



HAL
open science

Etude de l'influence de matériaux alternatifs sur les propriétés des mortiers mousse, en vue de leur valorisation (sédiments de dragage, mâchefers et fibre de verre)

Hamza Elmoueden

► To cite this version:

Hamza Elmoueden. Etude de l'influence de matériaux alternatifs sur les propriétés des mortiers mousse, en vue de leur valorisation (sédiments de dragage, mâchefers et fibre de verre). Matériaux. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai, 2021. Français. NNT : 2021MTLD0007 . tel-03881339

HAL Id: tel-03881339

<https://theses.hal.science/tel-03881339v1>

Submitted on 1 Dec 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : 2021MTLD0007
IMT NORD EUROPE



UNIVERSITÉ DE LILLE



THÈSE

Présentée en vue
d'obtenir le grade de

DOCTEUR

En
Sciences pour l'ingénieur
Spécialité : Génie Civil
Par

Hamza ELMOUEDEN

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE
DÉLIVRÉ PAR L'IMT Nord Europe

Titre de la thèse :

*Étude de l'influence de matériaux alternatifs sur les propriétés
des bétons mousse, en vue de leur valorisation (sédiments de
dragage, mâchefers et fibre de verre)*

Soutenue le 17/12/2021 devant le jury d'examen :

Présidente de jury	<i>Nadia SAIYOURI, professeure, Université de Bordeaux</i>
Rapporteur	<i>Fabrice BERNARD, professeure, INSA Rennes</i>
Examineur	<i>Rose-Marie DHEILLY, Professeure, L'Université de Picardie Jules Verne</i>
Examineur	<i>Ammar YAHIA, professeur, l'Université de Sherbrooke</i>
Directeur de thèse	<i>Mahfoud BENZERZOUR, Professeur, IMT Nord Europe</i>
Co-Directeur de thèse	<i>Nor-Edine ABRIAK, professeur, IMT Nord Europe</i>

Laboratoire d'accueil : Laboratoire du Département Génie Civil et Environnemental de l'IMT Nord Europe
École Doctorale SPI 072 (Univ. Lille, Univ. Artois, ULCO, Univ. Polyt. Hauts de Fr., Centrale Lille, IMT Nord Europe)

REMERCIEMENTS

Avant tout, je te remercie toi qui viens de lire mon manuscrit de thèse et je remercie également tous ceux qui m'ont soutenu pour arriver à ce travail. Merci à ma petite famille ma femme qui m'ont donné tout le courage et l'amour dont j'avais besoin pendant ces trois ans de thèse. Je remercie également mes parents, mes frères et ma sœur pour leurs encouragements tout au long de mon parcours académique.

Merci à mes directeurs de thèse, **Mahfoud BENZERZOUR** et **N-Edine ABRIAK**, ainsi qu'à mes encadrants, **Mouhamadou AMAR** et **Agnès ZAMBON**, pour leurs efforts et leur présence en première ligne de cette thèse de doctorat.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des personnes qui m'ont fait l'honneur d'être membres de mon jury. Je remercie **Nadia SAIYOURI**, pour avoir accepté de présider ce jury et de synthétiser les rapports. J'adresse également toute ma gratitude à **Fabrice BERNARD** pour avoir rapporté mon travail.

Merci aussi à **Rose-Marie DHEILLY** et **Ammar YAHIA** d'avoir accepté l'invitation pour assister à mon jury en tant qu'examineurs et pour leurs échanges enrichissants.

Mes remerciements vont à tous les doctorants et les assistants du LGCgE – IMT Lille Douai. Merci à Johanna, Guillaume, Damien et Mickaël pour leurs conseils et leurs disponibilités durant mes travaux pratiques. Merci également à ceux avec qui j'ai collaboré : Abdelhadi, Bader, Fouad... Et je dédie ce travail à tous les anonymes : amis, camarades que je n'ai pas cités mais qui ont contribué à la réussite de ce travail par leur soutien et leur présence. Ils se reconnaîtront.

Merci !

RESUME

L'utilisation de matériaux recyclés dans les bétons en remplacement du sable permet de répondre à un double enjeu : la nécessité de préserver la ressource naturelle menacée d'épuisement et la possibilité de régler la problématique de l'accumulation des déchets.

L'étude, réalisée en partenariat avec le laboratoire de génie civil et géo-environnement, a pour objet d'évaluer l'effet de trois matériaux recyclés sur les propriétés du béton mousse en substitution au sable. Ces trois matériaux recyclés sont les sédiments marins issus du dragage, les mâchefers d'incinération des déchets ménagers, et la fibre de verre recyclée. Le choix s'est porté sur le béton mousse car il permet de réaliser des économies en énergie et en coût. En effet la présence de volumes d'air créés par la mousse, lui confère une faible densité, des propriétés d'isolation thermique et une bonne ouvrabilité. L'objectif attendu de ce travail est de déterminer comment les matériaux recyclés impactent les propriétés du béton mousse et de montrer s'ils peuvent constituer des alternatives intéressants au sable. Pour cela, il a été choisi d'adopter une approche analytique consistant à étudier chaque élément séparément et à observer son effet sur les autres éléments. L'étude a été menée en deux temps :

- une étude préalable des propriétés des matériaux et de leur interaction avec la mousse.
- une analyse comparative des propriétés des bétons mousse dans laquelle le taux de substitution et la teneur en mousse ont été variés. L'effet des matériaux seul sur le mélange, l'effet de la mousse seule sur le mélange et enfin l'effet des matériaux sur le mélange avec mousse ont été étudiés.

L'expérimentation a montré que les sédiments peuvent constituer d'une très bonne alternative au sable. Ils présentent en effet de bien meilleures performances mécaniques, une meilleure ouvrabilité, un meilleur rapport résistance/densité, et ce sans altération des propriétés d'isolation thermique, leur permettant une utilisation plus structurelle. Une modélisation des effets et une optimisation de la formulation ont été proposées. Les résultats des mâchefers se sont révélés concluants. Les béton mousse obtenus ont présenté des propriétés variables selon le taux de substitution adopté. Cela a permis de conclure qu'ils pouvaient se substituer parfaitement au sable pour diverses applications. Il serait intéressant d'expérimenter un plus grand nombre de formulations de béton mousse à comme cela a été fait pour les sédiments. Les résultats sur la fibre de verre recyclé sont intéressants mais moins concluants que les sédiments et les mâchefers. Les bétons mousse obtenus sont plus légers et plus isolants pour des taux de substitution supérieurs à un certain seuil. Cependant les fibres ne semblent pas constituer un renfort et présenter de bénéfice mécanique.

Mots clés : béton mousse, matériaux recyclés, sédiments de dragage marin, mâchefers d'incinération des déchets ménagers, fibre de verre recyclée, fibres de verre résine polyester recyclées, substitution au sable, ouvrabilité, structure porale, densité, résistance mécanique, conductivité thermique.

ABSTRACT

The use of recycled materials in concrete in place of sand makes it possible to meet a double challenge: the need to preserve natural resources threatened with depletion and the possibility of solving the problem of waste accumulation.

The study, carried out in partnership with the Civil and Geo-environmental Engineering Laboratory, aims to assess the effect of three recycled materials on the properties of foam concrete in substitution for sand. These three recycled materials are dredged marine sediments, household waste incineration chocks, and recycled glass fiber. Foam concrete was chosen because it saves energy and costs. The presence of volumes of air created by the foam gives it a low density, thermal insulation properties and a good working ability. The expected objective of this work is to determine how recycled materials impact the properties of foam concrete and to show if they can be interesting alternatives to sand. To this end, it was decided to adopt an analytical approach consisting of studying each element separately and observing its effect on the other elements. The study was conducted in two phases:

- a preliminary study of the properties of materials and their interaction with foam.
- a comparative analysis of the properties of foam concretes in which the substitution rate and foam content were varied. The effect of the materials alone on the mixture, the effect of the foam alone on the mixture and finally the effect of the materials on the foam mixture were studied.

The experiment showed that sediments can be a very good alternative to sand. They have a much better mechanical performance, a better opening, a better resistance/density ratio, and this without altering the thermal insulation properties, allowing them a more structural use. Effects modelling and formulation optimization were proposed. The results of the chowers were conclusive. The foam concrete obtained showed variable properties depending on the rate of substitution adopted. This led to the conclusion that they could be perfectly substituted for sand for various applications. It would be interesting to experiment with more foam concrete formulations as has been done for sediment. The results on recycled fibreglass are interesting but less conclusive than sediments and chowers. The foam concretes obtained are lighter and more insulating for substitution rates higher than a certain threshold. However the fibers do not seem to constitute a reinforcement and present mechanical benefit.

Table des matières

<i>Remerciements</i>	2
<i>Résumé</i>	3
<i>Abstract</i>	4
<i>Liste des figures</i>	9
<i>Liste des tableaux</i>	15
<i>liste des abréviations</i>	17
<i>Introduction</i>	18
Problématique	18
Description du sujet de recherche	18
Organisation de la thèse	19
Partie 1 <i>Revue de littérature</i>	21
1. Béton mousse	22
1.1 Vieillissement de la mousse.....	22
1.2 Les particules solides.....	24
1.3 Facteurs influençant les propriétés des bétons mousse.....	27
2. Béton à base des matériaux alternatif	29
2.1 Les sédiments de dragage.....	30
2.2 Les mâchefers d'incinération de déchets non dangereux (MIDND).....	34
2.3 La fibre de verre recyclée.....	41
Partie 2 <i>Matériaux et méthode</i>	44
1. La démarche scientifique	45
2. Matériaux utilisés	46
2.1 Le ciment.....	46
2.2 L'eau.....	46
2.3 Le sable.....	46
2.4 L'agent moussant.....	46
2.5 Les matériaux recyclés.....	46
3. Descriptif des essais et mesures	48
3.1 Caractérisation des matériaux.....	48
3.2 Essais d'interactions mousse-particules solides.....	51
3. Caractérisation des matériaux	51
3.1 Caractérisation des sédiments.....	51
3.2 Caractérisation des mâchefers.....	56
3.3 Caractérisation de la fibre de verre.....	61
3.4 Caractérisation du sable.....	63
3.5 Caractérisation du ciment.....	64
4. Essais d'interaction mousse- particules solides	65
4.1 Résultats.....	65
4.2 Analyse des résultats.....	66
4.3 Conclusion.....	70
5. Essais de formulation	70
5.1 L'ouvrabilité.....	70
5.2 La densité à l'état frais.....	71
5.3 L'air occlus.....	71
5.4 Caractérisation de la structure porale.....	71

5.5	La résistance à la compression	77
5.6	La conductivité thermique	77
6.	Méthode de formulation	77
6.1	Préparation et malaxage	77
6.2	Dosage	80
Partie 3	<i>caractérisation des mortier mousse à base de sédiment.....</i>	82
1.	Dosage de référence.....	83
2.	À l'état frais : Air occlus et masse volumique.....	84
2.1	Description des résultats	84
2.2	Interprétation et discussion	86
2.3	Conclusion	87
3.	À l'état frais : Ouvrabilité	87
3.1	Résultats et analyse des effets	87
3.2	Conclusion	92
4.	À l'état durci : Structure porale	93
4.1	Résultats et analyse des effets	94
5.	À l'état durci : Densité sèche	104
5.1	Résultats et analyse des effets	104
5.2	Interprétation et discussion	107
5.3	Conclusion	109
6.	À l'état durci : Résistance à la compression	109
6.1	Résultats et analyse des effets	110
6.2	Résultats de l'évolution de la résistance mécanique	113
6.3	Interprétation et discussion	114
6.4	Conclusion	116
7.	À l'état durci : Conductivité thermique	117
7.1	Résultats et analyse des effets	117
7.2	Interprétation et discussion	119
7.3	Conclusion	121
8.	Étude comparative des propriétés	121
8.1	Résultats de la modélisation des effets.....	123
8.2	Analyse des modèles de régression.....	127
8.3	Optimisation et application	129
8.4	Conclusion sur les sédiments	134
Partie 4	<i>caractérisation des mortier mousse à base de mâchefer.....</i>	137
1.	Dosage de référence.....	138
2.	À l'état frais : Air occlus – Densité	138
2.1	Résultats et analyse des effets	138
2.2	Interprétation et discussion	141
2.3	Conclusion	142
3.	À l'état frais : Ouvrabilité	143
3.1	Résultats et analyse des effets	143
3.2	Interprétation et discussion	147
3.3	Conclusion	149
4.	À l'état durci : Structure porale	150
4.1	Résultats et analyse des effets	150
4.2	Interprétation et discussion	158
4.3	Conclusion	159
5.	À l'état durci : Densité sèche	160
5.1	Résultats et analyse des effets	160

5.2	Interprétation et discussion	163
5.3	Conclusion	164
6.	À l'état durci : Résistance à la compression	164
6.1	Résultats et analyse des effets	164
6.2	Résultats de l'évolution de la résistance mécanique	167
6.3	Interprétation et discussion	168
6.4	Conclusion	171
7.	À l'état durci : Conductivité thermique	171
7.1	Résultats et analyse des effets	171
7.2	Interprétation et discussion	174
7.3	Conclusion	176
8.	Étude comparative des propriétés	177
8.1	Conclusion sur les mâchefers	177
Partie 4 caractérisation des mortier mousse à base de fibre de verre		180
1.	Dosage de référence.....	181
2.	À l'état frais : Air occlus et Densité	181
2.1	Résultats et analyse des effets	181
2.2	Interprétation et discussion	185
2.3	Conclusion	185
3.	À l'état durci : Ouvrabilité	186
3.1	Résultats et analyse des effets	186
3.2	Interprétation et discussion	190
3.3	Conclusion	191
4.	À l'état durci : Structure porale	191
4.1	Résultats et analyse des effets	192
4.2	Interprétation et discussion	200
4.3	Conclusion	200
5.	À l'état durci : densité sèche.....	200
5.1	Résultats et analyse des effets	200
5.2	Interprétation et discussion	203
5.3	Conclusion	205
6.	À l'état durci : La résistance à la compression.....	205
6.1	Résultats et analyse des effets	205
6.2	Résultats de l'évolution de la résistance mécanique	208
6.3	Interprétation et discussion	209
6.4	Conclusion	212
7.	À l'état durci : La résistance en flexion.....	212
7.1	Résultats et analyse des effets	212
7.2	Interprétation et discussion	215
7.3	Conclusion	217
8.	À l'état durci : La conductivité thermique	217
8.1	Résultats et analyse des effets	217
8.2	Interprétation et discussion	220
8.3	Conclusion	222
9.	Étude comparative des propriétés	222
10.	Conclusion sur la fibre de verre	223
Partie5 Étude comparative des 3 matériaux recyclés.....		226
1.	Propriétés des matériaux.....	227
2.	Propriétés des bétons mousse	227

3. Comparaison des effets	231
4. Conclusion générale	233
<i>Références</i>	235
<i>Annexes</i>	247
Annexe 1 Le malaxage rapide	247

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Structure de la mousse [6]	23
Figure 2. Drainage [201]	23
Figure 3. coalescence[204].....	24
Figure 4. Effet Marangoni [202]	24
Figure 5. Différentes configurations de la stabilisation d'un film par des particules [11]	25
Figure 6. Interactions Particule / Bulle.....	26
Figure 7. Schéma de la structure cristalline en feuillet d'une argile (bentonite) [69]	32
Figure 8. L'eau dans les sédiments	33
Figure 9. Synoptique de production de MIDND élaborés [203].....	36
Figure 10. Schéma des processus de recyclage mécanique des composites thermodurcissables	41
Figure 11. : Schéma de la démarche scientifique.....	45
Figure 12. Séparation des fibres en laboratoire.....	48
Figure 13. Classification GTR des sols en fonction de Vbs.....	50
Figure 14. Distribution granulométrique comparée	52
Figure 15. Analyse ATG des sédiments.....	54
Figure 16. Analyse cristallographique DRX sur le sédiment.....	55
Figure 17. Les particules de mâchefer	57
Figure 18. Distribution granulométrique comparée mâchefers- sable	57
Figure 19. Analyse ATG de Mâchefer	59
Figure 20. Courbe de distribution de la longueur des fibres	62
Figure 21. Observation de la fibre de verre au microscope optique	62
Figure 22. Distribution granulométrique comparée	64
Figure 23. Analyse DRX.....	64
Figure 24. Distribution granulaire de ciment CEM I 42.5R.....	65
Figure 25. Analyse ATG de ciment CEM I 42.5R.....	65
Figure 26. Volume de mousse en fonction du temps	66
Figure 27. Stabilité de la mousse vierge en fonction du temps.....	67
Figure 28. Stabilité de la mousse avec sédiments en fonction du temps	68
Figure 29. Stabilité de la mousse avec mâchefers en fonction du temps	68
Figure 30. Observation de la forme des grains de mâchefers avec le microscope optique.....	69
Figure 31. Stabilité de la mousse avec fibre de verre en fonction du temps.....	69
Figure 32. Observation de la forme des particules de la fibre de verre avec le microscope optique.....	69
Figure 33. Mini cône MBE	70
Figure 34. La balance D	71
Figure 35. Aéromètre	71
Figure 36. Prosimètre à mercure/ AutopreV- version 9605	72
Figure 37. Phénomène de bouteille d'encre	73
Figure 38. ULTRATOM Système de tomographie par rayons X	74
Figure 39. Principe du traitement d'image par tomographie	74
Figure 40. Coupes 2D s avant traitement	75
Figure 41. Traitement d'images (segmentation par apprentissage)	75
Figure 42. Coupes 3D après traitement.....	75
Figure 43. Principe du traitement d'image par microscope.....	76
Figure 44. Gamme de tailles des pores couverte par les 3 techniques de la mesure de la porosité	76
Figure 45. La presse INSTRON 5500 R	77

Figure 46. Analyseur thermique Hot Disk TPS2200	77
Figure 47. Préparation des bétons mousse	78
Figure 48. Générateur de mousse JFG 200 (b) mousse obtenue	79
Figure 49. Type des batteurs	80
Figure 50. Schéma de la méthode de calcul des dosages massiques des constituants	81
Figure 51. Courbe de régression densité à l'état frais en fonction de l'air occlus	85
Figure 52. Variation de l'air occlus et densité à l'état frais en fonction des sédiments (formulations avec mousse 75%)	85
Figure 53. Variation de l'air occlus et densité à l'état frais en fonction de la mousse (formulations sans sédiments)	86
Figure 54 : Variation de l'air occlus et densité à l'état frais par rapport aux formulations sans sédiments	86
Figure 55. Variation de l'étalement en fonction des sédiments	88
Figure 56. Variation de l'étalement en fonction de la mousse	88
Figure 57. Variation de l'étalement par rapport aux formulations sans sédiments	89
Figure 58. (a) Distribution étalement en fonction mousse (b) Distribution étalement en fonction sédiments	89
Figure 59. Diagramme de Pareto des effets des sédiments et mousse sur l'étalement	90
Figure 60. Évolution de l'étalement dans le temps en fonction des sédiments	90
Figure 61. Variations temps de prise en fonction de la mousse et de sédiment	91
Figure 62. Courbe de régression étalement en fonction de l'air occlus (formulations avec mousse 75%)	91
Figure 63 : Courbes comparatives des techniques de mesure de la porosité	93
Figure 64 : Variation de la porosité en fonction des sédiments	94
Figure 65. Variation de la porosité en fonction de la mousse	95
Figure 66 : Variation de la porosité par rapport aux formulations sans sédiments	95
Figure 67. (a) Distribution porosité en fonction mousse (b) Distribution porosité en fonction sédiments	96
Figure 68. Diagramme de Pareto des effets des sédiments et mousse sur la porosité	97
Figure 69. Variation du diamètre et circularité des pores et surface spécifique en fonction des sédiments	98
Figure 70. Variation du diamètre et circularité des pores et surface spécifique en fonction de la mousse	98
Figure 71. Courbe distribution des pores en fonction de la substitution - formulations sans mousse (PAM)	99
Figure 72. Courbes distribution de la taille des pores en fonction des sédiments -formulations avec mousse (PAM)	99
Figure 73. Histogrammes distribution de la taille des pores en fonction des sédiments (Tomographie)	100
Figure 74. Histogrammes distribution de la circularité des pores en fonction des sédiments (Tomographie)	100
Figure 75. Plans de coupe MEB de la structure porale en présence de la mousse et des sédiments	101
Figure 76. Courbe distribution de la taille des pores en fonction de la mousse – formulations sas sédiments (PAM)	101
Figure 77. Images tridimensionnelles du réseau poreux en 3D (tomographie)	102
Figure 78. Plans de coupe microscopiques de la structure porale (formulation sans sédiments) (microscope optique)	103
Figure 79. Variation de la densité en fonction des sédiments	105
Figure 80. Variation de la densité en fonction de la mousse	105

Figure 81. Variation de la densité par rapport aux formulations de référence sans sédiments .	106
Figure 82. (a) Distribution densité en fonction sédiments (b) distribution densité en fonction mousse.....	106
Figure 83. Diagramme de Pareto des effets des sédiments et mousse sur la densité	107
Figure 84. Courbe de régression densité en fonction de la porosité	108
Figure 85. Courbes de régression densité en fonction du diamètre circularité et surface spécifique	108
Figure 86. Variation de la résistance en fonction des sédiments	111
Figure 87. Variation de la résistance en fonction de la mousse	111
Figure 88. Variation de la densité par rapport aux formulations de référence sans sédiments .	112
Figure 89. (a) distribution résistance en fonction sédiments (b) distribution résistance en fonction mousse.....	112
Figure 90. Diagramme de Pareto des effets des sédiments et mousse sur la résistance.....	113
Figure 91. Comparaison des 3 résistances à 7, 28 et 60 jours formulation sans mousse	114
Figure 92. Comparaison des 3 résistances à 7, 28 et 60 jours formulation avec mousse 75% .	114
Figure 93. Courbes de régression résistance en fonction du diamètre	115
Figure 94. Courbe de régression résistance en fonction de la porosité	115
Figure 95. Courbe de régression résistance en fonction de la densité.....	116
Figure 96. Variation de la conductivité thermique en fonction de la mousse	118
Figure 97. Variation de la conductivité thermique par rapport aux formulations sans sédiments	118
Figure 98. Distribution λ en fonction sédiments (b) distribution λ en fonction mousse.....	118
Figure 99. Diagramme de Pareto des effets des sédiments et mousse sur la conductivité thermique.....	119
Figure 100. Courbe de régression conductivité thermique en fonction de la porosité.....	120
Figure 101. Courbe de régression Conductivité thermique - Densité	120
Figure 102. Graphique de corrélation entre mousse et sédiments.....	124
Figure 103: Diagramme Pareto	126
Figure 104: Diagramme Pareto	126
Figure 105 : Diagramme de Pareto	127
Figure 106. Les graphes surface 3D et les équations de régression	128
Figure 107. Comparaison entre les valeurs prédictives et expérimentales	129
Figure 108. Overlay plot résistance maximale	131
Figure 109. Overlay plot résistance maximale + masse volumique minimale + mousse minimale.....	132
Figure 110. Overlay plot résistance maximale + masse volumique minimale + mousse minimale+ taux de substitution des sédiments maximal.....	133
Figure 111. Les formulations M25%, M50%, M75% et M100%	134
Figure 112. Rapport Résistance/Densité	135
Figure 113. L'effet des sédiments sur les propriétés de béton mousse	135
Figure 114. : Courbe de régression densité à l'état frais en fonction de l'air occlus	139
Figure 115. Variation de l'air occlus et densité à l'état frais en fonction des mâchefers	140
Figure 116. Variation de l'air occlus et densité à l'état frais par rapport aux formulations de référence (M0%Mch0% et M75%Mch0%)	140
Figure 117. Variation de l'air occlus et densité à l'état frais en fonction de la mousse.....	140
Figure 118. (a) Distribution air occlus en fonction mâchefers (b) Distribution air occlus en fonction mousse.....	141
Figure 119. : Diagramme de Pareto des effets des mâchefers et mousse sur l'air occlus.....	141
Figure 120 : Variation étalement en fonction de la mousse.....	144
Figure 121. Variation de l'étalement en fonction des mâchefers.....	144

Figure 122. Variation de l'étalement par rapport aux formulations sans mâchefers	145
Figure 123. (a) Distribution étalement en fonction mâchefers (b) Distribution étalement en fonction mousse.....	145
Figure 124. Diagramme de Pareto des effets des mâchefers et mousse sur l'étalement.....	146
Figure 125. Variations temps de prise en fonction de la mousse et mâchefers.....	147
Figure 126. Variations temps de prise en fonction de la mousse et de mâchefers.....	147
Figure 127. Courbe de régression étalement en fonction de l'air occlus	148
Figure 128. Courbes comparatives des techniques de mesure de la porosité	150
Figure 129. Variation de la porosité en fonction des mâchefers.....	151
Figure 130. Variation de la porosité en fonction de la mousse	152
Figure 131. Variation de la porosité par rapport aux formulations sans mâchefers.....	152
Figure 132. (a) Distribution porosité en fonction mâchefers (b) Distribution porosité en fonction mousse.....	152
Figure 133. Diagramme de Pareto des effets des mâchefers et mousse sur la porosité.....	153
Figure 134. Variation diamètre et circularité des pores et surface spécifique en fonction des mâchefers	154
Figure 135. Variation diamètre et circularité des pores et surface spécifique en fonction de la mousse.....	154
Figure 136. Courbe distribution des pores en fonction de la substitution - formulations sans mousse (PAM).....	155
Figure 137. Courbes distribution de la taille des pores en fonction de la substitution - formulations avec mousse (PAM).....	156
Figure 138. Histogrammes distribution de la taille des pores en fonction des mâchefers	156
Figure 139. Histogrammes distribution de la circularité des pores en fonction des sédiments	156
Figure 140. Représentation tomographique en 3 D de réseau poreux	158
Figure 141. Variation de la densité en fonction des mâchefers	160
Figure 142. Variation de la densité en fonction de la mousse.....	161
Figure 143. Variation de la densité par rapport aux formulations de référence sans mâchefers	161
Figure 144. (a) Distribution densité en fonction mâchefers (b) Distribution densité en fonction mousse.....	162
Figure 145. Diagramme de Pareto des effets des mâchefers et mousse sur la densité.....	162
Figure 147. Courbe de régression densité en fonction de la porosité	163
Figure 146. Courbes de régression densité en fonction de circularité	163
Figure 148. Variation de la résistance en fonction des mâchefers	165
Figure 149. Variation de la résistance en fonction de la mousse	166
Figure 150. Variation de la densité par rapport aux formulations de référence sans sédiments	166
Figure 151. (a) Distribution résistance en fonction mâchefers (b) Distribution résistance en fonction mousse.....	166
Figure 152. Diagramme de Pareto des effets des mâchefers et mousse sur la résistance	167
Figure 153. Comparaison des 3 résistances à 7, 28 et 60 jours.....	168
Figure 154. Rapport des résistances à la résistance finale (60jours).....	168
Figure 155. Courbe de régression résistance en fonction de la porosité	169
Figure 156. Courbes de régression résistance en fonction de circularité	170
Figure 157. Courbe de régression Résistance à la compression - Densité.....	171
Figure 158. Variation de la conductivité thermique en fonction de la mousse	172
Figure 159. Variation de la conductivité thermique en fonction des mâchefers.....	173
Figure 160. Variation de la conductivité thermique par rapport aux formulations sans mâchefers	173

Figure 161. Distribution λ en fonction mâchefers (b) Distribution λ en fonction mousse.....	173
Figure 162. Diagramme de Pareto des effets des mâchefers et mousse sur la conductivité thermique.....	174
Figure 163. Courbe de régression conductivité thermique en fonction de la porosité.....	175
Figure 164. Courbes de régression conductivité en fonction de circularité	175
Figure 165. Courbe de régression Conductivité thermique - Densité	176
Figure 166 : Rapport Résistance - Densité.....	178
Figure 167. L'effet des mâchefers sur les propriétés de béton mousse.....	178
Figure 168. Courbe de régression densité à l'état frais en fonction de l'air occlus	182
Figure 169. Variation de l'air occlus et densité à l'état frais en fonction de la fibre de verre ..	183
Figure 170. Variation de l'air occlus et densité à l'état frais en fonction de la mousse.....	183
Figure 171. Variation de l'air occlus et densité à l'état frais par rapport aux formulations sans fibre	183
Figure 172. (a) Distribution air occlus en fonction fibre (b) Distribution air occlus en fonction mousse.....	184
Figure 173. Diagramme de Pareto des effets de la mousse et fibre sur l'air occlus	184
Figure 174. Variation de l'étalement en fonction de la fibre	187
Figure 175. Variation de l'étalement en fonction de la mousse.....	187
Figure 176. Variation de l'étalement par rapport aux formulations sans fibre	188
Figure 177. (a) Distribution étalement en fonction fibre (b) Distribution étalement en fonction mousse.....	188
Figure 178. Diagramme de Pareto des effets de la mousse et de la fibre sur l'étalement.....	189
Figure 179. Évolution de l'étalement dans le temps en fonction de la fibre.....	189
Figure 180. Variations temps de prise en fonction de la mousse et de la fibre.....	190
Figure 181. Courbe de régression étalement en fonction de l'air occlus	190
Figure 182. Courbes comparatives des techniques de mesure de la porosité	192
Figure 183. Variation de la porosité en fonction de la fibre	193
Figure 184. Variation de la porosité en fonction de la mousse	193
Figure 185. Variation de la porosité par rapport aux formulations sans fibre	194
Figure 186. (a) Distribution porosité en fonction fibre (b) Distribution porosité en fonction mousse.....	194
Figure 187. Diagramme de Pareto des effets de la mousse et de la fibre sur la porosité.....	195
Figure 188. Variation diamètre des pores et surface spécifique en fonction de la fibre	196
Figure 189. Variation diamètre des pores et surface spécifique en fonction de la mousse.....	196
Figure 190. Variation circularité des pores en fonction de la fibre.....	197
Figure 191. Courbe distribution des pores en fonction de la substitution - formulations sans mousse (PAM).....	198
Figure 192. Courbes distribution de la taille des pores en fonction de la substitution - formulations avec mousse (PAM).....	198
Figure 193. Histogrammes distribution de la taille des pores en fonction de la fibre (Tomographie).....	198
Figure 194. Histogrammes distribution de la circularité des pores en fonction de la fibre (Tomographie).....	199
Figure 195. Variation de la densité en fonction de la fibre	201
Figure 196. Variation de la densité en fonction de la mousse.....	202
Figure 197. Variation de la densité par rapport aux formulations sans fibre	202
Figure 198. Distribution densité en fonction fibre (b) Distribution densité en fonction mousse	203
Figure 199. Diagramme de Pareto des effets de la fibre et mousse sur la densité	203
Figure 200. Courbe de régression densité en fonction de la porosité	204

Figure 201. Courbes de régression densité en fonction du diamètre circularité et surface spécifique	204
Figure 202. Variation de la résistance compression en fonction de la fibre	206
Figure 203. Variation de la résistance compression en fonction de la mousse	207
Figure 204. Variation de la résistance compression par rapport aux formulations sans fibre ..	207
Figure 205. (a) Distribution Rc en fonction fibre (b) Distribution Rc en fonction mousse	207
Figure 206. Diagramme de Pareto des effets de la mousse et de la fibre sur la Rc	208
Figure 207. Comparaison des 3 résistances à 7, 28 et 60 jours (formulations avec et sans mousse).....	209
Figure 208 Rapport des résistances à la résistance finale (60jours).....	209
Figure 209. Courbe de régression Rc on en fonction de la porosité	210
Figure 210. Courbes de régression Rc en fonction du diamètre, circularité et surface spécifique	210
Figure 211. Courbe de régression Résistance à la compression - Densité.....	211
Figure 212. Variation de la résistance flexion en fonction de la fibre	213
Figure 213. Variation de la résistance flexion en fonction de la mousse.....	213
Figure 214. Variation de la résistance flexion par rapport aux formulations sans fibre	214
Figure 215. (a) Distribution Rf en fonction fibre (b) Distribution Rf en fonction mousse.....	214
Figure 216. Diagramme de Pareto des effets de la mousse et de la fibre sur la Rf.....	215
Figure 217. Courbe de régression Rf en fonction de la porosité.....	215
Figure 218. Courbes de régression Rf en fonction du diamètre, circularité et surface spécifique	216
Figure 219. Courbe de régression Résistance à la flexion - Densité.....	217
Figure 220. Variation de la conductivité thermique en fonction de la fibre	218
Figure 221. Variation de la conductivité thermique en fonction de la mousse	219
Figure 222. Variation de la conductivité thermique par rapport aux formulations sans fibre ..	219
Figure 223. (a) Distribution λ en fonction fibre (b) Distribution λ en fonction mousse	220
Figure 224. Diagramme de Pareto des effets de la fibre et mousse sur la conductivité thermique	220
Figure 225. Courbe de régression conductivité thermique en fonction de la porosité.....	221
Figure 226. Courbes de régression conductivité thermique en fonction du diamètre, circularité et surface spécifique	221
Figure 227. Courbe de régression Conductivité thermique - Densité	222
Figure 228. Rapport Résistance/Densité	224
Figure 229. L'effet des fibres sur les propriétés de béton mousse.....	225
Figure 230. Granulométrie comparée.....	227
Figure 231. Graphe synthétique comparatif de la variation des propriétés par rapport aux formulations de références	228
Figure 232. Graphes détaillées comparatifs de la variation des propriétés par rapport aux formulations de références	229
Figure 233. L'effet des sédiments sur les propriétés de béton mousse	230
Figure 234. L'effet des mâchefers sur les propriétés de béton mousse.....	230
Figure 235. L'effet des fibres sur les propriétés de béton mousse.....	230
Figure 236. : Comparatif global des effets	232
Figure 237. L'effet du temps de malaxage sur la masse volumique	247

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Composition élémentaire moyenne d'un mâchefer [111][112].	37
Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques des mâchefers (étude Norlia Mohammad Ibrahim et al [125])	40
Tableau 3 : Formulations testées dans l'étude de Norlia Mohammad Ibrahim et al [125]	40
Tableau 4. Caractéristiques granulométriques pour les sédiments et sable	52
Tableau 5. Coefficient d'uniformité et de courbure pour les sédiments et sable	52
Tableau 6. Caractéristiques physiques pour les sédiments et sable	53
Tableau 7. Composition chimique des oxydes dans le sédiment en % en masse	54
Tableau 8. Composition chimique des éléments dans le sédiment en % en masse.	54
Tableau 9. Contaminants minéraux et seuils des sédiments et déchets (en mg/kg) avec L/S=10	55
Tableau 10. Contaminants organiques en mg/kg avec L/S=10	56
Tableau 11. Caractéristiques granulométriques pour les mâchefers et sable	57
Tableau 12. Coefficient d'uniformité et de courbure pour les sédiments et sable	58
Tableau 13. Caractéristiques physiques pour les mâchefers et sable	58
Tableau 14. Composition chimique des oxydes dans le sédiment en % en masse	59
Tableau 15. Composition chimique des éléments dans le sédiment en % en masse.	59
Tableau 16. Contaminants minéraux et seuils de pollution et utilisation routière (en (mg/kg) avec L/S=10.	61
Tableau 17. Contaminants organiques en mg/KG avec L/S=10	61
Tableau 18. Composition chimique des oxydes dans le sable	64
Tableau 19. Paramétré physique spécifique de ciment	65
Tableau 20. Composition chimique atomique des CEM I 42.5 R.	65
Tableau 21. Composition chimique des oxydes dans CEM I 42.5 R.	65
Tableau 22. Composition de Bogue du ciment	65
Tableau 23. Masse volumique pour chaque type des batteurs	80
Tableau 24. Compositions pour 1 m ³ de béton mousse sur la base de ciment CEM I.	84
Tableau 25. Statistiques de l'étalement	88
Tableau 26. Écarts type étalement (effet de la mousse)	89
Tableau 27. Écarts type étalement (effet des sédiments)	89
Tableau 28. Statistiques de porosité PAE	95
Tableau 29. (a) écarts type porosité effet de la mousse (b) et effet des sédiments	96
Tableau 30. Statistiques de densité	106
Tableau 31. (a) écarts type densité (effet des sédiments) (b) écarts type densité (effet de la mousse).	106
Tableau 32. Statistiques de la résistance	112
Tableau 33. (a gauche) écarts type résistance (effet des sédiments) (à droite) écarts type résistance (effet de la mousse)	113
Tableau 34. (a) écarts type λ (effet des sédiments) (b) écarts type λ (effet de la mousse).	119
Tableau 35. Statistiques globales	121
Tableau 36. Comparaison coefficients de variation (moyenne).	122
Tableau 37. Statistiques (effet sédiments).	122
Tableau 38. Statistiques (effet mousse).	122
Tableau 39. Statistiques (M75%)	123
Tableau 40. Synthèse du modèle	124
Tableau 41. ANOVA.	125
Tableau 42. Coefficients de régression	125
Tableau 43. Comparaison entre les valeurs prédictives et expérimentales	128

Tableau 44. Résultats d'optimisation obtenus selon les critères précités	130
Tableau 45. Résistance maximale	131
Tableau 46. Résistance maximale + masse volumique minimale + mousse minimale	132
Tableau 47. Résistance maximale + masse volumique minimale + mousse minimale+ taux de substitution des sédiments maximal	133
Tableau 48. Les 3 formulations optimisées.....	136
Tableau 49. Compositions pour 1 m3 de béton mousse sur la base de ciment CEM I	138
Tableau 50. (a) écarts type air occlus (effet des mâchefers) (b) écarts type air occlus (effet de la mousse).....	141
Tableau 51. (a) écarts type étalement (effet es mâchefers (b) écarts type étalement (effet de la mousse).....	145
Tableau 52. (a) écarts type porosité (effet mâchefers) (b) écarts type porosité (effet de la mousse).....	153
Tableau 53. (a) écarts type densité (effet des mâchefers) (b) écarts type densité (effet de la mousse).....	162
Tableau 54. (a) écarts type résistance (effet des mâchefers) (b) écarts type résistance (effet de la mousse).....	167
Tableau 55. (a) écarts type λ (effet des mâchefers) (b) écarts type λ (effet de la mousse)	174
Tableau 56. Statistiques (M75%)	177
Tableau 57. Compositions pour 1 m3 de béton mousse sur la base de ciment CEM I	181
Tableau 58. (a) écarts type air occlus (effet de la fibre) (b) écarts type air occlus (effet de la mousse).....	184
Tableau 59. (a) écarts type étalement (effet de la fibre) (b) écarts type étalement (effet de la mousse).....	188
Tableau 60. (a) écarts type porosité (effet fibre) (b) écarts type porosité (effet de la mousse)	194
Tableau 61. Écarts type densité (effet de la fibre) (b) écarts type densité (effet de la mousse).....	203
Tableau 62. (a) écarts type Rc (effet de la fibre) (b) écarts type Rc (effet de la mousse).....	208
Tableau 63. (a) écarts type Rf (effet de la fibre) (b) écarts Rf (effet de la mousse)	214
Tableau 64. (a) écarts type λ (effet de la fibre) (b) écarts type λ (effet de la mousse).....	220
Tableau 65. Statistiques (M75%)	223
Tableau 66. 4.1 Propriétés des matériaux	227
Tableau 67. Statistiques des propriétés	231

LISTE DES ABREVIATIONS

λ : conductivité thermique

E/C : Eau/Ciment

G/C : Granulat/ciment

E_{eff} : eau efficace

M% : fraction volumique de la mousse

Mch% : fraction massique des mâchefers

S% : fraction massique des sédiments

Fv% : fraction volumique de la fibre de verre

Rc : Résistance à la compression

Rf : Résistance à la flexion

PAM : porosité par intrusion du mercure

PAE : porosité accessible à l'eau

L/S : Liquide / Solide

FX : fluorescence des rayons x

VBS : La valeur au bleu de méthylène

EcTyp : écart type

VarCoeff : coefficient de variance

INTRODUCTION

Problématique

Le sable est la deuxième ressource naturelle la plus exploitée dans le monde après l'eau. La demande en sable a triplé en 20 ans et ne cesse d'augmenter surtout dans le domaine de génie civil. 40 milliards de tonnes de sable sont utilisées par an dans le monde et 383 millions de tonnes en France. Le secteur du BTP est incontestablement le plus grand consommateur de cette ressource : 30 milliards de tonnes de sable servent à fabriquer du béton et 30 000 tonnes de sable sont nécessaires pour construire 1 km d'autoroute. La consommation effrénée du sable a conduit à l'épuisement des réserves. Le dernier rapport de l'ONU Environnement « Sable et développement durable » publié en 2019 a tiré la sonnette d'alarme sur la surconsommation du sable, l'épuisement progressif des réserves et les déséquilibres écologiques résultant de l'extraction du sable des plages, des rivières et des carrières (érosion des côtes, destruction de la biodiversité inondations, inondations et sécheresses, pollution des nappes phréatiques). Confronté aux difficultés d'approvisionnement et de coûts, le secteur du BTP s'est vu contraint d'explorer une autre ressource plus accessible et plus disponible que sont les déchets. Cette piste permet de répondre à une double problématique : l'épuisement des ressources naturelles et l'accumulation des déchets (plus de 320 millions de tonnes produits en 2016). L'utilisation de déchets valorisés comme matière première alternative dans le béton a fait l'objet de nombreux projets et travaux de recherche à l'échelle mondiale et également en France. Ces travaux de recherche ont abouti au développement de produits alternatifs intéressants techniquement et économiquement tels que les bétons composés à 80% de granulats recyclés issus de la déconstruction ou les matériaux en technique routière incorporant des mâchefers. Néanmoins le taux de substitution du sable par des matériaux recyclés dans les bétons reste très insuffisant. Pour y remédier, l'industrie du béton a fortement adhéré au programme gouvernemental pour développer l'incorporation d'un plus grand volume de matières premières recyclées dans les produits finis [1].

Description du sujet de recherche

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude qui fait partie d'un programme de recherche sur le développement de bétons à base de matériaux recyclés élaboré par l'institut Mines Télécom Nord Europe en partenariat avec le laboratoire de génie civil et géo-environnement installé dans la région Hauts de France.

L'objet de l'étude est précisément d'évaluer l'effet de la substitution du sable par trois matériaux recyclés sur les propriétés du béton mousse : les sédiments de dragage marins, les mâchefers issus de l'incinération des déchets ménagers et la fibre de verre recyclée (sous forme de fibres recouvertes de polyester) en vue de leur valorisation dans le secteur de bâtiment et génie civil.

L'objectif attendu de ce travail, est de déterminer comment les matériaux recyclés impactent les propriétés et le comportement du béton mousse et de montrer s'ils peuvent constituer des alternatives intéressantes au sable. L'idée est donc de conclure sur leur potentiel à être incorporés en quantité suffisamment importante dans le béton mousse sans altérer les propriétés intrinsèques du béton mousse.

Le choix s'est porté sur le béton mousse car il permet de réaliser des économies en énergie et en coût. En effet la présence de volumes d'air créés par la mousse lui confère une faible densité, des propriétés d'isolation thermique et une bonne ouvrabilité. De plus les faibles exigences en résistance du béton mousse permettent de pouvoir envisager une substitution du sable par les matériaux recyclés en grande quantité.

Cette recherche répond ainsi à un double enjeu :

1. La nécessité de développer plus de produits à base de matières premières recyclées
2. L'impératif de se conformer aux exigences de performance énergétique et environnementale de la réglementation environnementale RE2020 avec comme objectifs entre autres de diminuer l'impact carbone des bâtiments et de poursuivre l'amélioration de leur performance énergétique etc.

Ces trois matériaux recyclés dans le béton mousse ont été choisis pour plusieurs raisons :

1. Leur abondance dans la région (sédiments) ou leur présence sur l'ensemble du territoire (mâchefers),
2. Leur valorisation avérée ou prometteuse dans la filière béton,
3. Leur légèreté,

Ces matériaux recyclés n'ont pas subi de traitement afin de réduire le bilan économiquement et écologiquement.

Cette étude a pour premiers objectifs de :

- Évaluer l'effet de la substitution des matériaux recyclés sur les propriétés des bétons mousse ;
- Comprendre les facteurs d'influence ;
- Réussir à déterminer les relations de cause à effet.

Pour cela, les matériaux ont tout d'abord été caractérisés. Puis, chaque composant solide du béton a été testé avec la mousse seule, afin d'examiner les éléments pouvant perturber la stabilité de la mousse. Et enfin la troisième étape a consisté à effectuer une comparaison entre les propriétés des formulations testées (rhéologie, résistance, densité, conductivité thermique et structure porale), dans lesquelles ont été variés le taux de substitution et la teneur en mousse, sur la base d'une même matrice cimentaire (E/C et G/C fixes). Les effets de chaque matériau recyclé ainsi que les effets de la mousse sur les bétons mousse ont été analysés au moyen du logiciel de statistique et d'analyse Minitab. Pour les sédiments, disposant de plus de données par rapport au nombre de formulations testées, des modèles sur les propriétés en fonction de la variation simultanée de la mousse et des sédiments ont été proposés via le logiciel Design Expert. Une analyse de la covariance ainsi que quelques résultats optimisés (performances et taux de substitution) sont également présentées.

Organisation de la thèse

Le plan s'articule autour de trois grandes parties. La première partie expose l'essentiel des résultats des études et des publications sur le sujet permettant de positionner la recherche actuelle. Cela a permis de mieux anticiper sur les facteurs susceptibles d'influencer chaque propriété des bétons mousse et de mieux comprendre de quelles façons et pour quelles raisons les matériaux recyclés impactent les bétons mousse. La deuxième partie décrit la démarche scientifique adoptée

pour réussir à répondre à l'objectif attendu. Les différents procédés et modes opératoires liés à l'expérimentation y sont présentés. La troisième et dernière partie sera consacrée aux résultats de l'expérimentation qui seront présentés, interprétés et comparés aux résultats issus de la littérature. Dans l'ordre de leur exécution sera vu dans ce mémoire : la caractérisation des matériaux, les essais d'interaction mousse-particules solides et les essais de comparaison des propriétés pour chaque matériau recyclé.

PARTIE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Dans cette première partie, les travaux de recherche issus de la littérature étudiant les facteurs influençant les propriétés des bétons mousse (notamment la stabilité de la mousse) seront présentées. Et en deuxième partie, les études portant sur les bétons mousse seront présentées. Puis étant donné que très peu d'études ont porté sur l'incorporation de recyclât dans les bétons mousse, quelques études les plus proches possibles du sujet et de ce type de matériau seront présentées.

1. BETON MOUSSE

Le béton mousse, constitué de plus de 20% de volume d'air, est caractérisé par :

- Une rhéologie fluide et autoplaçante ;
- Une faible densité située entre 60 et 1850 kg/m³ (contre 2200 et 2400 kg/m³ pour les bétons ordinaires) ;
- Une conductivité thermique variant entre 0,1 et 0,7 W/mK (contre 1,75 W/mK pour les bétons ordinaires) ;
- Une résistance à la compression variante entre 0,5 et 10 MPa.

Les béton mousse ont conçus dans les pays nordiques et sont particulièrement appréciés dans cette région à climat froid pour leur bonne résistance aux cycles de gel-dégel [2][3]. Ces bétons font partie des bétons légers et se divisent en deux catégories en fonction de la technique de fabrication employée.

La méthode de malaxage rapide repose sur un fort ajout de tensioactif au sein de la suspension minérale qui permet la création d'une mousse minérale stable lorsque tous les composants sont mélangés. La méthode par mousse préformées aqueuse légère stable (sèche ou humide). Ces deux méthodes requièrent un maintien de la structure de la mousse minérale jusqu'à la prise. Cette stabilité dépend de plusieurs paramètres tels que la contrainte de cisaillement de la suspension, la nature et concentration du tensioactif, la structure moléculaire du tensioactif. D'après plusieurs études [4][5], la méthode mousse préformée est généralement préférée à la méthode de malaxage rapide, car elle requiert moins de tensioactif et sa mise en place est facilitée sur chantier lors de la construction

1.1 Vieillessement de la mousse

La mousse est stable quand il y a maintien des bulles d'air. Le maintien des bulles est assuré par la présence de molécules amphiphiles appelées tensioactifs. Sans la présence de molécules tensioactives, les petites bulles (forte pression interne) tendent à coalescer avec les plus grandes bulles (faible pression interne).

Les mousses liquides sont formées de bulles d'air dispersées dans une phase aqueuse. Il s'agit d'un réseau formé par une série de films liquides connectés entre eux, formés eux-mêmes par des interfaces gaz-liquide où se trouvent les stabilisants adsorbés appelés tensioactifs. Ce sont ces tensioactifs qui permettent la formation de bulles de gaz séparées par les films liquides et permet ainsi à la mousse de se « tenir » et de se stabiliser.

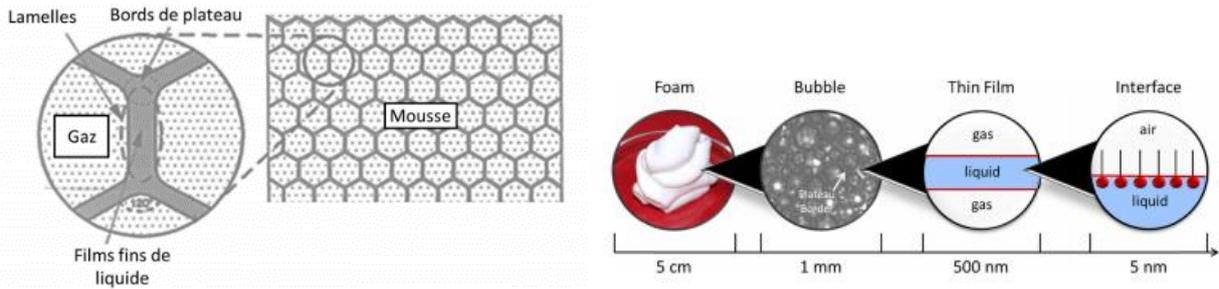


Figure 1. Structure de la mousse [6]

Il existe trois phénomènes qui risquent d'impacter la stabilité de la mousse :

1.1.1 Drainage :

Il existe dans les mousses un écoulement du liquide, qui a lieu dans le réseau de bords de Plateau et qui est initié par la gravité et ralenti par la succion capillaire ce qui induit une ségrégation. En réalité, le drainage dans une mousse se fait en deux étapes [7] : Au début, seule une partie de la mousse est impactée par le drainage. Il s'agit de la partie supérieure dans laquelle la fraction liquide diminue linéairement avec la « profondeur ». Dans la zone inférieure, la fraction liquide reste stationnaire et homogène. La limite entre la zone supérieure, sèche et la zone inférieure, humide est appelée front de drainage. La vitesse de ce front de drainage est constante au cours du temps. À un certain temps, le front de drainage atteint le bas de la mousse.

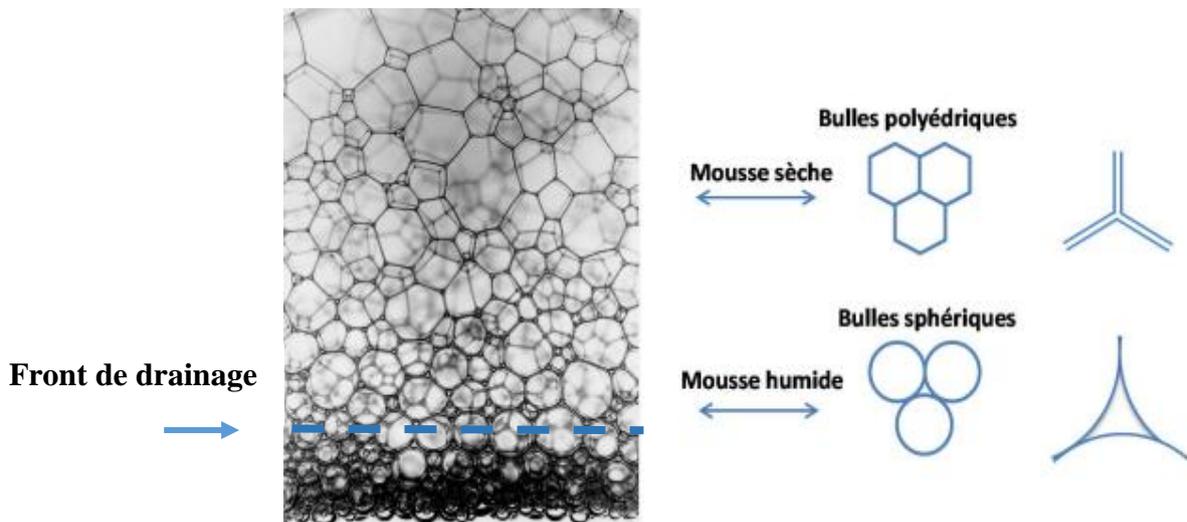


Figure 2. Drainage [201]

Les bulles des mousses sèches minimisent leur surface en partageant un film avec chacune de leurs voisines : elles prennent une forme polygonale. Dans les mousses humides, les films se gonflent de liquide, et les bulles s'éloignent. L'augmentation de la fraction liquide des mousses aqueuses modifie donc leur structure, mais les lois d'équilibre définies par Plateau pour les mousses sèches s'appliquent également aux mousses humides.

1.1.2 Coalescence :

Un phénomène beaucoup plus violent peut entraver la pérennité de la mousse, la coalescence. Sous l'effet de la gravité, la concentration en molécules tensioactives peut décroître,

ce qui fragilise le film ce processus conduit à la disparition de la mousse par diminution progressive du nombre total de bulles. Le film peut alors rompre ce qui entraîne la fusion des deux bulles voisines on dit qu'elles ont coalescé.



Figure 3. coalescence[204]

1.1.3 Le murissement

Dans une mousse, la pression varie d'une bulle à l'autre et c'est le moteur d'un flux de gaz au travers des films. Les bulles de forte pression se vident dans les bulles adjacentes de plus faible pression. Ce phénomène porte le nom de mûrissement. Statistiquement ce sont les bulles les plus petites et celles qui ont le moins de voisines qui perdent leur gaz. En moyenne, tout comme la coalescence, le mûrissement a donc pour effet l'augmentation du diamètre moyen des bulles et la diminution du nombre total de bulles au cours du temps, entraînant la disparition de la mousse à terme.

Le phénomène de coalescence, tout comme celui de mûrissement aboutit à une diminution du nombre total de bulles, bien que les phénomènes soient tout à fait différents

1.1.4 Effet Marangoni / Diffusion

Au repos, les tensioactifs sont adsorbés sur les deux interfaces d'un film de mousse et sont en équilibre avec les tensioactifs présents dans le film. Lorsque le film est soumis à une

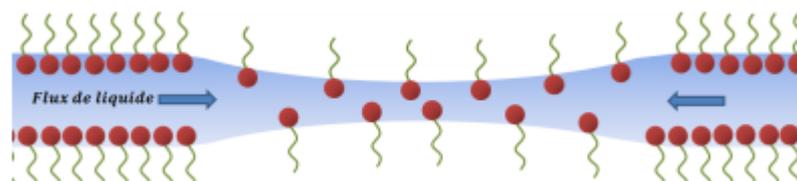


Figure 4. Effet Marangoni [202]

contrainte, cela entraîne une déformation de la surface et l'amincissement du film. La zone distendue est appauvrie en tensioactifs ce qui entraîne un gradient de la tension de surface. Le gradient provoque un déplacement des tensioactifs qui viennent se placer à l'interface et abaisser la tension de surface. Ils entraînent avec eux des molécules d'eau qui viennent épaissir le film et rétablir l'état d'équilibre initial.

1.2 Les particules solides

Les particules solides peuvent être utilisées dans les mousses soit pour supprimer le moussage, soit pour augmenter la stabilité de la mousse.

La manière dont les particules interagissent avec les bulles peuvent être grossièrement prédites par l'hydrophobicité ou l'hydrophilie des particules, qui est décrit par l'angle de contact des particules avec l'interface. Certaines particules solides peuvent être des agents anti-moussants, en créant un pont entre les deux surfaces du film[8]. Une particule hydrophobe serait principalement immergée dans la phase gazeuse et aurait un petit angle de contact, tandis que les particules hydrophiles resteraient principalement dans la phase aqueuse et ont de grands angles de contact[9][10]. L'efficacité de ces particules en tant qu'agent anti-moussant dépend de leur hydrophobicité, de leur forme et de leur taille.

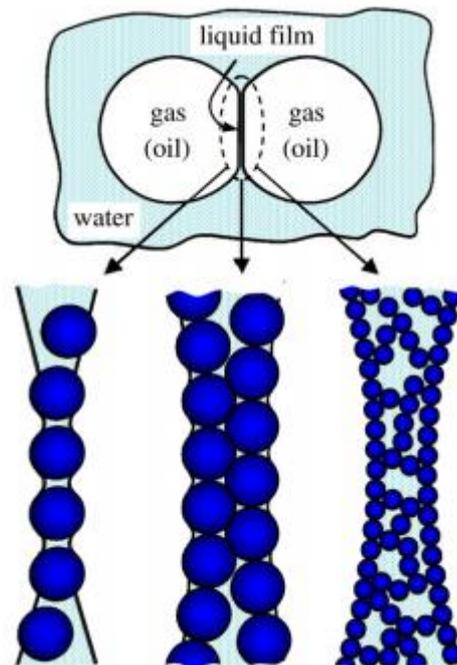


Figure 5. Différentes configurations de la stabilisation d'un film par des particules [11]

A l'interface, les particules peuvent alors se placer en monocouche, en bicouche, ou former des agrégats dans le film. Ces différentes configurations dépendent de leur angle de contact, de leur concentration ainsi que de leur taille [11]. Une étude de Tommy S. Horozov [12] Montre que la stabilité de la mousse repose non seulement sur la stabilité du film, mais également sur la stabilité des particules à l'interface, c'est-à-dire sur leur adsorption. La probabilité d'avoir une mousse stable dépend de ces deux événements.

La façon dont les particules se comportent au sein de la mousse dépend très étroitement de leur caractère hydrophile ou hydrophobe, ainsi que de leur taille et forme, et également de la façon dont elles interagissent avec les bulles au niveau des interfaces ou entre elles.

1- **Les particules hydrophiles**, ont tendance à rester principalement dans l'eau du film de la mousse. Si ce sont de petites particules, à mesure du drainage et de l'amincissement des films

de la mousse, leur concentration augmente, ce qui conduit à l'augmentation de la viscosité et le ralentissement du drainage. En plus les particules peuvent former une couche de protection de part et d'autre des films de la mousse, et empêcher ou réduire la diffusion d'air entre les bulles. Si elles sont de plus grande taille, elles sont expulsées du film de la mousse et viennent se loger dans les bords du plateau, où elles bloquent ou ralentissent le drainage.

2- si les **particules sont hydrophobes**, elles sont révoltées de l'eau et se placent principalement dans l'air, et créent un angle de contact $> 90^\circ$, la pression capillaire étant positive, le drainage est favorisé et entraîne le liquide loin de la particule. Et en raison du drainage, l'épaisseur des films de la mousse diminuera jusqu'à rupture entraînant alors la coalescence de bulles.

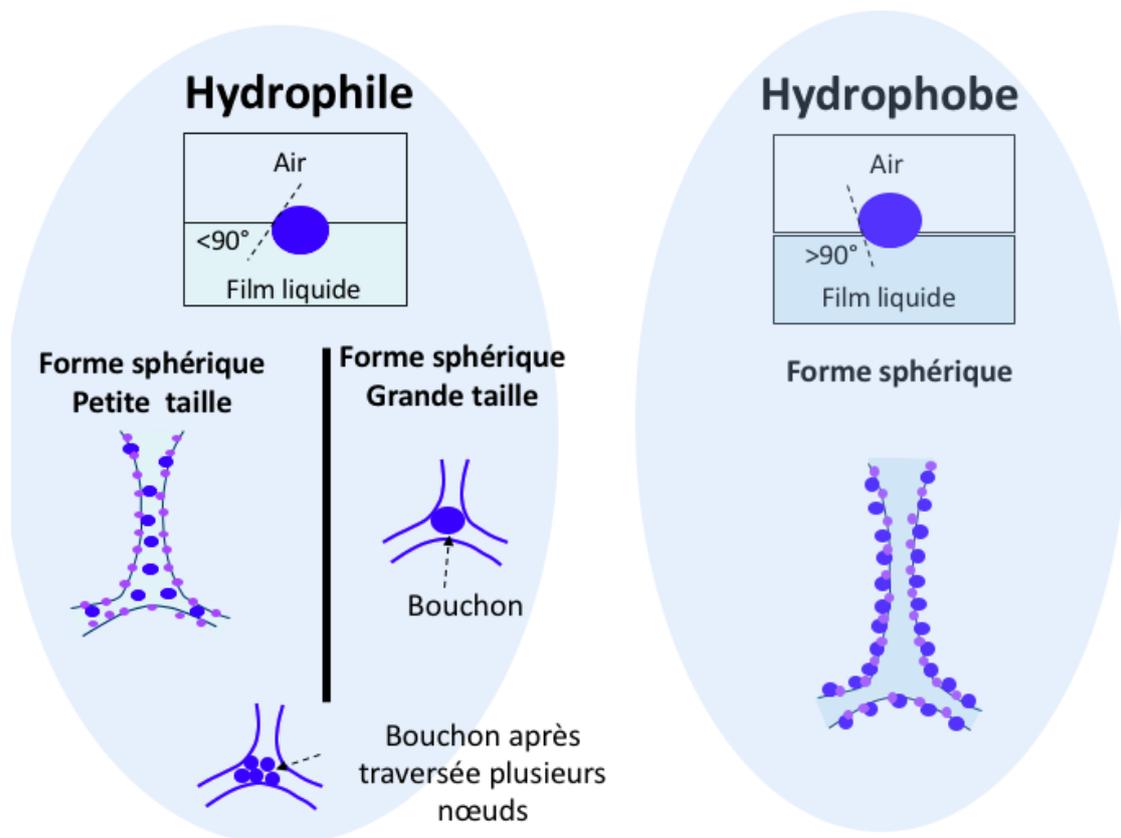


Figure 6. Interactions Particule / Bulle

C'est ce qui a été observé sur des mousses réalisées à partir de dispersions de nanoparticules de silice en présence d'un tensioactif cationique. Pour une concentration en particules suffisante, le drainage a été ralenti de manière importante grâce la formation de bouchons dans les bords de Plateau [13].

Le même phénomène d'encombrement des bords de Plateau a lieu dans les mousses de suspension. En effet, il existe une fraction volumique de particule critique au-delà de laquelle l'écoulement dans les nœuds et dans les bords de Plateau est bloqué. Cette valeur critique dépend de la taille des particules par rapport à l'aire du bord de Plateau.

1.3 Facteurs influençant les propriétés des bétons mousse

Ces propriétés sont essentiellement conférées par la structure porale (distribution des pores, leur taille et leur forme) qui est elle-même liée fortement à la stabilité de la mousse, c'est-à-dire au maintien des bulles d'air. Plus la mousse est stable, plus les pores sont uniformément distribués, fermés et de petite taille, meilleures sont les propriétés. Kunhanandan et Ramamurthy [14] ont montré que la taille, l'espacement et le volume des vides d'air dans le béton mousse influencent la densité. L'étude [15] a montré que la mousse doit être stable pour pouvoir résister à la pression du mortier jusqu'à la prise du ciment et pouvoir figer la structure porale formée. Selon Visague et Kearsley [16], une porosité élevée va fortement réduire la résistance à la compression surtout si les pores sont de grande taille. La conductivité thermique est essentiellement contrôlée par la porosité et la taille des pores. La transmission de chaleur est réduite ou arrêtée par les bulles d'air microscopiques. Batool et al. [17] ont étudié la répartition de la taille des vides d'air au sein d'une mousse à base de ciment. Ils ont observé que les mélanges avec des pores plus petits et une plage plus étroite de la distribution de taille des pores présentaient une conductivité thermique plus élevée et une densité plus faible. Une plus grande taille de pores et une distribution plus large des vides entraînent une conductivité thermique réduite. Dans l'étude [18], il a été observé une diminution de la conductivité thermique de 25 % pour un ajout de 20% d'air entraîné. Falliano et al., ont déclaré que les bulles d'air de plus petite taille du béton mousse extrudable le rendent plus résistant à la chaleur que celui du béton autoclavé aéré [19][20]. La position des pores et l'orientation relative affectent de manière significative la conductivité thermique du béton cellulaire. Si les pores sont disposés perpendiculairement à l'écoulement de la chaleur, la chaleur passera à travers les pores améliorant ainsi la résistance thermique. Une disposition des pores parallèle au flux de chaleur réduit la résistance thermique [20].

Ainsi plusieurs facteurs déterminent la stabilité la mousse :

La pression de génération de la mousse est un facteur de contrôle déterminant pour la densité de la mousse et la taille des bulles. Plus les bulles sont de petites tailles, plus la mousse est stable [14][21][22]. L'utilisation d'une pression trop basse génère une mousse qui pourra difficilement s'incorporer dans la pâte de mortier à l'état frais. Les bétons de mousse ainsi obtenus auront une structure poreuse peu significative. D'un autre côté, une pression trop élevée génère une turbulence dans le mélangeur et donne une mousse instable présentant densité élevée [23][24].

Les paramètres de malaxage (méthode de malaxage, type de malaxeur, vitesse et durée de malaxage) sont également des facteurs importants pour la stabilité de la mousse[25]. Karl et Worner [26] ont souligné que le malaxeur doit être capable de mélanger selon l'axe vertical afin d'éviter la séparation de la mousse légère en haut et des ingrédients du mortier plus lourds en bas. Avec un malaxeur à pâles (utilisé pour le mortier conventionnel) il a été observé que la mousse restait au-dessus du mélange en raison d'un malaxage incorrect. Le mélangeur à plateau avec bras rotatif s'est avéré être la meilleure option pour effectuer le malaxage d'un tel matériau. En effet ce type de dispositif est approprié en raison de la disposition du bras qui peut être placé à différents angles (les rotations dans le sens horaire et antihoraire sont possibles) [27]. En plus du

mélangeur à plateau, le mélangeur à palettes peut également être recommandé pour la méthode de production des mousses préformées [28]. Il a été constaté qu'un mélangeur standard à palettes à grande vitesse et un mélangeur à bac pourraient être des options appropriées pour la production de béton mélange-mousse [29]. Il a été rapporté qu'un malaxeur à hélice horizontale ayant une épaisseur de pôle de 0,75 pouce et une vitesse de rotation de 55 à 60 tr/min est généralement préféré pour la préparation du béton cellulaire [30]. Le malaxage du béton sur une durée très courte inférieure à 2 min conduit à un mélange non homogène [25] ; tandis qu'un malaxage prolongé supérieur à 6 min à grande vitesse conduit à la désagrégation de la mousse [29]. Le dosage de l'agent moussant a une influence importante sur la densité du béton mousse [31] et donc sur la structure porale et les propriétés qui en découlent. Une majorité de chercheurs ont signalé que le dosage en agent moussant a eu un effet significatif sur la porosité [32][33][34][35]. La résistance à la compression est principalement affectée par la teneur en mousse plutôt que par le rapport E/C [37]. Un excès d'agent moussant peut augmenter la taille des bulles, ce qui diminue la résistance en conséquence [38][33][32][34]

Le type d'agent moussant est également un facteur influençant la stabilité de la mousse. L'agent moussant à base de protéines produit des bulles d'air sphériques isolées, plus petites, et plus stables que les mousses synthétiques. Cela permet l'inclusion d'une plus grande quantité d'air lors de son incorporation avec le mortier à l'état frais. Cependant les mousses synthétiques donnent une plus grande expansion et donc une densité de la mousse plus faible [3][39]. L'agent moussant à base de protéines permet d'obtenir une meilleure résistance mécanique du béton mousse que l'agent moussant synthétique [36]. En revanche, une étude de Chao Sun et al [40] a montré que les agents moussants synthétiques confèrent une meilleure ouvrabilité aux bétons mousse en raison de leur teneur en eau plus élevée.

Des études ont rapporté qu'une faible **teneur en eau** poussait le ciment à absorber l'eau de la mousse et à rendre le mélange trop rigide, ce qui entraînait un éclatement des bulles et une dégénérescence rapide de la mousse. Cela provoque une perte en maniabilité [41] [42] et également une augmentation de la densité à l'état frais [41][43]. Une teneur en eau excessive peut provoquer une ségrégation du béton mousse pendant le coulage et affecter les performances d'ouvrabilité [44]. Le rapport E/C optimal doit être limité entre 0,5 et 0,6 comme suggéré par la British Cement Association [45]. L'utilisation de superplastifiants dans le béton mousse conduit à une meilleure stabilité et moins de fusion de bulles induisant une amélioration spectaculaire de la maniabilité et des propriétés rhéologiques [46]. A.Al-Shwaiter et al [47] ont trouvé que Le rapport E/C du béton mousse peut être réduit à 0,35 en ajoutant du polycarboxylate. Un rapport E/C élevé affecte également de manière significative la porosité du béton mousse [32]. Des travaux ont indiqué que lorsque le rapport E/C augmentait, la perméabilité et la distribution de la taille des pores des pâtes de ciment Portland avec mousse augmentaient. Ainsi des volumes considérables de pores plus grands étaient observés [48][35]. Une teneur en eau appropriée réduit les bulles de mousse de grande taille ce qui augmente la résistance à la compression [31].

Selon Nambiar et al [14], **le rapport S/C** a une influence sur la résistance obtenue par le béton mousse. Une étude a rapporté que l'influence de la teneur en sable n'impactait pas la résistance à la compression lorsqu'un rapport sable/ciment de 1 à 2 était utilisé [32].

Il a été observé que les matériaux **fins** pouvaient aider à une distribution régulière des pores permettant d'augmenter la résistance [49]. L'ajout d'une quantité excessive de sable grossier affecte la taille des pores et influence négativement la résistance [50][41][43]. De même, l'inclusion d'agrégats vitreux fins recyclés, d'agrégats de schiste expansé, de chaux, d'argile et d'agrégats de poussières de carrière peut augmenter la résistance en conséquence [51][52][53][54][55]. Étant donné que la phase de granulats grossiers est majoritairement absente dans le béton mousse, la charge se compose principalement uniquement de granulats fins dont le remplacement affecte également les propriétés thermiques [56].

La rapidité **de prise** du ciment permet de garantir la mousse stable [57].

Une étude de Cong et Bing [5] a montré que la chaux vive ajoutée au béton mousse, dégradait la stabilité de la mousse en endommageant et éclatant les bulles. La chaux vive a été ajoutée sous forme de poudre, comme second liant au béton mousse à base de sol, et l'agent moussant utilisé est à base de protéines. Ils ont montré que l'eau existant à la surface de la mousse maintenant la stabilité de la mousse, était consommée par la chaux vive suite à la réaction chimique : $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$, ce qui avait pour conséquence de déstabiliser la mousse. La conséquence constatée est une augmentation considérable de la densité : la chaux ajoutée à 5% puis à 15 % du ciment variait la densité de 1047 à 1650 kg/m³, soit une augmentation de 50% pour un 10% de chaux en plus. Ils ont utilisé un agent moussant à base de protéines. Ils ont montré par ailleurs que l'ajout de fumée de silice rendait les pores plus uniformes et fermés et de taille plus réduite, ce qui avait pour conséquence d'améliorer les propriétés de résistance et d'isolation thermique. Une autre étude a montré que la poudre de chaux avait la capacité de réduire la porosité supérieure à celle des cendres volantes en raison de ses fines particules qui pourraient améliorer la composition compacte de la microstructure du béton mousse durci [58].

2. BETON A BASE DES MATERIAUX ALTERNATIF

Plusieurs millions de tonnes de différents types de déchets sont générés chaque année dans le monde et cela devrait augmenter à l'avenir. La plupart de ces déchets sont mis en décharge ou incinérés, ce qui crée des problèmes environnementaux[59]. L'une des méthodes possibles d'utilisation de ces déchets consiste à les incorporer comme matériaux alternatives dans les bétons[60].

À cet égard, le béton mousse pourrait constituer un excellent moyen d'incorporer ces déchets dans un grand volume, principalement en raison des exigences de faible résistance du béton mousse. Un nombre important de recherches sont menées pour explorer l'idée d'intégrer des déchets dans le béton pré-moussé. Cependant, les connaissances limitées disponibles pour reconnaître l'utilisation de ces déchets et l'influence sur le béton mousse. En raison de la composition unique et des propriétés chimiques et physiques qui en résultent, ainsi que de la nature du remplacement, chaque type de déchets contribue différemment aux performances du béton mousse. Généralement, un béton mousse non porteur avec une faible conductivité

thermique, une faible densité et une résistance à la compression adéquate peut être produit en incorporant les déchets.

D'après la littérature les déchets et sous-produits provenant de différentes matières ont été utilisé dans le béton mousse pour remplacer partiellement ou totalement le ciment ou les agrégats. Généralement, la quantité de remplacement utilisant les déchets comme granulats (sable) est plus élevée que celle du remplacement du ciment. L'observation pour ce dernier est associée au niveau optimal de remplacement du ciment pour une réaction pouzzolanique efficace alors qu'un remplacement excessif entraînera une réduction significative de la résistance du béton mousse. En revanche, les sous-produits peuvent être plus facilement utilisés pour remplacer complètement les granulats (sable) dans le béton mousse afin de réduire la densité sans trop compromettre sa résistance.

2.1 Les sédiments de dragage

La définition couramment acceptée des sédiments est celle d'un dépôt de particules provenant de l'altération ou de la désagrégation de roches, et de la précipitation de matières en suspension en transit dans la colonne d'eau. Les sédiments sont composés des 3 phases physiques : une phase solide minérale et organique, une phase liquide composée des eaux interstitielles et une phase gazeuse.

Ces éléments jouent un rôle important sur les caractéristiques physiques mécaniques et environnementales du sédiment.

2.1.1 Phase solide du sédiment

Les principaux constituants de la phase solide responsables des formations superficielles peuvent être tant minéraux qu'organiques. Les minéraux primaires sont le fruit de la désagrégation des matériaux originels : silicates, carbonates, argiles notamment. Les minéraux secondaires, ou minéraux néoformés, sont le fruit de solutions à l'équilibre ou légèrement sursaturées: argiles néoformés, oxyhydroxydes de Fer, sels de redistribution (carbonates, sulfates, chlorures...), complexes organo-argileux, ou sulfures par exemple. On trouve également de la matière organique (MO) constituée de débris de plantes ou d'animaux, sous des formes plus ou moins décomposées. Il faut également tenir compte des matériaux anthropiques que l'on peut retrouver également en quantités variables dans les couches sédimentaires marines superficielles : polymères, verres, objets métalliques, etc.

2.1.1.1 Matière organique

La phase organique est en faible quantité par rapport à la phase minéralogique (10% à 30%) mais interagit très fortement avec cette dernière ce qui lui confère un rôle important dans les caractéristiques physiques des sédiments. La MO provient en grande partie du transfert des débris animaux et végétaux depuis la colonne qui s'accumulent dans les sédiments anaérobies du fait de l'activité microbienne oxydante réduite en présence d'O₂ [61] Une grande majorité de cette MO est présente sous forme de substances humiques, qui sont définies comme des molécules organiques associées à des particules minérales ou agglomérées entre elles[62]. Ainsi cette matière, constituée de polymères organiques comportant une grande densité de groupements

acides de type acides carboxyliques ou phénoliques seraient agrégées non pas en macropolymères mais sous la forme de supramolécules maintenues par des liaisons hydrogènes et par des forces hydrophobes [63]. Les substances humiques sont composées des humines, insolubles en milieu acide et alcalin, les acides humiques, solubles en milieu alcalin et les acides fulviques, solubles à la fois en milieu acide et alcalin [64]. La présence de sites à la fois hydrophiles et hydrophobes rend possible à la fois l'adsorption de substances organiques et d'ions métalliques dans les phases aqueuse et particulaire. Cette grande complexité rend difficile une étude des composés individuels de la MO, hormis quelques substances persistantes ou à la dégradation lente comme des polluants organiques anthropiques. Ainsi, on analyse couramment la MO par des groupes de composés partageant des caractéristiques communes [65].

2.1.1.2 Phase minérale

Parmi les minéraux que l'on retrouve majoritairement dans les sédiments, on notera le quartz, le feldspath, les carbonates et les argiles [66]. Les phases les plus réactives, à même d'influencer la mobilité des contaminants inorganiques, sont les argiles, les carbonates, les oxyhydroxydes de fer et de manganèse et les sulfures.

En pédologie, les argiles sont une classe de particules dont le diamètre n'excède pas 2 μm . en minéralogie, ce terme désigne spécifiquement une classe de minéraux composés de silicates d'aluminium hydratés appartenant à la famille des phyllosilicates. Cette appellation provient de leur structure cristalline organisée en feuillets. Construites par l'assemblage alternatif de couches tétraédriques $[\text{SiO}_4]^{4-}$ et de couches octaédriques $[\text{Al}(\text{OH})_6]^{3-}$ reliées entre elles, ces empilements créent des feuillets espacés de quelques Angströms où peuvent se loger divers cations par complexation de surface du fait de la présence de charge négative sur les feuillets Figure 7. La distinction entre ces diverses argiles se fait notamment sur l'arrangement et le nombre de ces couches [67]. Ce type de structure en couches successives leur confère des propriétés particulières, et notamment une grande surface spécifique (variable suivant les types d'argiles) offrant une importante interface d'échanges avec les polluants [68] Les phyllosilicates peuvent ainsi piéger des cations métalliques, ou les relarguer suivant les conditions environnantes.

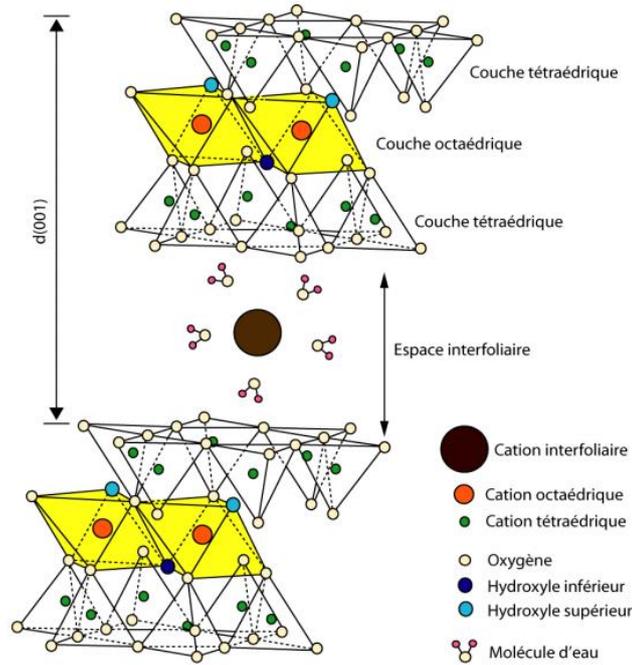


Figure 7. Schéma de la structure cristalline en feuillet d'une argile (bentonite) [69]

Les carbonates sont couramment retrouvés dans les sédiments. Ceux-ci jouent un rôle important dans les processus de sorption/désorption qui ont lieu au sein des sédiments du fait que leur équilibre de dissolution contrôle partiellement le pH à travers un effet tampon de l'acidité/basicité. De plus, les phases carbonatées sont susceptibles de fixer directement un certain nombre d'ions métalliques en précipitant sous forme de carbonates ou d'hydroxycarbonates [70][71][72][73]. Les principaux carbonates rencontrés sont la Calcite CaCO_3 et la Dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, ainsi que l'aragonite, un polymorphe de la calcite produit par les organismes marins (huîtres, moules, coquillages...).

De manière générale, les oxydes, oxyhydroxydes et hydroxydes sont fortement présents dans la lithosphère. Principalement formés de fer, d'aluminium ou de manganèse, ils abondent dans la fraction inférieure à $2\ \mu\text{m}$. La présence de groupement de surface $-\text{OH}$ leur confère des propriétés acido-basiques impliquées dans des mécanismes d'adsorption de cations métalliques [74]. Cette propriété fait des oxyhydroxydes l'un des éléments minéraux principaux contrôlant la mobilité des contaminants inorganiques [75][76]. Les sulfures constituent l'une des principales phases réactives des sédiments marins. Ils sont essentiellement insolubles, et formés par réduction en milieu anaérobie des ions sulfates. Ainsi, de par la grande affinité des sulfures avec certains ETM (Fe, Zn, Pb...) [77], la précipitation/oxydation des sulfures est l'une des clés du contrôle de la mobilité des polluants métalliques [72]

2.1.1.3 L'eau dans les sédiments

L'eau présente dans les sédiments peut être classée en quatre catégories :

- ✓ L'eau libre qui n'est pas liée aux fines qui peut être appelée aussi eau colloïdale dans laquelle les particules sont en suspension.
- ✓ L'eau capillaire qui est liée aux fines par des forces de capillarité. Cette eau crée entre les grains des forces d'attraction.

- ✓ L'eau adsorbée ou eau intercellulaire qui est liée chimiquement aux particules.

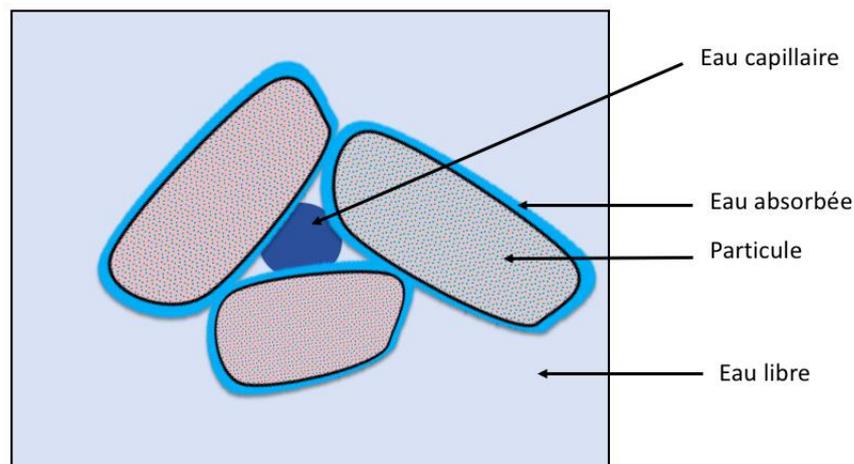


Figure 8. L'eau dans les sédiments

Il est à noter que l'eau présente dans les sédiments fait intervenir deux mécanismes de sorption différents ; l'absorption et l'adsorption. L'absorption correspond à un processus physique et chimique dans lequel les atomes, les molécules ou les ions pénètrent dans une phase gazeuse, liquide ou solide alors que l'adsorption correspond à une rétention en surface. Dans le cadre de notre étude le terme absorption sera utilisé pour faire référence à la capacité de gonflement des argiles au contact de l'eau.

2.1.2 Effet des Sédiments sur les propriétés des bétons mousse

De nombreuses études internationales indiquent diverses réutilisations bénéfiques des sédiments de dragage comme matière première dans la construction, à savoir : la construction de routes [78][79], la production de ciment [80][81][82][83][84], et le remplacement des agrégats dans la fabrication de mortier ou de béton [85][86][87][88]. Néanmoins, leur teneur en matière organique peut retarder la prise du béton et réduire la résistance [89][90][91][92][93]. Les fines et l'argile réduisent l'ouvrabilité en raison de leur surface spécifique et leur demande en eau. La résistance, le retrait et la durabilité du béton peuvent donc en être affectés [94][95].

À notre connaissance, il n'existe pas d'études qui se sont intéressées à proprement dit, à l'incorporation des sédiments de dragage marins en remplacement du sable dans les bétons mousse. Mais on peut évoquer deux études qui sont assez comparables à la nôtre :

L'étude de Agnès Zambon [96], traitant de la valorisation de la partie fine des sédiments en substitution des granulats (sol) dans le béton mousse a étudié l'influence du Zinc et du NaCl sur les propriétés du béton mousse. Pour cela 3 types de sol ont été préparés et comparés entre eux dont 2 contiennent du Zinc et de l'eau de gâchage saline (NaCl = 30g/L, zinc = 4g/L). L'étude a révélé plusieurs résultats intéressants. Le NaCl et le Zinc n'éclatent pas les bulles et n'impactent donc pas la densité. Le zinc a un effet retardateur sur la prise du ciment attribué à la formation de l'hydroxyde de Zinc. L'eau de gâchage saline n'a pas d'impact sur les performances mécaniques contrairement à ce qui était attendu. Le zinc diminue la résistance mécanique. Il est à noter que les sédiments utilisés sont de type argileux.

Dans la seconde étude[94], Xiaoyun Yang et al, ont utilisé les sédiments fluviaux comme addition au ciment dans les béton mousse. Ils ont ajouté la fumée de silice pour augmenter la résistance à la compression, et des superplastifiants pour augmenter l'ouvrabilité. Les teneurs en métaux lourds étaient relativement élevées (les concentrations d'As, de Cd, de Cu et de Zn étaient respectivement d'environ 95,0, 1,00, 580 et 1200 mg/ kg). La teneur en CaO, elle, était faible (de 1.39%). Les essais d'optimisation de formulation ont montré que l'ajout des sédiments dans le ciment diminuait la résistance à la compression (de 21,9 MPa à 7,25 MPa lorsque le pourcentage de sédiments par rapport au ciment augmentait de 30% à 70%). Corrélativement, la densité sèche a légèrement diminué de 1500 à 1310 kg/m³. L'ouvrabilité est quant à elle plus faible en raison de la forme irrégulière et de la forte absorption d'eau des sédiments fluviaux. La conductivité thermique diminue avec la substitution des sédiments sans ajout de mousse (de 0,591 à 0,439 W/mK pour un ajout de sédiments passant de 30% à 70%).

2.2 Les mâchefers d'incinération de déchets non dangereux (MIDND)

Les MIDND sont des résidus solides, dits « scories », récupérés en fin combustion dans des fours d'usine d'incinération, issus de la fraction collectée des ordures ménagères et en général plus ou moins mélangée à d'autres déchets issus des entreprises, commerces et administrations. Les mâchefers d'incinération de déchets non dangereux (MIDND) proviennent des Unités d'Incinération de Déchets non Dangereux (UIDND) ; certaines d'entre elles sont des Centres de Valorisation Énergétique (CVE).

Chaque année, près de 3 millions de tonnes de mâchefers sont produites par les 126 installations françaises de traitement thermique de déchets non dangereux qui traitent plus de 14 millions de tonnes de déchets[97]. Les MIDND représentent 20% des déchets incinérés en poids et 10% en volume. Deux millions de tonnes de graves de mâchefers sont recyclées chaque année après une phase de maturation et de préparation spécifique dans les 75 Installations de Maturation et d'Elaboration (IME) présentes en France en 2016[97].

Plusieurs paramètres majeurs influent sur les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques des MIDND : provenance/composition variable et tri sélectif des ordures ménagères en amont, choix du type d'incinérateur (technologie du four), paramètres de conduite (temps de séjour, excès d'air, etc.), mode de refroidissement, processus de maturation et type de séparateurs magnétiques utilisés[98][99].

2.2.1 Opérations de préparation et d'élaboration des mâchefers

Avant leur sortie de l'usine d'incinération, les MIDND bruts peuvent subir un certain nombre d'opérations d'homogénéisation. Ces opérations seront plus poussées ensuite dans des Installation de Maturation et en Installation de Maturation et d'Elaboration (IME)[100]. Les opérations pouvant être réalisées sur les MIDND dès leur sortie de four sont le criblage (opération permettant de débarrasser les MIDND des déchets les plus volumineux, notamment des déchets métalliques, et de briser d'éventuels blocs MIDND-déchets métalliques creux), le retrait des métaux ferreux par over-band et le retrait des métaux non-ferreux par machine séparatrice à courant de Foucault [101]. Les métaux séparés sont dirigés vers des filières de valorisation « matière », quel que soit le devenir envisagé pour les MIDND. Ces derniers peuvent être entreposés momentanément avant leur envoi vers une IME (connexe à l'installation soit externe

au site de l'unité de traitement thermique) ou un centre de stockage de déchets non dangereux (ou ISDND).

Les IME récupèrent les mâchefers issus des unités de traitement thermique pour les transformer en graves dans l'objectif de les recycler principalement en technique routière. L'opération d'élaboration repose sur une combinaison de traitements physiques et de traitements physico-chimiques avec pour objectif de produire un matériau granulaire alternatif à partir de mâchefers [102]. Les opérations qui sont le plus souvent réalisées sur les IME sont la maturation, le criblage, les opérations de concassage, l'extraction des imbrûlés de grandes tailles et l'extraction des métaux ferreux (MF) et des métaux non-ferreux (MNF). L'élaboration a lieu au cours de la maturation ou après.

2.2.1.1 Phase de maturation

Au cours de la maturation des mâchefers à l'air libre, un ensemble de réactions physico-chimiques ont lieu et reposent essentiellement sur une carbonatation de la chaux par le dioxyde de carbone atmosphérique, ainsi qu'une minéralisation des composés chimiques instables en sortie de l'incinération. Ces mécanismes de maturation conduisent à une diminution du potentiel d'hydrogène (pH) du mâchefer, ce qui a pour effet de réduire son potentiel polluant en rendant insolubles les hydroxydes de la plus grande partie des métaux lourds. Ils permettent également d'assurer une stabilité des caractéristiques géotechniques et environnementales des mâchefers en fin de maturation [103],[104]. Plus finement, diverses études ont permis de mieux comprendre ce processus physico-chimique [105], [106],[107],[108],. En sus du phénomène de lessivage des chlorures suite à la dissolution des sels (NaCl, KCl), la trempe des MIDND en sortie de four a pour effet la dissolution de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui constitue une réaction majeure de la phase de maturation. L'hydratation de la chaux CaO lors de la trempe est fortement exothermique. La dissolution de la portlandite libère du calcium et des ions OH^- conduisant à des pH très alcalins (> 12) favorisant la diffusion du CO_2 atmosphérique dans l'eau d'hydratation des MIDND sous-forme CO_3^{2-} , entraînant la précipitation de carbonates et notamment de la calcite CaCO_3 . La dissolution de CO_2 dans l'eau se traduit par une neutralisation progressive des ions OH^- . La baisse de pH induite par la carbonatation et la diminution des quantités de calcium libéré par la portlandite favorise la solubilisation du gypse CaSO_4 et le lessivage des sulfates. La baisse du pH conduit également à la diminution de la solubilité d'un certain nombre de métaux amphotères (notamment Pb et Cr) qui précipitent sous forme d'hydroxydes. Des métaux (Pb, Zn) peuvent aussi se trouver inclus dans la calcite néoformée.

2.2.1.2 Phase d'élaboration

Les opérations d'homogénéisation et de criblage réalisées sur les IME sont plus poussées que celles réalisées en sortie de four. Toutefois, elles ne se limitent pas forcément au criblage et au déferailage. Aussi, l'arrêté du 18/11/2011 [109] indique que « la phase d'élaboration au sein de l'IME comprend a minima un tri permettant d'extraire les matières indésirables dans le matériau routier, en particulier les métaux et les imbrûlés de grande taille ». Pour être homogène du point de vue terminologique, on dira que les matériaux issus d'une IME sont des « MIDND élaborés ». Les opérations visant à améliorer l'homogénéité et la qualité des MIDND en vue de leur utilisation en technique routière (principale filière de valorisation) sont :

- Le criblage ou scalpage, éventuellement complété par un concassage, en vue de faire rentrer le matériau dans un fuseau granulométrique de grave non traitée ;
- Le retrait des métaux ferreux par over-band ;
- Le retrait des métaux non-ferreux par machine à courant de Foucault ;
- Le retrait des imbrûlés résiduels par soufflage (papiers, cartons et plastiques).

Ces opérations peuvent être réalisées une ou plusieurs fois pour améliorer le résultat final et être conduites sur différentes fractions granulométriques des MIDND. Les matériaux extraits rejoignent des filières de valorisation matière. La Figure 9 présente le synoptique de production de mâchefers élaborés.

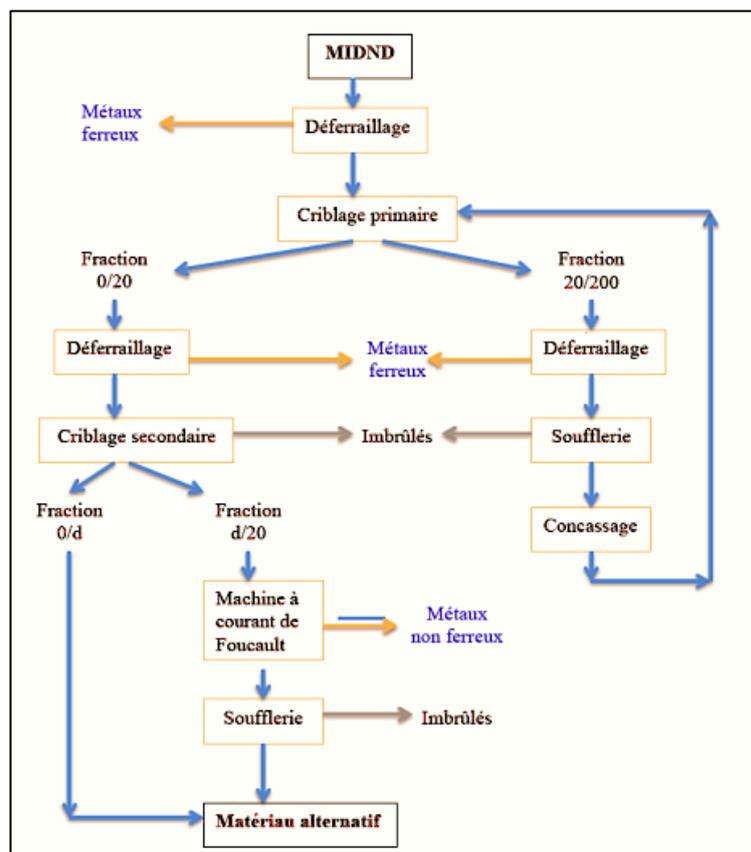


Figure 9. Synoptique de production de MIDND élaborés [203]

Au sein d'une IME, après maturation, les MIDND élaborés doivent vérifier les critères de recyclage liés notamment à leur usage routier, à leur comportement à la lixiviation et à leur teneur intrinsèque en éléments polluants. Les résultats des essais de lixiviation et d'analyse du contenu total doivent être conformes aux paramètres et seuils introduits par l'arrêté du 18/11/2011 [109]. Les MIDND élaborés doivent remplir au minimum les conditions des usages routiers de type 1 ou 2 définis par l'arrêté. L'appartenance des MIDND élaborés à ces types d'usage est déterminée par des analyses périodiques au stade de leur production. Les MIDND élaborés ne répondant pas aux seuils de ces usages routiers de type 1 ou 2 doivent rejoindre directement une Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND). L'arrêté du 18/11/2011 fixe la durée de stockage en IME à trois ans maximums. Passé ce délai, les lots de MIDND élaborés doivent être évacués vers une ISDND.

2.2.2 Caractérisation des MIDND : aspects physiques-chimiques, minéralogiques et environnementales

2.2.2.1 Caractérisation physico-chimique

La composition élémentaire des MIDND dépend de la composition des ordures incinérées, de la volatilité des éléments, du processus d'incinération (type de four, conduite du four). Elle peut donc varier dans le temps pour un site de production donné, et dans l'espace, d'un site de production à un autre. La composition d'un lot de MIDND évoluera aussi en fonction de l'efficacité des opérations de retrait des métaux et des imbrûlés [110]. Un même MIDND selon qu'il sera brut ou qu'il aura été plus ou moins élaboré aura donc une composition élémentaire et des caractéristiques physico-chimiques différentes. Il s'avère donc essentiel de préciser systématiquement le degré de préparation des matériaux [99]. Tableau 1 explicite la composition élémentaire moyenne d'un mâchefer selon les éléments majoritaires (> 10000 mg/kg), minoritaires (entre 1000 et 10000 mg/kg) et les éléments traces.

