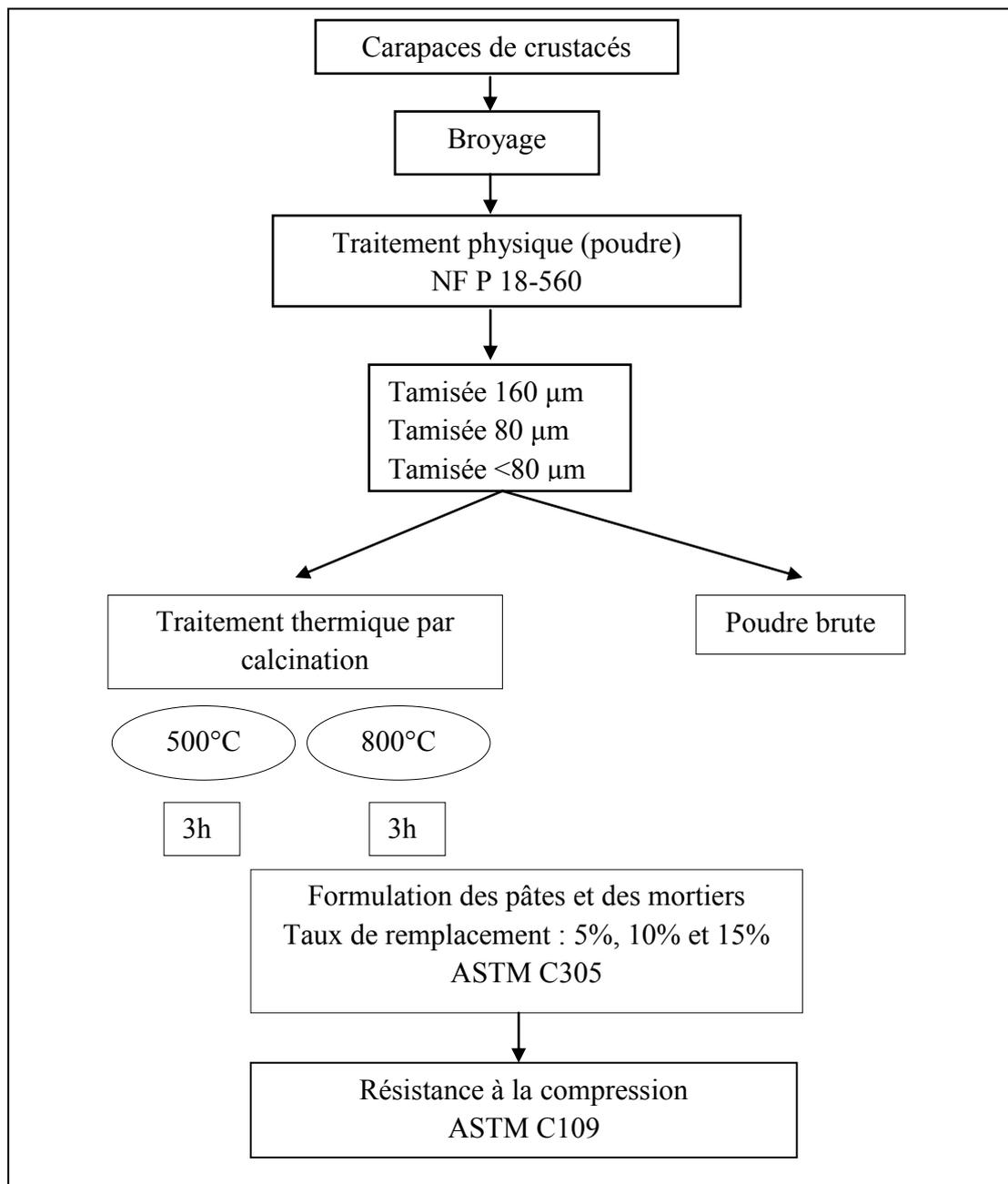


Figure 3.1 : Plan expérimental et essais réalisés

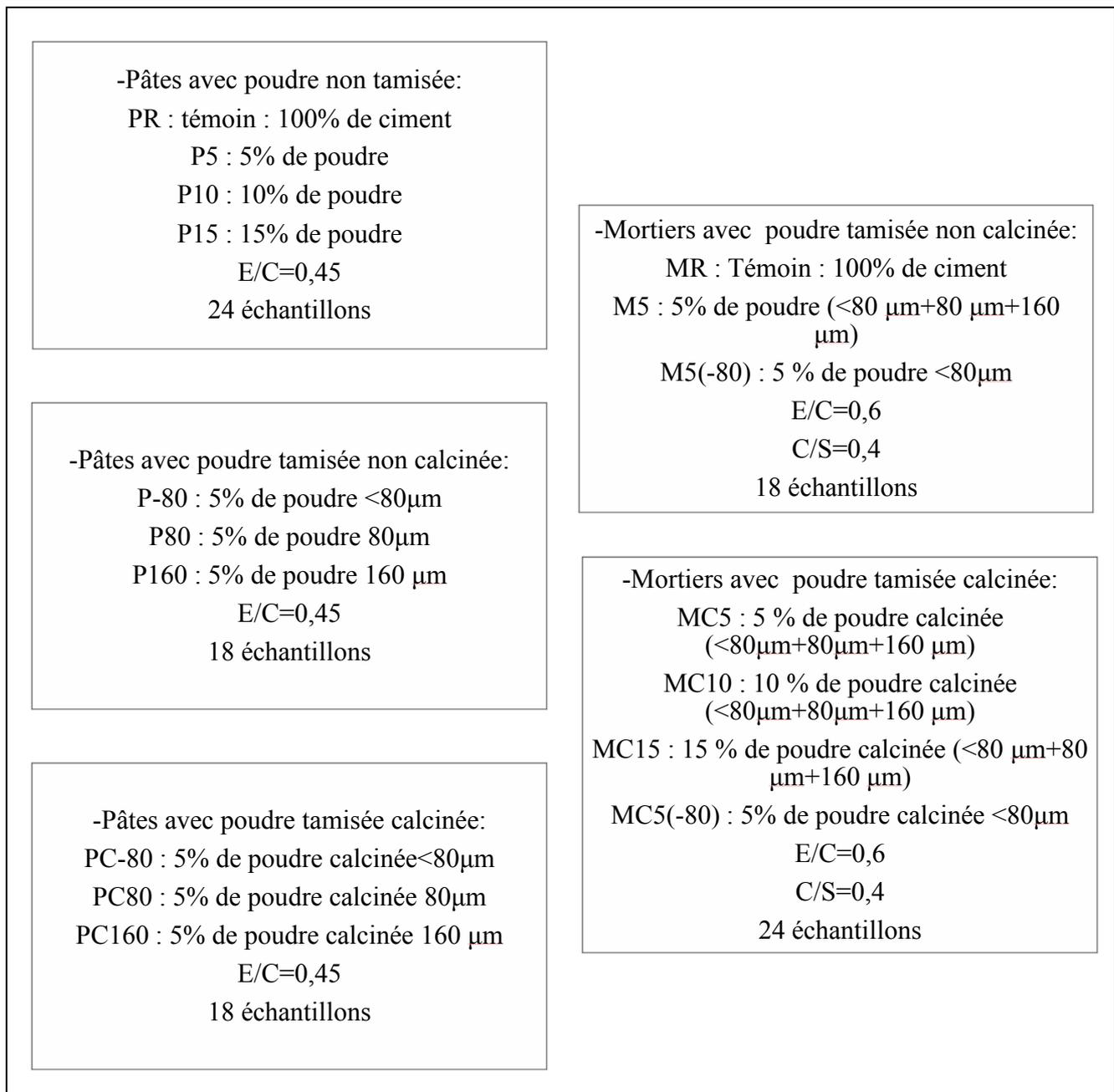


Figure 3.2 : Figure synthèse des différents mélanges réalisés

3.1. Caractérisation des deux poudres

Les carapaces de homard et de crabe utilisées dans ce projet proviennent des Îles-de-la-Madeleine en partenariat avec le CERMIM (Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes) sous forme de deux sacs ; l'un contenant des carapaces moyennement broyées (figure 3.3 à gauche) et l'autre des carapaces broyées sous forme de poudre (figure 3.3 à droite). Il s'agissait d'un mélange homogène de crabe et de homard crus et secs. Un broyage a été nécessaire pour caractériser les carapaces 1 et les utiliser dans les mélanges. Un broyeur à boulets a été utilisé pendant 1h (figure 3.4). Les carapaces 2 étaient suffisamment broyées.



Figure 3.3 : Les deux types de carapaces de crustacés

Pour caractériser les deux types de poudre obtenue, la technique de la diffraction des rayons X a été utilisée pour déterminer les phases cristallines et la technique de la fluorescence X pour déterminer la composition chimique. Le travail avec la poudre 1 (broyage, tamisage, calcination et incorporation dans les mélanges) sera favorisé dans les prochaines sections, car elle contient moins de matière organique que la poudre 2. Une analyse granulométrique a été ainsi faite sur la poudre 1. Les résultats sont présentés dans le chapitre 4.



Figure 3.4 : Broyeur à boulets

3.2. Calcination de la poudre

La poudre a été calcinée dans un four Thermolyne (figure 3.5) d'après le cycle suivant :

- Montée à 500°C en 2h
- Palier de 1h à 500°C
- Montée à 800°C en 2h
- Palier de 1h à 800°C
- Retour à la température pièce en fermant le four et en le gardant fermé toute la nuit

Le palier à 500°C est présent simplement pour éviter d’avoir trop de fumée, créé par la carbonisation, dans le laboratoire.

Le choix des températures est basé sur une étude qui montre que l’importante phase de décomposition se produit entre 400°C et 700°C indépendamment de la quantité de matière organique et que la composition est totale à 700°C (Ramaroson, 2008).



Figure 3.5 : Four Thermolyne modèle 30400

3.3. Programme expérimental : essais sur pâtes et mortiers

Les essais ont été réalisés sur les pâtes pour étudier l’influence de la poudre de crustacés sur l’hydratation de la pâte de ciment et les mortiers dans le but d’étudier le rôle des inclusions granulaires (sable de dragage dans le cas de ce projet). Le but est de trouver les mêmes performances mécaniques pour les pâtes en diminuant la proportion du ciment et pour les mortiers en incluant le sable de dragage. Pour chaque mélange, 6 cubes ont été préparés, 3 cubes pour la résistance à la compression à 7j et 3 cubes à 28j. Le tableau 3.1 résume les mélanges qui ont été préparés.

En se basant sur le modèle de Bolomey, il est possible de prévoir la résistance mécanique à la compression à 28j du béton f_{c28} à partir de la teneur massique du ciment C et du volume d’eau du béton. La résistance f_{c28} est donnée par la formule suivante :

$$f_{c28} = \lambda R_{c28} \left(\frac{C}{E} - \mu \right)$$

Avec :

λ, μ : des coefficients en fonction du type de granulat

R_{c28} : La résistance à 28j de la pâte de ciment

Pour des bétons avec additions, la formule devient :

$$f_{c28} = \lambda R_{c28} \left(\frac{C + \sum k_i A_i}{E} - \mu \right)$$

Avec:

C: teneur massique du ciment

A_i: teneur massique des additions

k_i: Coefficient de prise en compte de l'addition i défini par rapport à des grandeurs massiques dans la norme XP P18-305(Caré et al., 2000).

Tableau 3.1 : Programme expérimental

Mélanges			
Pâtes		Mortiers	
Avec poudre non tamisée non calcinée (1 et 2)	PR : témoin : 100% de ciment	Avec poudre tamisée non calcinée (1)	MR : Témoin : 100% de ciment
	P5 : 5% de poudre		M5 : 5% de poudre ($\frac{1}{3}<80 \mu\text{m} + \frac{1}{3}80 \mu\text{m} + \frac{1}{3}160 \mu\text{m}$)
	P10 : 10% de poudre		M5 (-80) : 5 % de poudre <80 μm
	P15 : 15% de poudre		
Avec poudre tamisée non calcinée(1)	P-80 : 5% de poudre <80 μm	Avec poudre tamisée calcinée(1)	MC5 : 5 % de poudre calcinée ($\frac{1}{3}<80\mu\text{m} + \frac{1}{3}80\mu\text{m} + \frac{1}{3}160 \mu\text{m}$)
	P80 : 5% de poudre 80 μm		MC10 : 10 % de poudre calcinée ($\frac{1}{3}<80\mu\text{m} + \frac{1}{3}80\mu\text{m} + \frac{1}{3}160 \mu\text{m}$)
	P160 : 5% de poudre 160 μm		MC15 : 15 % de poudre calcinée ($\frac{1}{3}<80 \mu\text{m} + \frac{1}{3}80 \mu\text{m} + \frac{1}{3}160 \mu\text{m}$)
			MC5 (-80): 5% de poudre calcinée <80 μm
Avec poudre tamisée calcinée(1)	PC-80 : 5% de poudre calcinée<80 μm		
	PC80 : 5% de poudre calcinée 80 μm		
	PC160 : 5% de poudre calcinée 160 μm		

3.3.1. Pâtes de ciment avec poudre non tamisée non calcinée

Tout d'abord, des pâtes de ciment ont été réalisées avec la poudre broyée non tamisée avec un rapport E/C=0,45 (tableau 3.2). Les mélanges préparés sont :

- Un mélange témoin(PR)
- Trois mélanges avec poudre de crustacés (P) avec des taux de remplacement de 5, 10 et 15 %. Ce choix a été basé sur des travaux antérieurs utilisant jusqu'à 30% de remplacement partiel du ciment, mais qui ont prouvé l'efficacité des faibles taux comme ceux choisis ici plutôt que des taux élevés.

Tableau 3.2 : Formulations de pâtes de ciment avec poudre non tamisée non calcinée

Mélange	Ciment(g)	Poudre(g)	Eau(g)	E/C+P	E/C	P/C
PR	1350	0	608	0.45	0,45	0
P5	1283	68	608	0.45	0,47	0,05
P10	1215	135	608	0.45	0,50	0,1
P15	1148	203	608	0.45	0,52	0,15

3.3.2. Pâtes de ciment avec poudre tamisée non calcinée

Après le tamisage, des poudres avec différentes finesses ont été obtenues. Des pâtes ont été réalisées avec un taux de remplacement de 5% et un rapport E/C=0,45. Le choix était de travailler avec trois finesses ce qui a donné trois mélanges (tableau 3.3) :

- P-80 : pâtes avec une finesse de poudre < 80 μ m;
- P80 : pâtes avec une finesse de poudre de 80 μ m;
- P160 : pâtes avec une finesse de poudre de 160 μ m (figure 3.6).

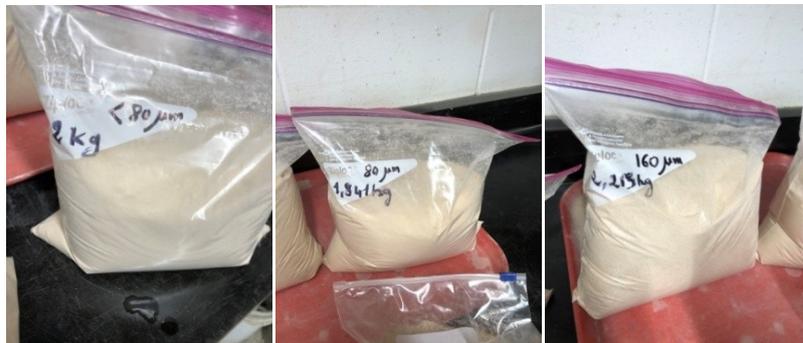


Figure 3.6 : Finesses < 80 μ m, 80 μ m et 160 μ m de la poudre de crustacés non calcinée

Tableau 3.3 : Formulations de pâtes de ciment avec poudre tamisée non calcinée avec un taux de remplacement de 5%

Mélange	Ciment(g)	Poudre(g)	Finesse (μ m)	Eau(g)	E/C+P	E/C	P/C
P-80	1283	68	<80	608	0,45	0,47	0,05
P80	1283	68	80	608	0,45	0,47	0,05
P160	1283	68	160	608	0,45	0,47	0,05

3.3.3. Pâtes de ciment avec poudre tamisée calcinée

Après la calcination de la poudre, des mélanges ont été préparés avec les mêmes finesses et le même taux de remplacement qui est 5% (figure 3.7 et tableau 3.4).

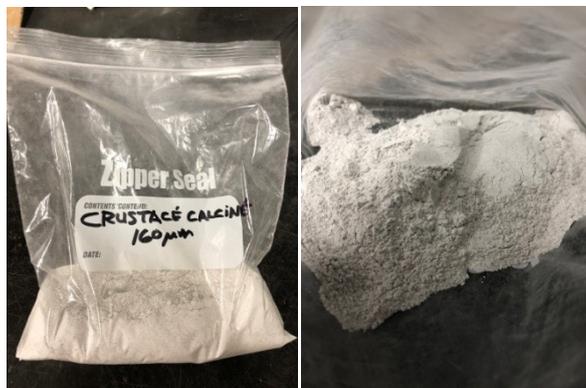


Figure 3.7 : Poudre de crustacés calcinée de finesses 160µm

Tableau 3.4 : Formulations de pâtes de ciment avec poudre tamisée calcinée avec un taux de remplacement de 5%

Mélange	Ciment(g)	Poudre(g)	Finesse (µm)	Eau(g)	E/C+P	E/C	P/C
PC-80	1283	68	<80	608	0,45	0,47	0,05
PC80	1283	68	80	608	0,45	0,47	0,05
PC160	1283	68	160	608	0,45	0,47	0,05

3.3.4. Mortiers de ciment avec poudre tamisée non calcinée

Après les pâtes, des mélanges avec le sable des Îles-de-la-Madeleine ont été préparés pour voir l'influence du remplacement du ciment avec 5% de poudre dans le cas des mortiers. Le tableau 3.5 présente la formulation pour les deux mélanges :

- Un rapport E/C=0,6 et un ratio ciment/sable=0,4. Cette formulation a été choisie, car les travaux de doctorat d'Amine el Safhi(2020) ont indiqué qu'il s'agissait de la formulation optimale pour les mélanges fabriqués avec le sable de dragage des Îles-de-la-Madeleine(Safhi, 2020).
- MR : mélange avec 100 % de ciment
- M5 : remplacement de 5% du ciment par de la poudre des carapaces sans MO (1/3 de finesse <80µm +1/3 de finesse 80µm+1/3 de finesse 160µm)
- M5 (-80) : remplacement de 5% du ciment par de la poudre des carapaces sans MO de finesse <80µm.

Tableau 3.5 : Formulations de mortiers de ciment avec poudre tamisée non calcinée

Mélange	Ciment(g)	Poudre(g)	Sable(g)	Eau(g)	E/C+P	E/C	C/S	P/C
MR	450	0	1125	270	0,6	0,6	0,4	0
M5	428	23	1125	270	0,6	0,63	0,4	0,05
M5 (-80)	428	23	1125	270	0,6	0,63	0,4	0,05

3.3.5. Mortiers de ciment avec poudre tamisée calcinée

Le tableau 3.6 présente la formulation pour les cinq mélanges :

- Un rapport E/C=0,6 et un ratio ciment/sable=0,4
- MR : mélange avec 100 % de ciment
- MC5 : remplacement de 5% du ciment par de la poudre calcinée (1/3 de finesse <80µm +1/3 de finesse 80µm+1/3 de finesse 160µm)
- MC10 : remplacement de 10% du ciment par de la poudre calcinée (1/3 de finesse <80µm +1/3 de finesse 80µm+1/3 de finesse 160µm)
- MC15 : remplacement de 15% du ciment par de la poudre calcinée (1/3 de finesse <80µm +1/3 de finesse 80µm+1/3 de finesse 160µm)
- MC5 (-80) : remplacement de 5% du ciment par de la poudre calcinée de finesse <80µm

Tableau 3.6 : Formulations de mortiers de ciment avec poudre tamisée calcinée

Mélange	Ciment(g)	Poudre(g)	Sable(g)	Eau(g)	E/C+P	E/C	C/S	P/C
MR	450	0	1125	270	0,6	0,6	0,4	0
MC5	428	23	1125	270	0,6	0,63	0,4	0,05
MC10	405	45	1125	270	0,6	0,67	0,4	0,11
MC15	382,5	67,5	1125	270	0,6	0,71	0,4	0,18
MC5 (-80)	428	23	1125	270	0,6	0,63	0,4	0,05

3.4. Préparation des mélanges

Le malaxage a été effectué à l'aide d'un malaxeur petit Hobart à axe vertical de capacité de 5 L. La pale de malaxeur peut tourner à trois vitesses. Tout d'abord, on introduit l'eau dans la cuve du malaxeur; on y verse ensuite le ciment; après, on met le malaxeur en marche à vitesse lente (vitesse1). Après 30 s de malaxage, on introduit régulièrement le sable pendant les 30s suivantes. On met le malaxeur à sa vitesse rapide (vitesse2) et on continue le malaxage pendant 30s. On arrête le malaxeur pendant 1 min 30 s pour enlever pendant les 15 premières secondes au moyen d'une raclette tout le mortier sur les parois et au fond de la cuve en le repoussant vers le milieu de celle-ci. Ensuite, on reprend le malaxage pendant 60 s à grande vitesse (ASTM C305, 2015). On commence par préparer les moules en appliquant un léger film d'huile pour faciliter le démoulage. Après avoir rempli les moules, on fait un compactage mécanique à l'aide d'une table à choc. Enfin, on couvre les moules par un film en plastique pour éviter l'évaporation de l'eau et on les stocke dans l'environnement du laboratoire. Après 24h, on fait le démoulage et on conserve les échantillons dans l'eau et la chaux dans une salle de mûrissement à une température de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. (Figures 3.8 à 3.10).



Figure 3.8 : Huilage des moules



Figure 3.9 : Malaxeur Petit Hobart/Compactage mécanique par table à choc



Figure 3.10 : Salle de mûrissement

3.5. Résistance à la compression sur cubes de mortier

La résistance à la compression uniaxiale sur cubes de mortier a été déterminée selon la norme ASTM C109. Après avoir sorti les échantillons de la chambre humide, on doit essuyer chaque cube jusqu'à ce qu'il soit sec en surface et vérifier que les surfaces qui vont être en contact avec la presse soient propres et dépourvues de saletés et de dissymétries. On doit placer l'échantillon dans la

machine d'essai sous le centre du palier supérieur et s'assurer que les surfaces en contact avec la presse soient planes. Ensuite, on doit appliquer une charge entre 900 et 1800 N/s. On peut ajuster la charge à la moitié durant la première moitié de l'essai, mais on ne doit pas l'ajuster pendant la deuxième moitié surtout avant la rupture (ASTM, 2010) (figure 3.11).



Figure 3.11 : Essai de compression sur cubes de mortier

3.6. Caractérisation des sédiments

Dans le cadre de cette étude, les données obtenues par Pellerin (2017) et Safhi (2020) sur les sédiments des IDM ont été utilisées comme base de travail pour les essais de formulations intégrant des carapaces de crustacés.

3.6.1. Introduction

Le Laboratoire de Mécanique des roches de l'Université de Sherbrooke, en partenariat avec Dragage IM qui est une filiale de la coopérative CTMA, ont travaillé sur un projet de recherche qui a pour but la réutilisation des sédiments de dragage des ports pour petits bateaux et chenaux aux Îles-de-la-Madeleine (IDM) pour avoir de nouveaux produits ou procédés.

3.6.2. Description des échantillons

3.6.2.1. Localisation

Dragage IM a envoyé à l'Université de Sherbrooke, entre mai et octobre 2016, des échantillons de sédiments de dragage issus de trois ports différents des IDM. Les ports sont Pointe-Basse, Millerand, et Grosse-Île. La Figure 3.12 présente la localisation des échantillonnages (Pellerin, 2017).

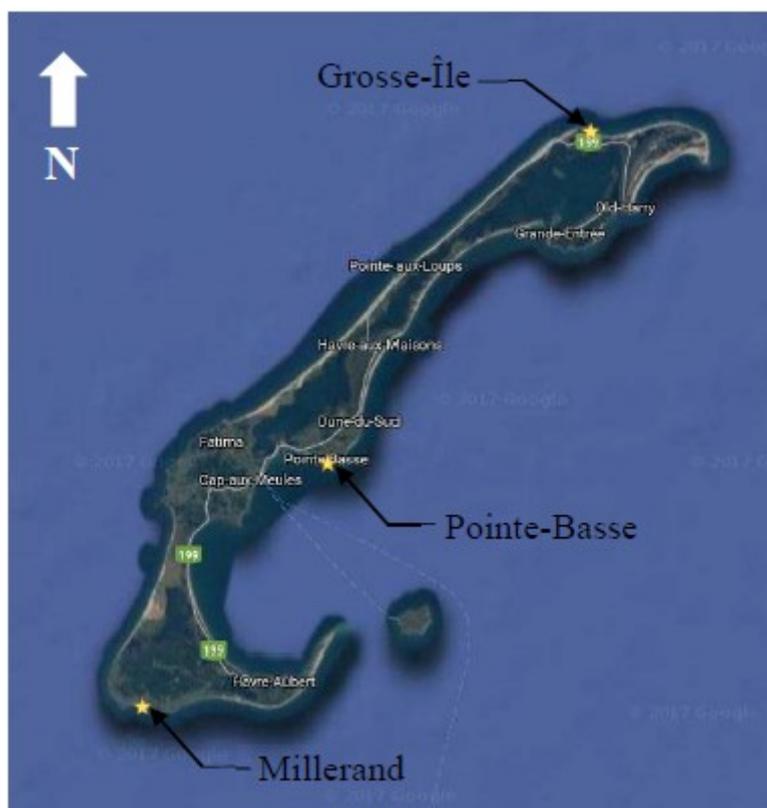


Figure 3.12 : Localisation des échantillonnages des IDM(Pellerin, 2017)

Dans le cadre de ce projet, il a été décidé de travailler uniquement avec les sédiments provenant de Pointe-Basse qui sont propres (non contaminés) et saturés. La figure 3.13 représente les sédiments propres de Pointe-Basse. Ces sédiments sont de couleur jaune avec des teintes rougeâtres parfois et semblent contenir une petite quantité de matière organique.



Figure 3.13 : Baril des sédiments propres de la Pointe-Basse des IDM(Pellerin, 2017)

3.6.3. Essais de caractérisation

3.6.3.1. Caractérisation physique

3.6.3.1.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été effectuée suivant la norme BNQ 2501-025 (tableau 3.7). D'après les coefficients de courbure et d'uniformité (figure 3.14), les sédiments sont caractérisés par une granulométrie très serrée et mal graduée. Pour le module de finesse, la norme ASTM C33 – 16 recommande une valeur entre 2,3 et 3,1 alors que d'après les analyses la valeur obtenue est 0,9.

Tableau 3.7 : Résultats de l'analyse granulométrique des sédiments (Pellerin, 2017)

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)	Fuseau (GF1) CSA A23.1-14 (%)	
112						
80						
56						
40						
31,5						
20						
14						
10	0	0	0,0	100	100	
5	0,56	0,56	0,2	100	95	100
2,5	0,25	0,81	0,2	100	80	100
1,25	0,72	1,53	0,5	100	50	90
0,63	0,83	2,36	0,7	99	25	65
0,315	6,54	8,9	2,7	97	10	35
0,16	258,21	267,11	81,8	18	2	10
0,08	58,93	326,04	99,8	0,2	0	3
Plat	0,49	326,53	---	---	---	---

Masse totale tamisée=326,6g

- Vérification de la perte au tamisage :

$$\text{Perte au tamisage (\%)} = \frac{\text{masse avant} - \text{masse après}}{\text{masse avant}} = 0,02 \% (\leq 0,3\%) \Rightarrow \text{Conforme}$$

- Mélange gros granulat/granulat fin :

Pourcentage fraction grossière : 0%

Pourcentage fraction fine : 100%

- Paramètres granulométriques :

D10 : 0,124

D30 : 0,183

D60 : 0,242

Coefficient d'uniformité : $C_u=1,3$

Coefficient de courbure : $C_c=1,1$

Module de finesse : $M_f=0,9$

$Cu \leq 2$: Granulométrie très serrée

$2 < Cu \leq 5$: Granulométrie serrée

$5 < Cu \leq 20$: Granulométrie semi-étalée

$20 < Cu \leq 200$: Granulométrie étalée

$200 < Cu$: Granulométrie très étalée

$1 \leq C_c \leq 3$: gravier/sable propre

Si $Cu > 4$ (gravier) granulométrie bien graduée

Si $Cu > 6$ (sable) granulométrie bien graduée

Autrement, mal graduée

⇒ Granulométrie très serrée et mal graduée et il s'agit de sable propre (Pellerin, 2017).

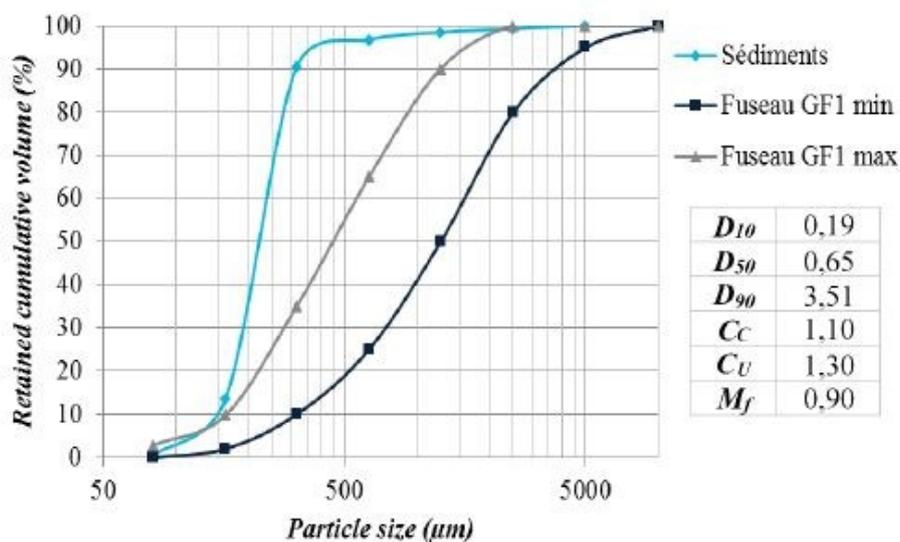


Figure 3.14 : Analyse granulométrique des sédiments (Safhi, 2020)

En comparant les résultats aux limites granulométriques imposées par la norme CSA A23.1/A23.2 Béton : Constituants et exécution des travaux / Méthodes d'essai et pratiques normalisées pour le béton, les valeurs au niveau des tamis 160 μm jusqu'à 1,25 mm sont plus élevées que les maximums recommandés. Pour le module de finesse, la norme ASTM C33 - 16 Standard Specification for Concrete Aggregates recommande une valeur entre 2,3 et 3,1 alors que d'après les analyses la valeur obtenue est 0,9. Vu que la granulométrie des sédiments analysés ne correspond pas aux critères d'un sable à béton standard, il faut donc faire un mélange entre les sédiments et un autre sable (Pellerin, 2017).

3.6.3.1.2. Perte au feu

Cet essai est fait selon la norme NF EN 12879 et à travers lequel on peut déterminer la quantité de matière organique qui se trouve dans les sédiments. Le principe de cet essai consiste à mesurer la variation de masse résultant du chauffage d'un échantillon dans des conditions spécifiées à 550°C. La perte au feu s'exprime en pourcentage en masse de la matière sèche. Le résultat de cet essai a donné un pourcentage de 0,32% pour ce sédiment qui est inférieur à 3% la limite dictée par la norme ASTM C33-16 (tableau 3.8).

Tableau 3.8 : Résultats de la perte au feu des sédiments (Pellerin, 2017)

Plat vide (g)	Sol humide avant PAF et sans plat	Sol sec avant PAF avec plat (g)	Sol sec avant PAF sans plat (g)	Perte d'eau (g)	Sol après PAF avec plat (g)	Sol après PAF sans plat (g)	Perte de MO (g)	% PAF
1,335	10,11	9,25	7,91	2,19	9,22	7,89	0,025	0,32

3.6.3.2. Caractérisation chimique

3.6.3.2.1. Fluorescence X

Les résultats de l'analyse effectuée par fluorescence X sont donnés dans le tableau 3.9. Les sédiments sont fortement siliceux (79,9% de silice).

Tableau 3.9 : Composition chimique des sédiments obtenue par fluorescence X (% massique) (Pellerin, 2017)

CO ₂	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Cl	SO ₃	TiO ₂
5	79,9	8,7	2,2	0,8	0,8	0,6	0,7	0,02	0,2	0,06

3.6.3.2.2. Diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X est faite conformément au protocole de l'UdeS pour déterminer les phases cristallines du sédiment. Le résultat est donné dans la figure 3.15. Les principales phases minérales trouvées par la diffraction des rayons X sont le quartz, microcline, dolomite, halite, albite et calcite.

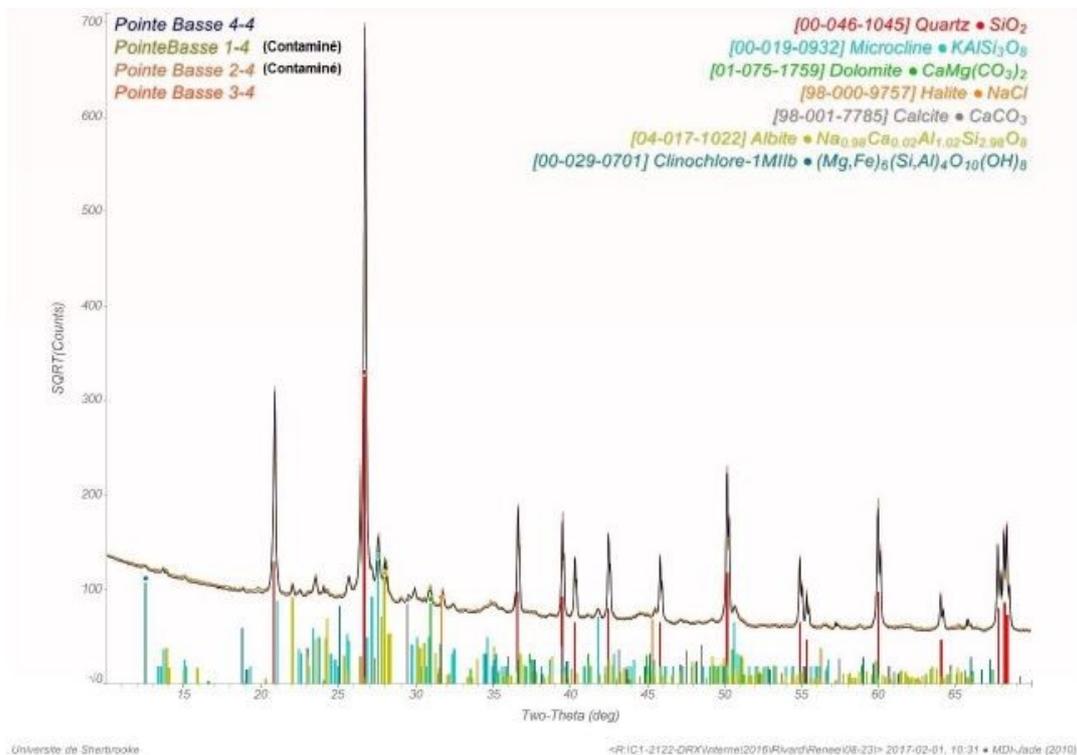


Figure 3.15 : Diffraction des rayons X des sédiments (Pellerin, 2017)

3.7. Conclusion

L'incorporation des sédiments de dragage et des carapaces de crustacés dans le béton nécessite d'abord une caractérisation des matériaux pour prévoir leur comportement. Plusieurs mélanges ont été préparés pour étudier l'effet des carapaces de crustacés mélangées ou non avec les sédiments. La poudre a été utilisée sous plusieurs formes : brute, tamisée et calcinée. Les taux de remplacement utilisés sont 5%, 10% et 15% en premier lieu pour les pâtes. Ensuite, il a été choisi de continuer avec le taux 5%, car il a donné de meilleures résistances. Il y avait eu une variation de la finesse et puis la poudre a subi un traitement thermique par chauffage pour éliminer la matière organique. Pour les mortiers, il a été décidé de commencer avec un taux de 5%, qui a ensuite été jusqu'à 15% avec la poudre calcinée.