Tableau 1. Composition élémentaire moyenne d'un mâchefer [111][112].

Élément majoritaires	Éléments minoritaires	Élément traces	
O: oxygène	Mg: magnésium	Sn: étain	Co: cobalt
Si: silicium	Ti: titane	Sb: antimoine	Ce: cérium
Fe: fer	Cl: chlore	V: vanadium	Ag: argent
Ca: calcium	Mn: manganèse	Mo: molybdène	Hg: mercure
Al: aluminium	Ba: baryum	As: arsenic	B: bore
Na: sodium	Zn: zinc	Se: sélénium	Br: brome
K: potassium	Cu: cuivre	Sr: strontium	F: fluor
C: carbone	Pb: plomb	Ni: nickel	I: iode
	Cr: chrome		

Concernant les matières organiques, leur présence dans les mâchefers est liée à la nature des déchets introduits dans le four et aux conditions de fonctionnement du four (température, brassage, temps de séjour, aération). On observe ainsi souvent des imbrûlés dans les MIDND (papiers, cartons, fibres synthétiques, os, matières plastiques, caoutchouc, etc). Cette matière organique représente 0,5 à 5,5 % (exprimée en COT) et 1 à 6 % (exprimée en imbrûlés), de la masse sèche des MIDND, la solubilité du COT à l'issue de l'essai de lixiviation des MIDND s'étalant de 250 à 2000 mg/kg de matière sèche [113]. La circulaire du 9 Mai 1994 [114] demandait un taux d'imbrûlé inférieur à 5% pour les MIOM V et M et respectivement des seuils à 1500 mg/kg et 2000 mg/kg pour le COT. Le guide du Sétra d'octobre 2012 [115] précise que le taux d'imbrûlé est contrôlé par la mesure du COT ou la perte au feu. La matière organique dans les MIDND [113] est composée majoritairement de cellulose (74 %), puis de lignine (20 %), le reste (6%) étant composé essentiellement (à 95 %) de substances extractibles à l'eau (substances humiques, acides carboxyliques, composés hydroxylés). Enfin, les substances extractibles par solvants organiques (soit 0,3 % du total) sont des alcanes, des stéroïdes (biodégradables), des acides gras saturés et des polluants plus persistants tels des phtalates, mais

aussi des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et des composés organochlorés : polychlorodibenzodioxines (PCDD – dites « dioxines »), polychlorodibenzofuranes (PCDF – dites « furanes »), chlorophénols (CP), chlorobenzènes (CB) et polychlorures biphényles (PCB).

2.2.2.2 Caractérisation minéralogique

Les MIDND étant des matériaux complexes et instables à court et moyen termes, l'analyse minéralogique est indispensable à la compréhension de leur comportement, tant du point de vue de l'évolution de la solubilité des éléments qui les composent, que du point de vue de l'évolution de leurs propriétés mécaniques. Aussi, certaines substances peuvent en effet se trouver fixées dans des espèces minérales plus ou moins stables. De plus, le développement de certains minéraux au sein des MIDND peut faire évoluer leurs propriétés physiques (gonflement, rigidification par exemple). L'étude minéralogique des MIDND montre qu'ils sont constitués de trois types de minéraux [116], [117][118]:

- ✓ Des minéraux « reliques », initialement présents dans les déchets incinérés et non modifiés par l'incinération. Les minéraux reliques sont des minéraux constitutifs de roches naturelles comme les feldspaths potassiques, certains pyroxènes, le quartz, la biotite; ils proviennent aussi pour une part importante de verre alimentaire n'ayant pas fondu, et enfin de métaux.
- ✓ Des minéraux « de haute température » formés durant l'incinération à partir de la fusion d'une partie des déchets. Les minéraux de haute température sont principalement des silicates (olivine calcique, plagioclases, géhlénite, clinopyroxènes, pseudowollastonite) et des oxydes (hématite, magnétite, spinelle).
- ✓ Des minéraux « de basse température » pouvant commencer à se former dès la sortie du four et/ou se développer plus ou moins rapidement durant le processus de maturation. Les minéraux de basse température sont essentiellement des carbonates (calcite, sidérite), des sulfates (anhydrite, ettringite), des chlorures (halite, sylvite), des oxydes de fer.

Les MIDND sont constitués d'une phase scoriacée et d'une phase vitreuse. La phase scoriacée, hétérogène et de faible densité, concentre les résidus d'incinération : débris métalliques, débris potentiels de verre alimentaire, granulats naturels, fragments non transformés par l'incinération. Elle contient aussi des minéraux de haute température comme en particulier des phases couramment rencontrées dans les ciments (alite, larnite, portlandite). Elle contient enfin des minéraux de basse température : sulfates (anhydrite) et carbonates (calcite, sidérite). La phase vitreuse se forme à partir de la fusion de déchets et sa composition varie en fonction de la nature des déchets avec lesquels les débris de verre contenus dans les déchets sont mélangés. Les débris de verre atteignant leur point de fusion donneront par trempe du verre amorphe. Ceux qui auront le temps de cristalliser au cours de la phase refroidissement permettront la formation de minéraux de haute température au sein d'une phase vitreuse. Ces minéraux sont des aluminosilicates calciques ferrifères (olivine calcique, plagioclases, gehlenite, clinopyroxènes, pseudowollastonite). Ils présentent des formes dendritiques révélatrices d'un refroidissement rapide. Même si la plupart des études minéralogiques réalisées ont tenté d'évaluer l'abondance des différentes espèces observées, la variabilité et la complexité chimique des MIDND est telle que ces études sont encore insuffisamment nombreuses pour qu'il soit possible de fournir des pourcentages d'abondance moyenne des différentes espèces recensées. On peut simplement dire

que les principaux minéraux cristallisés présents dans les MIDND sont le quartz, les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, les chlorures, la portlandite, la calcite, l'anhydrite, ainsi que divers silicates. Des éléments comme Al, Cu et Fe notamment sont présents à l'état métallique. L'analyse minéralogique des MIDND révèle aussi dans certains cas [119][106][120][121] l'existence de quelques composés des ciments : C2S, C3S. Ceux-ci sont toutefois présents en trop faible quantité pour jouer un rôle dans la prise hydraulique des MIDND.

2.2.2.3 Caractérisation environnementale

Le potentiel polluant des mâchefers d'incinération est un critère discriminant pour statuer sur son utilisation ainsi que sur sa mise en stockage dans les sites appropriés. Dans un contexte volontaire de limiter l'impact sur l'environnement, les réglementations sur la caractérisation environnementale des MIDND ont évolué dans plusieurs pays et diffère d'un pays à l'autre[111]. Chaque pays a défini un cadre réglementaire et législatif sur la gestion des mâchefers dans l'optique d'identifier les matériaux valorisables et ceux non valorisables. En France, pour évaluer les caractéristiques environnementales des mâchefers élaborés par une valorisation en technique routière, l'arrêté du 18 novembre 2011 requiert l'essai de lixiviation issu de la norme NF EN 12457-2, appliquée sur un échantillon représentatif du lot à caractériser. Cette norme permet leur caractérisation par un essai en bûchée unique avec un rapport liquide-solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 4 mm (sans ou avec réduction de la granularité). En phase d'entreposage mais aussi en place, il est bien connu que les MIDND ont un caractère évolutif sur le plan mécanique et environnemental (impact sur le potentiel lixiviable) notamment du fait de réactions physico-chimiques internes. Trois stades peuvent se distinguer pour décrire les caractéristiques environnementales :

- ✓ Le stade du matériau frais (MIDND bruts) ;
- ✓ Le stade du matériau mûri (dits usuellement « mûré »), prêt à être utilisé (MIDND élaborés) ;
- ✓ Le stade du matériau en place dans lequel on ne distinguera pas de sous-phases malgré l'évolution probable du matériau sur plusieurs années (impact du vieillissement).

La description temporelle des caractéristiques environnementales des MIDND à différents moments, ramène au processus de maturation (et aux facteurs qui déterminent ces réactions). Aussi, les conditions réelles rencontrées par les mâchefers une fois incorporés dans la structure routière sont aujourd'hui a priori insuffisamment connues pour expliquer leur évolution en place. Ces conditions in situ peuvent aussi être différentes d'une application à une autre en fonction de l'infiltration des eaux de pluie, des teneurs en eau dans la chaussée, de la température, etc. Dans le cas des graves de MIDND, il convient de rappeler que si la question des risques pour la ressource en eau au se pose, celle pour l'air au niveau des scénarios d'entreposage et de chantier mérite tout autant d'être posée et évaluée dans la finalité d'assurer un cadre environnemental maîtrisé.

2.2.3 Effet des mâchefers sur les propriétés des bétons mousse

Plus de 3 millions de tonnes de mâchefers bruts, résidus provenant des Unités d'Incineration de Déchets non Dangereux sont produits chaque année en France. 15 à 25 % de ces déchets sont valorisés en techniques routières. Ils sont couramment utilisés en remblai, couche de forme ou

couche de fondation à faible trafic. Ils induisent en effet une bonne portance et une bonne traficabilité à condition que la teneur en eau ne soit pas excessive [122].

L'augmentation du temps de séjour permet de diminuer la quantité de carbone organique dans les mâchefers. Plusieurs paramètres peuvent influencer sur la qualité des mâchefers comme la présence de fines, le type d'extraction et le refroidissement.

La nature rugueuse des particules des mâchefers réduit le compactage et l'affaissement dans le béton ordinaire [123]. Une porosité plus élevée et une demande en eau plus élevée diminuent la résistance dans le béton. La résistance à la compression peut être améliorée en réduisant la demande en eau en utilisant des superplastifiants [124].

Le potentiel d'utilisation des mâchefers comme granulats pour les bétons mousse est très lié à la qualité du traitement en amont notamment la durée de maturation et la séparation des ferreux et non ferreux. Les métaux lourds et les imbrûlés contenus dans les mâchefers peuvent déstabiliser la mousse et affecter les performances du béton mousse [125]. Les particules de mâchefers, hautement poreuses, peuvent réduire le retrait dans le béton mousse [126].

Norlia Mohammad Ibrahim et al [125] sont les seuls à notre connaissance qui ont étudié l'effet de la substitution des mâchefers au sable sur les propriétés des bétons mousse. Les formulations expérimentées correspondent à un taux de substitution faible. Par rapport à la présente étude, les mâchefers utilisés dans l'étude de Norlia Mohammad Ibrahim et al [125] sont de diamètre similaire, contenant plus de ferreux et presque autant de non ferreux. La teneur en aluminium est la même. Les teneurs en zinc et en plomb sont plus importantes (Tableau 2). Ils ont subi une période de maturation de 15 jours seulement et ont subi un traitement à l'hydroxyde de sodium (NaOH), pour diminuer la teneur en chlorure et en aluminium, qui peuvent affecter les performances du béton mousse. Dans l'étude citée, il a été observé :

- ✓ Une diminution de l'ouvrabilité de 3.5% en moyenne avec la substitution,
- ✓ Une légère augmentation de la densité sèche de 1%,
- ✓ Une variation inconstante de la résistance (augmentation de 64% dès l'introduction des mâchefers à 5%, puis atténuation et diminution).

Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques des mâchefers (étude Norlia Mohammad Ibrahim et al [125])

	Diamètre	Ferreux	Non ferreux	Aluminium	Zinc	Plomb	Maturation
Présente étude	0,5-2 mm	2,7%	5,1%	4,4%	0,3%	0,6%	4 mois
Étude Norlia	0-2mm	9,5%	5,5%	4,6%	1,9%	0,1%	15 jours

Tableau 3 : Formulations testées dans l'étude de Norlia Mohammad Ibrahim et al [125]

	E/C	G/C	Formulations (mousse, mâchefers) testées
Présente étude	0,6	3	(75%,15%) / (75%,30%) / (75%,50%)
Étude Norlia	0,4	1	(62%,5%) / (67%,10%) / (73%,15%) / (83%,20%)

D'autres études ont été menés sur les mâchefers carbone comme granulat et ajout au ciment. Une étude sur l'évaluation de la faisabilité de l'utilisation des mâchefers des centrales électriques au charbon comme agrégats fins dans le béton mousse, a trouvé que les bétons à base des

mâchefers présentait une porosité plus élevée que celle du béton témoin. Un besoin en eau plus élevé pour atteindre la maniabilité du béton mousse a été observé [127].

Une autre étude a montré que la résistance à la compression des blocs des bétons mousse a augmenté avec l'augmentation des mâchefers d'incinération de carbone par rapport au ciment [128].

Une troisième étude a mis en évidence que ce sont les particules de mâchefer plutôt fines qui sont les plus appropriées pour l'utilisation des mâchefers d'incinération de carbone dans la production de blocs de béton mousse de maçonnerie de catégorie légère [129].

2.3 La fibre de verre recyclée

La fibre de verre telle qu'elle sera utilisée dans cette étude est issue du broyage des matériaux composites à base de matrice thermodurcissable (résine) renforcée de fibres de verre. Leur incorporation dans les bétons permettrait d'augmenter sa ductilité. Leur rôle principal serait de s'opposer à la propagation de fissures dans le béton et de transmettre les efforts à travers les fissures.

Les composites peuvent, en plus des fibres de verre et de la résine, contenir des charges minérales comme les carbonates, les silices, les talcs et les argiles. Les propriétés mécaniques du béton obtenu dépendent de l'adhésion des fibres à la matrice cimentaire ainsi que de l'orientation des fibres.

La fibre de verre utilisée dans cette recherche est une fibre de verre recyclée issue du recyclage de déchets composites. Le recyclage mécanique est le plus adapté aux composites fibres de verre. Deux types de traitement sont utilisés selon l'emploi souhaité du recyclat (Figure 10) :

- ✓ Pour une réutilisation, le déchet composite est déchiqueté et broyé deux fois pour réduire sa taille, puis tamisé pour obtenir une poudre et des fibres courtes réutilisables comme composite.
- ✓ Pour la fabrication du béton, le déchet composite est déchiqueté et broyé une seule fois, puis tamisé pour obtenir des fibres longues qui entreront dans la composition de certains bétons pour les renforcer.

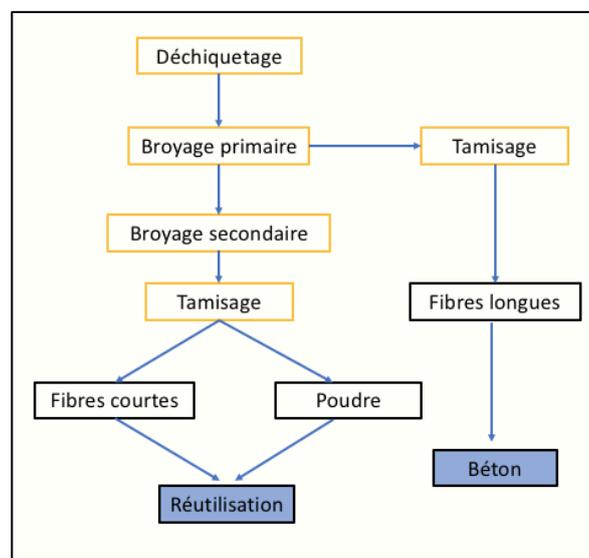


Figure 10. Schéma des processus de recyclage mécanique des composites thermodurcissables

Cette étape de traitement mécanique est déterminante pour la qualité du produit obtenu qui est directement liée au ratio fibres/résine et à la longueur résiduelle des fibres. La plupart des données publiées font mention de taux de substitution compris entre 5% et 30 % [130].

2.3.1 Effet de la fibre de verre sur les propriétés des bétons mousse

Dans la littérature, les fibres utilisées dans les bétons mousse sont des fibres synthétiques ou naturelles, à savoir : le verre résistant aux alcalis, le kénaf, l'acier, la fibre de palmier à huile et la fibre de polypropylène[39][131][132]. Le comité ACI 544 [133] suggère l'utilisation de fibres telles que les fibres de verre et les fibres synthétiques (fibres de polyamide, fibres de polypropylène et fibres d'alcool polyvinylique). Les fibres de carbone pourraient également être utilisées dans les bétons mousse mais elles ne sont pas recommandées en raison de leur coût élevé [134]. Les fibres d'acier ne sont pas non plus appropriées pour être utilisées dans les bétons mousse en raison de leur densité qui ne permet pas une bonne homogénéisation du mélange de béton [2]. En général, les fibres doivent avoir un module d'élasticité élevé et une certaine longueur pour participer à l'amélioration des performances mécaniques du béton.

Les fibres recyclées les plus fines contiennent davantage de polymère et de charge que le composite d'origine, alors que les plus grossières tendent à rassembler plus de fibres ainsi qu'à contenir des particules avec un plus grand rapport de longueur/diamètre. La nature fibreuse et la forme allongée des fibres recyclées de la fibre de verre recyclée empêchent leur utilisation comme agrégats grossiers dans le béton[135].

La fibre de verre recyclée est relativement légère par rapport aux matières premières utilisées pour fabriquer le béton, ce qui peut réduire la densité fraîche et durcie lorsqu'il est mis en œuvre comme agrégat de remplacement fin ou grossier. Par exemple une étude de Asokan [136] ont montré que l'utilisation de la fibre de verre recyclée en poudre allant de 5 à 50 % de remplacement d'agrégats fins abaissait la densité durcie de 1 à 11 %.

Dans la plupart des études, on signale une baisse de la résistance mécanique, avec la fibre de verre recyclée, généralement en raison des liens faibles ajoutés entre la pâte et les autres constituants. Tittarelli et Moriconi [137] a montré que l'incorporation de la poudre de fibre de verre recyclée aussi bien dans les mortiers de ciment (taux de substitution de 10 %, 15 % et 20 %) que dans les bétons autoplaçants (taux de substitution de 25 % et 50 %) a entraîné une perte considérable de performances mécaniques, bien que certaines propriétés liées à la durabilité aient été améliorées. Mais quelques études ont signalé des améliorations de la résistance à la compression. Asokan et al.[138] montrent que le remplacement du granulats fin par de la poudre de déchets de fibre de verre recyclé (avec des taux de substitution de 5% et 15%) peut conduire à des améliorations considérables des performances du béton à la fois pour la mécanique (résistance à la compression, résistance à la rupture en traction) et la durabilité.

À notre connaissance, il n'y a pas d'études traitant du même sujet. Il sera donc fait mention d'études comparables ayant très à d'autres fibre recyclés dans le béton mousse ou à de la fibre de verre recyclée dans le béton ordinaire.

Selon Steshenko et al. [139], l'introduction du plastifiant et des microfibrilles de polypropylène broyées dans le mélange de béton mousse, a entraîné la réduction de la taille des vides et l'ajout d'additifs modificateurs a conduit à la formation d'un grand nombre de pores fermés dans le béton mousse.

Yazdanbakhsh et al. [140] ont travaillé avec la fibre de verre recyclée en forme d'aiguilles qui ont été utilisées pour remplacer à 5 et 10 % les granulats grossiers dans des bétons ordinaires. Seules les aiguilles rainurées ont entraîné une augmentation de la résistance à la compression de 7 %. La résistance à la flexion ou le module de rupture est une autre propriété mécanique importante requise pour les éléments de flexion en béton tels que les dalles et les poutres. La mise en œuvre de la fibre de verre recyclé peut améliorer la résistance à la flexion, en particulier si les éléments fibre de verre recyclé sont capables de combler microfissures, transfèrent les contraintes à travers les petites fissures et atténuent la formation de fissures plus grandes.

PARTIE 2
MATERIAUX ET METHODE

En préambule à la présentation des résultats de l'expérimentation, cette partie décrit la démarche scientifique adoptée pour atteindre l'objectif attendu ainsi que les différents procédés et modes opératoires liés à l'expérimentation.

1. LA DEMARCHE SCIENTIFIQUE

Dans la démarche scientifique de compréhension de l'objet de l'étude, et vu sa complexité (hétérogénéité des composants), le système a été divisé en autant d'éléments nécessaires pour mieux comprendre le rôle et l'influence des variables de l'expérience et mieux expliquer les différentes interactions pouvant survenir entre les éléments du système (Figure 11).

En premier une analyse des caractéristiques physico-chimiques des matériaux recyclés a été effectuée afin de mieux comprendre leur influence sur les propriétés du béton mousse lors de leur utilisation en substitution au sable (Caractérisation des matériaux).

Ensuite, une étude a été menée pour examiner les interactions de la mousse avec les particules solides des autres composants : les matériaux recyclés, le sable et le ciment, afin d'évaluer la stabilité de la mousse en leur présence (Essais d'interaction mousse-particules solides).

En troisième lieu, des essais de comparaison ont été menés. Ils ont consisté à tester et comparer, pour chaque matériau recyclé, différentes formulations de bétons mousse ayant la même matrice cimentaire et dans lesquelles ont été variées les quantités de mousse et du matériau recyclé. L'objectif est d'évaluer l'effet de ces deux facteurs (mousse et matériau recyclé) sur les propriétés des bétons mousse. Pour cela, une analyse des effets a été effectuée, au moyen de logiciels de statistiques et d'analyse des données (Minitab et Design Expert). Cette analyse a permis d'expliquer le rôle de ces deux facteurs, et d'identifier leur influence sur les propriétés des bétons mousse (essais de comparaison).

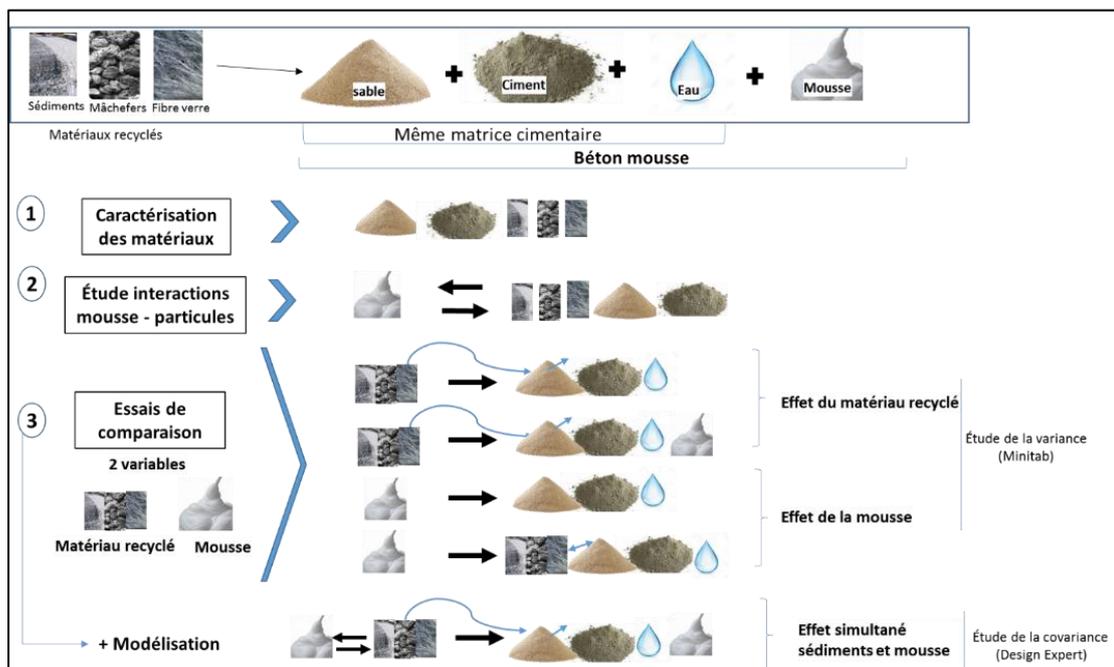


Figure 11. : Schéma de la démarche scientifique

2. MATERIAUX UTILISES

Les matériaux ont été utilisés dans leur forme la plus brute possible afin de minimiser les interactions inter-système, qui pourraient biaiser la compréhension des résultats et l'analyse causale.

2.1 Le ciment

Le **ciment** utilisé dans cette étude est un ciment **Portland CEM I-42,5 R** sans impuretés ni additifs. C'est un ciment usuellement utilisé dans les bétons mousse[141][142][143]. Il réagit positivement avec la mousse, du fait de la rapidité de prise, maintenant la stabilité de la mousse et évitant l'éclatement des bulles d'air avant durcissement.

La classe de résistance 42.5 R, correspond à une résistance à la compression résistance à 28 jours entre 42.5 MPA et 62.5 MPa, un temps de début de prise ≥ 60 min et une stabilité (expansion) ≤ 10 mm.

2.2 L'eau

L'eau utilisée est une eau pure provenant, de l'eau potable de distribution.

2.3 Le sable

Le sable utilisé, est un sable recommandé pour les bétons mousse [144]. C'est un sable calcaire, lavé 0/4 mm tamisé à 2 mm, très propre sans aucun mélange d'argile, et il est de bonne qualité. Il provient de la carrière « Boulonnais ».

Le choix du diamètre maximal s'est imposé du fait que les fractions de taille supérieure à 2mm testées ont provoqué un phénomène de ségrégation avec le mortier mousse objet de cette étude.

2.4 L'agent moussant

L'agent moussant utilisé (Propump Engineering) est 100% naturel, à base de l'hydrolyse de kératine issue des cornes et sabots d'animaux. Il est reconnu être compatible avec les ciments Portland et être. Respectueux de l'environnement. Son degré de nocivité répond aux réglementations imposées [145]. Il est réputé avoir une grande stabilité des pores, et ne pas provoquer de réaction chimique avec les autres constituants du mortier [146]

Par rapport à l'agent moussant synthétique, l'agent moussant à base de protéines produit des bulles d'air sphériques isolées plus petites et plus stables, et à cellules plus fermées qui permet l'inclusion de plus grandes quantités d'air, tandis que les synthétiques donnent une plus grande expansion et donc une densité plus faible [3][39].

2.5 Les matériaux recyclés

Trois matériaux recyclés ont été choisis pour cette étude : les sédiments de dragage marin, les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères et les fibres de verre polyester. Ces matériaux

ont été choisis en raison de leur accessibilité économique, leur disponibilité en grande quantité dans la région Haute de France et du fait qu'ils sont parfaitement recyclables et valorisables.

2.5.1 Les sédiments

Les sédiments utilisés dans cette étude sont des sédiments marins, extraits du grand port maritime de Dunkerque, qui a pour double avantage, d'assurer une bonne production annuelle en sédiments (50000 à 60000m³) et d'accueillir à même le port plusieurs usines de valorisation. Le choix s'est porté sur les sédiments marins, plutôt que fluviaux, pour leur nature sableuse plus fine et de forme plus roulée et pour leur très faible teneur en argile, nuisible à la stabilité de la mousse. Les sédiments marins, par leur teneur en sel et en matière organique, sont plus susceptibles d'altérer la résistance [147].

L'échantillon des sédiments a été choisi par rapport à une valeur moyenne de la teneur en masse organique de 7% (cette valeur varie entre 3 et 10%)

Les sédiments ont été déshydratés à 105°C pendant 24 h, étant donné que leur teneur en eau initiale était très élevée. La température a été limitée à 105°, afin d'éviter toute influence de la température sur la composition minéralogique initiale des sédiments, ainsi que la dégradation de la matière organique. Ils ont été tamisés à 2mm.

2.5.2 Les mâchefers MIDND

L'échantillon des mâchefers utilisés dans cette étude provient de la plate-forme de recyclage RMN-PréFerNord, localisée à Fretin, près de Lille, en région Hauts-De-France. Près de 150000 à 180000 tonnes de mâchefers sont traités sur cette plate-forme, ce qui en fait l'une des plus importantes en France. Ils sont issus de l'incinération des déchets ménagers et sont classés comme non dangereux :

Afin de pouvoir être incorporés dans les bétons mousse en remplacement du sable, les mâchefers ont été utilisés sous leur forme valorisable, selon les critères d'acceptabilité environnementale exigés par le Grenelle de l'Environnement, et également en référence à l'arrêté ministériel du 18 novembre 2011 relatif au recyclage en techniques routières des Mâchefers d'Incinérations de Déchets Non Dangereux MIDND. Ils sont considérés comme non traités car il n'y a pas eu d'ajout de liant hydraulique ou hydrocarboné ou de substances chimiques.

Après incinération et refroidissement à l'eau, ils ont subi une période de maturation à l'air libre de 4 mois, pour réduire les risques de lixiviation et les stabiliser chimiquement en rendant insolubles les hydroxydes de la plus grande partie des métaux lourds qui se retrouvent piégés dans la structure des mâchefers. Ils ont ensuite été débarrassés des matériaux ferreux puis criblés à 0/20 mm.

Pour être utilisés comme granulats pour béton plus compatibles avec la matrice cimentaire, il a été appliqué en plus la méthodologie d'élaboration améliorée de mâchefers 0/20 mm développée par Néo-Eco Développement et l'IMT Lille Douai. Les mâchefers 0/20 mm ont été débarrassés une seconde fois des métaux ferreux, criblés à 0/2mm, puis débarrassés des métaux non ferreux ainsi que des composés organiques imbrûlés. Ils ont ensuite subi une deuxième étape de séchage par une saturation préalable juste avant les essais afin de réduire leur teneur

en eau ou leur absorption en eau au maximum. Ces étapes et notamment le retrait des non ferreux, sont déterminantes car elles ont un impact direct sur la durabilité des bétons.

2.5.3 La fibre de verre

La fibre de verre utilisée dans cette recherche est issue du recyclage de déchets composites provenant de la filière automobile. Elle est produite par la société MCR (Mixt Composite Recyclables), sous le nom commercial de RECY-FIB 100. Les fibres sont recouvertes de résine de polyester. Elles ont subi une seule phase de broyage en plus du déchetage et tamisage. Les fibres RECY-FIB 100 sont caractérisées par une répartition granulométrique entre 0.5 et 30mm de diamètre. Elles offrent au béton un bon écoulement, une bonne ductilité, une bonne résistance mécanique et une excellente durabilité[148]

Le choix s'est porté sur la fibre de verre, pour sa légèreté, ses propriétés thermiques et mécaniques intéressantes à faible coût de production qui en font l'une des fibres les plus utilisées (98 % de la production européenne de composites [149]). Il a été opté pour le recyclage mécanique à une seule phase de broyage, vu que c'est la méthode la plus rentable et que les fibres longues ont un meilleur comportement mécanique que les fibres courtes ou la poudre[136][138].

Un traitement supplémentaire a été appliqué en laboratoire, consistant à utiliser de l'air sous pression et un tamis Figure 12 afin de séparer au maximum les fibres de verre restées collées entre elles par la résine, et se débarrasser ainsi des amas de fibres enchevêtrés, susceptibles de perturber le malaxage et d'empêcher l'homogénéité du mélange [150].



Figure 12. Séparation des fibres en laboratoire

3. DESCRIPTIF DES ESSAIS ET MESURES

3.1 Caractérisation des matériaux

Il est utile et nécessaire de déterminer en premier lieu, les caractéristiques physico-chimiques des matières premières constitutives des bétons mousse, pour avoir quelques clés de compréhension de leurs effets sur les performances obtenues.

Il est à noter qu'il n'existe pas de normes précisant la qualité des matériaux à utiliser pour la fabrication des bétons mousse. On s'est donc référé aux normes les plus proches, qui sont celles des bétons légers.

3.1.1 Analyse Granulométrique

L'analyse granulométrique permet de caractériser la distribution de taille des granulats. Dans le cas des sédiments et des mâchefers, les analyses granulométriques ont été réalisées par tamisage par voie sèche, selon la norme NF EN 12948, ainsi que par voie humide par granulométrie laser, permettant de caractériser les dispersions ou les matières solides en suspension. Dans le cas des fibres de verre, l'équivalent de la distribution granulométrique est la distribution en longueur qui a été réalisée par traitement d'image.

3.1.2 Absorption d'eau et teneur en eau

La mesure de l'absorption d'eau du sable et des mâchefers a été réalisée conformément à la norme EN 1097-6. Tandis que pour les sédiments, étant donné leur teneur en fractions fines, il a été appliqué la méthode par consistance normale. Le coefficient d'absorption d'eau mesure des pores accessibles à l'eau exprimé par A_b qui est le rapport de l'augmentation de la masse après imbibition par l'eau, à la masse sèche.

La teneur en eau représente le poids d'eau par rapport au poids du matériau sec ($W = \text{poids humide} - \text{poids sec} / \text{poids sec}$).

3.1.3 Teneur en matière organique

La connaissance de la teneur en matière organique (sédiments et sable) est utile, pour préjuger du comportement des matériaux vis-à-vis de l'eau. En effet, la présence de matière organique dans les matières premières, influe défavorablement sur les propriétés rhéologiques et la résistance des bétons en général, et par la suite sur la stabilité des ouvrages (retrait/gonflement), à cause de la capacité importante de la matière organique à retenir l'eau, avec comme répercussion de retarder la prise du béton et d'empêcher le développement de la résistance des matériaux cimentaires.

Selon le domaine d'utilisation et d'application, il est préconisé des teneurs en matière organique maximales à ne pas dépasser. Et en règle générale, la présence de la matière organique ne doit pas causer une réduction de la résistance de plus de 20% et une augmentation de temps de prise de plus de 120 mn [151].

Dans cette étude, deux techniques complémentaires ont été utilisées, pour quantifier la matière organique : essais de perte au feu à différentes températures, et essais d'analyse thermogravimétrique (ATG).

3.1.4 La Masse volumique absolue

La masse volumique absolue a été déterminée selon la norme NF EN 1097-7.

3.1.5 La surface spécifique

La surface spécifique représente la somme des surfaces des grains et nous renseigne donc sur la finesse des grains, en général plus les grains sont fins, plus la surface spécifique est importante.

La surface spécifique est mesurée par la méthode BET, en utilisant un appareil d'analyseur agitant de micrométries.

3.1.6 Valeur au bleu de méthylène (argilosité)

La valeur au bleu de méthylène (VBS) est une mesure de l'argilosité et est basée sur la capacité de la fraction argileuse à absorber le bleu de méthylène. La connaissance de la proportion d'argiles, peut renseigner sur le comportement du matériau vis-à-vis de l'eau. L'essai est réalisé conformément à la norme NF P 94068.

La classification des matériaux en fonction de la valeur au bleu méthylène est possible suivant la GTR. Les valeurs obtenues situent les matériaux entre des sols sableux et des sols argileux, comme indiqué dans la figure.



3.1.7 Caractérisation chimique

L'analyse chimique a été réalisée par la technique de fluorescence des Rayon X, permettant d'examiner la présence d'éléments chimiques perturbateurs.

Selon les normes en vigueur, une présence trop importante en éléments chimiques est susceptible de provoquer des perturbations dans le béton. À titre d'exemple : une proportion trop importante en sulfates peut provoquer le gonflement du béton, ou les chlorures présents en quantité importante dans les sédiments marins, peuvent provoquer la corrosion des armatures des bétons armés.

La fluorescence FX, est une technique permettant l'analyse et la détection de différentes proportions des éléments chimiques, présents dans un matériau, et la détermination de leur quantité respective. Cette analyse permet de donner les répartitions totales, massiques ou atomiques des différents atomes.

Les principaux composants chimiques élémentaires ont été quantifiés en pourcentage massique.

L'analyse FX a été réalisée avec un S4-PIONEER, équipé d'un générateur de 4kw avec une anticathode en Rhodium.

3.1.8 Tests de lixiviation

Le protocole de lixiviation de la norme NF EN 12457, permet d'identifier les polluants minéraux existant dans les matériaux, tels que le molybdène (Mo), le Zinc (Zn), le nickel (Ni), le cuivre ou le plomb (Pb). La présence de ces polluants dans la matrice cimentaire, peut présenter un effet généralement néfaste tant du point de vue mécanique que durabilité.

La technique utilisée est la technique par plasma induit (ICP), permettant d'évaluer la teneur en éléments métalliques traces. Les paramètres des essais sont : un rapport solide/liquide de 10 et une durée de lixiviation de 24 heures.

Le caractère inerte ou On évalue la présence en proportions des polluants, qui sont des polluants minéraux :

Le caractère inerte d'un sédiment est évalué sur la base des paramètres contenus dans le DIDI (déchets inertes), ainsi que dans l'ISDND (déchets non dangereux et l'ISDD (déchets dangereux).

3.1.9 Caractérisation minéralogique - diffraction des Rayons X

La caractérisation minéralogique est le complément nécessaire à l'analyse chimique. Elle permet d'identifier les minéraux primaires (présents dans les matériaux et liés à la nature des phases minéralogiques, notamment primaires (argiles, le quartz, calcite...).

Elle est permise grâce à la méthode d'analyse de diffraction des rayons X (DRX) permettant d'étudier les matériaux cristallisés.

Les tests ont été réalisés en utilisant l'appareil Bruker D2 phaser avec une source en cuivre.

3.2 Essais d'interactions mousse-particules solides

En deuxième lieu, une expérimentation a été menée pour étudier le comportement de la mousse, notamment la stabilité, en présence de particules solides objets de cette étude : les matériaux recyclés, le sable et le ciment.

Les tests ont été effectués sur 6 échantillons : la mousse seule, mélange mousse-sable, mousse-ciment puis mélange mousse - matériau recyclé.

Pour produire le mélange, la mousse préformée a été malaxée avec chaque matériau recyclé séparément, pendant 30s, à petite vitesse pour éviter l'éclatement des bulles (voir chapitre 1 protocole de fabrication du béton mousse).

Ensuite l'échantillon a été placé dans un bécher d'une capacité de 5000ml. Une balle de 40mm de diamètre et pesant 2,7g, a été placée délicatement sur la surface de l'échantillon.

Pour chaque échantillon, il a été enregistré le temps nécessaire, pour que le volume des échantillons atteigne 2000 ml (correspondant à la survenance de la déstabilisation de la mousse - phénomènes de drainage et de mûrissement- voir partie bibliographique), puis il a été déduit la vitesse moyenne de descente de la balle. Les données des échantillons mousse-matériau ont été ensuite comparé à celles de la mousse seule, pour apprécier l'intensité de l'effet de chaque matériau recyclé sur la stabilité de la mousse.

3. CARACTERISATION DES MATERIAUX

3.1 Caractérisation des sédiments

Pour être utilisés comme granulats pour bétons, les sédiments doivent en général remplir les conditions fixées par les normes en vigueur, sauf si l'on arrive à compenser les propriétés les plus faibles par une adaptation de leur formulation. C'est ce qui va être vérifié dans ce chapitre.

La classification des sédiments est déterminée par la granulométrie, l'état hydrique et la sensibilité des sédiments à l'eau (sec, modéré ou humide).

3.1.1 Granulométrie

La Figure 14 suivante présente les distributions granulométriques comparatives des sédiments et du sable.

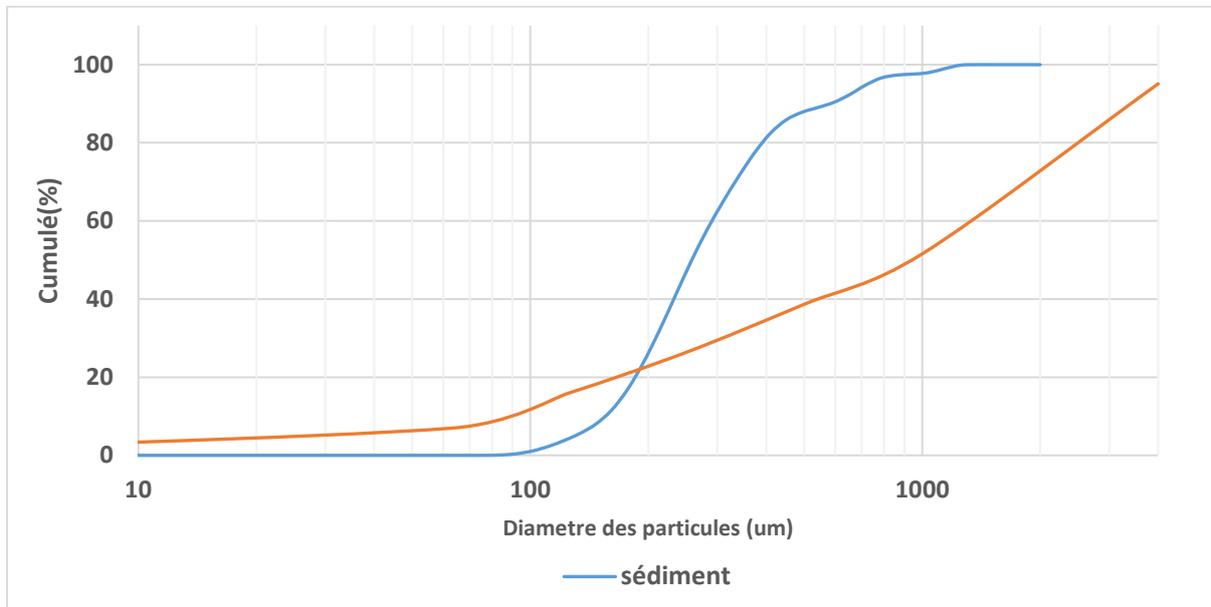


Figure 14. Distribution granulométrique comparée

Tableau 4. Caractéristiques granulométriques pour les sédiments et sable

Passants	sédiments	sable
<80 µm	0%	7%
< 2 µm (Fraction argileuse)	0%	3%
Entre 2 µm et 63 µm (fraction limoneuse)	0%	5%
>63 µm (fraction sableuse)	100%	93%
Fines < 315 µm	68.7	29.6

Les sédiments ont une granulométrie telle qu'ils peuvent être assimilés à du sable. Ils présentent une quantité de fines inférieurs à 315 µm, plus importante que le sable. Les sédiments ont une étendue granulométrique plus serrée que celle du sable impliquant une augmentation des distances inter granulaires. Les valeurs du coefficient d'uniformité $Cu=2,3$ et du coefficient de courbure $Cc = 0.69 (<1)$ reflètent bien un étalement serré et une forme mal graduée de la courbe granulométrique.

Tableau 5. Coefficient d'uniformité et de courbure pour les sédiments et sable

	Sédiments	Sable
Cu	2.3	12.71
Cc	0.69	0.12

Cu : coefficient d'uniformité = D_{60}/D_{10}

Cc : coefficient de courbure = $D_{30}^2/D_{10}.D_{60}$

Dx = diamètre des grains correspondant à x% de passant en poids

	sédiments	sable
D10 (µm)	154,9	89.7
D30 (µm)	197,3	112.3
D60 (µm)	359,9	1140.2
D max (µm)	1254.5	4000

3.1.2 Caractéristiques physiques

D'après les résultats obtenus relatifs à différentes caractéristiques physiques Tableau 6, on retient :

- ✓ Une masse volumique 10% inférieure à celle du sable ;
- ✓ Une teneur en eau et un coefficient d'absorption beaucoup plus importants que le sable (x15 et x67) ;
- ✓ Une teneur en MO (perte au feu) assez importante = 7 % (> 0,1% ce qui en fait un matériau non propre). Donc on peut s'attendre à ce qu'ils aient une influence plus ou moins défavorable sur l'ouvrabilité et les performances mécaniques des bétons ;
- ✓ Une fraction argileuse (VBS) assez négligeable aussi bien pour les sédiments que pour le sable ;
- ✓ Une grande surface spécifique supérieure à celle du sable. Ce qui implique des grains plus fins que ceux du sable et augure d'une bonne compacité.

Tableau 6. Caractéristiques physiques pour les sédiments et sable

Caractéristique	Sédiments	Sable
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2530	2798
Teneur en eau %	15	0,43
Absorption d'eau (%)	29	0,43
Perte au feu 450°C-3H (%)	4,47	1,63
Perte au feu 550°C-2H (%)	6,93	1,7
VBS (g/100g de matière sèche)	0,2	0,08
Surface spécifique BET (m ² /KG)	11,97	2,72

Analyse thermogravimétrique ATG

D'après les résultats ATG obtenus, on constate, autour de 800°C, une faible perte de masse suivie d'un dégagement de H_2O et un faible pic exothermique lié à la déshydroxylation des Kaolinites. En fonction du degré de déshydratation de la metakaolinite, un dégagement de H_2O se forme suivant la réaction :

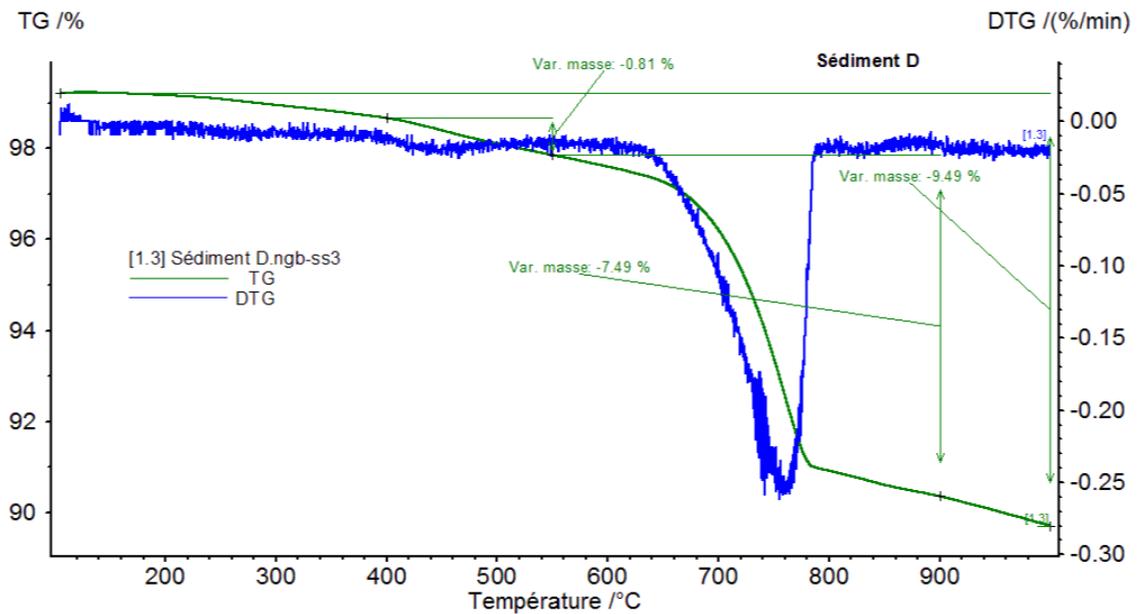


Figure 15. Analyse ATG des sédiments

3.1.3 Caractéristiques chimiques

Le Tableau 7 et Tableau 8 suivants synthétisent les compositions en oxydes et éléments chimiques des sédiments utilisés pour l'étude.

Tableau 7. Composition chimique des oxydes dans le sédiment en % en masse

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MGO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	SO_3
67.4	1.7	6.6	12.9	1.16	1	0.5	0.2	1.2

Tableau 8. Composition chimique des éléments dans le sédiment en % en masse

O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe
40,8	0,2	0,5	2,4	8,1	0,1	1,6	0,8	42,9	0,2	2,1

D'après les résultats indiqués dans le tableau ci-dessus, le dioxyde de silicium SiO_2 est présent en très forte concentration = 67.4% , ce qui augure de bonnes performances mécaniques dans les bétons ordinaires. En effet, le SiO_2 contribue à la production du CSH, qui une fois hydraté entraîne des liaisons entre les particules des sédiments, entraînant une augmentation de la résistance.

L'oxyde de calcium CaO (chaux vive) est également présent en forte concentration = 12.9%, ce qui peut être préjudiciable pour la stabilité de la mousse dans la mesure où d'après quelques études la chaux vive a tendance à fragiliser les films de la mousse et à faire éclater les bulles et es endommager, ce qui peut constituer un risque d'augmentation de la densité et de la conductivité thermique [58].

L'oxyde ferrique est présent en quantité trop importante. Et on peut considérer que les autres éléments sont présents en faible concentration.

Les sédiments sont très concentrés en calcium (42.9%), on note la très faible présence du chlorure et du zinc sous forme de traces seulement.

3.1.4 Caractéristiques minéralogiques

Les diffractogrammes de l'échantillons montrent la présence de phases minéralogiques primaires, principalement du quartz (dioxyde de silicium) (SiO_2) et de calcite ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$). L'analyse révèle aussi la présence de certaines phases comme l'albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), la muscovite, microcline. De plus d'autres phases, cette fois argileuses, sont aussi mises en évidence dans l'échantillon comme la Kaolinite.

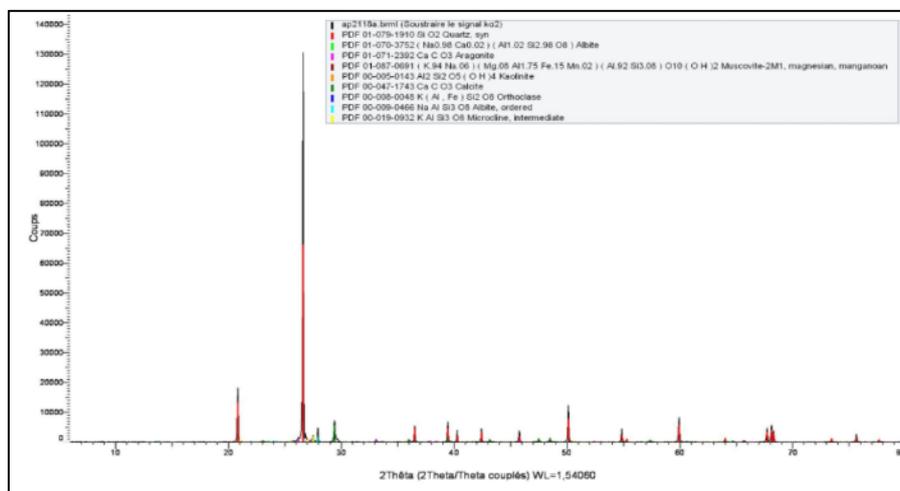


Figure 16. Analyse cristallographique DRX sur le sédiment

3.1.5 Essais de lixiviation

Au vu des valeurs obtenues relatives aux résultats des tests de lixiviation, affichées sur le Tableau 9 et

Tableau 10 on peut considérer que les sédiments utilisés dans cette étude comme non dangereux, mais non inertes à cause de la teneur en antimoine (Sb) et surtout en sulfates qui dépassent les seuils acceptables. Ils peuvent néanmoins être utilisés en tant que matériaux dans les filières de béton et produits de construction ainsi que les ouvrages de protection maritime et civile.

Tableau 9. Contaminants minéraux et seuils des sédiments et déchets (en mg/kg) avec L/S=10

Métaux (mg/kg)	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Zn
Contenance	0,15	0,015	0,006	0,002	0,26	0,04	0,08	0,04	0,07	0,08	0,02
Seuils N1	25		1.2	90	45		37	100			276
Seuils N2	50		2.4	180	90		74	200			552
Seuil ISDI**	0.5	20	0.04	0.5	2	0.5	0.4	0.5	0.06	0.1	4
Seuil ISDND ***	2	100	1	10	50	10	10	10	0.7	0.5	50
Déchets dangereux	25	300	5	70	100	30	40	50	5	7	200

Tableau 10. Contaminants organiques en mg/kg avec L/S=10

Contaminants organiques (mg/kg)	Fluorures	Chlorures	Sulfates
Contenance	7	206	1300
Seuil ISDI**	10	800	1000
Seuil ISDND ***	150	15000	20000
Déchets dangereux	500	25000	50000

*Seuils de qualité N1 et N2 des 8 métaux lourds réglementaires pour les sédiments marins et estuariens, d'après l'arrêté du 9 Août 2006.

** seuils d'acceptation en Installation de Stockage pour Déchets Inertes d'après l'arrêté du 12 décembre 2014

*** seuils d'acceptation en installations de stockage de déchet non dangereux, d'après l'arrêté du 12 Mars 2012

3.1.6 Conclusion

La caractérisation des sédiments a permis de faire ressortir leur constitution sableuse et se sont avérés très riches en calcium (42.9%).

Leur teneur en fines est supérieure au sable, ce qui peut augurer d'une plus forte porosité. Ils sont fortement organiques, ce qui est susceptible d'impacter l'ouvrabilité et les performances mécaniques des bétons mousse.

Ils sont 10% fois plus légers que le sable. Leur teneur en eau est plus élevée que le sable, en raison de leur teneur en matière organique, s'élevant à 7%, et qui pourrait entraîner une perte en ouvrabilité et performances mécaniques. Ils absorbent 67 fois plus d'eau que le sable

Leur teneur en argile est négligeable.

La teneur importante en chaux (12.9%) risque de déstabiliser la mousse.

Les essais de lixiviation ont révélé leur caractère non dangereux, mais non inertes, à cause de la teneur en antimoine (Sb) et surtout en sulfates. Il pourrait être envisagé de stabiliser leur teneur en polluants et de décomposer la matière organique), par un traitement thermique (calcination).

3.2 Caractérisation des mâchefers

La qualité des mâchefers et leur potentiel de valorisation comme granulats pour bétons, sont fortement liés à la composition des ordures incinérées, au type de collecte (tri sélectif ou non) au processus d'incinération (type de four, conduite de four...), au mode de refroidissement, et surtout au traitement subi après incinération et notamment les phases de maturation et purge des matériaux non ferreux [152].

3.2.1 Morphologie des granulats

Figure 17. Les particules de mâchefer



Les mâchefers se sont avérés de forme irrégulière avec une texture de surface rugueuse du fait de la présence, de grains anguleux et de de débris de verres et d'éléments métalliques Figure 17.

3.2.2 Granulométrie

La Figure 18 rend compte de la distribution granulométrique des mâchefers en comparaison avec le sable.

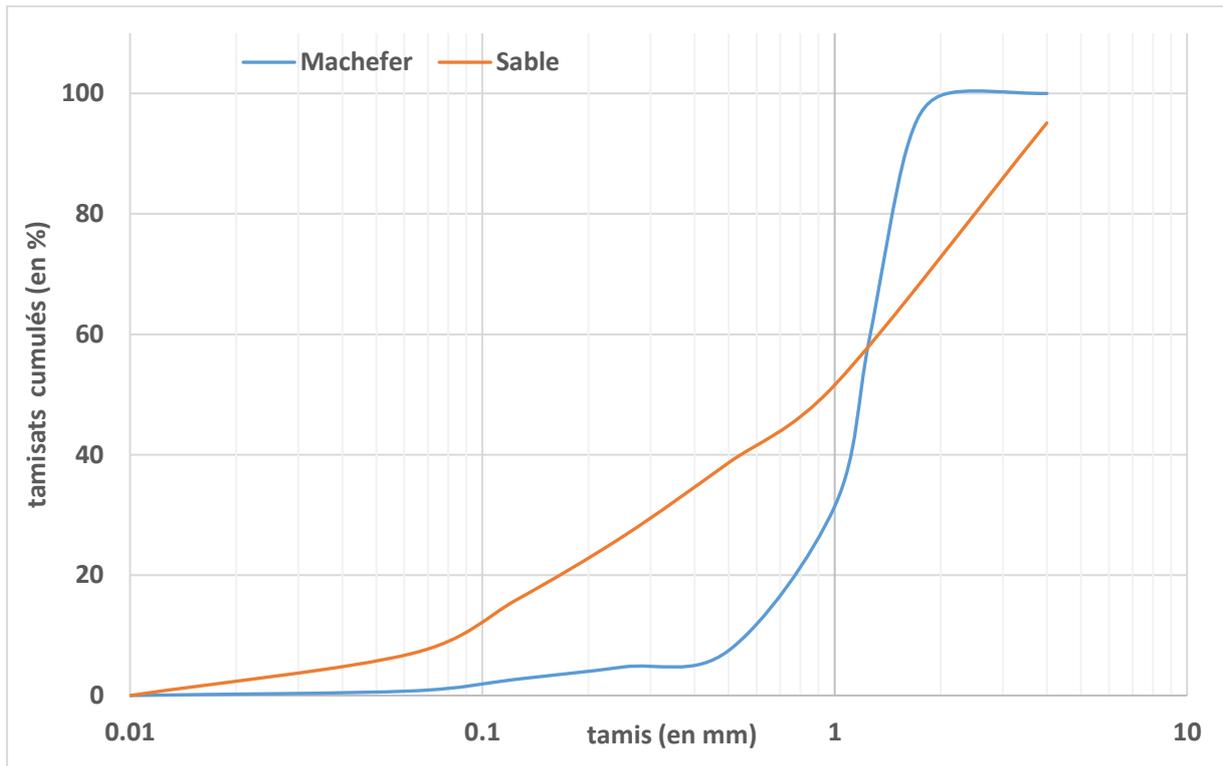


Figure 18. Distribution granulométrique comparée mâchefers- sable

Tableau 11. Caractéristiques granulométriques pour les mâchefers et sable

Passants	Mâchefers	sable
>63 μm (fraction sableuse)	100%	93%
<80 μm	0%	7%
Entre 0.5 et 2mm	100%	31%

La courbe de distribution granulométrique permet de rendre compte de la nature sableuse des mâchefers et à fraction dominante grossière, les proportions grossières (entre 0.5 et 2mm) contenues dans les mâchefers sont de 100% contre 30% pour le sable. La granulométrie des mâchefers est très serrée et beaucoup moins étalée que celle du sable, indiquant des distances inter granulaires plus importantes pour les mâchefers. Cela va constituer un facteur influant important pour les propriétés du béton mousse obtenues.

Les valeurs du coefficient d'uniformité $C_u=1,7$ et du coefficient de courbure $C_c 3.4$ reflètent bien un étalement très serré et une forme mal graduée de la courbe granulométrique.

Tableau 12. Coefficient d'uniformité et de courbure pour les sédiments et sable

	Mâchefers	sable
Cu	1,7	12.71
Cc	3,4	0.12

Cu : coefficient d'uniformité = D_{60}/D_{10}

Cc : coefficient de courbure = $D_{30}^2/D_{10} \cdot D_{60}$ ()

Dx = diamètre des grains correspondant à x% de passant en poids

	Mâchefers	sable
D10 (µm)	570	89.7
D30 (µm)	1385	112.3
D60 (µm)	989.2	1140.2
D max (µm)	2000	4000

3.2.3 Caractéristiques physiques

Tableau 13. Caractéristiques physiques pour les mâchefers et sable

Caractéristique	Mâchefers	Sable
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2230	2798
Teneur en eau (%)	19	0.43
Absorption d'eau (%)	11	0,43
Perte au feu 450°C-3H (%)	1,7	1.63
Perte au feu 550°C-2H (%)	2,62	1.7
VBS (g/100g de matière sèche)	0,018	0.083
Surface spécifique BET (m ² /kg)	9,22	2.72

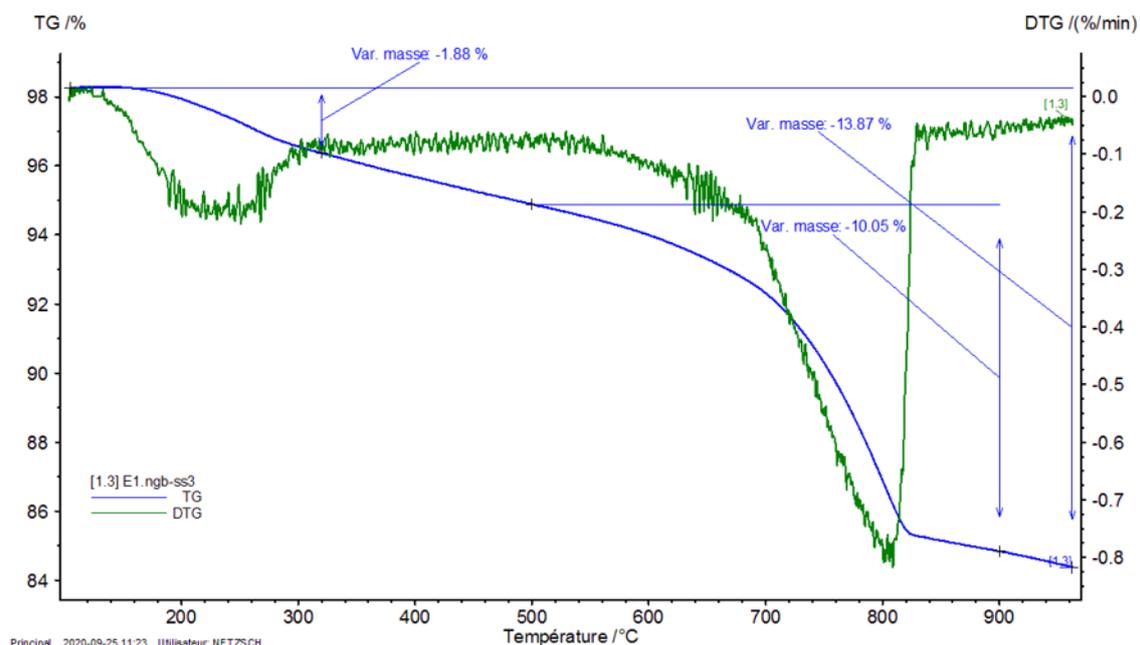
Les mâchefers se sont révélés de densité plus faible de 20% que le sable, puisque présentant une plus grande porosité inter granulaire induite par leur morphologie.

Leur teneur en eau élevée (19%) est une conséquence de la phase de refroidissement à l'eau subie à la sortie des incinérateurs. Cette valeur reste élevée, malgré les deux étapes de séchage, et ce à cause de la rugosité de surface importante. Ils absorbent 25 fois plus d'eau que le sable. La fraction argileuse (VBS) inférieure à 0,1 en fait un matériau propre. Leur surface spécifique

est importante et est supérieure à celle du sable. Le taux de composés organiques imbrûlés obtenu par la mesure de la perte au feu est relativement faible (2.6%).

Analyse thermogravimétrique de mâchefers :

La Figure 19 illustre les courbes ATG et DTG obtenue sur les mâchefers entre 0°C et 900°C.



Ces courbes peuvent être découpées en 3 parties :

1. De 0°C à 200°C, la courbe DTG présente tout d'abord un léger phénomène endothermique, associé à une perte de masse visible sur la courbe ATG de 1.88%. Ces effets sont dus à la déshydratation de l'échantillon. La perte de masse observée est associée à l'évaporation de l'eau libre dans un premier temps, suivie par l'évaporation de l'eau de cristallisation ;
2. Entre 200°C et 600°C la combustion de la matière organique (MO), résiduel contenu dans le mâchefer. Les pertes de masse sont associées à la transformation du carbone organique solide en $CO_2(g)$ et en $H_2O(g)$;
3. Enfin de 700°C à 900°C on observe un pic endothermique associé à une perte de masse plus importante de 10.05%. On assiste ici à la décomposition des carbonates.

3.2.4 Caractéristiques chimiques

Le Tableau 14 et Tableau 15 suivants synthétisent les compositions en oxydes et éléments chimiques des mâchefers étudiés.

Tableau 14. Composition chimique des oxydes dans le sédiment en % en masse

SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	MnO	ZnO
44,91	8,31	2,16	3,86	20,85	5,39	1,08	1,37	0,50	0,67	0,13	0,37

Tableau 15. Composition chimique des éléments dans le sédiment en % en masse

O	Si	Al	Mg	Fe	Ca	Na	K	P	S	Ti	Mn	Zn	Cu	Pb
48,8	21	4,4	1,3	2,7	14,9	4	0,9	0,6	0,2	0,4	0,1	0,3	0.1	0.1

La teneur massique en dioxyde de silicium (SiO₂) est prédominante (44.91%), suivi du CaO (20.85%). La valeur de SiO₂ est attendue dans la mesure où la méthodologie développée par Néo-Eco Développement et l'IMT Lille Douai, visait principalement l'augmentation de ce composé chimique.

L'oxyde de calcium CaO (chaux vive) est présent en forte concentration = 20.85%, ce qui peut être préjudiciable pour la stabilité de la mousse. En effet, d'après quelques études, la chaux vive a tendance à fragiliser les films de la mousse et à faire éclater les bulles et à les endommager, constituant un risque d'augmentation de la densité et de la conductivité thermique du béton mousse.

Les mâchefers objet de l'étude se sont avérés riches en minéraux : 63% (dont silicium :21%, calcium : 14.9%) Leur teneur en matériaux ferreux (Fe) s'est révélée basse = 2.7 % ; et leur teneur en non ferreux (, K, P, S, Ti, Mn, Zn, Cu, Pb) est plus importante = 5.1 %, ce qui pourrait présenter un risque d'altération des propriétés de durabilité. La phase d'élaboration des mâchefers n'a vraisemblablement pas suffi à réduire les non ferreux

L'aluminium est présent en quantité encore importante (4.4%) pouvant engendrer des réactions chimiques à l'intérieur de la matrice cimentaire, qui peuvent donner lieu à des pathologies de gonflement sur les ouvrages en béton [125][153] et un amoindrissement des performances mécaniques.

3.2.5 Essais de lixiviation

Les essais de lixiviation, révèlent la non dangerosité des mâchefers. Par contre leur teneur critique en antimoine (Sb) de 0.37 mg/kg et en sulfates de 2999 mg/kg, dépassant les seuils acceptables, en font un matériau non inerte (Tableau 16

Tableau 17).

Les mâchefers sont également conformes à l'arrêté 18/11/11, et donc peuvent être considérées comme valorisables pour une utilisation en technique routière.

Les métaux lourds présents dans les mâchefers peuvent être considérés comme inactifs, si on considère leur proportion isolément. Mais leur teneur accumulée s'élevant à 2,274 mg/kg, reste non négligeable et pourrait être responsable de la hausse de la porosité impliquant une baisse des propriétés mécaniques et également un gonflement et une fissuration du matériau.

Tableau 16. Contaminants minéraux et seuils de pollution et utilisation routière (en (mg/kg) avec L/S=10

Métaux lourds (mg/kg)	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Zn
Teneur mâchefers	0.11	0.26	0.009	0.37	0.73	0.26	0.05	0.035	0.37	0.08	0.03
Seuil ISDI**	0.5	20	0.04	0.5	2	0.5	0.4	0.5	0.06	0.1	4
Seuil ISDND ***	2	100	1	10	50	10	10	10	0.7	0.5	50
Déchets dangereux	25	300	5	70	100	30	40	50	5	7	200
Arrêté 18/11/11 type1	0.6	56	0.05	2	50	5.6	0.5	1.6	0.7	0.1	50
Arrêté 18/11/11 type2	0.6	28	0.05	1	50	2.8	0.5	1	0.6	0.1	50

Tableau 17. Contaminants organiques en mg/KG avec L/S=10

Contaminants organiques (mg/kg)	Fluorures	Chlorures	Sulfates
Contenance	3,9	541	2999
Seuil ISDI**	10	800	1000
Seuil ISDND ***	150	15000	20000
Déchets dangereux	500	25000	50000

*Seuils de qualité N1 et N2 des 8 métaux lourds réglementaires pour les sédiments marins et estuariens, d'après l'arrêté du 9 Août 2006.

** seuils d'acceptation en Installation de Stockage pour Déchets Inertes d'après l'arrêté du 12 décembre 2014

*** seuils d'acceptation en installations de stockage de déchet non dangereux, d'après l'arrêté du 12 Mars 201

3.2.6 Conclusion

La caractérisation des mâchefers a permis de faire ressortir leur constitution sableuse, avec prédominance de fractions grossières. Ils présentent des grains anguleux, de par la présence de verre et d'éléments, ce qui a l'avantage de leur conférer un caractère frottant et une meilleure portance pour une application en technique routière, mais cette particularité pourrait être moins avantageuse pour les propriétés rhéologiques. Ils sont 20% plus légers que le sable et absorbent l'eau 25 fois plus, du fait de leur porosité importante et aux éléments qu'ils contiennent. Ils se sont avérés riches en matières minérales 63% (notamment silicium, aluminium, calcium) et contiennent beaucoup d'eau (19%). Malgré le procédé de traitement (maturation et élaboration) pour épurer les mâchefers, les ferreux (2.7%), et non ferreux (5.1%), et les imbrûlés (2.6%) restent présent et pourraient amoindrir les propriétés durabilité (notamment les non ferreux). La teneur importante en chaux (20.85%) risque de déstabiliser la mousse. Les essais de lixiviation ont révélé leur caractère non dangereux, mais non inertes. Leur teneur en métaux lourds de 2.3 mg/kg pourrait constituer un frein pour l'obtention de bonnes propriétés mécaniques, notamment l'aluminium (4.4%). Ils se sont avérés conformes pour un emploi en technique routière.

3.3 Caractérisation de la fibre de verre

3.3.1 Caractéristiques physiques

L'histogramme de distribution de longueur des fibres Figure 20 réalisée par traitement d'image sur une population de 690 fibres, montre une étendue de longueur allant de 0 à 60mm avec un pic autour de 25-30 mm. Leur longueur moyenne est de 27,5 mm, attestant bien que ce sont des renforts à fibres longues. Le diamètre moyen, des fibres plus la résine) est de 581 μm .

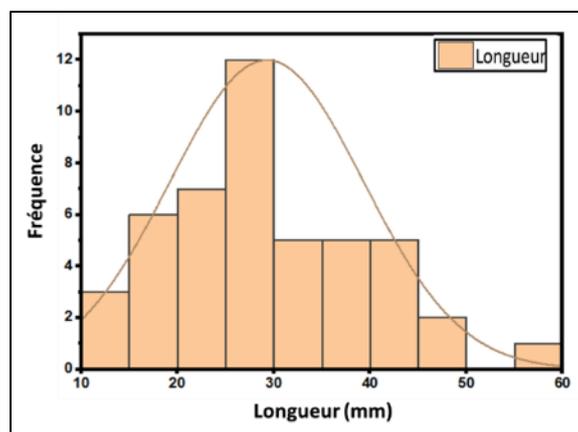


Figure 20. Courbe de distribution de la longueur des fibres

Des observations au microscope optique ont été effectuées afin de déterminer la morphologie de la fibre de verre. Les images obtenues à échelle microscopique reflètent l'intérieur d'un seul toron, sachant que les renforts fibreux sont composés de torons tissés, qui sont eux-mêmes composés de milliers de fibres. Ainsi, on peut voir d'après les 2 images de la Figure 21, un assemblage unidirectionnel de fibres dispersées régulièrement, d'aspect en forme d'aiguilles droites et tranchantes, et de forme cylindrique et qui sont recouvertes dans une proportion importante, par la résine. La surface de la fibre de verre a plutôt un aspect lisse. On y observe également des espaces entre les fibres représentant des micropores.

Il est à noter que d'autres pores sont présents dans les fibres de verre mais ne sont pas visibles à cette échelle, ce sont les mésopores qui se trouvent entre les torons de la fibre, ainsi que des grands pores visibles échelle macroscopique, pour certains types de renforts.

La masse volumique de la fibre de verre est de 2086 kg/m^3 . Elle est 25% plus légère que le sable.

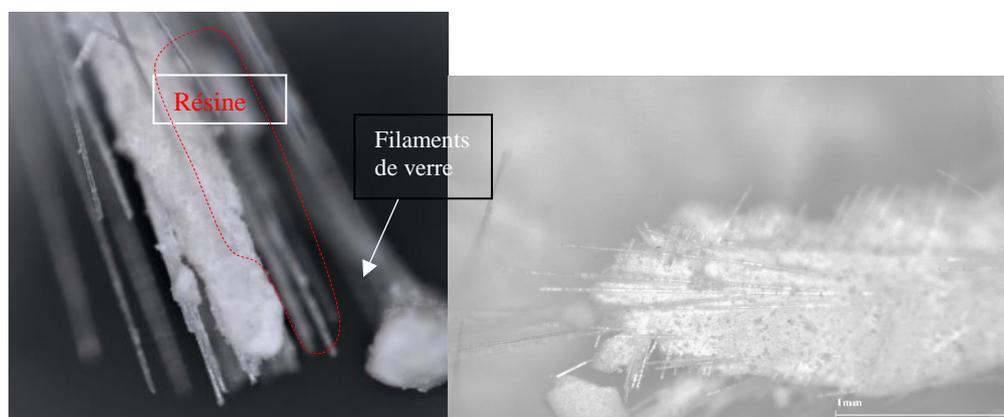


Figure 21. Observation de la fibre de verre au microscope optique

3.3.2 Composition de la fibre de verre

Il s'agit dans cette partie de déterminer le contenu en poids de la résine et des fibres de verre car chaque composant impacte différemment les bétons : les fibres de verre leur apportent une meilleure résistance à la traction, et la résine une meilleure résistance à la compression.

La fibre de verre RECY FIB 100 étant en principe composée de fibres de verre, de résine et de carbonate de calcium comme charge minérale (adjuvant de la résine), La détermination du ratio résine / fibres se fait par le biais de la calcination et la calcimétrie de la fibre de verre. La calcination de la fibre (550°C-2 heures), permet de calculer la proportion de la résine par la mesure de la perte de poids avant et après traitement thermique. La calcimétrie permet de déterminer le pourcentage de CaCO₃ par le biais d'une réaction avec l'acide chlorhydrique, suivant la norme NF P 94-048, et de déduire ainsi la proportion des fibres de verre.

Il en a résulté de ces deux manipulations, un contenu de résine en poids de 10%, un contenu de fibres de 35% et un volume en carbonate de calcium de 55%. Le ratio fibres/résine =3.5%.

3.3.3 Conclusion

La fibre de verre utilisée dans cette expérimentation est composée de fibres longues de 27.5 mm en moyenne, en forme d'aiguilles cylindriques, majoritairement recouvertes de résine polyester de surface lisse, et espacées par du vide. Le diamètre moyen comprenant la résine est de 581 µm. Elle s'est avérée 25% plus légère que le sable. Elle est composée de 10% de polymère (polyester), de 35% de fibres et de 55% de charge (carbonate de calcium) La littérature rapporte que normalement, la teneur en résine varie entre 5 et 15% de la masse totale, mais cette proportion peut Atteindre jusqu'à 30% si le matériau de charge est fin [137]. La surface lisse de la fibre pourrait entraver une bonne adhérence avec la matrice cimentaire et compromettre ainsi le comportement mécanique [154] . La forme cylindrique des fibres a une influence sur les propriétés du béton, elle peut notamment affecter les propriétés mécaniques et notamment l'ouvrabilité et la résistance à la compression [155].

3.4 Caractérisation du sable

Comme on peut le constater sur Figure 22 et Figure 23 et le Tableau 18, le sable utilisé, est un sable calcaire, avec 7% de fines, caractérisée par une grande présence d'éléments grossiers (D_{max} = 6.2mm). Il est riche en calcite CaO, et l'analyse DRX révèle un pic d'environ 100 % de calcite, traduisant la dominance du CaCO₃ en plus d'autres éléments révélés comme la silice SiO₂.

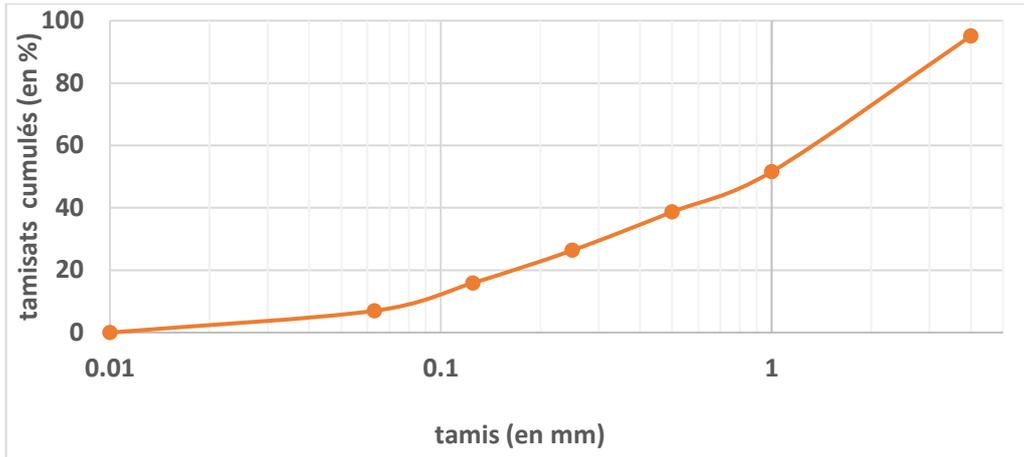


Figure 22. Distribution granulométrique comparée

Tableau 18. Composition chimique des oxydes dans le sable

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CAO
3.5	0.9	1.7	97.6

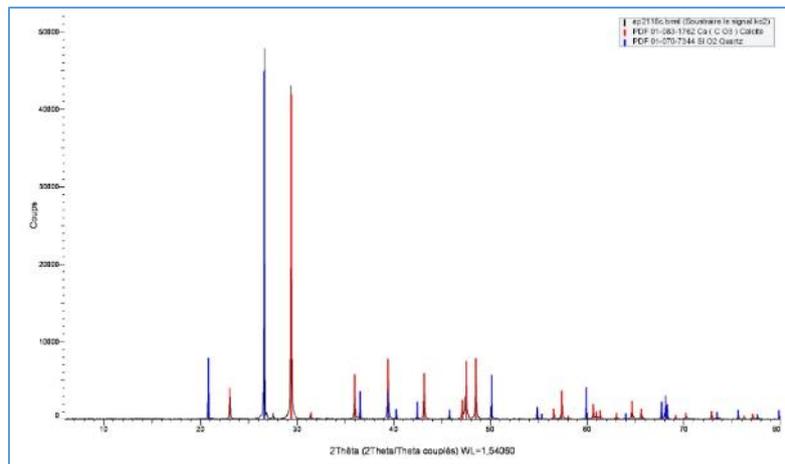


Figure 23. Analyse DRX

3.5 Caractérisation du ciment

D'après les résultats présentés sur le Tableau 22, on note une présence importante du Belite (C_2S), qui représente l'élément chimique le plus déterminant à l'obtention de bonnes propriétés mécaniques.

Le ciment utilisé est principalement constitué de calcium et de silicium. À noter que à la présence de sodium, potassium et de phosphate même en faibles proportions peut influencer la prise du ciment et la durabilité de l'ouvrage.

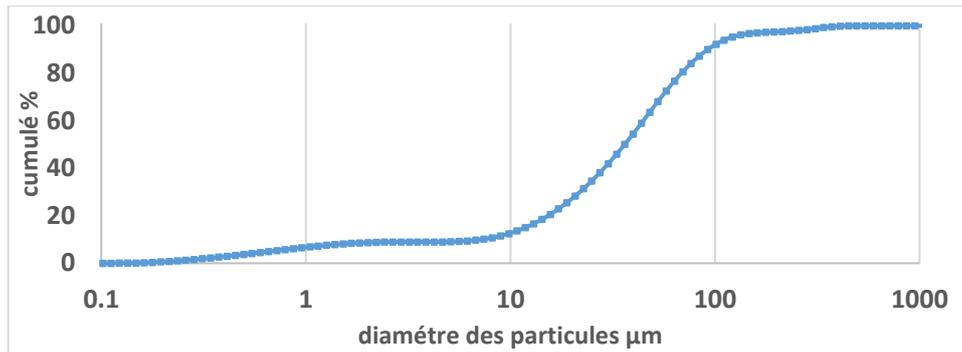


Figure 24. Distribution granulaire de ciment CEM I 42.5R

Tableau 19. Paramétré physique spécifique de ciment

Surface spécifique	834.6 m ² /g
Masse volumique	3130 kg/m ³
Perte au feu (450°C)	2.1%

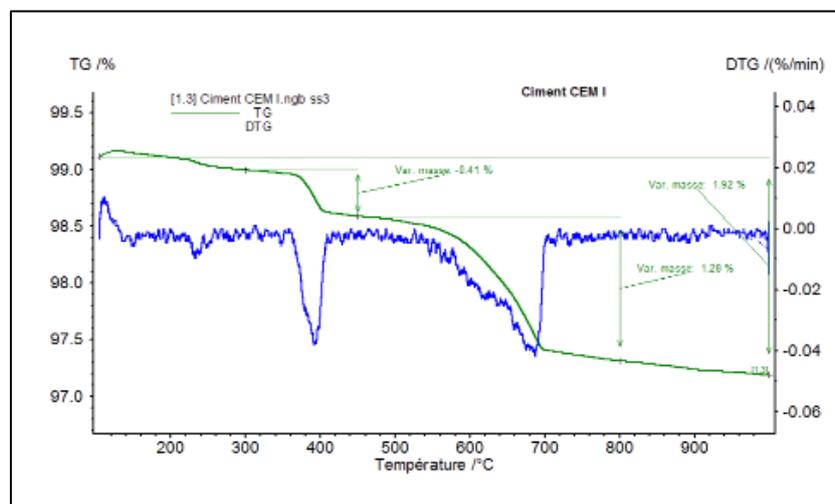


Figure 25. Analyse ATG de ciment CEM I 42.5R

Tableau 20. Composition chimique atomique des CEM I 42.5 R

O	Na	Mg	Al	Si	P	S	k	Ca	Ti	Fe	%IT
39,7	0,27	0,98	2,32	8,08	0,9	9	0,79	43,93	0,3	2,7	0,4

Tableau 21. Composition chimique des oxydes dans CEM I 42.5 R

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CAO	MGO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	%IT
17.6	4.4	2.7	61.9	0.7	1	0.4	0.4	9.00	0.3	0.4

Tableau 22. Composition de Bogue du ciment

C2S	C3S	C3A	C4AF
12,26	55,65	7,97	10,23

4. ESSAIS D'INTERACTION MOUSSE- PARTICULES SOLIDES

4.1 Résultats

Comme décrit dans le chapitre consacré à la description de l'analyse des interactions mousse-particules solides, pour les 6 échantillons de l'expérience (mousse seule, mousse malaxée avec sédiments, mâchefers, fibre de verre, sable et ciment) les temps et les vitesses au moment de la déstabilisation de la mousse ont été calculés.

Les résultats sont présentés dans le graphe (volume échantillon en fonction du temps) de la Figure 26 pour les 6 échantillons.

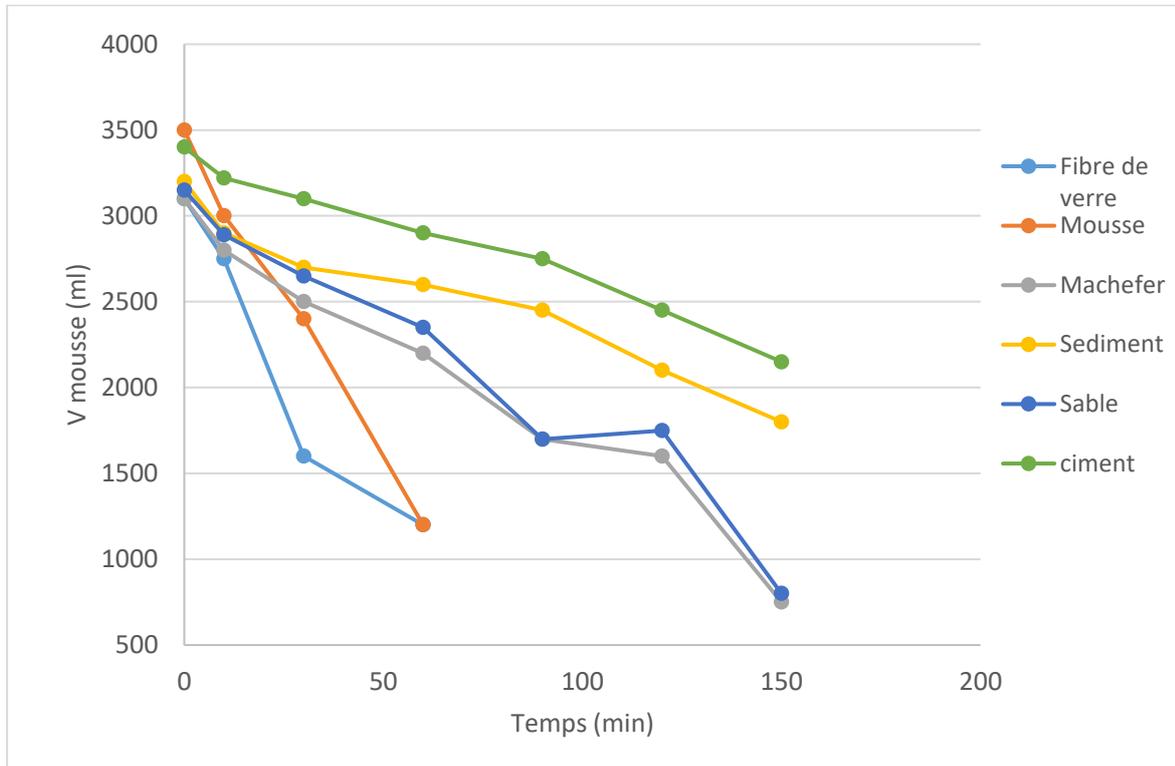


Figure 26. Volume de mousse en fonction du temps

Concernant les matériaux recyclés, les sédiments et mâchefers ont un effet favorable sur la stabilisation de la mousse (la diminution du volume est freinée par l'ajout des sédiments). Cependant la fibre de verre provoque l'effet inverse ; elle déstabilise d'avantage la mousse (la diminution du volume est accéléré par l'ajout de la fibre de verre).

Il est observé également que le sable et le ciment stabilisent la mousse au même titre que les sédiments et mâchefers. Les sédiments et le ciment ont un effet stabilisant de la mousse plus important car ils contiennent plus de particules fines. En effet les particules grossières du sable et des mâchefers entraînent d'avantage la mousse vers le bas, sous l'effet de la gravité, précipitant le phénomène de drainage de la mousse.

4.2 Analyse des résultats

4.2.1 Mousse seule

Comme indiqué dans la Figure 27 par une ligne rouge en pointillée, on observe une diminution brusque du volume de la mousse à une vitesse de 1,42mm/min. Cette diminution est liée au phénomène de drainage. Le drainage, comme mentionné dans la partie 1. Béton mousse,

est causé par l'écoulement du liquide interstitiel à travers les films formés par les tensioactifs qui forment les bulles d'air de la mousse. En parallèle les mécanismes de coalescence et de mûrissement, également mentionnés en Partie 1.1, interviennent et participent à la déstabilisation de la mousse comme le montrent les photos sur la Figure 27 les mécanismes de coalescence et de mûrissement tendent à augmenter la taille des bulles d'air de la mousse.

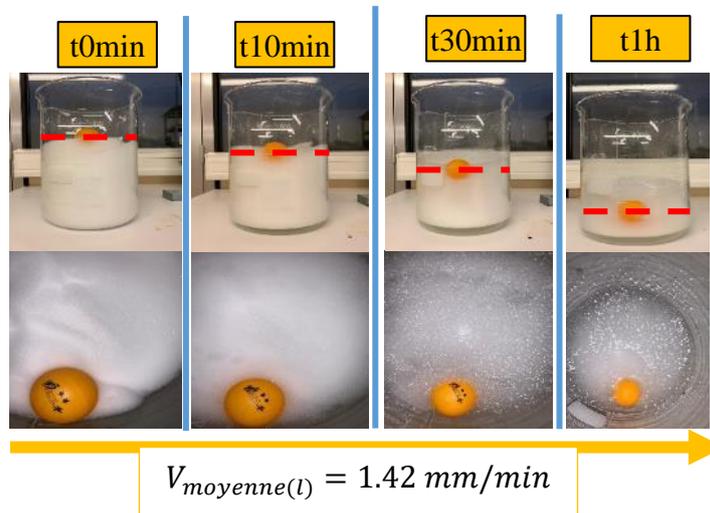


Figure 27. Stabilité de la mousse vierge en fonction du temps

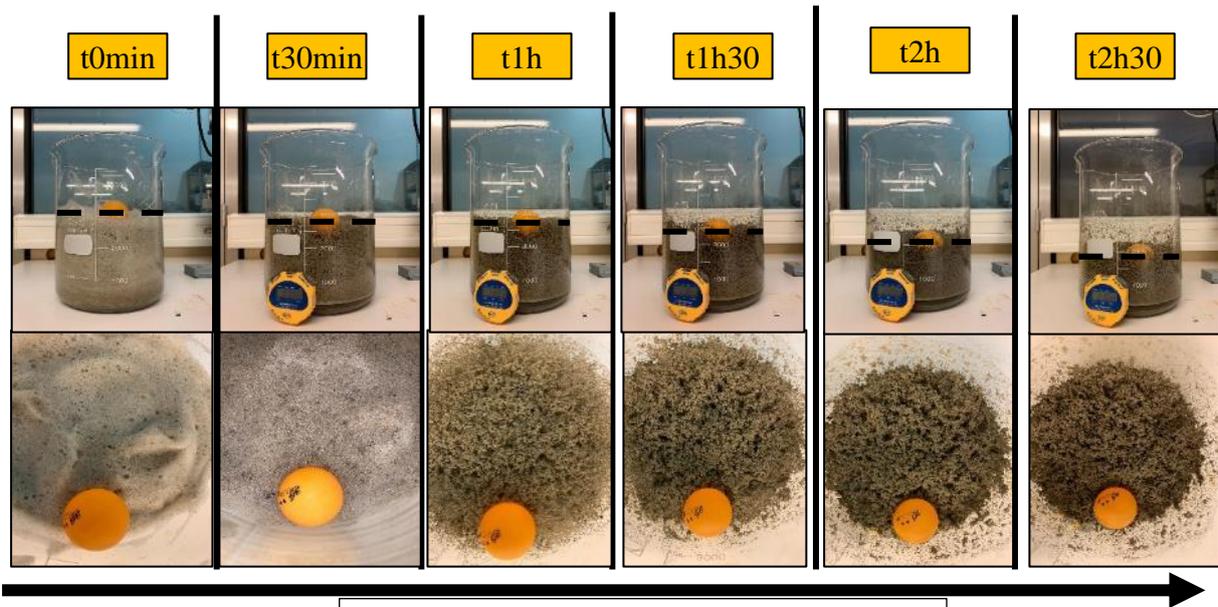
4.2.2 Mousse avec sédiments et mâchefers

La stabilité de la mousse repose sur la stabilité du film et également sur la stabilité des particules à l'interface, c'est-à-dire sur leur adsorption. La probabilité d'avoir une mousse stable est alors égale au produit des probabilités de ces deux événements.

Dans le cas des mélanges, mousse/sédiments et mousse/mâchefers, la stabilité de la mousse augmente par l'ajout des 2 matériaux. Ceci est dû à leur caractère hydrophile. En effet, la présence de particules hydrophiles ou de mouillabilité intermédiaire aide souvent à stabiliser les mousses [156][11]. Deux explications sont envisagées :

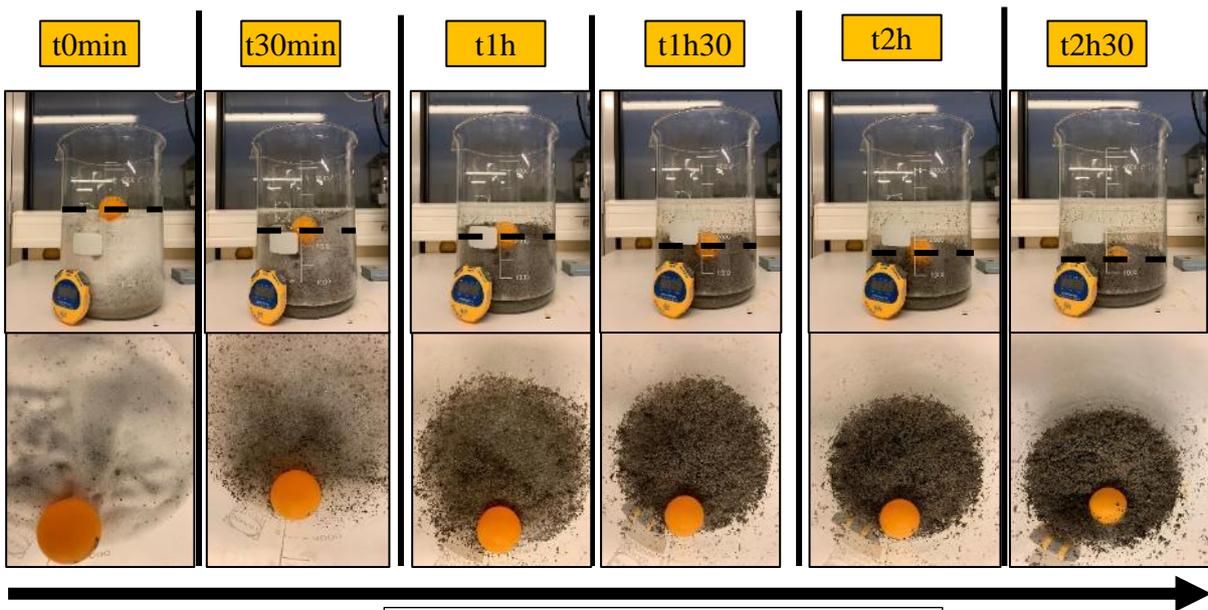
- 1- Les particules s'adsorbent à l'interface eau-air, de la même façon que les molécules tensioactives et stabilisent elles-mêmes l'interface.
- 2- Les particules ne s'adsorbent pas à l'interface eau/ air mais bloquent l'écoulement dans le bord de plateau.

On note sur la Figure 28 et Figure 29 que la vitesse de drainage est ralentie de 1.42 mm/min à 0.41mm/min pour les sédiments et à 0.83mm/min pour les mâchefers. Les sédiments ralentissent deux fois plus la vitesse de drainage que les mâchefers (ils stabilisent deux fois plus la mousse).



$$V_{\text{moyenne drainage}}(l) = 0.41\text{mm/min}$$

Figure 28. Stabilité de la mousse avec sédiments en fonction du temps



$$V_{\text{moyenne drainage}}(l) = 0.83\text{mm/min}$$

Figure 29. Stabilité de la mousse avec mâchefers en fonction du temps

Ceci est dû à la taille et la forme des grains de ces matériaux. En effet, plus la taille des grains est petite (cas des sédiments par rapport aux mâchefers), plus elle contribue à la stabilité des films. Et plus les grains présentent une forme non parfaitement sphérique, (cas des mâchefers dont la forme présente des angles et sommets tranchants –Figure 30), plus ils provoquent la rupture du film.



Figure 30. Observation de la forme des grains de mâchefers avec le microscope optique

4.2.3 Mousse avec fibre de verre

Comme cité auparavant, on remarque sur la Figure 31, que l'ajout de la fibre accélère la vitesse de drainage et donc a un effet défavorable sur la stabilité de la mousse. La vitesse de drainage passe de 1,42 mm/min pour la mousse à 2,5mm/mm avec la fibre de verre.

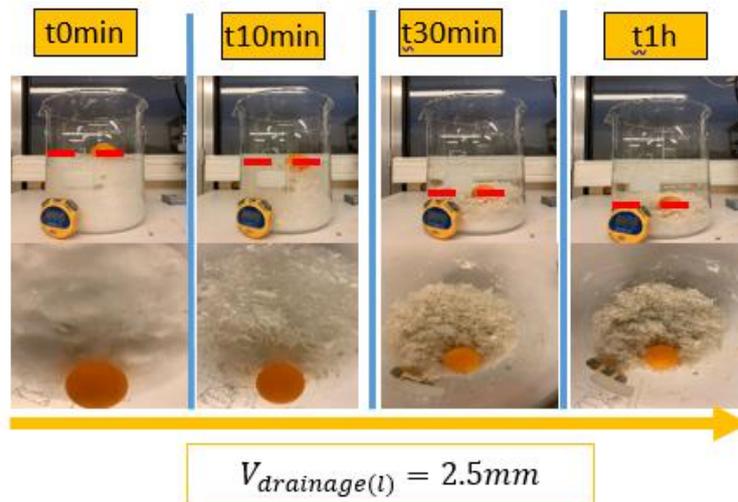


Figure 31. Stabilité de la mousse avec fibre de verre en fonction du temps

Ceci est dû essentiellement à la forme et la taille des particules de la fibre qui fragilisent le film en effet comme observé dans la Figure 32, les particules de la fibre de verre présentent une forme tranchante qui provoquent la rupture du film.