Les sédiments d'étude provenant de la pointe basse des IDM sont non contaminés. L'analyse granulométrique a montré que les sédiments possèdent une granulométrie fine très serrée et mal graduée ce qui n'est pas conforme avec la norme CSA A23.1-14 donc il n'est pas possible d'utiliser les sédiments tels quels dans le but de remplacer la totalité du sable pour des applications industrielles ou structurales. Toutefois, ce sable sera utilisé pour réaliser les expériences visant à déterminer le potentiel des carapaces de crustacés comme filler calcaire et comme pouzzolanes. La quantité de matière organique présente dans les sédiments ne dépasse pas la limite imposée par la norme ASTM C33-16. La diffraction des rayons X a montré que la composition minéralogique des sédiments est la suivante : microcline, quartz, dolomite, calcite, albite et halite ce qui était conforme avec la fluorescence X. Les sédiments sont siliceux donc peuvent remplacer un sable de béton standard à 100% dans le cadre de ce projet.

Chapitre 4 : Présentation des résultats et interprétations

4.1. Caractérisation des deux poudres

Une analyse granulométrique et une analyse chimique ont été réalisées sur les deux poudres après le broyage des carapaces de crustacés 1 à l'aide du broyeur à boulets (les carapaces 2 étaient suffisamment broyées).

4.1.1. Analyse Granulométrique par tamisage

L'analyse granulométrique par tamisage a été réalisée conformément à la norme NF P 18-560 sur la poudre 1, car les mélanges ont été faits avec cette poudre. Les résultats de l'analyse granulométrique de la poudre 1 sont présentés dans le tableau 4.1. La courbe granulométrique est présentée sur la Figure 4.1. La granulométrie est étalée avec un $D_{50}=180 \mu\text{m}$ et un coefficient d'uniformité $C_u=4,6$.

Tableau 4.1 : Analyse granulométrique de la poudre 1 des carapaces de crustacés

Diamètre tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulés (%)	Passants (%)
5	7,5	7,5	0,1	99,9
2,5	18	26	0,3	99,7
1,25	49	75	0,9	99,1
0,63	393	468	5,6	94,4
0,315	1800	2268	27,2	72,8
0,16	2215	4483	54	46,1
0,08	1841	6324	76	24

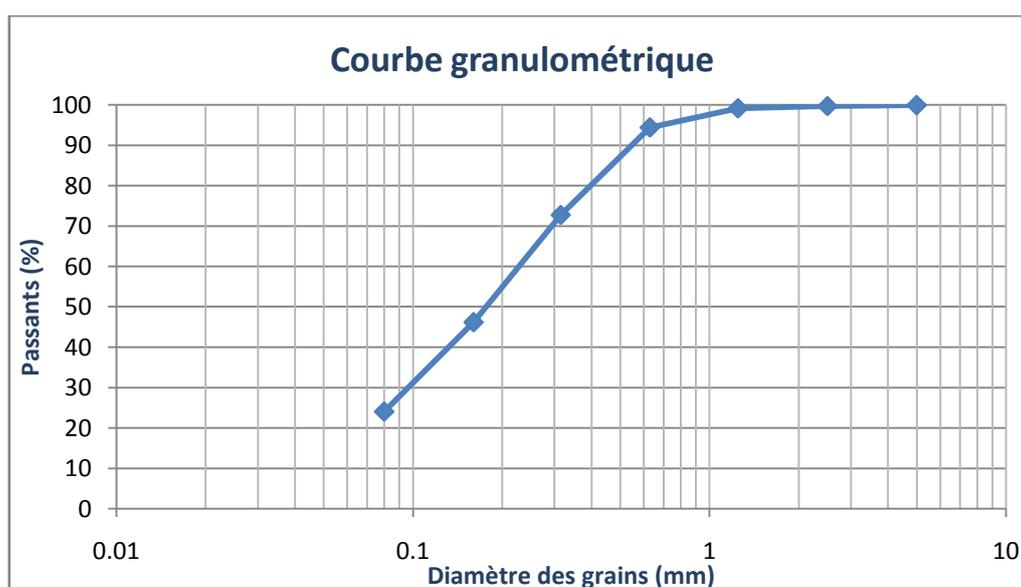


Figure 4.1 : Courbe granulométrique de la poudre 1 des carapaces de crustacés

4.1.2. Analyse chimique

4.1.2.1. Diffraction des rayons X

- Poudres 1 et 2 non calcinées

Les résultats de la diffraction des rayons X des deux poudres non calcinées sont illustrés dans la figure 4.2. L'échantillon 1 représente la poudre 1 et l'échantillon 2 représente la poudre 2. Les deux poudres possèdent les mêmes phases cristallines avec une variation de l'intensité. Elles sont majoritairement formées par des carbonates de calcium.

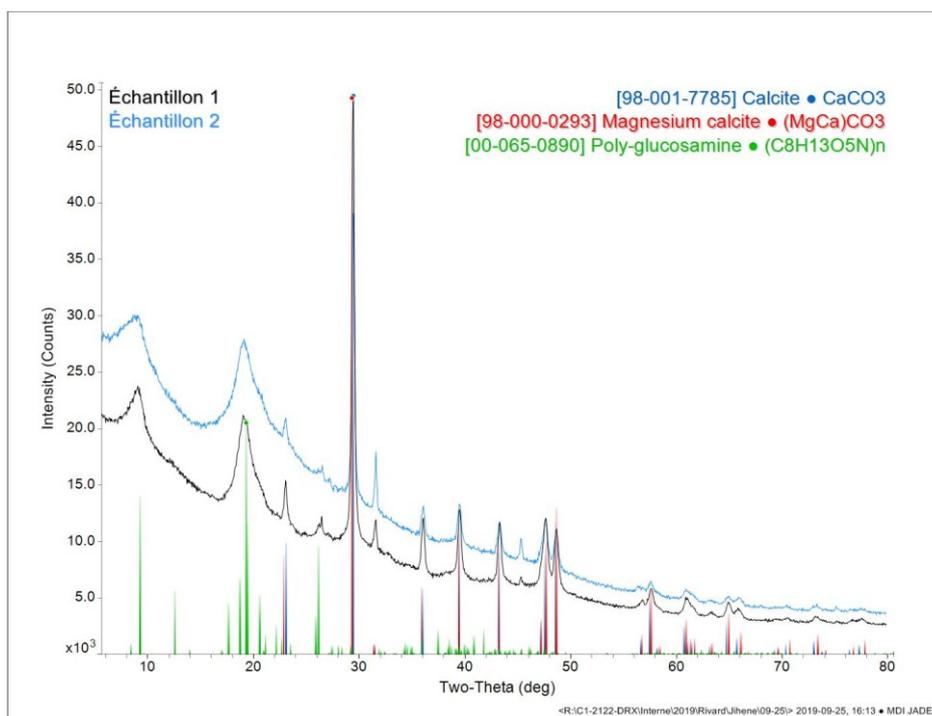


Figure 4.2 : DRX des deux poudres de crustacés non calcinées

- Poudre 1 calcinée

La figure 4.3 présente le résultat de la diffraction des rayons X de la poudre 1 calcinée. La poudre est en majorité composée par des carbonates de calcium CaCO_3 , donc elle n'était pas totalement décarbonatée. Il y a eu une formation de la portlandite ou chaux éteinte ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), un produit d'hydratation du clinker, et de la chaux vive CaO , le produit de la calcination du carbonate de calcium.

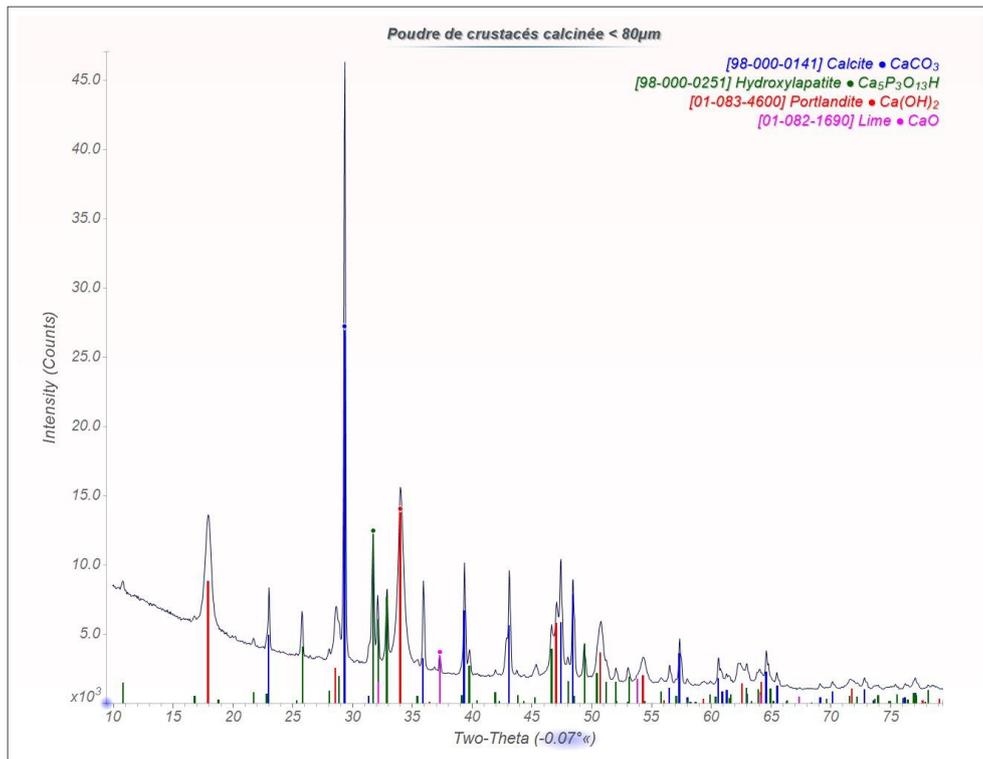


Figure 4.3 : DRX de la poudre 1 de crustacés calcinés

4.1.2.2. Fluorescence X

- Poudres 1 et 2 non calcinées

Les résultats de la fluorescence X des poudres non calcinées sont résumés dans les tableaux 4.2 et 4.3 et confirment l'analyse DRX. Les trois éléments chimiques principaux contenus dans les deux poudres sont le calcium (Ca), le phosphore (P) et le magnésium (Mg). Elles sont essentiellement formées par la chaux vive (CaO), suivie du pentoxyde de phosphore (P₂O₅) et par la périclase (MgO). Les résultats de la perte au feu montrent une forte présence de matière organique dans les deux poudres avec une valeur de 64,6% pour la poudre 1 et de 82,4 % pour la poudre 2. En se basant sur ces résultats, le travail avec la poudre 1 a été favorisé, car elle contenait moins de matière organique que la poudre 2.

Cette richesse en chaux de la poudre favorise son utilisation en tant qu'application cimentaire. Comme les fillers et les laitiers sont des additions pour le ciment qui sont formées essentiellement de chaux, silicates et aluminates, on peut se baser sur l'indice de basicité des laitiers qui est le rapport de la fraction basique à la fraction acide montré par la formule suivante :

$$I_{\text{laitier}} = [\text{CaO} + \text{MgO}] / [\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3]$$

Cet indice permet de déterminer le potentiel d'utilisation du laitier sous forme cimentaire. Si cet indice est inférieur à 0,9, la capacité hydraulique du laitier est faible et il sera donc beaucoup plus efficace d'utiliser ce sous-produit industriel comme granulat de béton. Sinon, lorsque cet indice est élevé, son utilisation sera plus intéressante sous forme d'ajout cimentaire (Bousslama et Jelidi, 2003). Par symétrie, l'indice de basicité de la poudre est calculé comme suit :

$$I_{\text{poudre}} = [\text{CaO} + \text{MgO}] / [\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3]$$

$$I_{\text{poudre1}} = [27.4 + 1.9] / [0.1 + 0.2] = 98$$

$$I_{\text{poudre2}} = [12.3 + 1] / [0.1 + 0.4] = 27$$

Pour les deux types de poudre, l'indice de basicité est supérieur à 0,9 donc leur utilisation en tant qu'ajout cimentaire est possible.

Tableau 4.2 : FRX de la poudre 1 non calcinée

Éléments	Valeur	Unité	Oxyde	% massique	Élément	% massique
Al ₂ O ₃	0,43	%	Al ₂ O ₃	0,2	Al	0,1
BaO	0,02	%	BaO	0,0	Ba	0,0
CaO	77,6	%	CaO	27,4	Ca	19,6
Co ₃ O ₄	0,00	%	Co ₃ O ₄	0,0	Co	0,0
Cr ₂ O ₃	0,00	%	Cr ₂ O ₃	0,0	Cr	0,0
CuO	0,00	%	CuO	0,0	Cu	0,0
Fe ₂ O ₃	0,07	%	Fe ₂ O ₃	0,0	Fe	0,0
HfO ₂	0,00	%	HfO ₂	0,0	Hf	0,0
K ₂ O	0,03	%	K ₂ O	0,0	K	0,0
MgO	5,42	%	MgO	1,9	Mg	1,2
Mn ₂ O ₃	0,05	%	Mn ₂ O ₃	0,0	Mn	0,0
Na ₂ O	0,39	%	Na ₂ O	0,1	Na	0,1
NiO	0,00	%	NiO	0,0	Ni	0,0
P ₂ O ₅	12,14	%	P ₂ O ₅	4,3	P	1,9
PbO	0	%	PbO	0,0	Pb	0,0
SO ₃	1,02	%	SO ₃	0,4	S	0,1
SiO ₂	0,40	%	SiO ₂	0,1	Si	0,1
SrO	0,76	%	SrO	0,3	Sr	0,2
TiO ₂	0,00	%	TiO ₂	0,0	Ti	0,0
V ₂ O ₅	0,00	%	V ₂ O ₅	0,0	V	0,0
WO ₃	0,01	%	WO ₃	0,0	W	0,0
ZnO	0,00	%	ZnO	0,0	Zn	0,0
ZrO ₂	0,00	%	ZrO ₂	0,0	Zr	0,0
PAF=64,6%						

Tableau 4.3 : FRX de la poudre 2 non calcinée

Oxyde	Valeur	Unité	Oxyde	%massique	Elément	%massique
Al ₂ O ₃	0,39	%	Al ₂ O ₃	0,1	Al	0,0
BaO	0,01	%	BaO	0,0	Ba	0,0
CaO	69,7	%	CaO	12,3	Ca	8,8
Co ₃ O ₄	0,00	%	Co ₃ O ₄	0,0	Co	0,0
Cr ₂ O ₃	0,00	%	Cr ₂ O ₃	0,0	Cr	0,0
CuO	0,02	%	CuO	0,0	Cu	0,0
Fe ₂ O ₃	0,33	%	Fe ₂ O ₃	0,1	Fe	0,0
HfO ₂	0,00	%	HfO ₂	0,0	Hf	0,0
K ₂ O	0,08	%	K ₂ O	0,0	K	0,0
MgO	5,51	%	MgO	1,0	Mg	0,6
Mn ₂ O ₃	0,07	%	Mn ₂ O ₃	0,0	Mn	0,0
Na ₂ O	1,52	%	Na ₂ O	0,3	Na	0,2
NiO	0,00	%	NiO	0,0	Ni	0,0
P ₂ O ₅	16,48	%	P ₂ O ₅	2,9	P	1,3
PbO	0,00	%	PbO	0,0	Pb	0,0
SO ₃	1,64	%	SO ₃	0,3	S	0,1
SiO ₂	2,25	%	SiO ₂	0,4	Si	0,2
SrO	0,70	%	SrO	0,1	Sr	0,1
TiO ₂	0,02	%	TiO ₂	0,0	Ti	0,0
V ₂ O ₅	0,00	%	V ₂ O ₅	0,0	V	0,0
WO ₃	0,01	%	WO ₃	0,0	W	0,0
ZnO	0,02	%	ZnO	0,0	Zn	0,0
ZrO ₂	0,00	%	ZrO ₂	0,0	Zr	0,0
PAF=82,4%						

- **Poudre 1 calcinée**

Les résultats de la fluorescence X de la poudre 1 calcinée sont résumés dans le tableau 4.4 et confirment l'analyse DRX. Les trois éléments chimiques principaux contenus dans la poudre sont le calcium (Ca), le phosphore (P) et le magnésium (Mg). Elles sont essentiellement formées par la chaux vive (CaO), suivie du pentoxyde de phosphore (P₂O₅) et par la périclase (MgO). Les résultats de la perte au feu montrent la présence de matière organique avec une valeur de 28,3% donc la matière organique ne s'est pas complètement décomposée.