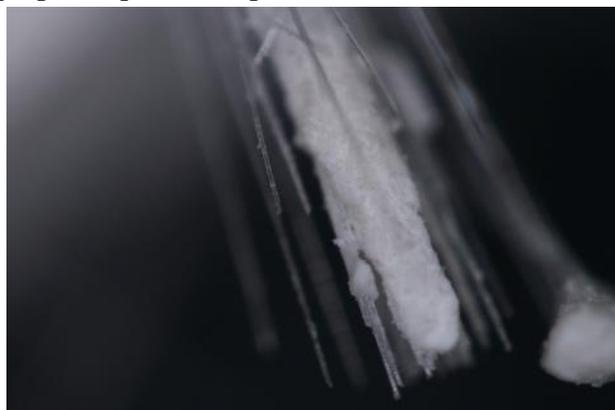


Figure 32. Observation de la forme des particules de la fibre de verre avec le microscope optique

4.3 Conclusion

On peut conclure que les sédiments et les mâchefers n'impactent pas de manière significative la mousse et qu'ils jouent même un rôle de stabilisateurs. Par contre les fibres de verre ont tendance à déstabiliser la mousse.

Les sédiments sont plus stabilisateurs que les mâchefers grâce à la forme des grains plus sphériques et à leur teneur en fines.

Ces résultats vont permettre de mieux présager et comprendre les réactions qui pourraient survenir lors de leur mélange avec le sable et le ciment.

5. ESSAIS DE FORMULATION

Les essais de formulation s'appuient sur les essais normalisés des bétons ordinaires

Les mesures ont été effectuées à l'état frais (air occlus et ouvrabilité) puis à l'état durci (caractérisation de la structure porale, essais mécaniques, mesure de la masse volumique sèche et de la conductivité thermique).

Pour les essais à l'état durci, les mortiers ont été placés dans des éprouvettes cubiques de dimensions 4×4×16 cm conformes au NF EN 196-1. Les mortiers ont mûri dans des sachets en plastique, sous cure humide (100% d'humidité) et à une température ambiante de 20°C. Après démoulage, la conservation se fait à l'air libre avec une température stable de 20°C et un taux d'humidité de 50%.

5.1 L'ouvrabilité

L'ouvrabilité permet de rendre compte de la fluidité et maniabilité et de la facilité de mise en œuvre.

En général, l'ouvrabilité (compacité) est liée à plusieurs paramètres : le ciment, les granulats (forme et granulométrie), le dosage en eau, et les constituants.

Elle a été évaluée par la mesure de l'étalement, au moyen de l'essai au mini-cône MBE (Mortier Béton Equivalent) développé par A. Schwartztruber [157], selon la norme NF EN 12350-2, car plus adapté aux petits volumes manipulés en laboratoire. Le diamètre de l'étalement a été mesuré à 20, 45, 60, 80 minutes. Le test a été réalisé dans une salle climatique à 20±2°C.

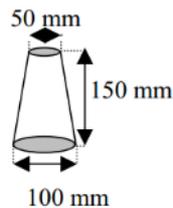


Figure 33. Mini cône MBE

5.2 La densité à l'état frais



Figure 34. La balance D

La mesure de la masse volumique est réalisée par un appareil précis qui est la balance D.

5.3 L'air occlus

La mesure de l'air occlus (vides d'air dans le béton qui ne sont pas intentionnellement créés), a été réalisée par un aéromètre la Figure 35, selon la norme NF EN 12350-7.

Cette mesure est utile dans la mesure où la teneur en air occlus influence sur les propriétés rhéologiques et mécaniques



Figure 35. Aéromètre

5.4 Caractérisation de la structure porale

La caractérisation de la structure porale des bétons mousse est l'étape la plus déterminante dans cette recherche. Car d'après la littérature, c'est essentiellement la porosité qui détermine les propriétés essentielles du béton mousse (résistance, durabilité, isolation et légèreté) : plus les pores sont fins, uniformément distribués et circulaires, meilleurs sont ses propriétés [35].

En général la structure porale est déterminée par l'arrangement granulaire et la structuration de la phase liante. Les paramètres de la structure porale mesurés sont :

- ✓ La porosité ou le volume poreux, la proportion de vides par rapport au volume total du matériau ;
- ✓ La distribution de la taille des pores, représentant la proportion de pores selon leur taille ;
- ✓ La surface spécifique, c'est-à-dire la surface totale des pores ouverts et interconnectés, représentant la surface de contact qui est directement accessible aux agents externes agressifs susceptibles de provoquer des réactions avec le mélange et autres interactions (absorption d'eau, échanges de chaleur,). Plus cette surface est petite plus la pénétration des agents agressifs et les interactions sont rendues difficiles. La pâte contenant de petites bulles a une surface spécifique plus grande que celle contenant de grandes bulles.
- ✓ La forme des pores (circularité).

En plus des calculs théoriques de la porosité, plusieurs techniques expérimentales ont été testées, afin de pouvoir obtenir les résultats les plus précis possibles, étant donné que chaque méthode sera plus ou moins précise selon le paramètre à mesurer et selon les tailles des pores : la porosité par intrusion de mercure (PAM) pour la mesure des diamètres $< 11 \mu\text{m}$ et la surface spécifique), porosité accessible à l'eau (PAE) pour la mesure de la porosité, traitement d'images par tomographie (TI-T) et traitement d'images par microscope optique (TI-MO) pour la mesure des diamètres $> 9 \mu\text{m}$ et la circularité.

5.4.1 Porosité théorique

La porosité théorique a été estimée par les 2 équations suivantes :

- ✓ L'équation de Hoff [32] : $\phi_{th} = 1 - \frac{\gamma_c(1+0.2G_c)}{(1+\frac{E}{C})G_c\gamma_e}$; Où ϕ_{th} est la porosité théorique, γ_c la densité du béton, G_c la densité du ciment, γ_e la densité de l'eau et E/C le rapport Eau/ciment

- ✓ l'équation de de Zheng [158] : $\phi_t = 1 - \frac{\gamma_b}{\gamma_{th}}$; où ϕ_t est la porosité totale, γ_b la masse volumique du mélange ; et γ_{th} est la densité théorique calculée selon cette formule :

$$\gamma_{th} = \frac{100+R_{cs}+0.25R_{cs}}{\frac{100}{G_s}+\frac{R_{cs}}{G_c}+(0.25R_{cs}\times 0.75)}$$

avec R_{cs} = rapport sable sur ciment,

G_s = densité du sable,

G_c = densité du ciment

5.4.2 Mesure de la porosité par intrusion du mercure (PAM)

La mesure de la porosité par intrusion du mercure (liquide non mouillant), est l'une des techniques les plus utilisées pour caractériser la structure des matériaux poreux. Elle est déterminée grâce à la mesure de la pression qui est nécessaire pour que le mercure puisse traverser le réseau poreux.



Figure 36. Prosimètre à mercure/ Autopore V -version 9605

Les mesures ont été réalisées, à l'aide d'un prosimètre à mercure/ Autopore V -version 9605 (micromeritics) la Figure 36, capable de mesurer les tailles allant de de 3nm à 1100 μ m.

Le calcul des différentes paramètres (volume, diamètres et surface spécifique) ainsi que la fonction de distribution des tailles de pores, sont fournis par le module logiciel du système.

Il est à retenir toutefois quelques limites importantes à cette technique fournie par la littérature :

- ✓ Cette technique nécessite un prétraitement des échantillons pour que le réseau poreux puisse être accessible au mercure à injecter : séchage et dégazage des échantillons afin d'évacuer toute l'eau résiduelle ainsi que les gaz et vapeurs contenus dans les pores. Ce qui en résulte un risque d'imprécision des valeurs obtenues, car elles peuvent varier selon les conditions de séchage (température, humidité,). Un séchage insuffisant par exemple,

réduira l'accès au réseau poreux, et pourra fausser les mesures et induire des valeurs minimisées. Tandis qu'un séchage trop brutal peut altérer la microstructure du matériau en l'occurrence des tassements ou fissurations qui pourraient déprécier la quantification des vides et donc la mesure de la porosité [159].

- ✓ Tous les pores ne sont pas accessibles au mercure injecté, étant donné que le mercure ne pénètre que dans les pores ouverts et interconnectés. Les pores fermés non accessibles, ne seront pas pris en compte, ce qui tend parfois à sous évaluer de manière importante le volume poreux.
- ✓ Une troisième limite peut être imputée à cette technique, qui a tendance à représenter la taille des pores D2 comme ayant le même diamètre que D1 (gorges). Ce phénomène est connu sous le nom de « bouteille d'encre »[160]. Et dans le cas des bétons mousse la pression d'intrusion du mercure peut détruire les lamelles minces entre les pores et par conséquent les 2 pores D1 et D2 peuvent être considérés comme un seul pore Figure 37.
- ✓ Les plus gros vides, tels que bulles d'air ou les zones macroporeuses présentes au niveau des interfaces pâte-granulats, ne peuvent pas non plus être correctement quantifiés par cette technique. L'analyse de ces vides a été possible par le traitement d'images.

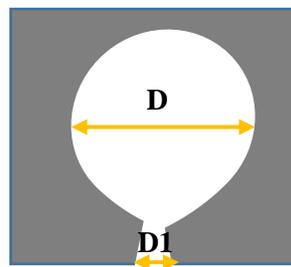


Figure 37. Phénomène de bouteille d'encre

5.4.3 Mesure de la porosité accessible à l'eau (PAE)

L'essai a été réalisé selon la norme NF P18-459, et consiste à évacuer l'air du matériau puis à l'immerger dans l'eau jusqu'à saturation c'est-à-dire jusqu'à ce que l'eau occupe la totalité des vides [161]. La limitation que l'on pourrait attribuer à cette technique, c'est la surestimation de la valeur de la porosité causée par la déshydratation possible de certains composants du béton.

5.4.4 Traitement d'images par tomographie (TI. T)

Cette technique d'imagerie non destructive, appelée aussi microtopographie aux rayons X, permet d'identifier la structure interne d'un matériau, à l'aide d'un équipement de tomographie ouvert et ultra-flexible à haute résolution tomographique (0.4 μm) et haute puissance (300 kV), appelé UltraTome Figure 38.

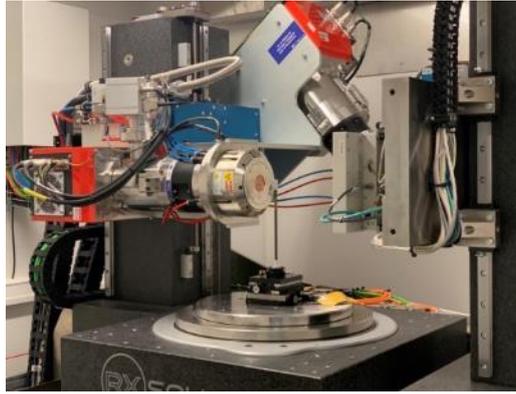


Figure 38. ULTRATOM Système de tomographie par rayons X

La limitation attribuée à cette technique, c'est son incapacité à analyser les micropores inférieurs à $20\mu\text{m}$, car ils n'apparaissent pas clairement lors du grossissement d'images. Les paramètres clés de la porosité ont été déterminés par le logiciel du système (distribution de la taille des pores et circularité).

Le principe du traitement d'image par tomographie est schématisé sur la Figure 39.

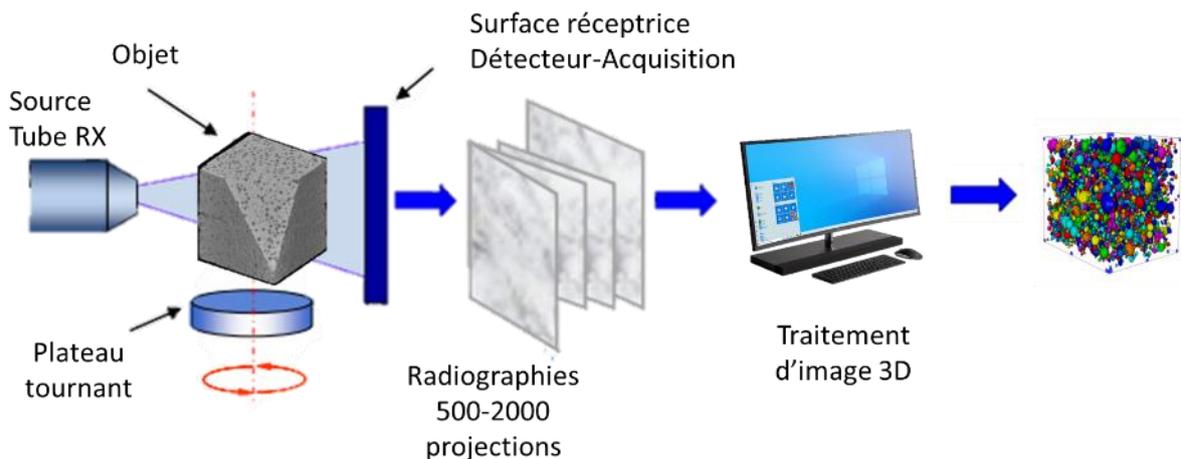
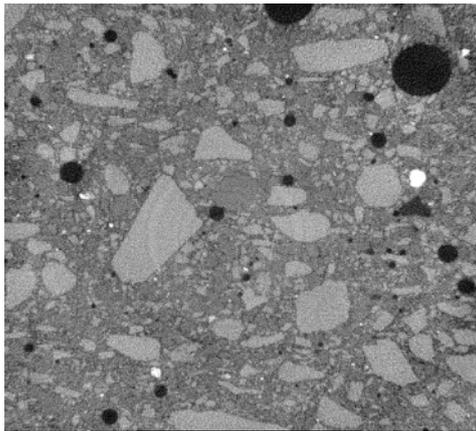


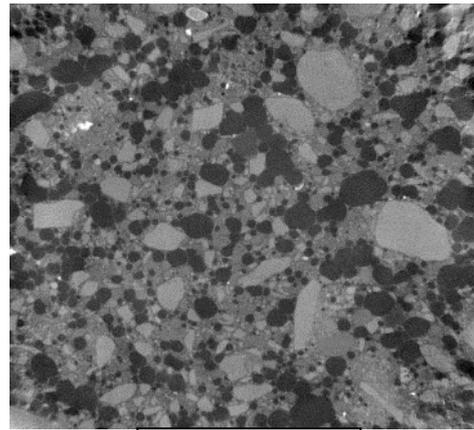
Figure 39. Principe du traitement d'image par tomographie

Étant donné la complexité de la structure porale des bétons mousse obtenus, on a adapté l'étape de traitement d'images 3D, afin de disposer d'images des pores de meilleure qualité et avec un rendu plus précis. Les plans de coupe radiographiques obtenus (entre 1300 et 1400), illustrés sur la Figure 40, ont été traités par le logiciel Amira-Aviso, pour la reconstruction en 3D du réseau poreux :

- ✓ Une première étape consistant à supprimer les zones inexploitable correspondant à de la matière,
- ✓ Un post-traitement : traitement des pixels correspondant à l'application de différentes fonctions citées ci-dessous :
 - Filtre bilatéral,
 - Fonction d'érosion et de dilatation des pixels qui permet de supprimer des objets de trop petite taille.



Sans mousse



Avec mousse

Figure 40. Coupes 2D s avant traitement

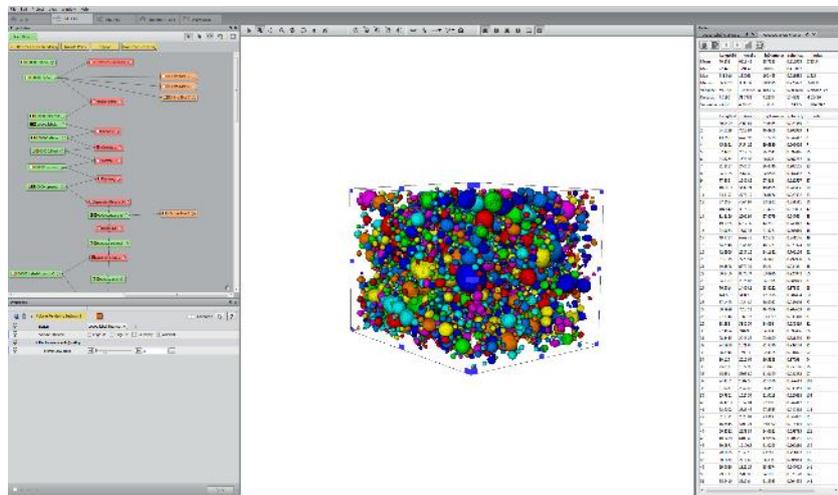


Figure 41. Traitement d'images (segmentation par apprentissage)

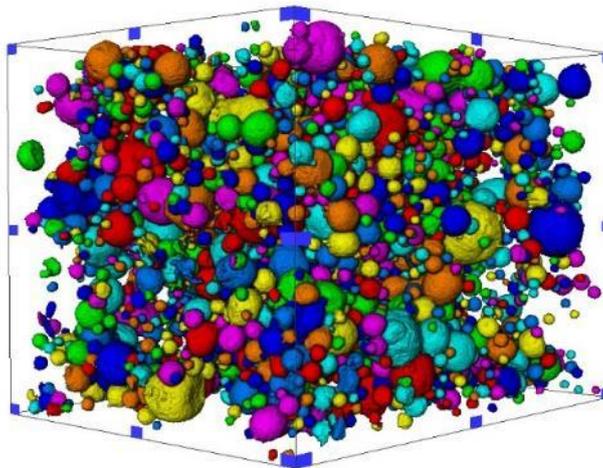


Figure 42. Coupes 3D après traitement

5.4.5 Traitement d'images par microscope optique (TI.MO)

Le microscope utilisé est plus précisément le microscope en fluorescence, qui fonctionne de la même manière que le microscope optique, à la seule différence près que l'optique utilise

de la lumière blanche alors que le microscope utilisée en fluorescence possède une gamme définie de longueurs d'onde.

La limitation attribuée à cette technique, c'est son incapacité à analyser les micropores inférieurs à $9\mu\text{m}$, car ils n'apparaissent pas clairement lors du grossissement d'images. La Figure 43 illustre les différentes étapes de cette technique :

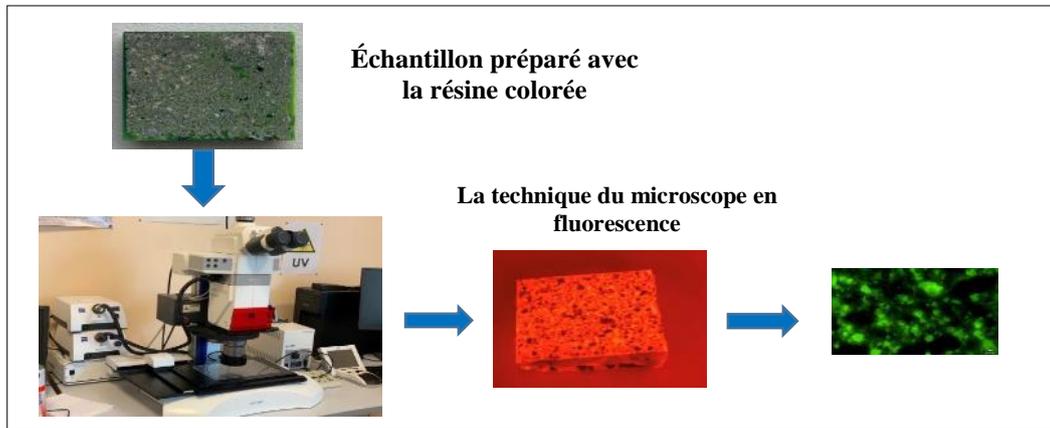


Figure 43. Principe du traitement d'image par microscope

5.4.6 Technique retenue

Après évaluation des différentes techniques, on a opté pour celle de la porosité accessible à l'eau, car c'est la moins limitée et elle fournit les valeurs de porosité les plus précises, dans la mesure où elle tient compte de la plus large gamme des tailles des pores, comme on peut le voir sur la Figure 44.

Les résultats obtenus des essais de porosité, ont d'ailleurs validé ce choix : les valeurs résultant des 2 techniques PAM et traitement d'images étant en effet inférieures à celles de la porosité à l'eau.

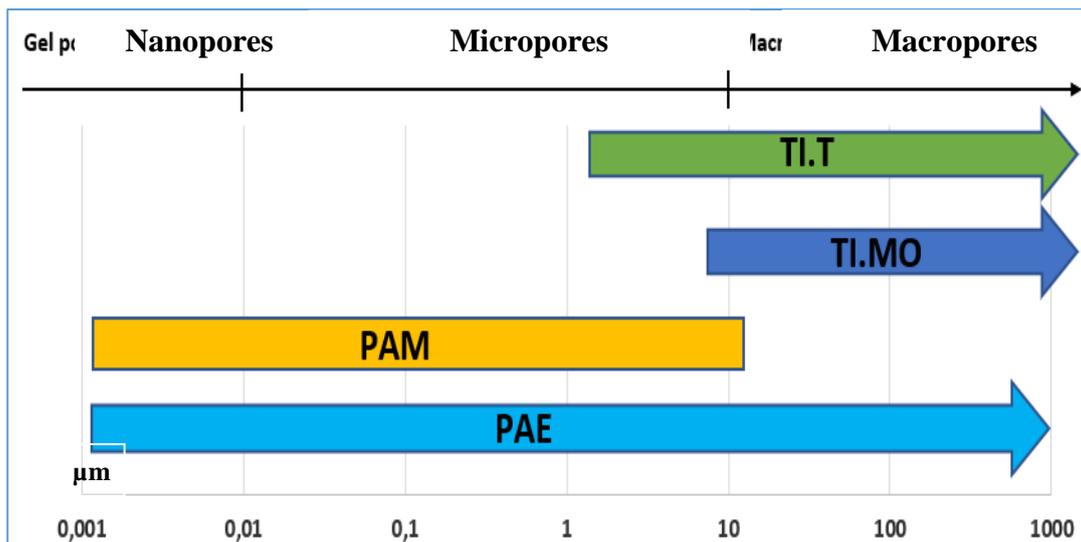


Figure 44. Gamme de tailles des pores couverte par les 3 techniques de la mesure de la porosité

5.5 La résistance à la compression

L'essai en compression a été mené conformément à la norme (NF P94-050).

Les mesures de la résistance à la compression ont été effectuées à 7, 28 et 60 jours. La valeur considérée est la moyenne des 3 tests pour chaque mesure à l'aide d'une presse de type Instron 5500 R Figure 45.



Figure 45. La presse INSTRON 5500 R

5.6 La conductivité thermique

La conductivité thermique a été mesurée par la méthode de source plane transitoire méthode HotDisk ou disque chaud régie par la norme Internationale ISO 22007-2 :2008, au moyen d'un analyseur thermique de type Hot Disk TPS2200 Figure 46.



Figure 46. Analyseur thermique Hot Disk TPS2200

Les propriétés de transferts thermiques sont directement liées aux constituants, à la morphologie du milieu (matrice solide et réseau poreux) et aux interactions entre les différents types de transferts existant dans le matériau.

6. METHODE DE FORMULATION

6.1 Préparation et malaxage

Il est à rappeler que la qualité de l'agent moussant ainsi que les paramètres de fabrication de la mousse interviennent fortement dans les propriétés des bétons mousse (densité, résistance) comme mentionné dans la partie 1. Béton mousse.

La préparation des bétons mousse est réalisée dans l'ordre suivant :

1. Préparation du mortier témoin (eau, sable et ciment), constituant la même base matricielle pour toutes les formulations.
2. Substitution du matériau recyclé (fraction massique pour les sédiments et les mâchefers, fraction volumique pour la fibre de verre).
3. Incorporation de la mousse préalablement préparée.

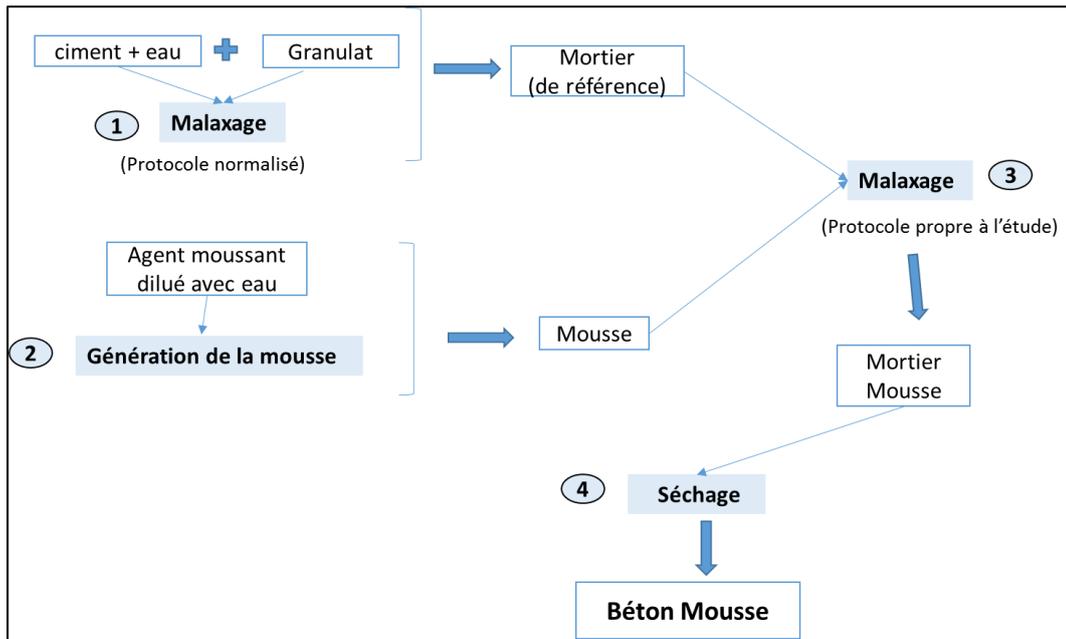


Figure 47. Préparation des bétons mousse

Dans ce qui suit, est développé le protocole de préparation d'un béton mousse suivant 3 étapes :

- 1-Préparation du mortier,
- 2-Production de la mousse,
- 3-Malaxage mousse-mortier.

Il est à noter que la méthode de malaxage est un facteur déterminant dans les performances des bétons mousse [25][26].

Préparation du mortier

Les mortiers sont préparés sans mousse, conformément à la norme EN 196-1 (EN 196-1 2005) selon les étapes suivantes :

- 1- Mélangeage du ciment et eau pendant 30s à vitesse lente (140tr/min) (V5) ;
- 2- Arrêt du malaxeur - Raclage du fond de cuve – Remise en marche du malaxeur ;
- 3- Introduction du sable pendant 30s à vitesse lente (140tr/min) (V5) ;
- 4- Augmentation de la vitesse à 285tr/min.

L'outil utilisé est un batteur mélangeur de 20 litres (DITO Electrolux XBM20).

Production de la mousse

Pour des considérations économiques et écologiques, il a été opté pour un moussage mécanique plutôt que chimique. Deux techniques de moussage mécanique ont été testées dans cette étude : la méthode par malaxage rapide et la méthode par mousse préformée.

La méthode de malaxage rapide (détaillée en annexe) consiste à introduire directement l'agent moussant à forte dose, au sein du mortier puis à mélanger l'ensemble. La mousse est ainsi créée et stabilisée par malaxage rapide.

La méthode par mousse préformée, consiste quant à elle, à produire séparément une mousse aqueuse à l'aide d'un générateur de mousse, puis à incorporer cette mousse préformée dans le mélange dans le mortier qui permet la création d'une mousse minérale stable.

On a opté pour la seconde méthode de mousse préformée car d'après la littérature Buyn et al. [60], elle présente plusieurs avantages :

- Elle est moins coûteuse car nécessite moins d'agent moussant dont le coût est assez élevé ;
- Elle ne nécessite pas l'utilisation de tensioactifs qui servent à stabiliser la mousse perturbée par la vitesse rapide de malaxage ;
- Elle nécessite moins d'énergie (vitesse et temps de malaxage plus faibles) ;
- Elle permet d'intervenir sur les propriétés de la mousse (notamment la masse volumique) afin d'ajuster les propriétés du mélange.

Pour la formation de la mousse aqueuse, on a utilisé le système de fabrication élaboré et fourni par l'entreprise Propump Engineering installée à Dartford au Royaume-Uni. Le système est constitué d'un générateur de mousse de type JFG 200 de Propump Engineering relié à un compresseur à air. Ce système permet de transformer l'agent moussant en mousse aqueuse la Figure 48.

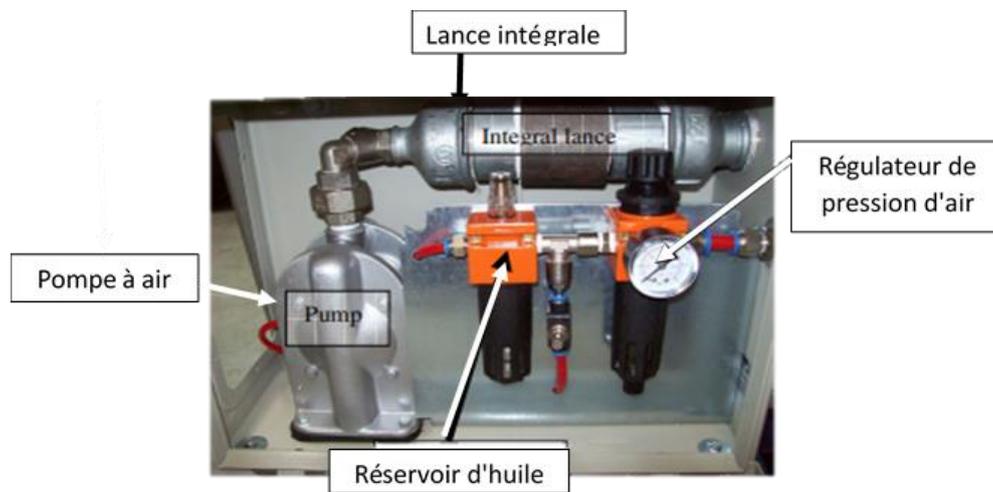


Figure 48. Générateur de mousse JFG 200 (b) mousse obtenue

L'agent moussant a été dilué au 25^{ème} avec de l'eau (1 l d'agent moussant / 25 l d'eau). Le générateur a été paramétré à 400l/min de débit d'air et 7 bars de pression. Ces paramètres ont conduit à une densité de la mousse aqueuse de 50 g/l.

Protocole de malaxage mousse et mortier

Il n'existe pas de protocole normalisé pour la troisième étape de malaxage de la mousse avec le mortier préalablement préparé. Un protocole propre à cette étude a donc été élaboré. Celui-ci s'appuie sur trois paramètres clés qui influencent directement l'homogénéité du mélange et la stabilité de la mousse : la vitesse, la durée et l'outil de malaxage utilisé. Les tests ont abouti à l'observation suivante : Plus la vitesse de malaxage augmente plus il y a une perte d'homogénéité du mélange. Celle-ci serait due, d'après la littérature [26][29], aux efforts de cisaillement du malaxage qui ont tendance à endommager et déformer les bulles jusqu'à leur élongation et leur éclatement. La vitesse retenue est de 35tr/s (plus petite vitesse du malaxeur). Le temps de malaxage a été arrêté à 30 s dès obtention d'un mélange homogène pour minimiser l'effet de cisaillement sur les bulles.

Deux batteurs ont été testés, dont un normalisé. A procédé et dosages identiques, on a remarqué que le batteur non normalisé permet d'obtenir une meilleure homogénéité et une masse volumique plus faible. C'est ce dernier batteur qui a été retenu pour l'expérimentation

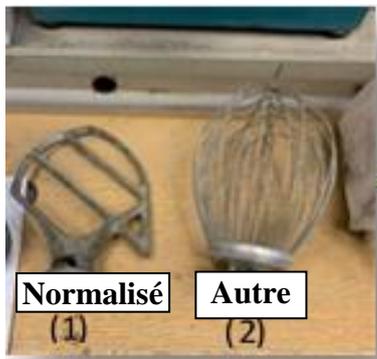


Figure 49. Type des batteurs

Tableau 23. Masse volumique pour chaque type des batteurs

Type des batteurs	Masse volumique (kg/m ³)
Normalisé	1436.6
Autre	1253.3

Le protocole de malaxage élaboré pour cette étude est résumé comme suit :

- 1- Pesage de la masse nécessaire de la mousse avec comme support la planche en polystyrène
- 2- Malaxage de la mousse avec le mortier à vitesse très lente : 35tr/min durant 30s
- 3- Arrêt du malaxeur – Raclage du fond de la cuve pour soulever la matière
- 4- Redémarrage du malaxeur avec la même vitesse : 35tr/min pendant 30s
- 5- Mesure de la densité du mélange intermédiaire, avec la balance Baroïde.

6.2 Dosage

Le calcul des dosages massiques des constituants a été réalisé selon les étapes suivantes (schéma descriptif sur la Figure 50) :

- Le rapport E/C (Eau efficace/Ciment) a été fixé à 0.6. Cette valeur est proche de la moyenne des rapports massiques adoptées dans la littérature pour la fabrication des bétons mousse (entre 0.45 et 0.65). Le rapport 0.5 a été testé et n'a pas été retenu car la pâte de mortier obtenu était trop ferme et causait la rupture des bulles ;
- Le rapport massique G/C (granulat/ ciment) a été fixé à 3. Cette valeur a été retenue afin de minimiser le dosage en ciment ;
- Le calcul de masse d'eau totale = Eau de gâchage + Eau absorbée par les matériaux recyclés ;
- Le calcul des masses ciment et Eau à partir des rapport E/C et G/C ;
- La mesure de la densité à l'état frais du mortier témoin ;
- Le calcul du volume du mortier témoin à partir de la densité ;

- L'ajout du matériau recyclé en substitution des matériaux recyclés au sable : fraction massique par rapport à la masse du sable pour sédiments et mâchefers ; fraction volumique par rapport au volume du mortier témoin pour la fibre (la masse de fibre à ajouter étant déduite du volume du mortier et densité de la fibre) ;
- Le calcul du volume du mortier de référence (avec matériau recyclé) ;
- L'ajout de la proportion volumique de la mousse par rapport au volume du mortier de référence ;
- Le calcul de la masse de mousse à ajouter à partir de la densité de la mousse.

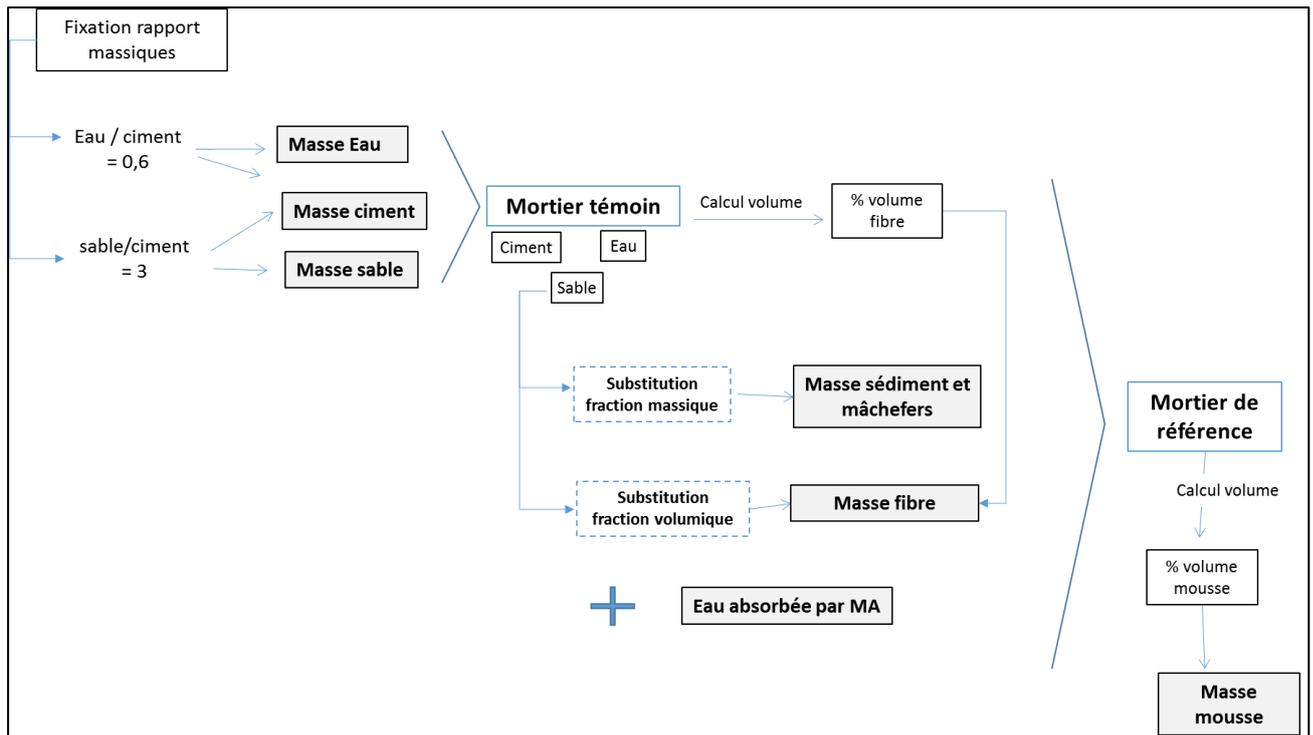


Figure 50. Schéma de la méthode de calcul des dosages massiques des constituants

Il est à noter que les rapports massiques E_{eff}/C et G/C sont restés fixes tout au long de l'expérimentation, pour pouvoir comparer les propriétés en fonction des seules variables taux de substitution et teneur en mousse.

PARTIE 3

CARACTERISATION DES MORTIER MOUSSE A BASE DE SEDIMENT

Dans ce chapitre, il sera présenté, pour chaque matériau recyclé, les résultats du dosage de référence, puis les résultats des effets des deux facteurs (mousse et matériau recyclé), sous la forme suivante : description, analyse des effets (logiciel Minitab), et interprétation. Pour éviter la répétition, l'effet de la mousse sur le mortier est présenté une seule fois dans la partie Sédiments

Pour le cas particulier des sédiments, pour lequel on dispose d'une taille d'échantillon plus importante, il sera présenté en plus, les résultats de la modélisation des effets, effectuée par le logiciel Design Expert (analyse de la variance et covariance, modèles de régression explicatifs, optimisation.)

1. DOSAGE DE REFERENCE

Le dosage de référence relatif aux essais de comparaison des bétons mousse avec sédiments se présentent ainsi :

- ✓ E/C (eau/ciment) = 0,6 et G/C (granulats/ciment) = 3
- ✓ Quantité d'eau = +10%, il n'a pas été tenu compte des résultats de l'absorption des sédiments (29%), car le matériau obtenu était trop fluide dès le départ avant l'ajout de la mousse, supposant un ajout en eau bien surévalué. Le dosage en eau a donc été ajusté à 10% dès l'obtention d'une consistance moins ferme
- ✓ 20 formulations testées : 0%, 15%, 30% et 50% pour les proportions massiques des sédiments (S%) en substitution au sable à quantité égale ; et 0%, 25%, 50%, 75% et 100% pour les proportions volumiques de la mousse (M%), par rapport au volume du mortier de référence.

Les quantités des composants nécessaires pour fabriquer 1m^3 de béton mousse, sont présentés dans le tableau suivant

Tableau de dosage :

Tableau 24. Compositions pour 1 m³ de béton mousse sur la base de ciment CEM I

Formulation	Densité état frais (kg/m ³)	Composition massique pour 1 m ³ de béton mousse								
		sédiments (kg)	Sable (kg)	Ciment (C) (kg)	Eau sédiments (l)	Eau efficace (l)	Eau totale (E) (l)	Mousse (l)	G/C	E/C
M0% S0%*	2200	0,0	1758,0	585,9	0,0	351,6	351,6	0	3	0,6
M0% S15%*	2166	263,7	1494,3	585,9	26,4	351,6	377,9	0	3	0,6
M0% S30%*	2138,5	527,4	1230,6	585,9	52,7	351,6	404,3	0	3	0,
M0% S50%*	2049,5	879,0	879,0	585,9	87,9	351,6	439,5	0	3	0,8
M25% S0%	1466	0,0	1171,5	390,4	0,0	234,3	234,3	15	3	0,6
M25% S15%	1552,8	189,0	1071,3	420,1	18,9	252,0	270,9	15	3	0,6
M25% S30%	1666	410,9	958,7	456,5	41,1	273,9	315,0	15	3	0,7
M25% S50%	1700	729,1	729,1	486,0	72,9	291,6	364,5	15	3	0,8
M50% S0%	1383,3	0,0	1105,4	368,4	0,0	221,1	221,1	30	3	0,6
M50% S15%	1478	179,9	1019,7	399,8	18,0	239,9	257,9	30	3	0,6
M50% S30%	1515	373,6	871,8	415,1	37,4	249,1	286,4	30	3	0,7
M50% S50%	1528	655,3	655,3	436,8	65,5	262,1	327,6	30	3	0,8
M75% S0%	1273,66	0,0	1017,8	339,2	0,0	203,5	203,5	45	3	0,6
M75% S15%	1350	164,4	931,4	365,2	16,4	219,1	235,6	45	3	0,6
M75% S30%	1428	352,2	821,7	391,3	35,2	234,8	270,0	45	3	0,7
M75% S50%	1475	632,6	632,6	421,7	63,3	253,0	316,3	45	3	0,8
M100% S0%	983,1	0,0	785,6	261,8	0,0	157,1	157,1	60	3	0,6
M100% S15%	1312	159,7	905,1	354,9	16,0	212,9	228,9	60	3	0,6
M100% S30%	1330	328,0	765,3	364,4	32,8	218,6	251,4	60	3	0,7
M100% S50%	1372	588,4	588,4	392,2	58,8	235,3	294,2	60	3	0,8

(*) mortiers de référence pour chaque série de formulations en sédiments

2. À L'ÉTAT FRAIS : AIR OCCLUS ET MASSE VOLUMIQUE

2.1 Description des résultats

Les résultats de l'air occlus et de la masse volumique sont présentés en même temps, du fait de leur lien de dépendance démontré dans plusieurs études.

En effet, d'après la courbe de la Figure 51, une corrélation linéaire négative entre la densité à l'état frais et l'air occlus ($P=0,001$ et $R^2= 88\%$) est observée.

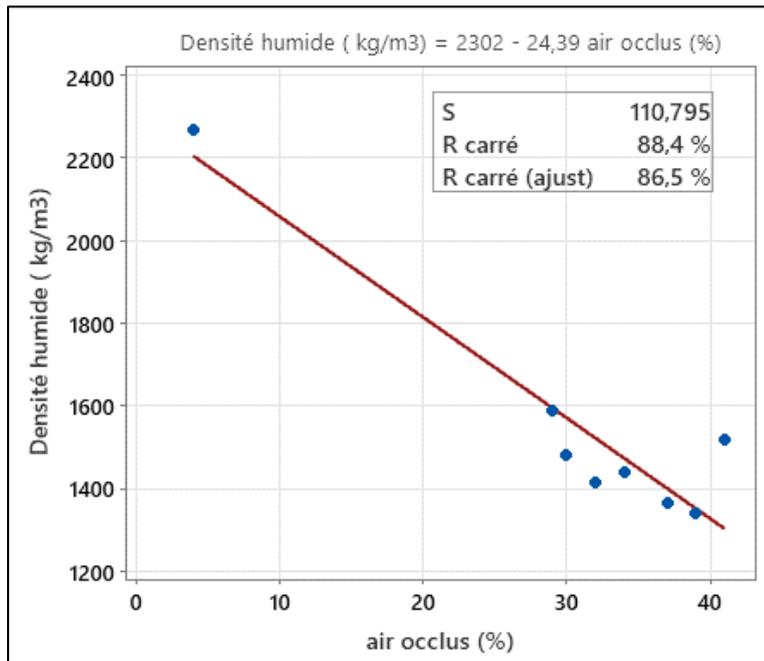


Figure 51. Courbe de régression densité à l'état frais en fonction de l'air occlus

La Figure 52 montre que, dans les formulations avec mousse (M=75%), une diminution de l'air occlus et une légère augmentation de la masse volumique sont observées avec l'ajout de sédiment.

La Figure 53 montre que, l'ajout de la mousse dans le mortier (sans sédiments), entraîne une diminution de la densité à l'état frais, corrélée à l'augmentation de l'air occlus. La variation est brusque dès l'introduction de la mousse à 25%.

D'après les variations de l'air occlus et la densité à l'état frais par rapport aux formulations sans sédiments Figure 54, on remarque que l'air occlus varie plus que la densité. Dans les formulations avec mousse (75%), l'air occlus diminue de 5%, 18% et 23% pour les taux de substitution de 15%, 30% et 50%. La densité à l'état frais de 2%, 6% et 10%.

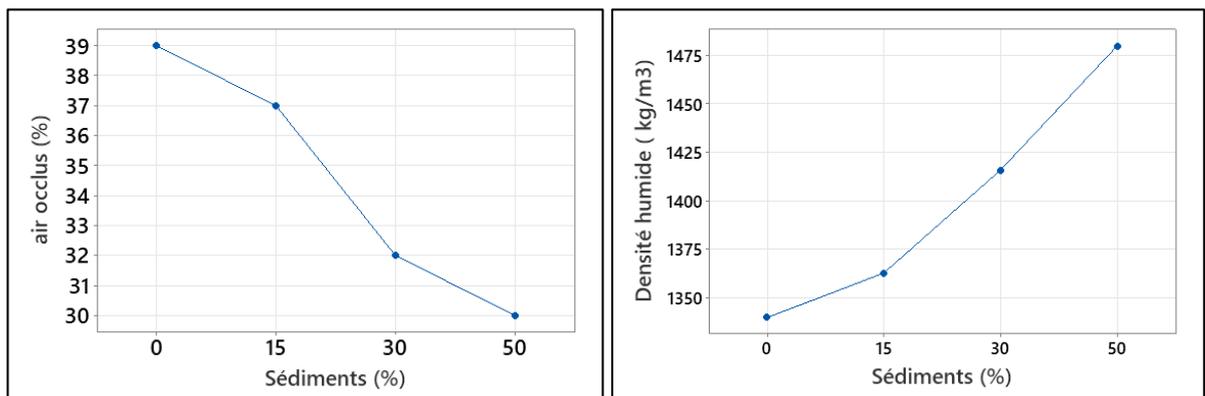


Figure 52. Variation de l'air occlus et densité à l'état frais en fonction des sédiments (formulations avec mousse 75%)

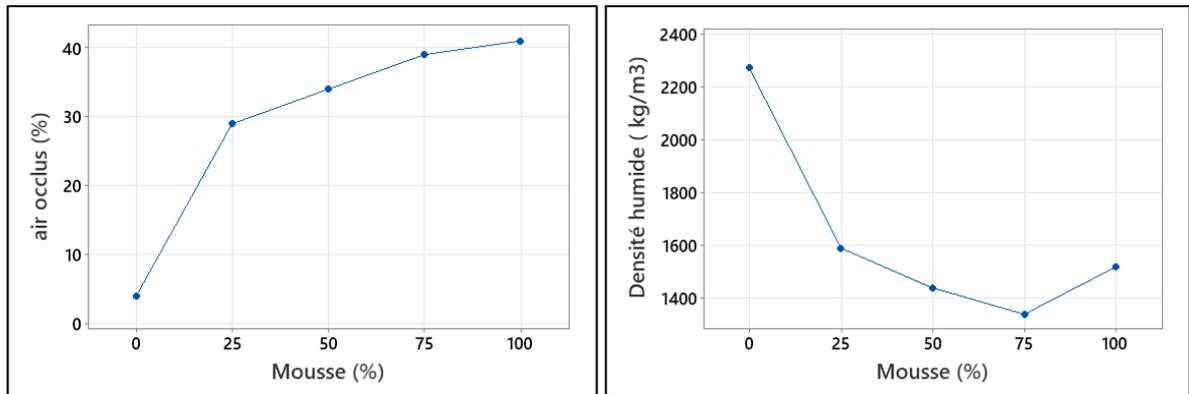


Figure 53. Variation de l'air occlus et densité à l'état frais en fonction de la mousse (formulations sans sédiments)

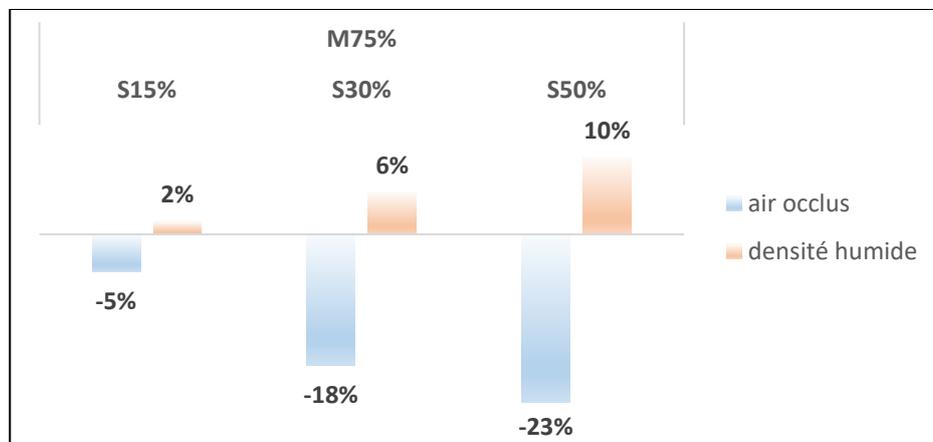


Figure 54 : Variation de l'air occlus et densité à l'état frais par rapport aux formulations sans sédiments

2.2 Interprétation et discussion

L'augmentation de l'air occlus sous l'effet de la substitution, dans les formulations sans mousse, est due probablement à la granulométrie des sédiments. Une étude de N.philippe et al [162] sur l'incorporation des sédiments dans les bétons autoplaçants a montré que l'air occlus croît avec l'augmentation du taux de fines des sédiments.

La diminution de l'air occlus sous l'effet de la substitution, dans les formulations avec mousse, est due à la chaux vive contenue dans les sédiments à dose assez concentrée (13%) qui d'après plusieurs études est à l'origine de la fragilisation de la mousse et l'éclatement des bulles. L'étude de Cong et Bing [5], mentionnée dans la Partie 1.3, a en effet montré que la chaux vive ajoutée au béton mousse, dégradait la stabilité de la mousse en endommageant et éclatant les bulles. Pendant le processus de mélange, la réaction de la chaux se produit immédiatement et l'eau existant à la surface de la mousse peut être consommée par celle-ci. Cela entraîne l'éclatement des bulles de mousse et la diminution de porosité. Une autre étude [58] a montré que la poudre de chaux avait la capacité de réduire la porosité en raison de ses fines particules.

L'effet de la mousse sur l'augmentation de l'air occlus, dans toutes les formulations, est dû à l'augmentation des pores suite à l'addition des bulles d'air générés par la mousse. Le cas de M100%, où on note une baisse de l'air occlus pourrait s'expliquer par :

- La ségrégation entre les gros agrégats du sable et ses particules fines, phénomène qui déstabiliserait la mousse ;
- La remontée des bulles d'air à la surface et la formation d'un nombre important de grosses bulles causées par la fusion des pores (mûrissement et coalescence).

2.3 Conclusion

Les mesures de l'air occlus et de la densité à l'état frais ont permis de montrer que :

- ✓ Les sédiments augmentent l'air occlus et diminuent légèrement la densité à l'état frais dans les formulations avec mousse. Pour des taux de substitution de 15%, 30% et 50%, l'air occlus diminue de 5%, 18% et 23% et la densité à l'état frais augmente de 2%, 6% et 10%.
- ✓ La mousse augmente l'air occlus et diminue la densité dans les formulations sans sédiments.

3. À L'ÉTAT FRAIS : OUVRABILITE

3.1 Résultats et analyse des effets

La Figure 55 montre que l'étalement augmente légèrement avec la substitution, dans les formulations avec et sans mousse. Dans la Figure 56, l'étalement augmente également avec l'ajout de la mousse dans les formulations avec et sans sédiments.

Sur le graphe de la Figure 57, les variations de l'étalement ont été calculées par rapport aux formulations sans sédiments, pour chaque série de mousse. On y observe que, dans les formulations sans mousse, l'augmentation de l'étalement sous l'effet de la substitution, est significative et atteint 45% pour 50% de substitution. Avec l'introduction de la mousse, cette augmentation est atténuée et varie entre 1% et 23% hors-série M100% où le mélange est hétérogène et trop instable.

Dans les graphes à moustache Figure 58, présentant la dispersion des valeurs de l'étalement, on remarque que la dispersion de l'étalement sous l'effet des sédiments fluctue selon la teneur en mousse, et que la dispersion de l'étalement sous l'effet de la mousse diminue de plus en plus avec l'ajout des sédiments jusqu'à la limite de 30%, c'est-à-dire que les sédiments atténuent l'effet de la mousse jusqu'à cette limite. Les valeurs des écarts types présentées dans les tableaux confirment bien l'observation précitée, la mousse impacte l'effet de sédiments et que les sédiments atténuent l'effet de la mousse (-14% en moyenne) et ce jusqu'à 30% de substitution.

Dans le diagramme de Pareto Figure 59, on voit bien que l'effet de la mousse sur l'étalement est plus important que celui des sédiments. En estimant l'intensité des 2 effets par les écarts types regroupés (tableaux), on peut déduire que la mousse a environ 2 fois plus d'effet que les sédiments sur la variation de l'étalement (écart type sédiments = 1,4 / écart type mousse = 2,7).

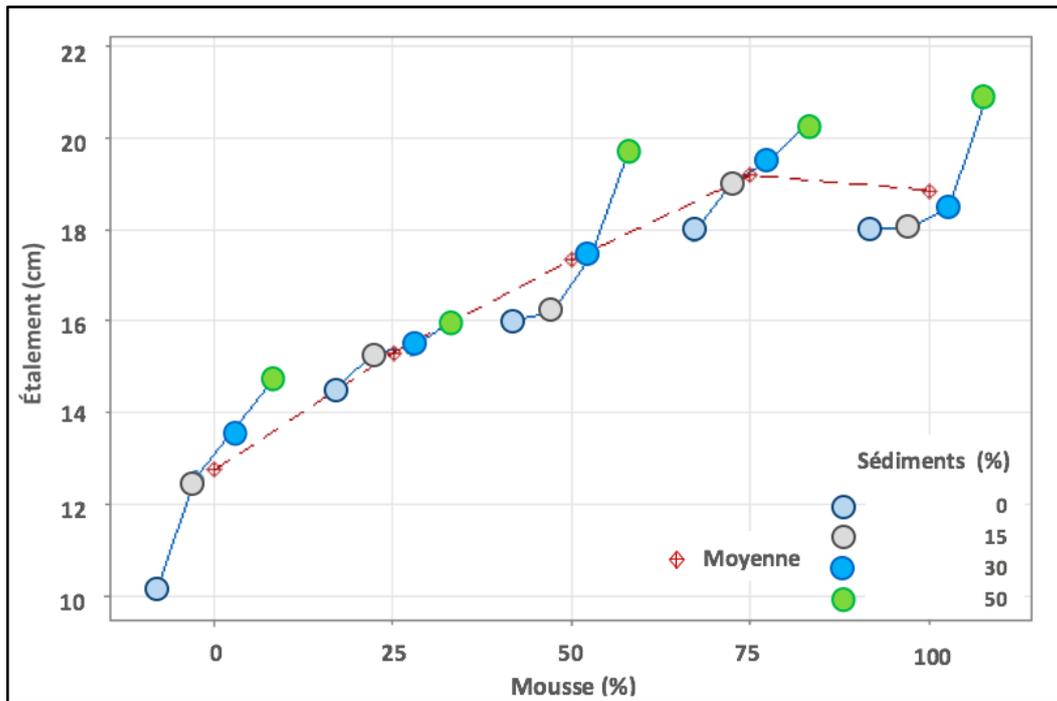


Figure 55. Variation de l'étalement en fonction des sédiments

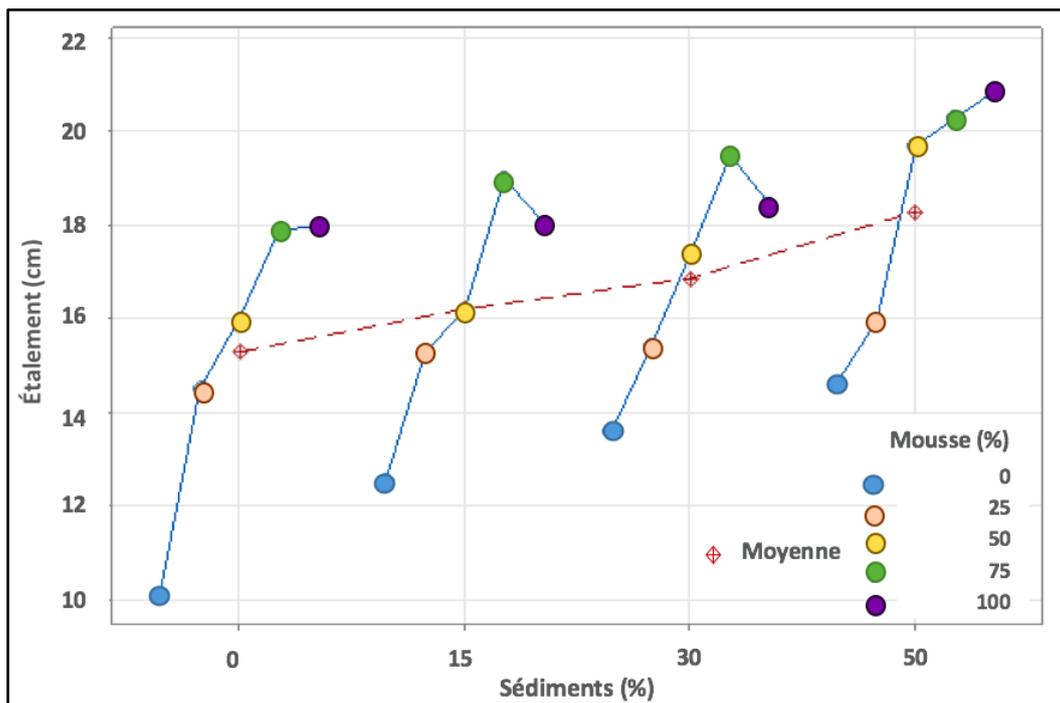


Figure 56. Variation de l'étalement en fonction de la mousse

Tableau 25. Statistiques de l'étalement

Variable	N	Moyenne	EcTyp	Variance	VarCoeff	Minimum	Maximum
Étalement (cm)	20	16,674	2,764	7,639	16,58	10,120	20,880

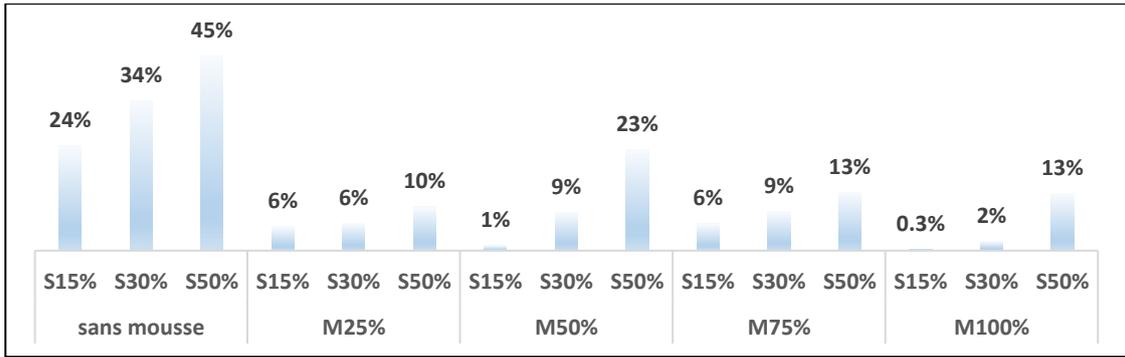
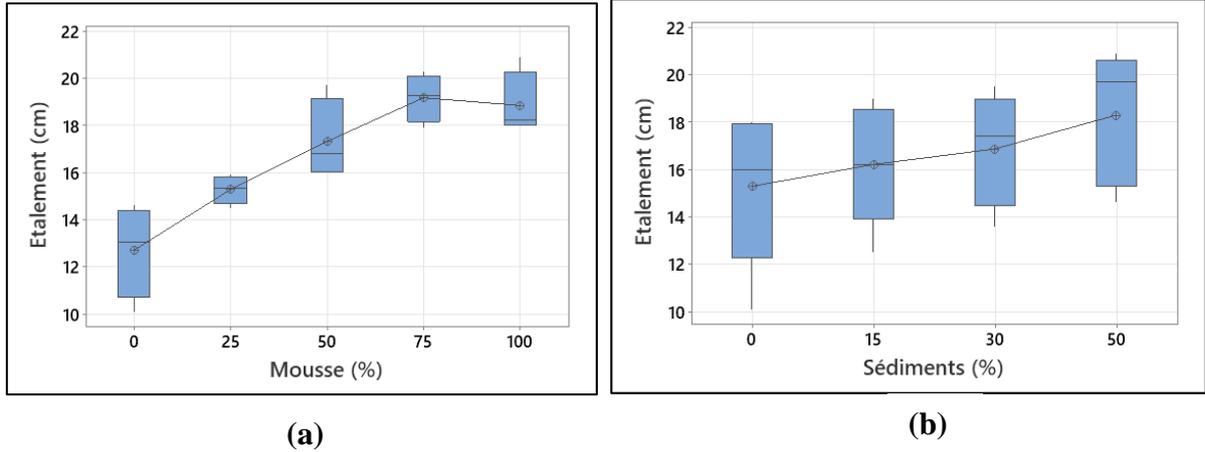


Figure 57. Variation de l'étalement par rapport aux formulations sans sédiments



(a)

(b)

Figure 58. (a) Distribution étalement en fonction mousse (b) Distribution étalement en fonction sédiments

(%)	N	EcTyp
0	4	1,940
25	4	0,603
50	4	1,704
75	4	1,009
100	4	1,372

Écart type regroupé = **1,40924**

Tableau 27. Écarts type étalement (effet des sédiments)

0	5	3,24
15	5	2,52
30	5	2,37
50	5	2,80

Écart type regroupé = **2,75324**

Tableau 26. Écarts type étalement (effet de la mousse)

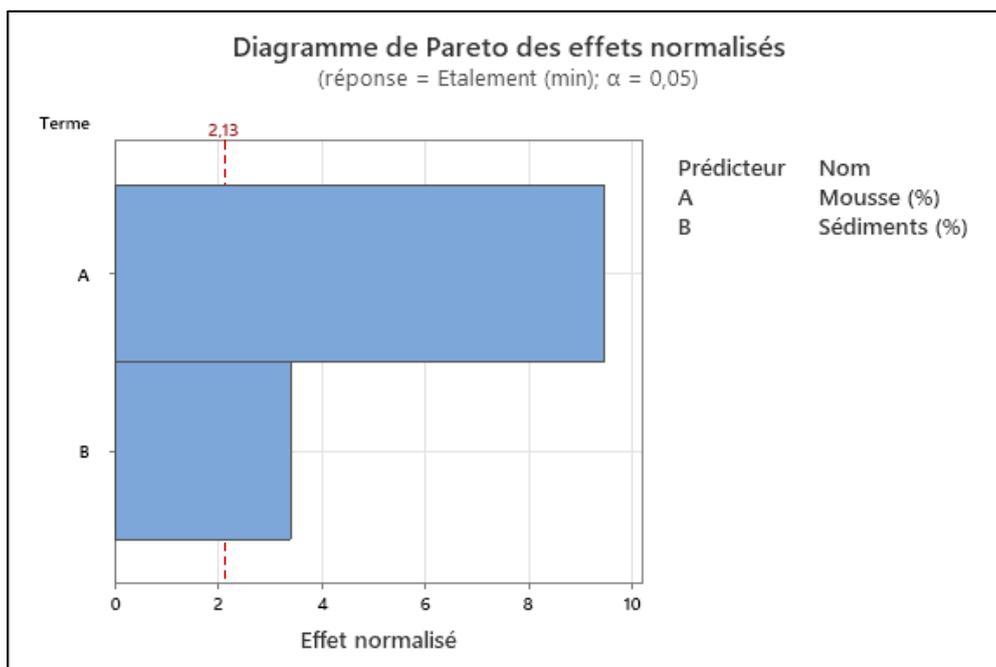


Figure 59. Diagramme de Pareto des effets des sédiments et mousse sur l'étalement

Les résultats de l'étalement dans le temps Figure 60, montrent que dans les formulations avec et sans mousse, l'étalement est accéléré dans le temps à mesure de la substitution, On peut voir qu'en présence de la mousse, l'étalement est d'avantage accéléré. Cette accélération est due au retard de prise provoqué par la substitution et l'ajout de la mousse. En effet, on note que les débuts et fins de prise sont de plus en plus retardés, à mesure de l'ajout des sédiments et de la mousse et que la mousse atténue l'effet des sédiments et inversement. La mousse a beaucoup plus d'effet que les sédiments.

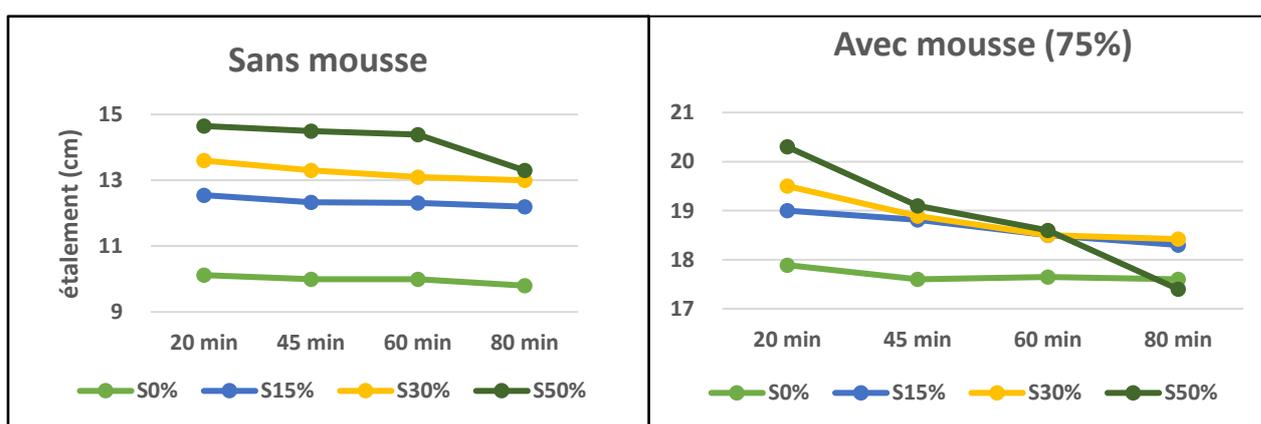


Figure 60. Évolution de l'étalement dans le temps en fonction des sédiments

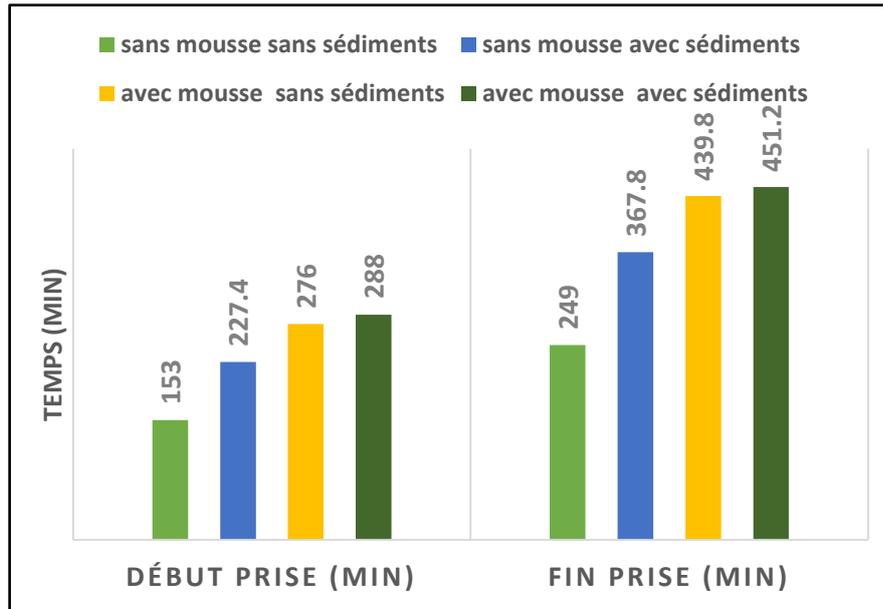


Figure 61. Variations temps de prise en fonction de la mousse et de sédiment

L'augmentation de l'étalement sous l'effet des sédiments dans les formulations avec mousse peut être expliquée en partie (90%) par la diminution de l'air occlus, étant donné le lien de causalité entre ces 2 propriétés indiqué par la courbe de régression de la figure où $R^2=90.4\%$. En effet, l'air occlus en diminuant, entraîne la diminution des espaces inter granulaires, et un accroissement des frottements, ce qui peut freiner l'écoulement.

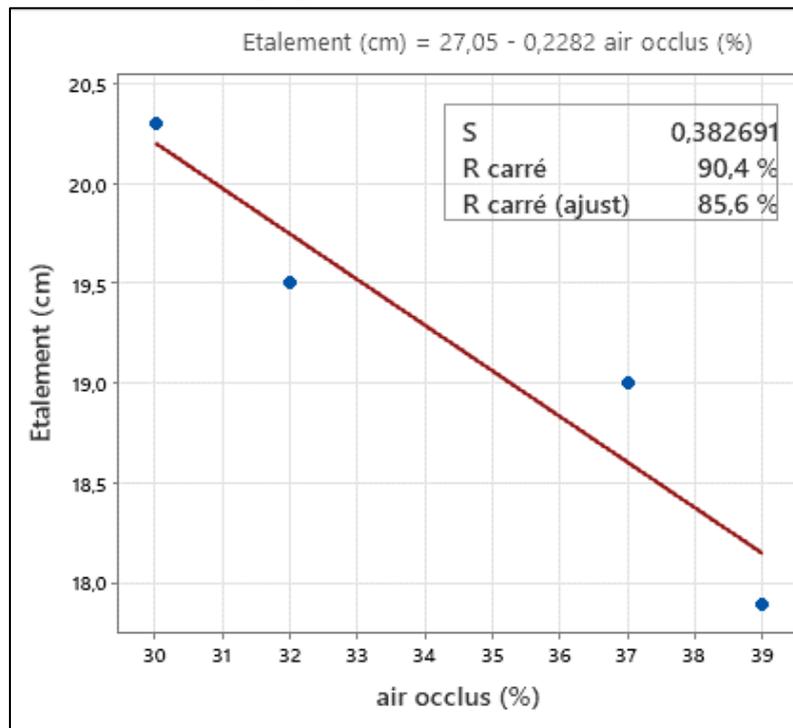


Figure 62. Courbe de régression étalement en fonction de l'air occlus (formulations avec mousse 75%)

Dans les formulations sans mousse, le facteur influant l'étalement est bien les fractions fines des sédiments. Limeira et al [87] ont travaillé sur le sable marine dragué du port de Barcelone en tant que correcteur granulaire fin en substitution partielle du sable brut de 15% à 50% de la masse de sable brut. Ils ont trouvé que la formulation avec 15% était la plus maniable. Selon Newman [163] l'effet de la fraction granulométrique des granulats sur la maniabilité du béton fabriqué avec des agrégats de dragage marin dépendra principalement de la fraction granulométrique du sable et de son uniformité

Les variations de l'étalement dans le temps observé, résultent de l'effet retardateur des sédiments et de la mousse sur la prise. L'effet retardateur des sédiments, peut être associé à la présence de la matière organique dans les sédiments à un taux de 7%, connue pour retarder la prise. Selon plusieurs études [164][93][165], quand le taux de matière organique dépasse 1g/100g, elle retarde le processus d'hydratation et de prise. Le composant majeur de la matière organique de dragage l'acide humique peu réagir avec le calcium et former de l'acide humique calcique, ce qui empêche la cristallisation des hydrates [90] [92]

En second plan, il est possible que le zinc même présent à un taux relativement faible 0.02 mg/kg, puisse relativement retarder l'hydratation des C3S, en formant une pellicule imperméable d'hydroxyde de Zinc amorphe ($Zn(OH)_2$) autour des grains anhydre ARLIGUIE et GRANDET [166] et provoquer un relatif retard de prise. L'étude de Agnès Zambon [96], citée auparavant, a bien montré l'effet retardateur du zinc

L'effet retardateur de la mousse est dû à la présence de bulles d'air qui ont tendance à ralentir la cinétique des réactions d'hydratation. Agnès Zambon [96] a montré que la présence des bulles d'air augmente le temps de début de prise et de fin de prise. Cet effet est plus important sur le temps de fin de prise que sur le temps de début de prise. La mousse a un effet retardateur au niveau de l'avancement des mécanismes d'hydratation qui reposent sur des phénomènes de diffusion d'ions. La présence des bulles d'air ralentit cette diffusion.

Le retard de prise causé par les sédiments peut avoir un effet négatif sur la stabilité de la mousse à cause du risque d'altération des bulles, et une incidence donc sur les autres propriétés du béton mousse comme mentionné dans la partie 1-1. Renvoi. Il peut être remédié à cela par l'ajout d'accélérateurs de prise. Tian Tian, Yun Yan et al [167] ont ajouté des accélérateurs de prise dans le béton mousse, et ont constaté le temps de début a été réduit de 78,6 à 85,3 % et le temps de prise final réduit de 22,9% à 46,5%.

Dans l'étude de Xiaoyun Yang et al [94], il a été constaté un affaiblissement de l'ouvrabilité avec la substitution des sédiments fluviaux dans les bétons mousse, et ce malgré l'ajout de superplastifiants. Ces résultats sont opposés aux nôtres en raison probablement de la forme irrégulière et la forte absorption d'eau des sédiments fluviaux.

3.2 Conclusion

Pour résumer, les essais d'ouvrabilité ont permis de montrer que :

- ✓ Les sédiments seuls augmentent assez significativement l'étalement (de 24, 34 et 45% pour des taux de substitution de 15,30 et 50%).
- ✓ En présence de la mousse, les sédiments continuent à augmenter l'étalement mais de façon plus atténuée (de 0 à 23%).

- ✓ La mousse augmente l'étalement dans les formulations avec et sans sédiments.
- ✓ L'effet des sédiments est atténué par l'ajout de la mousse et inversement l'effet de la mousse est atténué par la substitution jusqu'à la limite de 30%.
- ✓ L'effet de la fibre sur l'ouvrabilité reste significatif par rapport à la mousse, quoique 2 fois moindre.
- ✓ La mousse et les sédiments retardent le début et le temps de prise, par contre ils accélèrent l'écoulement dans le temps.

Les sédiments ont donc un effet légèrement favorable sur l'ouvrabilité des bétons mousse. Le gain en ouvrabilité varie de 1 à 23%, soit une moyenne de 10% (écart type 0.03). L'effet retardateur des sédiments constitue un résultat défavorable pour les bétons mousse, du fait du risque d'altération des bulles. Pour remédier à cela, il pourra être alors envisagé d'ajouter des accélérateurs de prise.

Pour avoir un gain en ouvrabilité intéressant (10 à 23%), il est nécessaire d'avoir un taux de substitution de 50%, sinon en deçà de ce taux, le gain est à peine de 6 à 9 %. À titre indicatif, partant de formulations de référence (sans sédiments) présentant un étalement entre 14 et 15.6 cm, la substitution des sédiments a permis d'obtenir des bétons mousse légèrement plus maniables (entre 15.3 et 20.3cm, si on exclut la série M100% où la mousse est instable). Ces résultats quoique positifs, ne sont pas suffisants pour une utilisation comme bétons autoplaçants par exemple.

4. À L'ÉTAT DURCI : STRUCTURE PORALE

Comme introduction à ce chapitre, il sera présenté les résultats comparatifs issus des différents essais de la mesure de la porosité.

Le graphique comparatif de la Figure 63 montre que les valeurs des deux techniques expérimentales PAM et traitement d'images (TI : par tomographie X) sont inférieures à celles de la PAE. Ces résultats étaient prévisibles car les porosités mesurées par PAM et TI sont sous-estimées du fait des limites développées dans le chapitre « descriptif des essais et mesures ». Tandis que les équations théoriques Zheng et Hoff ont révélé des valeurs supérieures à l'expérimentation.

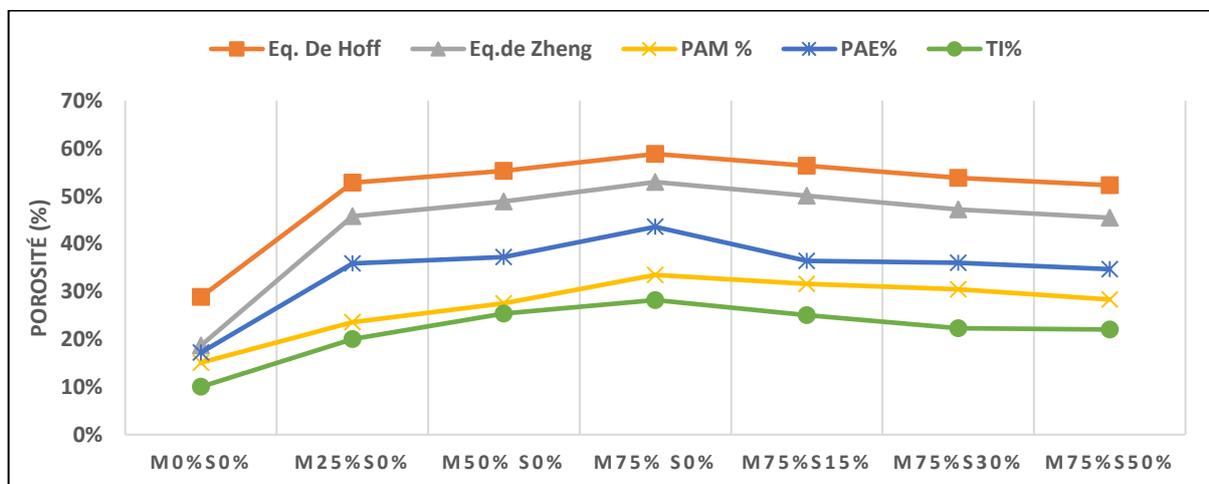


Figure 63 : Courbes comparatives des techniques de mesure de la porosité

Les valeurs de la porosité qui seront donc retenues, sont celles relatives à la mesure de la porosité accessible à l'eau (PAE) qui sont les plus proches de la réalité.

4.1 Résultats et analyse des effets

4.1.1 Porosité

La Figure 64 montre que la porosité (valeurs issues de la technique PAE) augmente légèrement avec la substitution, dans les formulations sans mousse. En présence de la mousse, elle diminue avec la substitution.

La Figure 65 montre que la porosité augmente avec l'ajout de la mousse dans les formulations avec et sans sédiments.

D'après les résultats des variations de la porosité, calculées par rapport aux formulations sans sédiments (Figure 66), on remarque une augmentation significative de la porosité dans les formulations sans mousse de 12% à 30% pour 15%, 30% et 50% de substitution. Pour les formulations avec mousse, une diminution de la porosité de 3% à 30% est observée. Ces deux valeurs minimum et maximum (porosité de 3% à 30%) correspondent à 25% de mousse avec respectivement 15% et 30% de sédiments. Pour des teneurs en mousse plus importante, la substitution fait également baisser la porosité de façon significative (de 16 à 20% pour 75% et 100% de mousse)

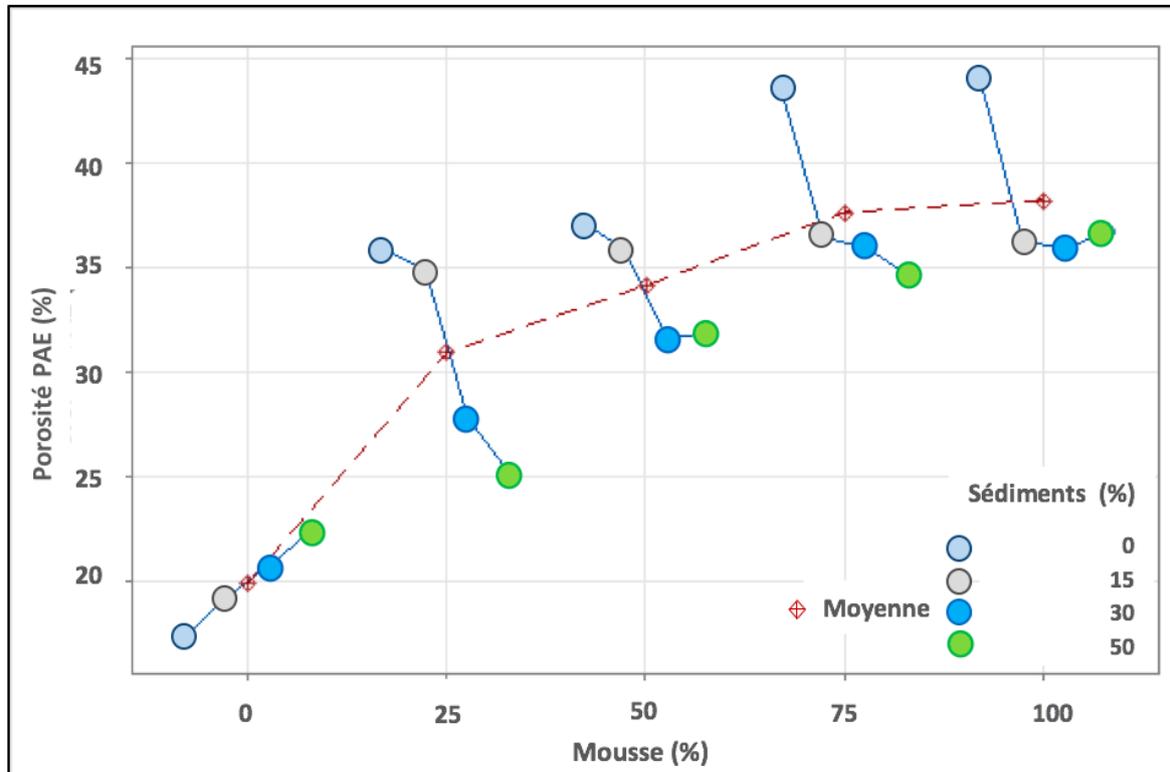


Figure 64 : Variation de la porosité en fonction des sédiments

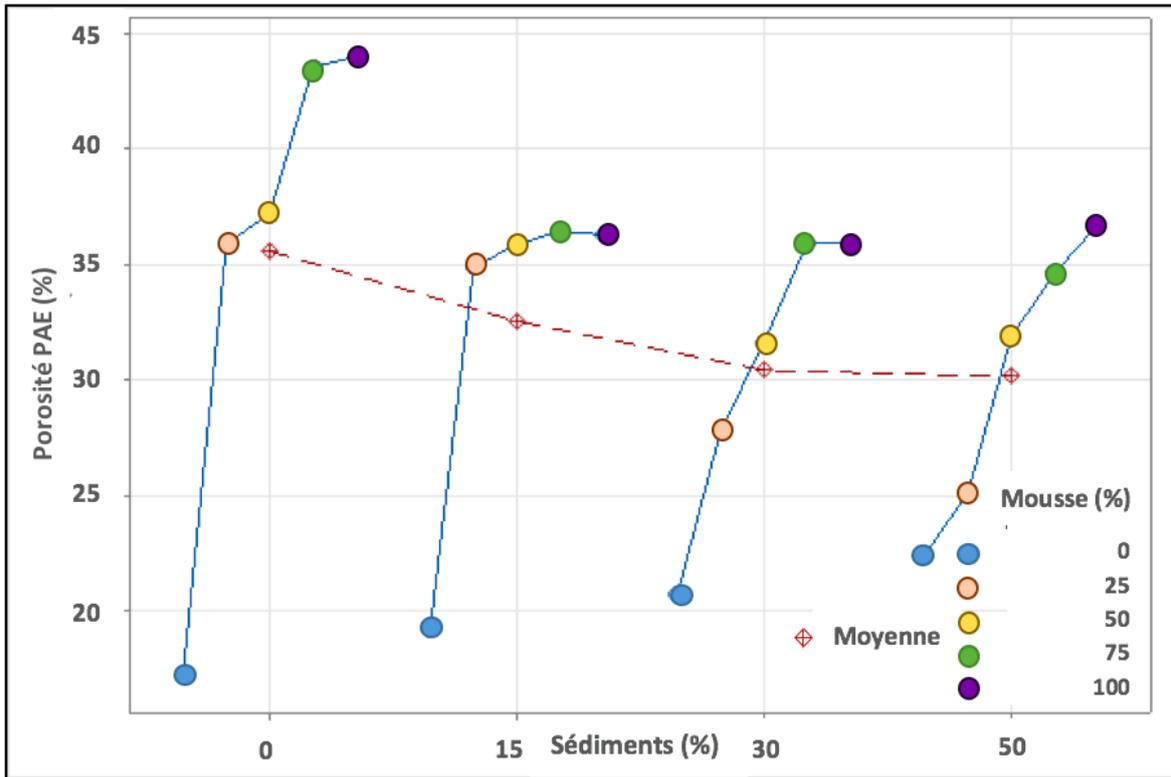


Figure 65. Variation de la porosité en fonction de la mousse

Tableau 28. Statistiques de porosité PAE

Variable	N	Moyenne	EcTyp	Variance	VarCoeff	Minimum	Maximum
Porosité PAE (%)	20	32,17	7,65	58,46	23,77	17,20	44,05

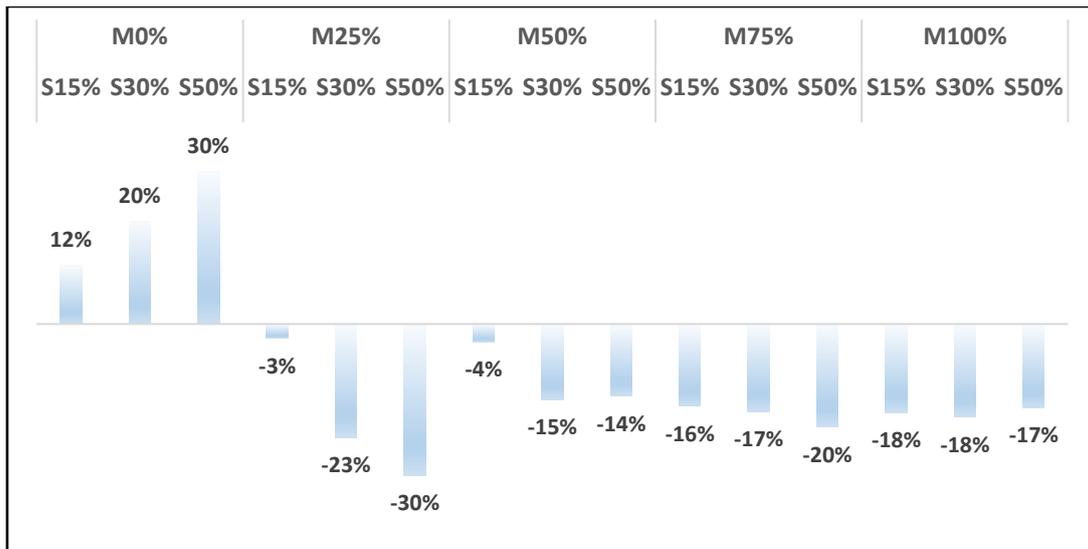


Figure 66 : Variation de la porosité par rapport aux formulations sans sédiments

Les graphes à moustache de la Figure 67, présentant la dispersion des valeurs de la porosité, indiquent que l'effet des sédiments est atténué par l'ajout de la mousse et qu'inversement l'effet

de la mousse est atténué par les sédiments. Cette observation est bien confirmée par les valeurs des écarts type présentées dans les Tableau 29. Le tableau (gauche) par rapport à l'effet de la mousse indique que celle-ci impacte l'effet des sédiments et que les sédiments atténuent l'effet de la mousse de -16% en moyenne.

Le diagramme de Pareto Figure 68 indique que l'effet de la mousse sur la porosité est largement plus important que celui des sédiments et que l'effet des sédiments n'est pas significatif. En estimant l'intensité des 2 effets par les écarts types regroupés Tableau 29, on peut déduire que la mousse a environ 2 fois plus d'effet que les sédiments sur la variation de la porosité (écart type sédiments = 3,8 / écart type mousse = 8).

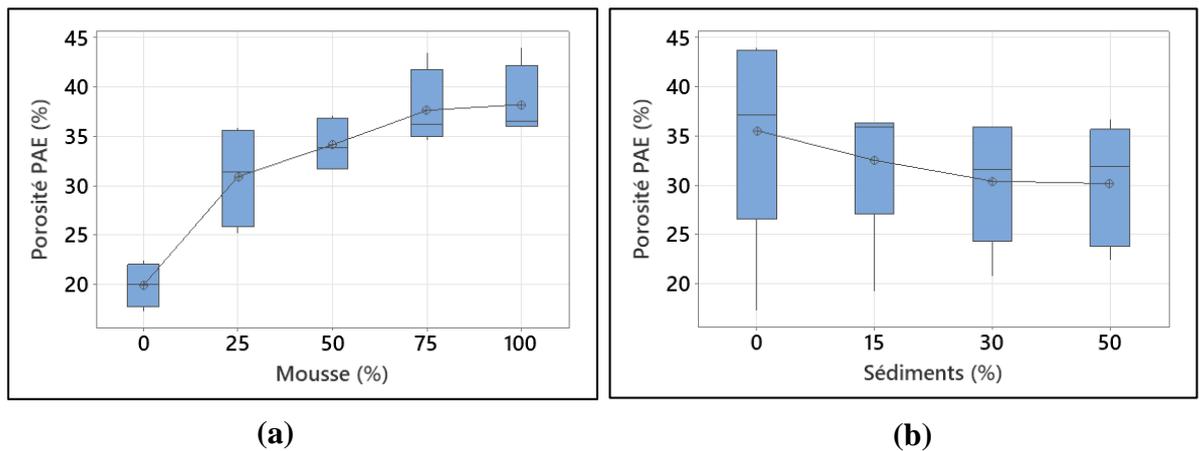


Figure 67. (a) Distribution porosité en fonction mousse (b) Distribution porosité en fonction sédiments

Tableau 29. (a) écarts type porosité effet de la mousse (b) et effet des sédiments

(a)

Sédiments(%)	N	EcTyp
0	5	10,91
15	5	7,48
30	5	6,40
50	5	6,17

Écart type regroupé = **7,96893**

(b)

Mousse (%)	N	EcTyp
0	4	2,21
25	4	5,29
50	4	2,82
75	4	4,00
100	4	3,88

Écart type regroupé = **3,79204**

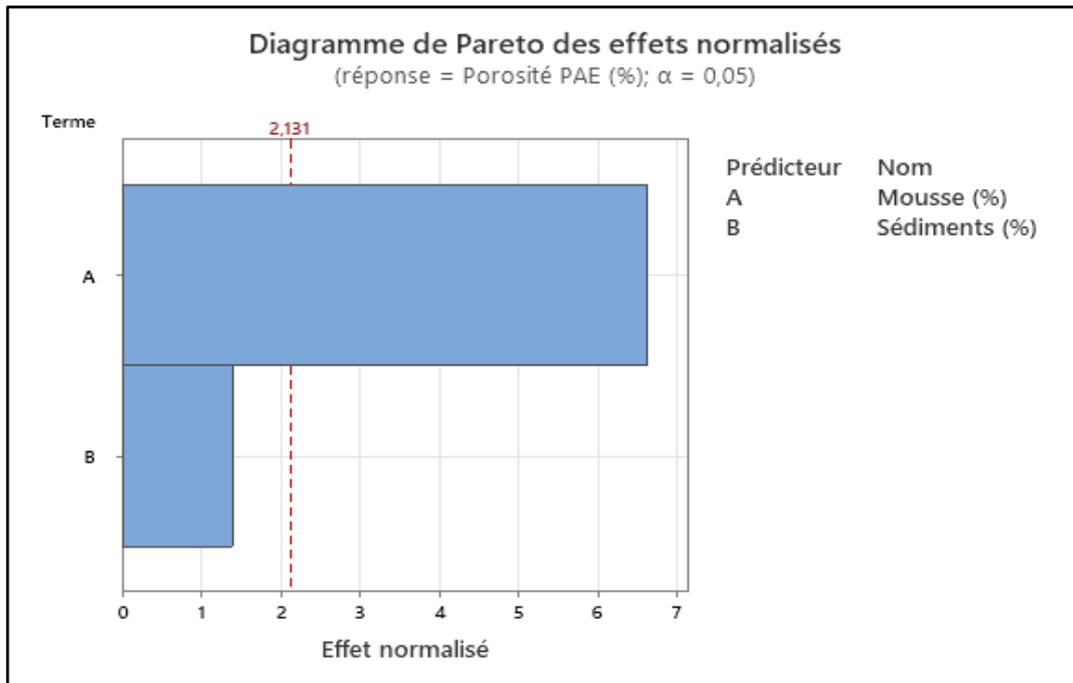
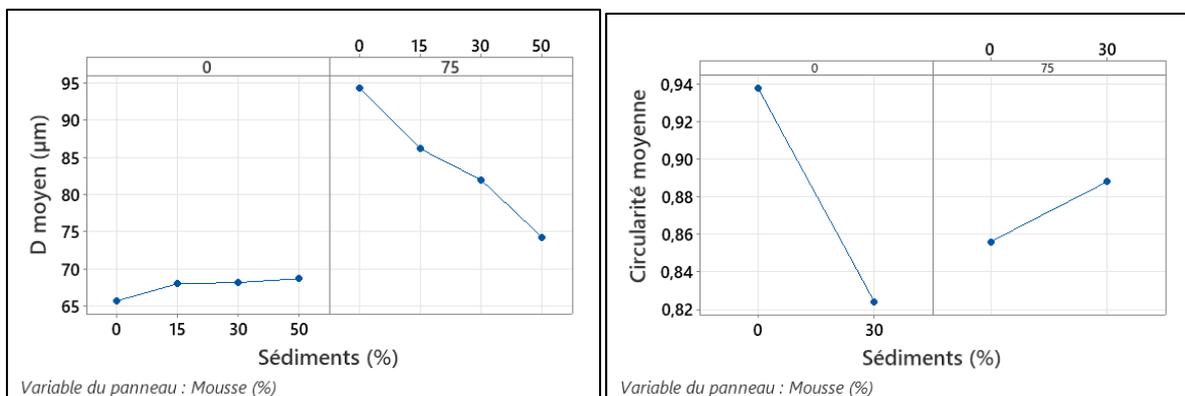


Figure 68. Diagramme de Pareto des effets des sédiments et mousse sur la porosité

4.1.2 Diamètre moyen, circularité et surface spécifique

Le diamètre moyen des pores et la surface spécifique ont été obtenues à partir des mesures de porosité au mercure. La circularité des pores a été calculée à partir des images de la tomographie X.

D'après les graphes de la Figure 69, le diamètre moyen et la surface spécifique suivent les mêmes courbes que la porosité. Ils augmentent avec la substitution dans les formulations sans mousse et diminuent en présence de la mousse. La circularité moyenne suit une courbe dont la tendance est inversée par rapport au diamètre. Cela pourrait être dû au fait que les sédiments déforment les pores dans les formulations sans mousse et corrigent la circularité en présence de la mousse. Ce phénomène pourrait s'expliquer par le fait que plus le diamètre des pores augmente, plus ils se déforment du fait du phénomène de coalescence.



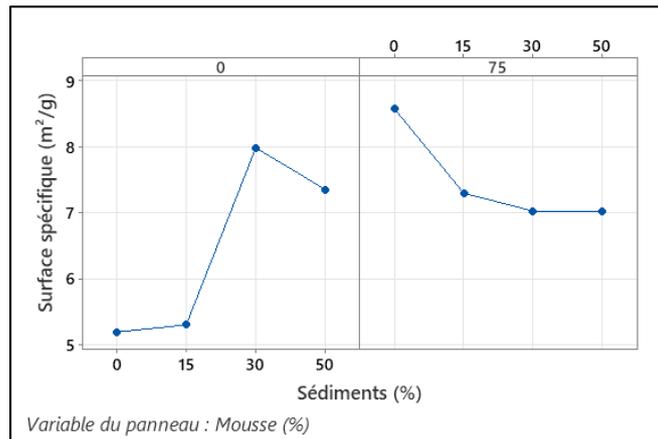


Figure 69. Variation du diamètre et circularité des pores et surface spécifique en fonction des sédiments

À partir des graphes de la Figure 70, présentant les variations des paramètres de la porosité en fonction de la mousse, il est noté que le diamètre augmente avec l'ajout de la mousse et que cette augmentation est atténuée avec la substitution. Quant à la surface spécifique, elle augmente avec l'ajout de la mousse jusqu'à la limite de 15% de substitution, à partir de laquelle elle commence à diminuer. Les sédiments atténuent l'effet de la mousse sur la surface au même titre que sur le diamètre. La circularité des pores diminue avec l'ajout de la mousse dans les formulations sans sédiments, et augmente en présence des sédiments et ce malgré l'augmentation du diamètre moyen.

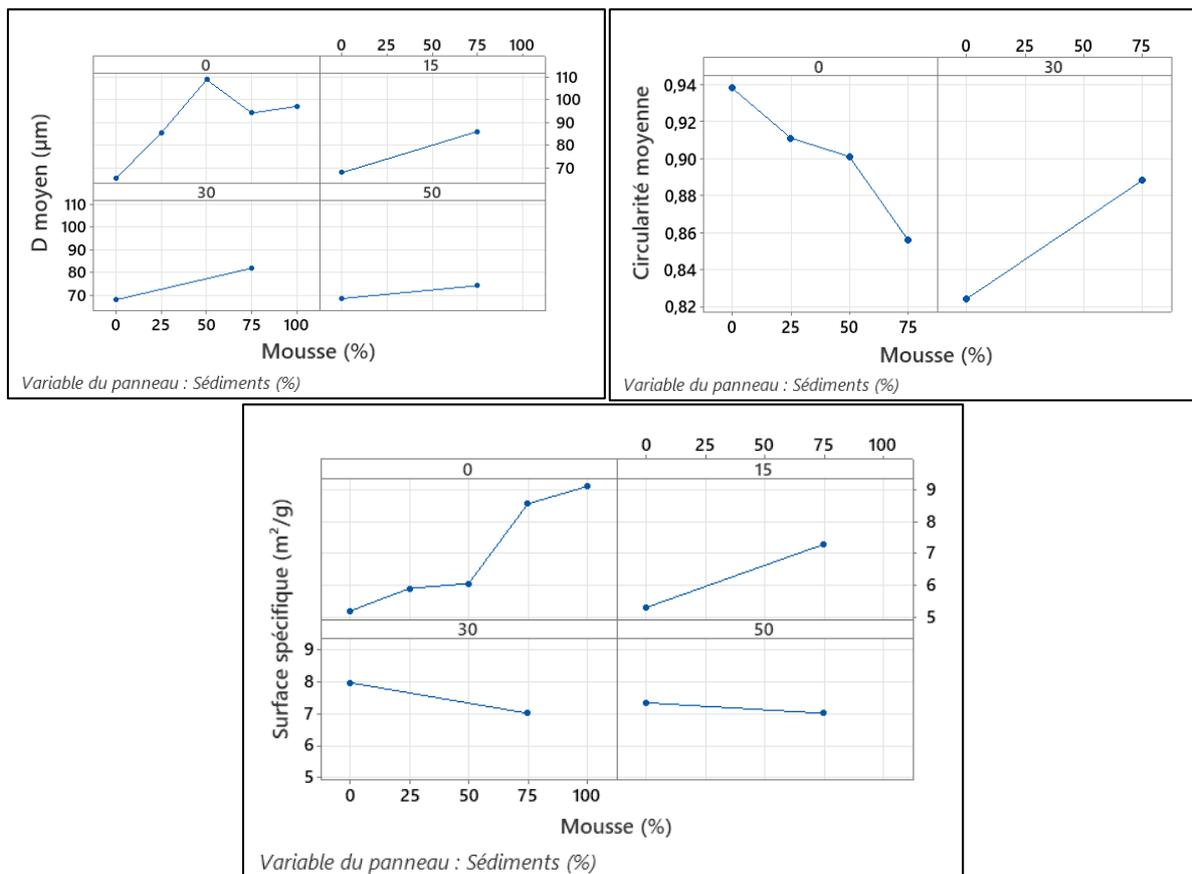


Figure 70. Variation du diamètre et circularité des pores et surface spécifique en fonction de la mousse

Dans cette seconde partie, la distribution de la taille des pores et leur circularité seront analysées à partir des résultats des techniques PAM et tomographie X.

Les courbes de distribution de taille des pores de la Figure 71 et de la Figure 72, issus de PAM montrent que la substitution augmente globalement les micropores dans les formulations sans mousse et les diminue dans les formulations avec mousse.

Les histogrammes de la Figure 73, issus de la tomographie, présentent la distribution de taille qu'à partir d'une taille de pore supérieur à 9 μm . Ces histogrammes montrent que dans les formulations sans mousse, la substitution a provoqué un décalage des principaux pics du diamètre des pores vers de plus grandes valeurs. Cela traduit une augmentation des macropores et une très légère diminution des macropores.

Les histogrammes de la Figure 74 présentent la distribution de la circularité des pores. Ces histogrammes montrent une diminution de la circularité des pores avec la substitution dans les formations avec et sans mousse. À noter que cette diminution est peu significative dans les formulations avec mousse (décalage du principal pic observé, de 0.9/0.95 à 0.85/0.9).

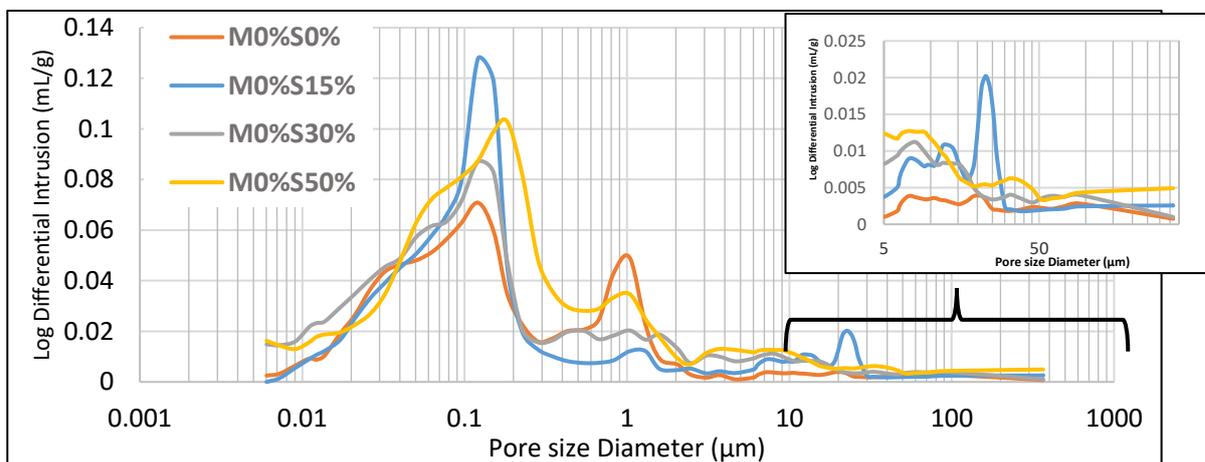


Figure 71. Courbe distribution des pores en fonction de la substitution - formulations sans mousse (PAM)

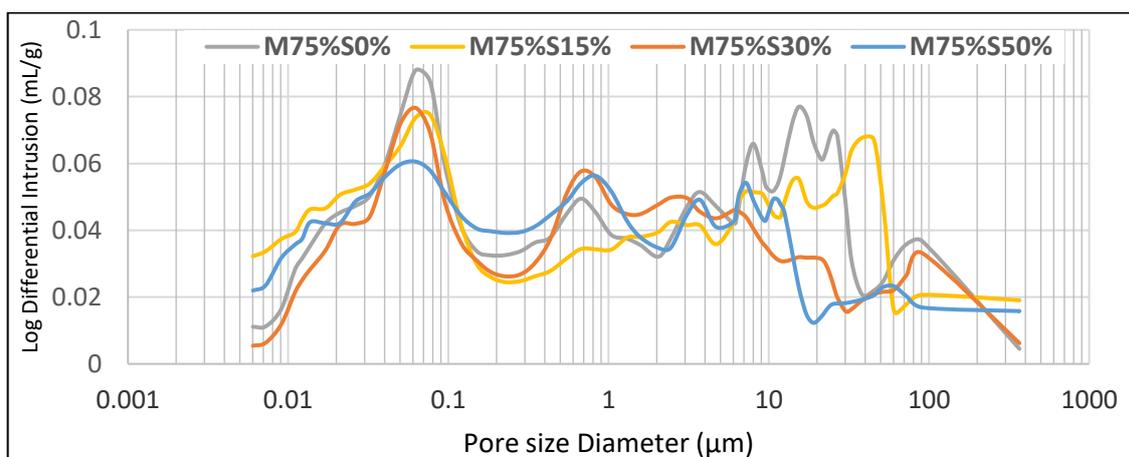


Figure 72. Courbes distribution de la taille des pores en fonction des sédiments -formulations avec mousse (PAM)

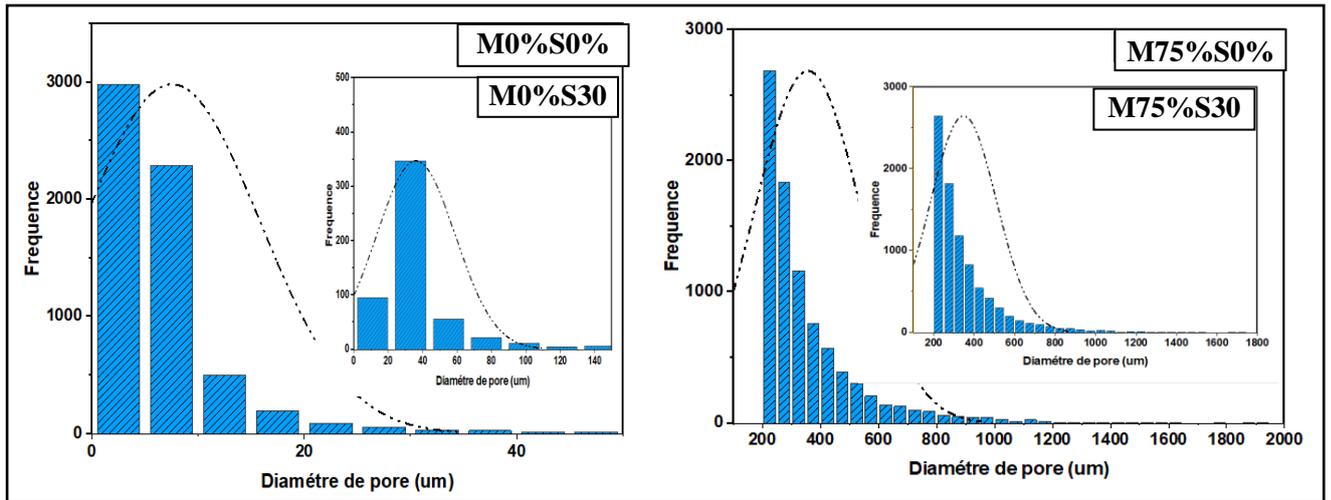


Figure 73. Histogrammes distribution de la taille des pores en fonction des sédiments (Tomographie)

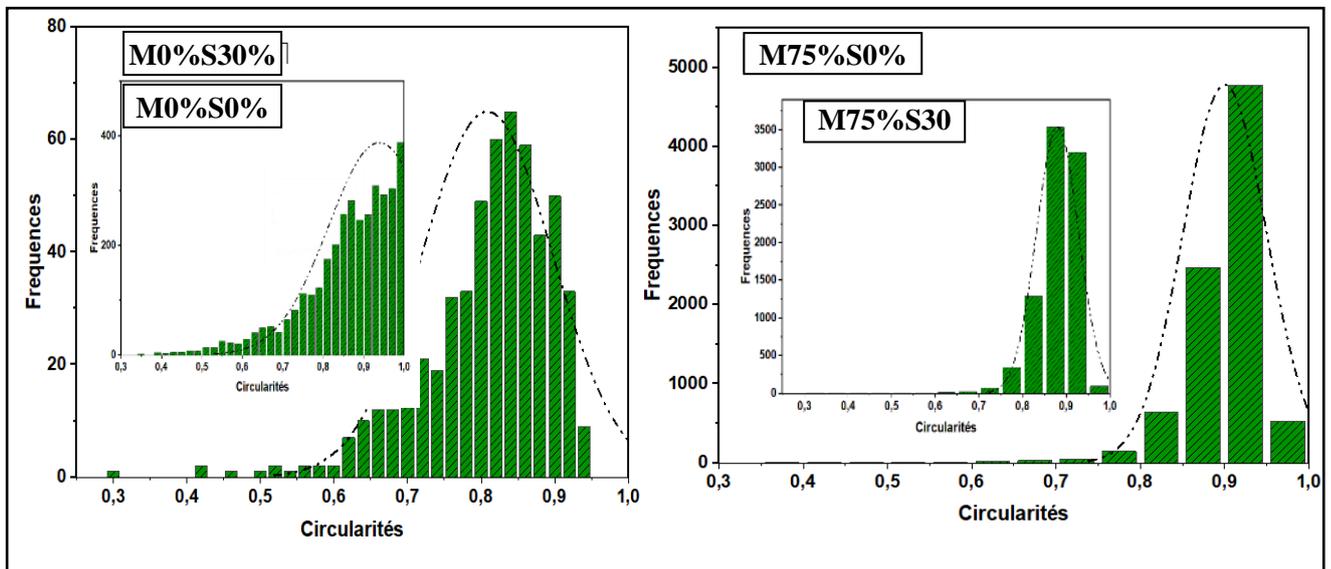


Figure 74. Histogrammes distribution de la circularité des pores en fonction des sédiments (Tomographie)

Une observation au MEB de la structure porale a été effectuée à l'état durci à 60j Figure 75 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, afin de constater l'effet de la substitution des sédiments sur le diamètre et la circularité, et on y constate bien un endommagement des bulles, lorsqu'elles sont recouvertes de particules des sédiments.

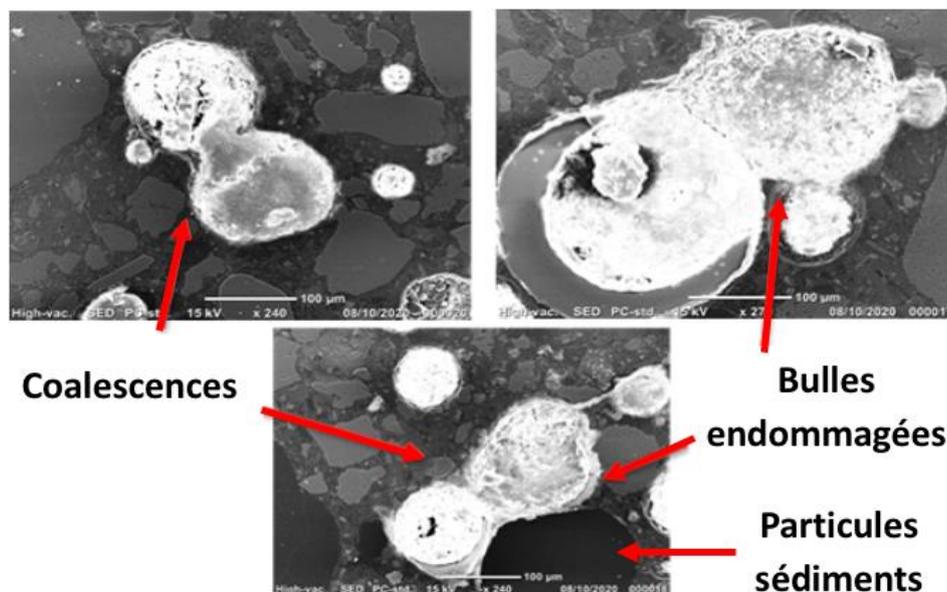


Figure 75. Plans de coupe MEB de la structure porale en présence de la mousse et des sédiments

Quant à l'effet de la mousse, présenté par les courbes de distribution de la Figure 76 on constate que les macropores (entre 10 et 100 μm) sont quasi inexistant dans le mortier témoin, puis augmentent de façon nette avec l'ajout de la mousse. Les micropores (entre 0,01 et 1 μm), majoritaires dans le mortier sans mousse, augmentent légèrement avec l'ajout de la mousse. La mousse donc augmente fortement les macropores et plus légèrement les micropores. À partir de M75% il est observé une forte concentration de micropores et des macropores.

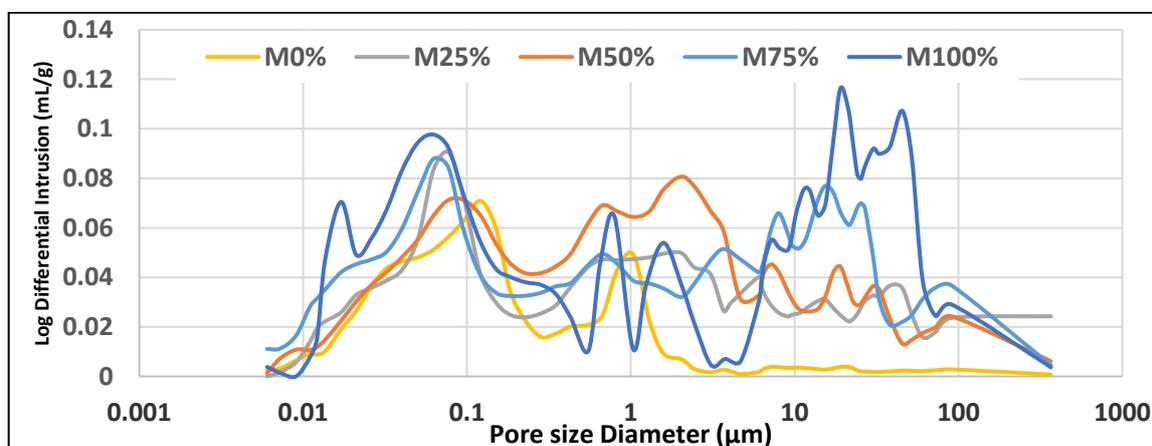


Figure 76. Courbe distribution de la taille des pores en fonction de la mousse – formulations sans sédiments (PAM)

4.1.3 Observation qualitative de la porosité (Tomographie X)

Il s'agit dans cette partie de présenter les résultats des observations de la structure porale, réalisées par tomographie pour constater l'effet de la substitution, et par microscope optique en fluorescence pour constater l'effet de la mousse.

La Figure 77 présente des plans de coupe de la structure porale, réalisés par tomographie, ne tenant en compte que les pores $> 9 \mu\text{m}$. Il y est constaté que la substitution des sédiments dans les formulations sans mousse, génère plus de macropores et une distribution plus étendue de taille de pores. À noter que ces observations sont liées aux traitements appliqués Pour les

formulations avec mousse, il est observé une augmentation notable des pores avec l'ajout de la mousse, et l'effet de la substitution sur les pores y est moins apparent.

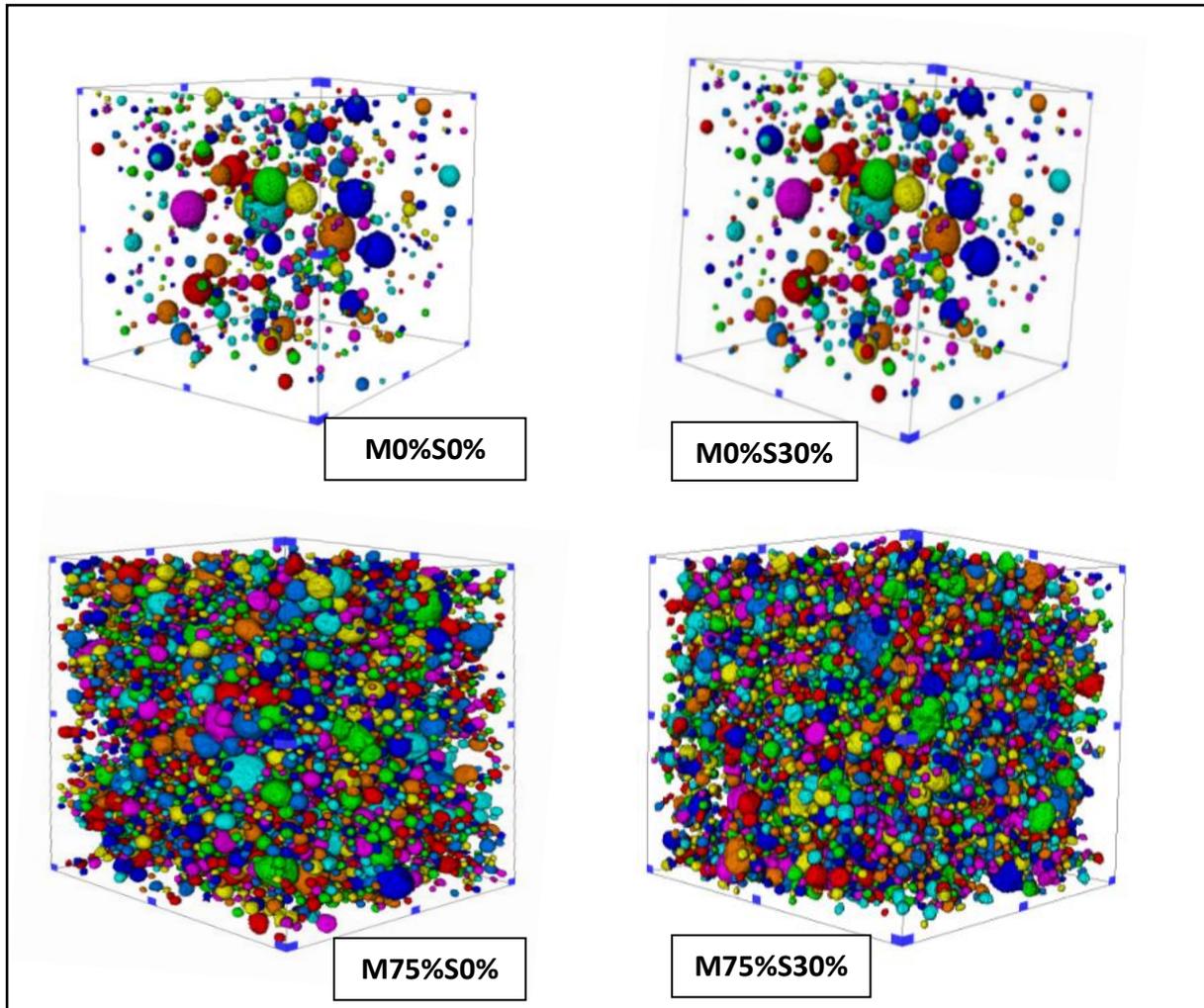
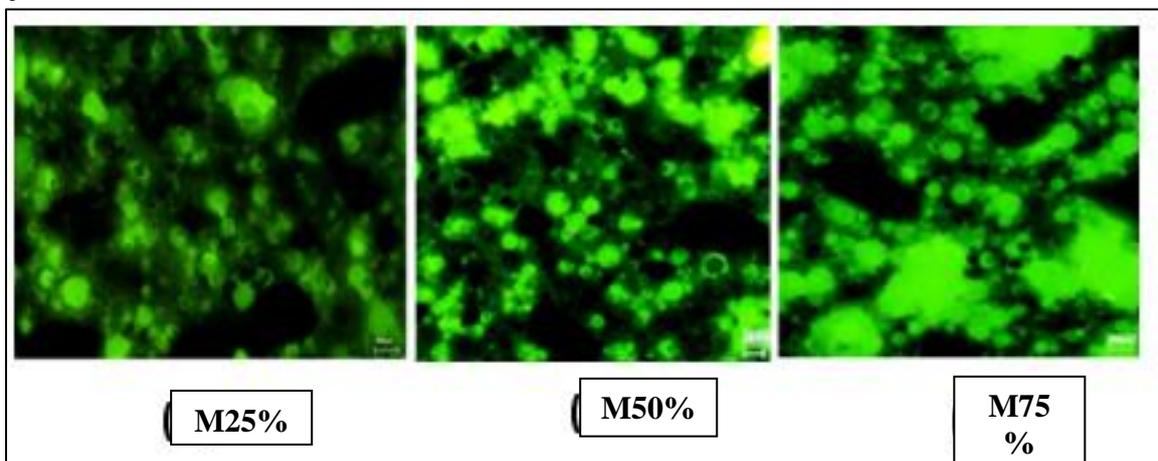


Figure 77. Images tridimensionnelles du réseau poreux en 3D (tomographie)

Des observations au microscope optique ont été faites avec un grossissement à $400\mu\text{m}$. Ces observations ne tiennent en compte que les pores $>2\mu\text{m}$. Elles permettent de constater l'effet de la mousse et montrent que les pores $>2\mu\text{m}$ s'élargissent et deviennent plus irréguliers avec l'ajout de la mousse.



4.1.4 Interprétation et discussion

L'augmentation de la porosité avec la substitution dans les formulations sans mousse peut être liée à la présence des fines dans les sédiments. Ces derniers augmenteraient l'espace inter granulaire [168] [169].

Une étude de Raouf et al [170] effectuée sur les sédiments de dragage de Dunkerque a montré que une augmentation de la porosité totale avec l'augmentation de la quantité de sédiments. Le béton qui contient 12,5% de sédiments a une porosité totale de 11,6 %, tandis que le béton qui contient 20% a une porosité de 16,9 %. Les résultats indiquent également que la taille des pores augmente avec la quantité de sédiments. Agnès Zambon [96] ayant constaté, l'augmentation de la porosité avec les sédiments marins dans des formulations sans mousse, a expliqué cette augmentation par l'évaporation de l'eau de gâchage absorbée par les sédiments. Même avec l'élimination de matière organique et la stabilisation de métaux lourds par des traitements avec le procédé Novosol, F. Agostini et al [85] ont remarqué une augmentation de la porosité dans le mortier à base de sédiments, en moyenne de 20% par rapport au mortier témoin.

Dans les formulations avec mousse, il a été constaté une diminution de la porosité sous l'effet des sédiments, découlant surtout de la diminution des micropores, puisque les macropores comme on l'a observé augmentent par suite de l'introduction des bulles d'air relevant la mousse. Il est suggéré plusieurs possibilités quant aux facteurs génératifs qui seuls ou cumulés tendraient à faire diminuer la porosité. Le premier facteur inspiré par la littérature, est la présence de la chaux vive en forte concentration dans les sédiments (13%) qui d'après Cong et Bing [5] réduisait la porosité à cause de l'endommagement et de l'éclatement des bulles provoquées, comme relaté dans la partie revue de littérature. Ceci est corroboré par une autre étude [58] qui a montré que la poudre de chaux avait la capacité de réduire la porosité en raison de ses fines particules. En effet l'observation microscopique MEB **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** révèle bien un endommagement des bulles lorsqu'elles sont recouvertes de particules des sédiments. Une deuxième facteur serait la présence de la matière organique, qui en retardant la prise, affecterait la stabilité de la mousse et entraînerait la diminution du nombre des bulles comme précisé dans la partie 1.3.

Quant à l'effet de la mousse sur l'augmentation de la porosité dans les formulations avec et sans mousse, il est simplement expliqué par l'augmentation des pores suite à l'introduction des bulles d'air générées par la mousse. L'effet atténuant des sédiments, est le résultat de l'endommagement des bulles d'air par les sédiments observés par MEB.

L'augmentation des macropores observées à partir de M75% résulte de la fusion des pores entre elles et leur déformation suite aux phénomènes de coalescence et mûrissement de la mousse partie 1. Béton mousse. En effet, l'étude de She Wei et al [171] a bien montré que le béton avec une teneur en air élevée, a tendance à produire des vides d'air plus grands en raison de la proximité des vides d'air, qui subissent la coalescence et forment des vides d'air irréguliers plus grands, comme expliqué dans la partie 1. Béton mousse.

4.1.5 Conclusion

Les comportements les plus marquants que l'on peut retenir de l'évaluation de la structure porale sont que :

- ✓ Les sédiments seuls augmentent la porosité (de 12 à 30% pour 15,30 et 50% de substitution)
- ✓ En présence de la mousse, les sédiments diminuent la porosité (de 3 à 30%)
- ✓ La mousse augmente la porosité dans les formulations avec ou sans sédiments.
- ✓ L'effet des sédiments est atténué par l'ajout de la mousse et inversement.
- ✓ L'effet de la fibre sur la porosité n'est pas significatif par rapport à la mousse, et il est 2 fois moindre.

On peut considérer que l'effet des sédiments sur la porosité n'est pas favorable pour le béton mousse. La porosité diminue de 3% à 30% sous l'effet des sédiments, c'est-à-dire une moyenne de 16% (avec écart type de 0.08). La valeur maximale correspond à 50 % de substitution et une teneur en mousse de 25%. Et malgré des teneurs en mousse de 75% et 100%, la baisse en porosité reste significative (de 16 à 20%).

5. À L'ETAT DURCI : DENSITE SECHE

5.1 Résultats et analyse des effets

La Figure 79 montre que la densité diminue avec la substitution, dans les formulations sans mousse et qu'en présence de la mousse, elle augmente avec la substitution de façon plus accentuée. La Figure 80 montre que la densité diminue avec l'ajout de la mousse, dans les formulations avec et sans sédiments. Cette diminution semble être de plus en plus atténuée à mesure de la substitution.

D'après les variations de la masse volumique calculées par rapport aux formulations sans sédiments Figure 81, on remarque que la variation de la densité est plus importante en présence de la mousse : une diminution limitée à 7% dans les formulations sans mousse, et une augmentation dans formulations avec mousse, de 6 et 16% en excluant la série M100% où la mousse est trop instable (à cause des phénomènes de ségrégation)

Dans les graphes à moustache Figure 82, présentant la dispersion des valeurs de la densité, on voit clairement que la mousse accentue globalement sur l'effet des sédiments, et qu'inversement les sédiments à un impact sur l'effet de la mousse en l'atténuant. Cette observation est bien confirmée par la mesure des écarts type illustrées dans le Tableau 30, où on peut voir, dans le tableau que la mousse accentue l'effet des sédiments d'environ + 41% ; et que les sédiments atténuent l'effet de la mousse de -16% en moyenne.

Dans le diagramme de Pareto Figure 83, on voit bien que l'effet de la mousse sur la densité est plus important que celui des sédiments, et que l'effet des sédiments n'est pas significatif.

En estimant l'intensité des 2 effets par les écarts types regroupés Tableau 30, on peut déduire que la mousse a environ 3 fois plus d'effet que les sédiments sur la variation de la densité (écart type sédiments = 109,4 / écart type mousse = 351,7).

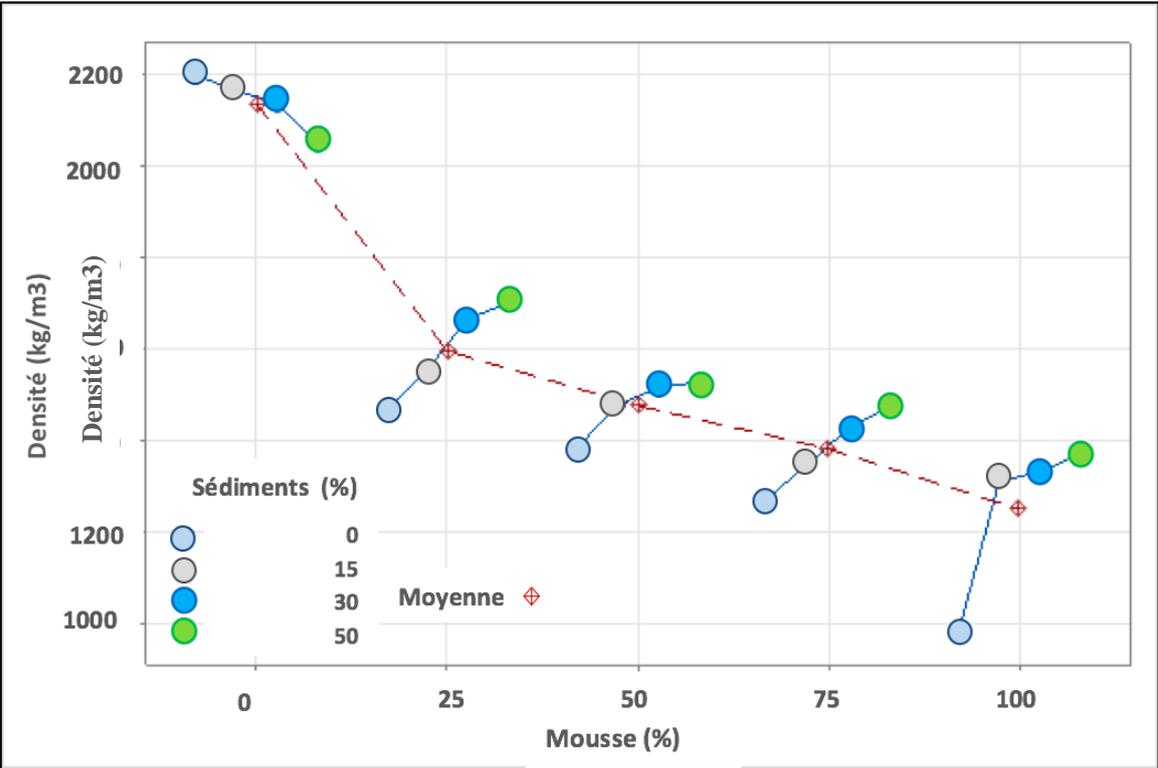


Figure 79. Variation de la densité en fonction des sédiments

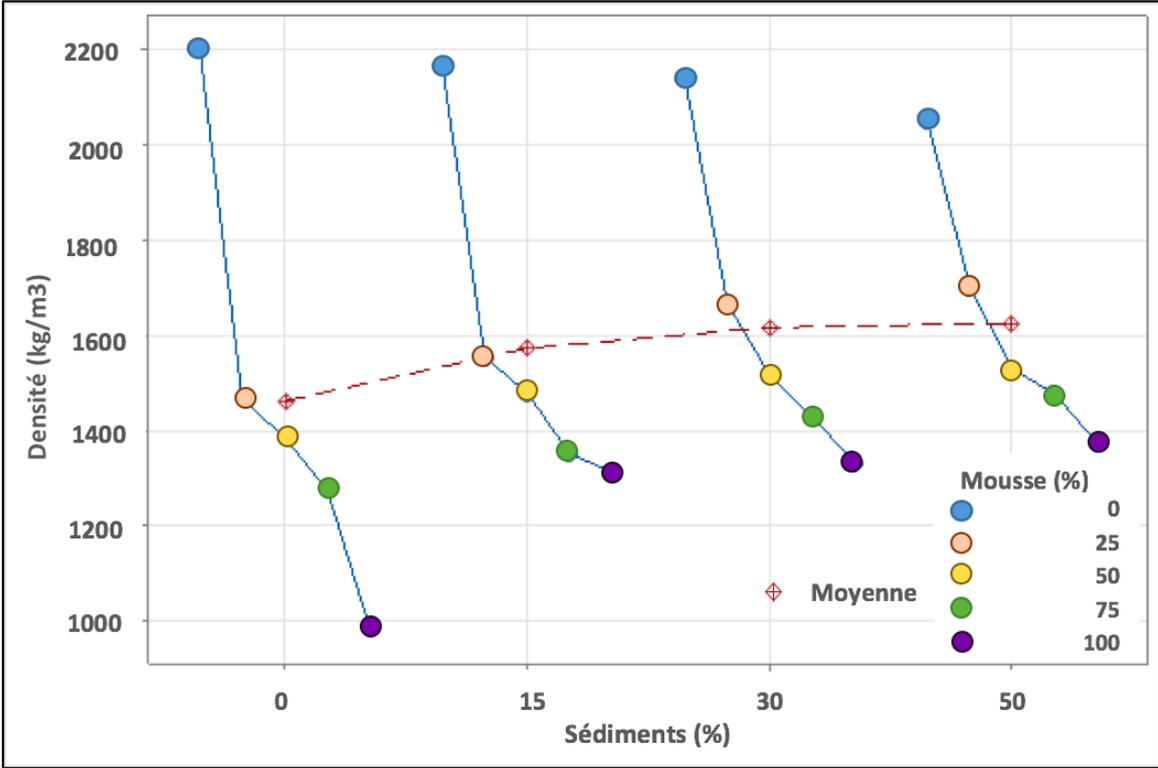


Figure 80. Variation de la densité en fonction de la mousse

Tableau 30. Statistiques de densité

Variable	N	Moyenne	EcTyp	Variance	VarCoeff	Minimum	Maximum
Densité (kg/m ³)	20	1568,4	329,6	108621,9	21,01	983,1	2200,0

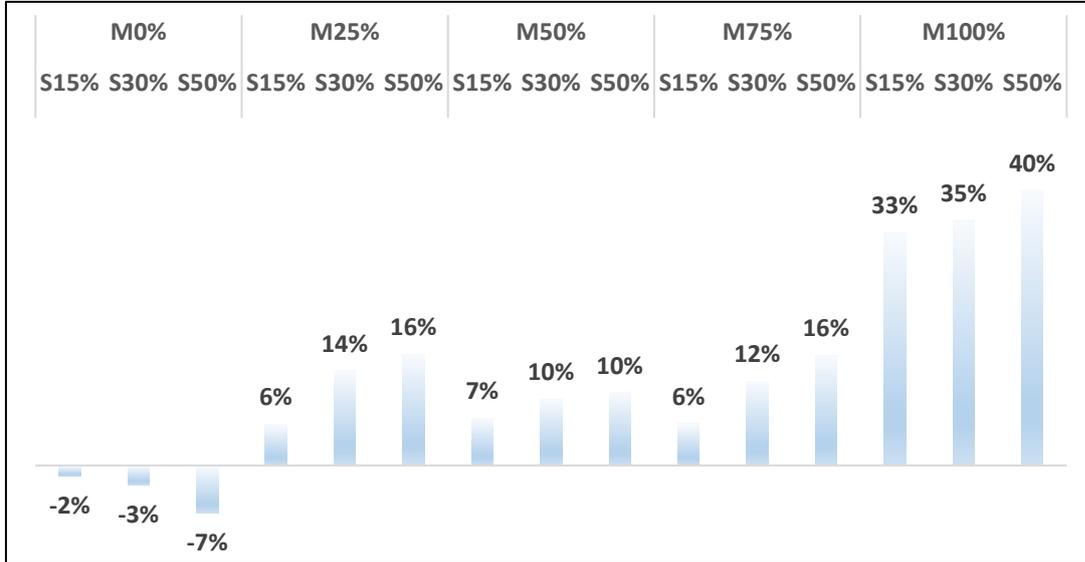


Figure 81. Variation de la densité par rapport aux formulations de référence sans sédiments

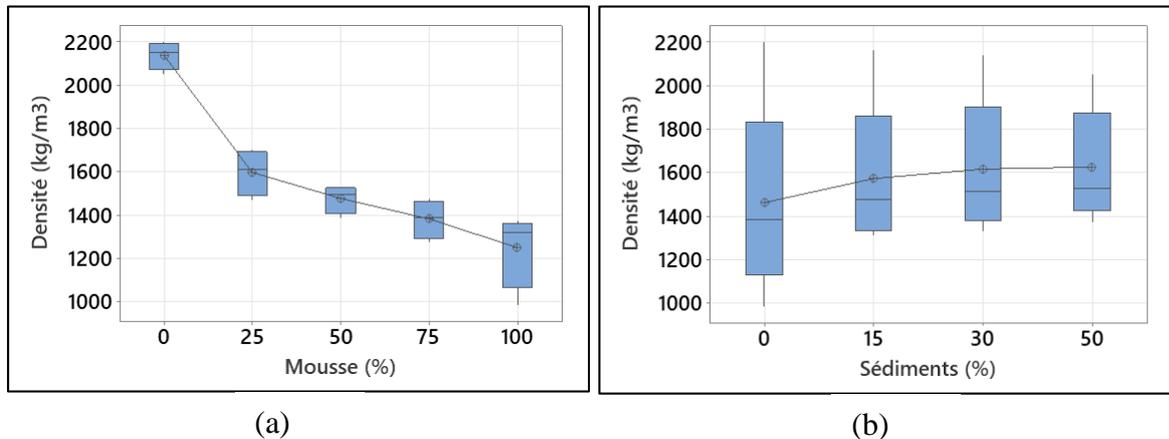


Figure 82. (a) Distribution densité en fonction sédiments (b) distribution densité en fonction mousse

Tableau 31. (a) écarts type densité (effet des sédiments) (b) écarts type densité (effet de la mousse)

(a)			(b)		
Mousse (%)	N	EcTyp	Sédiments(%)	N	EcTyp
0	4	64,4	0	5	452
25	4	107,2	15	5	346
50	4	65,4	30	5	317
75	4	88,6	50	5	265
100	4	179,2			

Écart type regroupé = 351,715

Écart type regroupé = 109.430

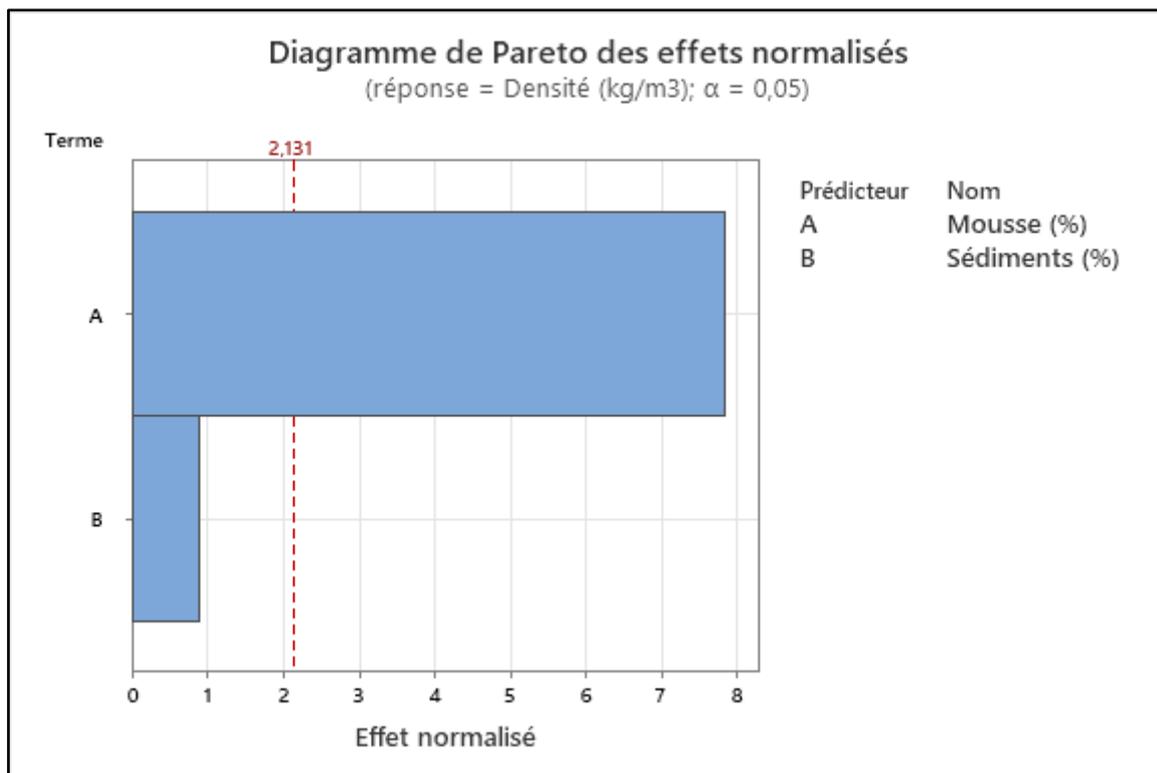


Figure 83. Diagramme de Pareto des effets des sédiments et mousse sur la densité

5.2 Interprétation et discussion

La courbe de la Figure 84 et l'ANOVA y correspondant, mettant en évidence une corrélation linéaire négative entre la densité et la porosité ($R^2=94\%$), montrent bien la relation de cause à effet entre ces 2 propriétés, établie dans de nombreuses études. Le diamètre moyen est relativement l'élément influant de la structure porale sur la densité ($R^2=70\%$), par contre ni la forme des pores ni la surface spécifique n'impactent la densité Figure 85.

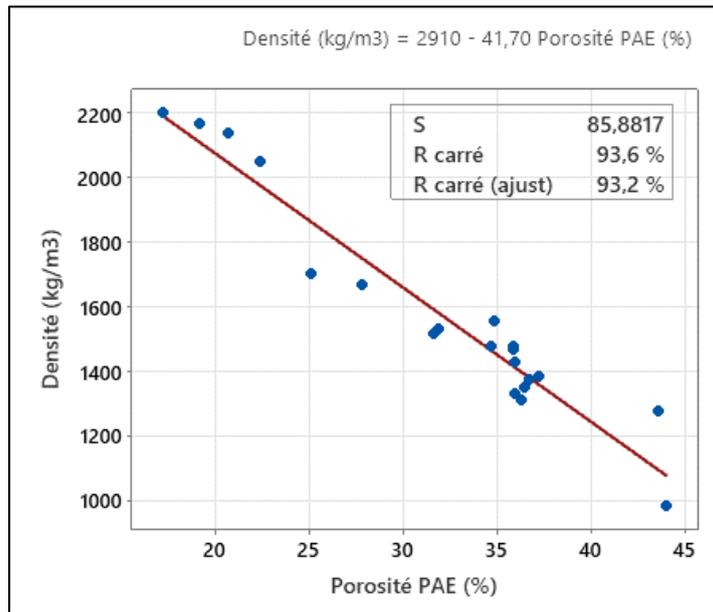


Figure 84. Courbe de régression densité en fonction de la porosité

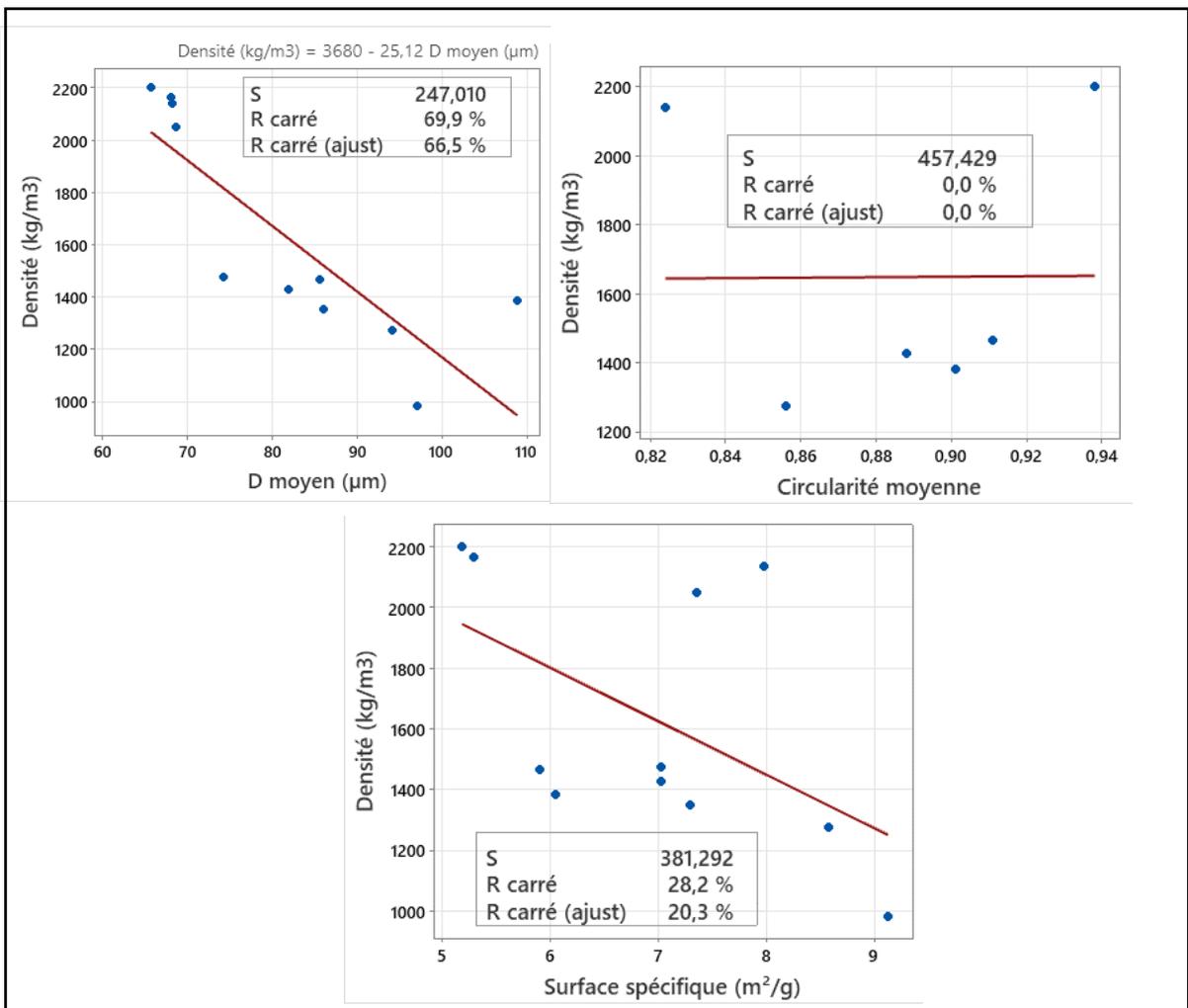


Figure 85. Courbes de régression densité en fonction du diamètre circularité et surface spécifique

On peut donc expliquer 94% des variations de la densité par les variations de la porosité. D'après des études portant sur la substitution des sédiments marins au sable dans les bétons ordinaires, il a été constaté que plus les sédiments étaient traités, moins la densité diminuait [85] [172] [82].

Concernant les formulations avec mousse, on peut citer toujours Cong et Bing [5], qui ont rapporté une augmentation considérable de la densité suite à l'ajout de la chaux au ciment dans le béton mousse : un ajout de 10% du ciment augmentait la densité de 50% . Ces résultats corroborent les nôtres dans une certaine mesure, qui ont montré une augmentation de la densité de 10% en moyenne pour un ajout de 6% de chaux contenue dans les sédiments à 13%.

Par contre l'étude de Xiaoyun Yang et al[94], cité dans la partie 1. Béton mousse , a montré que lorsque sont utilisés les sédiments (fluviaux) comme addition au ciment dans les béton mousse, la densité sèche diminue de 1500 à 1310 kg/m³ pour un ajout des sédiments de 30% à 70% par rapport au ciment) . On pourrait expliquer cette différence avec nos résultats par la faible teneur en chaux vive (1.36%)

5.3 Conclusion

En conclusion, on retient les résultats les plus importants :

- ✓ Les sédiments seuls diminuent la masse volumique (de 2, 3 et 7% pour 15,30 et 50% de substitution)
- ✓ En présence de la mousse, les sédiments augmentent la masse volumique (de 6 à 16% pour les formulations hors M100%)
- ✓ La mousse diminue la densité dans les formulations avec ou sans sédiments.
- ✓ L'effet des sédiments est accentué par l'ajout de la mousse, et l'effet de la mousse est atténué par la substitution et inversement.
- ✓ L'effet des sédiments sur la masse volumique n'est pas significatif par rapport à la mousse, et il est 3 fois moindre.

Les sédiments ont donc un effet légèrement défavorable sur la densité des bétons mousse. L'augmentation de la masse volumique reste acceptable : de 6% à 16%, par rapport aux bétons mousse de référence, si on exclut la M100% où la mousse est trop instable., soit une moyenne de 11% (avec écart type de 0.04) pour des taux de substitution massique de 15,30 et 50% combinés à une teneur en mousse de 25, 50 et 75%.

À titre indicatif, partant formulations de référence, présentant une masse volumique entre 1270 et 1460 kg/m³, la substitution des sédiments a donné lieu à des bétons mousse légèrement moins légers dont la densité varie dans la plage de densité des bétons mousse : entre 1350 et 1700 kg/m³ (correspondant à respectivement M75%S15% et M25%S50%)

6. À L'ETAT DURCI : RESISTANCE A LA COMPRESSION

6.1 Résultats et analyse des effets

La Figure 86 montre que la résistance diminue avec la substitution, dans les formulations sans mousse et qu'en présence de la mousse, elle augmente avec la substitution. La mousse semble globalement atténuer l'effet des sédiments. La Figure 87 montre que la résistance diminue avec l'ajout de la mousse, dans les formulations avec et sans sédiments et brusquement dès l'introduction de la mousse. Cette diminution est de plus en plus atténuée à mesure de la substitution.

D'après les résultats des variations de la résistance à la compression calculées par rapport aux formulations sans sédiments Figure 88, on remarque que la variation de la résistance est beaucoup plus importante en présence de la mousse : une diminution de 8 à 23% dans les formulations sans mousse, et une augmentation dans formulations avec mousse, de 42 à 241%, si on exclut la série M100% où la mousse est trop instable et les valeurs de la résistance trop faibles.

Dans les graphes à moustache la Figure 89, présentant la dispersion des valeurs de la résistance, on voit clairement que l'effet des sédiments est atténué par l'ajout de la mousse, et qu'inversement l'effet de la mousse est atténué par les sédiments.

Cette observation est bien confirmée par la mesure des écarts type illustrées dans les tableaux, où on peut voir, dans le Tableau 33 que la mousse atténue l'effet des sédiments d'environ -28% en moyenne, et que les sédiments atténuent l'effet de la mousse de -19% en moyenne.

Dans le diagramme de Pareto Figure 90, on voit bien que l'effet de la mousse sur la résistance est largement plus important que celui des sédiments, et que l'effet des sédiments n'est pas du tout significatif. En estimant l'intensité des deux effets par les écarts types regroupés (tableau 33), on peut déduire que la mousse a environ 4 fois plus d'effet que les sédiments sur la variation de la résistance (écart type mousse = 12,7 / écart type sédiments = 3,3).

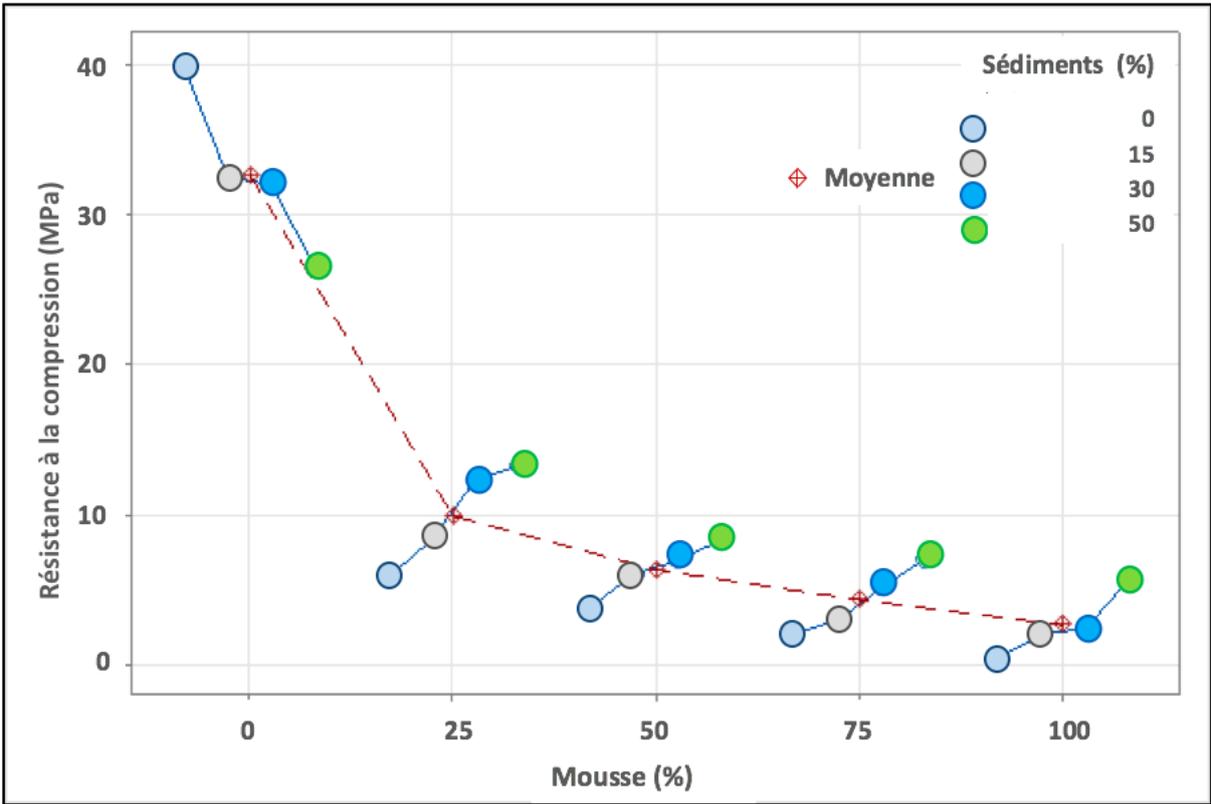


Figure 86. Variation de la résistance en fonction des sédiments

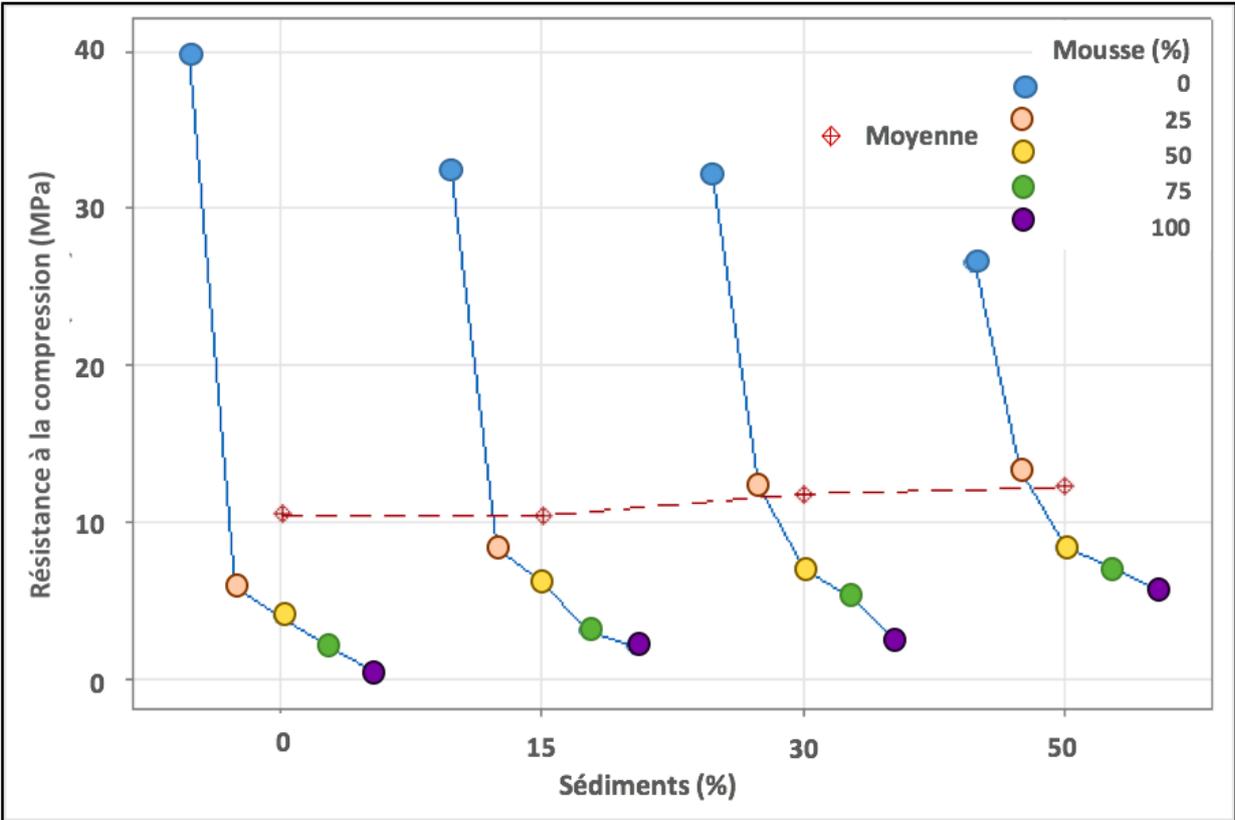


Figure 87. Variation de la résistance en fonction de la mousse

Tableau 32. Statistiques de la résistance

Variable	N	Moyenne	EcTyp	Variance	VarCoeff	Minimum	Maximum
Résistance (MPa)	20	11,15	11,71	137,10	105,02	0,42	39,77

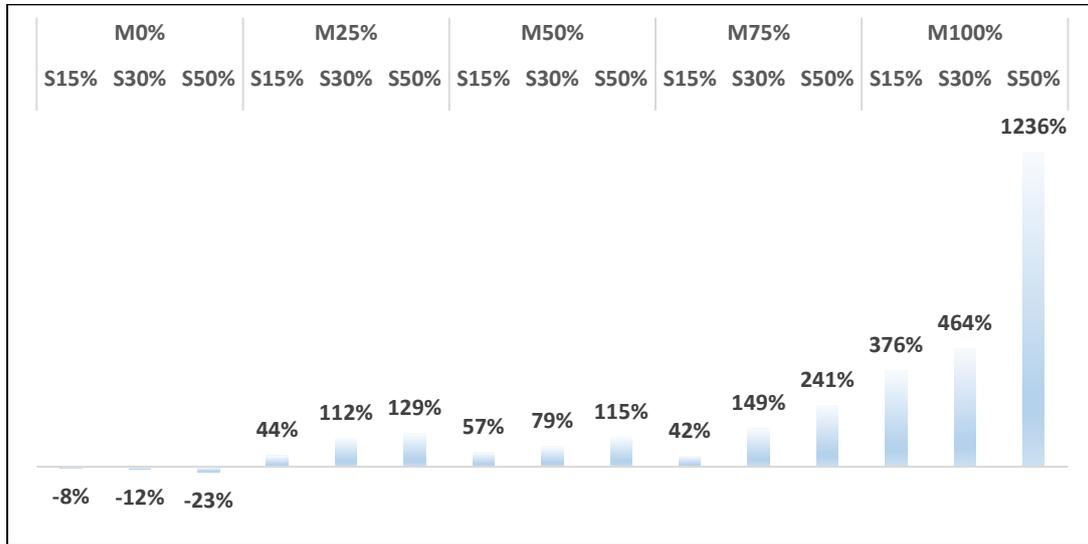


Figure 88. Variation de la densité par rapport aux formulations de référence sans sédiments

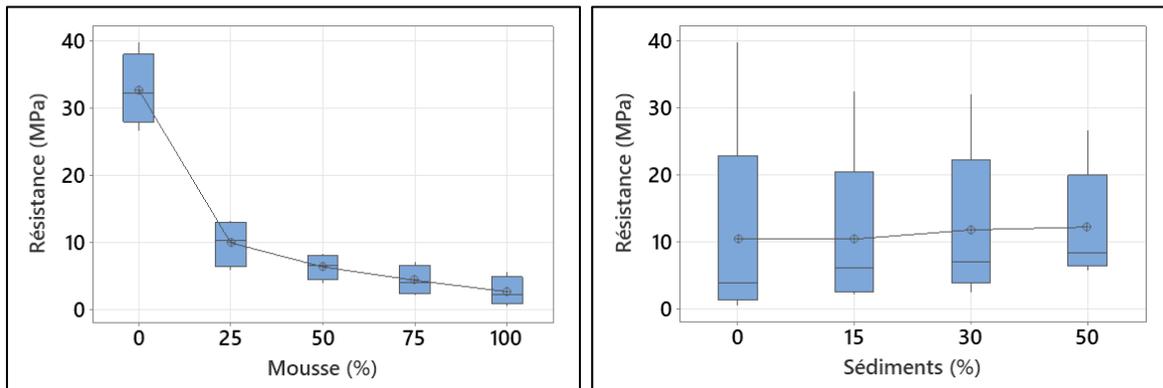


Figure 89. (a) distribution résistance en fonction sédiments (b) distribution résistance en fonction mousse

Mousse (%)	N	EcTyp	Sédiments(%)	N	EcTyp
0	4	5,43	0	5	16,55
25	4	3,47	15	5	12,63
50	4	1,863	30	5	11,89
75	4	2,23	50	5	8,55
100	4	2,18			

Écart type regroupé = **12,7282**

Écart type regroupé = **3,30812**

Tableau 33. (a gauche) écarts type résistance (effet des sédiments) (à droite) écarts type résistance (effet de la mousse)

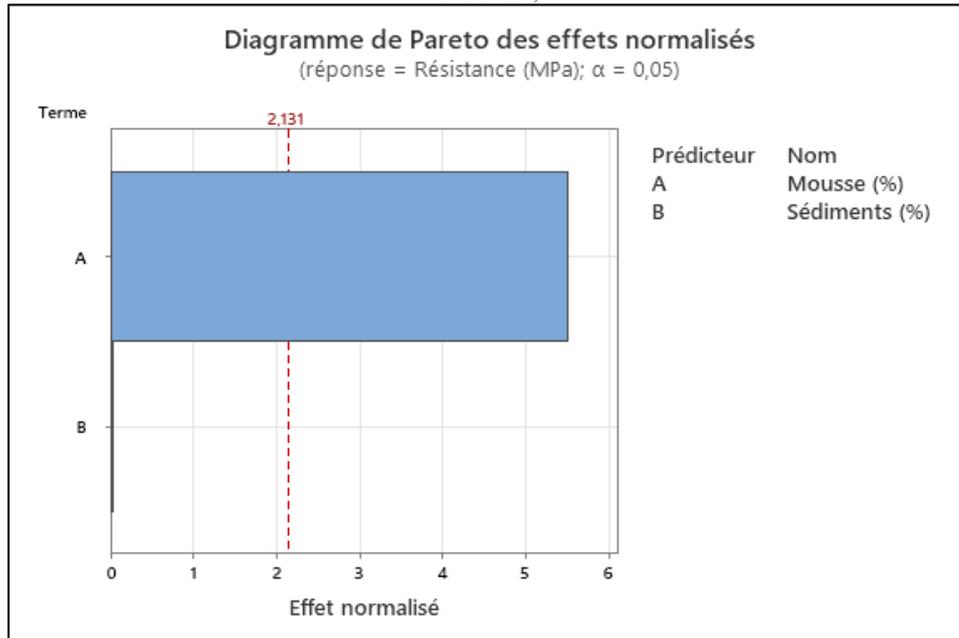


Figure 90. Diagramme de Pareto des effets des sédiments et mousse sur la résistance

6.2 Résultats de l'évolution de la résistance mécanique

Les résultats des essais de résistance à la compression à différents temps de cure à 7, 28 et 60 jours sont présentés dans la Figure 91, comme on peut le voir sur le graphe de la Figure 92, les sédiments permettent d'augmenter la vitesse de durcissement des bétons, et d'obtenir ainsi des résistances à 7 jours atteignant en moyenne 77% de la résistance finale, pour les formulations avec sédiments, contre 62% pour le mortier témoin, et des résistances à 28 jours, atteignant en moyenne 91% de la résistance finale contre 84% pour le mortier témoin, ce résultat n'est pas en accord avec le résultat relatif à l'effet retardateur des sédiments, trouvé dans la partie ouvrabilité. La mousse a tendance à diminuer les écarts entre les résistances 7 et 28 jours et la résistance finale, c'est-à-dire à diminuer la vitesse de durcissement, par contre ce résultat est bien en accord avec le résultat relatif à l'effet retardateur de la mousse, trouvé dans la partie ouvrabilité.

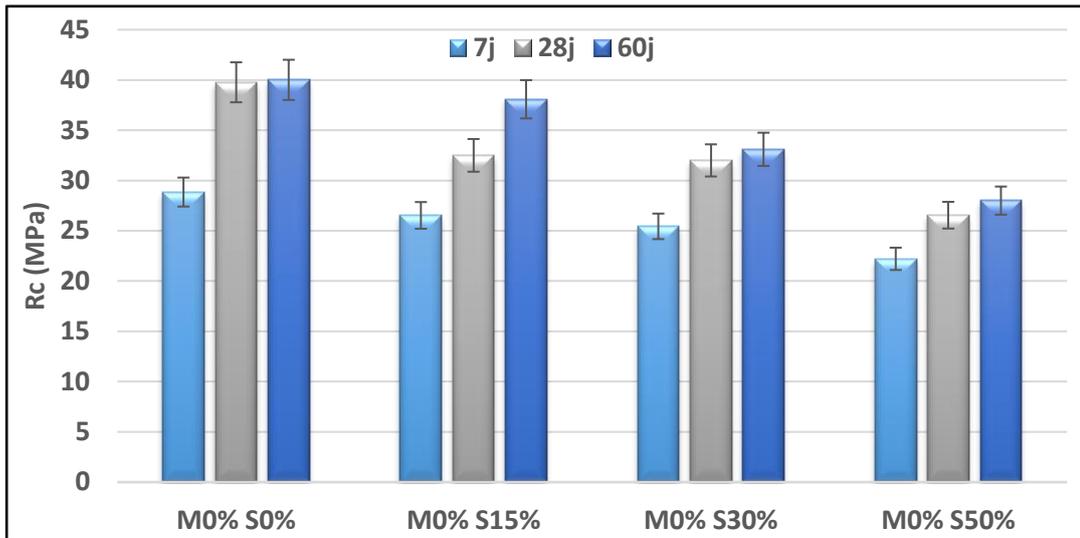


Figure 91. Comparaison des 3 résistances à 7, 28 et 60 jours formulation sans mousse

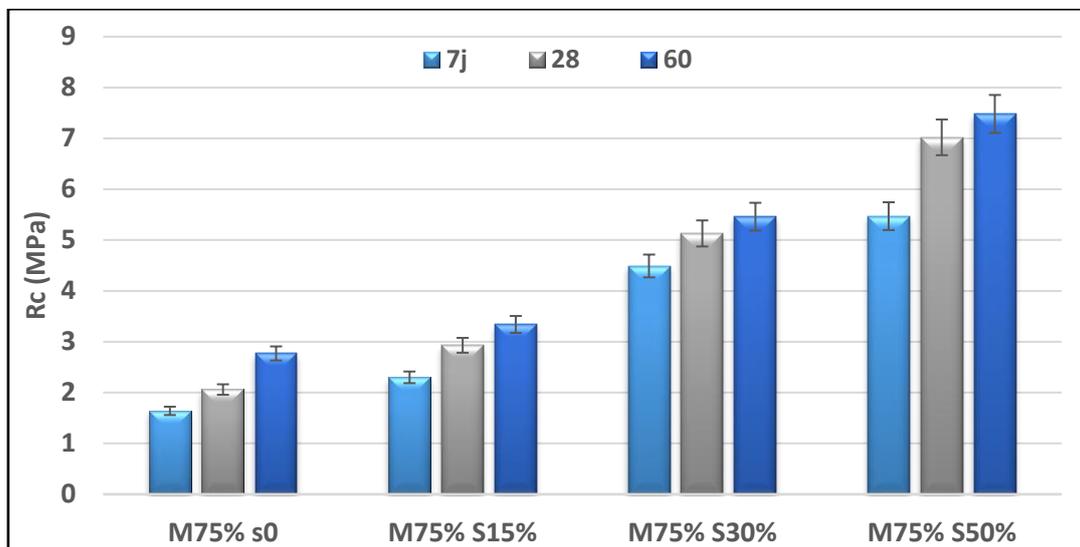


Figure 92. Comparaison des 3 résistances à 7, 28 et 60 jours formulation avec mousse 75%

6.3 Interprétation et discussion

D'après la littérature, la résistance dépend essentiellement de la structure porale des bétons. En effet cette dépendance est bien établie par la courbe de régression présentant la densité en fonction de la porosité, affichant un $R^2=87.4\%$ Figure 94. Le diamètre moyen semble le paramètre qui est le plus corrélé à la résistance ($R^2=67\%$) Figure 95.

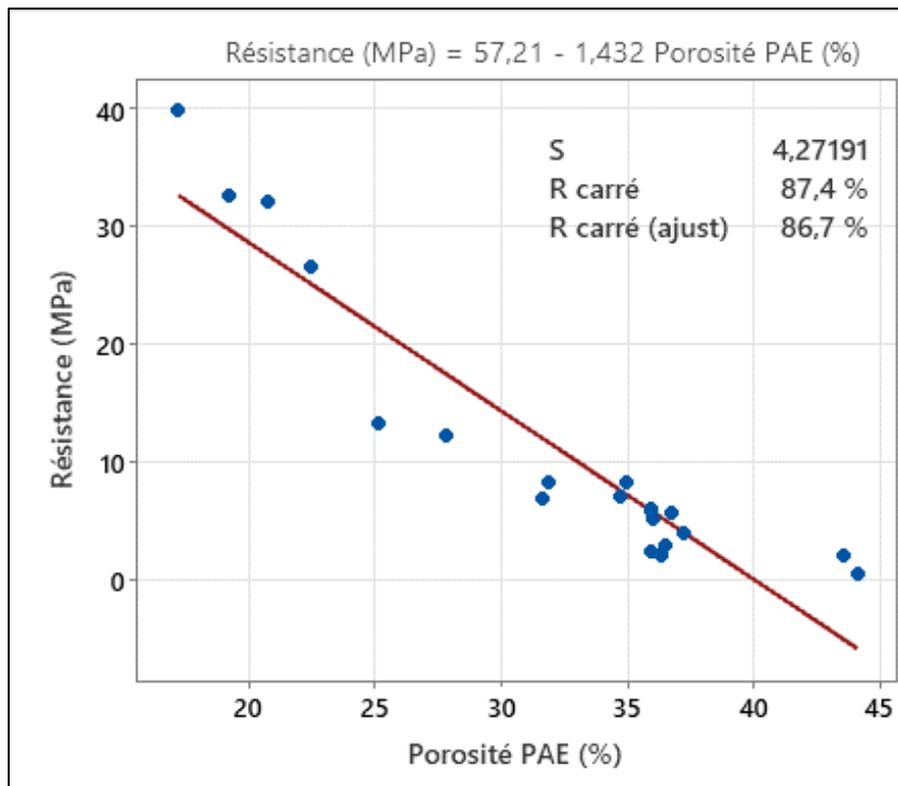


Figure 94. Courbe de régression résistance en fonction de la porosité

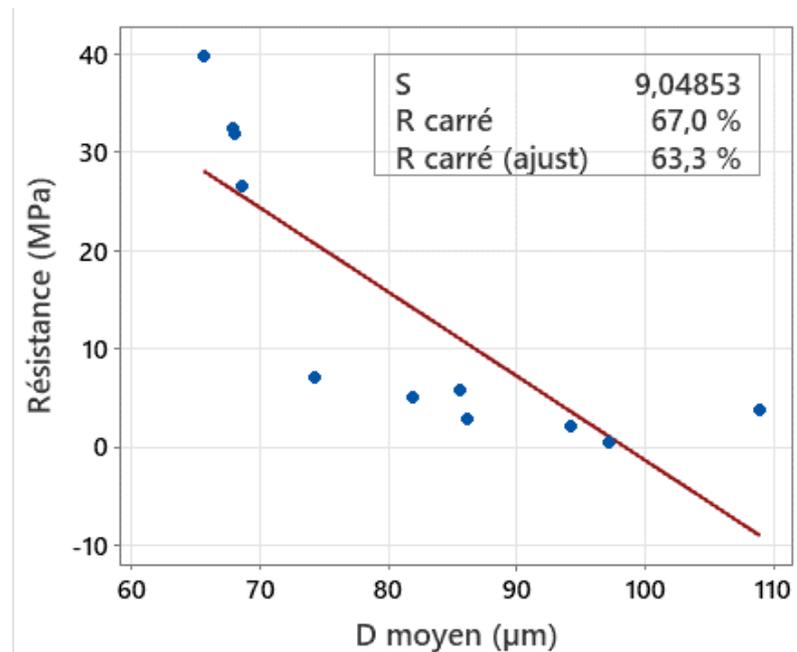


Figure 93. Courbes de régression résistance en fonction du diamètre

On peut donc expliquer 88% des variations de la résistance par les variations de la porosité. Un autre facteur pouvant être à l'origine de la diminution de la résistance dans les formulations sans mousse est la présence de la matière organique qui en retardant la prise du béton affecte la résistance. La présence de la chaux vive, peut également sérieusement impacter les réaction

pouzzolaniques et entraîner des défauts d'adhérence granulats/pâte et perturber ainsi les performances mécaniques [155]

Quant aux formulations avec mousse, les autres facteurs potentiels, entraînant l'augmentation de la résistance, hormis la porosité sont

Dans l'étude de Xiaoyun Yang et al[94], cité dans la partie 1. Béton mousse, il a été constaté au contraire une diminution de la résistance l'ajout des sédiments dans le ciment (de 21,9 MPa à 7,25 MPa lorsque le pourcentage de sédiments par rapport au ciment a augmenté de 30% à 70%), et ce malgré l'ajout de la fumée de silice.

Il est à retenir en outre que ce gain en résistance se fait au détriment d'une perte en légèreté du fait de la corrélation forte entre ces 2 propriétés ($R^2 = 93\%$ - figure), indiquée dans la littérature.

Il peut être envisagé de trouver un compromis entre légèreté et résistance mécanique, en agissant sur les paramètres de l'expérience, de façon à augmenter la résistance sans que la densité augmente et selon les performances que l'on veut atteindre. Il peut être envisagé l'ajout de la fumée de silice qui d'après Cong et Bing [5] rendait les pores plus uniformes et fermés et de taille plus réduite, et améliorerait la résistance. D'autres possibilités seraient de faire subir aux sédiments un prétraitement de façon à diminuer la teneur en eau, ou de recourir aux additifs écologiques et économiques tels que les tensioactifs à base végétal pour stabiliser la mousse et gagner en légèreté, ou d'optimiser le protocole de malaxage.

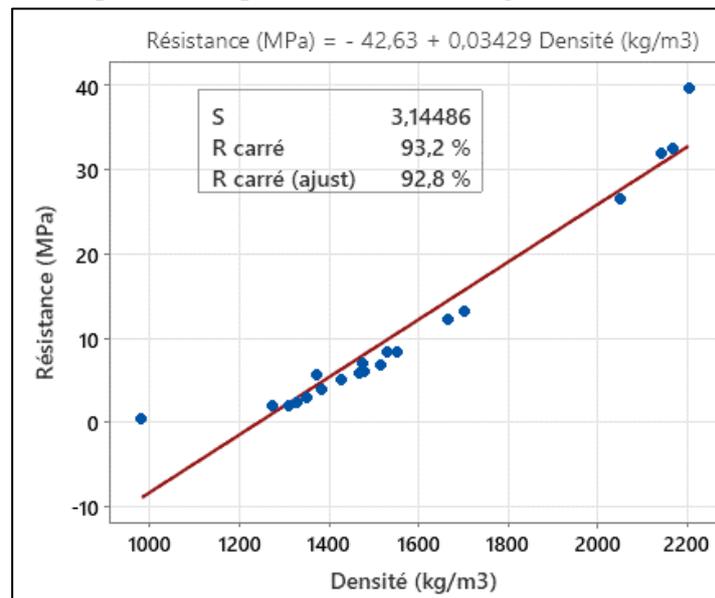


Figure 95. Courbe de régression résistance en fonction de la densité

6.4 Conclusion

Pour résumer, on retient les résultats les plus importants :

- ✓ Les sédiments seuls diminuent la résistance (de 8, 12 et 23% pour 15, 30 et 50% de substitution)
- ✓ En présence de la mousse, les sédiments augmentent la résistance de façon plus importante (de 42 à 241% hors-série M100%).
- ✓ La mousse diminue la résistance dans les formulations avec ou sans sédiments.

- ✓ L'effet des sédiments est atténué par l'ajout de la mousse et inversement.
- ✓ L'effet des sédiments sur la résistance n'est pas significatif par rapport à la mousse, quoique et il est 4 fois moindre.

Les sédiments ont donc un effet très favorable sur la résistance à la compression des bétons mousse. Le gain en résistance est conséquent, il varie de 42% à 241%, en excluant la série M100% où la mousse est trop instable, soit une moyenne de 108% (avec écart type de 0.6) pour des taux de substitution massique de 15,30 et 50% combinés à une teneur en mousse de 25, 50 et 75%. Par exemple, pour seulement 15% de substitution, on obtient en moyenne un gain conséquent en résistance de 50%.

À titre indicatif, partant des formulations de référence, présentant une résistance entre 2 et 5.7 MPa, la substitution des sédiments a permis d'obtenir des bétons mousse plus résistants (entre 3 et 13 MPa (correspondant à respectivement M25%S50% et M75%S15%). Ces valeurs augurent d'une utilisation plutôt dans des applications semi structurelles

7. À L'ETAT DURCI : CONDUCTIVITE THERMIQUE

7.1 Résultats et analyse des effets

La Figure 96 montre que la conductivité thermique diminue avec la substitution, dans les formulations sans mousse, et augmente en présence de la mousse. On peut voir que la mousse atténue l'effet des sédiments.

D'après les résultats des variations de la conductivité thermique calculées par rapport à la formulation sans sédiments Figure 97 on remarque que pour 15, 30 et 50% de substitution, les sédiments diminuent la conductivité de 0.4, 3 et 20% dans les formulations sans mousse, et l'augmentent de 3, 11 et 12% dans les formulations avec mousse à 75%

Dans les graphes à moustache la Figure 98, présentant la dispersion des valeurs de la conductivité thermique, on voit clairement que l'effet des sédiments est fortement atténué par l'ajout de la mousse, et qu'inversement l'effet de la mousse est suffisamment atténué par les sédiments.

Cette observation est bien confirmée par la mesure des écarts type illustrées dans le Tableau 34, où on peut voir, dans le tableau que la mousse atténue l'effet des sédiments d'environ -77%, et que les sédiments atténuent l'effet de la mousse de -21% en moyenne.

Dans le diagramme de Pareto Figure 99, on voit bien que l'effet de la mousse sur la conductivité thermique est beaucoup plus important que celui des sédiments, et que l'effet des sédiments n'est pas significatif. En estimant l'intensité des 2 effets par les écarts types regroupés Tableau 34 , on peut déduire que la mousse a environ 5 fois plus d'effet que les sédiments sur la variation de la conductivité thermique (écart type mousse = 0,44 / écart type sédiments = 0,09).

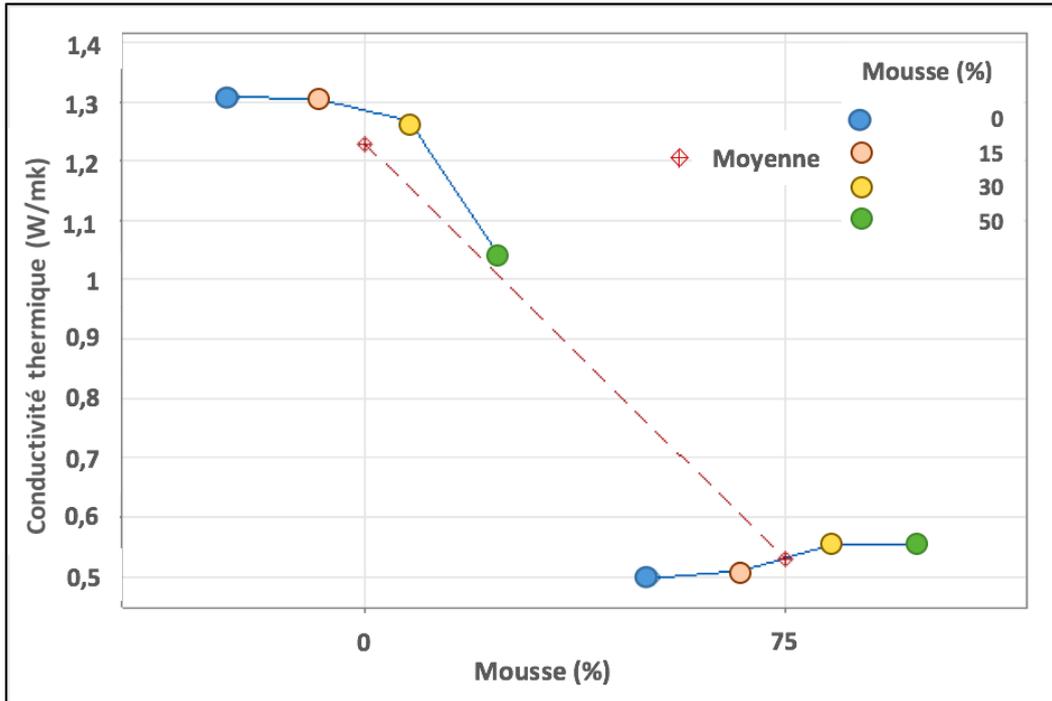


Figure 96. Variation de la conductivité thermique en fonction de la mousse

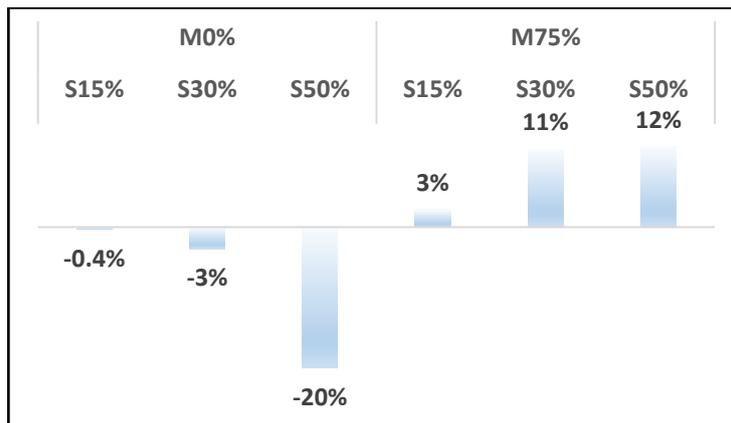
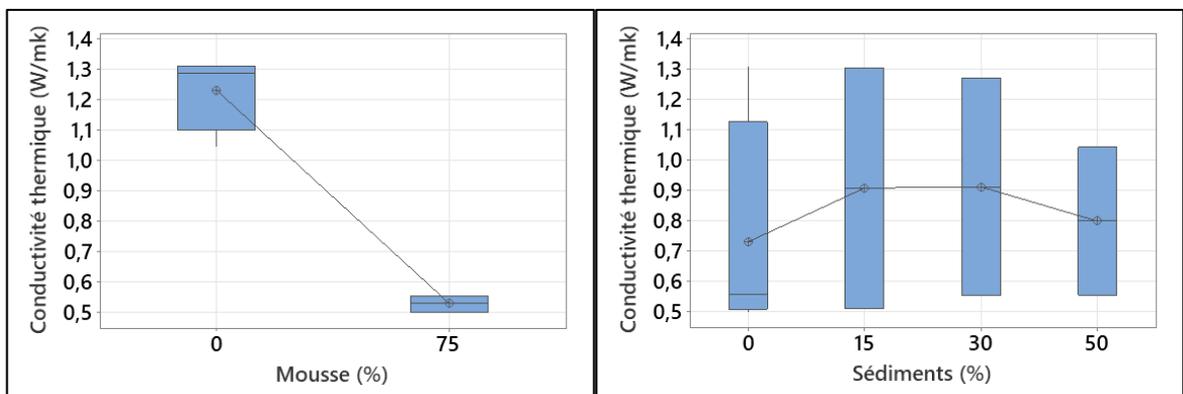


Figure 97. Variation de la conductivité thermique par rapport aux formulations sans sédiments



(a)

(b)

Figure 98. Distribution λ en fonction sédiments (b) distribution λ en fonction mousse

Tableau 34. (a) écarts type λ (effet des sédiments) (b) écarts type λ (effet de la mousse)

(a)			(b)		
Mousse (%)	N	EcTyp	Sédiments(%)	N	EcTyp
0	4	0,1276	0	4	0,388
75	4	0,0296	15	2	0,562
			30	2	0,506
			50	2	0,344

Écart type regroupé = **0,435927**

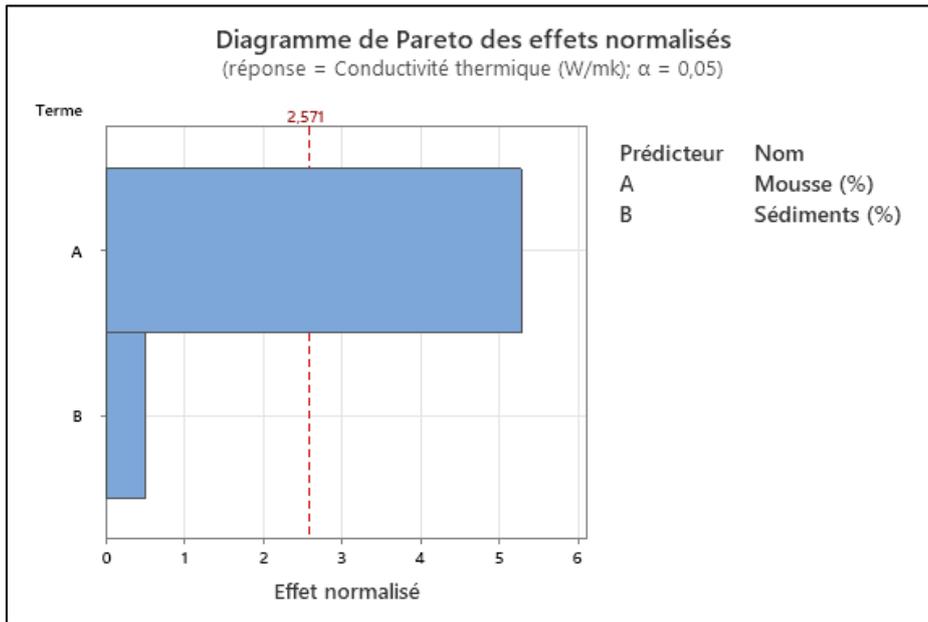


Figure 99. Diagramme de Pareto des effets des sédiments et mousse sur la conductivité thermique

7.2 Interprétation et discussion

Les variations de la conductivité thermique s'expliquent à 94% par les variations de la porosité, comme on peut le voir dans la courbe de régression de la Figure 100, présentant la conductivité en fonction de la porosité ($R^2=94.2\%$). Comme pour les 2 propriétés précédentes, le diamètre moyen semble être le paramètre relativement le plus impactant avec $R^2=60\%$, par contre ni la forme des pores ni la surface spécifique n'est corrélée à la conductivité.

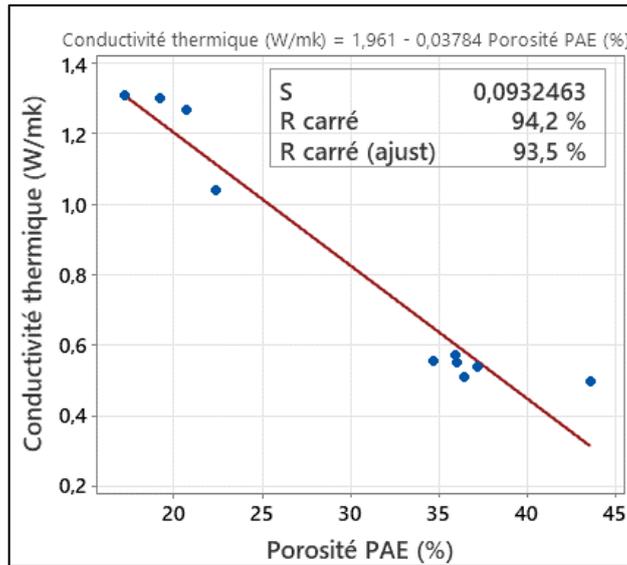


Figure 100. Courbe de régression conductivité thermique en fonction de la porosité

On peut donc expliquer 94% de la variation de la conductivité thermique par la variation de la porosité. Un autre facteur explicatif hormis la porosité, de la diminution de la conductivité thermique dans les formulations sans mousse, est la teneur en chaux vive des sédiments (12.9%) qui, d'après quelques études permet d'obtenir de bonnes propriétés d'isolation thermique [155].

Dans l'étude de Xiaoyun Yang et al[94], cité dans la partie 1.3, les sédiments ont également diminué la conductivité thermique dans les composites sans ajout de mousse (de 0,591 à 0,439 W/mK pour un ajout de sédiments passant de 30 à 70%).

Dans les formulations avec mousse, les propriétés d'isolation thermique pourraient être davantage améliorées par l'ajout de fumée de silice qui d'après Cong et Bing [5] rendait les pores plus uniformes et fermés et de taille plus réduite.

La corrélation entre la conductivité thermique et la densité est bien vérifiée avec $R^2=98\%$ Figure 101

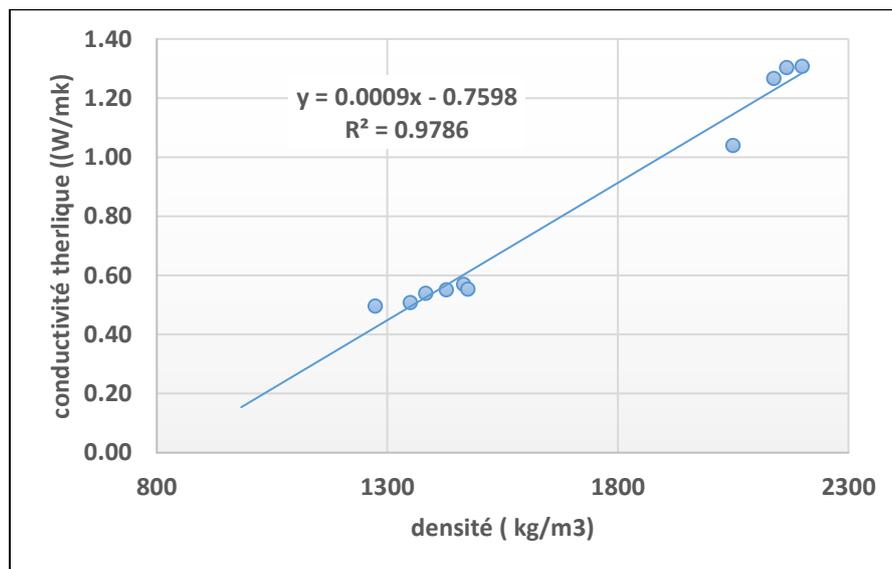


Figure 101. Courbe de régression Conductivité thermique - Densité

7.3 Conclusion

Pour résumer, on retient les résultats les plus importants :

- ✓ Les sédiments seuls diminuent la conductivité thermique (de 0,4, 3 et 20% pour 15, 30 et 50% de substitution).
- ✓ En présence de la mousse, les sédiments augmentent légèrement la conductivité thermique. (De 3, 11 et 12% pour 15, 30 et 50% de substitution).
- ✓ La mousse diminue la conductivité thermique dans les formulations avec ou sans sédiments.
- ✓ L'effet des sédiments est atténué par l'ajout de la mousse et inversement.
- ✓ L'effet des sédiments sur la conductivité thermique n'est pas significatif par rapport à la mousse, et il est 5 fois moindre.