Tableau 4.4 : FRX de la poudre 1 calcinée

Éléments	Valeur	Unité	Oxyde	% massique	Elément	% massique
Al ₂ O ₃	0,05	%	Al ₂ O ₃	0,0	Al	0,0
BaO	0,01	%	BaO	0,0	Ba	0,0
CaO	80,48	%	CaO	57,7	Ca	41,2
Co ₃ O ₄	0,00	%	Co ₃ O ₄	0,0	Co	0,0
Cr ₂ O ₃	0,00	%	Cr ₂ O ₃	0,0	Cr	0,0
CuO	0,04	%	CuO	0,0	Cu	0,0
Fe ₂ O ₃	0,04	%	Fe ₂ O ₃	0,0	Fe	0,0
HfO ₂	-0,01	%	HfO ₂	0,0	Hf	0,0
K ₂ O	0,05	%	K ₂ O	0,0	K	0,0
MgO	5,52	%	MgO	4,0	Mg	2,4
Mn ₂ O ₃	0,05	%	Mn ₂ O ₃	0,0	Mn	0,0
Na ₂ O	0,71	%	Na ₂ O	0,5	Na	0,4
NiO	0,00	%	NiO	0,0	Ni	0,0
P ₂ O ₅	9,84	%	P ₂ O ₅	7,1	P	3,1
PbO	-0,01	%	PbO	0,0	Pb	0,0
SO ₃	0,87	%	SO ₃	0,6	S	0,2
SiO ₂	0,18	%	SiO ₂	0,1	Si	0,1
SrO	0,77	%	SrO	0,6	Sr	0,5
TiO ₂	0,00	%	TiO ₂	0,0	Ti	0,0
V ₂ O ₅	0,00	%	V ₂ O ₅	0,0	V	0,0
WO ₃	0,01	%	WO ₃	0,0	W	0,0
ZnO	0,01	%	ZnO	0,0	Zn	0,0
ZrO ₂	0,00	%	ZrO ₂	0,0	Zr	0,0
PAF=28,3%						

4.2. Résistances à la compression uniaxiale des mélanges

4.2.1. Pâtes de ciment avec poudre non tamisée non calcinée : effet de la matière organique

Les pâtes ont été réalisées en variant le taux de remplacement du ciment par des poudres non tamisées non calcinées (1 et 2) suivant 3 pourcentages : 5%, 10% et 15% et un mélange témoin. Les deux poudres ont été utilisées au début avant de faire une caractérisation et de connaître leur teneur en matière organique. Les valeurs données sont la moyenne sur trois échantillons.

- **Poudre 1 des carapaces de crustacés**

Les résistances à la compression sur les cubes de pâtes ont été testées à 9j et à 34j. Le tableau 4.5 et la figure 4.4 présentent les résistances à la compression des pâtes de ciment en remplacement partiel avec de la poudre 1 ainsi que le pourcentage de diminution. Les résistances ont tendance à diminuer en augmentant le taux de remplacement. Il n'y a pas une grande différence entre les taux 5 et 10%. La meilleure résistance a été obtenue avec 5% de poudre non tamisée et est égale à 30,2 MPa à 28j présentant une diminution de 51% par rapport à la pâte de référence.

Tableau 4.5 : Effet du taux de remplacement de la poudre 1 des carapaces de crustacés

Pâtes	PR	P5	P10	P15
Résistance à la compression 9j (MPa)	50,0	25,4	20,2	12,8
Diminution(%)	-	(-) 49%	(-) 60%	(-) 74%
Résistance à la compression 34j(MPa)	61,3	30,2	27,2	15,6
Diminution(%)	-	(-) 51%	(-) 56%	(-) 75%

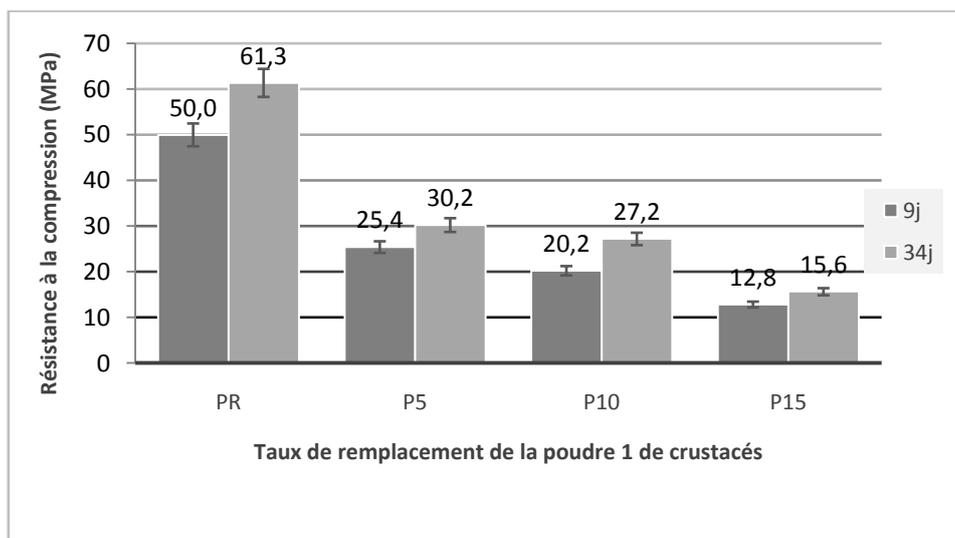


Figure 4.4 : Influence du taux de remplacement de la poudre 1 des carapaces de crustacés

- **Poudre 2 des carapaces de crustacés**

Les résistances à la compression des pâtes de ciment avec la poudre 2 en remplacement partiel sont présentées dans le tableau 4.6 et la figure 4.5. La dégradation de la résistance est notée pour 5%, 10% et 15 % de substitution, mais elle est plus importante pour 10% et 15% atteignant 89% à 28j. Il y a une similarité avec la poudre 1 au niveau de la diminution des résistances. La diminution est plus importante en passant de 5 à 10 et 15% de remplacement.

Tableau 4.6 : Effet du taux de remplacement de la poudre 2 des carapaces de crustacés

Pâtes	PR	P5	P10	P15
Résistance à la compression 9j (MPa)	50,0	27,5	8,2	-*
Diminution(%)	-	(-) 45%	(-) 84%	-
Résistance à la compression 34j(MPa)	61,3	33,2	11,0	6,6
Diminution(%)	-	(-) 46%	(-) 82%	(-) 89%

* : Echantillon écrasé dès le début de l'essai

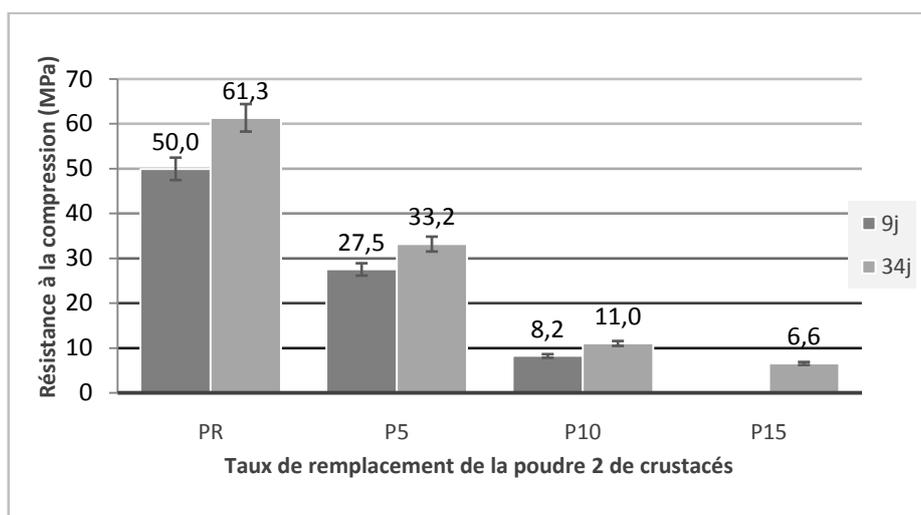


Figure 4.5 : Influence du taux de remplacement de la poudre 2 des carapaces de crustacés

Dans les deux cas, l'augmentation du taux de remplacement engendre une baisse des résistances. La présence de matière organique a également un effet notable sur les résistances. La différence entre les mélanges 1 et 2 est très marquée pour des taux de remplacement supérieurs à 5 %, alors que cette différence est faible à 5%. Remarquons également que les tendances de diminution de résistance sont similaires à 9j et à 34j ; l'évolution de l'hydratation ne semble donc pas améliorer les résistances. Comme mentionné précédemment, seule la poudre 1 sera utilisée dans tout ce qui suit.

4.2.2. Pâtes de ciment avec poudre tamisée non calcinée: effet de la finesse

En raison des résultats qui précèdent et des résultats de la fluorescence X, il a été choisi de continuer le travail avec la poudre 1. Les mélanges ont été réalisés en variant la finesse de la poudre avec un taux de remplacement de 5% (figure 4.6). Plus la finesse augmente, plus la résistance diminue. La plus importante diminution est obtenue avec la finesse < 80 μ m et est égale à 65% à 7j et 51% à 28j (Tableau 4.7). La meilleure résistance à 28j a été obtenue avec la finesse 160 μ m et est égale à 30,8 MPa. En comparant ces résultats avec ceux obtenus avec la poudre non tamisée, la résistance la plus proche à la résistance de la poudre non tamisée à 34j (30,2 MPa) est celle de la poudre de finesse 160 μ m à 28j (30,8 MPa).

Tableau 4.7 : Effet de la finesse de la poudre de crustacés non calcinée pour un taux de remplacement de 5%

Pâtes	PR	P-80	P80	P160
Résistance à la compression 7j(MPa)	45,5	16,0	19,2	20,8
Diminution(%)	-	(-) 65%	(-) 58%	(-) 54%
Résistance à la compression 28j(MPa)	52,5	26,0	27,4	30,8
Diminution(%)	-	(-) 51%	(-) 48%	(-) 41%

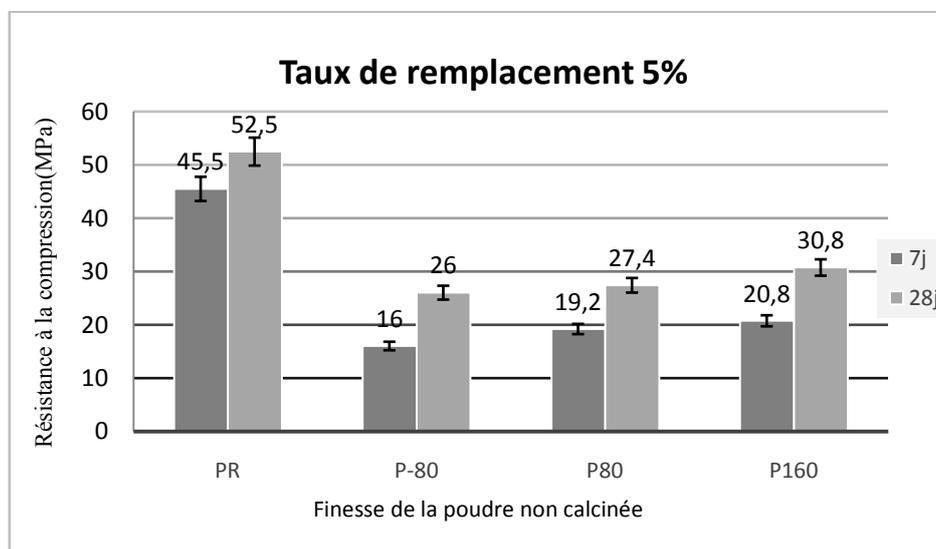


Figure 4.6 : Influence de la finesse de la poudre de crustacés non calcinée pour un taux de remplacement de 5%

4.2.3. Pâtes de ciment avec poudre tamisée calcinée : effet de la finesse

Après calcination de la poudre, des pâtes de ciment ont été réalisées en faisant varier sa finesse avec un taux de remplacement de 5% (tableau 4.8 et figure 4.7). La calcination a eu un effet positif sur les résistances à 28j avec une augmentation de 82% pour les pâtes de finesse de poudre <80 μ m,

120% pour les pâtes de finesse de poudre de 80 μm et 56% pour les pâtes de finesse de poudre de 160 μm par rapport aux pâtes avec poudre non calcinée (figure 4.8). La résistance de la pâte avec une finesse de 80 μm a dépassé la résistance de la pâte sans poudre à 28j avec une augmentation de 14% pour atteindre 60 MPa.

Tableau 4.8 : Effet de la finesse de la poudre de crustacés calcinée pour un taux de remplacement de 5%

Pâtes	PR	PC-80	PC80	PC160
Résistance à la compression 7j(MPa)	45,5	36,6	38,8	44,3
Diminution(%)	-	(-) 20%	(-) 15%	(-) 3%
Résistance à la compression 28j(MPa)	52,5	47,4	60,1	48,0
Diminution/Augmentation(%)	-	(-) 10%	(+) 14%	(-) 9%

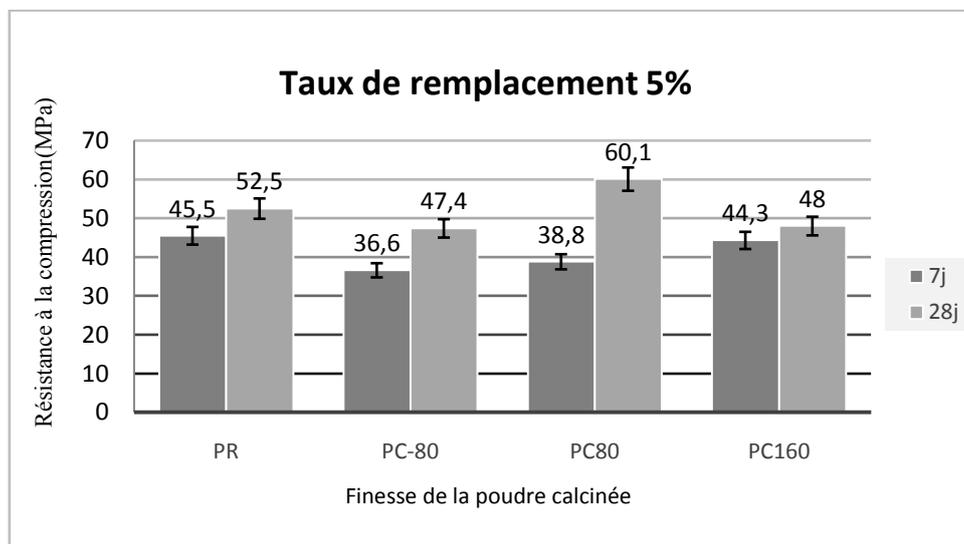


Figure 4.7 : Influence de la finesse de la poudre de crustacés calcinée pour un taux de remplacement de 5%

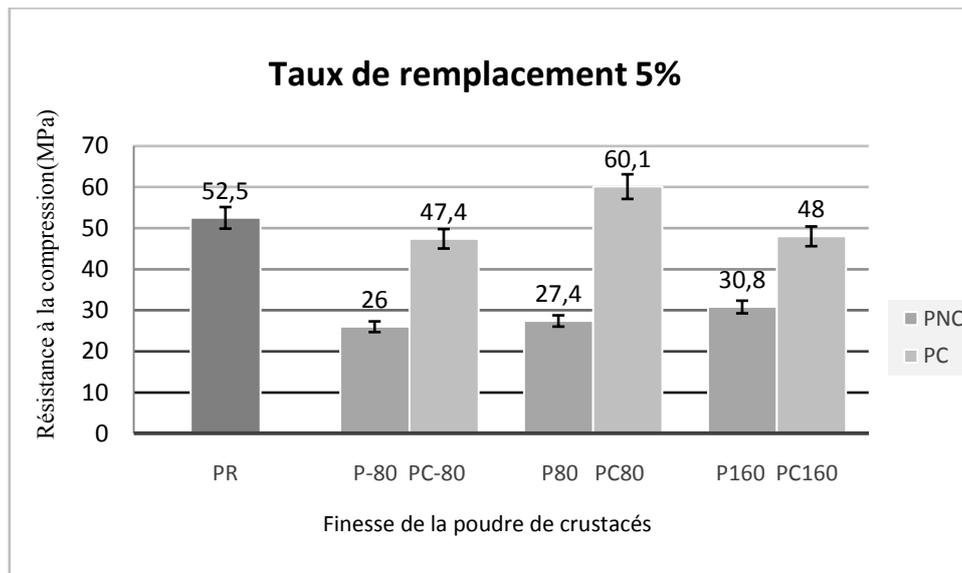


Figure 4.8 : Comparaison entre les résistances des poudres non calcinées (PNC) et calcinées (PC) à 28j pour un taux de remplacement de 5%

4.2.4. Mortiers avec poudre tamisée non calcinée

Les mortiers ont été réalisés avec la poudre 1 en mélangeant trois finesses différentes <math><80\ \mu\text{m}</math>, $80\ \mu\text{m}$ et $160\ \mu\text{m}$ avec un taux de remplacement de 5 %. Les résistances à la compression sont présentées dans le tableau 4.9. Pour la résistance à la compression à 7j, il y a eu une baisse de 82%. Pour la résistance à 28j il y a eu une baisse de 71%. La poudre des carapaces de crustacés non traitée a causé une chute considérable de la résistance à la compression du mortier (figure 4.9). Comparée avec les pâtes de ciment, la diminution de la résistance des mortiers est beaucoup plus importante. La plus grande baisse pour les pâtes est de 51% avec une finesse <math><80\ \mu\text{m}</math>, alors que pour les mortiers la diminution a atteint 71% pour le même taux de remplacement qui est 5%.