On peut considérer que la substitution a un effet faiblement défavorable sur la conductivité thermique (8% en moyenne avec une teneur en mousse de 75%, elle passe de 0,5 W/mk pour la formulation sans sédiments à 0,51 et 0,55 W/mk, pour les taux de substitution de 15, 30 et 50%).

8. ÉTUDE COMPARATIVE DES PROPRIÉTÉS

Pour comparer les variations des propriétés des bétons mousse sous l'effet de la substitution des sédiments et de la mousse, on s'est basé sur la mesure des coefficients de variation des propriétés, qui sont à même de décrire le plus justement la variation des données par rapport à la moyenne car ils sont rapportés à une échelle sans unités. Ainsi, plus le coefficient est élevé, plus les valeurs de la propriété sont dispersées et plus l'effet des facteurs sera impactant.

Dans un premier temps, afin de pouvoir apprécier l'effet de la mousse également, l'examen n'inclura pas la conductivité thermique car seules les valeurs de la série M75% sont disponibles pour cette propriété.

Tableau 35. Statistiques globales

Variable	VarCoeff	EcTyp	Moyenne	Minimum	Maximum
Densité (kg/m ³)	8,51	125,6	1475,6	1312,0	1700,0
Résistance (MPa)	53,01	3,54	6,67	2,00	13,23
Étalement (cm)	10,80	1,946	18,014	15,300	20,880

D'après le Tableau 35 des statistiques globales, on voit bien que c'est la résistance qui varie le plus sous l'effet de la variation des 2 facteurs, suivi de l'étalement puis de la densité. Les sédiments impactent les propriétés mécaniques 6 fois plus que la densité, et 5 fois plus que l'ouvrabilité.

Le Tableau 36 synthétisant les statistiques réparties par facteur montre que les sédiments impactent 12 fois plus la résistance (gain) que la densité (perte en légèreté) et 6 fois plus que

l'ouvrabilité (gain). La mousse impacte 6 fois plus la résistance (perte) que la densité (allègement) et 5 fois plus que l'ouvrabilité (gain).

Cela signifie que vouloir améliorer la légèreté aura très peu d'incidence sur la résistance et l'ouvrabilité et sur le taux de substitution qui seront très peu réduites.

Et cela veut dire d'autre part qu'introduire de la mousse en plus grande quantité pour alléger le matériau va être significativement impactant au niveau des performances mécaniques. Cela permet cependant d'obtenir une meilleure ouvrabilité.

Tableau 36. Comparaison coefficients de variation (moyenne)

	Densité	Résistance	Étalement
Effet Sédiments	3	35	6
Effet Mousse	9	54	10

Tableau 37. Statistiques (effet sédiments)

Variable	Mousse (%)	VarCoeff	EcTyp	Moyenne	Minimum	Maximum
Densité (kg/m3)	25	4,70	77,0	1639,6	1552,9	1700,0
	50	1,72	25,9	1507,0	1478,0	1528,0
	75	4,45	63,1	1417,7	1350,0	1475,0
	100	2,30	30,8	1338,0	1312,0	1372,0
	Moyenne	3				
Résistance (MPa)	25	23,27	2,62	11,25	8,28	13,23
	50	16,11	1,142	7,087	6,050	8,310
	75	40,72	2,05	5,03	2,93	7,02
	100	59,70	1,99	3,33	2,00	5,61
	Moyenne	35				
Étalement (cm)	25	2,26	0,352	15,560	15,300	15,960
	50	10,04	1,78	17,77	16,20	19,71
	75	3,35	0,656	19,600	19,000	20,300
	100	8,01	1,532	19,127	18,050	20,880
	Moyenne	17				

Tableau 38. Statistiques (effet mousse)

Variable	Sédiments (%)	VarCoeff	EcTyp	Moyenne	Minimum	Maximum
Densité (kg/m3)	15	7,86	111,9	1423,2	1312,0	1552,9
	30	9,60	142,5	1484,8	1330,0	1666,0
	50	9,03	137,1	1518,8	1372,0	1700,0
	Moyenne	9				
Résistance (MPa)	15	59,96	2,89	4,81	2,00	8,28
	30	62,43	4,16	6,66	2,37	12,23
	50	38,79	3,31	8,54	5,61	13,23
	Moyenne	54				
Étalement (cm)	15	9,85	1,689	17,137	15,300	19,000
	30	9,84	1,741	17,692	15,420	19,500
	50	11,56	2,22	19,21	15,96	20,88
	Moyenne	10				

En intégrant la conductivité thermique dans cette comparaison, on note d'après le Tableau 39 que dans les formulations de la série M75%, les sédiments impactent les propriétés mécaniques 9 fois plus que la densité, 8 fois plus que la conductivité thermique et 12 fois plus que l'ouvrabilité.

Tableau 39. Statistiques (M75%)

Variable	VarCoeff	EcTyp	Moyenne	Minimum	Maximum
Densité (kg/m ³)	4,45	63,1	1417,7	1350,0	1475,0
Résistance (MPa)	40,72	2,05	5,03	2,93	7,02
Conductivité thermique (W/mk)	4,75	0,0256	0,5380	0,5085	0,5537
Étalement (cm)	3,35	0,656	19,600	19,000	20,300

8.1 Résultats de la modélisation des effets

Il s'agit dans cette partie de modéliser les propriétés essentielles des bétons mousse (masse volumique, résistance et ouvrabilité) sous l'effet des deux facteurs mousse et sédiments. La conductivité thermique n'a pas pu être traitée car les données sont insuffisantes. Le logiciel utilisé est le logiciel de statistiques et d'analyse des données Design Expert.

Après une première analyse du modèle obtenu par le logiciel, il s'est avéré qu'il n'y a pas de corrélation entre les 2 variables mousse et sédiments Figure 102. Un point aberrant a été détecté correspondant à M100%S0%. Ce point ne sera donc pas pris en compte dans le modèle global.

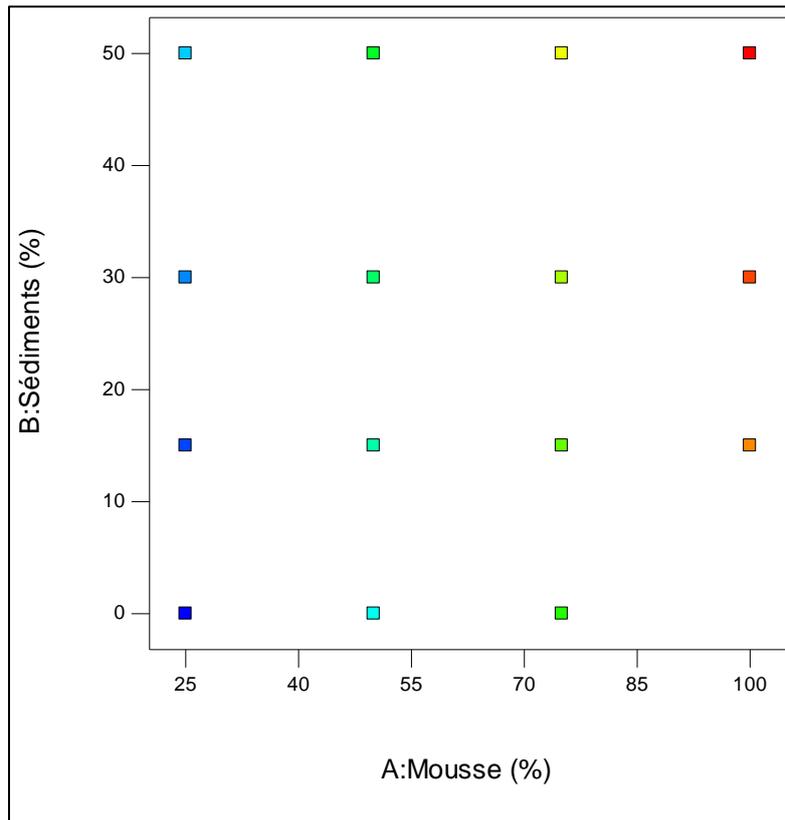


Figure 102. Graphique de corrélation entre mousse et sédiments

La synthèse du modèle global obtenu, ainsi que les résultats de l'analyse de la variance y relatif, sont présentés ci-dessous :

Tableau 40. Synthèse du modèle

Design Summary			
File Version	10.0.1.0		
Study Type	Response Surface	Subtype	Randomized
Design Type	Historical Data	Runs	16
Design Model	Quadratic	Blocks	No Blocks

Factor	Units	Minimum	Maximum	Mean	Std. Dev.
Mousse	%	25	100	62.5	28.8675
Sédiments	%	0	50	23.75	19.105

Response	Units	Obs	Analysis	Minimum	Maximum	Mean	Std. Dev.	Ratio	Model
Densité	kg/m3	15	Polynomial	1273.66	1700	1455.32	124.453	1.3	Linear
Résistance	MPa	15	Polynomial	2	13.23	6.11667	3.41149	6.6	Linear
Étalement	cm	15	Polynomial	14.2	20.33	16.8993	1.81715	1.43169	Linear

Tableau 41. ANOVA

Source	Densité			Résistance			Étalement		
	df	F Value	p-value	df	F Value	p-value	df	F Value	p-value
Model	2	93.53	< 0.0001	2	79.67	< 0.0001	2	27.15	< 0.0001
A-Mousse	1	148.59	< 0.0001	1	111.27	< 0.0001	1	39.89	< 0.0001
B-Sédiments	1	59.77	< 0.0001	1	67.94	< 0.0001	1	8.67	0.0123
Residual	12			12			12		
Cor Total	14			14			14		

Densité			
Std. Dev.	33.01	R-Squared	0.9397
Mean	1455.32	Adj R-Squared	0.9297
C.V. %	2.27	Pred R-Squared	0.9000
		Adeq Precision	28.399

Résistance			
Std. Dev.	0.98	R-Squared	0.9300
Mean	6.12	Adj R-Squared	0.9183
C.V. %	15.94	Pred R-Squared	0.8854
		Adeq Precision	26.330

Étalement			
Std. Dev.	0.84	R-Squared	0.819
Mean	16.90	Adj R-Squared	0.7888
C.V. %	4.94	Pred R-Squared	0.7135
		Adeq Precision	14.941

Tableau 42. Coefficients de régression

	Densité	Résistance	Étalement
Intercept	1444.42	5.83	17.01
A-Mousse	-145.08	-3.71	1.90
B-Sédiments	92.16	2.90	0.89

8.1.1 Densité

ANOVA montre que :

- Le modèle linéaire est le plus significatif ($R^2=94\%$) ;
- L'effet de la mousse est significatif ($F(1,12) = 148.59$; $p < 0,0001$) ;
- L'effet des sédiments est significatif ($F(1,12) = 59.77$; $p < 0,0001$).

D'après les coefficients de régression obtenues, la densité diminue avec l'ajout de la mousse et augmente avec la substitution. Il apparaît également que l'effet de la mousse est plus important que celui des sédiments.

Le diagramme de Pareto Figure 103 montre les sédiments et la mousse ont des effets significatifs avec une prédominance pour la mousse. Il apparaît également que l'effet de leur interaction n'est pas significatif.

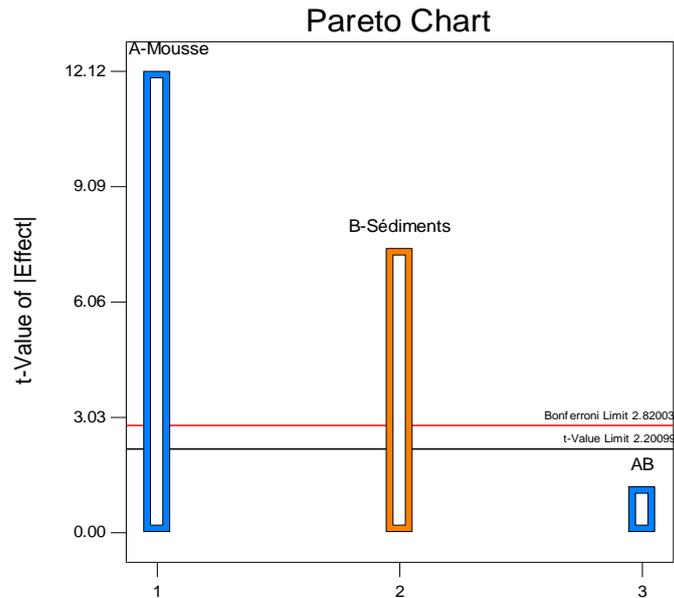


Figure 103: Diagramme Pareto

8.1.2 Résistance

ANOVA montre que :

- Le modèle linéaire est le plus significatif ($R^2=93\%$) ;
- L'effet de la mousse est significatif ($F(1,12) = 111.27$; $p < 0.0001$) ;
- L'effet des sédiments est significatif ($F(1,12) = 67.94$; $p < 0.0001$).

D'après les coefficients de régressions obtenues, la résistance diminue avec l'ajout de la mousse et augmente avec la substitution. Il apparaît également que l'effet de la mousse est légèrement plus important que celui des sédiments.

Le diagramme de Pareto Figure 104 indique que les sédiments et la mousse ont des effets significatifs avec une prédominance pour la mousse. L'effet de leur interaction n'est pas significatif.

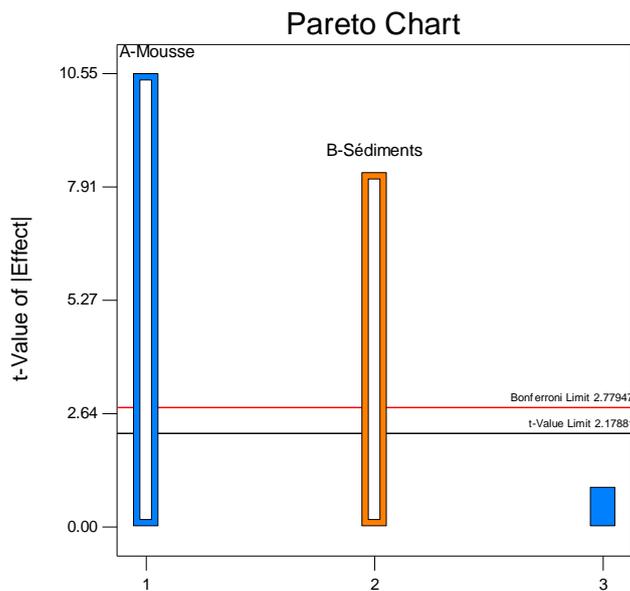


Figure 104: Diagramme Pareto

8.1.3 Ouvrabilité

ANOVA montre que :

- Le modèle linéaire est le plus significatif ($R^2=82\%$) ;
- L'effet de la mousse est significatif ($F(1,12) = 39.89$; $p < 0.0001$) ;
- L'effet des sédiments est significatif ($F(1,12) = 8.67$; $p = 0.0123$).

D'après les valeurs des coefficients de régressions obtenues, l'étalement augmente avec l'ajout de la mousse et avec la substitution. L'effet de la mousse est plus important que celui des sédiments. D'après le diagramme de Pareto Figure 105, on voit bien que les sédiments et la mousse ont des effets significatifs avec une prédominance pour la mousse et que l'effet de leur interaction n'est pas significatif.

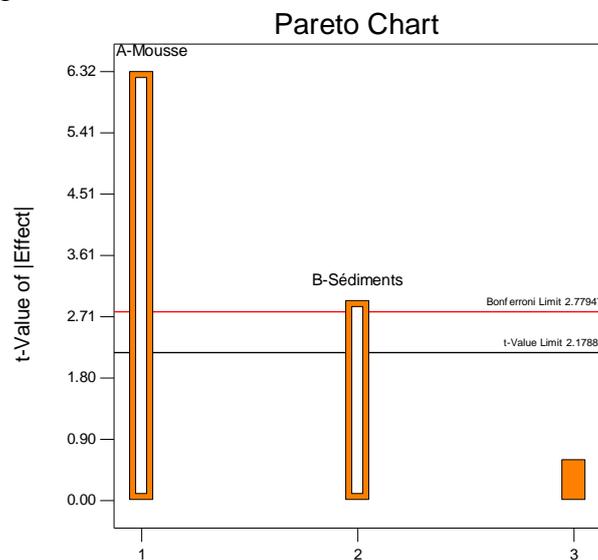


Figure 105 : Diagramme de Pareto

8.2 Analyse des modèles de régression

Les graphes surface 3D et les équations de régression, montrent bien une régression linéaire entre les 3 propriétés et les 2 facteurs. La densité et la résistance augmentent avec l'augmentation des sédiments et la diminution de la mousse. L'étalement augmente avec l'augmentation des sédiments et l'augmentation de la mousse.

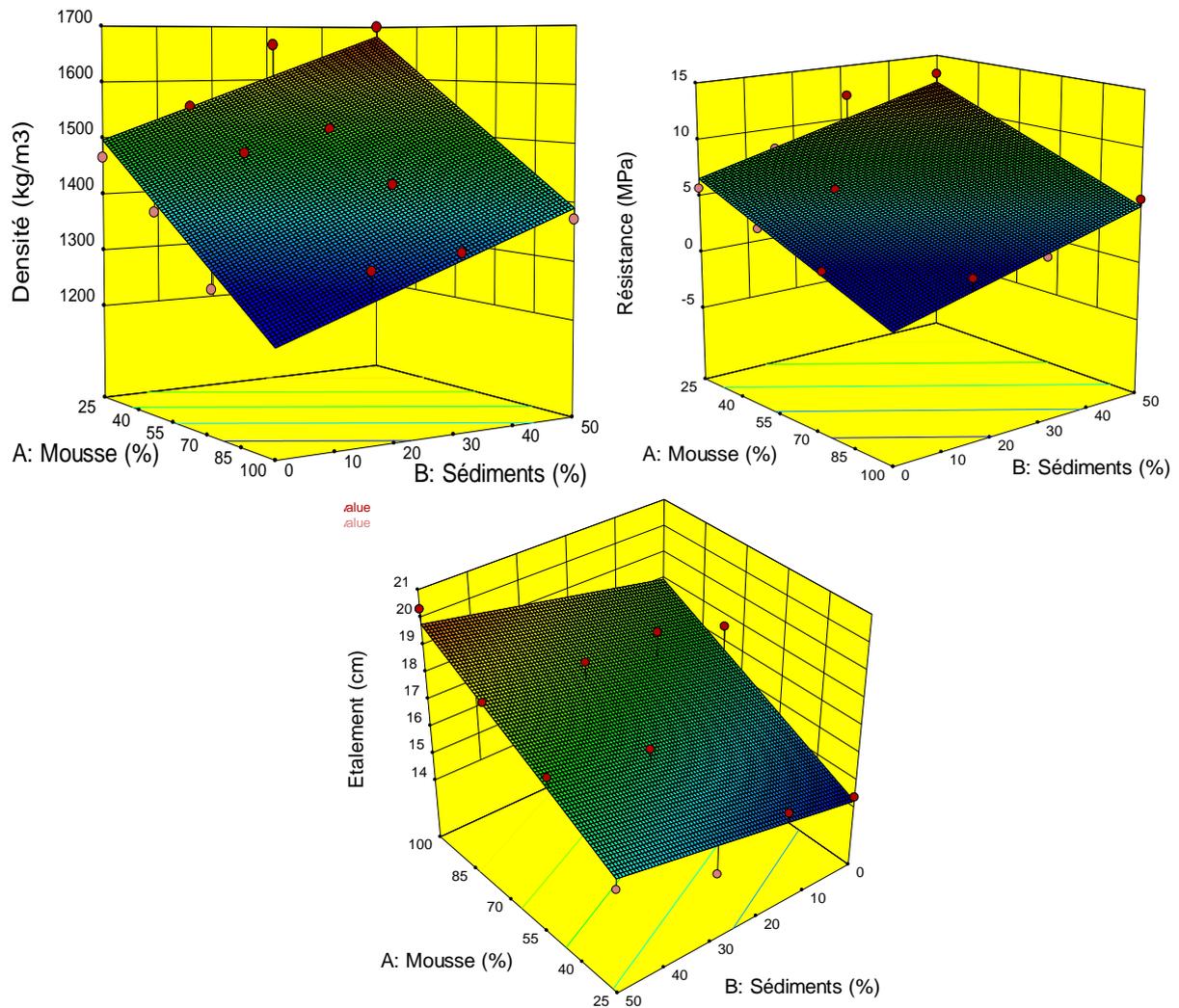


Figure 106. Les graphes surface 3D et les équations de régression

$$\text{Densité (kg/m}^3\text{)} = +1594.05779 - 3.86872*\text{Mousse} + 3.68643*\text{Sédiments}$$

$$\text{Résistance (MPa)} = +9.10967 - 0.098916*\text{Mousse} + 0.11613*\text{Sédiments}$$

$$\text{Étalement (cm)} = +12.95675 + 0.050715*\text{Mousse} + 0.035515*\text{Sédiments}$$

Le tableau comparatif suivant entre les valeurs prédictives et expérimentales ainsi que les graphes y correspondant, montrent que le modèle global est correct

Tableau 43. Comparaison entre les valeurs prédictives et expérimentales

Variables		Densité (kg/m ³)			Résistance (MPa)			Étalement (cm)		
Mousse %	Sédiments %	Actual Value	Predicted Value	Residual	Actual Value	Predicted Value	Residual	Actual Value	Predicted Value	Residual
25	0	1466.00	1497.34	-31.34	5.77	6.64	-0.87	14.37	14.22	0.15
25	15	1552.87	1552.64	0.23	8.28	8.38	-0.099	15.10	14.76	0.34
25	30	1666.00	1607.93	58.07	12.23	10.12	2.11	14.20	15.29	-1.09
25	50	1700.00	1681.66	18.34	13.23	12.44	0.79	15.60	16.00	-0.40
50	0	1383.33	1400.62	-17.29	3.86	4.16	-0.30	14.77	15.49	-0.72

50	15	1478.00	1455.92	22.08	6.05	5.91	0.14	16.00	16.03	-0.025
50	30	1515.00	1511.21	3.79	6.90	7.65	-0.75	16.99	16.56	0.43
50	50	1528.00	1584.94	-56.94	8.31	9.97	-1.66	17.67	17.27	0.40
75	0	1273.66	1303.90	-30.24	2.06	1.69	0.37	17.65	16.76	0.89
75	15	1350.00	1359.20	-9.20	2.93	3.43	-0.50	18.50	17.29	1.21
75	30	1428.00	1414.50	13.50	5.13	5.17	-0.045	18.50	17.83	0.67
75	50	1475.00	1488.23	-13.23	7.02	7.50	-0.48	18.60	18.54	0.064
100	15	1312.00	1262.48	49.52	2.00	0.96	1.04	17.20	18.56	-1.36
100	30	1330.00	1317.78	12.22	2.37	2.70	-0.33	18.01	19.09	-1.08
100	50	1372.00	1391.51	-19.51	5.61	5.02	0.59	20.33	19.80	0.53

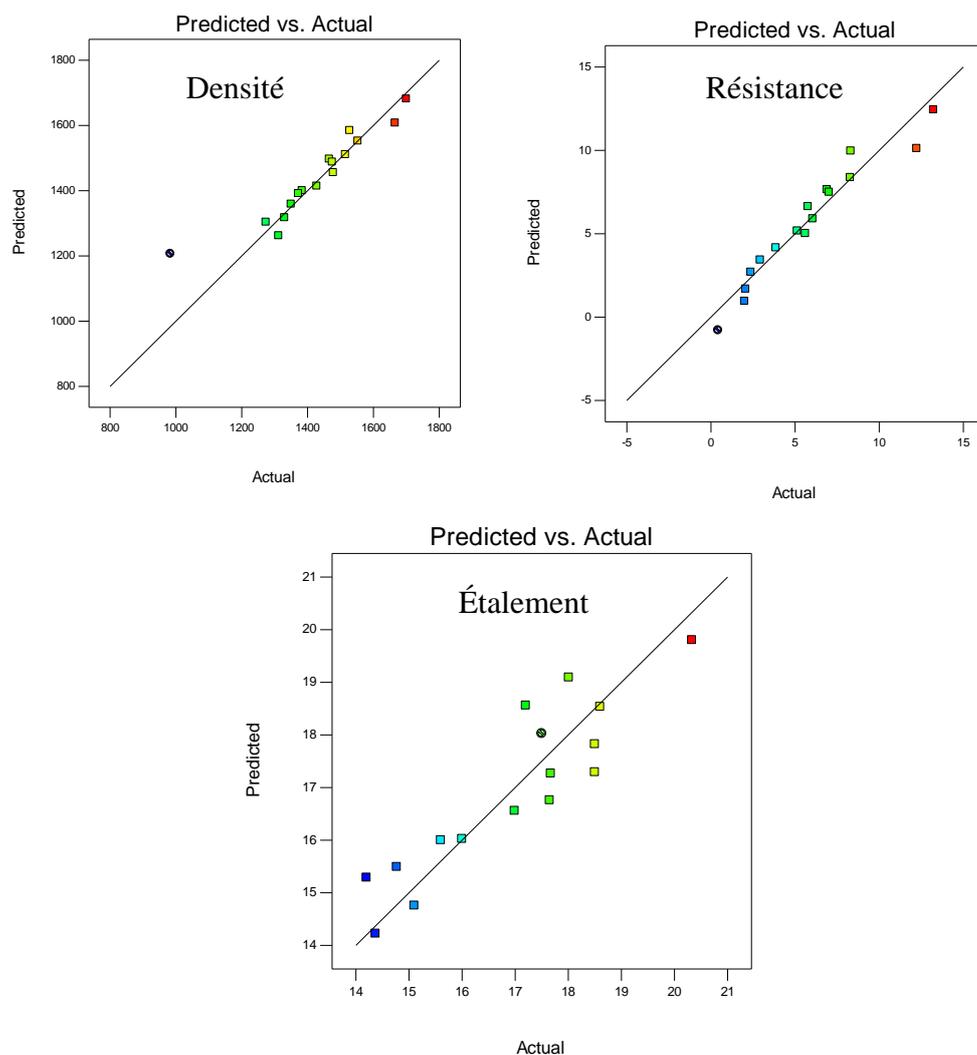


Figure 107. Comparaison entre les valeurs prédictives et expérimentales

8.3 Optimisation et application

Étant donné la consistance très plastique, des bétons mousse obtenus, au regard des paramètres de référence (nature et dosage des constituants) et des propriétés obtenues, Le domaine d'emploi à privilégier pour les bétons mousse est un usage structurel isolant, pour lequel il s'agira donc de maximiser la résistance (R_c).

À défaut d'une norme ou réglementation encadrant les bétons mousse et parmi toutes les normes régissant l'utilisation des bétons dans des applications structurales, la plus à même de répondre à notre cas est la norme NF EN 206-1. Quoique ne s'appliquant pas aux bétons mousse, cette norme couvre les bétons légers, dont la masse volumique est comprise entre 800 et 2000 kg/m³, destinés aux bâtiments et aux ouvrages en béton armé de génie civil. Elle définit selon le domaine d'utilisation, les propriétés et composition requises, en termes de classes d'exposition (l'environnement), de classes de consistance, de résistance à la compression minimale, teneur maximale en chlorures des bétons et La dimension maximale des granulats. Ainsi, pour une utilisation structurale, la masse volumique doit en général être comprise entre 1200 et 1600 kg/m³ et la résistance entre 6 et 18 MPa. Au regard des performances obtenues pour ce cas d'étude. Donc, au regard des propriétés obtenues.

Plusieurs solutions peuvent alors être envisagées selon que l'on choisit en même temps de minimiser la masse volumique (Mv), de maximiser les sédiments (S) et de minimiser la mousse (M) pour réduire le coût de production. L'étalement a été exclu des critères étant donné que les valeurs obtenues varient peu.

Les résultats d'optimisation obtenus selon les critères précités sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 44. Résultats d'optimisation obtenus selon les critères précités

	Rc max	+ S max	+M min	+S max +M min	+ Mv min	+Mv min +S max	+Mv min +M min	+Mv min + S max + M min
Mousse	25%	25%	25%	25%	61%	61%	25%	46%
Sédiments	50%	50%	50%	50%	50%	50%	19%	50%
Densité (kg/m³)	1681.6	1681.6	1681.6	1681.6	1540	1540	1569	<u>1599.3</u>
Résistance (MPa)	12.4	12.4	12.4	12.4	8,9	8,9	8,9	<u>10.3</u>
Étalement (cm)	16	16	16	16	17,9	17,9	15	<u>17,1</u>

On note que le fait de maximiser la résistance induit l'optimisation des sédiments et de la mousse (résultats identiques pour les 4 premières colonnes).

Si on décide de minimiser en même temps la masse volumique (colonnes 5 et 6), les résultats sont inintéressants, dans la mesure où il est nécessaire d'ajouter +144% de mousse pour obtenir une diminution d'à peine -9% de la masse volumique, avec en plus une diminution de -12% de la résistance.

En comparant les résultats des 2 dernières colonnes, on remarque que la maximisation du taux de substitution se fait au détriment de la teneur en mousse. Les deux résultats peuvent néanmoins être retenues selon l'objectif de dosage souhaité.

Ainsi, trois solutions peuvent être proposées, selon les paramètres de référence rappelés ci-dessous :

- ✓ Ciment Portland CEM I-42,5 R
- ✓ Sable calcaire riche en calcite très propre, de bonne qualité tamisé à 2mm
- ✓ Agent moussant 100% naturel, à base d'hydrolyse et de kératine (Propump Engineering)
- ✓ Sédiments marins fortement organiques, tamisés à 2 mm, sans séparation granulométrique et séchés
- ✓ E/C =0.6

✓ G/C=3

- Critère 1 : résistance maximale

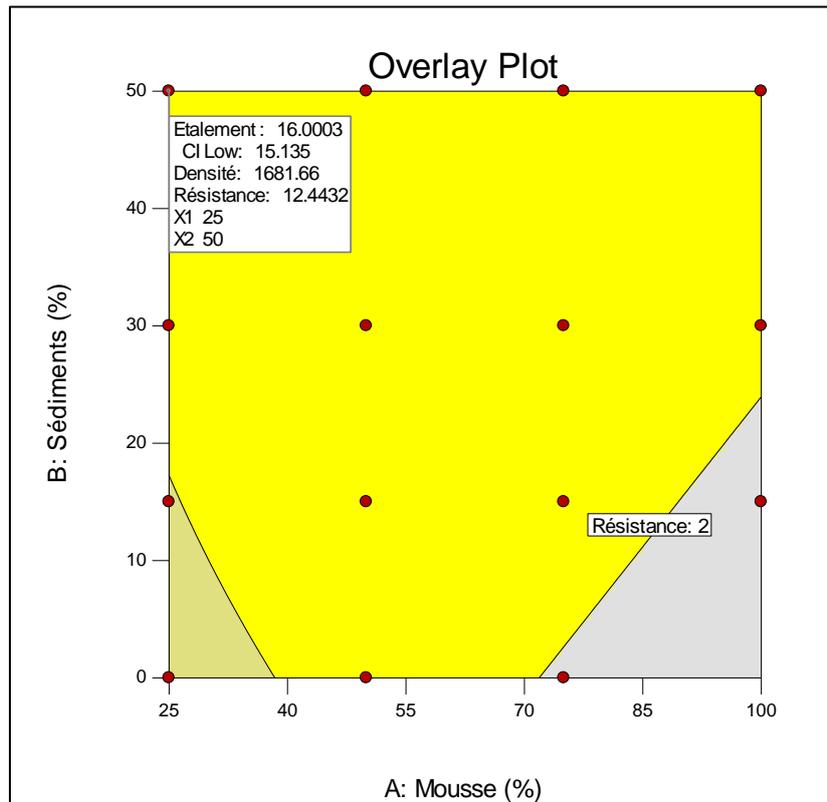


Figure 108. Overlay plot résistance maximale

Tableau 45. Résistance maximale

Formulations optimales		Valeurs (expérimentales)			Dosage pour 1m3 de bétons
Mousse	Sédiments	Résistance	Densité	Étalement	
25%	50%	13.2 MPa	1700kg/m3	15.6 cm	Sédiments : 729,1 kg; sable : 729,1kg; Mousse : 15l ; Ciment : 486kg ; eau : 364,5l
Gain % référence		129%	16%	8%	

Application à privilégier : murs porteurs*

- **Critère 2** : résistance maximale + masse volumique minimale + mousse minimale

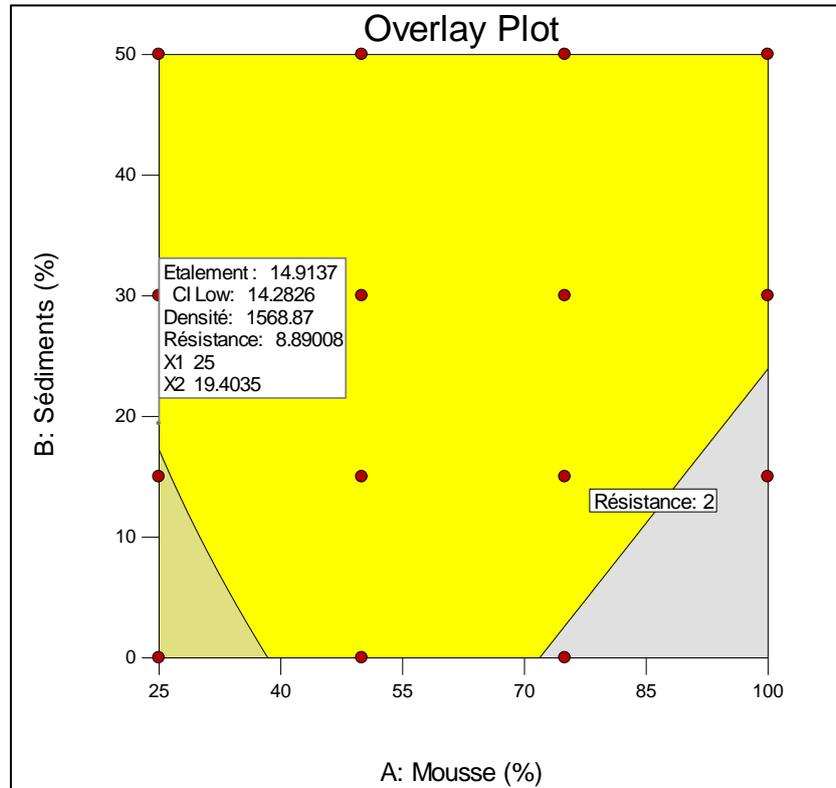


Figure 109. Overlay plot résistance maximale + masse volumique minimale + mousse minimale

Tableau 46. Résistance maximale + masse volumique minimale + mousse minimale

Formulations optimales		Valeurs prédictives		
Mousse	Sédiments	Résistance	Densité	Étalement
25%	19,4%	8.9 MPa	1568.9 kg/m ³	15 cm
Gain % formulation référence		54%	7%	3%

Application à privilégier : Murs non structurels / Murs porteurs / Piliers des ponts / Dalles de plancher Remplissage des vides / Remplissage des ports

- **Critère 3** : résistance maximale + masse volumique minimale + mousse minimale+ taux de substitution des sédiments maximal

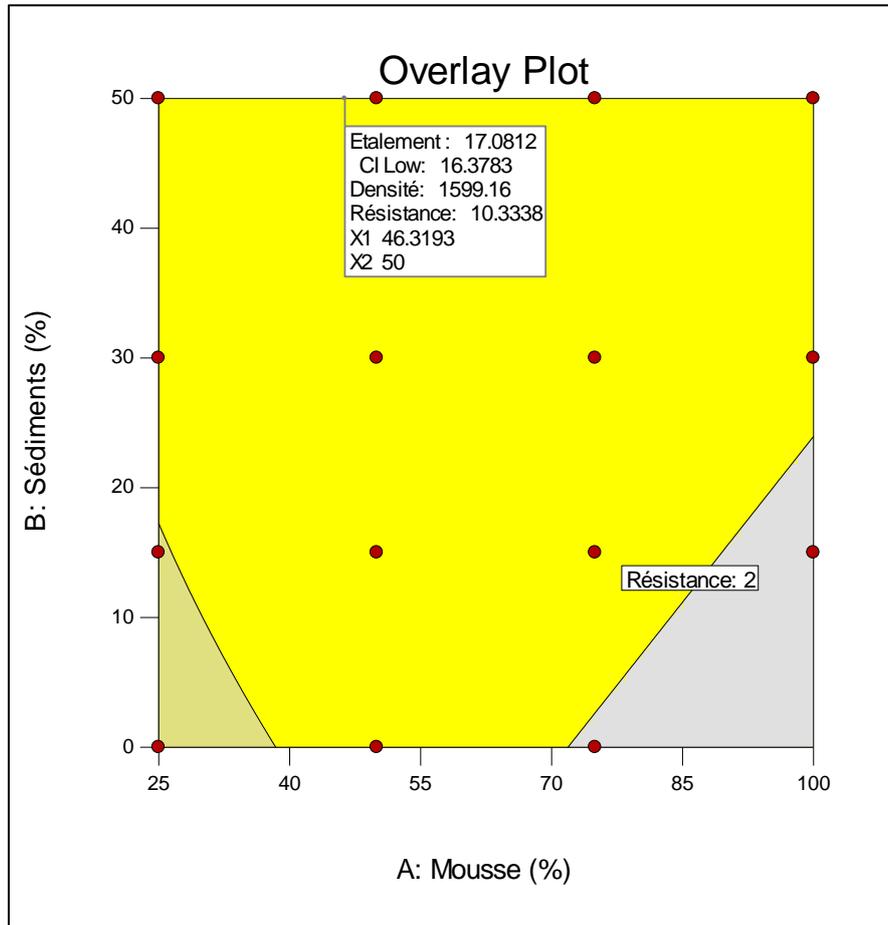


Figure 110. Overlay plot résistance maximale + masse volumique minimale + mousse minimale+ taux de substitution des sédiments maximal

Tableau 47. Résistance maximale + masse volumique minimale + mousse minimale+ taux de substitution des sédiments maximal

Formulations optimales		Valeurs prédictives		
Mousse	Sédiments	Résistance	Densité	Étalement
46,3%	50%	10.3 MPa	1599.3 kg/m ³	17.1 cm

Application à privilégier : Murs non structurels / Murs porteurs / Les piliers des ponts / Dalles de plancher / Remplissage des vides / Remplissage des ports

Pour une utilisation structurelle, les formulations avec M75% et M100% sont à éviter car les produits obtenus sont trop poreux et trop friables, comme on peut le remarquer visuellement sur la photo de la Figure 111, et en plus elles ne sont pas intéressantes de point de vue économique, vu le coût trop élevé de la mousse.

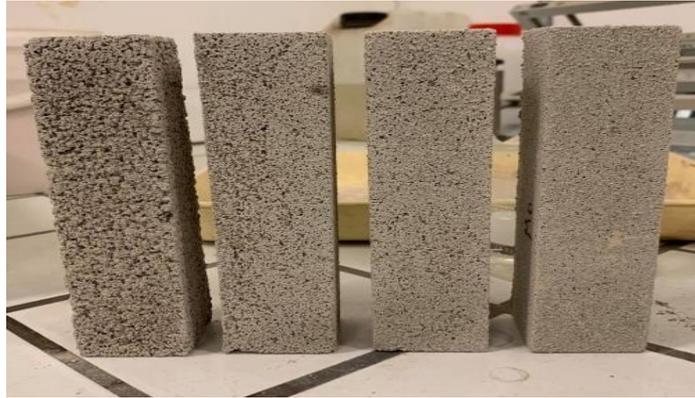


Figure 111. Les formulations M25%, M50%, M75% et M100%

En cas d'emploi des bétons mousse pour la construction de murs de façade, ces derniers doivent recevoir un revêtement extérieur d'étanchéité afin d'éviter les pénétrations d'eau de pluie et contrer les risques de remontée capillaire, étant donné la teneur en chlorure et le fort taux d'absorption d'eau des sédiments.

8.4 Conclusion sur les sédiments

Au regard des paramètres de l'expérimentation fixés, nature et dosage des constituants ($E/C=0.6$, $G/C=3$), un échantillon de sédiments avec 7% de teneur en matière organique, plus fins que le sable, 10% plus légers et absorbant 67 fois plus d'eau, et en considérant les résultats hors-série M100% où la mousse est trop instable, on peut dire que la substitution des sédiments au sable dans les bétons mousse, a permis un gain en résistance conséquent par rapport aux formulations de référence en mousse, variant de 42 à 241%, soit une moyenne de 108% (avec écart type de 0.6) pour des taux de substitution massique de 15,30 et 50% combinés à une teneur en mousse de 25, 50 et 75%; et par exemple seulement 15% de substitution, produit un gain en résistance de 50% en moyenne.

Le corollaire de cette bonne performance est une perte en légèreté mais beaucoup moindre (une moyenne de 11%) de sorte que le rapport résistance/densité de toutes les formulations avec sédiments est amélioré, comme on peut le voir sur la figure où ce rapport augmente à mesure de la substitution de 34 à 194%, soit une moyenne de 86% (avec écart type de 0.5).

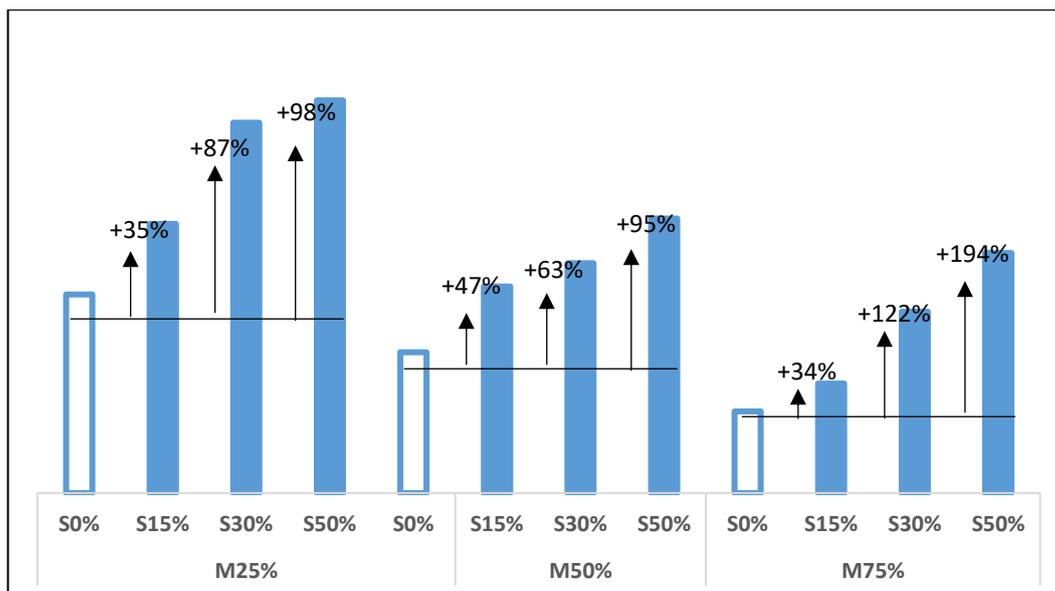


Figure 112. Rapport Résistance/Densité

Il a été enregistré un gain en ouvrabilité de 10% en moyenne (de 1 à 23%). Les bétons mousse obtenus ont globalement une consistance plastique et non fluide à cause des dosages de référence (E/C=0.6), G/C=3).

L'effet des sédiments sur l'augmentation de la conductivité thermique s'est avéré faible (8% en moyenne pour une teneur en mousse de 75%).

Les bétons mousse obtenus se sont avérés 16% moins poreux (de 3 à 30%).

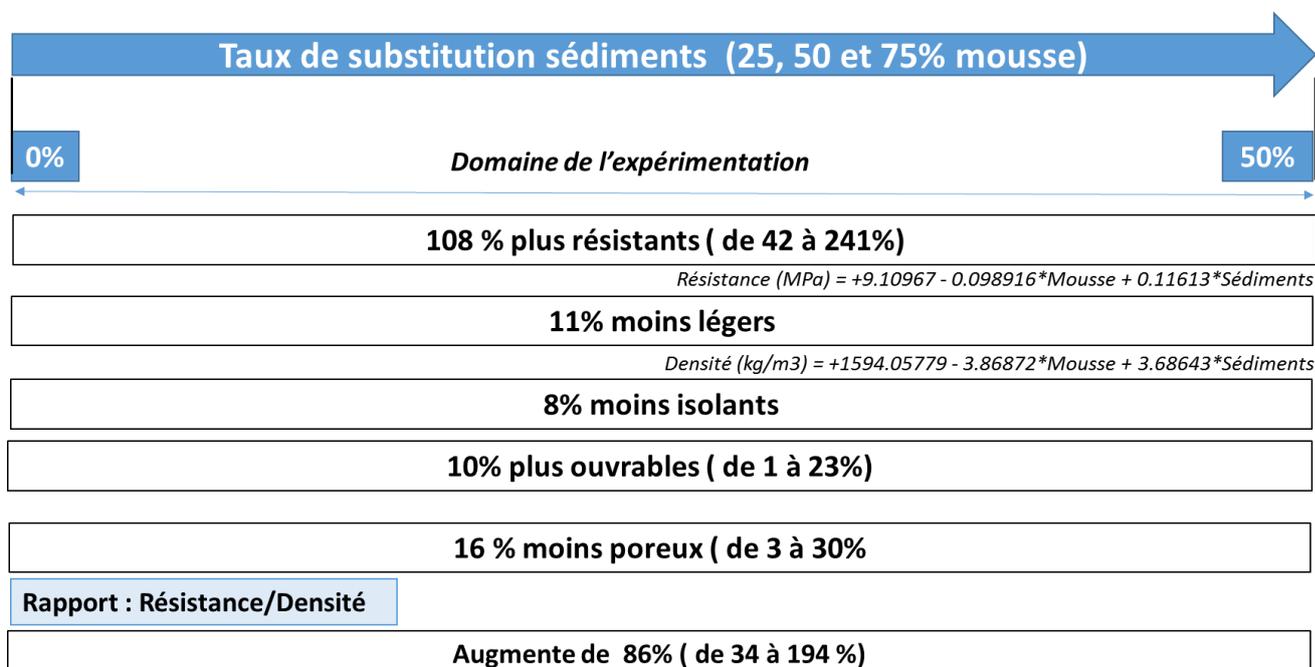


Figure 113. L'effet des sédiments sur les propriétés de béton mousse

La résistance s'est avérée la plus impactée par les sédiments par rapport aux autres propriétés (6 fois plus que la densité, et 5 fois plus que l'ouvrabilité).

La performance enregistrée pour la résistance, permet d'envisager l'élargissement du champ d'application aux ouvrages plus structurels avec plus de portance.

Ces résultats sont essentiellement dus à la présence de la chaux vive dans les sédiments dans une forte proportion (13%), qui déstabilise la mousse endommage et éclate les bulles, entraînant ainsi une réduction en porosité et donc une perte en densité et en isolation thermique mais un gain en résistance.

On peut conclure que les sédiments peuvent constituer de très bons alternatives au sable pour la conception de bétons mousse structurants, avec des rapports résistance/densité améliorés, plus ouvrables et une isolation thermique non affectée et des taux de substitution intéressants.

À titre indicatif suivant les paramètres de référence des formulations, on peut retenir 3 formulations optimisées permettant d'obtenir une résistance maximale et selon si l'on veut minimiser ou pas, le dosage en mousse ou la masse volumique.

Tableau 48. Les 3 formulations optimisées

Mousse	Sédiments	Résistance (MPa)	Densité (kg/m³)	Étalement (cm)
25%	50%	13	1700	15.6
46,3%	50%	10	1599	17
25%	19,4%	9	1569	15

PARTIE 4

CARACTERISATION DES MORTIER MOUSSE A BASE DE MACHEFER

1. DOSAGE DE REFERENCE

Le dosage de référence relatif aux essais de comparaison des bétons mousse avec mâchefers se présentent ainsi :

- ✓ E/C (eau/ciment) = 0.6 et G/C (granulats/ciment) = 3 ;
- ✓ Quantité d'eau = +11, tenant compte de l'eau absorbée par les mâchefers ;
- ✓ 8 formulations testées : 0%, 15%, 30%, et 50% pour les proportions massiques des mâchefers (Mch%) en substitution au sable à quantité égale, dans les formulations sans mousse et avec mousse (à 75% en proportion volumique par rapport au volume du mortier de référence).

Les quantités des composants nécessaires pour fabriquer 1m³ de béton mousse, sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 49. Compositions pour 1 m³ de béton mousse sur la base de ciment CEM I

Formulation	Densité état frais (kg/m ³)	Composition massique pour 1 m ³ de béton mousse								
		Mâchefers (kg)	Sable (kg)	Ciment (C)(kg)	Eau mâchefers (l)	Eau efficace (l)	Eau totale (E) (l)	Mousse (l)	G/C	E/C
M0% Mch0%	2270	0	1758	585,9	0,0	351,6	351,6	0	3	0,6
M0% Mch15%	2150	263,7	1494,3	585,9	29	351,6	380	0	3	0,6
M0% Mch30%	2060	527,4	1230,6	585,9	58	351,6	409,6	0	3	0,6
M0% Mch50%	2085	879	879	585,9	96,69	351,6	448,3	0	3	0,6
M75% Mch0%	2200	0	1017,8	339,2	0	203,5	203,5	45	3	0,6
M75% Mch 15%	2190	163,6	927,2	363,6	18	218,2	235,7	45	3	0,6
M75% Mch 30%	2100	361,1	842,6	401,1	39,7	240,7	280,4	45	3	0,6
M75% Mch 50%	2080	582,1	582,1	388	64	232,8	296,9	45	3	0,6

2. À L'ETAT FRAIS : AIR OCCLUS – DENSITE

2.1 Résultats et analyse des effets

La corrélation négative entre la teneur en air et la densité à l'état frais est bien vérifiée selon le graphique de Figure 114 ($R^2= 98\%$ et $P=0,000003$), corroborant le lien de causalité de la masse volumique par rapport à l'air occlus. De ce fait, l'analyse des effets portera uniquement sur l'air occlus.

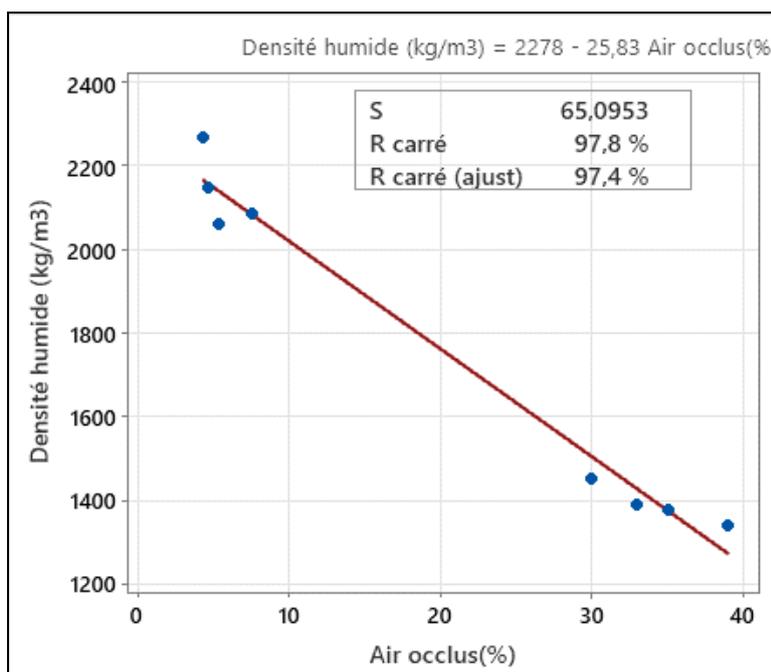


Figure 114. : Courbe de régression densité à l'état frais en fonction de l'air occlus

La Figure 115 montre que l'air occlus augmente et la densité à l'état frais diminue avec la substitution, dans les formulations sans mousse et qu'en présence de la mousse, l'air occlus diminue et la densité augmente avec la substitution, jusqu'à la limite de 30%, au-delà de laquelle, les tendances s'inversent. La Figure 116 montre que l'air occlus augmente et la densité diminue, avec l'ajout de la mousse dans les formulations avec mâchefers. Ces variations semblent être atténuées à mesure de la substitution, jusqu'à la limite de 30%.

D'après les variations de l'air occlus et la densité à l'état frais par rapport aux formulations sans mâchefers Figure 117, on remarque que l'air occlus varie plus que la densité et ces variations sont plus importantes dans les formulations sans mousse. Dans les formulations avec mousse (75%), les taux de substitution de 15, 30 et 50% ont diminué l'air occlus de 10, 23 et 15%, et ont augmenté la densité de 3, 8 et 4%.

Dans les graphes à moustache la Figure 118, présentant la dispersion des valeurs de l'air occlus, on voit clairement que l'effet des mâchefers est accentué par l'ajout de la mousse, et qu'en revanche l'effet de la mousse est atténué par les mâchefers, jusqu'à la limite de 30%. Les valeurs des écarts types présentées dans le Tableau 50, confirment bien cette observation. En effet on peut voir dans le tableau, que la mousse augmente l'écart type de l'air occlus en fonction des mâchefers de 1,4 à 3,7, c'est-à-dire que la mousse accentue fortement l'effet des mâchefers d'environ 165%. Dans le tableau, on remarque qu'avec l'augmentation des mâchefers l'écart type diminue, autrement dit les mâchefers atténuent l'effet de la mousse de 16% en moyenne, et ce jusqu'à la limite de 30% de substitution.

Dans le diagramme de Pareto Figure 119, on voit bien que l'effet de la mousse sur l'air occlus est largement plus important que celui des mâchefers, et que l'effet des mâchefers n'est pas significatif. En estimant l'intensité des 2 effets par les écarts types regroupés (tableaux), on peut déduire que la mousse a environ 7 fois plus d'effet que les mâchefers sur la variation de l'air occlus (écart type mousse = 20,5 / écart type mâchefers = 2,8).

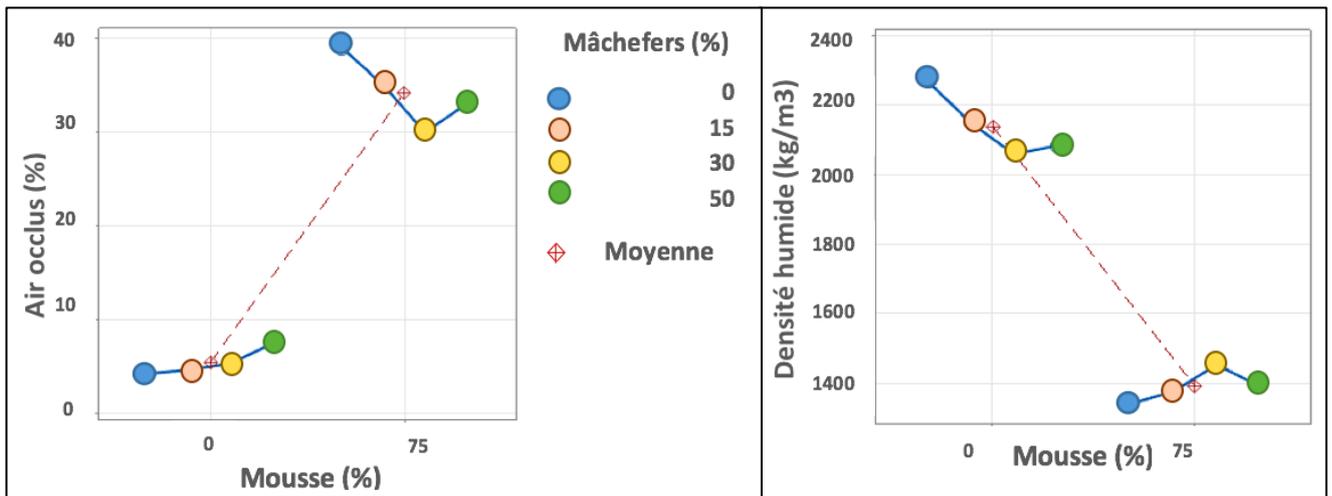


Figure 115. Variation de l'air occlus et densité à l'état frais en fonction des mâchefers

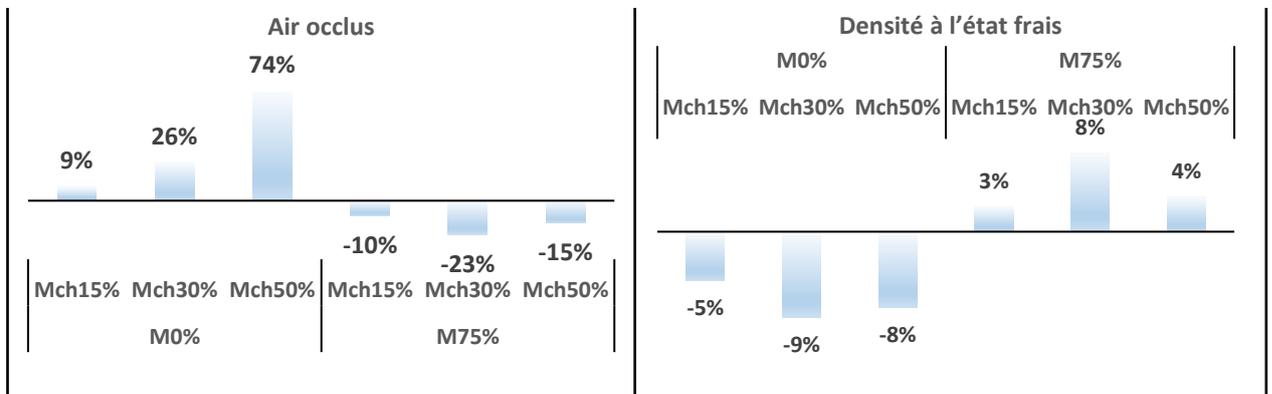


Figure 116. Variation de l'air occlus et densité à l'état frais par rapport aux formulations de référence (M0%Mch0% et M75%Mch0%)

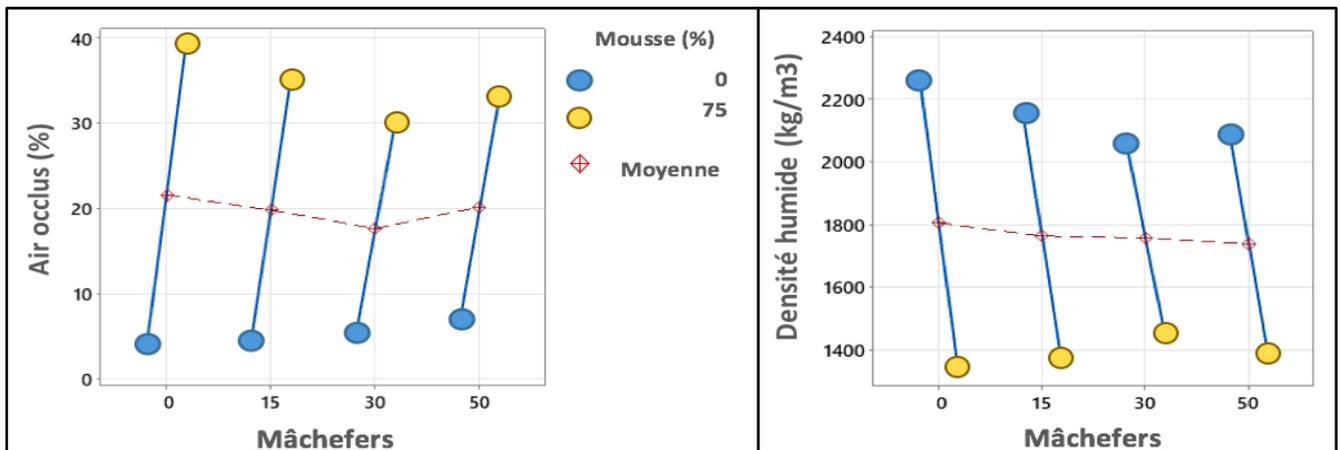
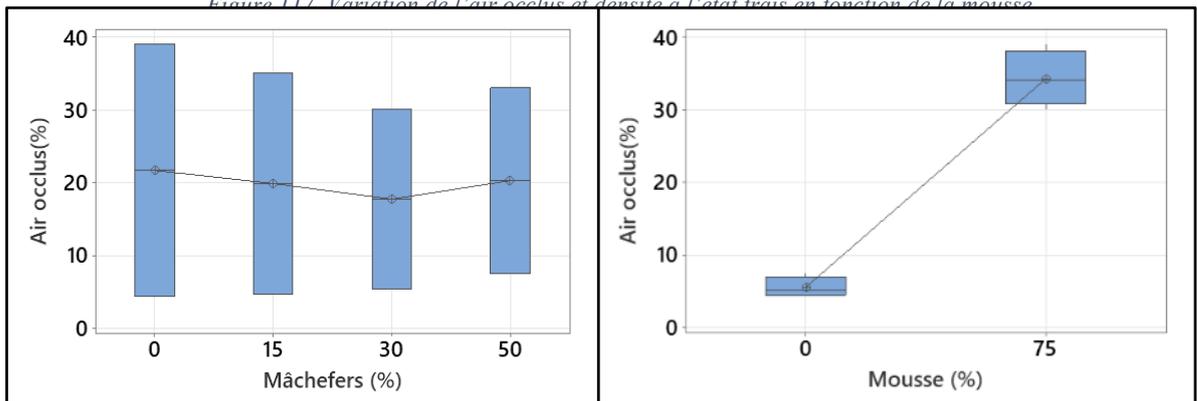


Figure 117. Variation de l'air occlus et densité à l'état frais en fonction de la mousse



(a)

(b)

Une étude de A. Bhardwaj and N. Singh[176] a montré une inflexion à 30% de substitution des mâchefers au sable dans un béton ordinaire : en deçà de 30% , l'air n'a pas varié de manière significative, une très légère baisse , et au-delà de 30% l'air occlus a fortement augmenté , alors que dans la présente étude, l'air occlus a augmenté de 9 et 26% pour 15 et 30% de substitution (à 50% l'air occlus a également fortement augmenté de 74%) ; les mâchefers qu'ils ont utilisés sont 38% plus légers (1390 kg/m³) avec 17.3% de fines. Par contre une étude de Nader Ghafoori et al. [177] a montré que l'ajout de mâchefers n'entraînait pas plus d'air dans le béton ordinaire, le seul changement opéré est la réduction du rapport E/C du fait de l'absorption d'eau importante des mâchefers ; Les mâchefers qu'ils ont utilisés sont 11% plus lourds (2470 kg/m³) , 57% moins absorbants (7%), avec 2.8% de fines en plus .

Dans les formulations avec mousse, on a noté une diminution de l'air occlus et ce malgré l'introduction de la mousse à 75%. Cela est dû à la présence de la chaux vive dans les mâchefers à dose concentrée (21%), qui d'après plusieurs études est à l'origine de la fragilisation de la mousse et de l'éclatement des bulles apportées par la mousse [155]. On pourrait également compter sur les tensioactifs de la mousse qui en permettant de réduire la tension de surface[178], rendraient difficiles la pénétration de l'aluminium contenu dans les sédiments et donc la réaction chimique avec le mélange donnant lieu à des bulles de vide supplémentaire (hydrogène) serait empêchée ou réduite. Les tensioactifs pourraient empêcher également la pénétration de la chaux vive, mais elle est présente en trop forte dose par rapport à l'aluminium pour être empêchée de pénétrer en totalité.

L'inversion des variations (augmentation de l'air occlus et diminution de la densité) au-delà d'un taux de substitution de 30%, peut être expliquée par la lenteur de la diffusion des éléments chimiques par rapport à la cinétique des réactions et également par l'augmentation de la quantité d'aluminium qui va moins échapper aux tensioactifs une très forte réaction de l'aluminium métallique générant des gaz sous forme de macropores [125].

Norlia Mohammad Ibrahim et al ont observé dans leur étude [125] citée en partie 1.1 , une très légère augmentation de la densité à l'état frais, de 1.2% en moyenne. Cette augmentation est inférieure à nos résultats (3% et 8% pour 15 et 30 % de substitution).

2.3 Conclusion

Les mesures de l'air occlus et de la densité à l'état frais ont permis de montrer que :

- ✓ Les mâchefers seuls augmentent l'air occlus et diminuent la densité à l'état frais. Pour 50% de substitution, l'air occlus augmente jusqu'à 74% et la densité diminue de 9%.
- ✓ En présence de la mousse, les mâchefers diminuent l'air occlus et augmentent la densité à l'état frais., jusqu'à 30% de substitution. Les taux de substitution de 15, 30 et 50% ont diminué l'air occlus de 10, 23 et 15% et ont augmenté la densité à l'état frais de seulement 3,8 et 4%.
- ✓ La mousse augmente l'air occlus et diminue la densité dans les formulations avec mâchefers.
- ✓ L'effet des mâchefers est accentué par l'ajout de la mousse, et inversement l'effet de la mousse est atténué par les mâchefers, jusqu'à la limite de 30%.

- ✓ L'effet des mâchefers n'est pas significatif par rapport à la mousse, et il est 7 fois moindre.

3. À L'ÉTAT FRAIS : OUVRABILITE

3.1 Résultats et analyse des effets

La Figure 120 montre que l'étalement diminue très légèrement avec la substitution, dans les formulations avec et sans mousse. Cette diminution des mâchefers ne semble pas être influencée par l'ajout de la mousse. Dans la Figure 121, l'étalement augmente avec l'ajout de la mousse dans les formulations avec mâchefers, de façon quasi uniforme sans être affecté par la substitution.

Sur le graphe de la Figure 122, présentant les variations de l'étalement par rapport aux formulations sans mâchefers, on observe que, dans les formulations avec et sans mousse, la diminution de l'étalement sous l'effet de la substitution, n'est pas significative. On note par exemple qu'il faut 50% de substitution pour obtenir une diminution de l'étalement d'à peine -3%, dans les formulations avec mousse et -6% pour les formulations sans mousse.

Dans les graphes à moustache la Figure 123, présentant la dispersion des valeurs de l'étalement, on remarque bien que la mousse n'a quasi pas d'influence sur l'effet des mâchefers et inversement. Les valeurs des écarts types présentées dans les tableaux confirment bien que la mousse n'a pas d'impact dans l'effet des mâchefers sur l'étalement. On observe une augmentation d'à peine 11%. Idem pour les mâchefers, ils n'impactent pas l'effet de la mousse (+1% en moyenne) et ce jusqu'à 30% de substitution.

Dans le diagramme de Pareto Figure 124, on voit bien que l'effet de la mousse sur l'étalement est largement plus important que celui des mâchefers. En estimant l'intensité des deux effets par les écarts types regroupés Tableau 51, on peut déduire que la mousse a environ 20 fois plus d'effet que les mâchefers sur la variation de l'étalement (écart type mousse = 5,5 / écart type mâchefers = 0,25).

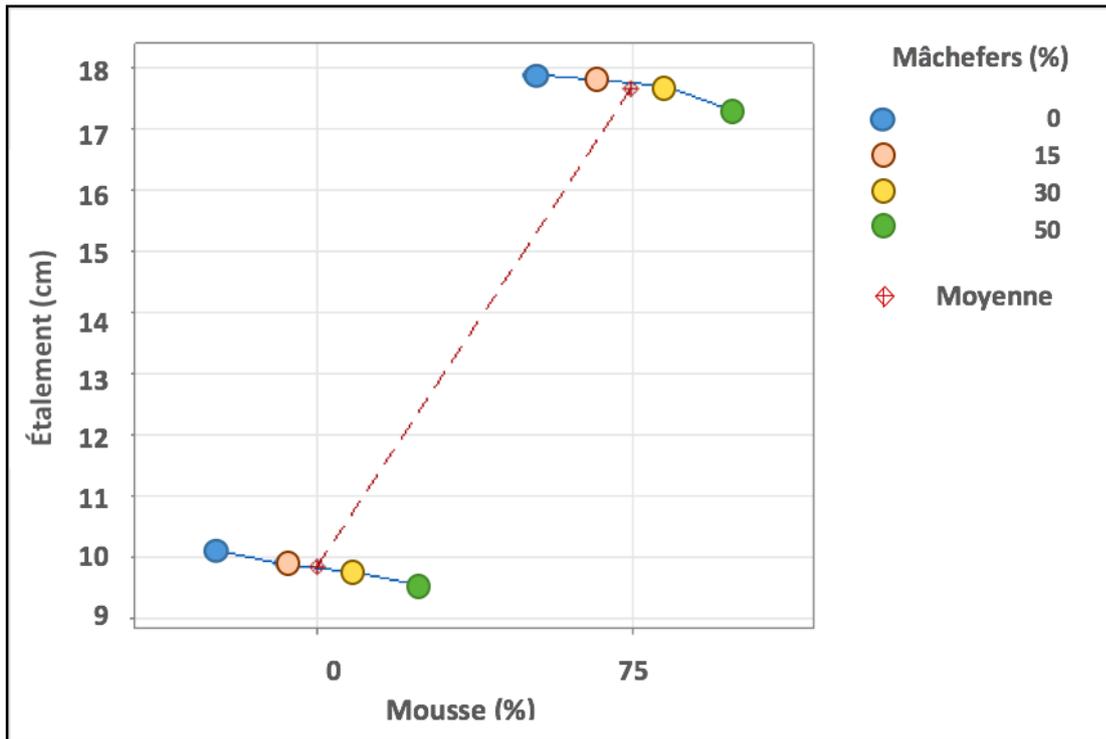


Figure 120 : Variation étalement en fonction de la mousse

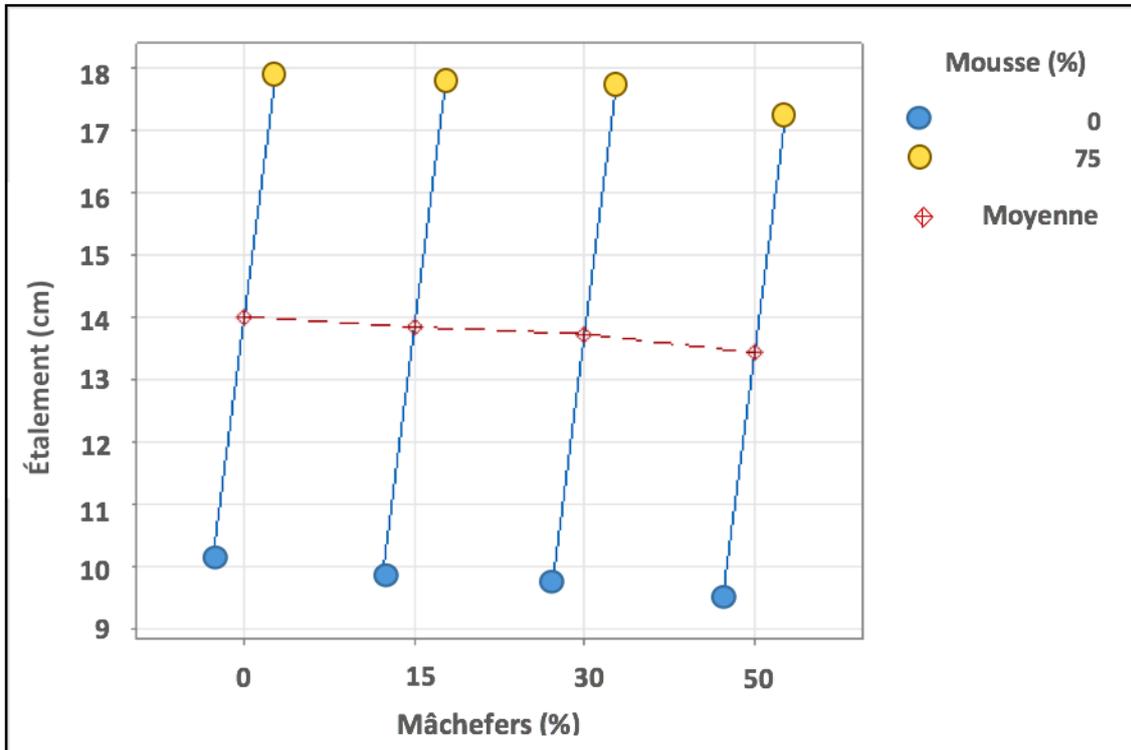


Figure 121. Variation de l'étalement en fonction des mâchefers

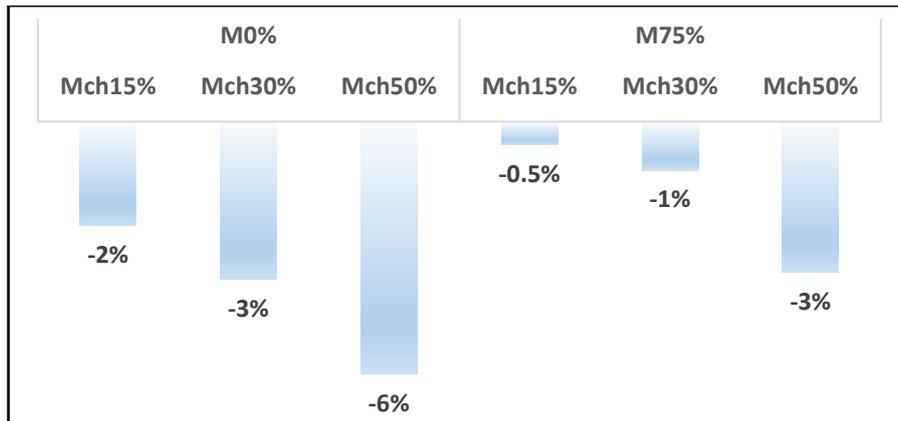
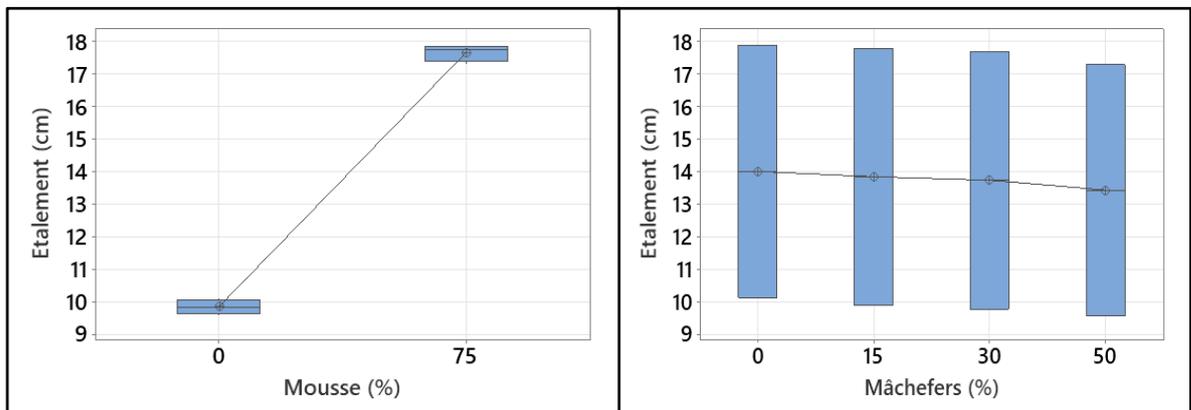


Figure 122. Variation de l'étalement par rapport aux formulations sans mâchefers



(a)

(b)

Figure 123. (a) Distribution étalement en fonction mâchefers (b) Distribution étalement en fonction mousse

Tableau 51. (a) écarts type étalement (effet es mâchefers) (b) écarts type étalement (effet de la mousse)

(a)

Mousse (%)	N	EcTyp
0	4	0,234
75	4	0,260

Écart type regroupé = **0,247378**

(b)

Mâchefers(%)	N	EcTyp
0	2	5,49
15	2	5,59
30	2	5,61
50	2	5,47

Écart type regroupé = **5,54226**

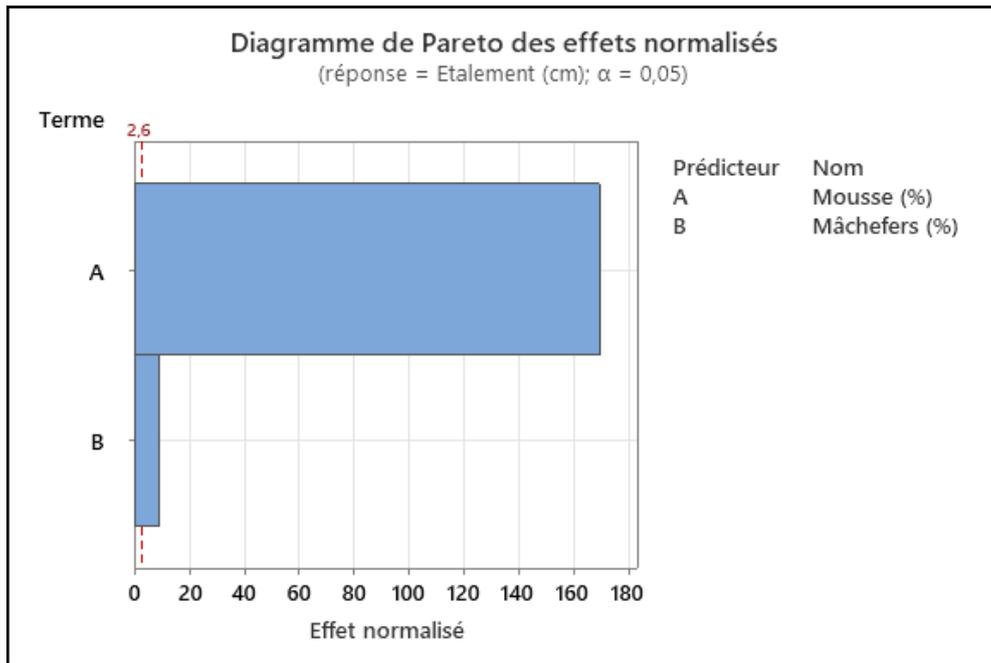


Figure 124. Diagramme de Pareto des effets des mâchefers et mousse sur l'étalement

Les résultats de l'étalement dans le temps, présentés sur les graphes la Figure 125 montrent que, dans les formulations avec et sans mousse, l'étalement est ralenti dans le temps à mesure de la substitution. On peut voir qu'en présence de la mousse, l'étalement est plus faible mais pas d'avantage ralenti.

On note cependant un retard de prise engendré par la présence de la mousse et des mâchefers, comme on peut le noter sur la Figure 126 En effet, on note que les débuts et fins de prise sont de plus en plus retardés, à mesure de l'ajout des mâchefers et de la mousse et que la mousse atténue l'effet des mâchefers et inversement. Les deux effets sur le retardement sont quasiment équivalents.

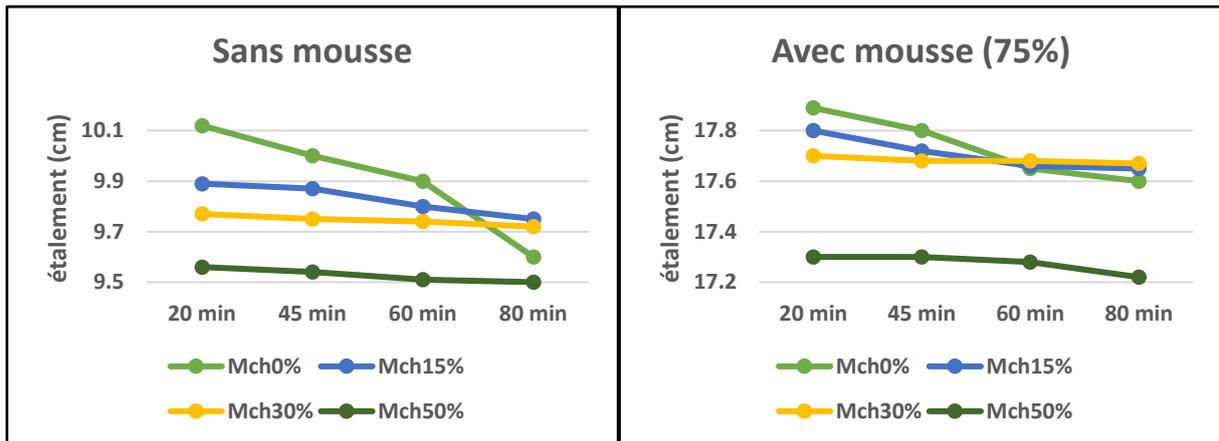


Figure 125. Variations temps de prise en fonction de la mousse et mâchefers

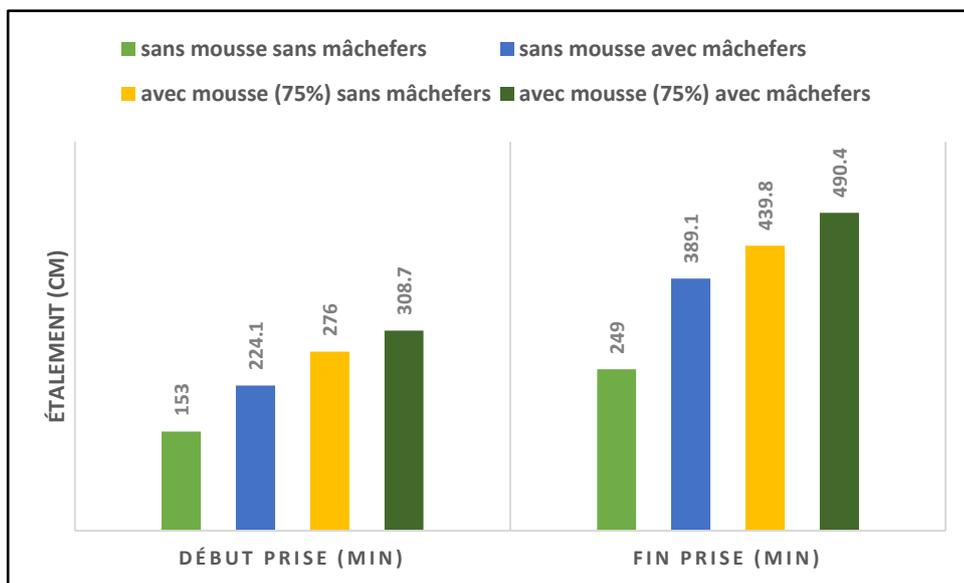


Figure 126. Variations temps de prise en fonction de la mousse et de mâchefers

3.2 Interprétation et discussion

Les variations de l'étalement sous l'effet des mâchefers, sont le résultat de l'influence de l'air occlus comme on peut le voir sur la courbe de régression, où le coefficient R^2 de 97% correspond à une corrélation très forte Figure 127 entre ces 2 éléments. En effet, une augmentation de l'air occlus va réduire les frottements inter-granulaires et favoriser ainsi l'écoulement et inversement.

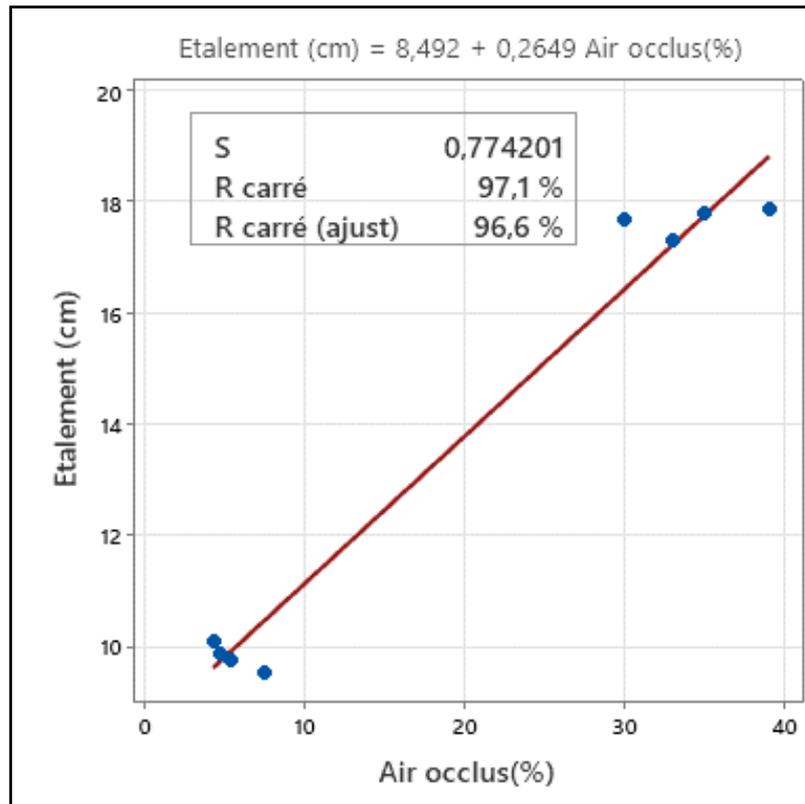


Figure 127. Courbe de régression étalement en fonction de l'air occlus

On peut donc expliquer 97% des variations de l'ouvrabilité par les variations de l'air occlus. D'autres facteurs explicatifs, concernant les formulations sans mousse, pouvant être la forme irrégulière la surface rugueuse des mâchefers, leur capacité d'absorption d'eau importante. Une étude menée par Tao Zhang[179] sur la substitution des mâchefers au sable dans un béton ordinaire a bien identifié trois raisons principales à la réduction de la maniabilité : une absorption d'eau élevée, une teneur en air élevée et des particules plus fines. En général, un certain nombre de chercheurs ont rapporté que l'affaissement est diminué lors de l'utilisation de mâchefers au lieu d'agrégat naturel [180] [181] en indiquant l'influence des caractéristiques physiques du mâchefer telles que sa forme irrégulière et sa texture de surface rugueuse. D'autre études ont indiqué que l'ouvrabilité du béton frais était légèrement diminuée, lorsque les mâchefers grossiers remplaçaient à 100% le granulats grossier naturel.

Dans les formulations avec mousse, il a été observé une diminution de l'étalement mais très légère de 0.5, 1 et 3% pour 15, 30 et 50 % de substitution. Malgré la présence de tous ces facteurs, la baisse des propriétés rhéologiques est à peine perceptible dans les formulations avec mousse. La mousse semble atténuer ou neutraliser une partie de l'effet de ces facteurs. L'étude similaire précitée, de Norlia Mohammad Ibrahim et al [125], a également observé une diminution de l'ouvrabilité à mesure de la substitution, de 3.5% en moyenne pour 5%, 10%, 15% et 20% de substitution. Cette augmentation est assez comparable à notre étude.

Il a en outre été constaté un résultat inhabituel dans notre étude, concernant le fait que l'ouvrabilité ne suit pas les courbes de l'air occlus et la densité au-delà de 30% de substitution, l'ouvrabilité continue à diminuer alors que l'air occlus augmente et la densité diminue.

Les variations de l'étalement dans le temps observé, résultent de l'effet retardateur des mâchefers sur la prise, qui peut être lié à la présence de quelques métaux et minéraux dans les mâchefers, comme l'aluminium, le zinc et le plomb.

En effet, l'aluminium, présent en proportion de 4.4% réagit avec le ciment (à base de calcaire et d'argile) en libérant de l'hydrogène, sous forme de bulles de gaz, qui restent piégées dans la structure interne, et accroissent ainsi la porosité, ce qui a pour conséquence de retarder la prise [Bertolini et Carsana [182].

La présence du zinc (0.3%), est également un élément retardateur de la prise, comme mis en évidence par Agnès Zambon dans son étude, mentionnée dans la Partie 1-1 et par Rémond et Pimienta [183] qui ont montré la caractéristique du zinc ralentir les réactions d'hydratation et perturber ainsi les temps de prise.

On peut également imputer l'effet retardateur des mâchefers à leur forme angulaire qui crée de la porosité dans la matrice.

Une étude [184] a montré que l'ajout de mâchefers, dans un mortier ordinaire, augmente le temps de prise initial et final, par rapport au mélange de référence, du fait de la présence d'une plus grande quantité d'eau dans les mélanges avec mâchefers qui maintient une plus grande maniabilité..

Une autre étude sur le béton ordinaire de Nader Ghafoori et al. [177] a montré que le temps moyen de prise initiale des mélanges de mâchefers était d'environ 6,3 % plus élevé que celui des échantillons témoins

Ce qu'il doit être retenu en priorité c'est qu'en se référant à la littérature, l'effet retardateur des mâchefers sur la prise et l'hydratation du ciment, peut être préjudiciable pour la compacité du béton et la stabilité de la mousse (éclatement et déformation de bulles), et peut entraîner ainsi une perte en résistance, en isolation thermique et en légèreté.

3.3 Conclusion

Pour résumer, les essais d'ouvrabilité effectués, permettent de montrer que :

- ✓ Les mâchefers seuls diminuent légèrement l'étalement (de 2, 3 et 6% pour substitutions de 15,30 et 50%) ;
- ✓ En présence de la mousse, les mâchefers continuent à diminuer l'étalement, de façon plus légère (jusqu'à 3% pour 50% de substitution) ;
- ✓ La mousse augmente l'étalement dans les formulations avec mâchefers ;
- ✓ L'effet des mâchefers est accentué par l'ajout de la mousse, et inversement ;
- ✓ L'effet des mâchefers sur l'ouvrabilité reste significatif par rapport à la mousse, quoique 20 fois moindre ;
- ✓ Les mâchefers retardent l'écoulement dans le temps à cause de leur effet retardateur sur la prise.

L'analyse de l'ouvrabilité réalisée, indique donc un effet légèrement défavorable des mâchefers sur l'ouvrabilité. Elle diminue à peine de 1.5% en moyenne, pour une teneur en mousse de 75%.

4. À L'ÉTAT DURCI : STRUCTURE PORALE

Les résultats comparatifs issus des différents essais de la mesure de la porosité, sont présentés sur le graphe suivant :

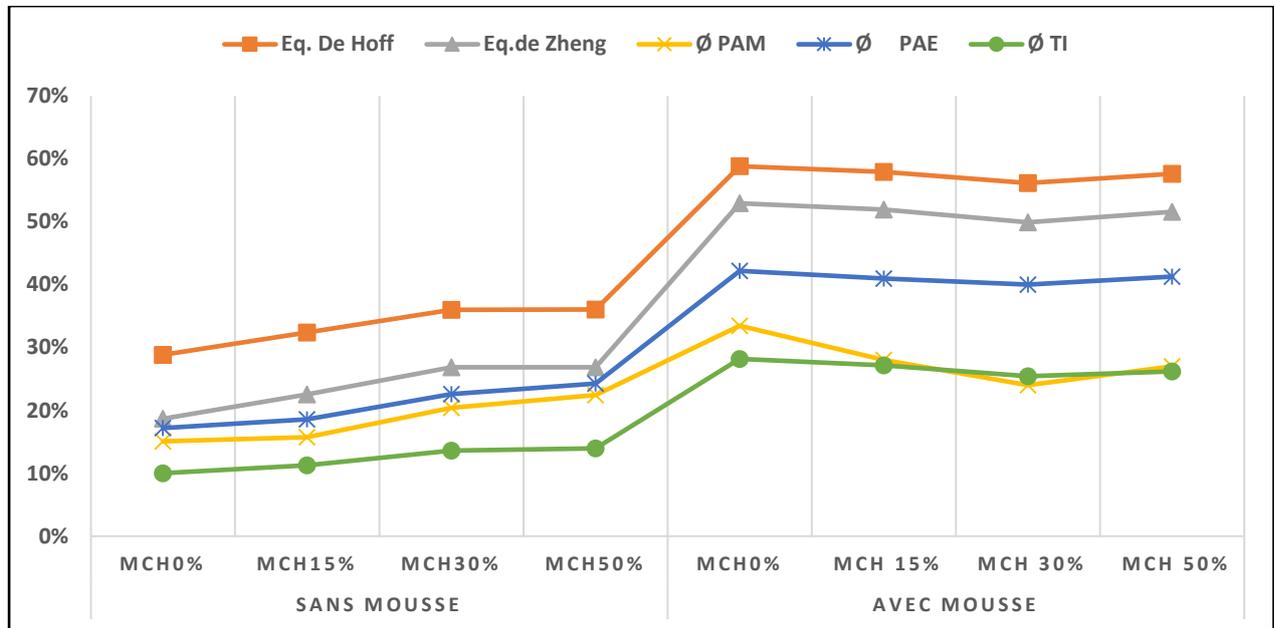


Figure 128. Courbes comparatives des techniques de mesure de la porosité

Comme pour les sédiments, nous notons que les valeurs des deux techniques expérimentales porosité par intrusion du mercure (PAM) et porosité par traitement d'images (TI : par tomographie X.) sont inférieures à celles de la technique de la porosité accessible à l'eau (PAE). Ces résultats sont attendus vu les limites de PAM et TI.

Les équations théoriques Zheng et Hoff ont révélé des valeurs supérieures à l'expérimentation

Les valeurs de la porosité qui seront donc retenues, sont celles de la porosité accessible à l'eau (PAE) qui sont les plus proches de la réalité.

4.1 Résultats et analyse des effets

4.1.1 Porosité

La Figure 129 montre que la porosité (valeurs issues de la technique PAE) augmente avec la substitution, dans les formulations sans mousse et qu'en présence de la mousse, elle diminue légèrement avec la substitution, jusqu'à la limite de 30%. Au-delà de cette limite, la porosité commence à augmenter. La Figure 130 montre que la porosité augmente avec l'ajout de la mousse dans les formulations avec mâchefers. Cette augmentation semble être atténuée à mesure de la substitution, jusqu'à la limite de 30%.

D'après les variations de la porosité, calculées par rapport aux formulations sans sédiments Figure 131, on remarque une augmentation très importante de la porosité dans la formulation

sans mousse (jusqu'à +41% pour MCh50%), en présence de la mousse, la diminution de la porosité reste faible (maximum de -5% pour Mch30%) et est de plus en plus atténuée.

Dans les graphes à moustache la Figure 132 présentant la dispersion des valeurs de la porosité, on voit clairement que l'effet des mâchefers est atténué par l'ajout de la mousse, et qu'inversement l'effet de la mousse est atténué par les mâchefers. En effet, on note bien d'après le Tableau 52, que les écarts type diminuent de -73% c'est-à-dire que la mousse atténue l'effet des mâchefers d'environ 73% ; et que les mâchefers atténuent l'effet de la mousse de -12% en moyenne.

Dans le diagramme de Pareto Figure 133, on voit bien que l'effet de la mousse la porosité est largement plus important que celui des mâchefers et que l'effet des mâchefers n'est pas significatif. En estimant l'intensité des 2 effets par les écarts types regroupés Tableau 52, on peut déduire que la mousse a environ 6 fois plus d'effet que les mâchefers sur la variation de la porosité (écart type mousse = 14,6 / écart type mâchefers = 2,4).

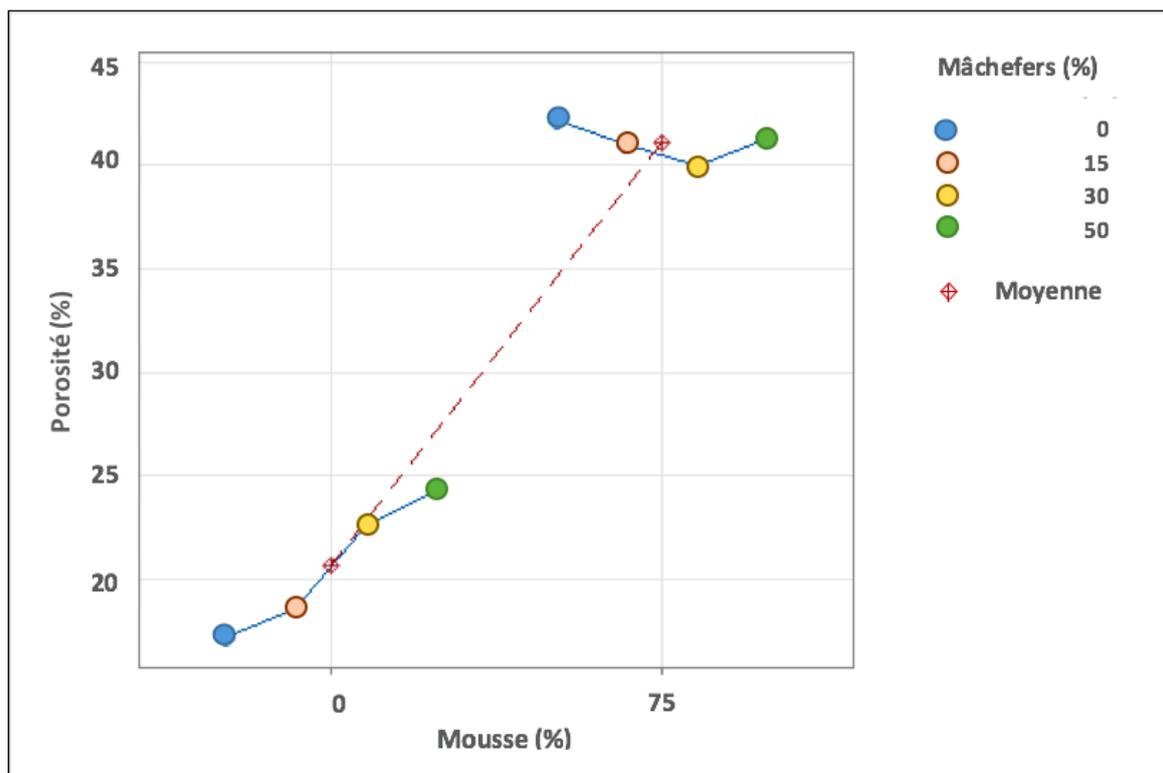


Figure 129. Variation de la porosité en fonction des mâchefers

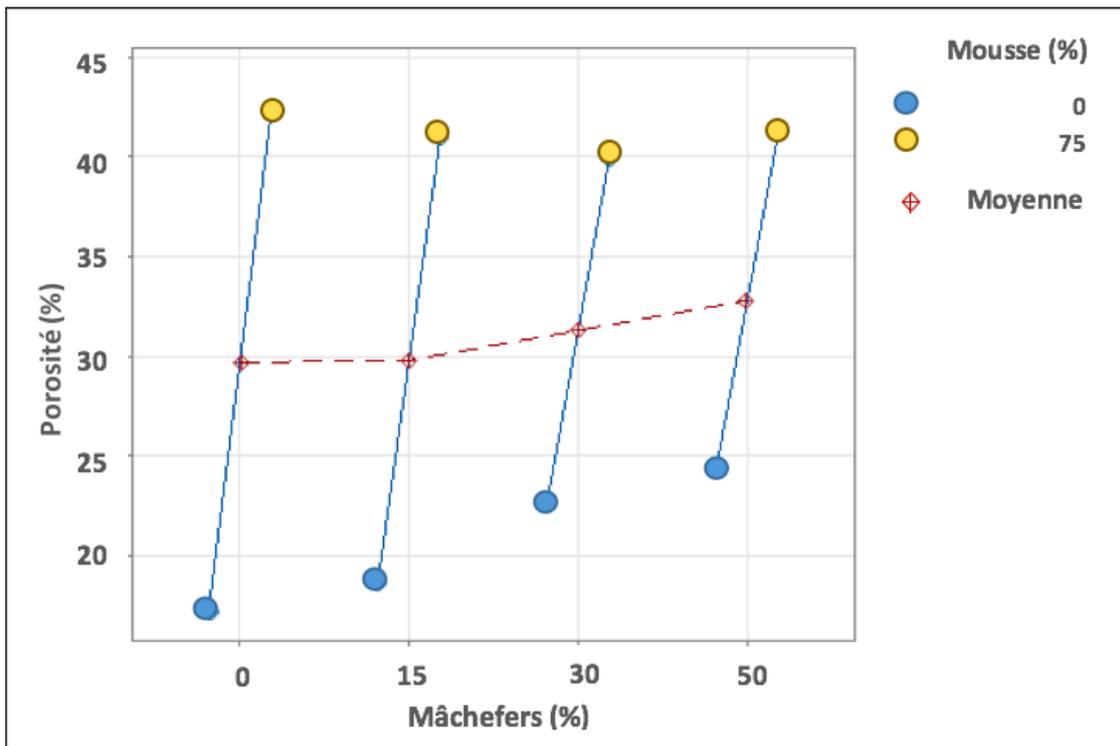


Figure 130. Variation de la porosité en fonction de la mousse

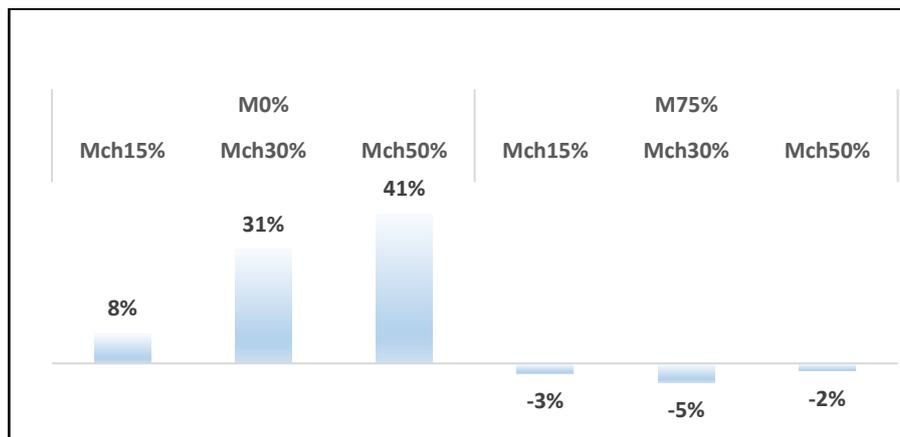


Figure 131. Variation de la porosité par rapport aux formulations sans mâchefers

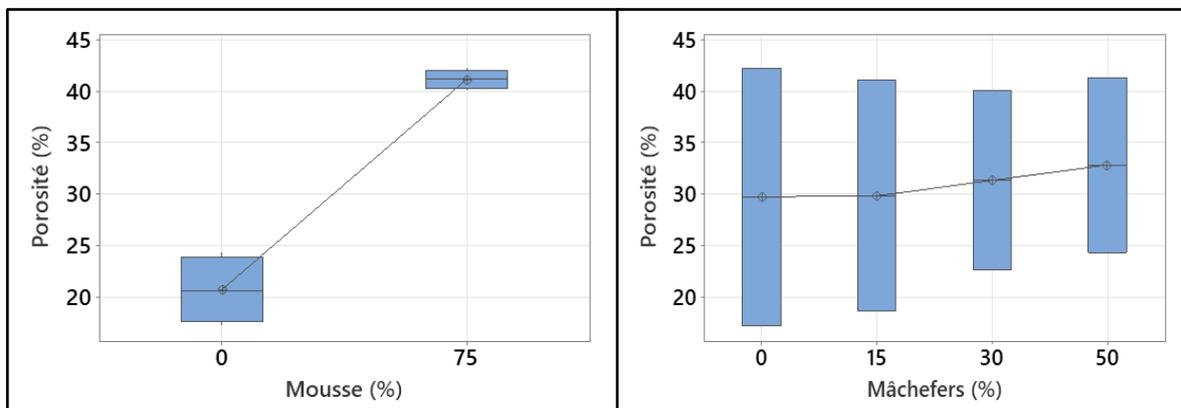


Figure 132. (a) Distribution porosité en fonction mâchefers (b) Distribution porosité en fonction mousse

de Mch30%, les 2 paramètres suivent la même tendance malgré la diminution du diamètre dans les formulations Mch30% et 50%.

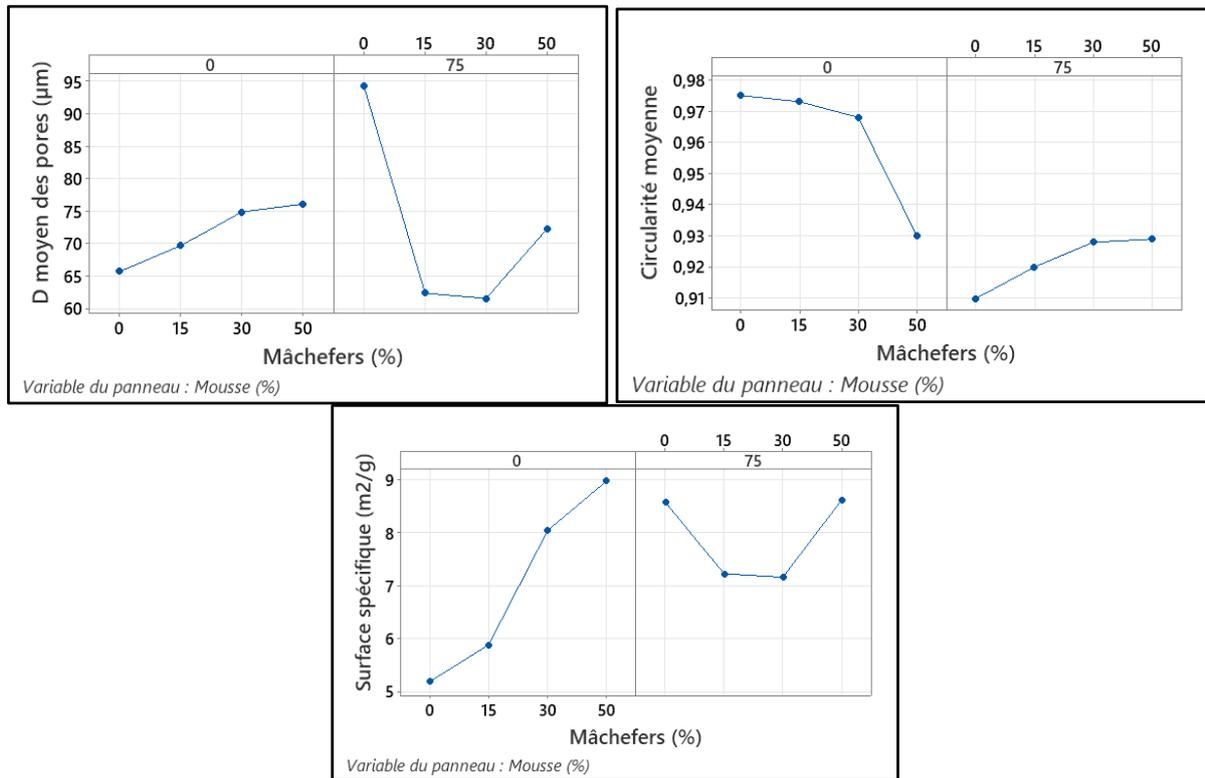


Figure 134. Variation diamètre et circularité des pores et surface spécifique en fonction des mâchefers

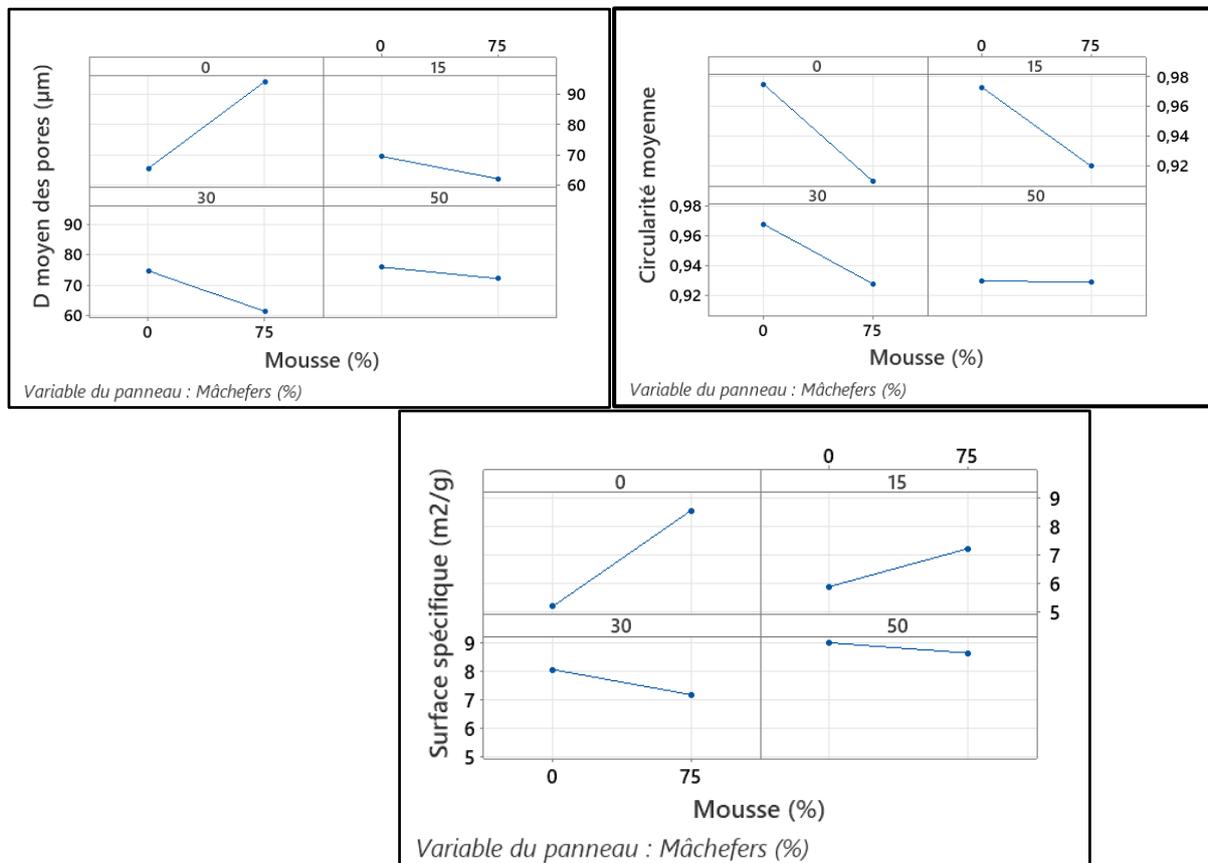


Figure 135. Variation diamètre et circularité des pores et surface spécifique en fonction de la mousse

Les courbes de distribution de la taille des pores de la Figure 136 et

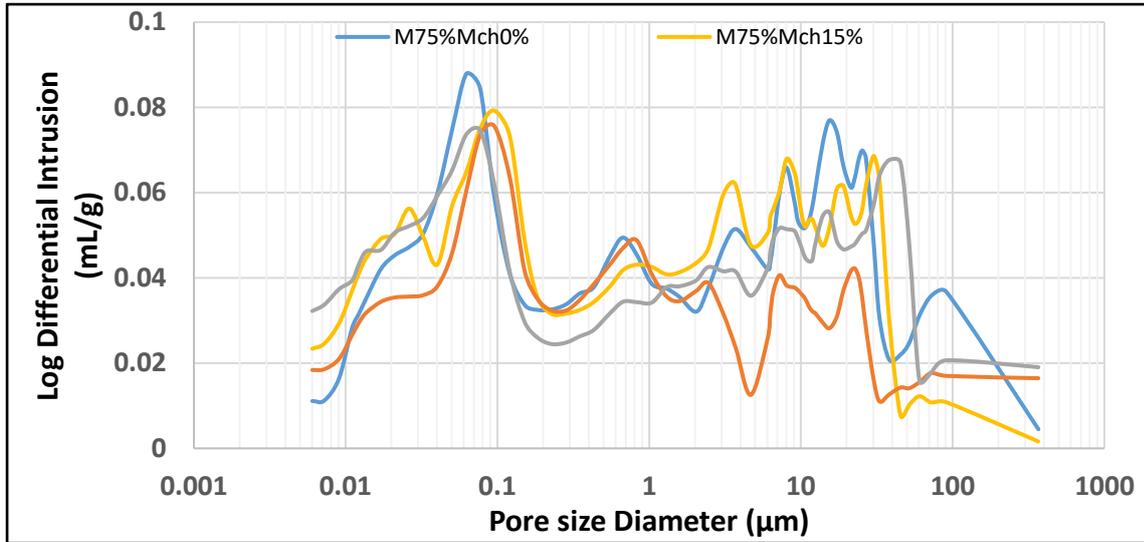


Figure 137, issus des résultats de la porosité au mercure, ne tenant compte que les pores <11 µm, montrent que, la substitution augmente globalement les micropores dans les formulations sans mousse et les diminue dans les formulations avec mousse.

D'après l'histogramme de la distribution de la taille des pores Figure 138, issus de la tomographie, ne tenant en compte que les pores >9 µm, on voit clairement que dans les formulations sans mousse, les principaux pics se déplacent vers de plus grandes valeurs avec la substitution, autrement dit que les macropores augmentent. Dans les formulations avec mousse, la distribution garde la même forme mais la fréquence des diamètres diminue, autrement dit que les macropores diminuent avec la substitution.

L'histogramme de la distribution de circularité Figure 139, montre que les pores générés par la substitution des mâchefers dans les formulations sans mousse, sont de forme moins régulière que celle du mortier témoin. Il y a donc déformation des pores avec la substitution. Dans les formulations avec mousse, les principaux pics se concentrent vers la valeur 1 à mesure de la substitution, la substitution corrige donc la circularité des pores.

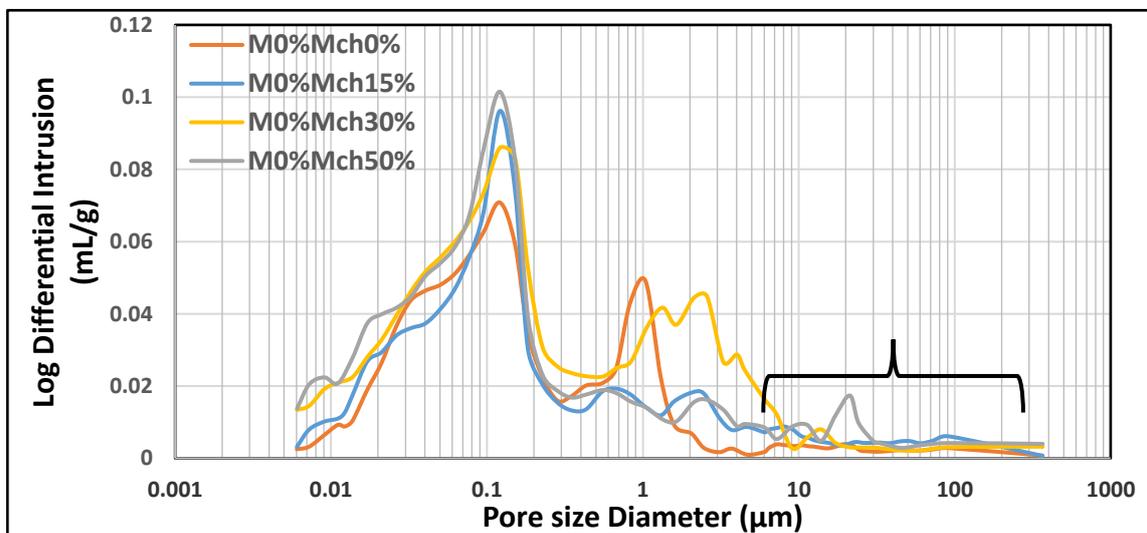


Figure 136. Courbe distribution des pores en fonction de la substitution - formulations sans mousse (PAM)

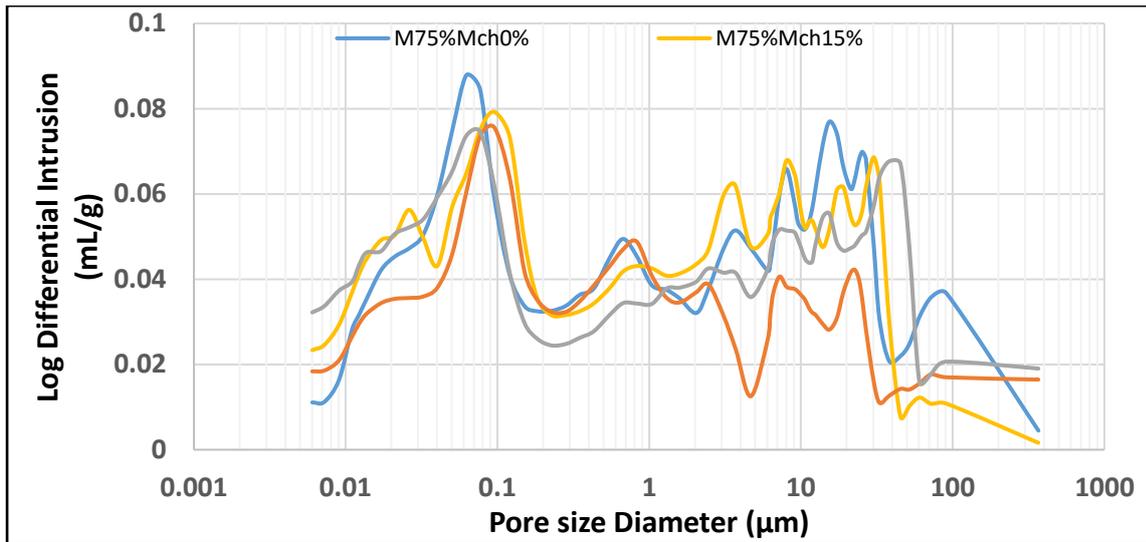


Figure 137. Courbes distribution de la taille des pores en fonction de la substitution -formulations avec mousse (PAM)

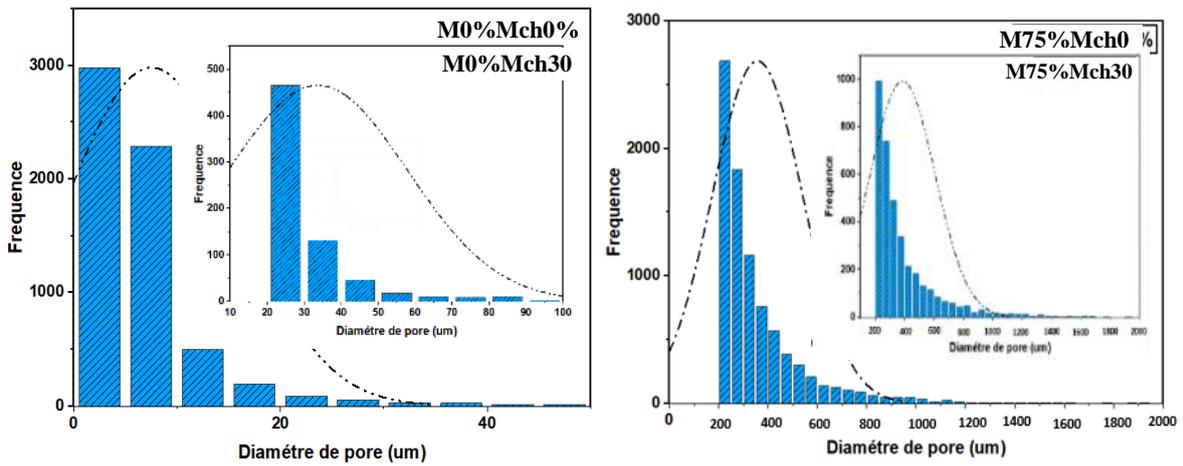


Figure 138. Histogrammes distribution de la taille des pores en fonction des mâchefer

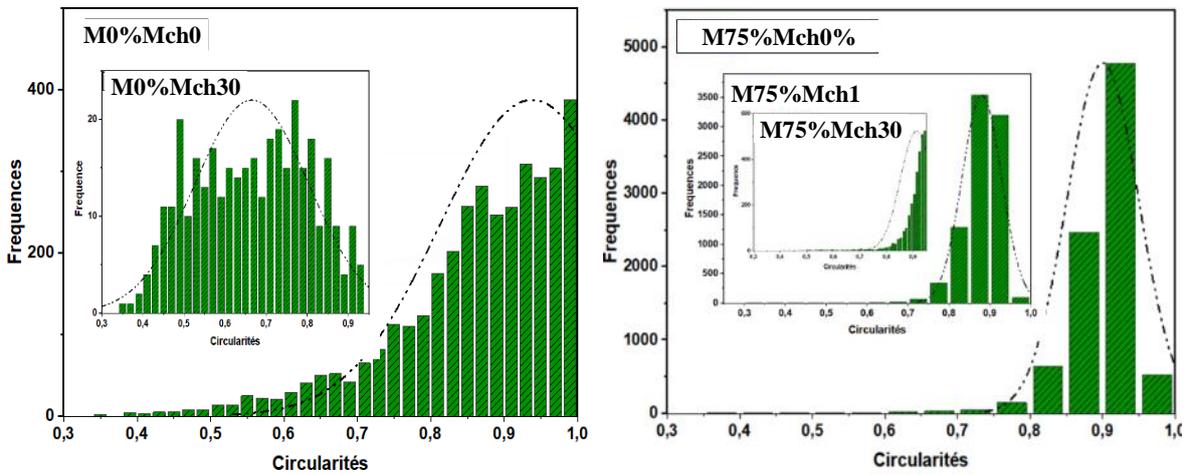


Figure 139. Histogrammes distribution de la circularité des pores en fonction des sédiments

4.1.3 Observation qualitative de la porosité (Tomographie X)

L'observation de la structure porale a été effectuée à la suite du traitement des images obtenues par tomographie X pour toutes les formulations, ne tenant en compte que les pores que les pores $>9\mu\text{m}$. Il apparaît clairement que la substitution des mâchefers dans les bétons sans mousse, génère plus de macropores, comme observé dans les autres techniques de la mesure de la porosité, et une distribution plus étendue de taille de pores.

Les images 3D des formulations avec mousse, ne permettent pas une bonne observation de la microstructure, à cause de la difficulté du logiciel à différencier entre la matrice cimentaire, la matière, et le vide.

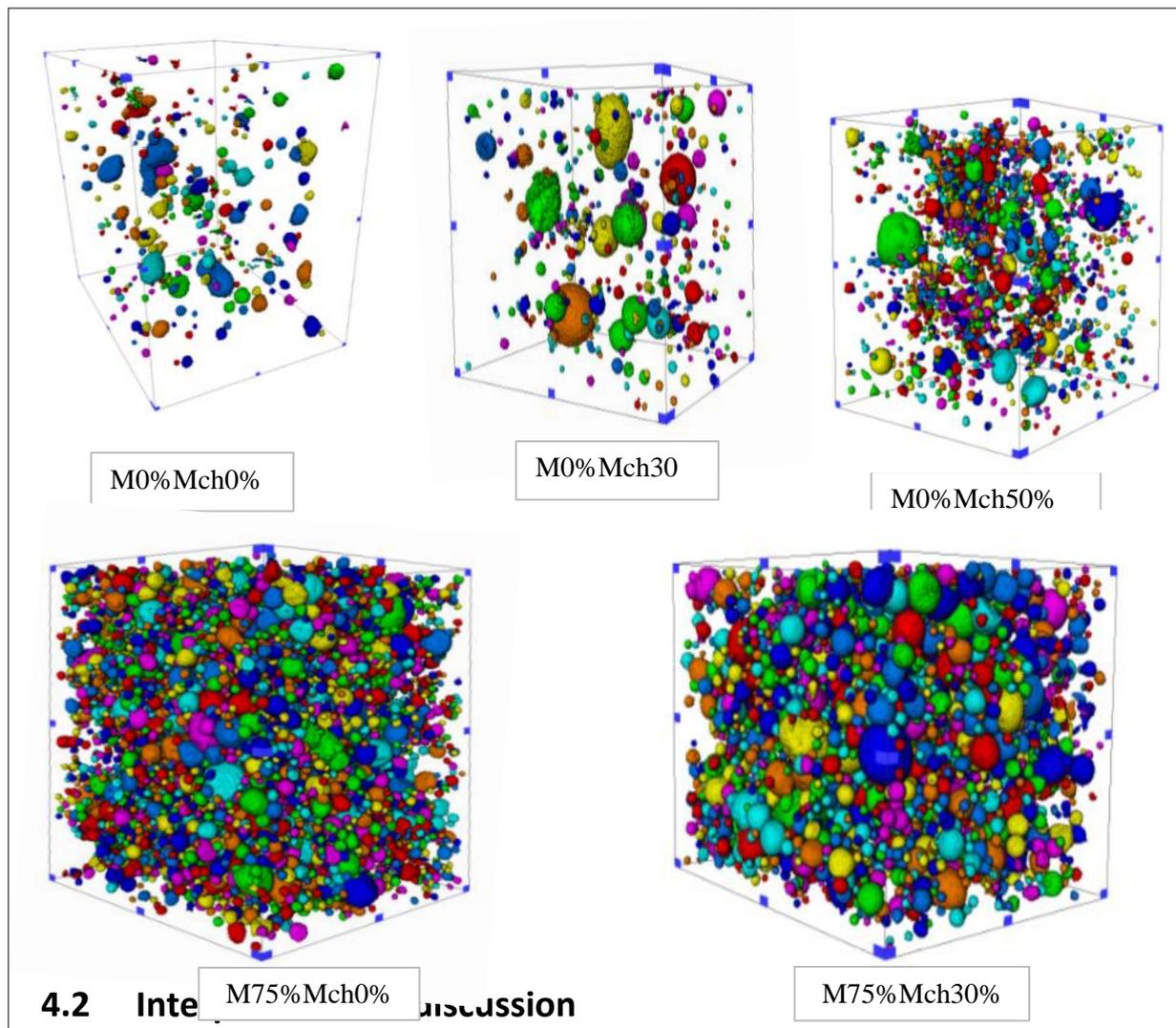


Figure 140. Représentation tomographique en 3 D de réseau poreux

4.2 Intégration et discussion

tendraient à augmenter les paramètres de la porosité dans les formulations sans mousse :

- ✓ la réaction pouzzolanique de l'aluminium contenu dans les mâchefers, générant de l'hydrogène gazeux, sous forme de vides internes de taille mésoporeuse (d'où l'augmentation des macropores) [185], contribuant ainsi à la forte porosité (jusqu'à 41% pour 50% de substitution. Des observations de la microstructure effectuées par Müller et Rübner [175] ont montré des pores allongés avec des rapports longueur/largeur élevés suivant le contours des grains des mâchefers, ces vides ne se trouvent pas dans le mortier témoin, ils sont clairement liés à la réaction d'aluminium produisant une phase gazeuse à l'état frais du béton ;
- ✓ La réaction du chlorure contenu dans les mâchefers avec l'hydrate du ciment ;
- ✓ Porosité intergranulaire des mâchefers plus importants que le sable.

Pavlik et al. [186] ont substitué les mâchefers au sable dans un béton ordinaire et ont bien observé une augmentation de la porosité. Cette augmentation, de 20,9 % et 27,9 % pour 10 et 40% de substitution, est plus importante que dans notre étude pour des petits taux de substitution et moins importante pour les taux plus élevés. Il y a une différence également relative au macropores qui n'ont pas varié alors que dans notre étude ils ont augmenté. Cela peut provenir du fait qu'ils ont utilisé des mâchefers de plus grande taille (8mm), dans la mesure où Müller

et Rübner [175] ont observé que la taille des mâchefers remplaçant complètement les granulats, augmentait la porosité des mélanges de béton : de 17% pour des mâchefers de 2-8 mm de diamètre, et de 22.5 % pour 2- 32 mm de diamètre.

Une autre étude de Tang et al. [187] ont observé également une augmentation de la porosité mais beaucoup moins élevée que dans nos résultats. Ils ont remarqué une augmentation de la porosité de 5% pour 30% de substitution des mâchefers alors que notre augmentation était de 31% pour 30% de substitution. Les mâchefers utilisés sont de même diamètre que notre étude (0-2mm) avec 1.29 % de finesse.

En présence de la mousse, la substitution des mâchefers, induit des comportements inverses : la diminution des paramètres de la porosité. Cela est dû à la présence de la chaux vive dans les mâchefers à dose concentrée (21%), qui réagirait avec les tensions de surface des bulles d'air de la mousse. Plusieurs études ont montré l'effet de la chaux vive sur la fragilisation de la mousse et de l'éclatement des bulles apportées par la mousse [5].

Quant au cas particulier de 50% de mâchefers, où la porosité augmente, on peut l'expliquer par le fait que la mousse ralentit la diffusion des ions dans la matrice cimentaire avant la prise et donc empêche les polluants des mâchefers de circuler et de déstabiliser la mousse. Ou on peut supposer une très forte réaction de l'aluminium métallique générant des gaz sous forme de macropores.

4.3 Conclusion

Les comportements les plus marquants que l'on peut retenir de l'évaluation de la structure porale sont que :

- ✓ Les mâchefers seuls, augmentent la porosité de façon globale (augmentation des micropores et macropores, déformation des pores.) ;
- ✓ En présence de la mousse, les mâchefers diminuent la porosité de façon globale (diminution des micropores et macropores, restauration des pores.), jusqu'à la limite de 30% au-delà de laquelle les tendances sont inversées ;
- ✓ La mousse augmente la porosité dans les formulations avec mâchefers ;
- ✓ L'effet des mâchefers est atténué par l'ajout de la mousse, et inversement, l'effet de la mousse est atténué par la substitution, jusqu'à la limite de 30% ;
- ✓ L'effet de la fibre sur la porosité n'est pas significatif par rapport à la mousse, et il est 6 fois moindre.

On peut considérer que les mâchefers ont un effet favorable sur les bétons mousse, du fait que, en dessous d'un certain seuil de porosité (de 62% si la teneur en mousse est de 75%), la porosité diminue à peine de 3% en moyenne. Au-delà de ce seuil la porosité augmente.

5. À L'ÉTAT DURCI : DENSITE SECHE

5.1 Résultats et analyse des effets

La Figure 141 montre que la densité diminue avec la substitution, dans les formulations sans mousse et qu'en présence de la mousse, elle augmente légèrement avec la substitution, jusqu'à la limite de 30% de substitution. Au-delà de cette limite la densité commence à diminuer. La Figure 142 montre que la densité diminue avec l'ajout de la mousse, dans les formulations avec mâchefers. Cette diminution semble être de plus en plus atténuée à mesure de la substitution. D'après les variations de la masse volumique calculées par rapport aux formulations sans mâchefers Figure 143, la hausse de la masse volumique sous l'effet des mâchefers ne dépasse pas 6% dans les formulation avec mousse(75%).

Dans les graphes à moustache la Figure 144, présentant la dispersion des valeurs de la densité, on voit clairement que l'effet des mâchefers est atténué par l'ajout de la mousse, et qu'inversement l'effet de la mousse est atténué par la substitution, jusqu'à la limite de 30%. En effet, on note bien d'après le Tableau 53, que les écarts type diminuent de -68% c'est-à-dire que la mousse atténue l'effet des mâchefers d'environ -68% ; et que les mâchefers atténuent l'effet de la mousse de -18% en moyenne, jusqu'à la limite de 30% de substitution.

Dans le diagramme de Pareto Figure 145, on voit bien que l'effet de la mousse sur la densité est largement plus important que celui des mâchefers, et que l'effet des mâchefers n'est pas significatif. En estimant l'intensité des 2 effets par les écarts types regroupés Tableau 53, on peut déduire que la mousse a environ 7 fois plus d'effet que les mâchefers sur la variation de la densité (écart type mousse = 539 / écart type mâchefers = 79).

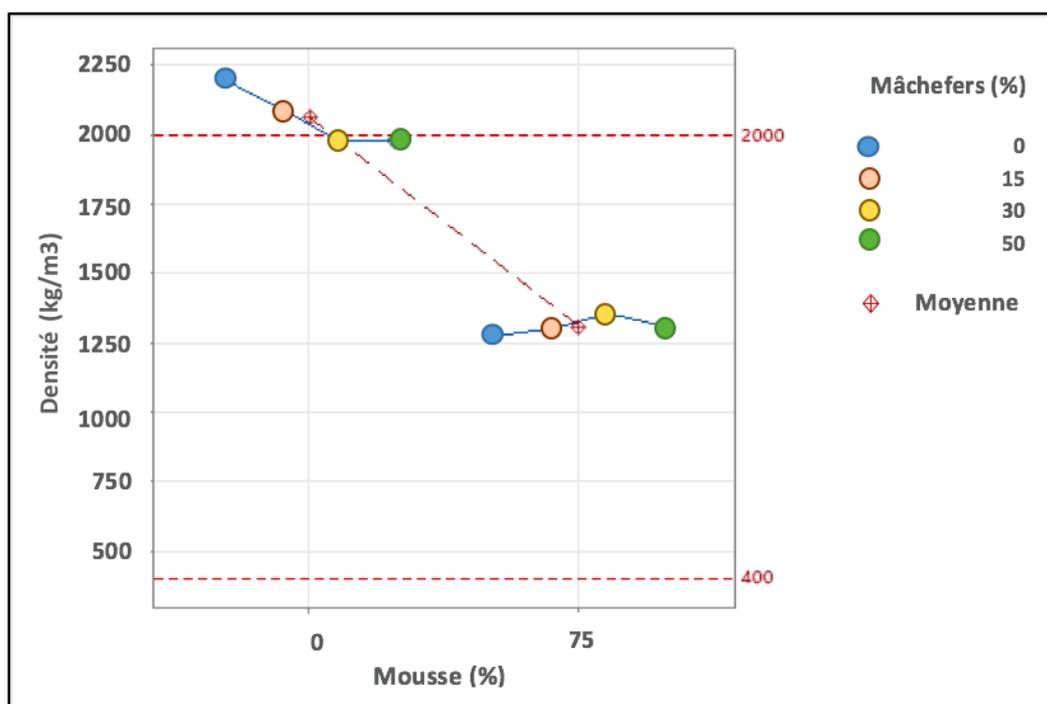


Figure 141. Variation de la densité en fonction des mâchefers

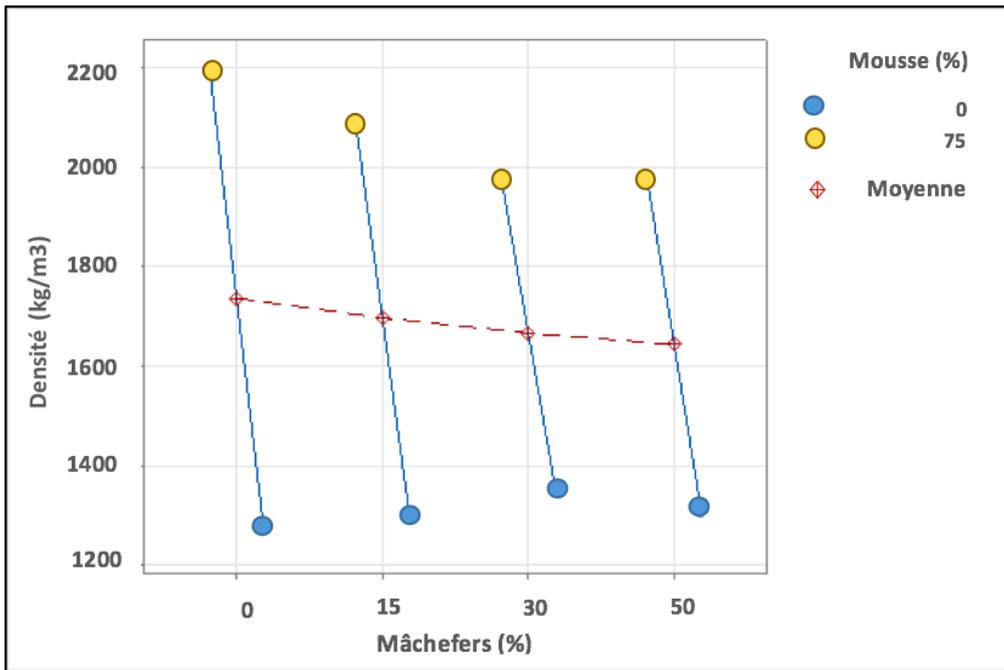


Figure 142. Variation de la densité en fonction de la mousse

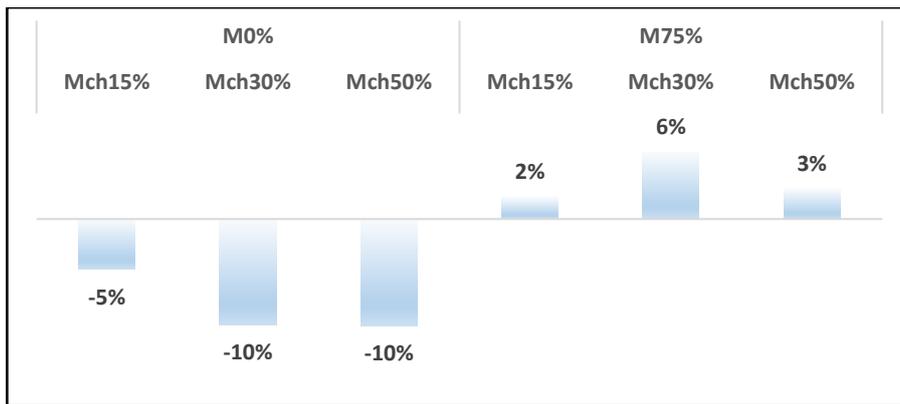


Figure 143. Variation de la densité par rapport aux formulations de référence sans mâchefers

5.2 Interprétation et discussion

Les variations de la densité, sont expliquées à 99% par les variations de la porosité observées lors de l'analyse de la structure porale. En effet la corrélation entre ces 2 propriétés, a bien été vérifiée avec un coefficient R^2 de 99% correspondant à une régression très forte Figure 147, en accord avec la thèse établissant la relation de cause à effet entre ces 2 propriétés. Ainsi Le paramètre de la forme des pores avec $R^2=76%$ influence sur la porosité.

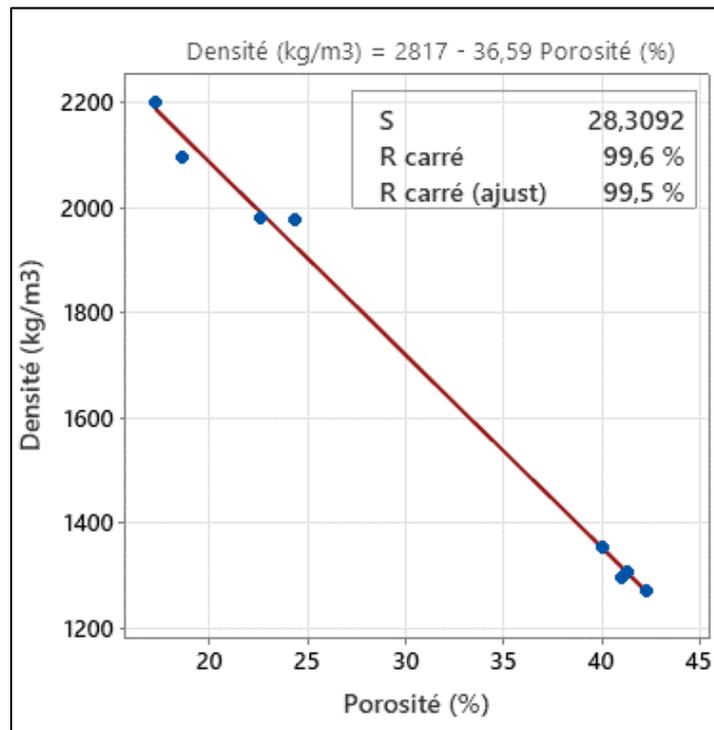


Figure 147. Courbe de régression densité en fonction de la porosité

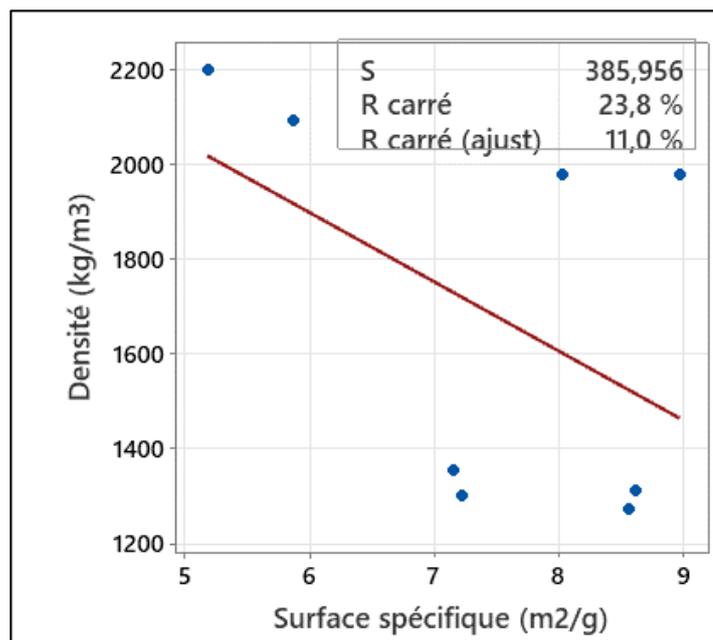


Figure 146. Courbes de régression densité en fonction de circularité

On peut donc expliquer 99% des variations de la densité par les variations de la porosité, les autres facteurs pouvant être l'absorption d'eau trop importante, en effet Machaka et al. [188] ont également obtenu une diminution de la densité mais plus légère que dans notre étude : -4% pour 50% de substitution, contre -10% pour le même taux de 50% pour notre cas, et leurs mâchefers absorbent 88 % moins d'eau (1.35%).

Des résultats différentes ont été observées dans une autre étude de T. Zhang and Z. Zhao [179], où la densité du béton augmentait avec l'augmentation de la teneur en mâchefers. Les auteurs expliquent cette augmentation par la capacité d'absorption d'eau beaucoup plus grande que celle du gravier utilisé.

L'étude de Norlia Mohammad Ibrahim et al [125] concernant la substitution des mâchefers au sable dans un béton mousse, a bien montré une très légère augmentation de 1% en moyenne de la densité sèche. Cette augmentation est inférieure à nos résultats (2% et 6% pour 15 et 30% de substitution).

5.3 Conclusion

Pour résumer, l'expérimentation a permis de découvrir que :

- ✓ Les mâchefers seuls diminuent la masse volumique ;
- ✓ En présence de la mousse à 75%, les mâchefers augmentent très légèrement la masse volumique, jusqu'à la limite de 30% où la densité commence à diminuer ;
- ✓ La mousse diminue la densité dans les formulations avec mâchefers ;
- ✓ L'effet des mâchefers est atténué par l'ajout de la mousse, et inversement l'effet de la mousse est atténué par la substitution, jusqu'à la limite de 30% ;
- ✓ L'effet de la fibre sur la masse volumique n'est pas significatif par rapport à la mousse, et il est 7 fois moindre.

On peut conclure, pour ce chapitre, que la substitution des mâchefers est favorable à la densité, étant donné que pour obtenir des bétons mousse plus légers, les taux de substitution doivent dépasser une certaine limite. À titre indicatif, cette limite est estimée à 66% pour une teneur en mousse de 75%. Les bétons mousse obtenus sont donc plus légers pour des taux de substitution supérieures à environ 66%, et en deçà de 66%, ils sont à peine moins légers de 3.6% en moyenne.

6. À L'ÉTAT DURCI : RESISTANCE A LA COMPRESSION

6.1 Résultats et analyse des effets

La Figure 148 montre que la résistance diminue avec la substitution, dans les formulations sans mousse et qu'en présence de la mousse, elle augmente avec la substitution, jusqu'à la limite de 30% de substitution. Au-delà de cette limite la résistance commence à diminuer. La Figure 149 montre que la résistance diminue drastiquement avec l'ajout de la mousse, dans les formulations avec mâchefers. Cette diminution semble être de plus en plus atténuée à mesure de la substitution.

D'après les variations de la résistance à la compression calculées par rapport aux formulations sans mâchefers Figure 150, on remarque une augmentation importante de la résistance pour 15 et 30% de substitution, (respectivement 72% et 78%) dans les formulations avec mousse, et ce malgré la présence de la mousse à 75% . Au-delà de 30% de substitution cette augmentation commence à s'atténuer. Dans les formulations sans mousse, la variation est moins importante).

Dans les graphes à moustache la Figure 151, présentant la dispersion des valeurs de la résistance, on voit clairement que l'effet des mâchefers est atténué par l'ajout de la mousse, et qu'inversement l'effet de la mousse est atténué par les mâchefers. En effet, on note bien d'après le Tableau 54, que les écarts type diminuent de -78% c'est-à-dire que la mousse atténue l'effet des mâchefers d'environ -78% ; et que les mâchefers atténuent l'effet de la mousse de -20% en moyenne Tableau 54.

Dans le diagramme de Pareto Figure 152, on voit bien que l'effet de la mousse sur la résistance est largement plus important que celui des mâchefers, et que l'effet des mâchefers n'est pas significatif. En estimant l'intensité des 2 effets par les écarts types regroupés Tableau 54, on peut déduire que la mousse a environ 4 fois plus d'effet que les mâchefers sur la variation de la résistance (écart type mousse = 79 / écart type mâchefers = 20).

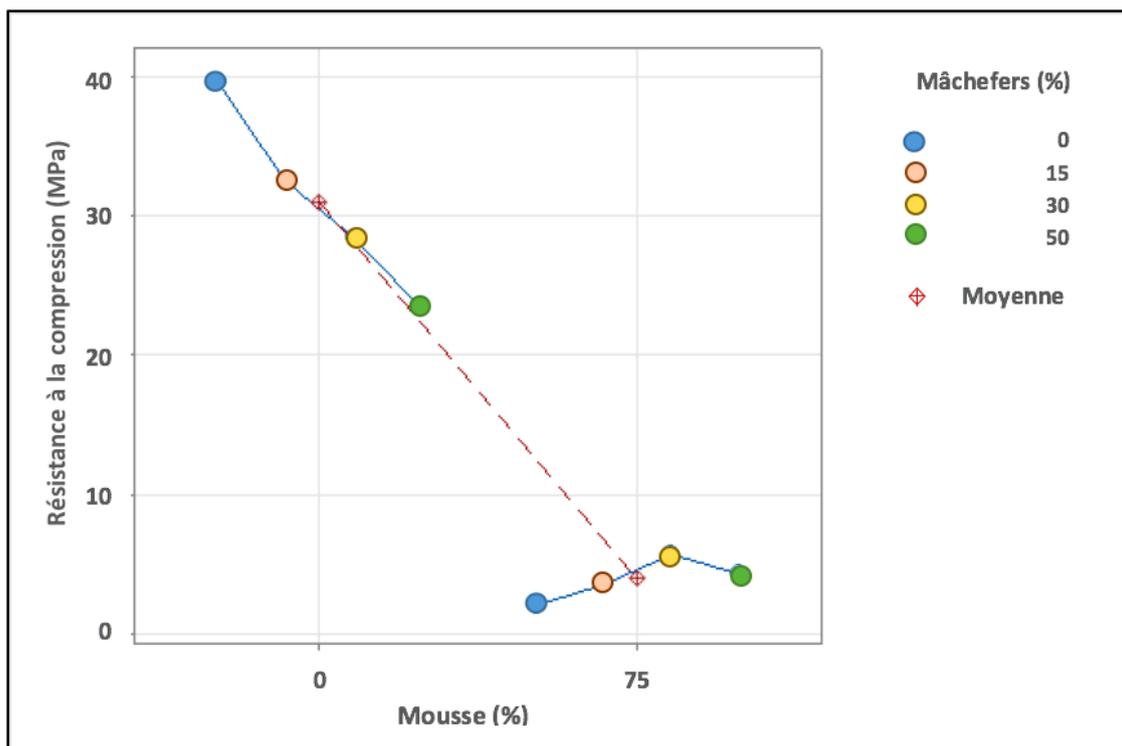


Figure 148. Variation de la résistance en fonction des mâchefers

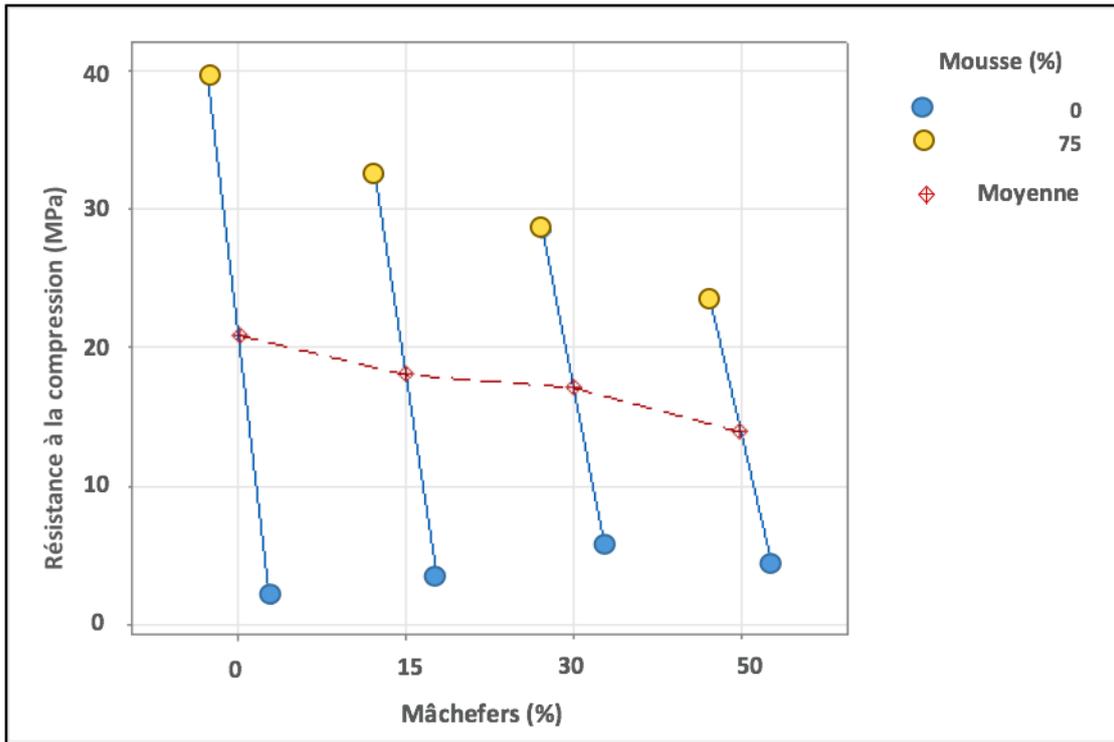


Figure 149. Variation de la résistance en fonction de la mousse

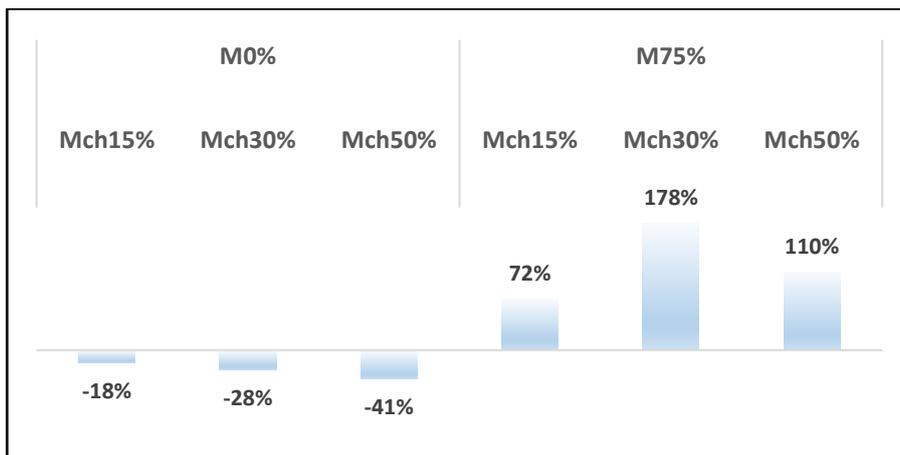
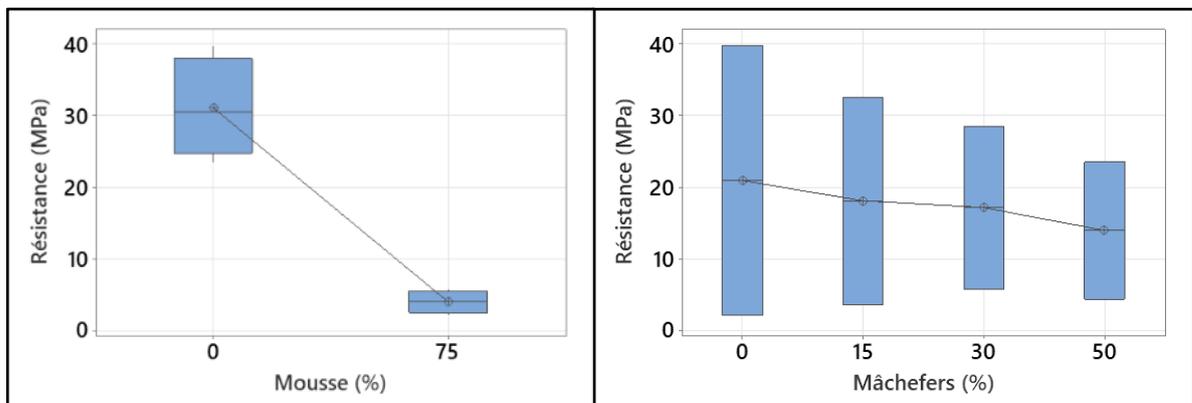


Figure 150. Variation de la densité par rapport aux formulations de référence sans sédiments



(a)

(b)

Figure 151. (a) Distribution résistance en fonction mâchefers (b) Distribution résistance en fonction mousse

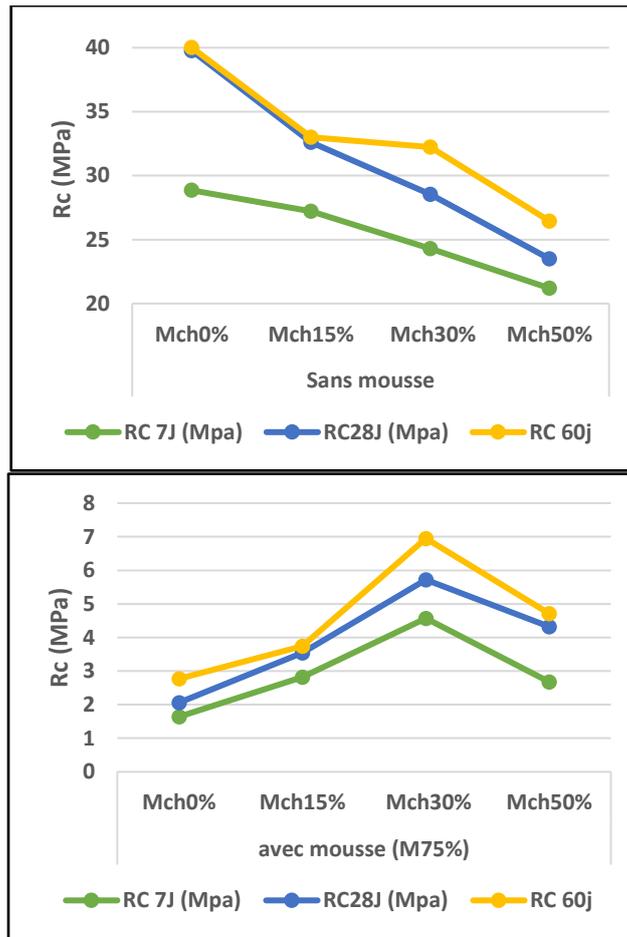


Figure 153. Comparaison des 3 résistances à 7, 28 et 60 jours

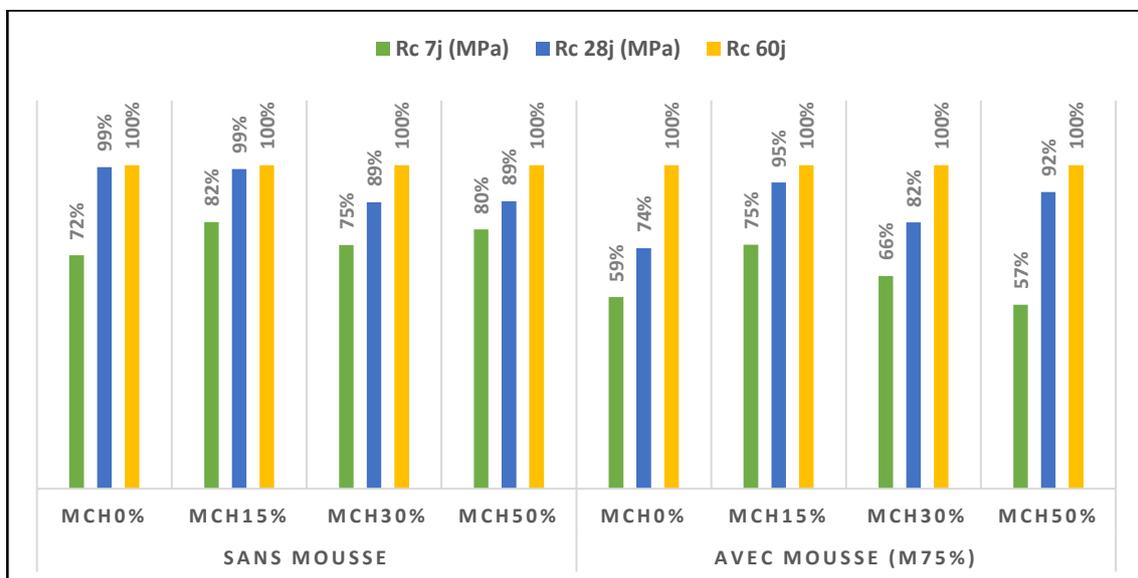


Figure 154. Rapport des résistances à la résistance finale (60jours)

6.3 Interprétation et discussion

La corrélation entre la résistance et la porosité étant bien établie ($R^2 = 98.4\%$), on peut expliquer les variations de la résistance par les variations de la porosité dont dépend fortement

la résistance. A l'instar de la densité, le paramètre le plus influent est la forme des pores avec $R^2=85\%$, le diamètre des pores et la surface spécifique ne sont pas corrélés à la résistance Figure 156.

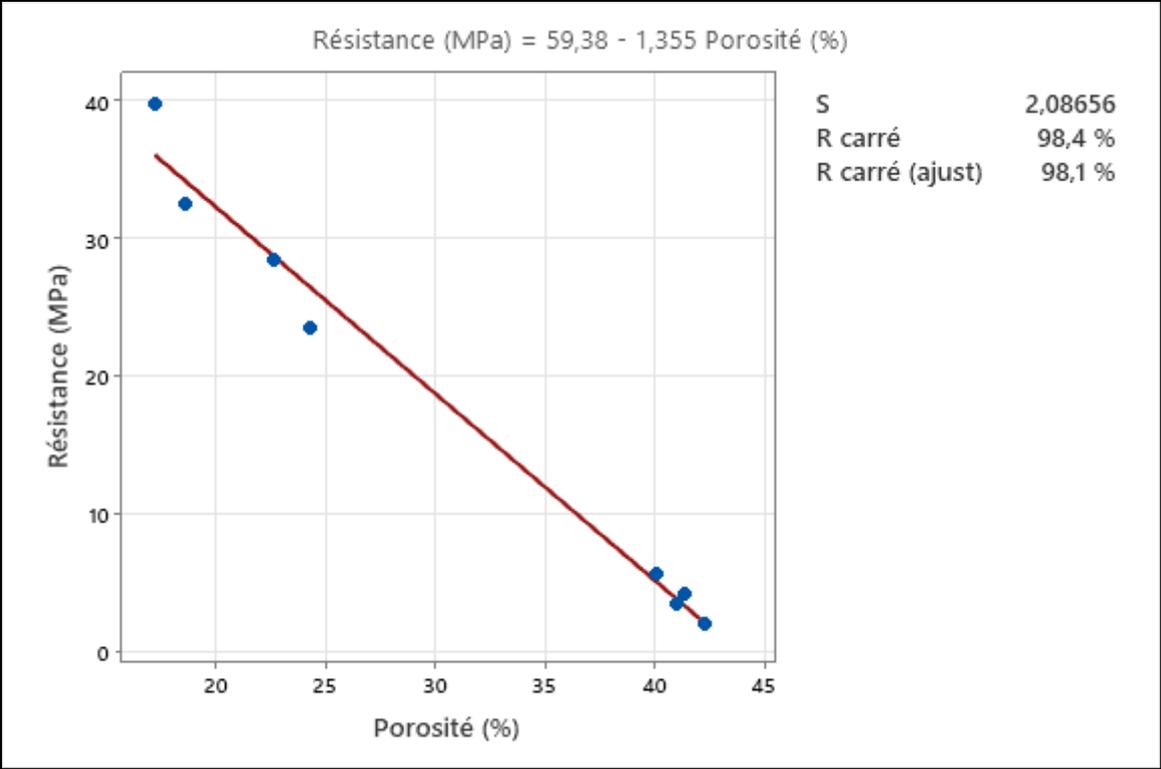


Figure 155. Courbe de régression résistance en fonction de la porosité

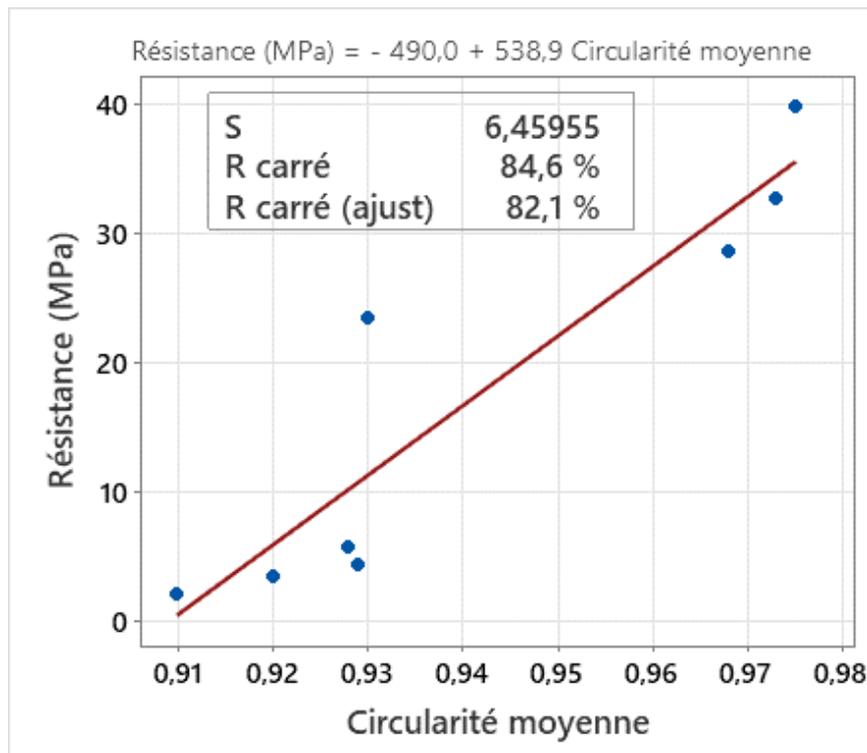


Figure 156. Courbes de régression résistance en fonction de circularité

Plusieurs recherches rapportent des réductions de résistance dans les bétons ordinaires, plus ou moins importantes par rapport à nos résultats (18, 28, et 41% de réduction pour 15, 30 et 50% de substitution), selon la nature des échantillons. Par exemple, Saikia et al. [189], ont remarqué une réduction de 50% de la résistance à la compression pour 25% de substitution avec des mâchefers de 0-2mm. Yang et al. [190] ont observé une réduction de 30% pour 100% de substitution, c'est à dire une réduction 2 fois moins importante, sachant qu'ils ont utilisé des mâchefers 2 fois plus légers que les nôtres (1125kg/m³). Müller et Rübner [175] ont observé que la résistance diminuait avec la taille des mâchefers (28.1 MPa pour 2-8 mm et 14.4 MPa pour 2-32 mm).

Concernant les formulations avec mousse où la résistance a connu une augmentation conséquente (72, 178, et 110% de réduction pour 15, 30 et 50% de substitution), et toujours en la comparant à l'étude de Norlia Mohammad Ibrahim et al [125], ils ont obtenu de même une augmentation importante de la résistance de 64% dès l'introduction des mâchefers à 5%, mais au-delà de ce taux, cette augmentation s'atténue jusqu'à une diminution (19.7, -17.8 et -17.4% pour 10, 15 et 20% de substitution). Cela peut s'expliquer par une plus grande teneur en métaux ferreux (9.5% contre 2.7%) qui affectent les propriétés mécaniques, et ce malgré le traitement des mâchefers avec NaOH.

La corrélation entre la résistance mécanique et la densité est bien vérifiée avec R²=98% Figure 157.

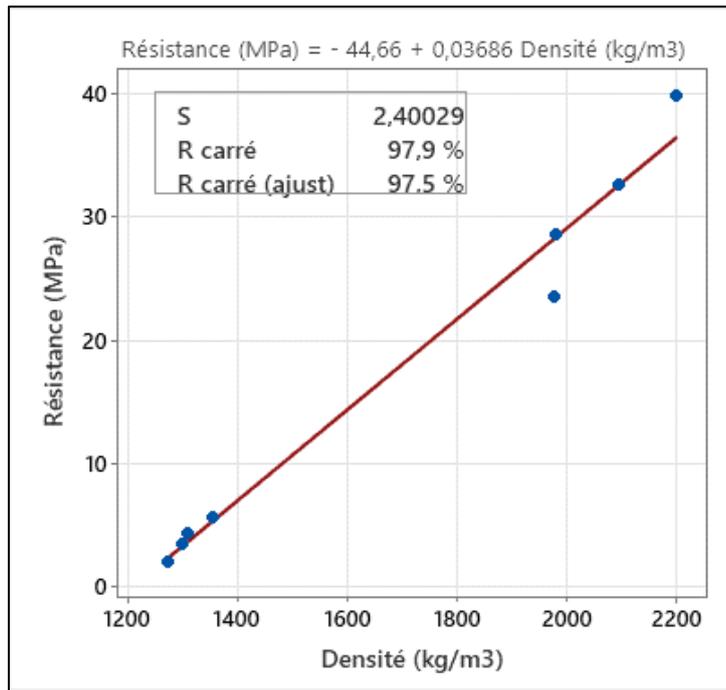


Figure 157. Courbe de régression Résistance à la compression - Densité

6.4 Conclusion

L'expérimentation a permis de mettre en évidence que

- ✓ Les mâchefers seuls diminuent la résistance (de 18, 28 et 41% pour 15, 30 et 50% de substitution) ;
- ✓ En présence de la mousse, les mâchefers augmentent de façon importante la résistance jusqu'à la limite de 30% de substitution, au-delà de laquelle la résistance commence à diminuer, mais sans descendre en deçà de la résistance de référence ;
- ✓ Les mâchefers atténuent l'effet de la mousse et inversement ;
- ✓ L'effet de la fibre sur la résistance n'est pas significatif par rapport à la mousse, et il est 4 fois moindre.

On peut conclure, pour ce chapitre, que la substitution des mâchefers, est favorable à la résistance si on ne dépasse pas un certain taux de substitution. À titre indicatif, cette limite est estimée à 82.3% pour une teneur en mousse de 75%, ce qui représente un taux suffisamment élevé. En deçà de cette limite, résistance a augmenté de 120% en moyenne.

7. À L'ÉTAT DURCI : CONDUCTIVITE THERMIQUE

7.1 Résultats et analyse des effets

La Figure 158 montre que la conductivité thermique diminue avec la substitution, dans les formulations avec et sans mousse, et de façon abrupte dès l'introduction des mâchefers dans le béton sans mousse. En présence de la mousse, la conductivité thermique diminue toujours mais de façon plus atténuée. La Figure 159 montre que la conductivité thermique diminue avec

l'ajout de la mousse, dans les formulations avec mâchefers. Cette diminution est plus en plus atténuée à mesure de la substitution.

D'après les variations de la conductivité thermique calculées par rapport à la formulation sans mâchefers Figure 160 on remarque une forte variation de la conductivité thermique avec la substitution dans les formulations sans mousse (-29% à -44%). En présence de la mousse, la diminution moyenne est de -10% jusqu'à 30%. Au-delà de cette valeur la conductivité se stabilise l'impact des mâchefers est fortement atténué (-4% à -18%).

Dans les graphes à moustache la Figure 161, présentant la dispersion des valeurs de la conductivité thermique, on voit clairement que l'effet des mâchefers est fortement atténué par l'ajout de la mousse, et qu'inversement l'effet de la mousse est assez atténué par les mâchefers. En effet, on note bien d'après le Tableau 55, que les écarts type diminuent de --82% c'est-à-dire que la mousse atténue l'effet des mâchefers d'environ --82% ; et que les mâchefers atténuent l'effet de la mousse de -25% en moyenne.

Dans le diagramme de Pareto Figure 162, on voit bien que l'effet de la mousse sur la conductivité thermique est plus important que celui des mâchefers. En estimant l'intensité des 2 effets par les écarts types regroupés Tableau 55, on peut déduire que la mousse a environ 2 fois plus d'effet que les mâchefers sur la variation de la conductivité thermique (écart type mousse = 0,38 / écart type mâchefers = 0,18).

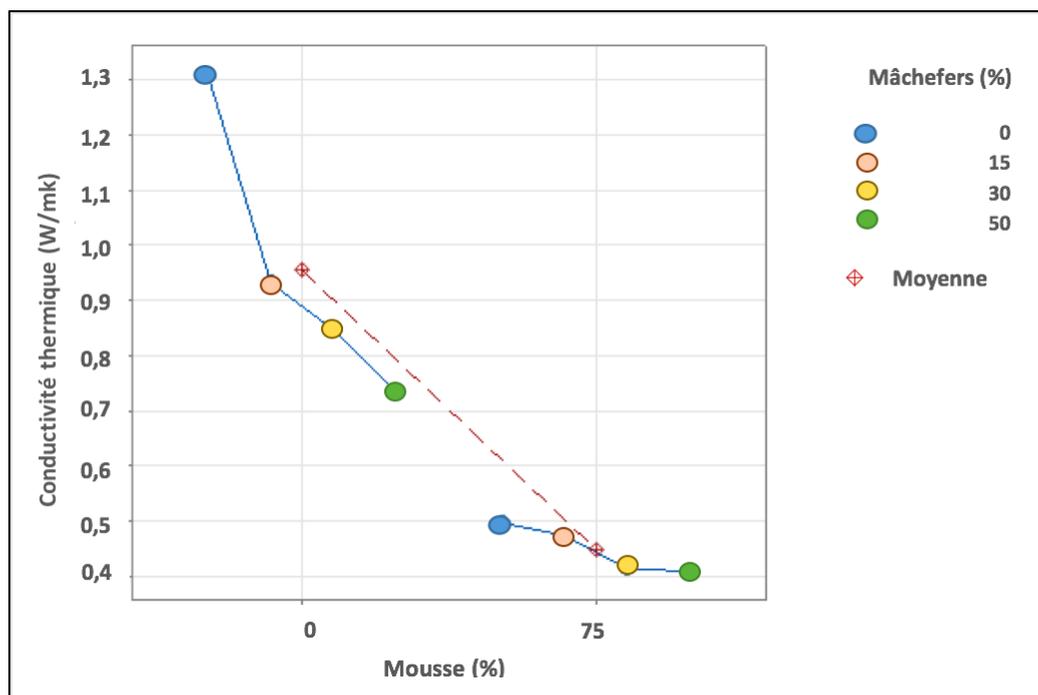


Figure 158. Variation de la conductivité thermique en fonction de la mousse

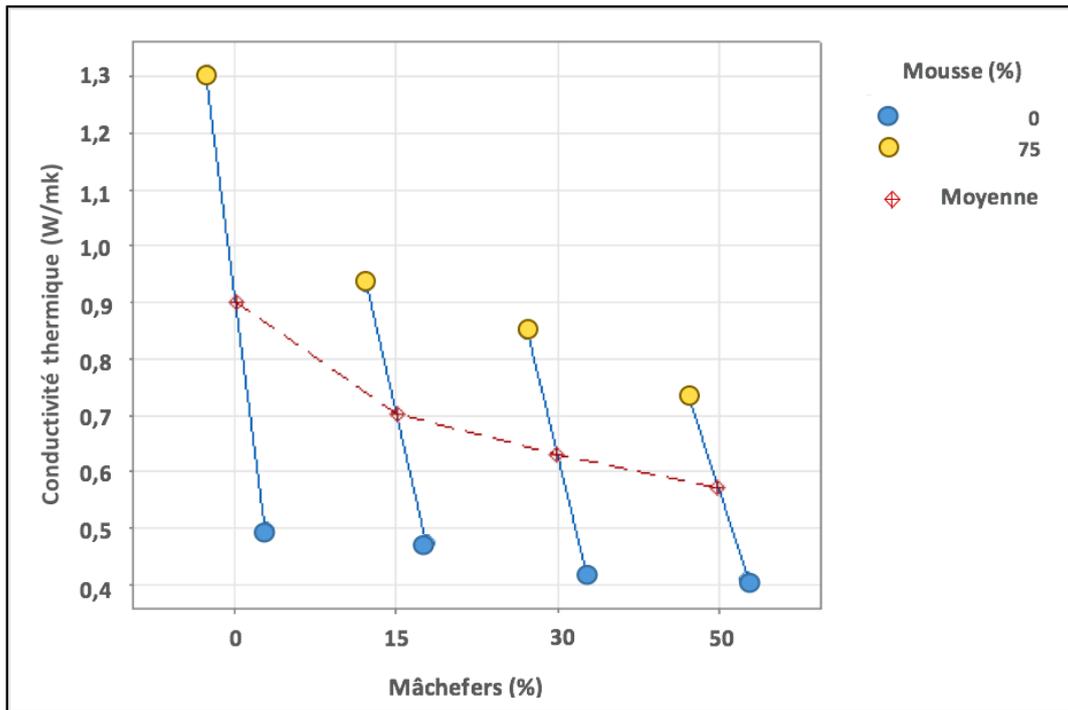


Figure 159. Variation de la conductivité thermique en fonction des mâchefer

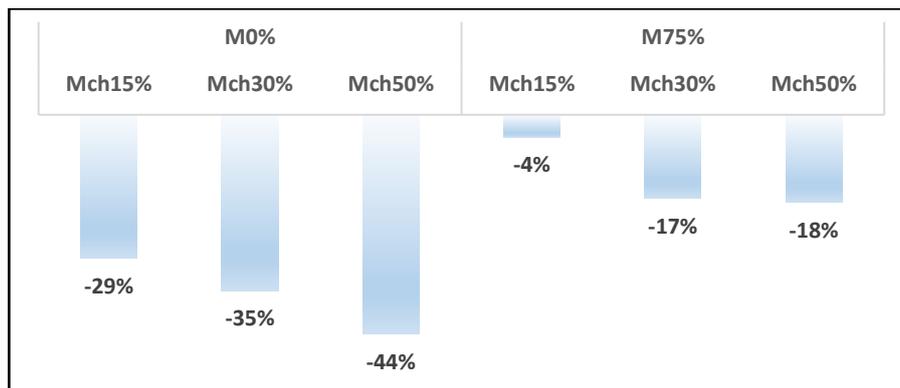
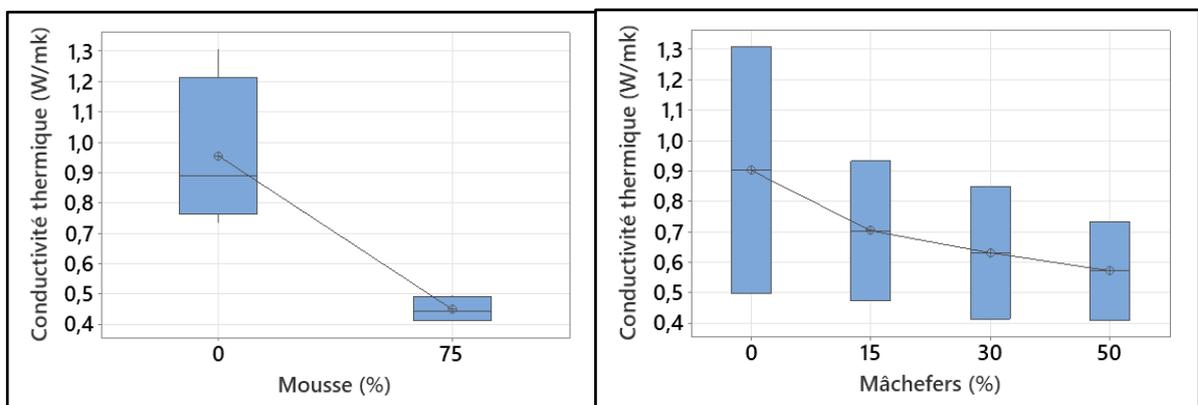


Figure 160. Variation de la conductivité thermique par rapport aux formulations sans mâchefer



(a)

(b)

Figure 161. Distribution λ en fonction mâchefer (b) Distribution λ en fonction mousse

Tableau 55. (a) écarts type λ (effet des mâchefers) (b) écarts type λ (effet de la mousse)

(a)			(b)		
Mousse (%)	N	EcTyp	Mâchefers(%)	N	EcTyp
0	4	0,249	0	2	0,574
75	4	0,0436	15	2	0,324
			30	2	0,307
			50	2	0,229

Écart type regroupé = **0,178677**

Écart type regroupé = **0,381436**

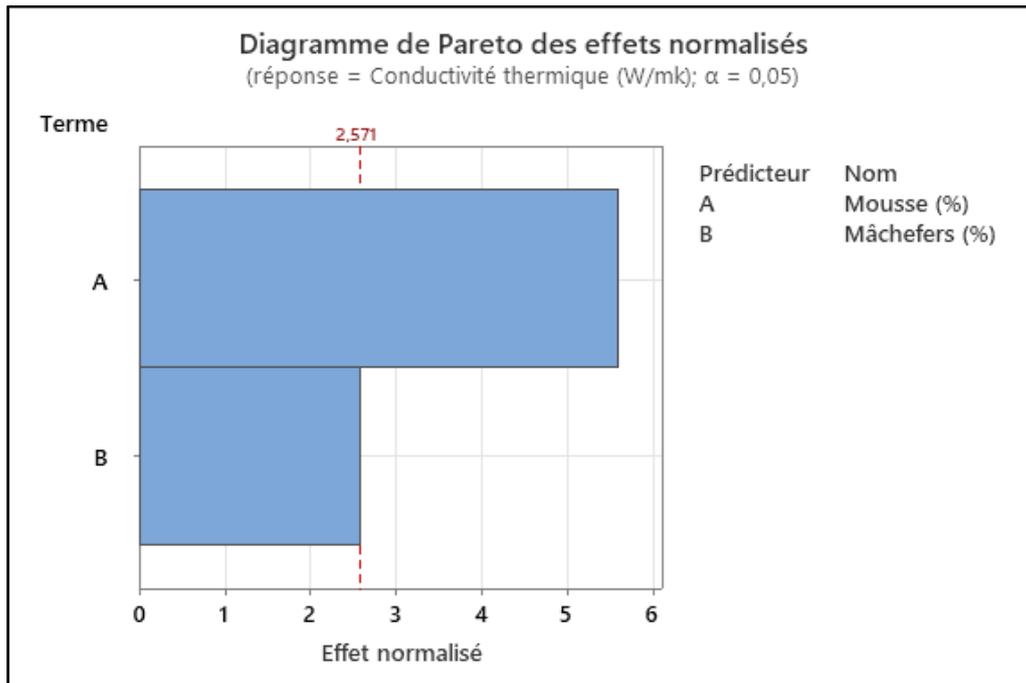


Figure 162. Diagramme de Pareto des effets des mâchefers et mousse sur la conductivité thermique

7.2 Interprétation et discussion

Le lien de causalité entre la conductivité et la porosité est bon confirmée ($R^2= 85\%$ Figure 163). La conductivité dépend plus exactement de la forme des pores ($R^2=75\%$) Figure 164.

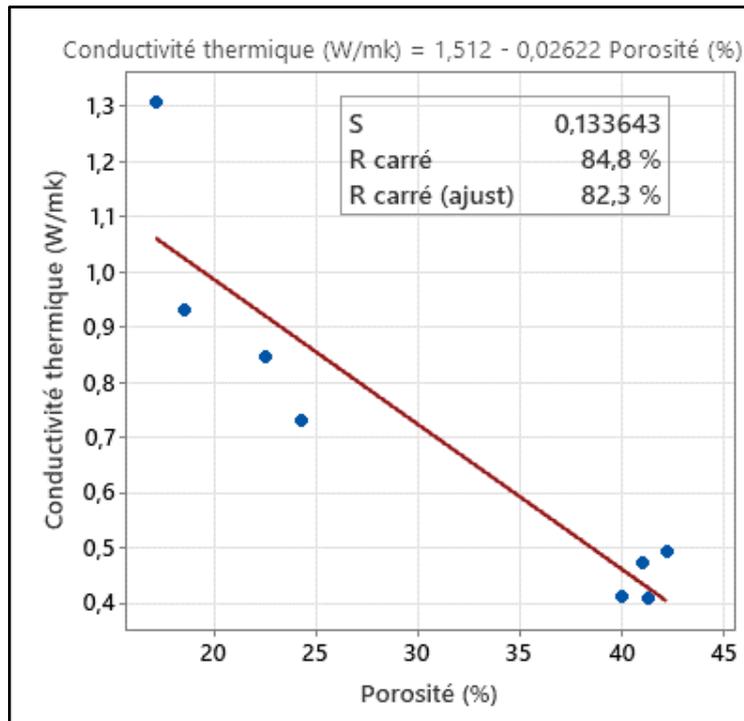


Figure 163. Courbe de régression conductivité thermique en fonction de la porosité

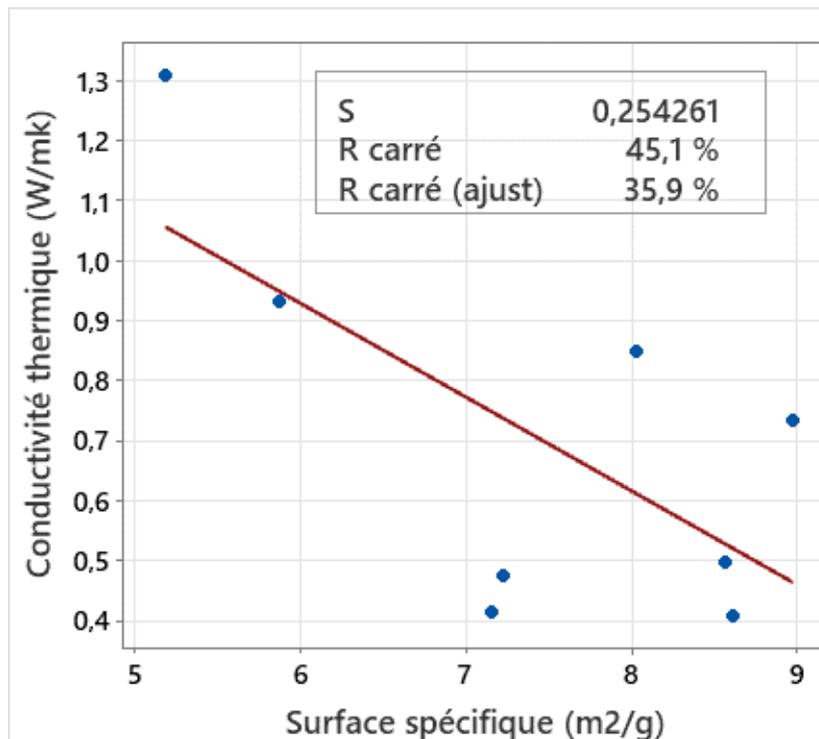


Figure 164. Courbes de régression conductivité en fonction de circularité

Dans les formulations sans mousse, les mâchefers ont réussi à réduire la conductivité thermique jusqu'à 44% pour 50% de substitution. Peiliang Shen et al [191], qui ont travaillé sur un béton éco-perméable avec des taux de substitution des mâchefers aux granulats, ont

observé une réduction de la conductivité thermique de 10% pour 50% de substitution et de 45% pour 100% de substitution ; ils ont utilisé des mâchefers avec une granulométrie plus grossière (2-5mm), 53% plus légers (1049 kg/m^3) et une capacité d'absorption de 11.64 % comparable à la nôtre . En comparaison avec notre étude, la diminution qu'ils ont obtenue est beaucoup inférieure, cette différence peut s'expliquer par le fait que leurs mâchefers soient 53% plus légers.

La corrélation entre la conductivité thermique et la densité est bien vérifiée avec $R^2= 84\%$ Figure 165.

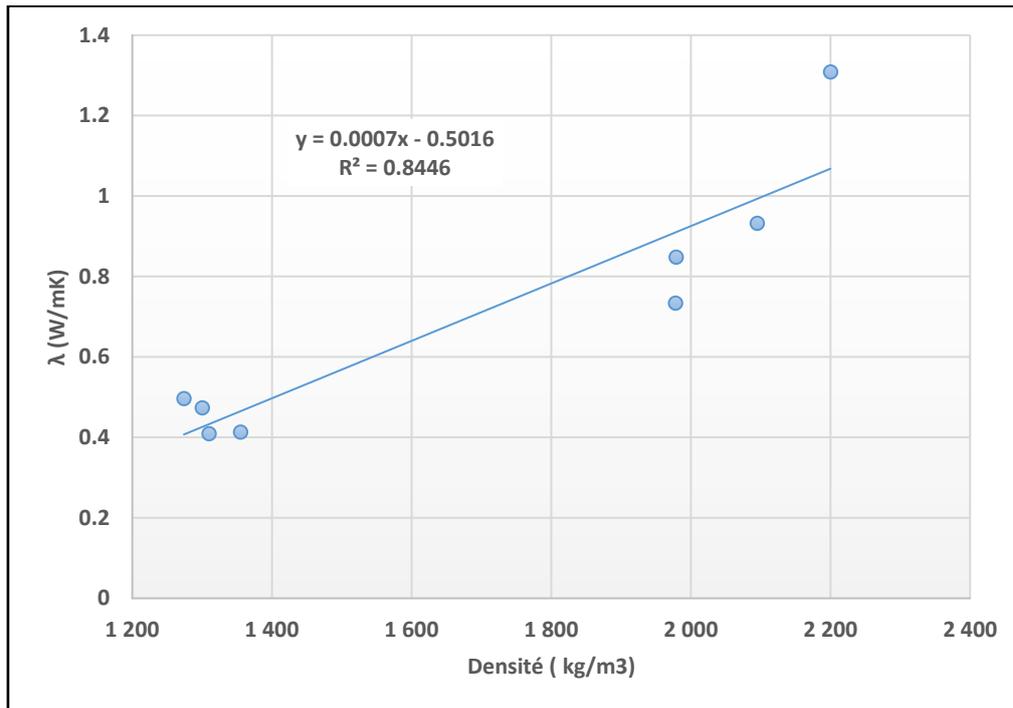


Figure 165. Courbe de régression Conductivité thermique - Densité

7.3 Conclusion

Les essais sur la conductivité thermique ont révélé que :

- ✓ Les mâchefers seuls diminuent la conductivité thermique et de façon brusque dès leur introduction à 15%, de 29, 35 et 44 % pour 15,30 et 50% de substitution ;
- ✓ En présence de la mousse, les mâchefers continuent à diminuer la conductivité thermique ;
- ✓ Les mâchefers atténuent l'effet de la mousse et inversement ;
- ✓ L'effet des mâchefers sur la conductivité thermique reste significatif par rapport à la mousse, quoique 2 fois moindre.

On peut conclure, pour ce chapitre, que la substitution des mâchefers, a un effet favorable sur l'isolation thermique des bétons mousse. Elle diminue en moyenne de 13%. Toutefois, on

peut conjecturer une inversion de la courbe, à partir d'un certain taux de substitution, au regard des résultats obtenus relatifs à la porosité et la densité. À titre d'exemple on voit bien que pour une teneur en mousse de 75%, la conductivité thermique ne diminue plus au-delà de 30% de substitution.

8. ÉTUDE COMPARATIVE DES PROPRIÉTÉS

Comme pour les sédiments, on va se baser sur la mesure des coefficients de variation pour comparer les variations des propriétés des bétons mousse sous l'effet de la substitution.

Tableau 56. Statistiques (M75%)

Variable	VarCoeff	EcTyp	Moyenne	Minimum	Maximum
Densité (kg/m ³)	2,22	29,3	1321,7	1300,0	1355,0
Résistance (MPa)	24,40	1,105	4,527	3,540	5,720
Conductivité thermique (W/mk)	8,40	0,0363	0,4318	0,4089	0,4736
Étalement (cm)	1,50	0,265	17,600	17,300	17,800

D'après le Tableau 56, On voit bien que c'est la résistance qui varie le plus sous l'effet de la variation des mâchefers, suivi de la conductivité thermique et de la densité. L'ouvrabilité est la moins sensible à cette variation.

Les mâchefers impactent 11 fois plus les propriétés mécaniques (gain) que la densité (perte en légèreté), 3 fois plus que la conductivité thermique (gain en isolation) et 16 fois plus que l'ouvrabilité (perte).

Cela signifie que vouloir améliorer les performances les plus faibles (densité et ouvrabilité) aura très peu d'incidence sur les autres propriétés et sur le taux de substitution qui seront très peu réduites.

8.1 Conclusion sur les mâchefers

Partant des paramètres de l'expérimentation fixés : nature et dosage des constituants (E/C=0.6, G/C=3), un échantillon de mâchefers anguleux, contenant 8% de métaux ferreux et non ferreux et 2.6% de composés organiques imbrûlés, plus grossiers que le sable, 20% plus légers et absorbant 25 fois plus d'eau, on peut dire que la substitution des mâchefers au sable, si elle ne dépasse pas un certain seuil, permet de gagner en résistance et ceci sans que la densité soit trop affectée. Par exemple, pour une teneur en mousse de 75%, en deçà de 66%, les bétons mousse sont plus résistants de 120% en moyenne et à peine 4% moins légers ; entre 66 et 82% de substitution, ils sont plus légers et toujours plus résistants, et au-delà de 82% ils sont moins résistants et plus légers.

Le rapport résistance/ densité augmente avec la substitution par rapport à la formulation sans mâchefers de 111% moyenne. D'après la tendance de régression de ce rapport, le point d'inflexion prédictible au-delà duquel ce rapport commencera à diminuer est estimé à 87%.

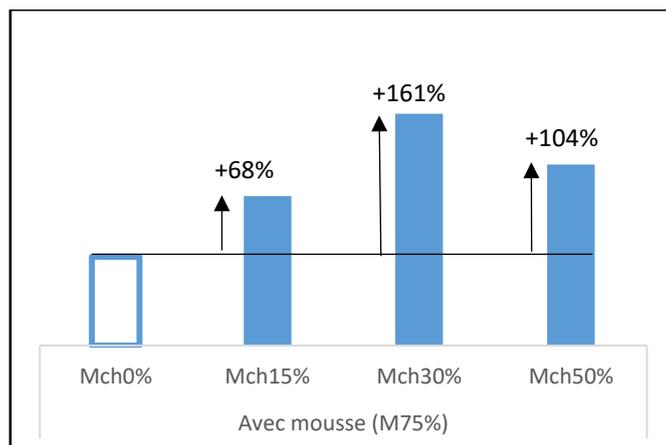


Figure 166 : Rapport Résistance - Densité

La substitution a permis en outre d'obtenir des bétons mousse un peu plus isolants (+13% en moyenne), et à peine moins ouvrables (-1.5% en moyenne à cause de l'effet retardateur des mâchefers sur la prise). Ils sont plus poreux au-delà d'un certain seuil de substitution (62% pour M75%) et à peine moins poreux en deçà (3% en moyenne).