Tableau 4.9 : Effet de la poudre de crustacés non calcinées ur les mortiers

Mortier	MR	M5
Résistance à la compression 7j (MPa)	28,3	5,0
Diminution	-	(-) 82%
Résistance à la compression 28j (MPa)	28,5	8,2
Diminution	-	(-) 71%

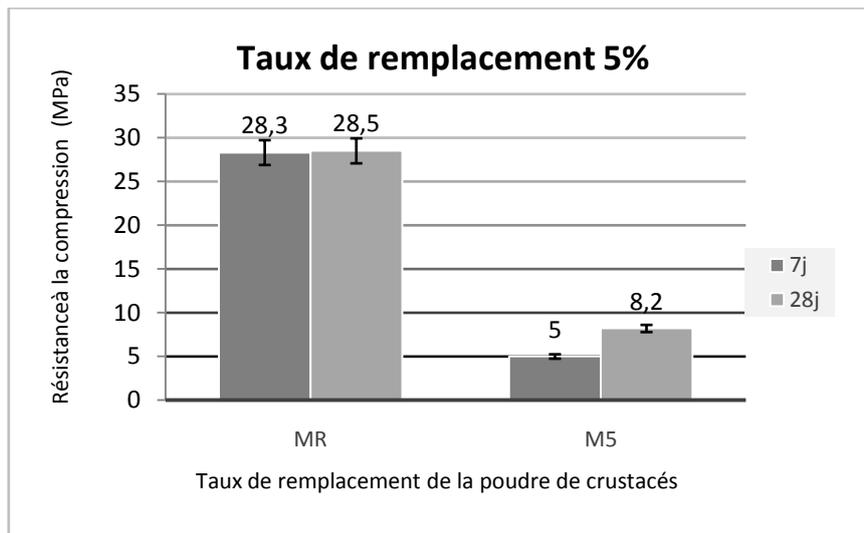


Figure 4.9 : Effet de la poudre de crustacés sur les mortiers

Un deuxième mortier a été préparé avec seulement la poudre non calcinée de finesse $<80 \mu\text{m}$ avec un taux de remplacement de 5%. Les résistances à la compression à 7j et 28j sont présentées dans le tableau 4.10 et la figure 4.10. Le mortier fabriqué avec la poudre non calcinée de finesse $<80 \mu\text{m}$ présente des résistances nettement plus faibles comparativement au témoin, avec des diminutions de 80% à 7j et 65 % à 28j. Néanmoins, la résistance à 28j est légèrement plus élevée que celle qui a été mesurée avec le mélange de 3 finesses qui avait obtenu une résistance de 8,2 MPa (figure 4.11).

Tableau 4.10 : Effet de la finesse $<80 \mu\text{m}$ de la poudre de crustacés non calcinée sur les mortiers

Mortier	MR	M5 (-80)
Résistance à la compression 7j (MPa)	28,3	5,6
Diminution	-	(-) 80%
Résistance à la compression 28j (MPa)	28,5	10,0
Diminution	-	(-) 65%

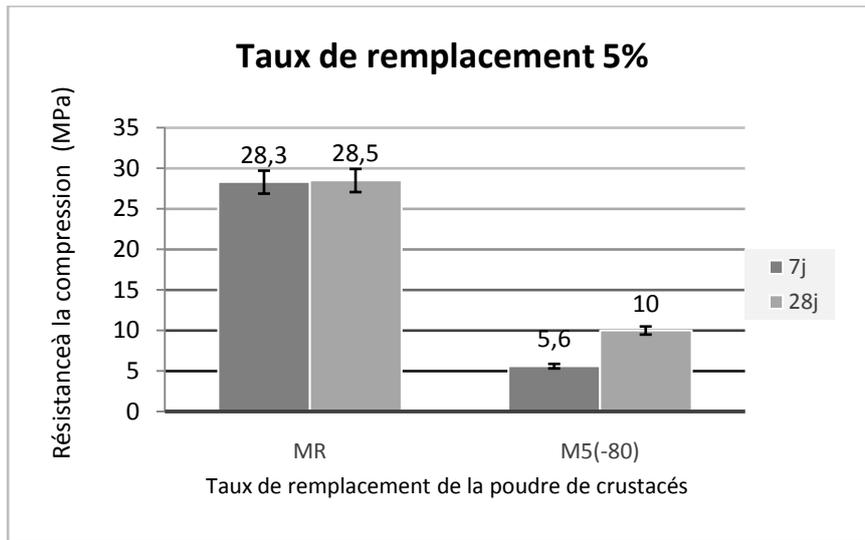


Figure 4.10 : Effet de la poudre de crustacés non calcinée <math><80 \mu\text{m}</math> sur les mortiers

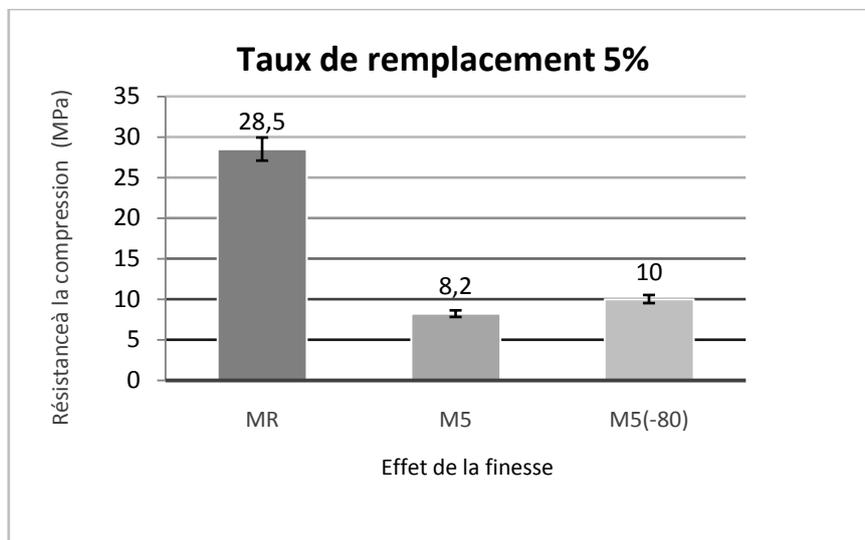


Figure 4.11 : Effet de la finesse sur la résistance des mortiers à 28j pour 5% de poudre non calcinée

4.2.5. Mortiers de ciment avec poudre tamisée calcinée

Le tableau 4.11 présente les résistances à la compression à 7j et à 28j des mortiers formulés avec la poudre calcinée. Des taux de remplacement de 5, 10 et 15% ont été adoptés avec un mélange témoin contenant 100% de ciment. Une diminution de 5 % pour le MC5 et le MC15 et une augmentation de 1% pour le MC10 à 28j ont été remarquées. Il n'y a pas de différence significative entre les taux 5, 10 et 15%, les résistances sont très proches (figure 4.12). La meilleure résistance a été obtenue avec 10% de remplacement, est égale à 28,8 MPa et est de l'ordre de celle du mortier témoin (28,5 MPa).

Tableau 4.11 : Effet de la poudre de crustacés calcinée sur les mortiers

Mortier	MR	MC5	MC10	MC15
Résistance à la compression 7j(MPa)	28,3	16,0	22,6	20,6
Diminution (%)	-	(-) 43%	(-) 20%	(-) 27%
Résistance à la compression 28j(MPa)	28,5	26,9	28,8	27,1
Diminution (%) / Augmentation (%)	-	(-) 5%	(+) 1%	(-) 5%

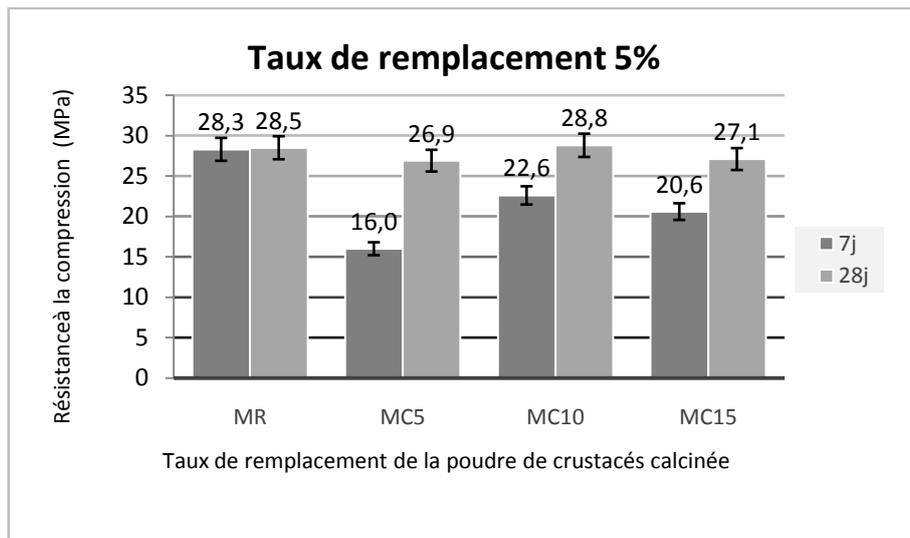


Figure 4.12 : Effet de la poudre de crustacés calcinée mélange de 3 finesses sur les mortiers

Le tableau 4.12 présente les résistances à la compression mesurées à 7j et à 28j sur les mortiers formulés avec la poudre calcinée de finesse $<80 \mu\text{m}$ avec un taux de remplacement de 5%. Il a été remarqué que la résistance à 28j de ce mortier a dépassé la résistance du mortier de référence avec une augmentation de 17% pour une valeur de 33,3 MPa contre 28,5 MPa (figure 4.13). La résistance du mortier MC5 (-80) à 7j est plus faible que celle du mortier témoin alors qu'à 28j elle est plus élevée. La poudre a eu un effet sur la cinétique d'hydratation en retardant cette réaction.

Tableau 4.12 : Effet de la finesse $<80 \mu\text{m}$ de la poudre de crustacés calcinée sur les mortiers

Mortier	MR	MC5(-80)
Résistance à la compression 7j (MPa)	28,3	23,8
Diminution (%)	-	(-) 16%
Résistance à la compression 28j (MPa)	28,5	33,3
Augmentation (%)	-	(+) 17%

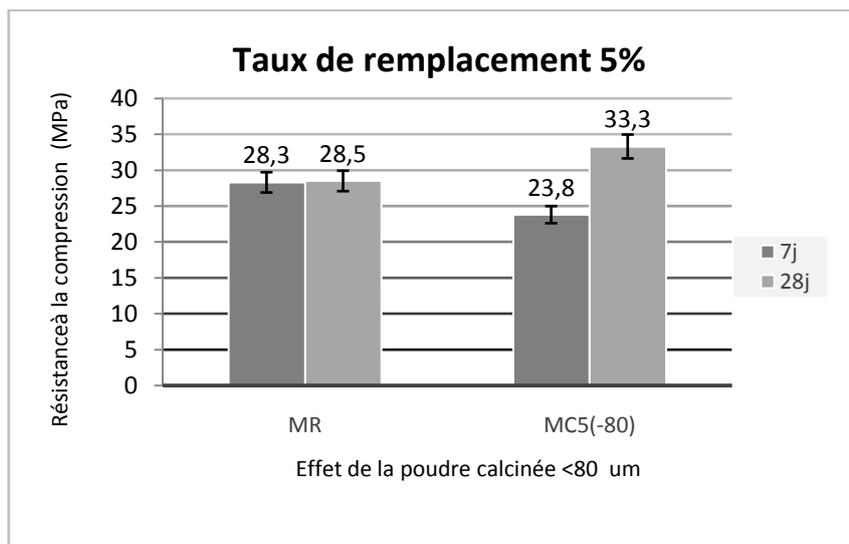


Figure 4.13 : Effet de la poudre de crustacés calcinée <80 µm sur les mortiers

La figure 4.14 récapitule les différentes résistances des mortiers à 28j obtenus avec 5% de poudre de crustacés formulés avec les 3 finesses <80 µm, 80 µm et 160 µm mélangées et la finesse <80 µm seule, calcinée et non calcinée en les comparant au mortier de référence.

Une amélioration significative de la résistance a été notée grâce à la calcination de la poudre (mélange de 3 finesses) en comparant M5 et MC5. La résistance a presque triplé de 8,2 MPa à 26,9 MPa. L'effet de calcination est aussi remarquable en comparant le M5(-80) et MC5(-80). La résistance a encore triplé de 10 MPa à 33,3 MPa avec seulement la finesse <80 µm. L'effet de la poudre <80 µm a aussi été remarqué, la résistance a augmenté de 22% pour la poudre non calcinée et de 24% pour la poudre calcinée par rapport à la résistance avec 3 finesses.

En comparant ces résistances avec la résistance du mortier témoin, il a été trouvé que le mortier fabriqué avec la poudre calcinée de finesse <80 µm a obtenu une résistance dépassant de 17% celle du mortier de référence. Le mortier avec le mélange des 3 finesses calcinées présentait aussi une résistance proche de celle du témoin avec une baisse de 5%. Il faut aussi mentionner la résistance obtenue avec 10% de remplacement (3 finesses) qui est égale à 28,8 MPa avec une augmentation de 1% par rapport au mortier sans poudre.

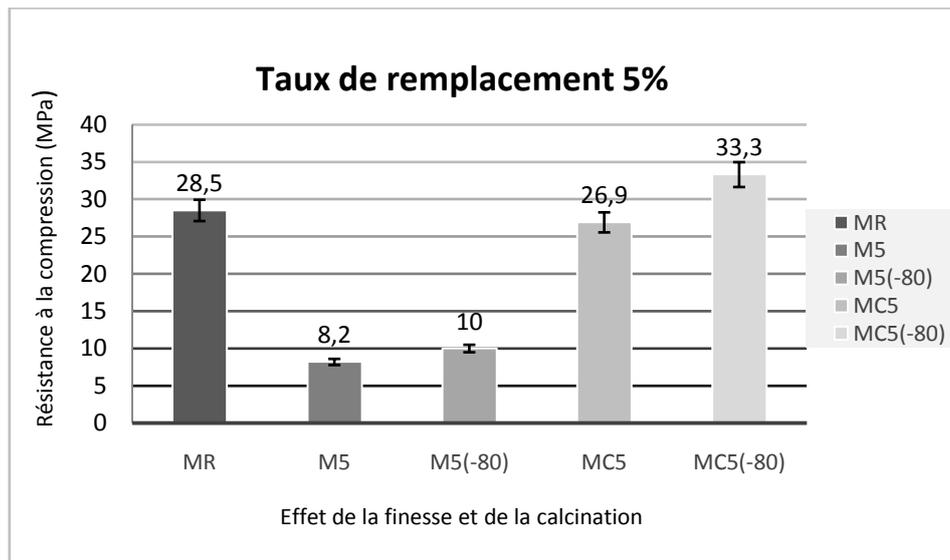


Figure 4.14 : Effet de la finesse et de la calcination sur les résistances à la compression à 28j des mortiers pour un taux de remplacement de 5%.

4.3. Discussion

▪ Effet de la matière organique :

En se basant sur le principe de minimisation des coûts, les premiers mélanges consistaient à tester l'effet de la poudre non traitée et non tamisée. Il n'y avait pas une différence entre les poudres 1 et 2 au niveau de la résistance pour un taux de remplacement de 5%. Les deux types de poudre ont causé une réduction de 50% de la résistance par rapport à un mélange témoin à 34j. Pour les mortiers confectionnés avec la poudre non calcinée, on a noté une chute considérable de la résistance de 71%. Cette diminution de la résistance est due à la présence de la matière organique dans la poudre. En effet, la matière organique provoque un retard de prise dans le ciment (Glasser, 1997). Ce retard est dû à l'intervention de la matière organique dans les réactions chimiques d'hydratation du ciment (Cabane, 2005), ce qui empêche la polymérisation des CSH (Valls et Vázquez, 2001). Elle peut également impacter négativement les réactions pouzzolaniques et la prise du ciment (Cabane, 2005; Harvey *et al.*, 2010) et par conséquent, les caractéristiques mécaniques finales du matériau. On note aussi un effet sur la prise et le durcissement en raison de la formation d'un film particulier et protecteur autour des grains de ciment (Benzerzour *et al.*, 2017). Pour améliorer l'hydratation du ciment, un prétraitement à la chaux est conseillé pour détruire la matière organique ou l'ajout du chlorure de calcium (Valls et Vázquez, 2001).