La propriété la plus impactée est la résistance à la compression, suivie de la conductivité thermique (3 fois moins), de la densité (11 fois moins) et en dernier de l'ouvrabilité (16 fois moins).

En résumé, et comme on peut le voir sur le schéma suivant, les résultats sont prometteurs, quelque soient les taux de substitutions et les seuils des taux limitant quelques performances, restent intéressants dans tous les cas de figure. On note par exemple que jusqu'à environ 87% de substitution, le rapport résistance / densité est en moyenne 111% supérieur avec des propriétés d'isolation bien préservées. Il serait intéressant de tester plus de formulations avec la mousse afin de pouvoir disposer d'un modèle plus complet.

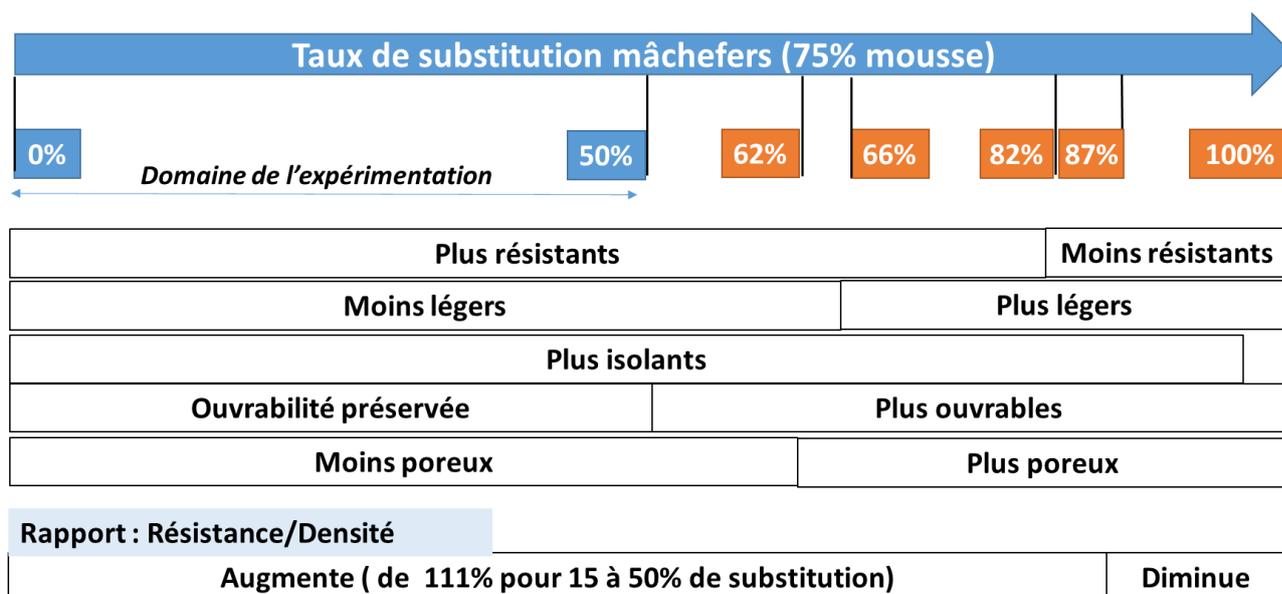


Figure 167. L'effet des mâchefers sur les propriétés de béton mousse

Il sera toujours possible d'améliorer d'avantage les performances mécaniques tout en limitant l'augmentation de la densité, en optimisant le procédé de traitement et d'élaboration pour purger d'avantage les mâchefers des éléments indésirables (déferraillage, criblage) [125], en augmentant par exemple la durée de maturation.

PARTIE 4

CARACTERISATION DES MORTIER MOUSSE A BASE DE FIBRE DE VERRE

1. DOSAGE DE REFERENCE

Le dosage de référence relatif aux essais de comparaison des bétons mousse avec fibre de verre se présentent ainsi :

- ✓ E/C (eau/ciment) = 0.6 et G/C (granulats/ciment) = 3
- ✓ 8 formulations testées : 0%, 2%, 4% et 6%, pour les proportions volumiques des fibres (Fv%), en substitution au sable à volume équivalent, dans les formulations sans mousse et avec mousse (à 75% en proportion volumique par rapport au volume du mortier de référence).

Les quantités des composants nécessaires pour fabriquer 1m³ de béton mousse sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau de dosage :

Tableau 57. Compositions pour 1 m³ de béton mousse sur la base de ciment CEM I

Formulation	Densité à l'état frais (kg/m ³)	Composition massique pour 1 m ³ de béton mousse						
		Fibre (kg)	Sable (kg)	Ciment (C) (kg)	Eau efficace (E) (l)	Mousse (l)	G/C	E/C
M0%Fv0%	2200	0	1758	585,9	351,6	0	3	0,6
M0%Fv2%	2165,5	35	1734,6	585,9	351,6	0	3	0,6
M0%Fv4%	2100	70	1722,6	585,9	351,6	0	3	0,6
M0%Fv6%	2080	105	1699,2	585,9	351,6	0	3	0,6
M75%Fv0%	1273,66	0	1017,8	339,2	203,5	45	3	0,6
M75%Fv2%	1328,15	21,46	1063,8	359,34	215,64	45	3	0,6
M75%Fv4%	1420	47,33	1164,8	396,18	237,74	45	3	0,6
M75%Fv6%	1340	67,64	1094,67	377,45	226,51	45	3	0,6

2. À L'ETAT FRAIS : AIR OCCLUS ET DENSITE

2.1 Résultats et analyse des effets

La corrélation entre la densité à l'état frais et l'air occlus étant vérifiée par la courbe de régression avec un coefficient $R^2 = 97,4\%$ (Figure 168), corroborant le lien de causalité de la masse volumique par rapport à l'air occlus. De ce fait, l'analyse des effets portera uniquement sur l'air occlus.

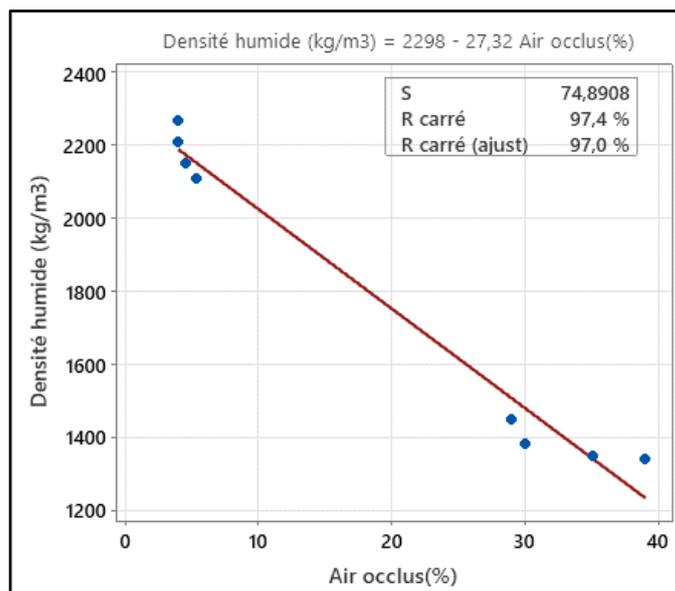


Figure 168. Courbe de régression densité à l'état frais en fonction de l'air occlus

La Figure 169 montre que l'air occlus augmente légèrement avec la substitution, dans les formulations sans mousse et que la densité à l'état frais diminue en conséquence. En présence de la mousse, l'air occlus diminue et la densité augmente donc, jusqu'à la limite de 4% de substitution, au-delà de laquelle les 2 tendances s'inversent, avec une très légère augmentation de l'air. Ces variations semblent être accentuées par la mousse. La Figure 170 montre, qu'avec l'ajout de la mousse dans les formulations avec fibre, l'air occlus augmente et la densité diminue. Ces variations sont atténuées à mesure de la substitution, jusqu'à la limite de 4% de substitution.

D'après les variations de l'air occlus et la densité à l'état frais par rapport aux formulations sans fibre Figure 171, on remarque que l'air occlus varie plus que la densité. Dans les formulations avec mousse (75%), les taux de substitution de 2, 4 et 6% ont diminué l'air occlus de 10, 26 et 23% et ont augmenté la densité à l'état frais de 1,8, et 3%.

Dans les graphes à moustache la Figure 172, présentant la dispersion des valeurs de l'air occlus, on voit clairement que l'effet de la fibre est bien accentué par l'ajout de la mousse, et qu'en revanche l'effet de la mousse est atténué par la fibre jusqu'à la limite de 4% de substitution. Les valeurs des écarts types présentées dans le Tableau 58, confirment bien cette observation. En effet, on note bien l'écart type augmenter fortement avec l'ajout de la mousse c'est-à-dire que la mousse accentue fortement l'effet de la fibre (+605%), et dans le Tableau 58 l'écart type diminue avec la substitution, c'est-à-dire que la fibre atténue l'effet de la mousse (-16% en moyenne), jusqu'à la limite de 4% de substitution.

Dans le diagramme de Pareto Figure 173, on voit bien que l'effet de la mousse sur l'air occlus est largement plus important que celui de la fibre, et que l'effet de la fibre est non significatif. En estimant l'intensité des 2 effets par les écarts types regroupés Tableau 58, on peut déduire que la mousse a environ 6 fois plus d'effet que les fibre sur la variation de l'air occlus (écart type mousse = 20,6 / écart type fibre = 3,3).

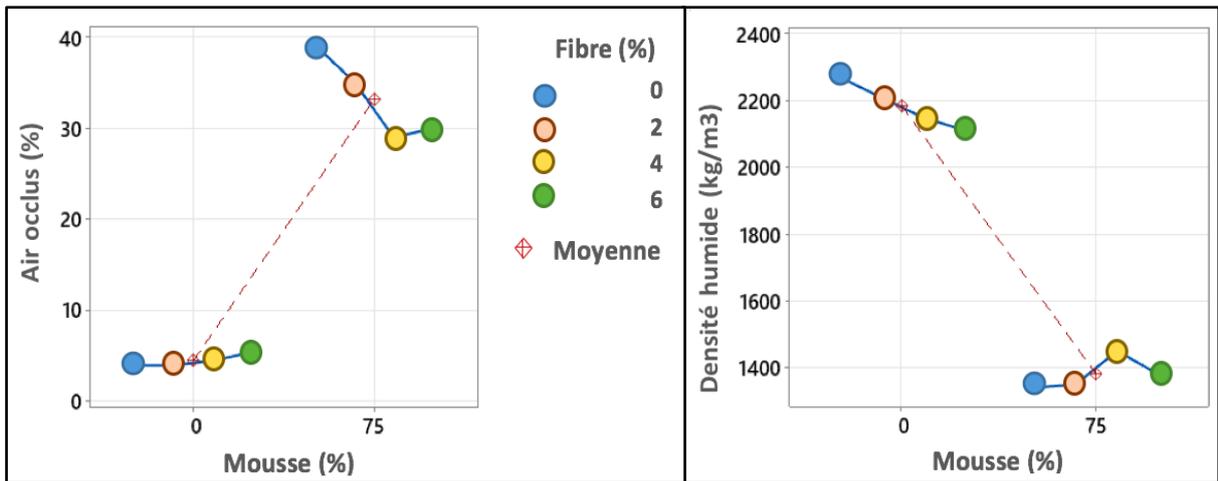


Figure 169. Variation de l'air occlus et densité à l'état frais en fonction de la fibre de verre

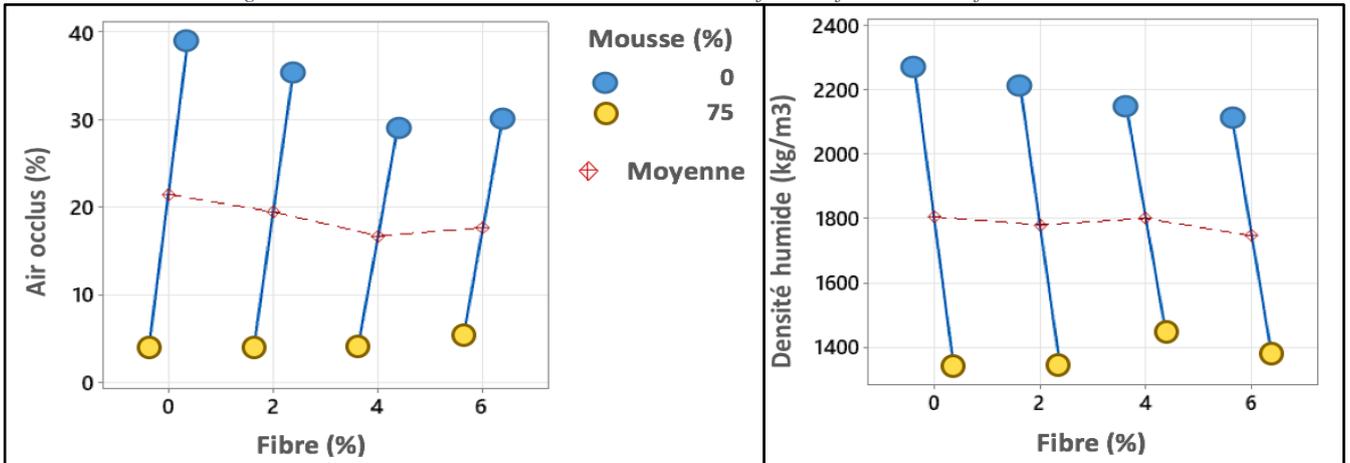


Figure 170. Variation de l'air occlus et densité à l'état frais en fonction de la mousse

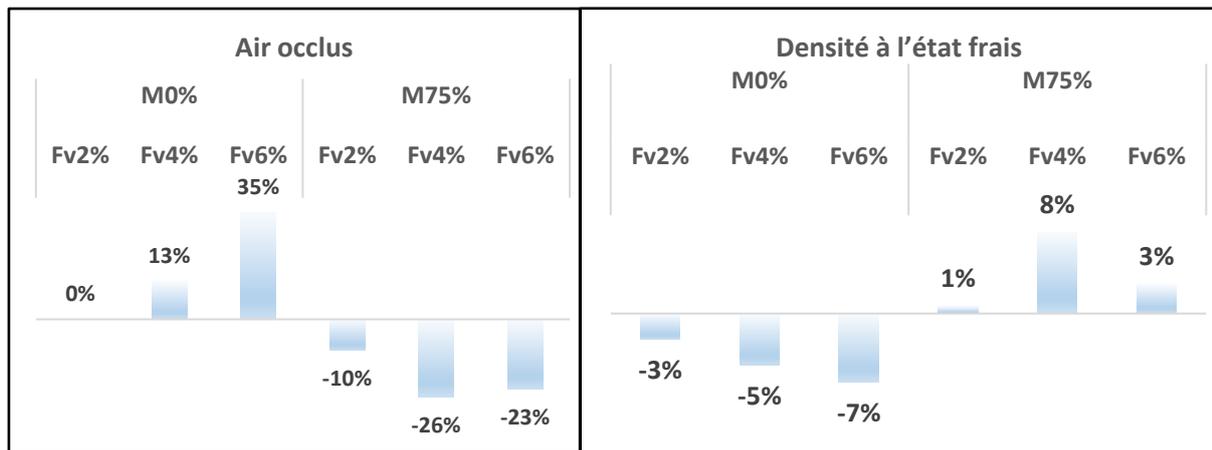
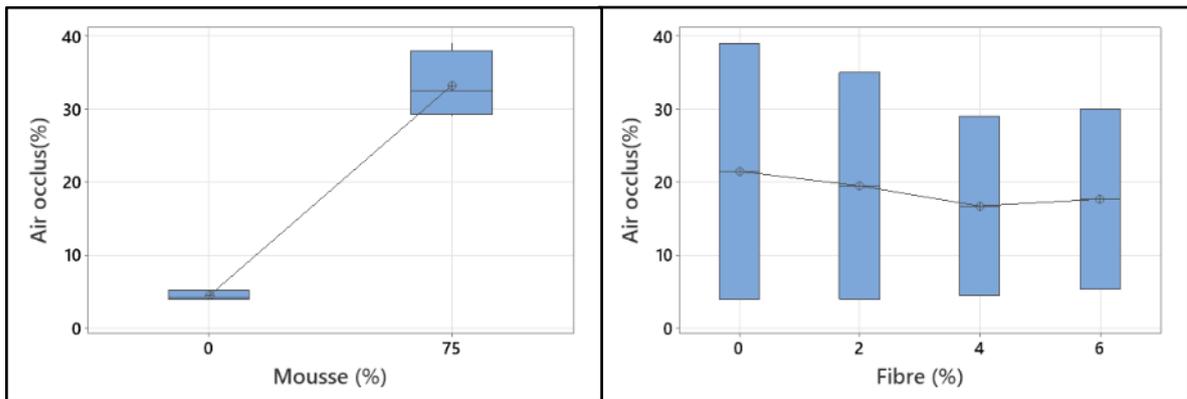


Figure 171. Variation de l'air occlus et densité à l'état frais par rapport aux formulations sans fibre



(a)

(b)

Figure 172. (a) Distribution air occlus en fonction fibre (b) Distribution air occlus en fonction mousse

Tableau 58. (a) écarts type air occlus (effet de la fibre) (b) écarts type air occlus (effet de la mousse)

(a)

Mousse (%)	N	EcTyp
0	4	0,660
75	4	4,65

Écart type regroupé = 3,31807

(b)

Fibre (%)	N	EcTyp
0	2	24,7
2	2	21,9
4	2	17,3
6	2	17,4

Écart type regroupé = 20,5895

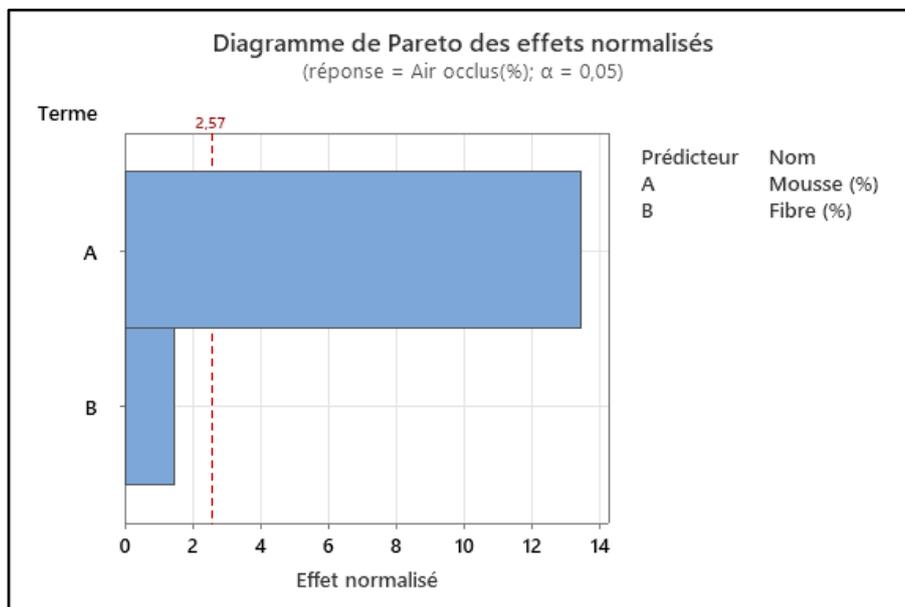


Figure 173. Diagramme de Pareto des effets de la mousse et fibre sur l'air occlus

2.2 Interprétation et discussion

On peut attribuer l'augmentation de l'air occlus sous l'effet de la fibre, et donc la diminution de la densité à l'état frais, dans les formulations sans mousse, à la modification de l'arrangement granulaire induite par la morphologie de la fibre. Une autre explication peut provenir de la distribution non uniforme et non régulière des fibres ainsi que la perturbation de leur orientation lors du malaxage, qui seraient à l'origine des vides d'air piégés dans le mélange frais. Cette explication est inspirée des résultats de Marcin Małek et al. [192] et Vafaei et al. [193], bien qu'ils aient travaillé avec d'autres fibres qui sont les fibres de polypropylène et d'alcool polyvinylique, en remplacement du sable dans les bétons classiques. Ils avaient observé la même accélération de l'augmentation de l'air occlus avec l'ajout de fibres : pour des ajouts de 0.3% et 0.5% l'augmentation est passée de 12% à 20%. Ces augmentations sont de 0% à +13% pour une substitution de 2% à 4% et de 13% à 35% pour une substitution de 4% à 6%. Une étude de Correia [155] a montré des réductions de 1,7 à 5,8 % de la densité à l'état frais en incorporant 5, 10, 15 et 20 % de fibre de verre recyclée en poudre, en remplacement des agrégats fins, avec une fibre 30 % plus légère que le granulats fin substitué. En comparaison avec nos résultats, on pourrait déduire que la fibre de verre recyclée sous forme en fibres a plus d'effet sur la densité que sous forme de poudre, puisqu'on a obtenu une réduction de 3, 5 et 7% pour des taux de substitution de 2, 4 et 6%, avec une fibre 35% plus légère que le sable. Cette déduction est par ailleurs confirmée par une autre étude de A. Dehghan, K. Peterson, and A. Shvarzman[194] , qui a montré que l'utilisation de la fibre de verre recyclée sous forme de poudre réduisait la densité à l'état frais de moins de 0,5 %, tandis que son utilisation sous forme de fibres entraînait des réductions de la densité à l'état frais jusqu'à 2 %.

En présence de la mousse, la fibre a un effet inverse et diminue l'air occlus, à cause très probablement de la forme tranchante des fibres qui fragilisent le film de la mousse et entraînent l'éclatement de bulles entraînées. À 4% de substitution, la tendance s'inverse et l'air occlus commence à augmenter. Ceci peut être expliqué par le fait que plus il y a de fibres, plus elles vont s'agglomérer et provoquer ainsi moins d'éclatement de bulles.

2.3 Conclusion

Les mesures de l'air occlus et de la densité à l'état frais ont permis de montrer que :

- ✓ La fibre de verre seule augmente significativement l'air occlus et diminue donc la densité à l'état frais. Pour 6% de substitution, l'air occlus augmente de 35% et la densité diminue de 7% ;
- ✓ En présence de la mousse, La fibre de verre diminue l'air occlus et augmente la densité à l'état frais, jusqu'à 4% de substitution. Les taux de substitution de 2, 4 et 6% ont diminué l'air occlus de 10, 26 et 23% et ont augmenté la densité à l'état frais de seulement 1, 8, et 3% ;
- ✓ La mousse augmente l'air occlus et diminue la densité dans les formulations avec fibre ;
- ✓ L'effet de la fibre est accentué par l'ajout de la mousse, et l'effet de la mousse est atténué par la fibre, jusqu'à la limite de 4% ;
- ✓ L'effet de la fibre n'est pas significatif par rapport à la mousse, et il est 6 fois moindre.

3. À L'ÉTAT DURCI : OUVRABILITE

3.1 Résultats et analyse des effets

La Figure 174 montre que l'étalement diminue légèrement avec la substitution, dans les formulations avec et sans mousse. Dans la Figure 175, l'étalement augmente avec l'ajout de la mousse dans les formulations avec fibre, de façon quasi uniforme sans être affecté par la substitution.

D'après les variations de l'étalement par rapport aux formulations sans fibre Figure 176, l'étalement varie plus dans les formulations sans mousse qu'avec mousse (respectivement en moyenne 2.7% et 1.9% pour un écart de 2% de substitution). La perte en ouvrabilité sous l'effet de la substitution n'est pas significative dans les formulations avec mousse (-6% pour 6% de substitution) et de plus elle s'atténue fortement avec l'ajout de la fibre, elle diminue de -2% pour 2% de substitution et quasiment stagne à -6% pour 4% et 6% de substitution.

Dans les graphes à moustache la Figure 177, présentant la dispersion des valeurs de l'étalement, on remarque que la mousse accentue l'effet de la fibre et que la fibre a très peu d'influence sur l'effet de la mousse. Les valeurs des écarts types présentées dans le Tableau 59 confirment bien ces observations : la mousse augmente l'écart type, c'est-à-dire accentue l'effet de la fibre de 22% et la fibre augmente l'écart type, c'est-à-dire accentue l'effet de la mousse de seulement 2% en moyenne et ce jusqu'à 4% de substitution.

Dans le diagramme de Pareto Figure 178, on voit clairement que l'effet de la mousse sur l'étalement est largement plus important que celui de la fibre. En estimant l'intensité des 2 effets par les écarts types regroupés (tableaux), on peut déduire que la mousse a environ 12 fois plus d'effet que la fibre sur la variation de l'étalement (écart type mousse = 5,5 / écart type fibre = 0,47).

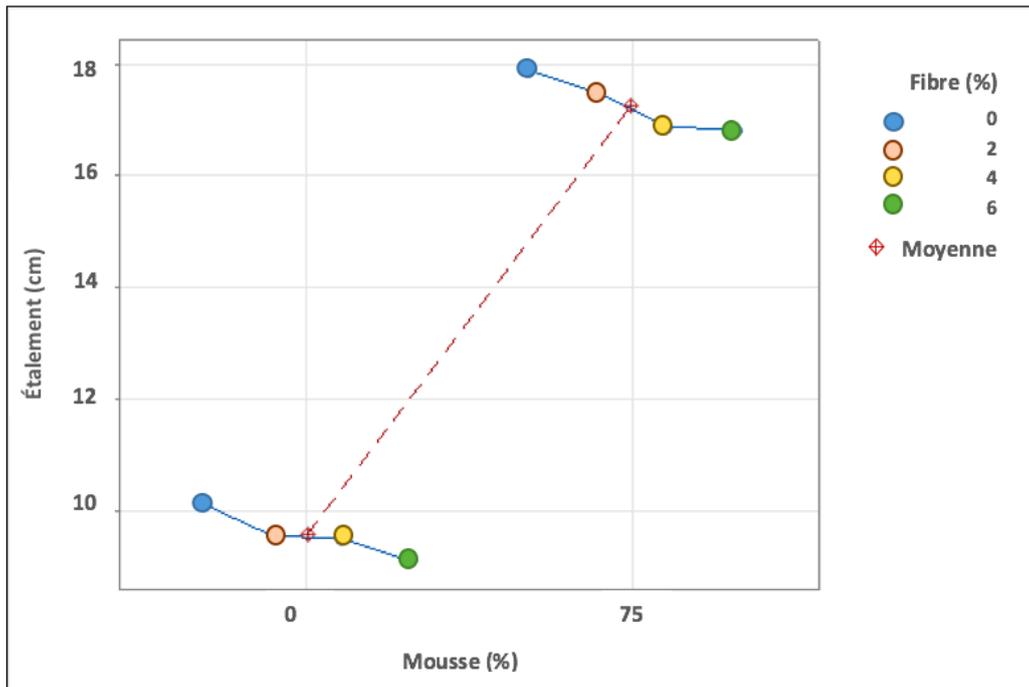


Figure 174. Variation de l'étalement en fonction de la fibre

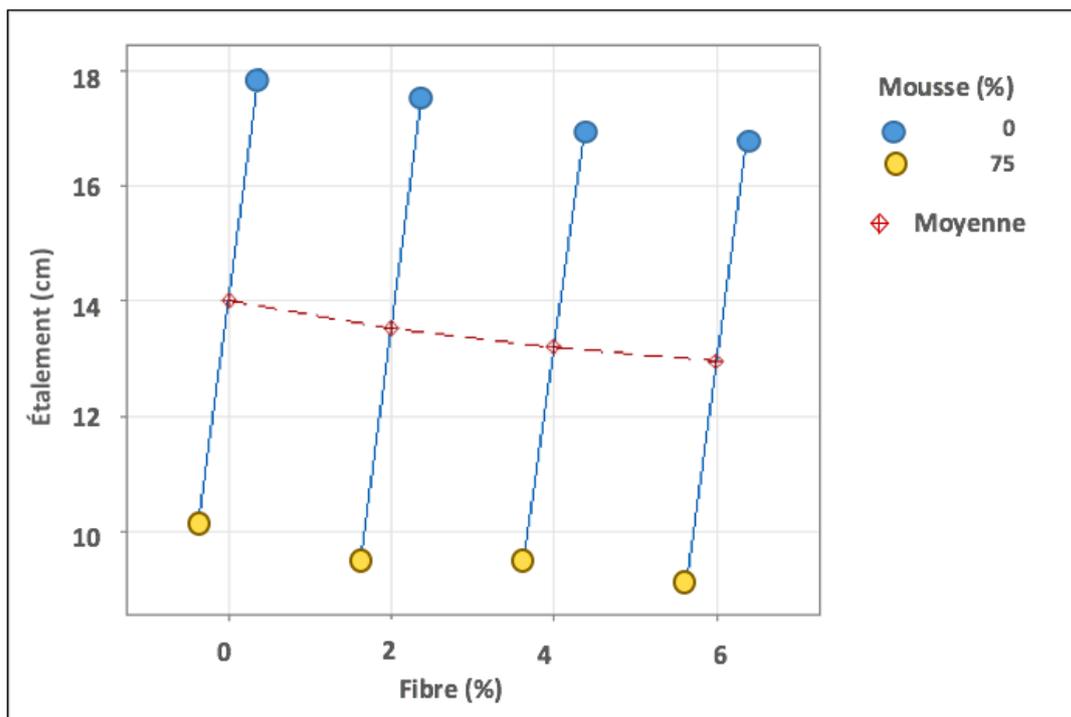


Figure 175. Variation de l'étalement en fonction de la mousse

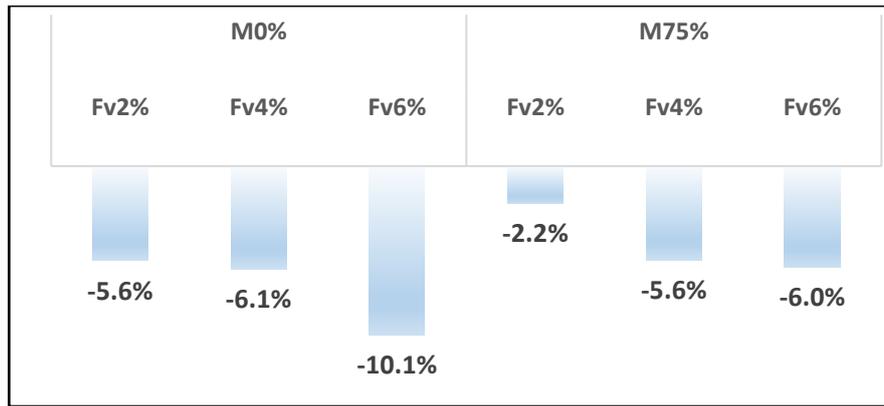


Figure 176. Variation de l'étalement par rapport aux formulations sans fibre

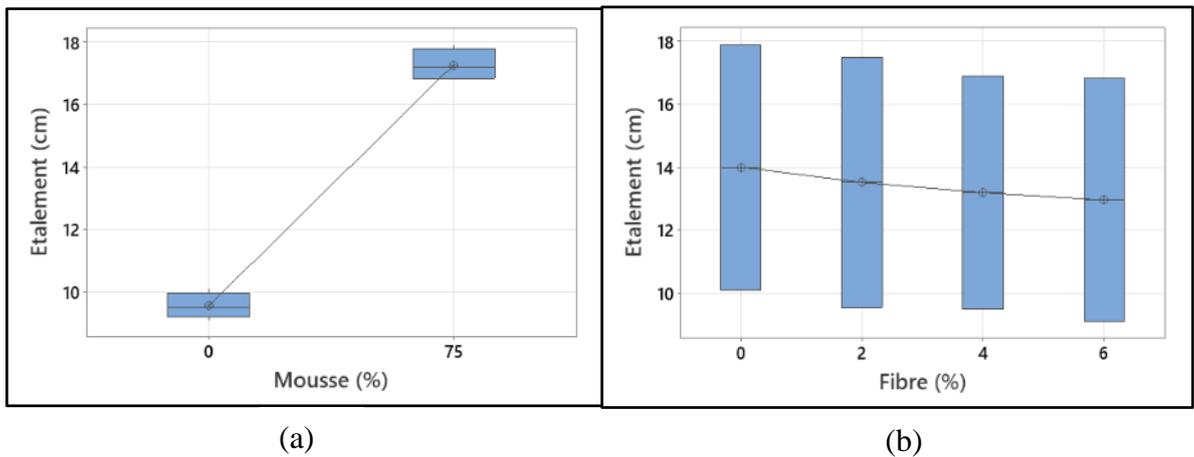


Figure 59. (a) écarts type étalement (effet de la fibre) (b) écarts type étalement (effet de la mousse)

(a)

Mousse (%)	N	EcTyp
0	4	0,420
75	4	0,513

Écart type regroupé = **0,468593**

(b)

Fibre(%)	N	EcTyp
0	2	5,50
2	2	5,62
4	2	5,23
6	2	5,46

Écart type regroupé = **5,45538**

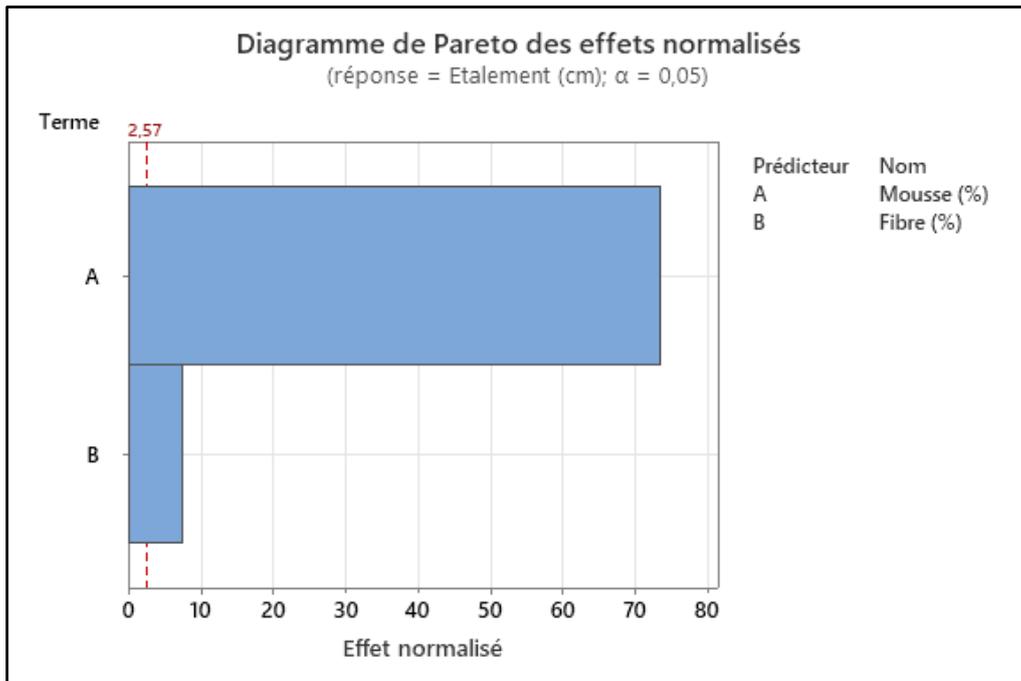


Figure 178. Diagramme de Pareto des effets de la mousse et de la fibre sur l'étalement

Les résultats de l'étalement dans le temps, présentés sur la Figure 179 montrent que, dans les formulations avec et sans mousse, l'étalement dans le temps n'est pas affecté par la substitution (une augmentation de 1% est négligeable et peut être imputée à la marge d'erreur de la mesure) ; par contre il est accéléré en moyenne de 45% par l'ajout de la mousse à 75%. Ceci est la conséquence des résultats des temps de prise illustrés dans la Figure 180, où on voit clairement que la fibre affecte très peu les temps de prise (2% en moyenne), alors que la mousse accélère fortement la prise (67% en moyenne).

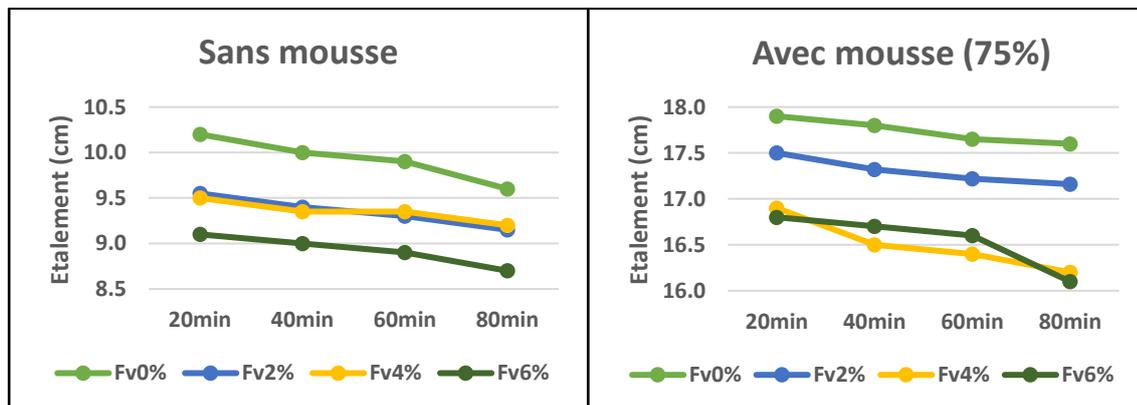


Figure 179. Évolution de l'étalement dans le temps en fonction de la fibre

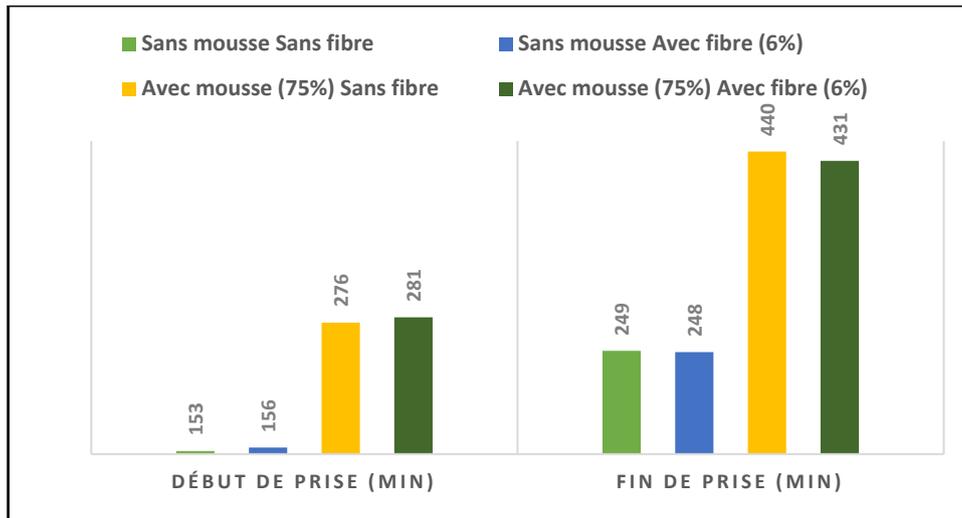


Figure 180. Variations temps de prise en fonction de la mousse et de la fibre

3.2 Interprétation et discussion

D'après le coefficient de régression de la Figure 181, on peut expliquer 98% de la variation de l'étalement par la variation de l'air occlus.

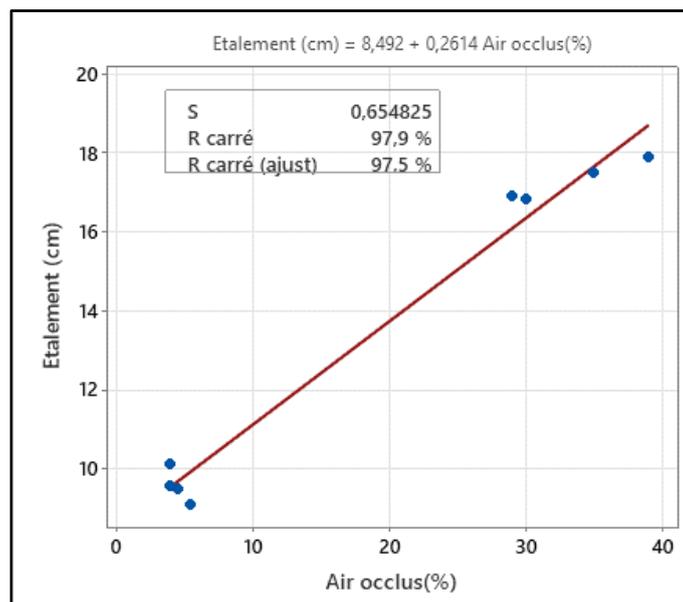


Figure 181. Courbe de régression étalement en fonction de l'air occlus

D'autres éléments explicatifs de la diminution de l'étalement dans les formulations sans mousse, peuvent être liés à une surface plus importante des fibres qui nécessite plus de mortier autour des fibres [195] pouvant entraver l'écoulement et également à leur forme cylindrique qui a tendance à réduire l'écoulement [155].

Étant donné l'inexistence de travaux similaires au notre (fibre de verre recyclée en remplacement du sable dans bétons mousse), nous nous sommes appuyés sur des recherches comparables et qui ont abouti à la même conclusion. Jones et al.[196] ont testé la fibre de verre recyclée broyée sous forme de poudre, en remplacement des granulats fins dans un béton

classique, et ont constaté une réduction de l'ouvrabilité sous l'effet de la substitution et l'ont expliquée, par la granulométrie très fine des fibres engendrant une surface plus importante et une demande en eau plus élevée. Les travaux de Mastali et al [4] concernant la substitution de la fibre de verre recyclée au sable dans un béton auto-plaçant, ont montré une réduction de l'affaissement de 15% pour un dosage de 1.25%.

Le résultat relatif à la non affectation des temps de prise par la fibre, est rencontré dans une étude assez comparable, menée par Malek et al [197] sur les fibres de verre avec polypropylène en remplacement du sable dans un mortier classique

Dans les formulations sans mousse, il a été observé un résultat inattendu qui est la diminution de l'étalement alors que l'air occlus y augmente.

3.3 Conclusion

Les essais d'ouvrabilité permettent de montrer que :

- ✓ La fibre de verre seule diminue légèrement l'étalement (2.7% en moyenne pour +2% de substitution avec teneur en mousse =75%) ;
- ✓ En présence de la mousse, la fibre continue à diminuer l'étalement de façon plus légère 1.9 % en moyenne pour +2% de substitution avec teneur en mousse =75%) ;
- ✓ La mousse augmente l'étalement dans les formulations avec fibre ;
- ✓ L'effet des mâchefers est accentué par l'ajout de la mousse, et l'effet de la mousse n'est quasi pas affecté par la fibre ;
- ✓ L'effet de la fibre sur l'ouvrabilité reste significatif par rapport à la mousse, quoique 12 fois moindre ;
- ✓ La fibre n'affecte pas les temps de prise et l'écoulement dans le temps (un effet accélérateur très faible).

On peut considérer que la fibre affecte très peu l'ouvrabilité des bétons mousse, la perte en ouvrabilité n'étant pas significative (-4.6% en moyenne).

4. À L'ÉTAT DURCI : STRUCTURE PORALE

Les résultats comparatifs issus des différents essais de la mesure de la porosité, présentés sur la Figure 182 suivant montrent comme pour les autres matériaux recyclés des valeurs sous estimées des 2 techniques expérimentales porosité par intrusion du mercure (PAM) et porosité par traitement d'images (TI tomographie X) par rapport à la technique de la porosité accessible à l'eau (PAE), vu leurs limites citées plus haut. Les équations théoriques Zheng et Hoff ont révélé des valeurs supérieures à l'expérimentation.

Les valeurs de la porosité qui seront donc retenues, sont celles de la porosité accessible à l'eau (PAE), les plus proches de la réalité.

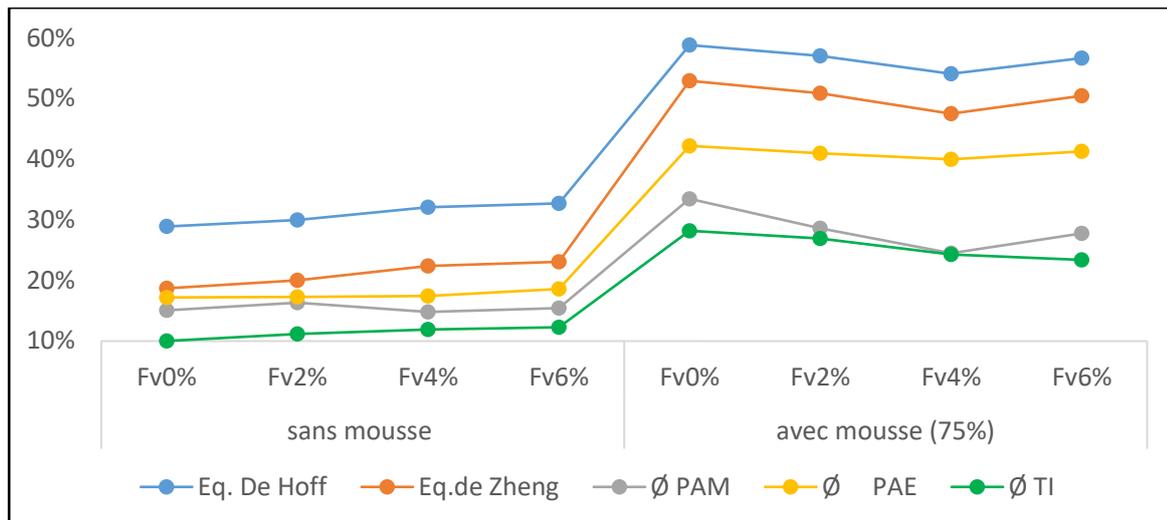


Figure 182. Courbes comparatives des techniques de mesure de la porosité

4.1 Résultats et analyse des effets

4.1.1 Porosité

La Figure 183 montre que la porosité (valeurs issues de la technique PAE) augmente avec la substitution, dans les formulations sans mousse et qu'en présence de la mousse, elle diminue jusqu'à la limite de 4% de substitution, au-delà de laquelle elle commence à augmenter. La Figure 184 montre que la porosité augmente avec l'ajout de la mousse dans les formulations avec fibre.

D'après la Figure 185, les variations de la porosité par rapport aux formulations sans fibre restent assez faibles notamment dans les formulations avec mousse où la diminution ne dépasse pas 2.6%.

Dans les graphes à moustache la Figure 186, présentant la dispersion des valeurs de la porosité, on voit que l'effet de la fibre est légèrement atténué par l'ajout de la mousse, et qu'inversement l'effet de la mousse est très légèrement atténué par la substitution jusqu'à la limite de 4%. En effet, on note bien dans le Tableau 60, que la mousse diminue l'écart type, c'est-à-dire atténue l'effet de la fibre, de -16% et que la fibre diminue l'écart type, c'est-à-dire atténue l'effet de la mousse, de seulement -3% en moyenne, et ce jusqu'à 4% de substitution.

Dans le diagramme de Pareto Figure 187, on voit bien que l'effet de la mousse sur la porosité est largement plus important que celui de la fibre et que l'effet de la fibre est non significatif. En estimant l'intensité des 2 effets par les écarts types regroupés Tableau 60, on peut déduire que la mousse a environ 28 fois plus d'effet que la fibre sur la variation de la porosité (écart type mousse = 17 / écart type fibre = 0,6).

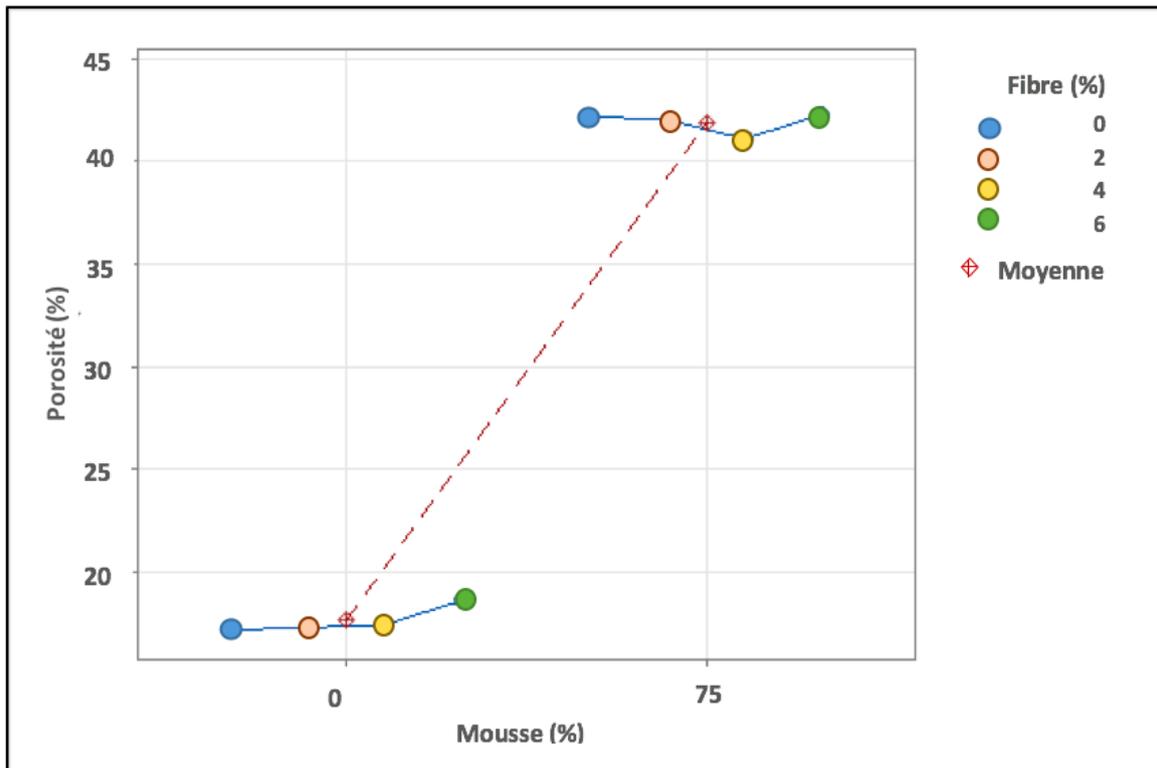


Figure 183. Variation de la porosité en fonction de la fibre

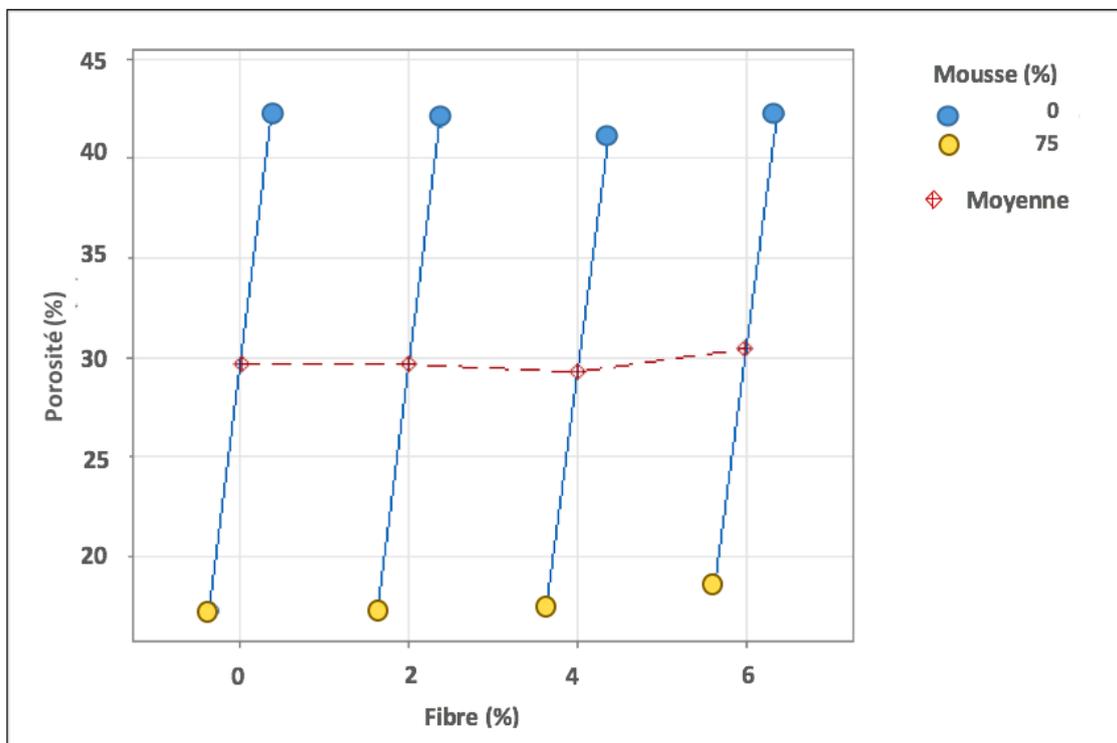


Figure 184. Variation de la porosité en fonction de la mousse

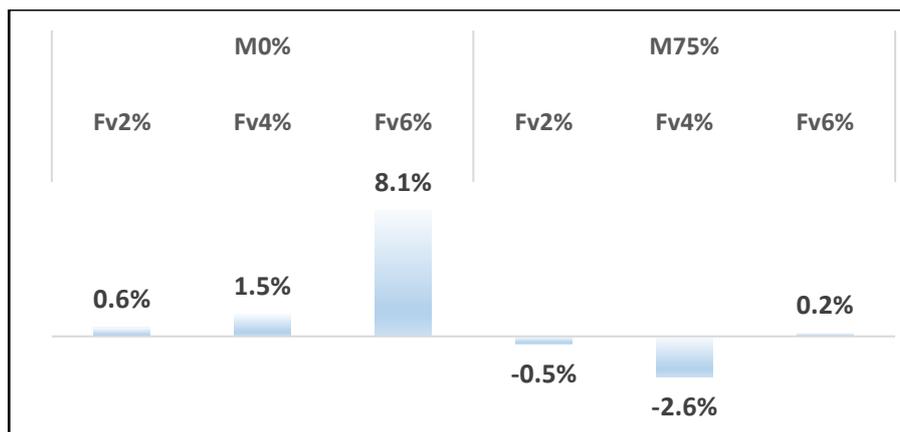
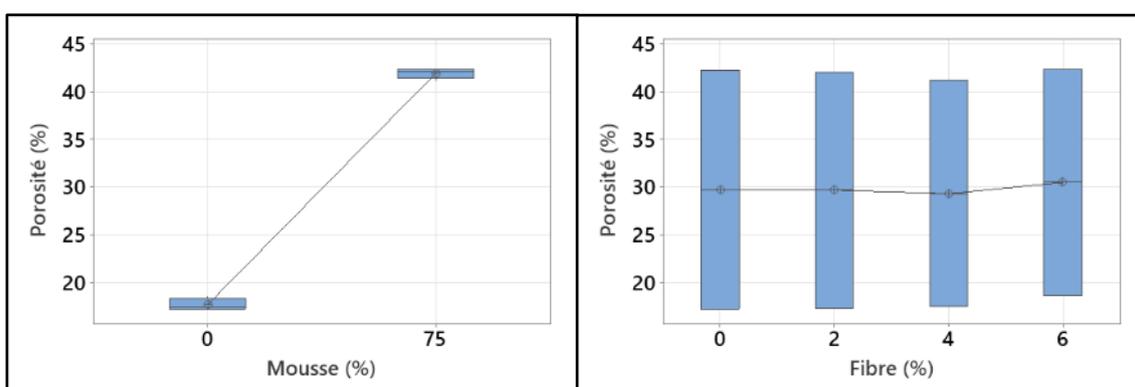


Figure 185. Variation de la porosité par rapport aux formulations sans fibre



(a)

(b)

Figure 186. (a) Distribution porosité en fonction fibre (b) Distribution porosité en fonction mousse

Tableau 60. (a) écarts type porosité (effet fibre) (b) écarts type porosité (effet de la mousse)

(a)

Mousse (%)	N	EcTyp
0	4	0,650
75	4	0,548

Écart type regroupé = **0,600954**

(b)

Fibre(%)	N	EcTyp
0	2	17,7
2	2	17,5
4	2	16,7
6	2	16,8

Écart type regroupé = **17,1614**

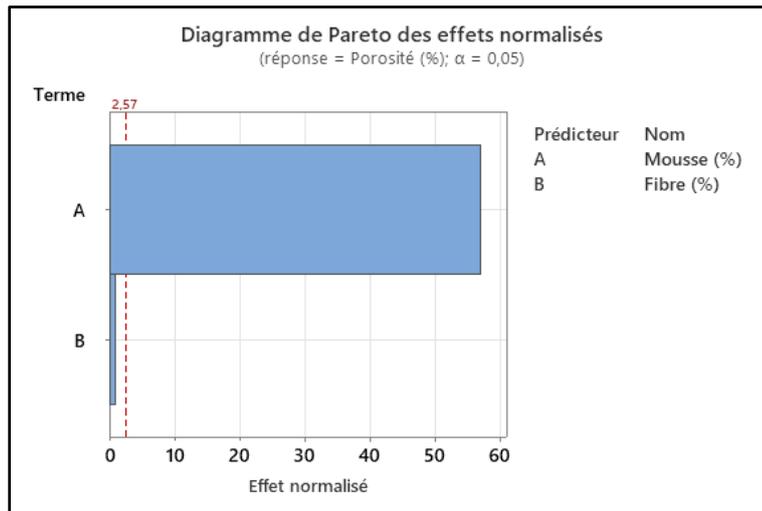


Figure 187. Diagramme de Pareto des effets de la mousse et de la fibre sur la porosité

4.1.2 Diamètre moyen, surface spécifique et circularité

Les valeurs du diamètre moyen des pores et de la surface spécifique tenues en comptes, proviennent des résultats de la porosité au mercure, et les valeurs de la circularité des pores proviennent des résultats de la tomographie X.

La Figure 188, montre que le diamètre moyen diminue avec la substitution, dans les formulations avec et sans mousse ; que la surface spécifique augmente très légèrement dans les formulations sans mousse et diminue légèrement dans la formulation avec mousse jusqu'à la limite de 6% de substitution au-delà de laquelle elle commence à augmenter. La Figure 189 montre que le diamètre moyen et la surface spécifique augmentent avec l'ajout de la mousse et que cette augmentation est légèrement atténuée par la substitution.

Quant à la circularité, la Figure 190 montre que la fibre déforme très légèrement les pores dans les formulations sans mousse, et qu'en présence de la mousse cette déformation est bien accentuée.

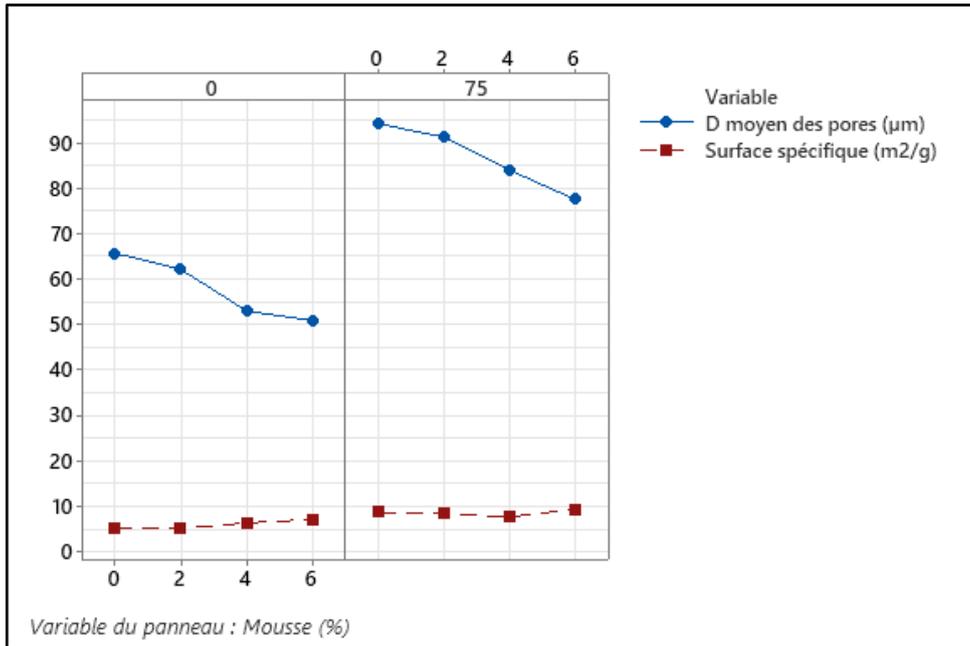


Figure 188. Variation diamètre des pores et surface spécifique en fonction de la fibre

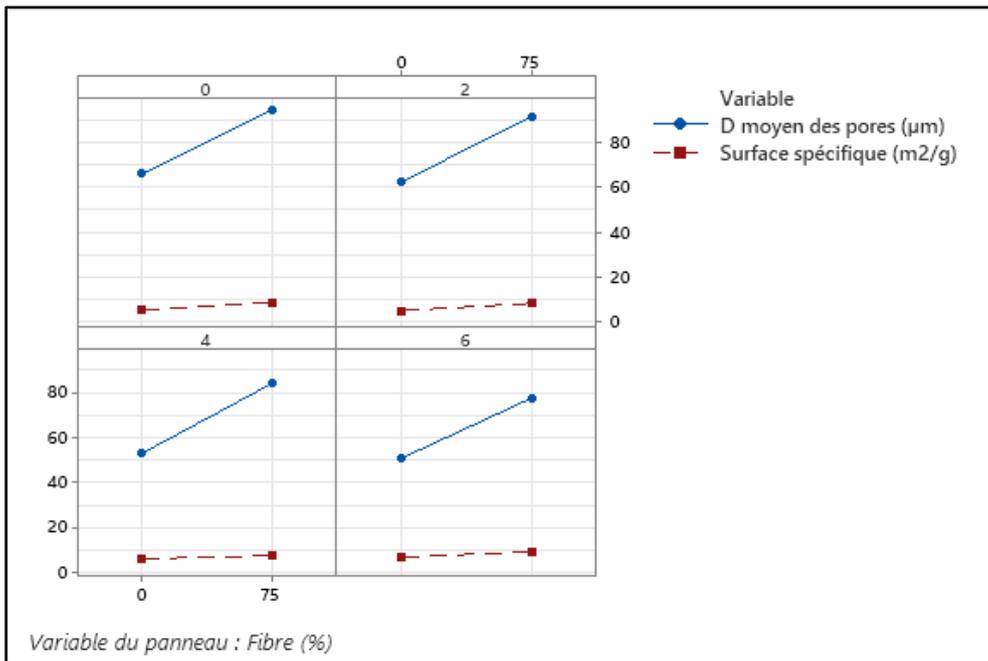


Figure 189. Variation diamètre des pores et surface spécifique en fonction de la mousse

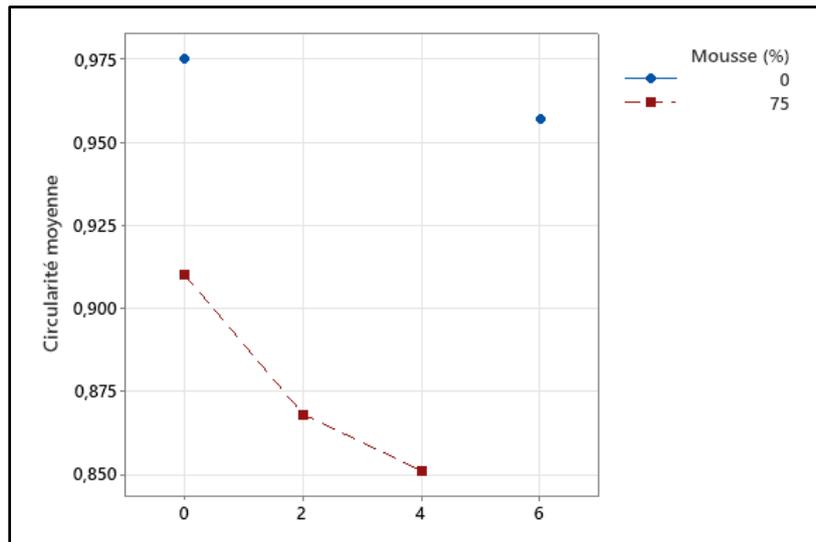


Figure 190. Variation circularité des pores en fonction de la fibre

D'après les courbes de la distribution de la taille des pores Figure 191 et Figure 192 issues de la technologie PAM, ne tenant en compte que les pores $<11\ \mu\text{m}$, on voit que dans les formulations sans mousse, la substitution augmente globalement les micropores ($<0.5\ \mu\text{m}$) et les diminuent dans les formulations avec mousse.

Les histogrammes de la distribution de la taille des pores Figure 193 issues de la technologie tomographie, ne tenant en compte que les pores $>9\ \mu\text{m}$, montrent un déplacement des principaux pics vers de plus grandes valeurs, dans les formulations sans mousse, c'est-à-dire une augmentation des macropores; et dans les formulations avec mousse, on observe une diminution des macropores. L'histogramme de la distribution des pores, montre que la majorité des vides sont de taille uniforme entre 20-200 μm .

Les histogrammes de la distribution de la circularité des pores Figure 194, issues de la technologie tomographie, montre que la forme des pores est moins régulière à mesure de la substitution et que la circularité diminue; et dans les formulations sans mousse, les pics se déplacent plus vers de plus grandes valeurs autrement dit que la circularité augmente avec la substitution. La fibre seule a donc tendance à déformer les pores et en présence de la mousse elle les reforme.

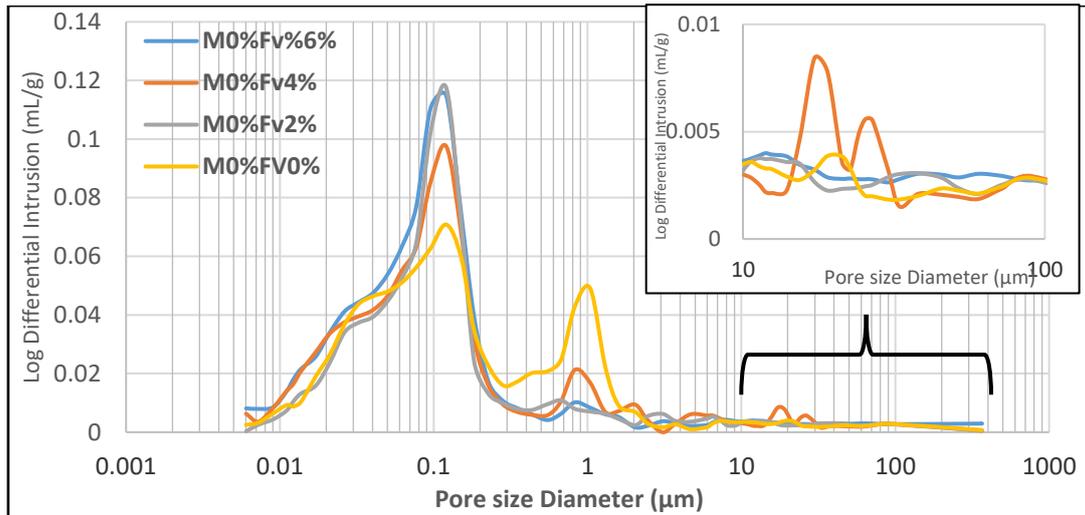


Figure 191. Courbe distribution des pores en fonction de la substitution - formulations sans mousse (PAM)

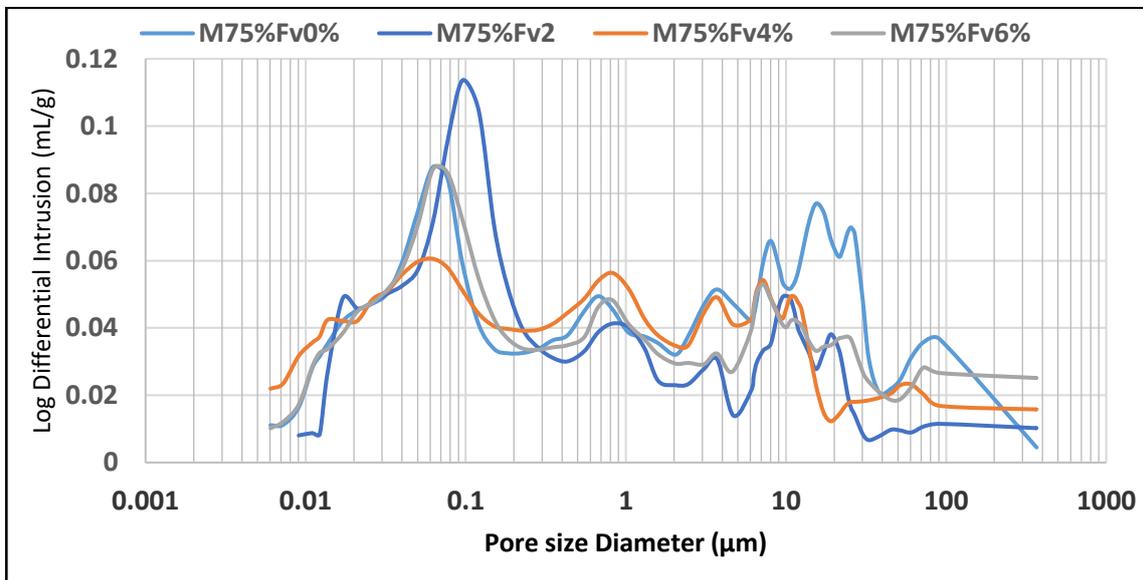


Figure 192. Courbes distribution de la taille des pores en fonction de la substitution -formulations avec mousse (PAM)

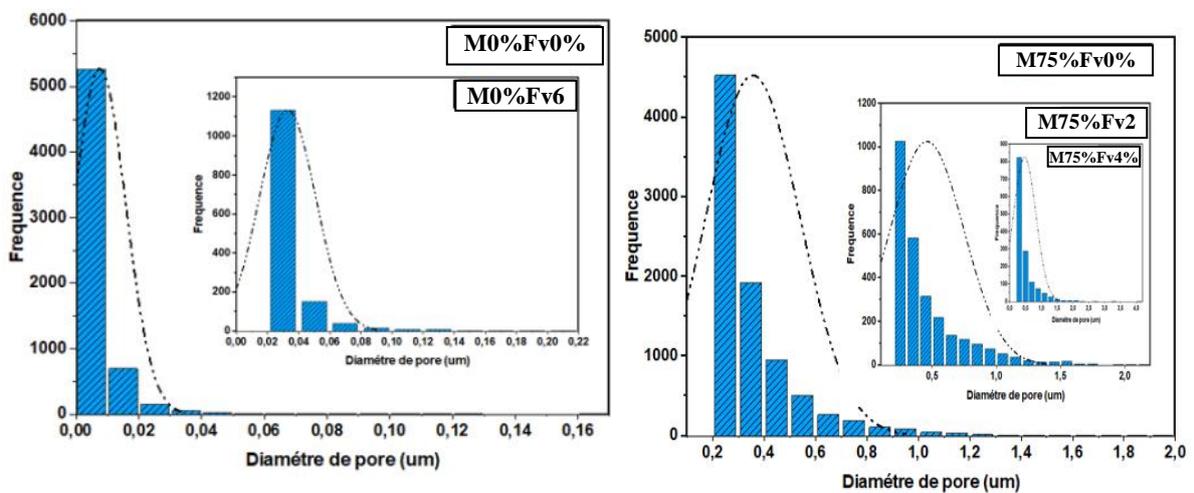


Figure 193. Histogrammes distribution de la taille des pores en fonction de la fibre (Tomographie)

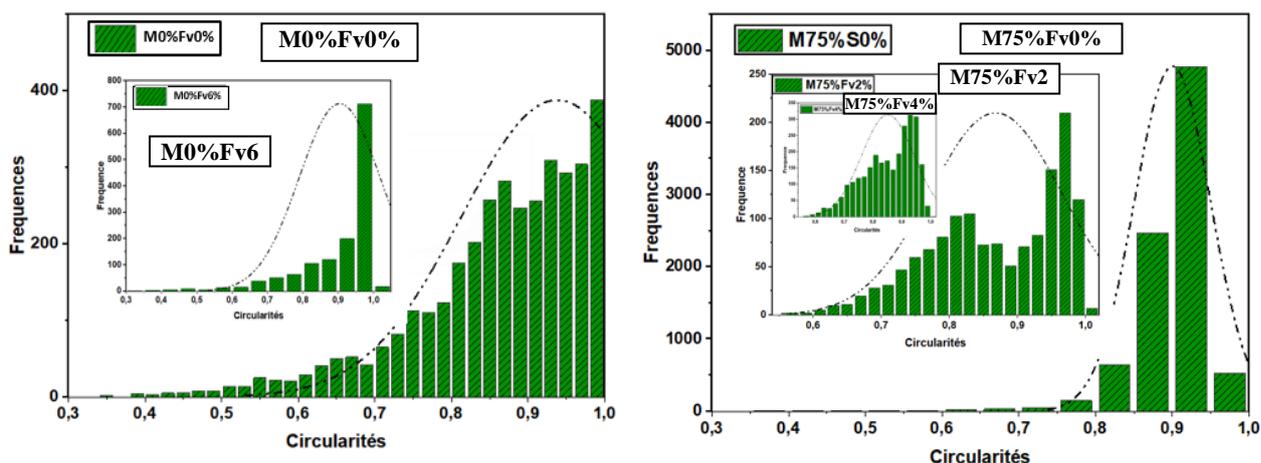
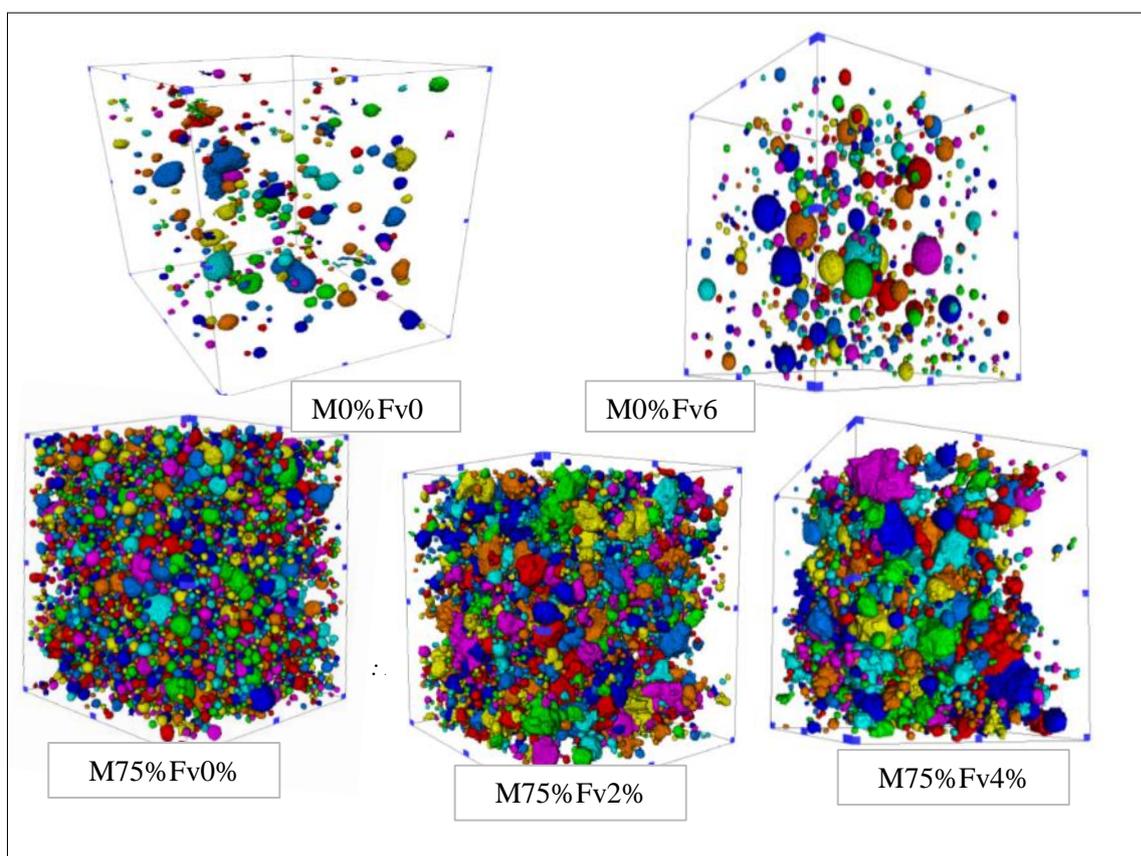


Figure 194. Histogrammes distribution de la circularité des pores en fonction de la fibre (Tomographie)

4.1.3 Observation qualitative de la porosité (Tomographie X)

D'après les images tridimensionnelles du réseau poreux des formulations sans mousse (pores $>9 \mu\text{m}$), on voit que la substitution à 6% augmente légèrement le nombre de macropores. On y remarque également que dans la formulation sans fibre les pores sont plus déformés que dans la formulation avec fibre, ce qui est en contradiction avec la diminution les valeurs de la circularité proposées par le logiciel, de Fv0% à Fv6%.

Dans les formations avec mousse, on remarque clairement qu'avec la substitution les pores diminuent et ont tendance à fusionner et à se déformer.



4.2 Interprétation et discussion

L'augmentation de la porosité dans les formulations sans mousse est due à la porosité propre de la fibre et aux vides d'air piégés dans le mélange frais comme précité dans le paragraphe relatif à l'air occlus.

La diminution de la porosité dans les formulations avec mousse, jusqu'à Fv4%, est due très probablement à l'éclatement des bulles générées par la mousse au contact des fibres. Au point d'inflexion de 4 % de substitution, où la porosité reprend la courbe ascendante, on peut supposer que les fibres à partir d'une certaine quantité commencent à s'agglomérer entre elles. Elles impactent moins les bulles générées de la mousse du fait de la diminution de la surface de contact.

Le même résultat a été trouvée par Eethar Thanon Dawood et al.[198] concernant la diminution de la porosité jusqu'à une certaine limite du taux de substitution dans les formulations avec mousse. Ces derniers ont mené une étude assez similaire à la nôtre, où ils ont testé la substitution de la fibre de verre (non recyclée) à la totalité du mortier dans un béton mousse pour des petites fractions volumiques de 0.06, 0.2, 0.4 et 0.6%.

Quelques résultats singuliers sont à commenter :

- ✓ L'augmentation brusque des micropores dans la seule formulation M75% Fv2% ;
- ✓ La diminution du diamètre moyen des pores au-delà de 4% alors que tous les autres paramètres augmentent (porosité, micropores, macropores).

4.3 Conclusion

Les comportements les plus marquants que l'on peut retenir de l'évaluation de la structure porale sont que :

- ✓ Pour les formulations sans mousse, la présence des fibres augmente la porosité et de façon limitée (8% d'augmentation pour 6% de substitution avec teneur en mousse =75%) ;
- ✓ Pour les formulations avec mousse, la fibre diminue très légèrement la porosité (la diminution n'excède pas 2.6%), jusqu'à 4% de substitution. Au-delà de cette limite les tendances sont inversées ;
- ✓ La mousse augmente la porosité dans les formulations avec fibre ;
- ✓ L'effet de la fibre est accentué par l'ajout de la mousse et l'effet de la mousse est légèrement atténué par la substitution jusqu'à la limite de 4% ;
- ✓ L'effet de la fibre sur la porosité n'est pas significatif par rapport à la mousse et il est 21 fois moindre.

5. À L'ETAT DURCI : DENSITE SECHE

5.1 Résultats et analyse des effets

La Figure 195 montre que la densité diminue avec la substitution, dans les formulations sans mousse et qu'en présence de la mousse, elle augmente, jusqu'à la limite de 4% de substitution,

au-delà de laquelle elle commence à diminuer. Ces variations sont accentuées avec l'ajout de la mousse. La Figure 196 montre que la densité diminue avec l'ajout de la mousse, dans les formulations avec fibre. Cette diminution semble être de plus en plus atténuée à mesure de la substitution jusqu'à la limite de 4%.

D'après les variations de la densité par rapport aux formulations sans fibre Figure 197, on remarque que la densité varie plus dans les formulations avec mousse que sans mousse (respectivement en moyenne 6.7% et 1.3% pour un écart de 2% de substitution). Globalement, les variations ne sont pas significatives. Dans les formulations avec mousse (75%), les taux de substitution de 2, 4 et 6% ont augmenté la densité de 4, 11 et 5%.

Dans les graphes à moustache de la Figure 198, présentant la dispersion des valeurs de la densité, on voit clairement que l'effet de la fibre est légèrement accentué par l'ajout de la mousse et qu'inversement l'effet de la mousse est atténué par la fibre jusqu'à la limite de 6% de substitution. En effet, on note bien dans le Tableau 61, que la mousse augmente l'écart type, c'est-à-dire accentue l'effet de la fibre de 8% et que la fibre diminue l'écart type, c'est-à-dire atténue l'effet de la mousse de seulement -14% en moyenne et ce jusqu'à 4% de substitution.

Dans le diagramme de Pareto Figure 199, on voit clairement que l'effet de la mousse sur la densité est largement plus important que celui de la fibre, et que l'effet la fibre est non significatif. En estimant l'intensité des 2 effets par les écarts types regroupés Tableau 61, on peut déduire que la mousse a environ 10 fois plus d'effet que la fibre sur la variation de la densité (écart type mousse = 567 / écart type fibre = 58).

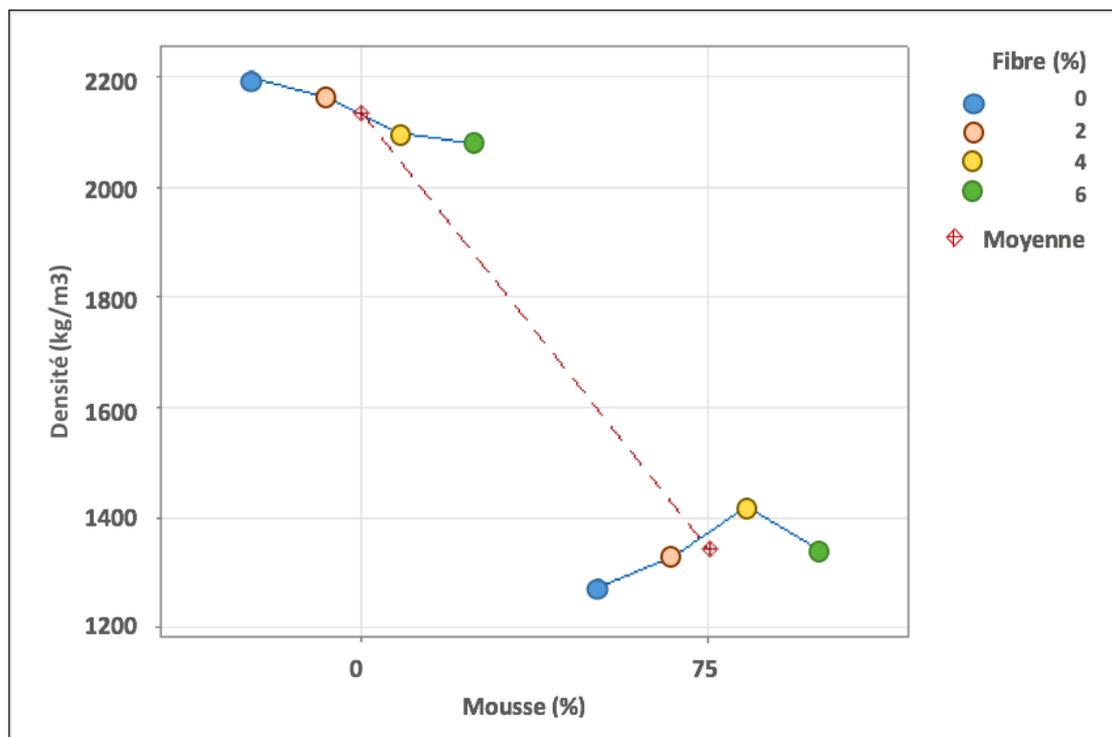


Figure 195. Variation de la densité en fonction de la fibre

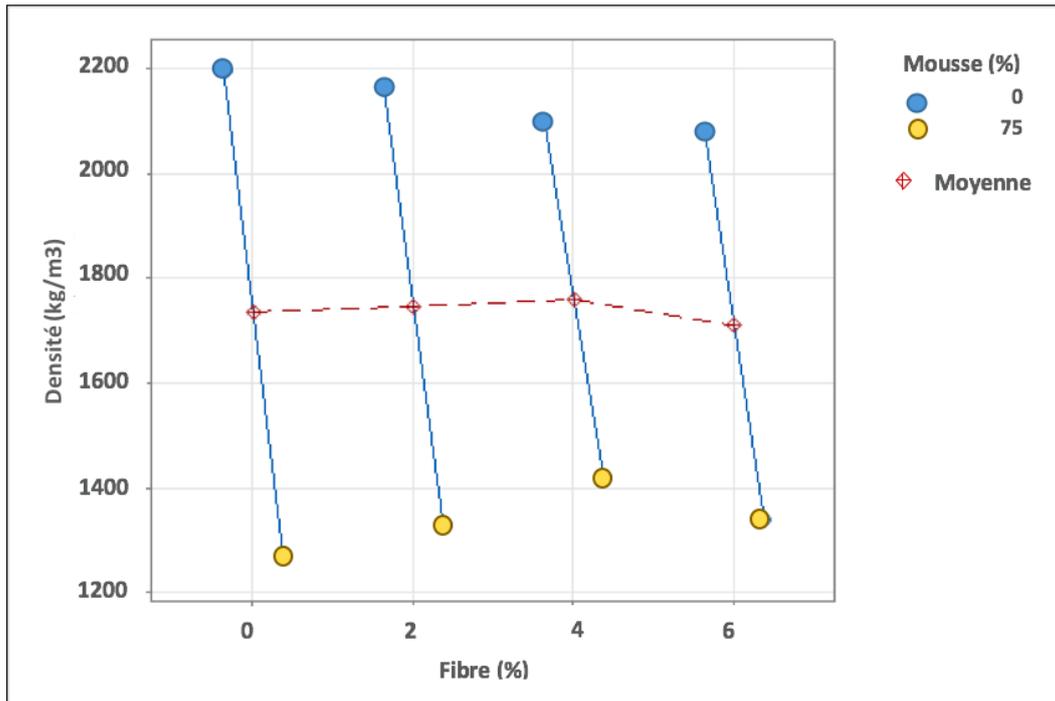


Figure 196. Variation de la densité en fonction de la mousse

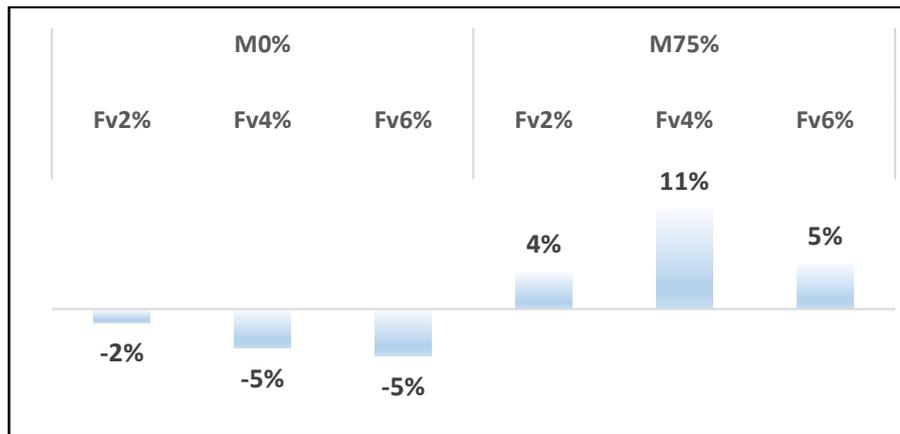


Figure 197. Variation de la densité par rapport aux formulations sans fibre

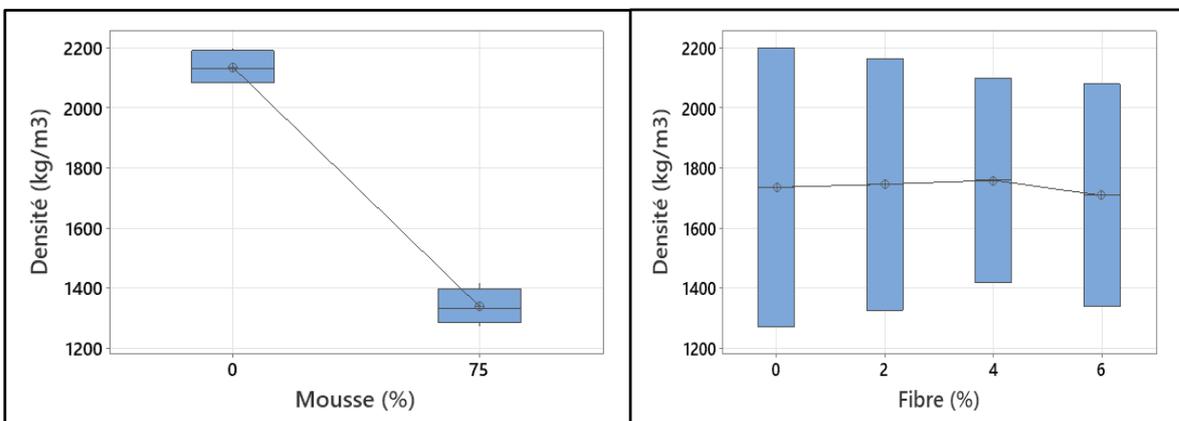


Tableau 61. Écarts type densité (effet de la fibre) (b) écarts type densité (effet de la mousse)

(a)			(b)		
Mousse (%)	N	EcTyp	Fibre(%)	N	EcTyp
0	4	56,0	0	2	655
75	4	60,4	2	2	592
			4	2	481
			6	2	523
Écart type regroupé = 58,2213			Écart type regroupé = 566.708		

Figure 198. Distribution densité en fonction fibre (b) Distribution densité en fonction mousse

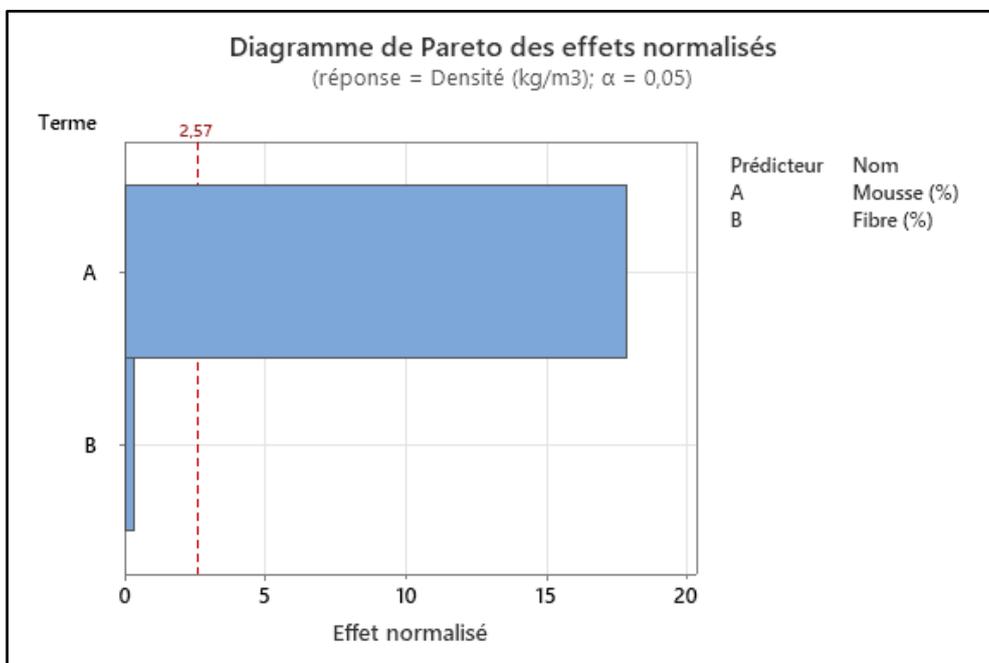


Figure 199. Diagramme de Pareto des effets de la fibre et mousse sur la densité

5.2 Interprétation et discussion

On peut déduire, d'après le coefficient de régression entre la densité et la porosité Figure 200, que les variations de la densité, sont expliquées à 99% par les variations de la porosité observées lors de l'analyse de la structure porale. La densité dépend plus de la surface spécifique (à 84%) et de la taille des pores (à 81%) que de leur forme (75%) Figure 201.

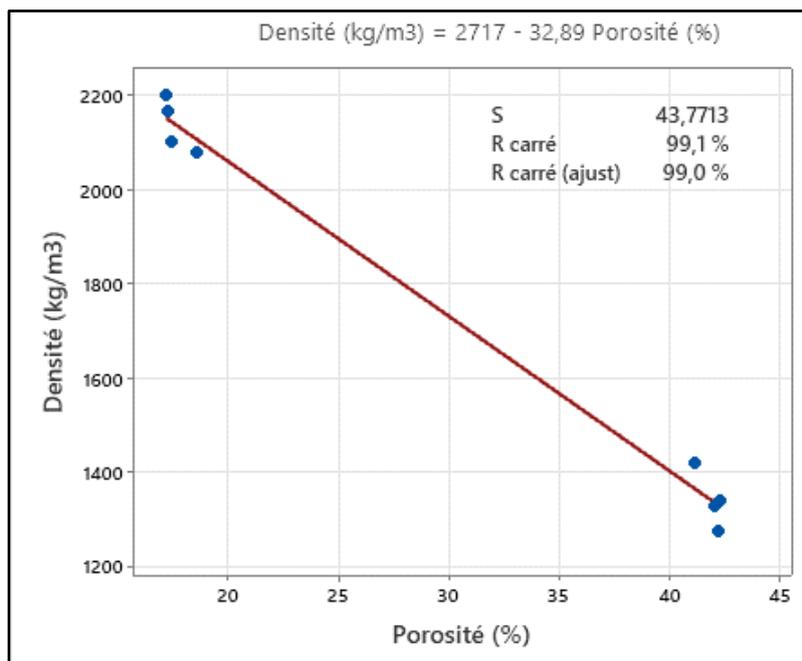


Figure 200. Courbe de régression densité en fonction de la porosité

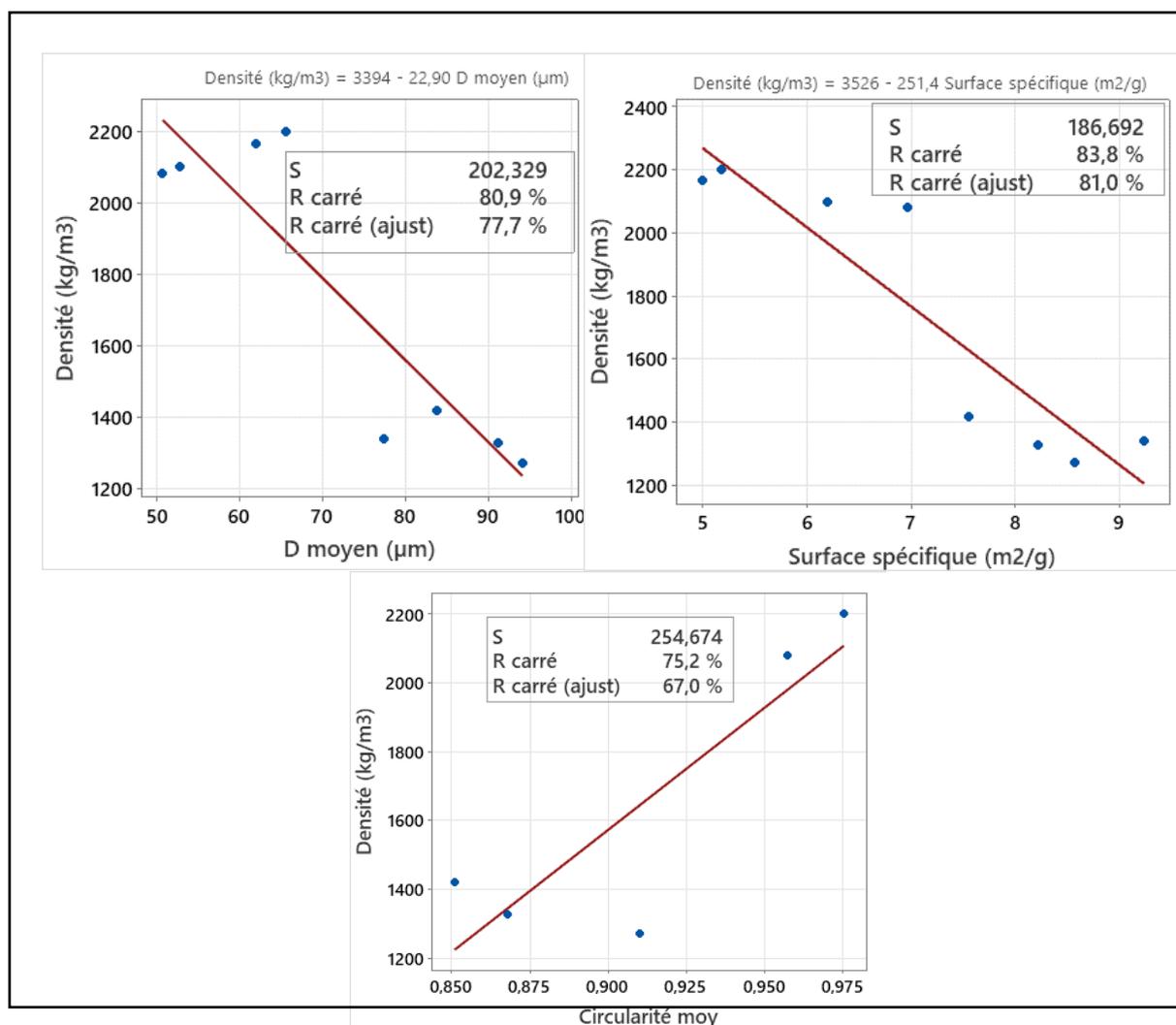


Figure 201. Courbes de régression densité en fonction du diamètre circularité et surface spécifique

La légèreté de la fibre par rapport au sable peut expliquer également la diminution de la densité dans les formulations sans mousse.