▪ Effet de la finesse :

On peut déterminer l'intérêt majeur de la finesse d'un grain par sa capacité à combler des vides intergranulaires (Geretto, 2018b). Donc plus les particules sont fines, plus leur pouvoir de comblement des vides est important. Ceci a été confirmé par les résultats des mortiers qui ont présenté une meilleure résistance avec la poudre <80 μm qu'avec le mélange des 3 fineses <80 μm , 80 μm et 160 μm dans les deux cas : calcinée et non calcinée. En revanche, les résultats obtenus avec les pâtes ne confirment pas cette hypothèse, la meilleure résistance à 28j a été obtenue avec la plus petite finesse de poudre (160 μm) dans le cas de poudre non calcinée et avec la finesse 80 μm

dans le cas de poudre calcinée. Les deux autres finesses de poudre calcinée <80 µm et 160 µm ont donné des résistances très proches (47,4 et 48,0 MPa). Le ciment GU utilisé contient 97% de particules inférieures à 45 µm (annexe). Les poudres de finesses 160 µm et 80 µm ont ainsi des particules de taille supérieure à celle du ciment. Dans ce cas, les grains de ciment vont combler les vides situés entre les particules de la poudre ce qui diminuera la porosité. Cependant, la poudre de finesse <80 µm a des particules ayant plus ou moins la même taille que celles du ciment. Ce qui explique peut-être les résistances obtenues pour les pâtes non calcinées.

Pour les pâtes calcinées, le même principe peut s'appliquer, mais les particules de 80 µm présentent des vides intergranulaires moins importants par rapport aux particules de taille 160 µm et avec l'effet de la calcination, ils se rétrécissent encore plus ce qui pourrait expliquer la forte résistance obtenue. La norme française P18-501 donne une caractérisation des additions pour un béton hydraulique appelées aussi fillers. Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de calcaire et siliceux s'il contient au moins 90% de silice. Aucune de ces deux dénominations ne s'applique sur la poudre des carapaces de crustacés à cause de l'absence de la silice et sa teneur en oxyde de calcium qui n'atteint pas le 90%. Dans les autres cas, le filler peut être désigné par sa roche d'origine. La même norme précise la granularité et la surface spécifique des fillers. Pour être considérée comme filler, les exigences de la norme NF P18-501 doivent être suivies lors du broyage de la poudre des carapaces de crustacés, l'étendue granulaire doit être 0/315 µm, le passant à 80µm doit être > 85% (égal à 24 % dans le broyage qui a été fait dans ce projet) et la surface spécifique Blaine doit faire partie des 4 classes A, B, C ou D(Caré et al., 2000)(Tableau 4.13).

Tableau 4.13 : Caractéristiques normalisées des fillers

Etendue granulaire	0/315 µm
Passant à 80 µm	>85 %
Surface spécifique Blaine (m ² /kg)	
Classes : A	<200
B	200 à 400
C	400 à 600
D	>600

▪ **Effet de la calcination :**

Pour les pâtes, la meilleure résistance à 28j a été obtenue avec un taux de remplacement de 5% avec une finesse de poudre calcinée de 80 µm et est égale à 60,1 MPa. Cette valeur a même dépassé de 14% la résistance de la pâte de référence. La poudre des carapaces de crustacés calcinée a augmenté donc la résistance de la pâte à 28j. Pour les mortiers, la meilleure résistance a été obtenue avec 5% de poudre <80 µm et est égale à 33,3 MPa à 28j (contre 28,5 MPa pour un mortier de référence). La calcination de la poudre a mené à l'amélioration des résistances grâce au phénomène d'agglomération ou frittage qui consiste en la soudure entre les grains sous l'influence de la chaleur(Benzerzour et al., 2017). En effet, la matière organique se décompose provoquant une augmentation de la porosité. En augmentant encore plus la température, les grains grossissent, des

joints de grains se forment entre les particules donc leur taille augmente et il y aura une densification qui permettra de réduire la porosité et la surface spécifique (Ramaroson, 2008). La calcination modifie aussi la granulométrie (D50 est affecté aux alentours de 700°C) (Benzerzour et al., 2017).

▪ **Activité pouzzolanique :**

Une pouzzolane naturelle est définie selon la norme ASTM C125-07 comme « des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui ne possèdent pas eux-mêmes de propriétés liantes, mais qui, sous forme finement divisée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes ». Les pouzzolanes naturelles sont formées de 60 à 85% de silice (SiO₂) et d'alumine (Al₂O₃) (Souchu, 2014). On désigne par propriété pouzzolanique la réaction entre la silice (ensuite l'alumine) avec la chaux en présence de l'eau pour former les hydrates (silicates de calcium hydratés et silico-aluminates de calcium hydratés) (Geretto, 2018a).

Selon la norme ASTM C618, un matériau est considéré comme pouzzolanique si :

- Sa composition chimique vérifiée : $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 \geq 70\%$
- La valeur de la PAF $\leq 10\%$ (ASTM Standard, 2008)

Or, pour la poudre des carapaces de crustacés non calcinée, $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 = 0,2 + 0,1 + 0,0 = 0,3\% \ll 70\%$ et PAF (poudre 1 non calcinée) = 64,6%, donc elle ne peut pas être considérée comme pouzzolanique, mais plutôt inerte vu qu'elle ne respecte pas les limites imposées par la norme. Même chose pour la poudre calcinée, elle est plutôt inerte car : $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 = 0,0 + 0,1 + 0,0 = 0,1\% \ll 70\%$ et sa valeur de perte au feu est de 28,3%.

▪ **Compacité du squelette granulaire :**

L'augmentation de la résistance peut aussi être associée à l'amélioration de la compacité du squelette granulaire (de Larrard, 1989; Sedran et al., 2007). En effet, les vides intergranulaires sont comblés, la porosité est diminuée et, par conséquent, la compacité de la pâte est augmentée. Le gain de compacité permet aussi de limiter le phénomène de ségrégation qui se manifeste par une séparation des plus gros composants des plus fins générant une détérioration de l'homogénéité dans le cas des bétons (Geretto, 2018b). Donc il faut augmenter plus la finesse afin d'améliorer la compacité.

▪ **Effet de la minéralogie :**

La teneur élevée en calcite (CaCO₃) favorise l'hydratation de l'alite (C₃S). En présence de l'eau, le carbonate de calcium réagit avec le C₃S et l'aluminate C₄AH₁₃ pour former du monocarboaluminate de calcium hydraté [C₃A, CaCO₃, 11 H₂O]. La présence de la chaux réactive suite à la transformation thermique de calcite permet d'améliorer les réactions d'hydratation (Benzerzour et al., 2017).

4.4. Conclusion

Pour prédire le comportement d'un ajout cimentaire, il faut connaître sa composition et les éléments constituants. Pour ce faire, des analyses chimiques et minéralogiques de la poudre de crustacés ont été faites. Cette 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%). L'analyse granulométrique par tamisage a montré que la poudre possède une granulométrie serrée avec un $D_{50}=180\ \mu\text{m}$ et un coefficient d'uniformité $C_u=4.6$. Les résistances des pâtes et des mortiers réalisés avec la poudre non calcinée n'étaient pas satisfaisantes, car il y avait une baisse importante allant de 40% à 71% due à la présence de la matière organique qui agit négativement sur la réaction d'hydratation et affecte par conséquent les caractéristiques mécaniques du matériau. Pour éliminer la matière organique, la poudre a été calcinée d'après le cycle suivant : montée à 500°C en 2h, palier de 1h à 500°C, montée à 800°C en 2h, palier de 1h à 800°C et retour à la température pièce en fermant le four et en le gardant fermé toute la nuit. Cette procédure a affecté positivement les résistances et il y avait eu une augmentation 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.

Chapitre 5 : Conclusion

Ce projet consistait à étudier le potentiel de valorisation des carapaces de crustacés pour la fabrication de bétons à base des sédiments de dragage. Il avait pour objectif spécifique d'étudier différentes formulations de pâtes de ciment et de mortiers en faisant varier quatre paramètres, soit le taux de remplacement du ciment par la poudre de crustacés, la finesse de la poudre, la présence ou non de matière organique dans la poudre et l'effet de la calcination de la poudre.

Le sable utilisé dans les formulations et les carapaces de crustacés sont issus des Îles-de-la-Madeleine. Deux types de carapaces ont été utilisés dans ce projet : des carapaces 1 moyennement broyées et des carapaces 2 suffisamment broyées sous forme de poudre. La première étape était le broyage des carapaces 1 pour avoir une poudre. Ensuite, pour caractériser les deux types de poudre obtenue chimiquement, on a utilisé la technique de la diffraction des rayons X pour déterminer les phases cristallines et la technique de la fluorescence X pour déterminer la composition chimique. Ces techniques ont montré que la poudre des carapaces de crustacés comporte surtout des phases cristallines majoritairement formées par des carbonates de calcium. Les trois éléments chimiques principaux contenus dans la poudre étaient le calcium (Ca), le phosphore (P) et le magnésium (Mg). La présence de matière organique a aussi été remarquée dans les deux poudres. Une analyse granulométrique a été ainsi faite sur la poudre 1 qui contient moins de matière organique (PAF=64,6% contre 82,4% pour la poudre 2) et a montré qu'elle avait une granulométrie étalée avec un $D_{50}=180 \mu\text{m}$ et un coefficient d'uniformité $C_u=4,6$.

L'objectif à long terme du projet était d'envisager la fabrication d'un béton avec de bonnes propriétés mécaniques à moindres coûts. Dans cette optique, il a été choisi de commencer par faire des mélanges avec les carapaces broyées sans aucun traitement physique ou chimique (poudre brute). Pour les pâtes incorporant la poudre avec le moins de matière organique (1), une baisse de résistance a été notée allant de 51% à 75% à 28j pour les taux de remplacement de 5 à 15%. Pour la poudre avec le plus de matière organique (2), une baisse notamment de 46% à 89% pour les mêmes taux de remplacement a été observée.

Pour étudier l'effet de la finesse de la poudre, il a été décidé de procéder à un tamisage de la poudre pour utiliser trois finesses ($<80 \mu\text{m}$, $80 \mu\text{m}$ et $160 \mu\text{m}$) et formuler des pâtes avec un taux de remplacement de 5%. Les résistances ont également baissé, mais il y a eu une légère amélioration par rapport aux premiers mélanges. La baisse allait de 41% à 51% à 28j pour les finesses de $160 \mu\text{m}$ à $<80 \mu\text{m}$. Dans le cas des mortiers incorporant le sable de dragage, les résistances à 28j à un taux de remplacement de 5% n'étaient guère meilleures, la baisse étant de 71%. Cette réduction des propriétés mécaniques pourrait être associée à la présence de la matière organique dans la poudre de crustacées, ce qui provoque un retard de prise dans le ciment (Glasser, 1997). La matière organique affecte les réactions chimiques d'hydratation (Cabane, 2005) et empêche la polymérisation des CSH (Valls et Vázquez, 2001). À la vue de tous ces résultats, la substitution d'un certain pourcentage du ciment dans un mélange sans adjuvant par de la poudre de crustacés n'ayant subi aucun traitement ne s'avère pas viable.

Pour améliorer les performances mécaniques dégradées par la présence de la matière organique, une calcination de la poudre a été faite suivant le cycle suivant : montée à 500°C en 2h, palier de 1h à

500°C, montée à 800°C en 2h, palier de 1h à 800°C et retour à la température pièce en fermant le four et en le gardant fermé toute la nuit. Ce procédé a conduit à une amélioration importante des résistances des pâtes avec de faibles diminutions respectives de 9 à 10% à 28j pour les finesses 160 µm et <80 µm. Il y a eu une augmentation de 14% de la résistance pour la finesse 80 µm pour atteindre 60,1 MPa à 28j. La meilleure formulation pour la pâte était donc avec un taux de remplacement de 5% de poudre calcinée de finesse 80 µm.

En ce qui concerne les mortiers incorporant la poudre calcinée mélange de 3 finesses, la baisse était de 5 % pour les taux 5 et 15%. Pour un taux de 10%, il y a eu une augmentation de 1% par rapport au témoin. Il y a eu donc une nette amélioration de la résistance par rapport au mortier fabriqué avec la poudre non calcinée. Cette amélioration pourrait être due au phénomène d'agglomération ou frittage qui consiste en la soudure entre les grains sous l'influence de la chaleur (Benzerzour et al., 2017) et à l'élimination de la matière organique la cause principale de la chute des résistances. Les mortiers fabriqués avec la poudre de finesse <80 µm présentaient des meilleures résistances par rapport aux mortiers mélangeant les 3 finesses, que ce soit avec la poudre calcinée ou non. Avec la poudre calcinée <80 µm, il y avait une croissance de 17% de la résistance par rapport au témoin.

Pour conclure, il a été trouvé qu'une formulation a dépassé les attentes que les mélanges formulés possèdent un comportement mécanique proche de celui d'un mélange témoin pour les pâtes de ciment avec une résistance à la compression à 28j de 60,1 MPa. Pour les mortiers avec la poudre calcinée, la résistance du témoin a été dépassée avec 10% de remplacement du ciment par les 3 finesses <80 µm, 80 µm et 160 µm mélangées, et aussi avec 5% de poudre de finesse <80 µm. La poudre des carapaces de crustacés a montré sa capacité à jouer le rôle d'une addition inerte vu qu'elle ne présente pas une activité pouzzolanique, reste à voir si elle peut être désignée par filler si les exigences de la norme NF P18-501 sont suivies pour avoir les caractéristiques normalisées pour les fillers. Il sera aussi possible d'augmenter les taux de remplacement avec la finesse <80 µm pour voir le taux pour lequel la résistance ne subira pas une baisse ou au moins sera de l'ordre de la résistance du témoin.

Recommandations :

Etant parmi les facteurs les plus importants dans la formulation du béton, le facteur E/C affecte considérablement la résistance finale. Pour cela, une variation de ce rapport pourra être envisagée dans le futur. Les données obtenues par Pellerin (2017) ont montré que la granulométrie des sédiments analysés ne correspond pas aux critères d'un sable de béton standard. À la vue de cette constatation, un mélange du sable de dragage et d'un sable de béton standard pourra être considéré.

En s'appuyant sur les résultats obtenus avec les mortiers et les pâtes, un passage à l'échelle béton s'avère possible. La détermination de la surface spécifique permet d'établir une corrélation avec l'activité du matériau et donc prédire son efficacité dans la matrice cimentaire (Benzerzour et al., 2017). La surface spécifique de la poudre calcinée pourra être déterminée avant de l'utiliser pour avoir une surface proche de celle du ciment GU (396 m²/kg). La calcination change la granulométrie et la forme des particules, une analyse granulométrique pourra être faite à la poudre calcinée.

Comme la matière organique est encore présente dans la poudre suite à la calcination, il sera possible d'augmenter la température de calcination et aller au-delà de 800°C. Il pourra y avoir aussi une optimisation du temps de calcination. Une étude qui porte sur l'utilisation des sédiments de dragage en tant qu'addition pour le ciment a démontré que les sédiments calcinés à 1h étaient plus efficaces que ceux calcinés à 3h et ont donné des meilleures résistances à la compression (Benzerzour et al., 2017). Mais vu que le traitement thermique nécessite une énergie excessive pour atteindre des températures élevées et dégage du CO₂, il sera intéressant de faire une analyse du cycle de vie et une analyse économique pour voir si ce type de mélange est viable de point de vue économique et environnemental.

Références

- Achour, R. (2013) *Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiments de dragage*. Mines Douai, l'université Lille1 et l'université de Sherbrooke.
- Agostini, F. (2006) 'Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins', *Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille*, p. 207.
- Asphama, A. I. et al. (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 (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 Standard, C.-08a (2008) 'Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, West Conshohocken, PA.', in ASTM, I. (ed.) *Annual Book of ASTM Standards*.
- Babut, M. et al (1999) *Sediment quality assessment of three rivers and streams in France: the Moselle, the Rhône and the Seine in International Symposium on Sediment Quality Assessment*. Berlin.
- Baldock, J. et al. (2004) 'Cycling and composition of organic matter in terrestrial and marine ecosystems', *Marine Chemistry*, 92(1–4), pp. 39–64.
- Beddaa, H. et al. (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.
- Bel Hadj Ali, I. (2013) *Contribution à l'étude des sédiments marins tunisiens : cas des ports de Radès et de Gabès*. Ecole centrale de Lille et Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis.
- Benard, A. (2014) 'Sédiments de dragage', *OFRIR (Observation Français des Ressources des les Infrastructures)*.
- Benzerzour, M., Amar, M. and 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.
- Bousslama, S. and Jelidi, A. (2003) 'Hydraulic concrete development using Tunisian blast furnace slag', *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 36(255), pp. 59–67.
- Bubb, J. M. and J. N. L. (1974) 'Anthropogenic heavy metal inputs two lowland river system, a case study. Water, Air, and Soil pollution', 78(3–4), pp. 279–926.
- Cabane, N. (2005) 'Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation To cite this version : HAL Id : tel-00010521 ET AUX LIANTS HYDRAULIQUES : des éléments perturbateurs de', pp. 1–189.
- Cazalet, M. L. (2012) 'Caractérisation physico-chimique d'un sédiment marin traité aux liants hydrauliques – Évaluation de la mobilité potentielle des polluants inorganiques.', *Thèse de doctorat, INSA-LYON*, p. 239.
- Colin, C. (2003) *Valorisation des sédiments fins de dragage en technique routière*.
- Desjardins, C. and Forcier, F. (2007) *Étude comparative des technologies de traitement des résidus organiques et des résidus ultimes applicables à la région métropolitaine de Montréal*. Montréal.
- Ez-zaki, H. et al. (2016) 'Composite cement mortars based on marine sediments and oyster shell powder', 66(321).
- Ferraro, V. et al. (2010) 'Valorisation of natural extracts from marine source focused on marine by-products: A review', *FRIN*. Elsevier Ltd, 43(9), pp. 2221–2233. doi: 10.1016/j.foodres.2010.07.034.

- Geretto, P. (2018a) *De la pouzzolanité, une affaire de coefficients*. Available at: <http://doc.lerm.fr/de-pouzzolanite-affaire-de-coefficients/>.
- Geretto, P. (2018b) *L'optimisation du squelette granulaire*. Available at: <http://doc.lerm.fr/loptimisation-squelette-granulaire/>.
- Glasser, F. P. (1997) 'Fundamental aspect of cement solidification and stabilization', *Journal of Hazardous Material*, 52(2–3), pp. 151–170.
- Harvey, O. R. *et al.* (2010) 'Natural organic matter and the formation of calcium-silicate-hydrates in lime-stabilized smectites: A thermal analysis study', *Thermochimica Acta*. Elsevier B.V., 505(1–2), pp. 106–113. doi: 10.1016/j.tca.2010.04.007.
- Hassoune, M. *et al.* (2020) 'Requalification of dredging sediments through their use in concrete formulations based on a 3rd generation admixture', *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd., 22, pp. 28–31. doi: 10.1016/j.matpr.2019.08.065.
- Hayet, A., Deram, A. and 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.
- Holmyard, N. and Franz, N. (2016) *Lobster Markets*.
- Ilangumaran, G. *et al.* (2017) 'Microbial Degradation of Lobster Shells to Extract Chitin Derivatives for Plant Disease Management', 8(May), pp. 1–14. doi: 10.3389/fmicb.2017.00781.
- John, V. M. *et al.* (2018) 'Cement and Concrete Research Fillers in cementitious materials — Experience , recent advances and future potential', *Cement and Concrete Research*. Elsevier, 114(March), pp. 65–78. doi: 10.1016/j.cemconres.2017.09.013.
- Kribi, S. (2005) *Décomposition des matières organiques et stabilisation des métaux lourds dans les sédiments de dragage*. INSA Lyon.
- Kwon, K., Bang, J.-W. and Kim, Y.-Y. (2018) 'Flexural performance of multi-layered fiber-reinforced cement composites with diverse interface shape.', 30(4), pp. 429–435.
- Lage-Yusty, M. A. *et al.* (2011) 'Chemical composition of snow crab shells (*Chionoecetes opilio*)', *CYTA - Journal of Food*, 9(4), pp. 265–270. doi: 10.1080/19476337.2011.596285.
- Laldji (2015) 'Caractéristiques fondamentales du béton A-Liant', *Construction*, pp. 1–42.
- de Larrard, F. (1989) 'ULTRAFINE PARTICLES FOR THE MAKING OF VERY HIGH STRENGTH CONCRETE', *Cement and Concrete Research*, 19(c), pp. 161–172.
- Légaré Bilodeau, C. (2011) *2011 Identification de scénarios de valorisation des matières résiduelles critiques aux Îles-de-la-Madeleine Rapport de stage en gestion des matières résiduelles*.
- Liang, Y. and Wong, M. (2003) 'Spatial and temporal organic and heavy metal pollution at Mai Po Marshes Nature Reserve, Hong Kong.', *Chemosphere*, 52(9), pp. 1647–1658.
- Limeira, J. *et al.* (2011) 'Mechanical and durability properties of concrete made with dredged marine sand', *Construction and Building Materials*, 25(11), pp. 4165–4174. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.053.
- Lirer, S. *et al.* (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.
- Lydon, D. (2003) (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*.
- Mason, A. (1995) 'Metal detoxication in aquatic organisms in Metal speciation and bioavailability in aquatic systems.', pp. 469–608.
- Minocha, A. K., Jain, N. and Verma, C. L. (2003) 'Effect of organic materials on the solidification of heavy metal sludge', *Construction and Building Materials*, 17(2), pp. 77–81. doi: 10.1016/S0950-0618(02)00098-3.
- Mohammad Redzuan Abdul Hanana et al (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.
- 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).
- Muraz, L. (2015) 'Valorisation de scories cristallines dans le béton de ciment'.
- Ngo, D. C. *et al.* (2020) 'Design of a soil concrete as a new building material – Effect of clay and hemp proportions', *Journal of Building Engineering*, 32(June). doi: 10.1016/j.job.2020.101553.
- Nguyen, T. T. *et al.* (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/>.
- Pellerin, R. (2017) *Rapport de caractérisation des sédiments de dragage*. Sherbrooke.
- Power, E. A. and P. M. C. (1992) 'Assessing sediment quality. Sediment Toxicity Assessment', pp. 1–18.
- Ramaroson, J. (2008) *Calcination des Sédiments de Dragage Contaminés. Etudes des Propriétés Physico-chimiques*.
- S. Caré, R. Linder, V. Baroghel-Bouny, F. de Larrard, Y. C. (2000) *Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage des bétons, Plans d'expériences et analyse statistique, Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées*.
- Sabatini, P. (2015) *Comodity Update - Lobster*.
- Safhi, A. el M. *et al.* (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 des bétons autoplaçants : optimisation de la formulation et étude de la durabilité*.
- Sedran, T., De Larrard, F. and Le Guen, L. (2007) 'Détermination de la compacité des ciments et additions minérales à la sonde de Vicat', *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussees*, (270–271), pp. 155–163.
- Souchu, P. (2014) *Pouzzolanité, activité pouzzolanique et hydraulité*. Available at: <http://doc.lerm.fr/pouzzolanite-activite-pouzzolanique-et-hydraulicite/#note6>.
- Stewart, G. and 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. (2014a) 'Chapitre IV Hydratation du ciment Portland Chapitre VI Hydratation du ciment Portland'.
- Tagnit-hamou, A. (2014b) 'Chapitre VIII Les ajouts cimentaires Professeur: Arezki Tagnit-Hamou'.
- Tagnit-hamou, A. (2019) 'Chapitre 6 L'hydratation du ciment Portland'.
- Therriault, G., Hanlon, J. and Creed, L. (2013) *Report of the Maritime Lobster Panel*. Available at: http://www.gov.pe.ca/photos/original/FARD_LobPan13.pdf.
- Tselikis, A. (Maine L. A. . and Mccarron, P. (2006) *Lobster Market Overview*, *Usda*. Available at: <http://taatrain.cffm.umn.edu/publications/LobsterMrktOverview.pdf>.
- Uchechi, G. *et al* (2018) 'Properties of seashell agregate concrete', 192, pp. 287–300.
- Valls, S. and Vázquez, E. (2001) 'Accelerated carbonatation of sewage sludge-cement-sand mortars and its environmental impact', *Cement and Concrete Research*, 31(9), pp. 1271–1276. doi: 10.1016/S0008-8846(01)00573-7.
- Vermeulen, J., *et al.* . (2003) 'Ripening of dredged sediments during temporary upland disposal', *A bioremediation technical journal of Soil and Sediments*, 3(1), pp. 49–59.
- Walsh, R. (2000) 'The Lobster Pickle', *Natural History*, 109(6), pp. 72–74.
- Xu, Y., Gallert, C. and Winter, J. (2008) 'Chitin Purification from Shrimp Wastes by Microbial Deproteinization and Decalcification..', *Appl Microbiol Biotechnol*, 79, pp. 687–697.

Zhao, Z. *et al.* (2018) 'Use of uncontaminated marine sediments in mortar and concrete by partial substitution of cement', 93, pp. 155–162.

Annexes

PANalytical							
Viewresult				Centre de caractérisation des matériaux (CCM)			
Measurement				X-Ray Fluorescence Results Report			
Type:	Routine						
Archive:	WROXI LOI						
Application:	WROXI LOI						
Sample:	Rivard/Echantillon1 PAF 64,64			Sample:	Rivard/Echantillon1 PAF 64,64		
Sum (%):	98,32			LOI (%):	64,64		
Initweight:	0,6913 g						
Flux weight:	7,0049 g						
Final weight:	7,6962 g						
Compound	Value	Unit	Status	Oxide	(wt %)	Element	(wt%)
Al2O3	0,43	%		Al2O3	0,2	Al	0,1
BaO	0,02	%		BaO	0,0	Ba	0,0
CaO	77,58	%		CaO	27,4	Ca	19,6
Co3O4	0,00	%		Co3O4	0,0	Co	0,0
Cr2O3	0,00	%		Cr2O3	0,0	Cr	0,0
CuO	0,00	%		CuO	0,0	Cu	0,0
Fe2O3	0,07	%		Fe2O3	0,0	Fe	0,0
HfO2	0,00	%		HfO2	0,0	Hf	0,0
K2O	0,03	%		K2O	0,0	K	0,0
MgO	5,42	%		MgO	1,9	Mg	1,2
Mn2O3	0,05	%		Mn2O3	0,0	Mn	0,0
Na2O	0,39	%		Na2O	0,1	Na	0,1
NiO	0,00	%		NiO	0,0	Ni	0,0
P2O5	12,14	%		P2O5	4,3	P	1,9
PbO	-0,01	%		PbO	0,0	Pb	0,0
SO3	1,02	%		SO3	0,4	S	0,1
SiO2	0,40	%		SiO2	0,1	Si	0,1
SrO	0,76	%		SrO	0,3	Sr	0,2
TiO2	0,00	%		TiO2	0,0	Ti	0,0
V2O5	0,00	%		V2O5	0,0	V	0,0
WO3	0,01	%		WO3	0,0	W	0,0
ZnO	0,00	%		ZnO	0,0	Zn	0,0
ZrO2	0,00	%		ZrO2	0,0	Zr	0,0

PANalytical
Viewresult

Measurement

 Type: Routine
 Archive: WROXI
 Application: WROXI
 Sample: Rivard/Echantillon2 PAF
 Sum (%): 98,77
 Initweight: 0,3651 g
 Flux weight: 7,0043 g
 Final weight: 7,3694 g

X-Ray Fluorescence Results Report

 Sample: Rivard/Echantillon2 PAF 82,39
 LOI (%): 82,39

Compound	Value	Unit	Status
Al ₂ O ₃	0,39	%	
BaO	0,01	%	
CaO	69,73	%	
Co ₃ O ₄	0,00	%	
Cr ₂ O ₃	0,00	%	
CuO	0,02	%	
Fe ₂ O ₃	0,33	%	
HfO ₂	0,00	%	
K ₂ O	0,08	%	
MgO	5,51	%	
Mn ₂ O ₃	0,07	%	
Na ₂ O	1,52	%	
NiO	0,00	%	
P ₂ O ₅	16,48	%	
PbO	-0,01	%	
SO ₃	1,64	%	
SiO ₂	2,25	%	
SrO	0,70	%	
TiO ₂	0,02	%	
V ₂ O ₅	0,00	%	
WO ₃	0,01	%	
ZnO	0,02	%	
ZrO ₂	0,00	%	

Compound	Value	Unit	Status	Oxide	(wt %)	Element	(wt%)
Al ₂ O ₃	0,39	%		Al ₂ O ₃	0,1	Al	0,0
BaO	0,01	%		BaO	0,0	Ba	0,0
CaO	69,73	%		CaO	12,3	Ca	8,8
Co ₃ O ₄	0,00	%		Co ₃ O ₄	0,0	Co	0,0
Cr ₂ O ₃	0,00	%		Cr ₂ O ₃	0,0	Cr	0,0
CuO	0,02	%		CuO	0,0	Cu	0,0
Fe ₂ O ₃	0,33	%		Fe ₂ O ₃	0,1	Fe	0,0
HfO ₂	0,00	%		HfO ₂	0,0	Hf	0,0
K ₂ O	0,08	%		K ₂ O	0,0	K	0,0
MgO	5,51	%		MgO	1,0	Mg	0,6
Mn ₂ O ₃	0,07	%		Mn ₂ O ₃	0,0	Mn	0,0
Na ₂ O	1,52	%		Na ₂ O	0,3	Na	0,2
NiO	0,00	%		NiO	0,0	Ni	0,0
P ₂ O ₅	16,48	%		P ₂ O ₅	2,9	P	1,3
PbO	-0,01	%		PbO	0,0	Pb	0,0
SO ₃	1,64	%		SO ₃	0,3	S	0,1
SiO ₂	2,25	%		SiO ₂	0,4	Si	0,2
SrO	0,70	%		SrO	0,1	Sr	0,1
TiO ₂	0,02	%		TiO ₂	0,0	Ti	0,0
V ₂ O ₅	0,00	%		V ₂ O ₅	0,0	V	0,0
WO ₃	0,01	%		WO ₃	0,0	W	0,0
ZnO	0,02	%		ZnO	0,0	Zn	0,0
ZrO ₂	0,00	%		ZrO ₂	0,0	Zr	0,0

PANalytical



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

Viewresult

Plateforme de Recherche et d'Analyse des
Matériaux (PRAM)

Measurement

**Résultats de l'analyse quantitative par fluorescence
des rayons-X (XRF)**

Type: Routine
Archive: WROXI
LOI
Application: WROXI
LOI
Sample: Rivard / Jihene / crustacé calciné
<80um PAF: 28,33
Sum (%): 98,61
Initweight: 0,7015 g
Flux weight: 7,0089 g
Final weight: 7,7104 g

Échantillon : Rivard / Jihene / crustacé calciné
<80um PAF: 28,33

PAF à
1050°C (%): 28,3

Compound	Value	Unit	Status	Oxyde	(% massique)	Éléme nt	(% massique)
Al2O3	0,05	%		Al2O3	0,0	Al	0,0
BaO	0,01	%		BaO	0,0	Ba	0,0
CaO	80,48	%		CaO	57,7	Ca	41,2
Co3O4	0,00	%		Co3O4	0,0	Co	0,0
Cr2O3	0,00	%		Cr2O3	0,0	Cr	0,0
CuO	0,04	%		CuO	0,0	Cu	0,0
Fe2O3	0,04	%		Fe2O3	0,0	Fe	0,0
HfO2	-0,01	%		HfO2	0,0	Hf	0,0
K2O	0,05	%		K2O	0,0	K	0,0
MgO	5,52	%		MgO	4,0	Mg	2,4
Mn2O3	0,05	%		Mn2O3	0,0	Mn	0,0
Na2O	0,71	%		Na2O	0,5	Na	0,4
NiO	0,00	%		NiO	0,0	Ni	0,0
P2O5	9,84	%		P2O5	7,1	P	3,1
PbO	-0,01	%		PbO	0,0	Pb	0,0
SO3	0,87	%		SO3	0,6	S	0,2
SiO2	0,18	%		SiO2	0,1	Si	0,1
SrO	0,77	%		SrO	0,6	Sr	0,5
TiO2	0,00	%		TiO2	0,0	Ti	0,0
V2O5	0,00	%		V2O5	0,0	V	0,0
WO3	0,01	%		WO3	0,0	W	0,0
ZnO	0,01	%		ZnO	0,0	Zn	0,0
ZrO2	0,00	%		ZrO2	0,0	Zr	0,0

Le 1^{er} décembre 2006

CERTIFICAT DE CIMENT
Usine de Joliette

Ciment Hydraulique à Usage Général
Type GU (anciennement Type 10)
Période de production : Novembre 2006

<u>Analyses chimiques (%)</u>		<u>Propriétés physiques</u>	
Alcalis (Na ₂ O équ.).....	0.86	Finesse: blaine	396 m ² /kg
Perte au feu (≤ 3.5 %).....	2.7	passant 45 μ (≥ 72 %).....	97 %
Insolubles (≤ 1.5 %).....	0.63	Expansion à l'autoclave (≤ 1.0 %).....	0.073 %
Chaux libre.....	1.0	(A3004-B5)	
SiO ₂	20.0	Temps de prise:	
Al ₂ O ₃	4.9	Initial (≥ 45 et ≤ 375 minutes)....	130 min.
Fe ₂ O ₃	2.2	Final.....	210 min.
CaO.....	63.2	Teneur en air.....	7.2 %
MgO (≤ 5.0 %).....	1.9	Fausse prise.....	93 %
SO ₃	3.4		
Composition minéralogique:		Résistance à la compression:	
C ₃ S.....	59.3	à 3 jours (≥ 14.5 MPa).....	31.3 MPa
C ₂ S.....	12.6	à 7 jours (≥ 20.0 MPa).....	36.3 MPa
C ₃ A.....	9.3	à 28 jours « Oct 06 » (≥ 26.5 MPa)....	41.1 MPa
C ₄ AF.....	6.8		

Ces résultats attestent que le ciment représenté par l'échantillon ci-dessus satisfait à toutes les exigences de la norme en vigueur CSA A3000-03.

- Résultats essais de compression pâtes de ciment à 9j (Poudre 2)

% Poudre	Référence	5%	10%
Cube1	47,04	27,06	9,34
Cube2	48,86	26,88	8,02
Cube3	53,96	28,65	7,33
Moyenne(MPa)	49,95	27,53	8,23
Diminution		44,89%	83,52%
Écart-type	3,59	0,97	1,02
CV (%)	7,18%	3,54%	12,41%

- Résultats essais de compression pâtes de ciment à 34j (Poudre 2)

% Poudre	Référence	5%	10%	15%
Cube1	61,48	32,8	11,55	7,61
Cube2	62,21	35,5	10,16	6,11
Cube3	60,29	31,23	11,37	5,98
Moyenne(MPa)	61,33	33,18	11,03	6,57
Diminution	-	45,90%	82,02%	89,29%
Écart-type	0,97	2,16	0,76	0,91
CV (%)	1,58%	6,51%	6,86%	13,80%

- Résultats essais de compression pâtes de ciment à 9j (Poudre 1)

% Poudre	Référence	5%	10%	15%
Cube1	47,04	26,15	19,61	13,46
Cube2	48,86	24,56	20,24	12,58
Cube3	53,96	25,48	20,83	12,44
Moyenne(MPa)	49,95	25,40	20,23	12,83
Diminution	-	49,16%	59,51%	74,32%
Écart-type	3,59	0,80	0,61	0,55
CV (%)	7,18%	3,14%	3,02%	4,31%

- Résultats essais de compression pâtes de ciment à 34j (Poudre 1)

% Poudre	Référence	5%	10%	15%
Cube1	61,48	30,13	27,57	14,57
Cube2	62,21	31	26,79	16,48
Cube3	60,29	29,52	27,19	15,85
Moyenne(MPa)	61,33	30,22	27,18	15,63
Diminution		50,73%	55,67%	74,51%
Écart-type	0,97	0,74	0,39	0,97
CV (%)	1,58%	2,46%	1,43%	6,23%

- Résultats essais de compression pâtes de ciment à 7j (Poudre 1 tamisée non calcinée)

Identification	éch. #	âge de la pate	Finesse poudre	Résistance	Moyenne(MPa)	Réduction(%)	Ecart-type	CV(%)
			(μm)	(MPa)				
Référence	1	7j	-	47,04	<u>49,95</u>	=	<u>3,59</u>	<u>7%</u>
	2	7j		48,86				
	3	7j		53,96				
A	1	7j	<80	11,73	<u>16,02</u>	<u>67,93</u>	<u>3,89</u>	<u>24%</u>
	2	7j		17				
	3	7j		19,33				
B	1	7j	80	19,9	<u>19,21</u>	<u>61,54</u>	<u>2,04</u>	<u>11%</u>
	2	7j		20,82				
	3	7j		16,91				
C	1	7j	160	23,47	<u>20,75</u>	<u>58,46</u>	<u>2,38</u>	<u>11%</u>
	2	7j		19,03				
	3	7j		19,75				

- Résultats essais de compression pâtes de ciment à 28j (Poudre 1 tamisée non calcinée)

Avant un essai			Vérifiez la rotule										
			Vérifiez le taux de chargement (0,44 mpa/s)										
Identification	éch. #	âge du béton	lbs	newton	hauteur	largeur	surface	Mpa	moyenne	presse utilisée	Finesse de la poudre	Diminution(%)	
					moyenne de 2	moyenne de 2	(mm ²)						
A	1	28j	14300	63606.4	49,5	49	2425,50	26,22	<u>26,03</u>	riehle	<80 µm	57,56	
	2	28j	14000	62272	50	50	2500,00	24,91		riehle			
	3	28j	15000	66720	50	49,5	2475,00	26,96		riehle			
B	1	28j	14250	63384	50	50	2500,00	25,35	<u>27,41</u>	riehle	80 µm	55,30	
	2	28j	16350	72724.8	49,5	50	2475,00	29,38		riehle			
	3	28j	15150	67387.2	49	50	2450,00	27,50		riehle			
C	1	28j	18400	81843.2	50	50	2500,00	32,74	<u>30,75</u>	riehle	160µm	49,86	
	2	28j	17100	76060.8	50	50	2500,00	30,42		riehle			
	3	28j	16350	72724.8	50	50	2500,00	29,09		riehle			

- Résultats essais de compression mortiers de ciment à 7j (Poudre 1 mélange de 3 fineses)

Identification	éch. #	âge de la pate	Finesse poudre	Résistance	Moyenne(Mpa)	Réduction(%)	Ecart-type	CV(%)
			(μm)	(MPa)				
A	1	7j	-	32,49	<u>28,26</u>	=	<u>4,76</u>	<u>17%</u>
	2	7j		23,1				
	3	7j		29,18				
B	1	7j	1/3(<80) +1/3(80) +1/3(160)	4,04	<u>4,96</u>	<u>82,43</u>	<u>1,42</u>	<u>29%</u>
	2	7j		6,6				
	3	7j		4,25				

- Résultats essais de compression mortiers de ciment à 28j (Poudre 1 mélange de 3 fineses)

Avant un essai			Vérifiez la rotule								% poudre=5%	S/C=0,4	
			Vérifiez le taux de chargement (0,44 MPa/s)										
Identification	éch. #	âge du béton	lbs	newton	hauteur	largeur	surface	MPa	moyenne	presse	Finesse de la poudre	Diminution(%)	
					moyenne de 2	moyenne de 2	(mm ²)			utilisée			
A	1	28j	17850	79396,8	50	51	2550,00	31,14	<u>28,51</u>	riehle	-	-	
	2	28j	15750	70056	51	51	2601,00	26,93		riehle			
	3	28j	15750	70056	51	50	2550,00	27,47		riehle			
B	1	28j	4450	19793,6	50	51,5	2575,00	7,69	<u>8,21</u>	riehle	1/3<80 μm +1/3 80 μm +1/3 160 μm	71,21	
	2	28j	5150	22907,2	50	51,5	2575,00	8,90		riehle			
	3	28j	4750	21128	51	51,5	2626,50	8,04		riehle			

- Résultats essais de compression pâtes avec poudre calcinée <80 µm

Résistance à la compression à 7j sur les cubes de pâte avec poudre < 80um (# de production : 3)							
Identifiant	Date de test	Résistance 7j (Lbs)	Résistance 7j (N)	Résistance 7j (MPa)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Surface (mm ²)
1 - Crus - <80	18/06/2020	22350	99417,72	37,87	51,33	51,15	2625,53
2 - Crus - <80	18/06/2020	20700	92078,15	35,22	51,63	50,63	2614,03
Résistance à la compression à 28j sur les cubes de pâte avec poudre < 80um (# de production : 3)							
Identifiant	Date de test	Résistance 28j (Lbs)	Résistance 28j (N)	Résistance 28j (MPa)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Surface (mm ²)
3 - Crus - <80	09/07/2020	26100	116098,54	44,64	51,54	50,46	2600,71
4 - Crus - <80	09/07/2020	29000	128998,38	50,86	50,58	50,15	2536,59
5 - Crus - <80	09/07/2020	29650	131889,72	48,96	51,9	51,9	2693,61
6 - Crus - <80	09/07/2020	26200	116543,36	45,05	50,54	51,19	2587,14

- Résultats essais de compression pâtes avec poudre calcinée 80 µm

Résistance à la compression à 7j sur les cubes de pâte avec poudre de carapaces de crustacé calcinées (# de production : 9)							
Identifiant	Date de test	Résistance 7j (Lbs)	Résistance 7j (N)	Résistance 7j (MPa)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Surface (mm ²)
Pâte-Crust-Cal-80-1	17/07/2020	25600	113874,43	44,15	50,43	51,14	2578,99
Pâte-Crust-Cal-80-2	17/07/2020	27100	120546,76	46,77	50,52	51,02	2577,53
Résistance à la compression à 28j sur les cubes de pâte avec poudre de carapaces de crustacé calcinées (# de production : 9)							
Identifiant	Date de test	Résistance 28j (Lbs)	Résistance 28j (N)	Résistance 28j (MPa)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Surface (mm ²)
Pâte-Crust-Cal-80-3	07/08/2020	32300	143677,51	55,38	50,48	51,39	2594,17
Pâte-Crust-Cal-80-4	07/08/2020	32650	145234,38	59,48	50,68	48,18	2441,76
Pâte-Crust-Cal-80-5	07/08/2020	34700	154353,23	62,24	50,76	48,86	2480,13
Pâte-Crust-Cal-80-6	07/08/2020	34650	154130,82	63,09	50,52	48,36	2443,15

- Résultats essais de compression pâtes avec poudre calcinée 160 µm

Résistance à la compression à 7j sur les cubes de pâte avec poudre 160um (# de production : 4)							
Identifiant	Date de test	Résistance 7j (Lbs)	Résistance 7j (N)	Résistance 7j (MPa)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Surface (mm ²)
1 - Crus - 160	18/06/2020	24300	108091,75	44,10	50,62	48,42	2451,02
2 - Crus - 160	18/06/2020	23750	105645,23	44,51	50,26	47,23	2373,78
Résistance à la compression à 28j sur les cubes de pâte avec poudre 160um (# de production : 4)							
Identifiant	Date de test	Résistance 28j (Lbs)	Résistance 28j (N)	Résistance 28j (MPa)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Surface (mm ²)
3 - Crus - 160	09/07/2020	28300	125884,63	50,10	50,31	49,94	2512,48
4 - Crus - 160	09/07/2020	24500	108981,39	44,78	49,74	48,93	2433,78
5 - Crus - 160	09/07/2020	25250	112317,56	46,61	49,73	48,46	2409,92
6 - Crus - 160	09/07/2020	29350	130555,26	50,27	51,02	50,9	2596,92

- Résultats essais de compression pâte témoin

Résistance à la compression à 7j sur les cubes de pâte avec poudre de carapaces de crustacé calcinées (# de production : 10)							
Identifiant	Date de test	Résistance 7j (Lbs)	Résistance 7j (N)	Résistance 7j (MPa)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Surface (mm ²)
Pâte-Crust-Cal-TEM-1	17/07/2020	18400	81847,25	32,72	50,25	49,78	2501,45
Pâte-Crust-Cal-TEM-2	17/07/2020	24500	108981,39	44,86	50,43	48,17	2429,21
Résistance à la compression à 28j sur les cubes de pâte avec poudre de carapaces de crustacé calcinées (# de production : 10)							
Identifiant	Date de test	Résistance 28j (Lbs)	Résistance 28j (N)	Résistance 28j (MPa)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Surface (mm ²)
Pâte-Crust-Cal-TEM-3	07/08/2020	30700	136560,35	56,30	50,54	47,99	2425,41
Pâte-Crust-Cal-TEM-4	07/08/2020	28800	128108,74	50,96	51,46	48,85	2513,82
Pâte-Crust-Cal-TEM-5	07/08/2020	30400	135225,89	53,98	51,28	48,85	2505,03
Pâte-Crust-Cal-TEM-6	07/08/2020	27600	122770,87	48,66	50,38	50,08	2523,03

- Résultats essais de compression mortier avec 5% de poudre calcinée (mélange de 3 finesses)

Résistance à la compression à 7j sur les cubes de mortier avec poudre calcinée 1/3 < 80um, 1/3 80um et 1/3 160um(# de production : 3)								
Identifiant	Date de test	Résistance 7j (Lbs)	Résistance 7j (N)	Résistance 7j (MPa)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Surface (mm ²)	Moyenne (MPa)
Crust-Cal-5%-1	30/09/2020	10200	45369,60	18,15	50	50	2500	16,0
Crust-Cal-5%-2	30/09/2020	7950	35361,60	13,87	50	51	2550	
Crust-Cal-5%-3	30/09/2020	9100	40476,80	15,87	50	51	2550	
Résistance à la compression à 28j sur les cubes de mortier avec poudre calcinée 1/3 < 80um, 1/3 80um et 1/3 160um(# de production : 3)								
Identifiant	Date de test	Résistance 28j (Lbs)	Résistance 28j (N)	Résistance 28j (MPa)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Surface (mm ²)	Moyenne (MPa)
Crust-Cal-5%-4	21/10/2020	14800	65830,40	26,33	50	50	2500	26,9
Crust-Cal-5%-5	21/10/2020	16500	73392,00	27,67	52	51	2652	
Crust-Cal-5%-6	21/10/2020	15050	66942,40	26,78	50	50	2500	

- Résultats essais de compression mortier avec 10 % de poudre calcinée (mélange de 3 finesses)

Résistance à la compression à 7j sur les cubes de mortier avec poudre de carapaces de crustacé calcinées (# de production : 7)							
Identifiant	Date de test	Résistance 7j (Lbs)	Résistance 7j (N)	Résistance 7j (MPa)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Surface (mm ²)
Crust-Cal-10%-1	14/07/2020	12700	56492,39	22,71	50,50	49,26	2487,63
Crust-Cal-10%-2	14/07/2020	12450	55380,34	21,57	50,63	50,71	2567,45
Crust-Cal-10%-3	14/07/2020	13500	60050,97	23,65	50,58	50,21	2539,62
Résistance à la compression à 28j sur les cubes de mortier avec poudre de carapaces de crustacé calcinées (# de production : 7)							
Identifiant	Date de test	Résistance 28j (Lbs)	Résistance 28j (N)	Résistance 28j (MPa)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Surface (mm ²)
Crust-Cal-10%-4	04/08/2020	14800	65833,66	25,52	50,05	51,54	2579,58
Crust-Cal-10%-5	04/08/2020	15950	70949,11	27,38	50,22	51,60	2591,35
Crust-Cal-10%-6	04/08/2020	17250	76731,80	29,81	49,97	51,51	2573,95
Crust-Cal-10%-7	04/08/2020	16500	73395,63	29,52	49,60	50,13	2486,45
Crust-Cal-10%-8	04/08/2020	17050	75842,15	30,13	49,68	50,67	2517,29
Crust-Cal-10%-9	04/08/2020	16700	74285,27	30,62	48,39	50,13	2425,79

- Résultats essais de compression mortier avec 15 % de poudre calcinée (mélange de 3 fineses)

Résistance à la compression à 7j sur les cubes de mortier avec poudre de carapaces de crustacé calcinées (# de production : 8)							
Identifiant	Date de test	Résistance 7j (Lbs)	Résistance 7j (N)	Résistance 7j (MPa)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Surface (mm ²)
Crust-Cal-15%-1	14/07/2020	11550	51376,94	20,65	50,40	49,37	2488,25
Crust-Cal-15%-2	14/07/2020	11150	49597,65	20,04	50,58	48,93	2474,88
Crust-Cal-15%-3	14/07/2020	11450	50932,12	21,00	50,45	48,08	2425,64
Résistance à la compression à 28j sur les cubes de mortier avec poudre de carapaces de crustacé calcinées (# de production : 8)							
Identifiant	Date de test	Résistance 28j (Lbs)	Résistance 28j (N)	Résistance 28j (MPa)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Surface (mm ²)
Crust-Cal-15%-4	04/08/2020	15575	69281,03	27,47	49,88	50,57	2522,43
Crust-Cal-15%-5	04/08/2020	14850	66056,07	25,83	50,15	51,00	2557,65
Crust-Cal-15%-6	04/08/2020	15150	67390,53	26,27	49,83	51,48	2565,25
Crust-Cal-15%-7	04/08/2020	15425	68613,79	27,35	48,99	51,21	2508,78
Crust-Cal-15%-8	04/08/2020	15850	70504,29	26,99	51,07	51,15	2612,23
Crust-Cal-15%-9	04/08/2020	16650	74062,86	28,79	50,49	50,95	2572,47

- Résultats essais de compression mortier avec 5% de poudre non calcinée <80um

Résistance à la compression à 7j sur les cubes de mortier avec poudre non calcinée <80um (# de production : 3)								
Identifiant	Date de test	Résistance 7j (Lbs)	Résistance 7j (N)	Résistance 7j (MPa)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Surface (mm ²)	Moyenne (MPa)
1 - M5 -80 (1)	30/09/2020	3450	15345,60	5,90	51	51	2601	5,6
2 - M5 -80 (2)	30/09/2020	2850	12676,80	4,97	50	51	2550	
3 - M5 -80 (3)	30/09/2020	3450	15345,60	6,02	51	50	2550	
Résistance à la compression à 28j sur les cubes de mortier avec poudre non calcinée <80um (# de production : 3)								
Identifiant	Date de test	Résistance 28j (Lbs)	Résistance 28j (N)	Résistance 28j (MPa)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Surface (mm ²)	Moyenne (MPa)
1 - M5 -80 (1)	21/10/2020	4300	19126,40	7,65	50	50	2500	10,0
2 - M5 -80 (2)	21/10/2020	8400	37363,20	14,65	51	50	2550	
3 - M5 -80 (3)	21/10/2020	4350	19348,80	7,59	51	50	2550	

- Résultats essais de compression mortier avec 5% de poudre calcinée <80um

Résistance à la compression à 7j sur les cubes de mortier avec poudre calcinée <80um (# de production : 3)								
Identifiant	Date de test	Résistance 7j (Lbs)	Résistance 7j (N)	Résistance 7j (MPa)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Surface (mm ²)	Moyenne (MPa)
1 - MC5-80 (1)	29/09/2020	13900	61827,20	24,74	49	51	2499	23,8
2 - MC5-80 (2)	29/09/2020	13350	59380,80	23,75	50	50	2500	
2 - MC5-80 (3)	29/09/2020	12900	57379,20	22,95	50	50	2500	
Résistance à la compression à 28j sur les cubes de mortier avec poudre calcinée <80um (# de production : 3)								
Identifiant	Date de test	Résistance 28j (Lbs)	Résistance 28j (N)	Résistance 28j (MPa)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Surface (mm ²)	Moyenne (MPa)
1 - MC5-80 (1)	21/10/2020	19000	84512,00	33,80	50	50	2500	33,3
2 - MC5-80 (2)	21/10/2020	20200	89849,60	35,24	51	50	2550	
2 - MC5-80 (3)	21/10/2020	16950	75393,60	30,77	49	50	2450	