Le résultat de la réduction de la densité de 2% à 5% dans les formulations sans mousse, rejoint les résultats de Asokan [136] ayant travaillé sur la substitution de la fibre de verre recyclé en poudre aux agrégats fins dans un béton classique, qui montrent une baisse de la densité sèche de 1 à 11 % avec des taux de substitution de 5 à 50%.

Dans les formulations avec mousse, le même résultat lié à l'augmentation de densité sèche jusqu'à une certaine limite, a été trouvée par Eethar Thanon Dawood et al.[198] dans l'étude précitée concernant la substitution de la fibre de verre (non recyclée) à la totalité du mortier, dans un béton mousse, pour des petites fractions volumiques de 0.06, 0.2, 0.4 et 0.6%

5.3 Conclusion

Pour résumer, l'expérimentation a permis de découvrir que :

- ✓ La fibre seule diminue légèrement la masse volumique (de 2 à 5% pour taux de substitution de 2 à 6 %) ;
- ✓ En présence de la mousse, la fibre augmente légèrement la masse volumique, jusqu'à la limite de 4% de substitution au-delà de laquelle la densité commence à diminuer ;
- ✓ La mousse diminue la densité dans les formulations avec mâchefers ;
- ✓ L'effet des mâchefers est accentué par l'ajout de la mousse, et inversement l'effet de la mousse est atténué par la substitution, jusqu'à la limite de 4% ;
- ✓ L'effet de la fibre sur la masse volumique n'est pas significatif par rapport à la mousse, et il est 10 fois moindre.

On peut conclure, pour ce chapitre, que la substitution de la fibre de verre est favorable à la densité, étant donné que pour obtenir des bétons mousse plus légers, les taux de substitution doivent dépasser une certaine limite. À titre indicatif, cette limite est estimée à 7.7% pour une teneur en mousse de 75%. Les bétons mousse obtenus sont donc plus légers pour des taux de substitution supérieures à environ 8%, et en deçà de 8%, ils sont légèrement moins légers de 7% en moyenne.

6. À L'ÉTAT DURCI : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION

6.1 Résultats et analyse des effets

La Figure 202 montre que la résistance à la compression (R_c) diminue avec la substitution, dans les formulations sans mousse et brutalement de 2 à 4% de substitution, et qu'en présence de la mousse, elle augmente légèrement avec la substitution, jusqu'à la limite de 4% de substitution, au-delà de laquelle elle commence à diminuer. La Figure 203 montre que la résistance diminue avec l'ajout de la mousse, dans les formulations avec fibre. Cette diminution est de plus en plus atténuée à mesure de la substitution.

D'après les variations de la résistance par rapport aux formulations sans fibre Figure 204, on remarque que la résistance varie beaucoup moins dans les formulations sans mousse qu'avec

mousse (respectivement en moyenne -11% et 52% pour un écart de 2% de substitution). Dans les formulations avec mousse (75%), une augmentation importante de la résistance (+80%) est enregistrée avec 4% de fibre, et au-delà de ce taux, la résistance connaît une baisse non négligeable, les taux de substitution de 2,4 et 6% ont augmenté cette résistance de 19, 80 et 36%.

Dans les graphes à moustache des Figure 205, présentant la dispersion des valeurs de la résistance, on voit clairement que l'effet de la fibre est atténué par l'ajout de la mousse, et qu'inversement l'effet de la mousse est atténué par la fibre , jusqu'à la limite de 4% de substitution. En effet, on note bien dans le Tableau 62, que la mousse diminue l'écart type, c'est-à-dire atténue l'effet de la fibre, fortement de -87%% et que la fibre diminue l'écart type, c'est-à-dire atténue l'effet de la mousse, de seulement -16% en moyenne , et ce jusqu'à 4% de substitution.

Dans le diagramme de Pareto Figure 206, on voit bien que l'effet de la mousse sur la résistance est largement plus important que celui de la fibre, et que l'effet de la fibre est non significatif. En estimant l'intensité des 2 effets par les écarts types regroupés Tableau 62, on peut déduire que la mousse a environ 6 fois plus d'effet que la fibre sur la variation de la résistance (écart type mousse = 22,7 / écart type fibre =3,9).

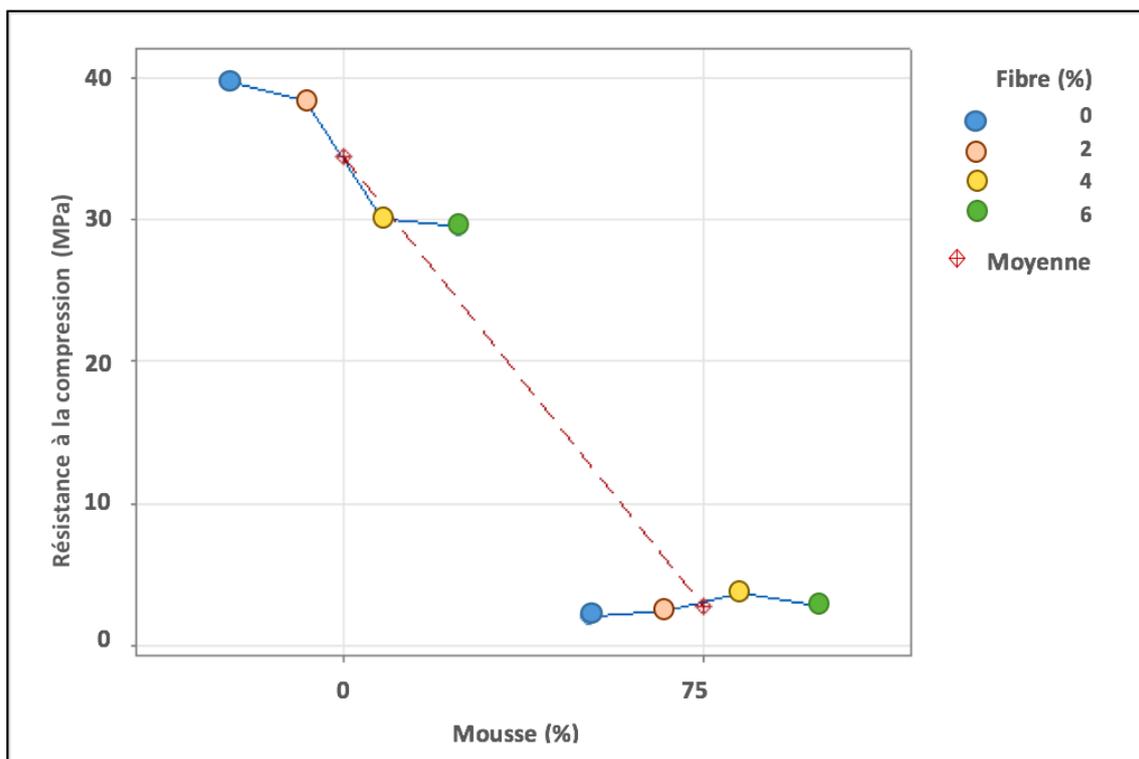


Figure 202. Variation de la résistance compression en fonction de la fibre

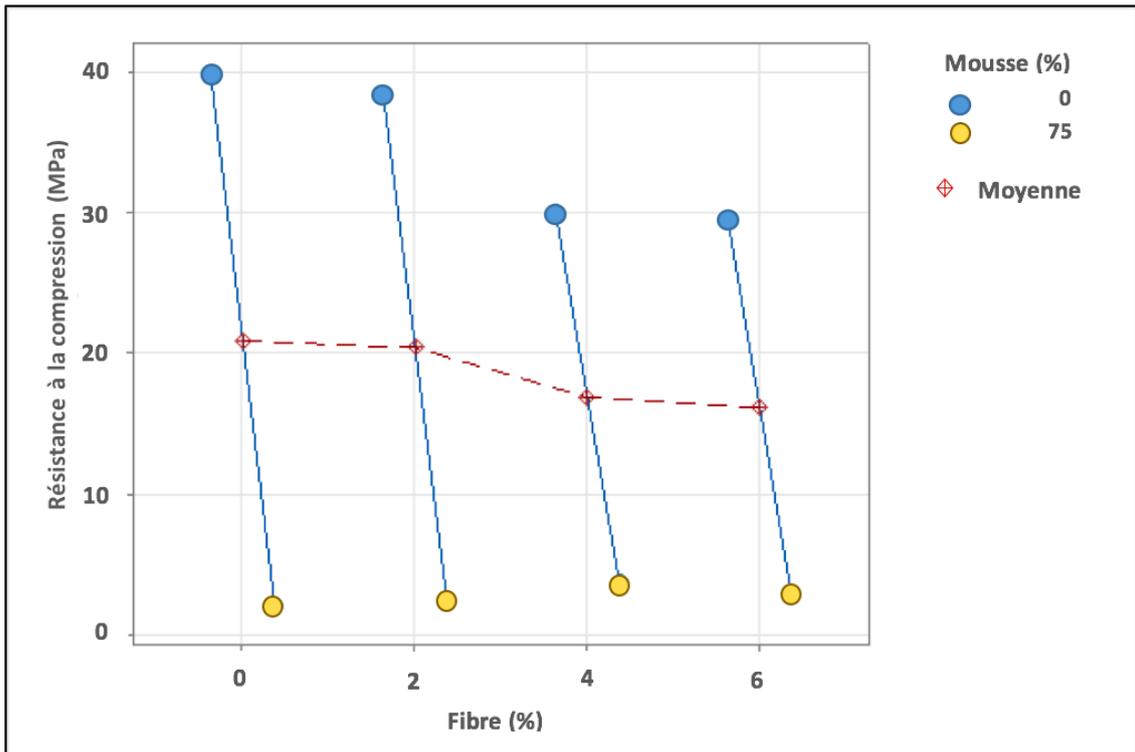


Figure 203. Variation de la résistance compression en fonction de la mousse

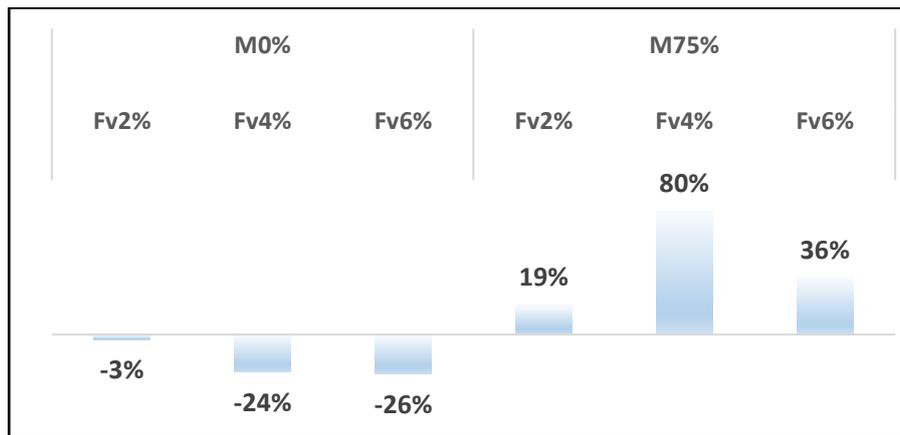


Figure 204. Variation de la résistance compression par rapport aux formulations sans fibre

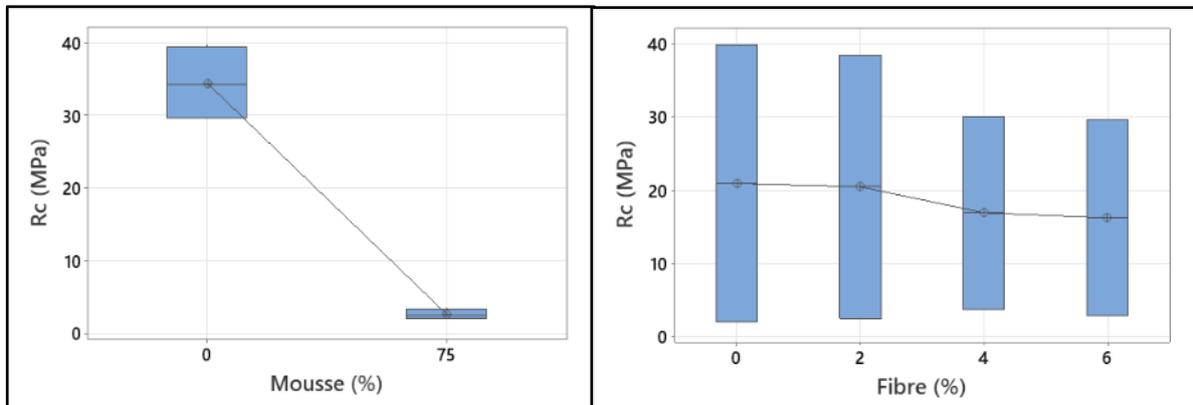


Fig (a) (a) Distribution R_c en fonction fibre (b) Distribution R_c en fonction mousse

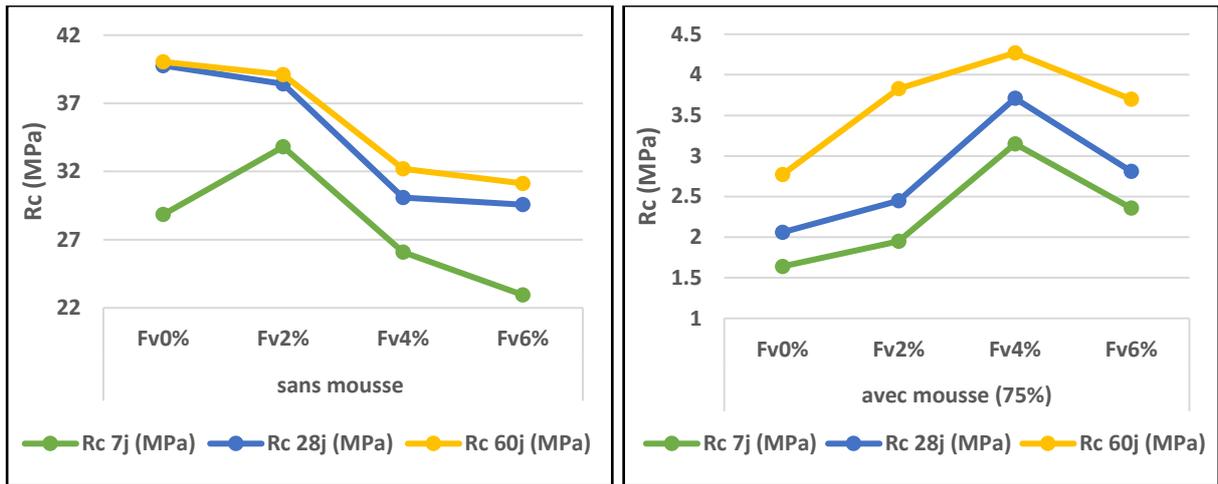


Figure 207. Comparaison des 3 résistances à 7, 28 et 60 jours (formulations avec et sans mousse)

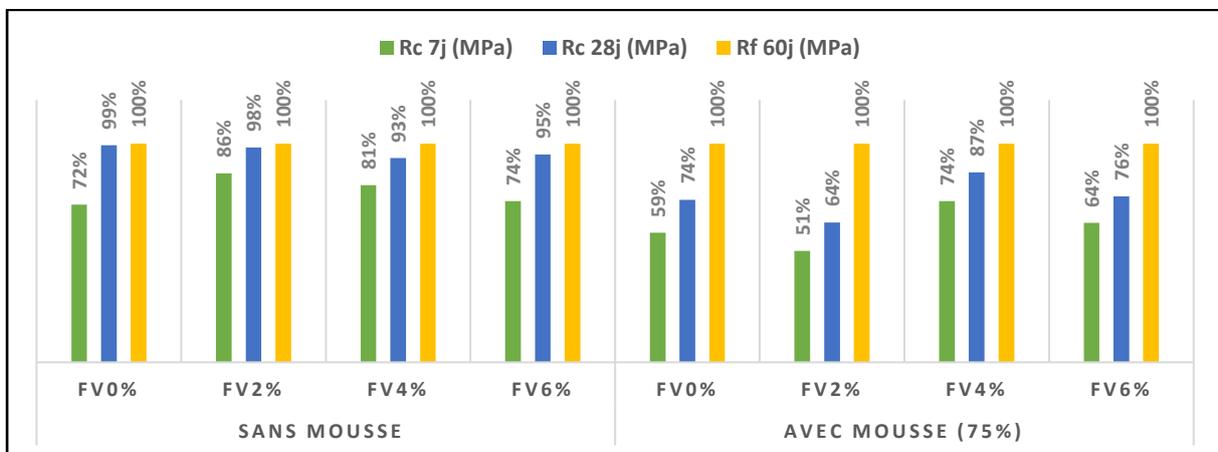


Figure 208 Rapport des résistances à la résistance finale (60journs)

6.3 Interprétation et discussion

On peut expliquer 97% des variations de la résistance par les variations de la porosité, comme montré par le coefficient de régression de la Figure 209. Le paramètre le plus influent est la surface spécifique (87%) suivi de la forme des pores (81%) puis de la taille des pores (71%) Figure 210.

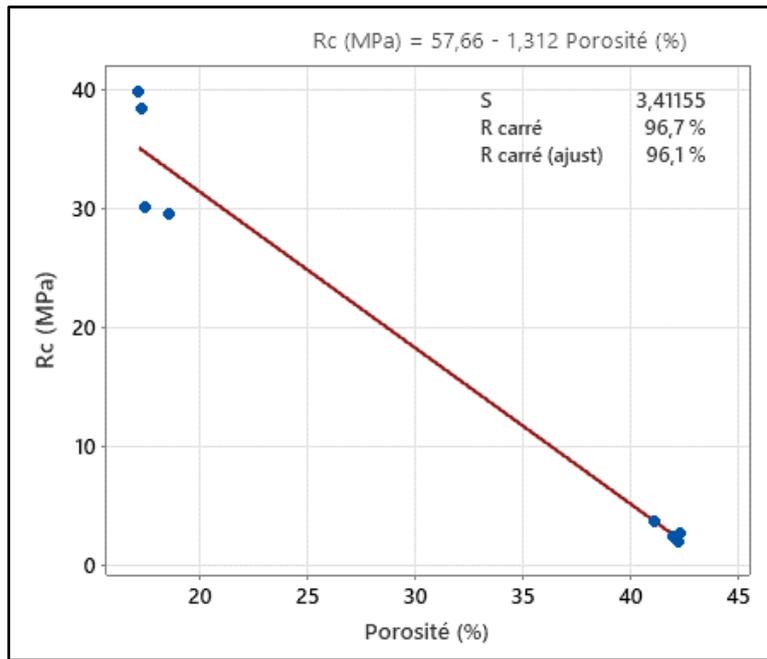


Figure 209. Courbe de régression Rc on en fonction de la porosité

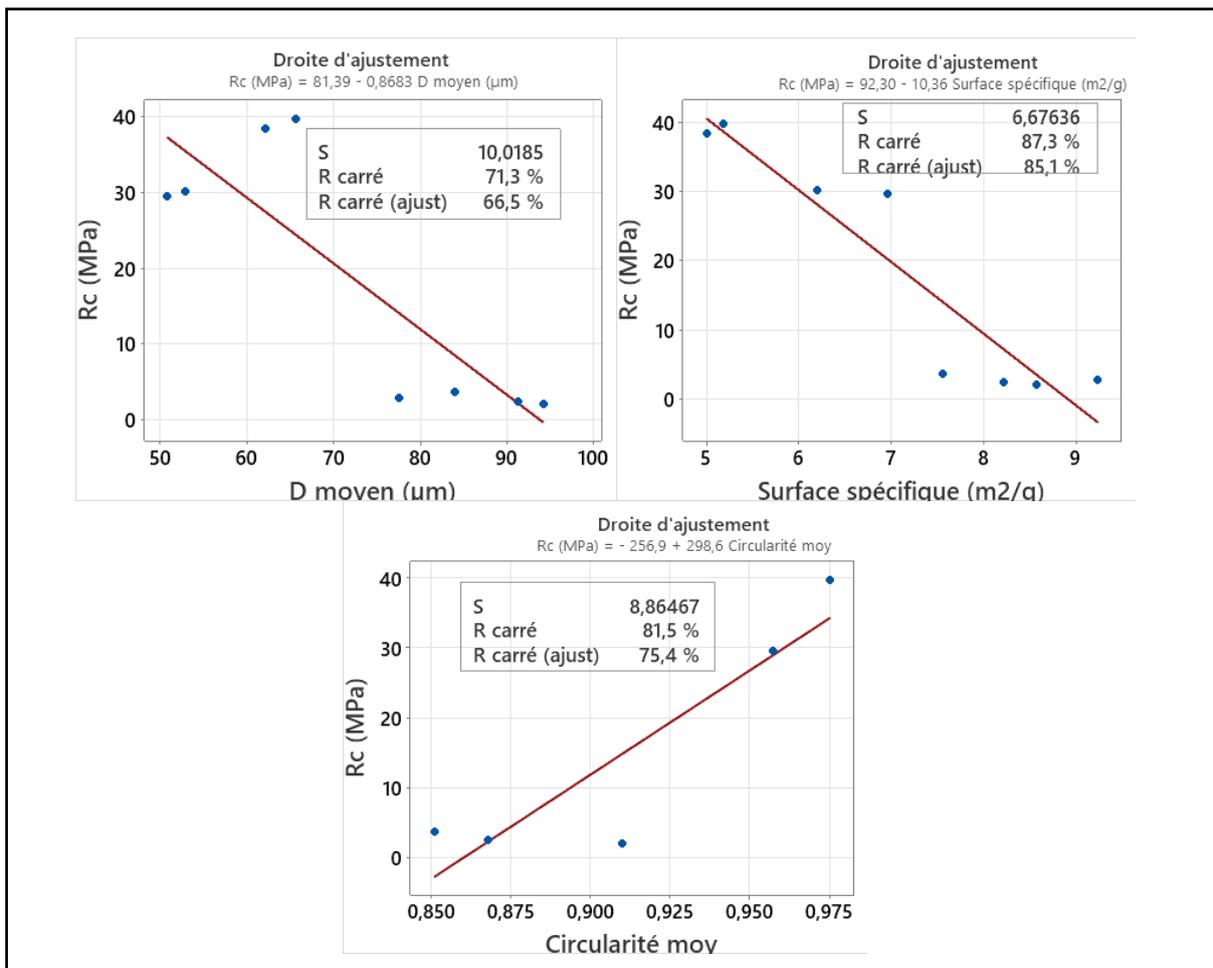


Figure 210. Courbes de régression Rc en fonction du diamètre, circularité et surface spécifique

La présence de la résine dans le matériau est censée conférer au béton un gain en résistance en compression. Or c'est le contraire qui a été observé dans les formulations sans mousse.

Ceci peut être dû à la surface lisse de la résine, qui pourrait perturber l'adhérence avec la matrice cimentaire et affaiblir ainsi la résistance. Une étude de João et al.[155] confirme bien ce résultat en montrant que la fibre de verre recyclée fine peut sérieusement affecter les propriétés mécaniques du béton, même pour de faibles taux de substitution; une réduction importante de la résistance à la compression de 19.4% pour une substitution volumique de 5% a été trouvée, et est assez comparable à nos résultats, où 4 et 6% de substitution a entraîné une réduction de 24 et 26%.

Suivant les conclusions d'autres auteurs Tittarelli et Moriconi, 2010 [137], l'incorporation de proportions plus élevées de fibre de verre recyclée en substitution aux granulats, a un effet néfaste sur toutes les propriétés mécaniques. Malgré le fait que cette procédure de substitution entraîne une porosité et une communication interstitielle inférieures, l'une des principales caractéristiques de la fibre de verre recyclée, qui semble affecter les propriétés du béton est que la forme cylindrique des particules qui affecte la zone d'interface au lieu de favoriser la liaison entre les composants du béton.

Dans les formulations avec mousse, le même résultat concernant l'augmentation de la résistance à la compression jusqu'à une certaine limite, a été trouvée par Eethar Thanon Dawood et al.[198] dans l'étude précitée concernant la substitution de la fibre de verre (non recyclée) à la totalité du mortier, dans un béton mousse, pour des petites fractions volumiques de 0.06, 0.2, 0.4 et 0.6%.

La diminution de la résistance à partir de 4% peut être liée aux fibres, qui à partir d'une certaine quantité, s'agglomèrent en amas, et peuvent perturber l'homogénéité du mélange et créer des zones de faiblesse[199][200] ayant une répercussion négative sur la résistance à la compression.

La corrélation entre la résistance mécanique et la densité est bien vérifiée avec $R^2=98\%$ Figure 211.

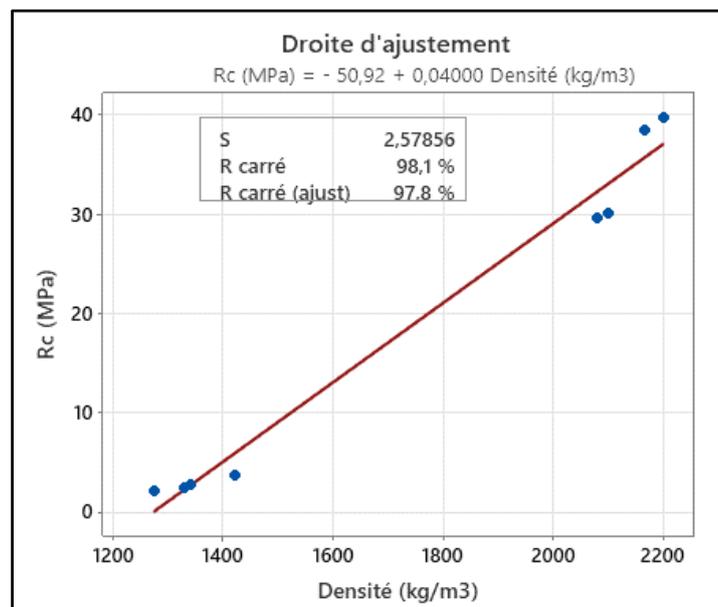


Figure 211. Courbe de régression Résistance à la compression - Densité

6.4 Conclusion

L'expérimentation a permis de mettre en évidence que :

- ✓ La fibre seule diminue légèrement la résistance (en moyenne -11% pour un écart de +2% de substitution pour une teneur en mousse = 75%) ;
- ✓ En présence de la mousse, la fibre augmente fortement la résistance (en moyenne +62% pour un écart de +2% de substitution pour une teneur en mousse = 75%), jusqu'à la limite de 4% de substitution, au-delà de laquelle la résistance commence à diminuer ;
- ✓ La mousse diminue la résistance dans les formulations avec fibre ;
- ✓ L'effet de la fibre est atténué par l'ajout de la mousse et inversement ;
- ✓ L'effet de la fibre sur la masse volumique n'est pas significatif par rapport à la mousse, et il est 6 fois moindre.

On peut conclure, pour ce chapitre, que la substitution de la fibre de verre, à 35% de fibres de verre, est favorable à la résistance à la traction si on ne dépasse pas un certain taux de substitution assez important. À titre indicatif, cette limite est estimée à 7.7% pour une teneur en mousse de 75%. En deçà de cette limite, la résistance à la compression a augmenté en moyenne de 45% (maximal de 80% pour 4% de substitution).

7. À L'ÉTAT DURCI : LA RESISTANCE EN FLEXION

7.1 Résultats et analyse des effets

La Figure 212 montre que dans les formulations sans mousse, la résistance à la flexion (R_f) diminue de façon brutale pour Fv4% et augmente très légèrement pour Fv2 et 4% (+1%), et qu'en présence de la mousse, elle augmente toujours, jusqu'à la limite de 4% de substitution, au-delà de laquelle elle commence à diminuer. La Figure 213 montre que la résistance diminue avec l'ajout de la mousse, dans les formulations avec fibre. Cette diminution est de plus en plus atténuée à mesure de la substitution, jusqu'à la limite de 4%.

D'après les variations de la résistance par rapport aux formulations sans fibre Figure 214, on remarque que la résistance en flexion varie légèrement plus dans les formulations sans mousse qu'avec mousse (respectivement en moyenne -9% et +7% pour un écart de 2% de substitution). On obtient un gain en résistance qui atteint de +40% pour 4% de substitution dans les formulations avec mousse, les taux de substitution de 2, 4 et 6% ont augmenté cette résistance de 22, 40 et 24%.

Dans les graphes à moustache Figure 215, présentant la dispersion des valeurs de la résistance, on voit clairement que l'effet de la fibre est atténué par l'ajout de la mousse, et qu'inversement l'effet de la mousse est atténué par la fibre, jusqu'à la limite de 6% de substitution. En effet, on note bien dans le Tableau 63, que la mousse atténue fortement l'effet de la fibre de -68% et que la fibre atténue l'effet de la mousse, de seulement -14% en moyenne, et ce jusqu'à 4% de substitution.

Dans le diagramme de Pareto Figure 216, on voit bien que l'effet de la mousse sur la résistance est largement plus important que celui de la fibre, et que l'effet de la fibre est non

significatif. En estimant l'intensité des 2 effets par les écarts types regroupés Tableau 63, on peut déduire que la mousse a environ 7,5 fois plus d'effet que la fibre sur la variation de la résistance (écart type mousse = 0,7/ écart type fibre = 5,2).

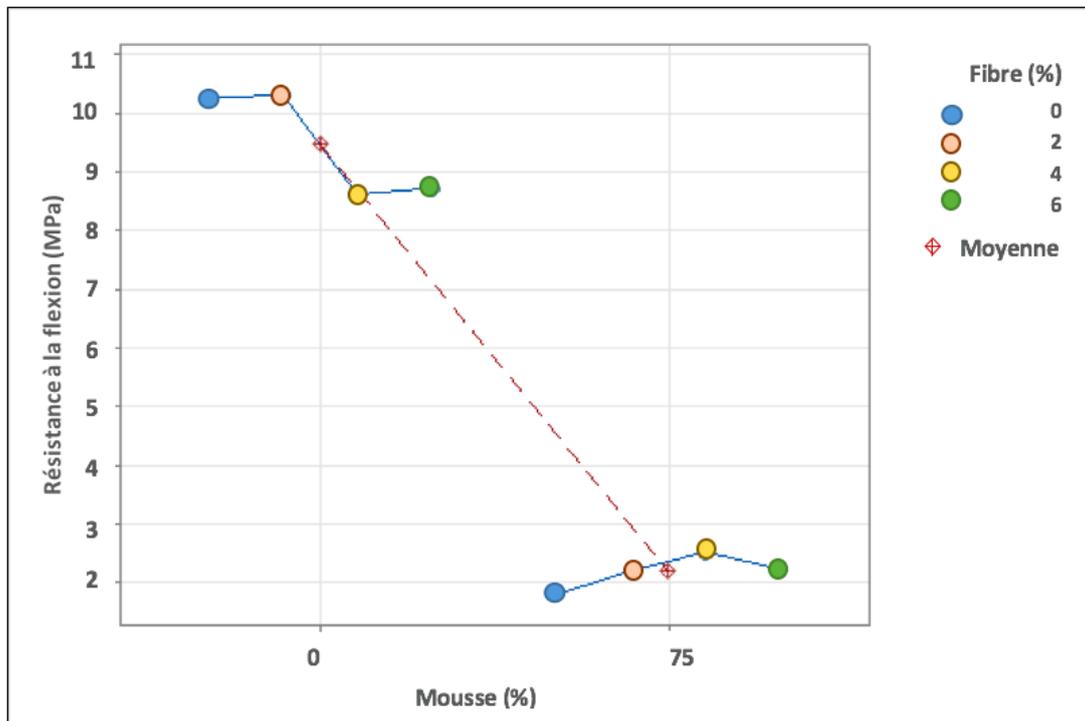


Figure 212. Variation de la résistance flexion en fonction de la fibre

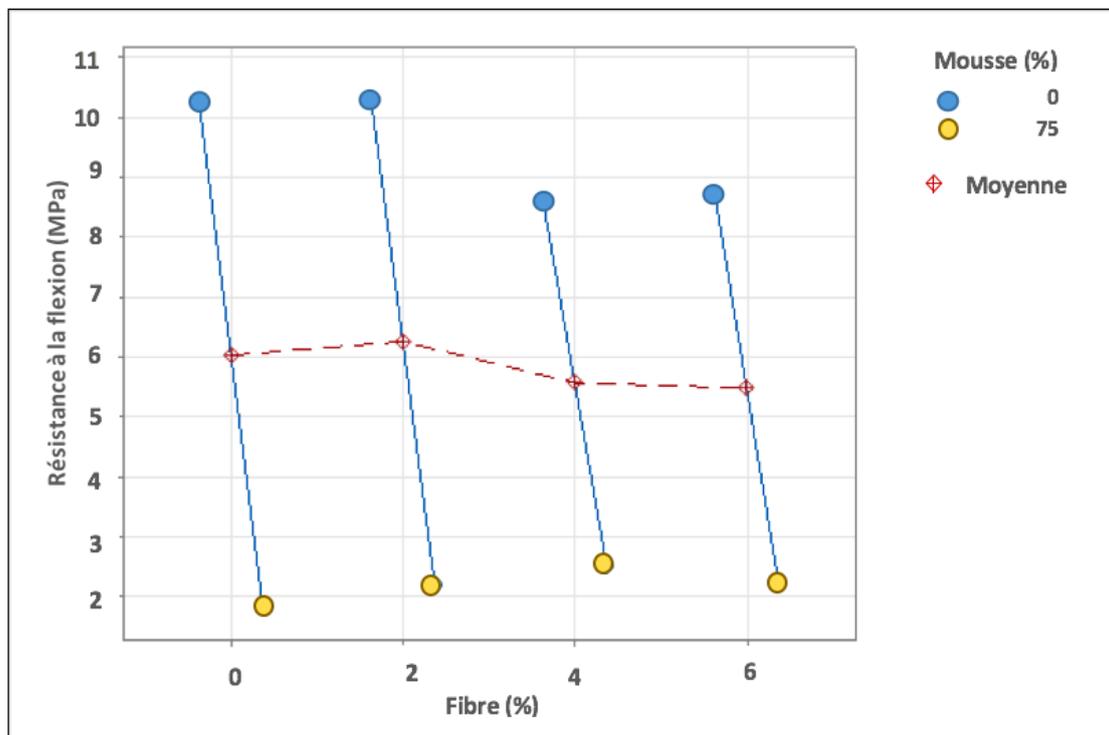


Figure 213. Variation de la résistance flexion en fonction de la mousse

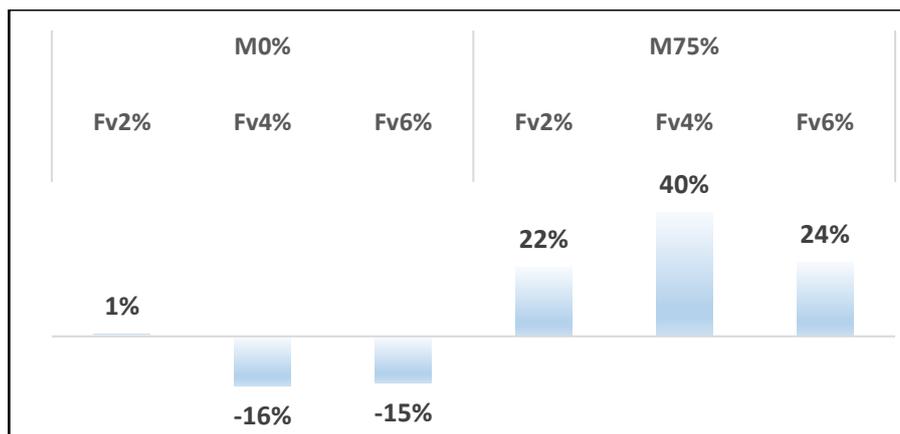


Figure 214. Variation de la résistance flexion par rapport aux formulations sans fibre

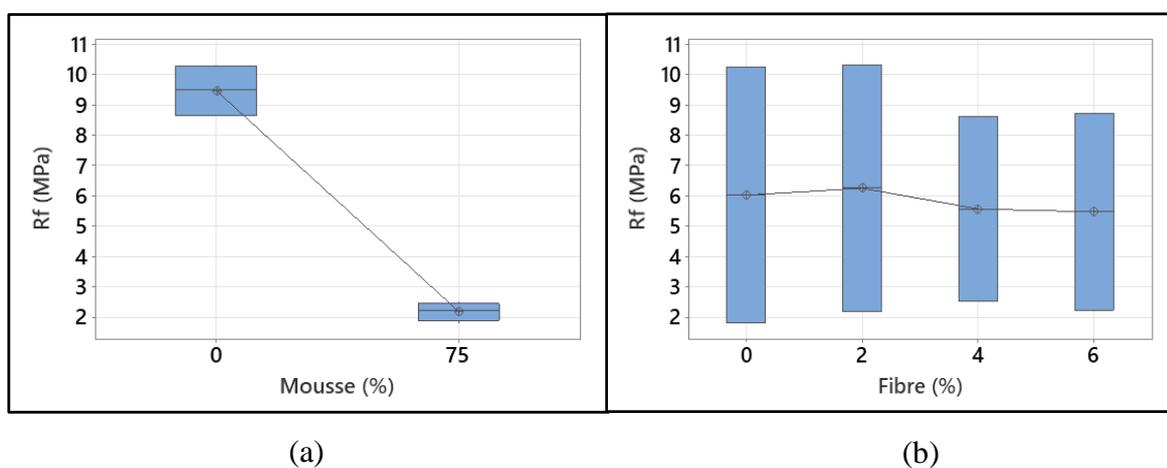


Figure 215. (a) Distribution Rf en fonction fibre (b) Distribution Rf en fonction mousse

Tableau 63. (a) écarts type Rf (effet de la fibre) (b) écarts Rf (effet de la mousse)

(a)		
Mousse (%)	N	EcTyp
0	4	0,934
75	4	0,296
Écart type regroupé = 0,692670		

(b)		
Fibre (%)	N	EcTyp
0	2	5,98
2	2	5,73
4	2	4,31
6	2	4,59
Écart type regroupé = 5,20075		

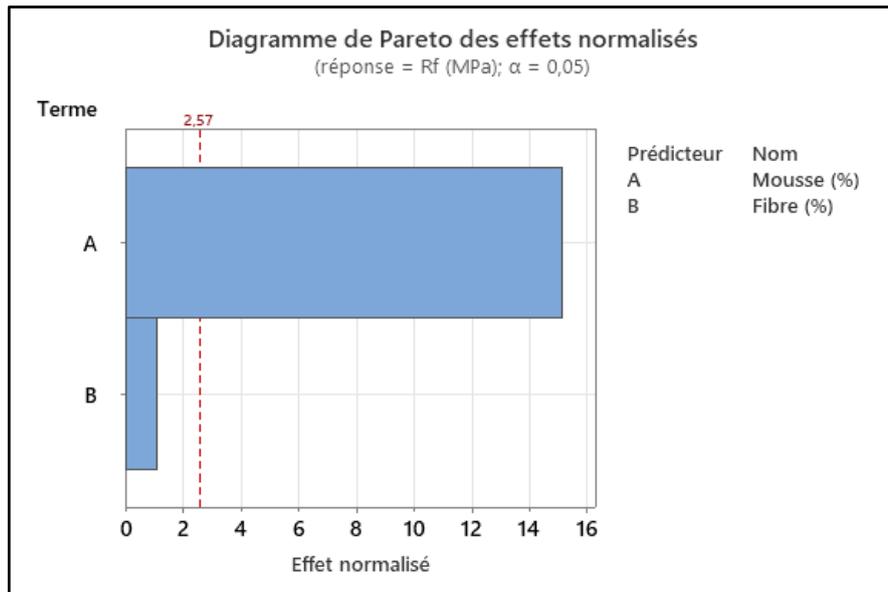


Figure 216. Diagramme de Pareto des effets de la mousse et de la fibre sur la Rf

7.2 Interprétation et discussion

On peut expliquer 97% des variations de la résistance à la traction par les variations de la porosité, comme montré par le coefficient de régression de la Figure 217. Le paramètre le plus influent est la surface spécifique (86%) suivi de la forme des pores (79%) puis de la taille des pores (76%) Figure 218.

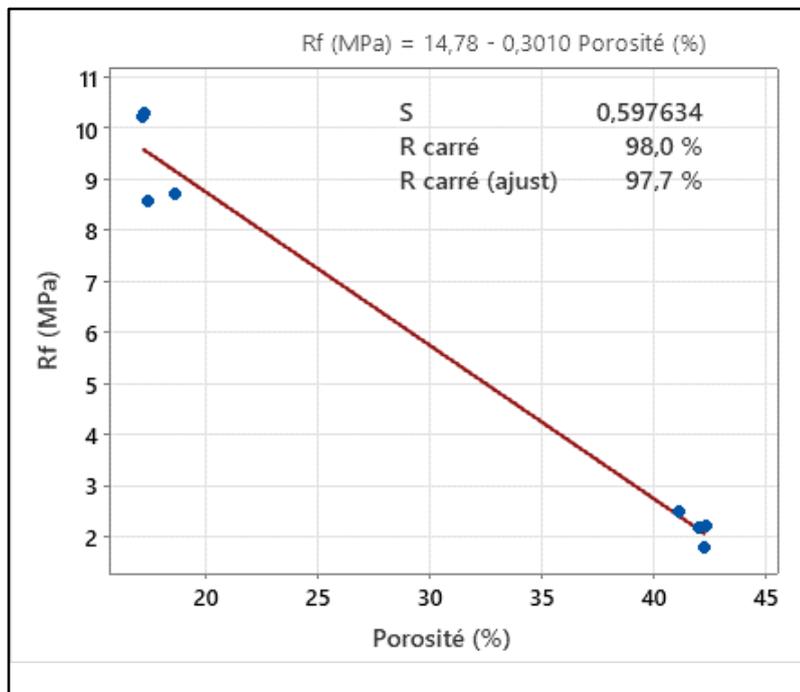


Figure 217. Courbe de régression Rf en fonction de la porosité

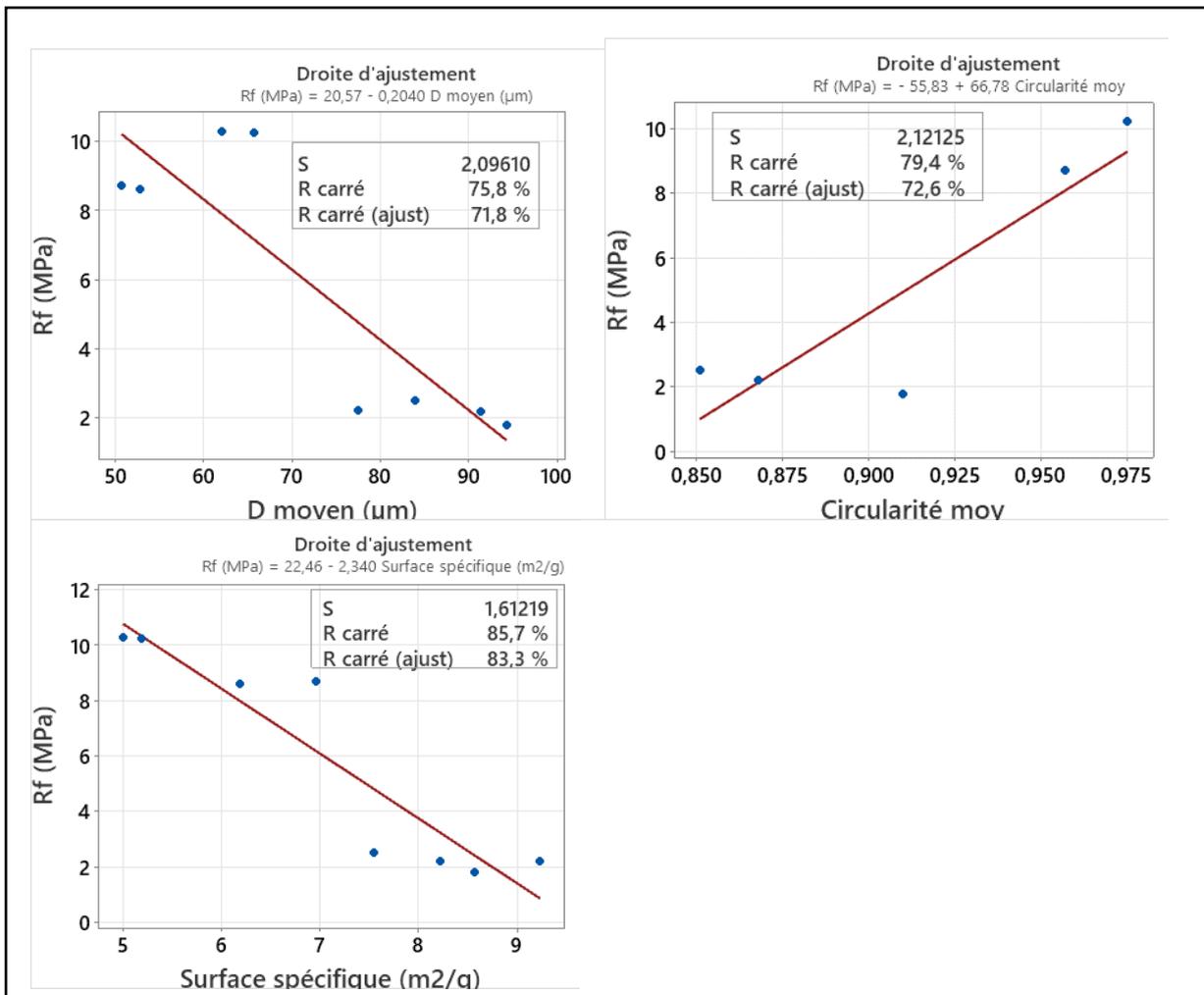


Figure 218. Courbes de régression R_f en fonction du diamètre, circularité et surface spécifique

Dans les formulations sans mousse, on peut considérer que la résistance en flexion diminue (l'augmentation de la résistance en flexion pour Fv2% et Fv6% est négligeable), et ce malgré le rôle des fibres comme renforts par rapport au comportement du béton en traction, qui permettent de limiter l'ouverture des fissures et d'assurer la répartition de la microfissuration. Cette diminution % peut être expliquée par la fragilisation de la structure des fibres due au traitement mécanique (broyage) subi lors du recyclage. Ce résultat est d'ailleurs largement étayé par la littérature qui en majorité montre que les fibres de verre recyclés impactent négativement la résistance en flexion. L'étude de João et al [155] précitée, montre une réduction de la résistance en traction de 2,7%, pour un taux de substitution de 5%, qui reste moins importante que la résistance à la compression. Cette réduction est assez faible par rapport à nos résultats, où la résistance a été réduite de 16, et 15% pour 4 et 6% de substitution.

Dans les formulations avec mousse, le même résultat concernant l'augmentation de la résistance en traction jusqu'à une certaine limite, a été trouvée par Eethar Thanon Dawood et al.[198] dans l'étude précitée concernant la substitution de la fibre de verre (non recyclée) à la totalité du mortier, dans un béton mousse, pour des petites fractions volumiques de 0.06, 0.2, 0.4 et 0.6%.

La corrélation entre la résistance mécanique et la densité est bien vérifiée avec $R^2=99\%$ Figure 219.

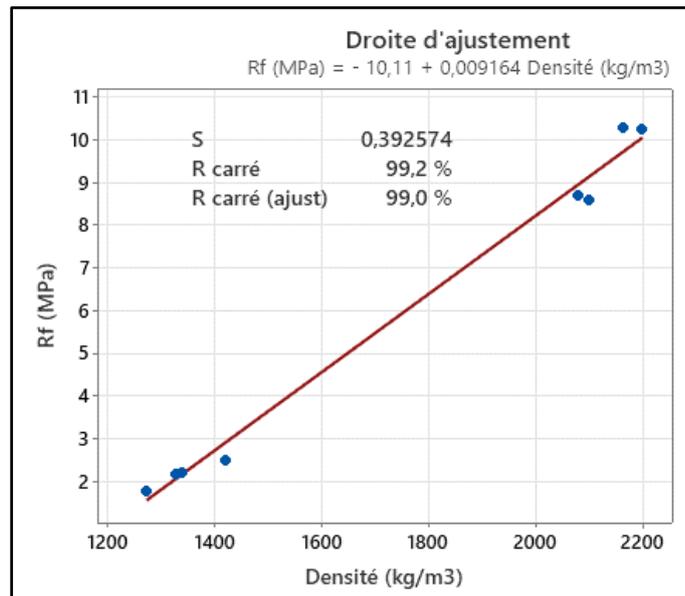


Figure 219. Courbe de régression Résistance à la flexion - Densité

7.3 Conclusion

L'expérimentation a permis de mettre en évidence que

- ✓ La fibre seule diminue légèrement la résistance à la flexion (en moyenne -9% pour un écart de +2% de substitutions avec 75% de mousse) ;
- ✓ En présence de la mousse, la fibre augmente légèrement la résistance en flexion (en moyenne +7% pour un écart de +2% de substitution avec 875% de mousse), jusqu'à la limite de 4% de substitution, au-delà de laquelle la résistance commence à diminuer ;
- ✓ La mousse diminue la résistance en flexion dans les formulations avec fibre ;
- ✓ L'effet de la fibre est atténué par l'ajout de la mousse et inversement ;
- ✓ L'effet de la fibre sur la masse volumique n'est pas significatif par rapport à la mousse, et il est 6 fois moindre.

On peut conclure, pour ce chapitre, que la substitution de la fibre de verre, à 35% de fibres de verre, est favorable à la résistance à la traction si on ne dépasse pas un certain taux de substitution assez important. À titre indicatif, cette limite est estimée à 9% pour une teneur en mousse de 75%. En deçà de cette limite, la résistance à la flexion a augmenté de 29% en moyenne (un maximum de 40% pour 4% de substitution).

8. À L'ETAT DURCI : LA CONDUCTIVITE THERMIQUE

8.1 Résultats et analyse des effets

La Figure 220 montre que la conductivité thermique diminue brutalement avec la substitution, dans les formulations sans mousse, et augmente très peu dans les formulations

avec mousse, jusqu'à Fv6% où elle diminue brusquement. La mousse a tendance à atténuer l'effet de la fibre. La Figure 221 montre que la conductivité thermique diminue avec l'ajout de la mousse, dans les formulations avec fibre. Cette diminution est plus en plus atténuée à mesure de la substitution.

D'après les variations de la porosité par rapport aux formulations sans fibre Figure 222, la diminution de la conductivité thermique sous l'effet de la fibre dans les formulations avec mousse, devient significative au-delà de 4% de substitutions (-19% pour 6% de substitution). La diminution de la conductivité est en moyenne de -9% dans les formulations sans mousse pour +2% de substitution. Dans les formulations avec mousse (75%), les taux de substitution de 2, 4% n'ont pas d'effet sur la conductivité et à 6% la diminution est de -19%.

Dans les graphes à moustache Figure 223, présentant la dispersion des valeurs de la conductivité thermique, on voit clairement que l'effet de la fibre est fortement atténué par l'ajout de la mousse, et qu'inversement l'effet de la mousse est également atténué par la fibre mais de façon moins forte. En effet, on note bien dans le Tableau 64, que la mousse diminue l'écart type, c'est-à-dire atténue l'effet de la fibre, de -70% et que la fibre diminue l'écart type, c'est-à-dire atténue l'effet de la mousse, de seulement -13% en moyenne.

Dans le diagramme de Pareto Figure 224 on voit bien que l'effet de la mousse sur la conductivité thermique est plus important que celui de la fibre. En estimant l'intensité des 2 effets par les écarts types regroupés Tableau 64, on peut déduire que la mousse a environ 4 fois plus d'effet que la fibre sur la variation de la conductivité thermique (écart type mousse = 0,46 / écart type fibre = 0,12).

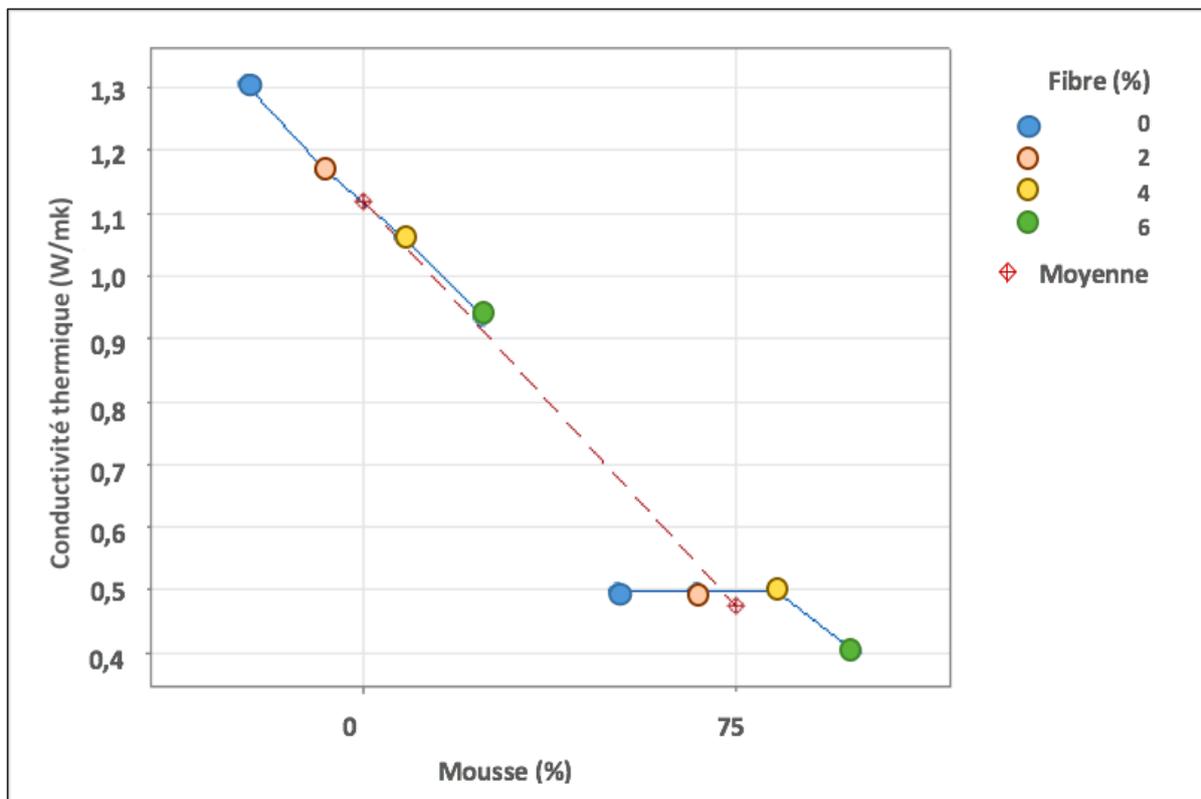


Figure 220. Variation de la conductivité thermique en fonction de la fibre

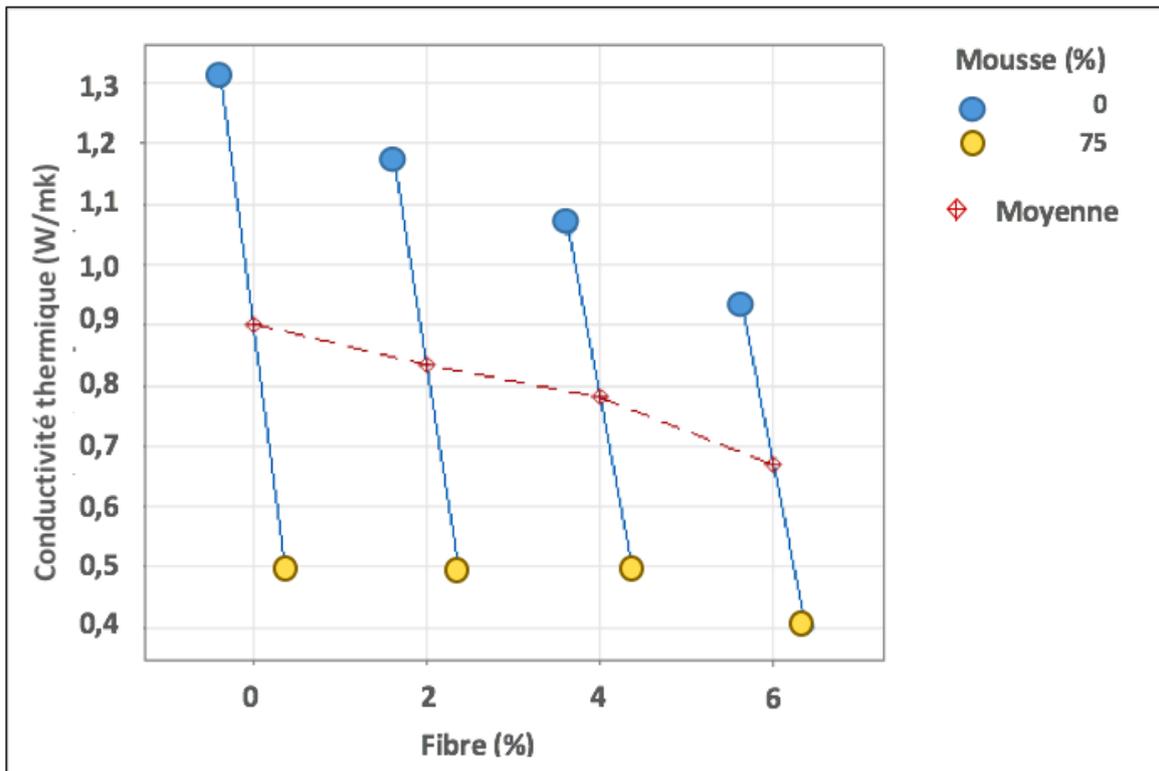


Figure 221. Variation de la conductivité thermique en fonction de la mousse

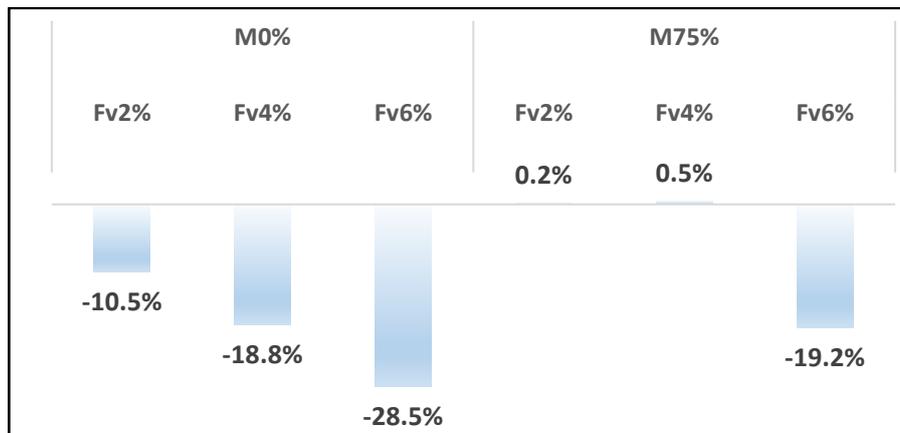
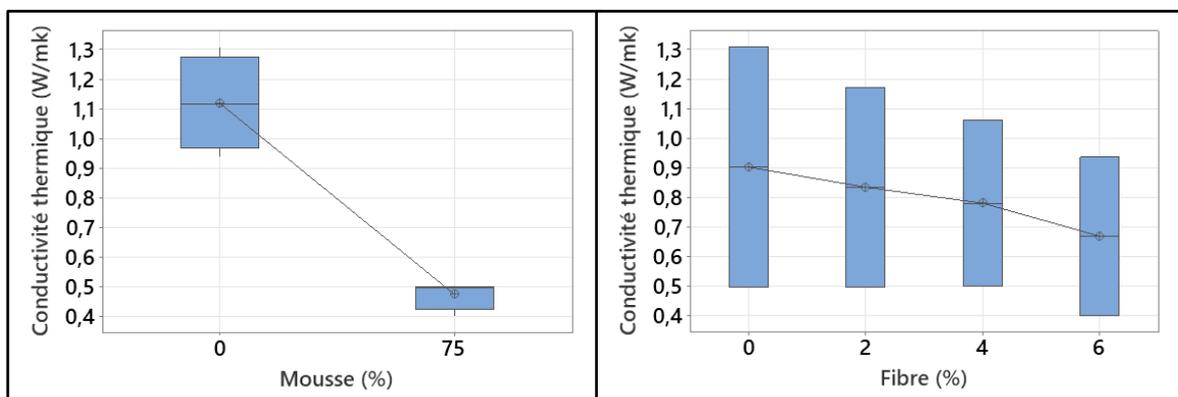


Figure 222. Variation de la conductivité thermique par rapport aux formulations sans fibre



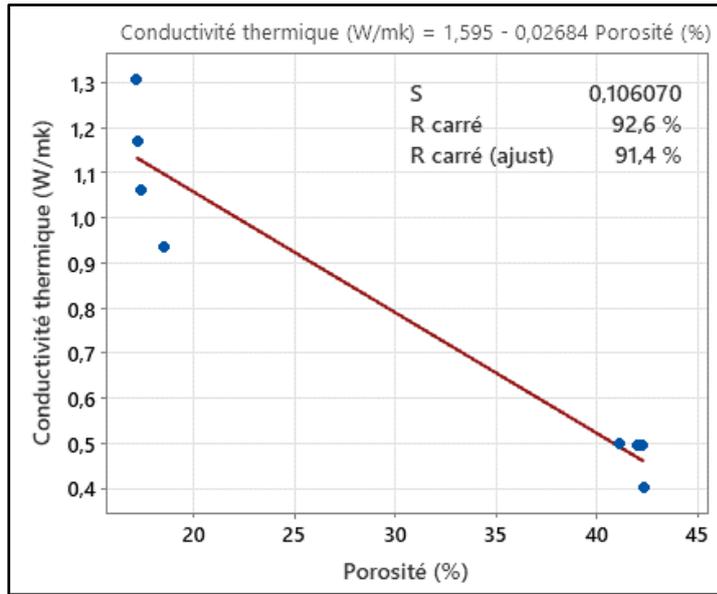


Figure 225. Courbe de régression conductivité thermique en fonction de la porosité

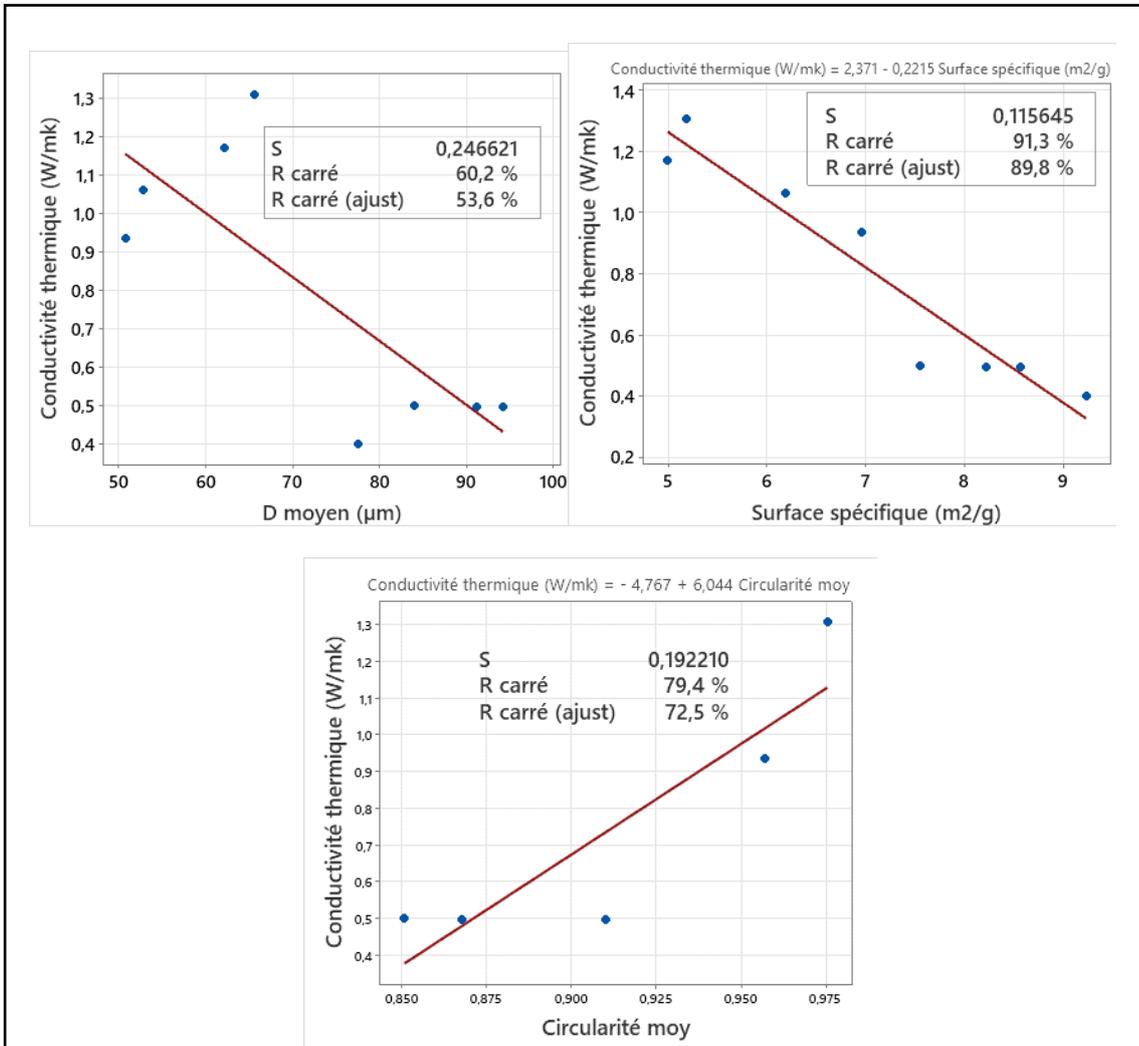


Figure 226. Courbes de régression conductivité thermique en fonction du diamètre, circularité et surface spécifique

La corrélation entre la résistance mécanique et la densité est bien vérifiée avec $R^2=94\%$ Figure 227.

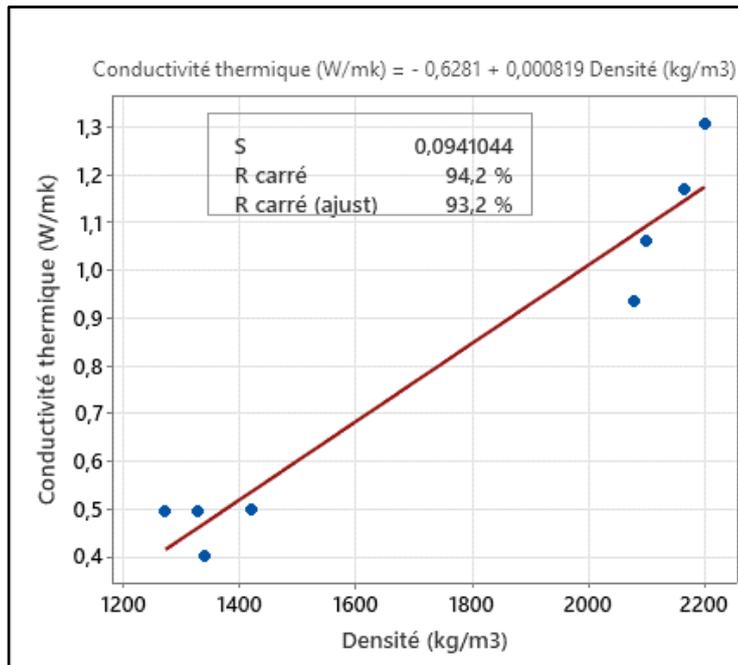


Figure 227. Courbe de régression Conductivité thermique - Densité

8.3 Conclusion

Les essais sur la conductivité thermique ont révélé que :

- ✓ La fibre seule diminue la conductivité thermique (de façon brusque dès leur introduction à 2%) (la diminution est en moyenne de -9% pour +2% de substitution avec 75% de mousse) ;
- ✓ En présence de la mousse, la conductivité thermique n'est presque pas affectée par la fibre affecte, jusqu'à 6% où elle diminue brusquement (-16%) ;
- ✓ L'effet de la fibre est atténué par l'ajout de la mousse et inversement ;
- ✓ L'effet de la fibre sur la conductivité thermique reste significatif par rapport à la mousse, quoique 4 fois moindre.

On peut conclure, pour ce chapitre, que la substitution de la fibre de verre est favorable à l'isolation thermique. Les bétons mousse obtenus sont plus isolants à partir de 4% de substitution (+19% pour 6% de substitution), et en deçà de 4%, l'effet est quasi nul.

9. ÉTUDE COMPARATIVE DES PROPRIÉTÉS

Comme pour les autres matériaux recyclés on va se baser sur la mesure des coefficients de variation pour comparer les variations des propriétés des bétons mousse sous l'effet de la substitution.

Tableau 65. Statistiques (M75%)

Variable	VarCoeff	Moyenne	Minimum	Maximum
Densité (kg/m ³)	4,51	1340,5	1273,7	1420,0
Résistance compression (MPa)	25,57	2,757	2,060	3,710
Résistance flexion (MPa)	13,59	2,178	1,790	2,510
Conductivité thermique (W/mk)	10,20	0,4731	0,4007	0,4985
Étalement (cm)	2,97	17,280	16,820	17,900

D'après le Tableau 65, On voit bien que c'est la résistance qui varie le plus sous l'effet de la variation de la fibre, suivi de la conductivité thermique et de la densité.

La fibre impacte la résistance à la compression, 2 fois plus que la résistance en flexion, 3 fois plus que la conductivité thermique (gain en isolation), 6 fois plus que la densité (perte en légèreté) et 9 fois plus que l'ouvrabilité (perte).

Cela signifie que vouloir améliorer les performances les plus faibles (densité et ouvrabilité) aura peu d'incidence sur les autres propriétés et sur le taux de substitution qui seront peu réduites.

10. CONCLUSION SUR LA FIBRE DE VERRE

Partant des paramètres de l'expérimentation fixés : E/C=0.6, G/C=3, un échantillon de fibre de verre recyclée avec des fibres longues de 27.5 mm, composée de 37% de fibres et 10% de polyester, 25% plus légère que le sable, on peut dire que la substitution de la fibre au sable, est favorable pour la densité et la conductivité thermique, quand elle dépasse un certain seuil. À titre indicatif, pour une teneur en mousse de 75%, à partir de 4% de substitution, on obtient des bétons mousse plus isolants (jusqu'à 19% pour un taux de 6%) et à partir de 8% de substitution, on obtient des bétons mousse plus légers. En deçà de 4%, la conductivité thermique n'a pas varié, et en deçà de 8% la densité a diminué d'à peine 7% en moyenne.

Les résultats les moins favorables enregistrées, concernent les deux résistances à la compression et en flexion, car pour gagner en résistance, les taux de substitution doivent restées limitées à un seuil trop faible (8% pour la compression et 9% pour la flexion si teneur en mousse de 75%) ; en deçà de 8%, on obtient néanmoins un gain important en résistance à la compression (45% en moyenne et 80% pour 4% de substitution), et en deçà de 9%, un gain en résistance à la flexion moindre (29% en moyenne et 40% pour 4% de substitution).

Néanmoins, le rapport résistance/ densité augmente avec la substitution par rapport à la formulation sans mâchefers de 35% moyenne et au-delà d'une limite estimée à 8% de substitution ce rapport commence à diminuer.

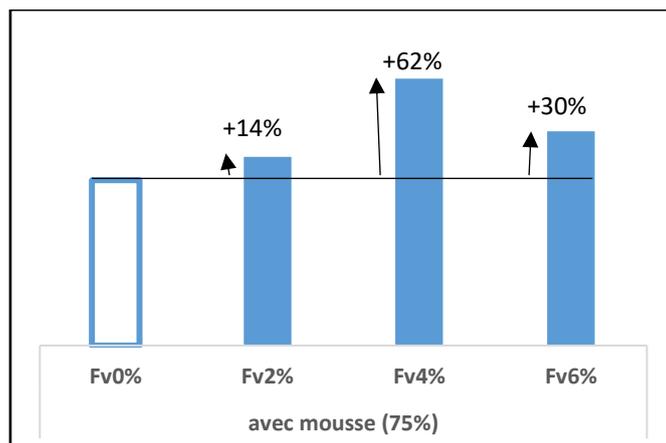


Figure 228. Rapport Résistance/Densité

L'ouvrabilité et les temps de prise ne sont quasi pas affectés par la fibre de verre (-4.6% en moyenne).

Les mâchefers impactent légèrement la porosité ; elle diminue de 1.7% pour des taux de substitution <6% et augmente au-delà.

La propriété la plus impactée est la résistance à la compression, suivie de la résistance en flexion (2 fois moins), de la conductivité thermique (3 fois moins), de la densité (6 fois moins) et en dernier l'ouvrabilité (9 fois moins).

Les résultats les plus faibles obtenus sont liés essentiellement à la morphologie tranchante des fibres qui ont tendance à éclater les bulles générées par la mousse, jusqu'à une certaine quantité, au-delà de laquelle les fibres commencent à s'amasser et éclatent de moins en moins de bulles. Or tout l'intérêt d'utiliser la fibre de verre, réside dans la morphologie des fibres qui leur confère leur rôle de renforts. Les bétons mousse ne profitent de cette fonction que pour des taux de substitution limités à un certain seuil.

Mais en conclusion, on peut considérer que les résultats sont intéressants pour les taux de substitution supérieurs à 8%, car des taux inférieurs à 8 seraient trop faibles pour susciter de l'intérêt.

D'après le schéma suivant, les bétons mousse deviennent plus légers et plus isolants quoique plus poreux et moins résistants, et sont donc plus adaptés à une utilisation non structurelle isolante.

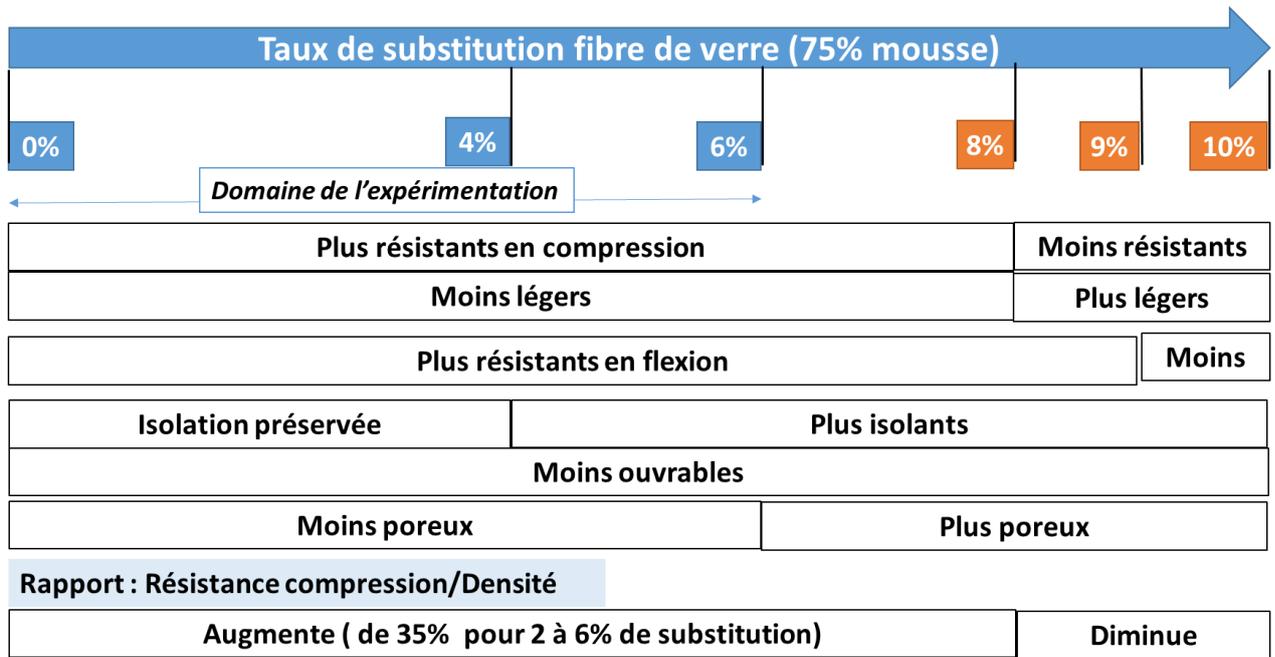


Figure 229. L'effet des fibres sur les propriétés de béton mousse

PARTIE5

ÉTUDE COMPARATIVE DES 3 MATERIAUX RECYCLES

1. PROPRIETES DES MATERIAUX

Dans les granulats, les sédiments se sont révélés les plus légers, les plus fins et les plus absorbants.

Les mâchefers se sont révélés les plus poreux et de surface rugueuse de par leur forme.

Tableau 66. 4.1 Propriétés des matériaux

	Sédiments	Mâchefers	Fibre de verre
Masse volumique	-20% sable	-10% sable	-25% sable
Absorption d'eau	67 x sable	25 x sable	
Composition	7% Matière organique, 13% chaux vive	8% métaux lourds, 2.6% imbrûlés, 21% chaux vive	35% fibres, 10% polyester, 55% CaCO ₃

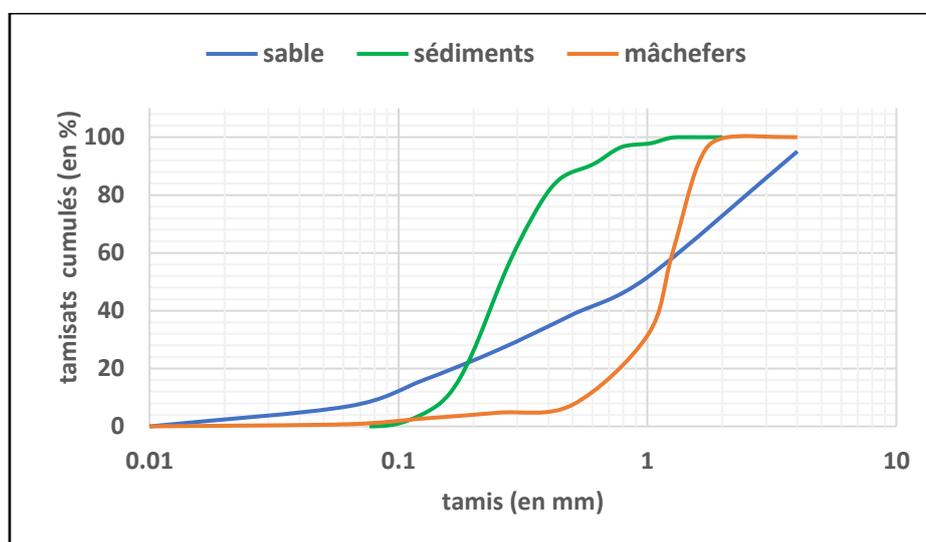


Figure 230. Granulométrie comparée

2. PROPRIETES DES BETONS MOUSSE

Pour les besoins de comparaison, il a été tenu compte de la teneur en mousse de 75% pour les 3 matériaux.

D'après le graphique synthétique de la Figure 231, on voit clairement que la résistance à la compression a varié nettement plus que les autres propriétés sous l'effet des substitutions pour les 3 recyclats. La résistance a varié en moyenne, tout matériau confondu, 11 fois plus que la conductivité, 15 fois plus que la densité et 21 fois que l'étalement. Les bétons mousse obtenus se sont tous révélés plus résistants avec la substitution, et affichent un rapport résistance/densité amélioré (en moyenne de 14). Les bétons mousse avec mâchefers et avec fibre sont plus isolants, et seuls les bétons mousse avec sédiments se sont avérés plus ouvrables. Les 3 matériaux et notamment les sédiments, ont permis d'obtenir des bétons mousse moins poreux.

D'après les graphes de la figure et les schémas de la Figure 232, il est apparent que :

- ✓ Les sédiments ont permis d'obtenir les plus grands gains en résistance, et une meilleure ouvrabilité. Les bétons mousse avec sédiments se sont révélés les moins poreux ;
- ✓ Les mâchefers ont donné lieu à des bétons mousse les plus isolants avec la plus petite perte en densité ;
- ✓ Le meilleur rapport résistance / densité, en termes de variations, a été permis par les sédiments suivi de très près par les mâchefers.

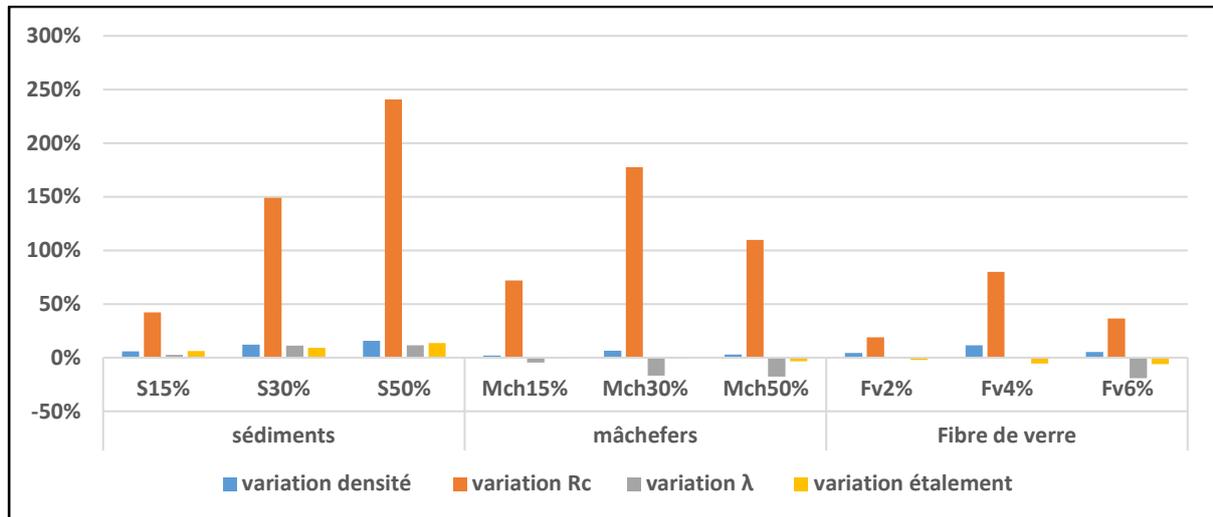


Figure 231. Graphe synthétique comparatif de la variation des propriétés par rapport aux formulations de références

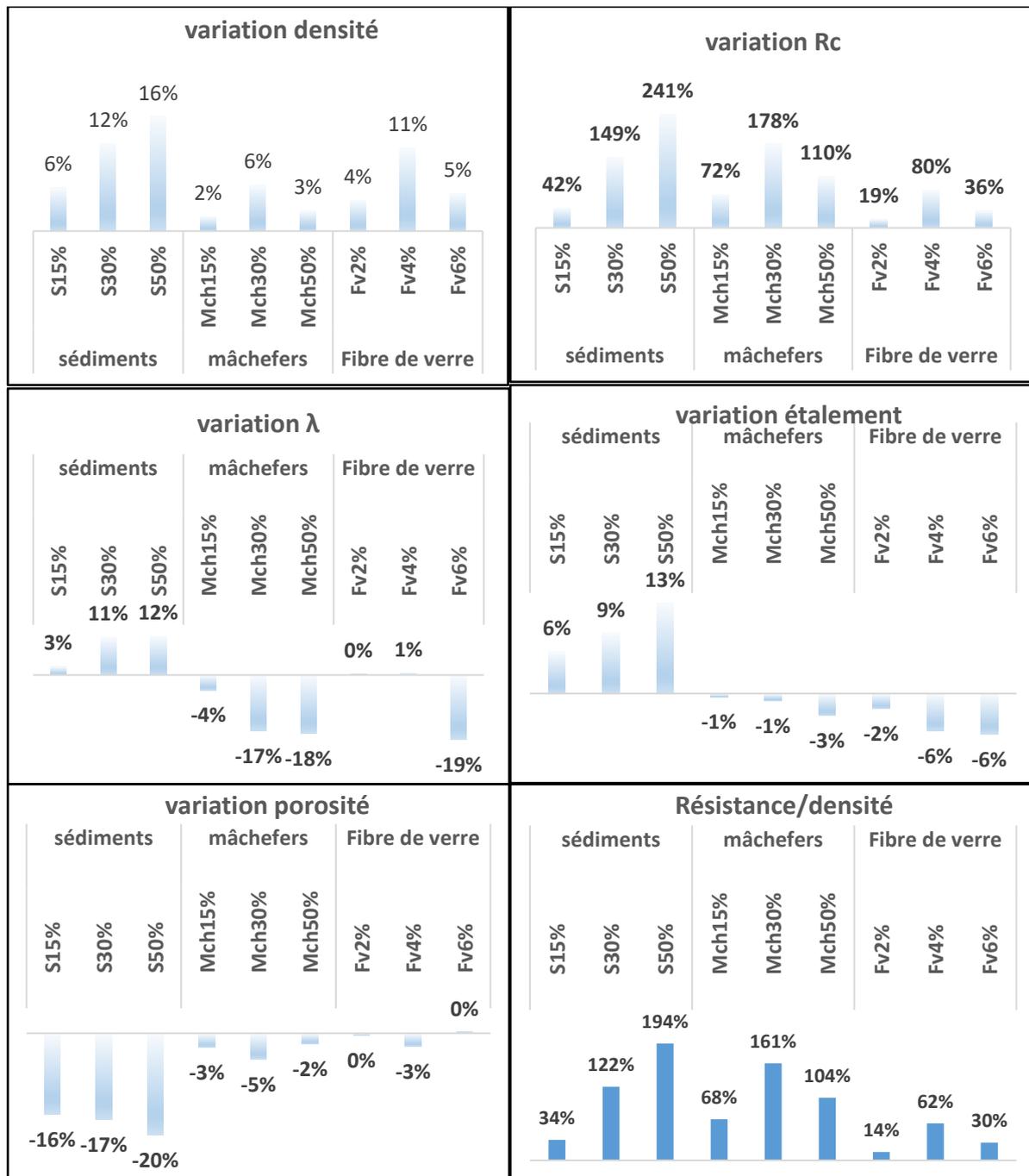


Figure 232. Graphes détaillées comparatifs de la variation des propriétés par rapport aux formulations de références

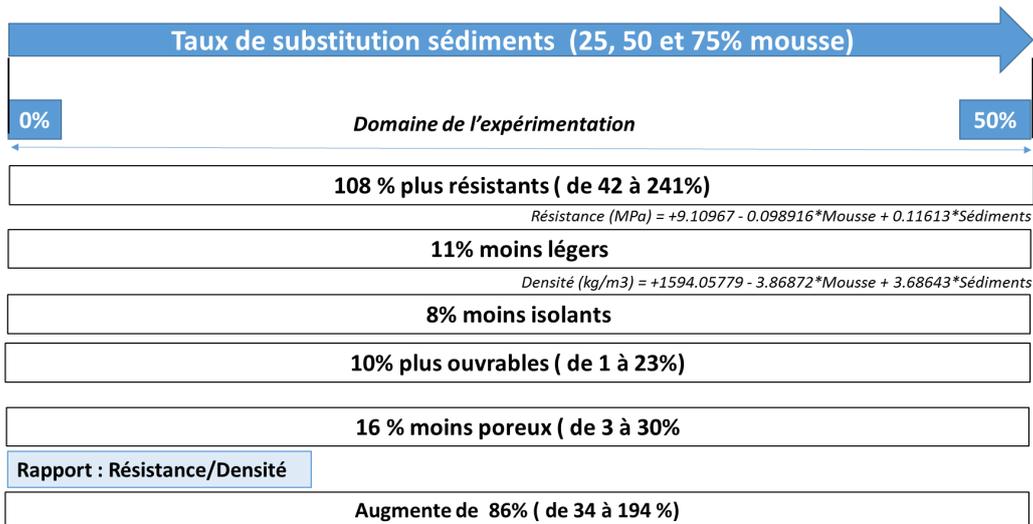


Figure 233. L'effet des sédiments sur les propriétés de béton mousse

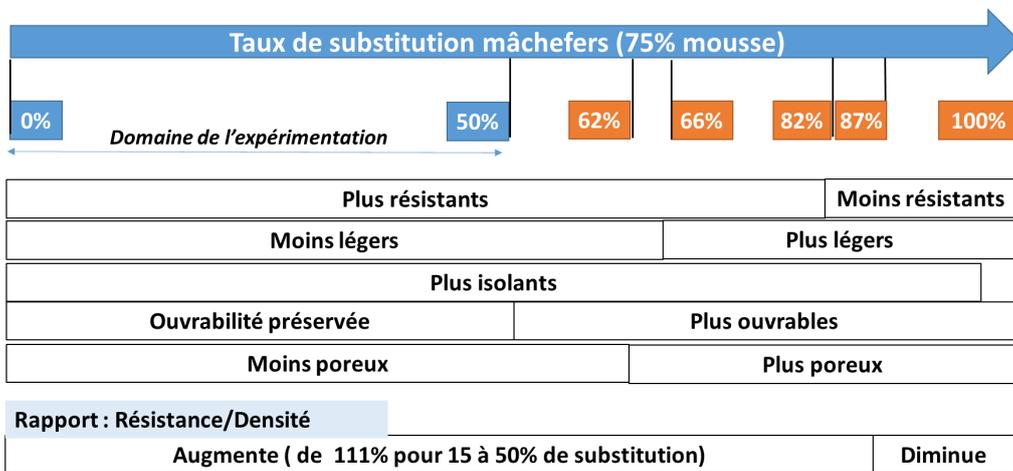


Figure 234. L'effet des mâchefers sur les propriétés de béton mousse

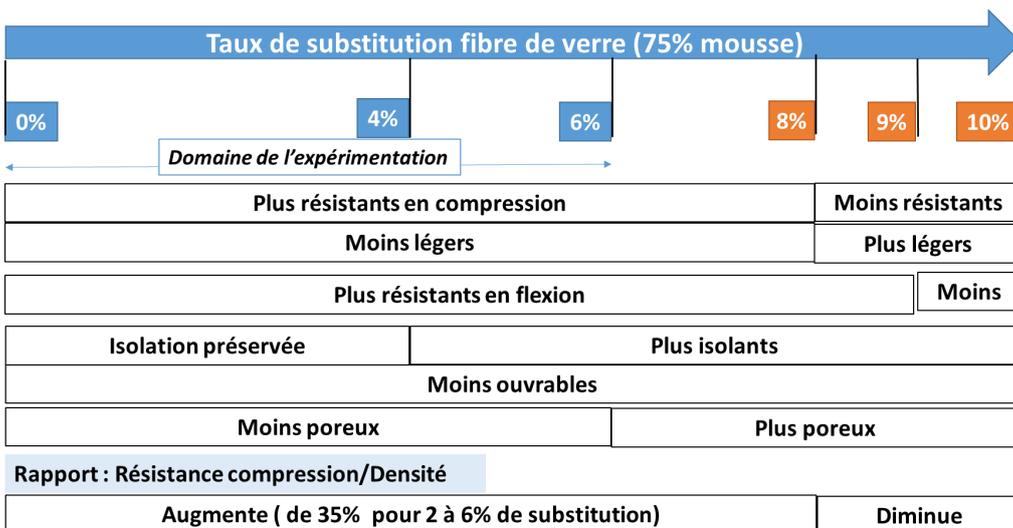


Figure 235. L'effet des fibres sur les propriétés de béton mousse

3. COMPARAISON DES EFFETS

Pour les besoins de comparaison, il a été tenu compte des mêmes bases de formulation : 75% pour la mousse et 15%, 30% et 50% pour les matériaux recyclés.

D'après le tableau des statistiques suivant, on voit que la densité est plus impactée par les sédiments puis par la fibre et en dernier par les mâchefers. La résistance est impactée dans l'ordre par la résistance, les mâchefers et la fibre. La conductivité thermique est impactée par la fibre puis les mâchefers et les sédiments. L'ouvrabilité est impactée par les sédiments puis la fibre et enfin les mâchefers.

Tableau 67. Statistiques des propriétés

Propriété	Matériau	VarCoeff	EcTyp	Moyenne	Minimum	Maximum
Densité (kg/m ³)	Sédiments	4,45	63,1	1417,7	1350,0	1475,0
	Mâchefers	2,22	29,3	1321,7	1300,0	1355,0
	Fibre	3,67	50,0	1362,7	1328,2	1420,0
Résistance à la compression (MPa)	Sédiments	40,72	2,05	5,03	2,93	7,02
	Mâchefers	24,40	1,105	4,527	3,540	5,720
	Fibre	21,71	0,649	2,990	2,450	3,710
Conductivité thermique (W/mk)	Sédiments	4,75	0,0256	0,5380	0,5085	0,5537
	Mâchefers	8,40	0,0363	0,4318	0,4089	0,4736
	Fibre	12,05	0,0561	0,4654	0,4007	0,4985
Étalement (cm)	Sédiments	3,35	0,656	19,600	19,000	20,300
	Mâchefers	1,50	0,265	17,600	17,300	17,800
	Fibre	2,18	0,372	17,073	16,820	17,500

Le graphique de Figure 236 montre que la résistance est la plus influencée par les trois matériaux recyclés suivi de la conductivité thermique. La densité et l'étalement sont les moins impactées.

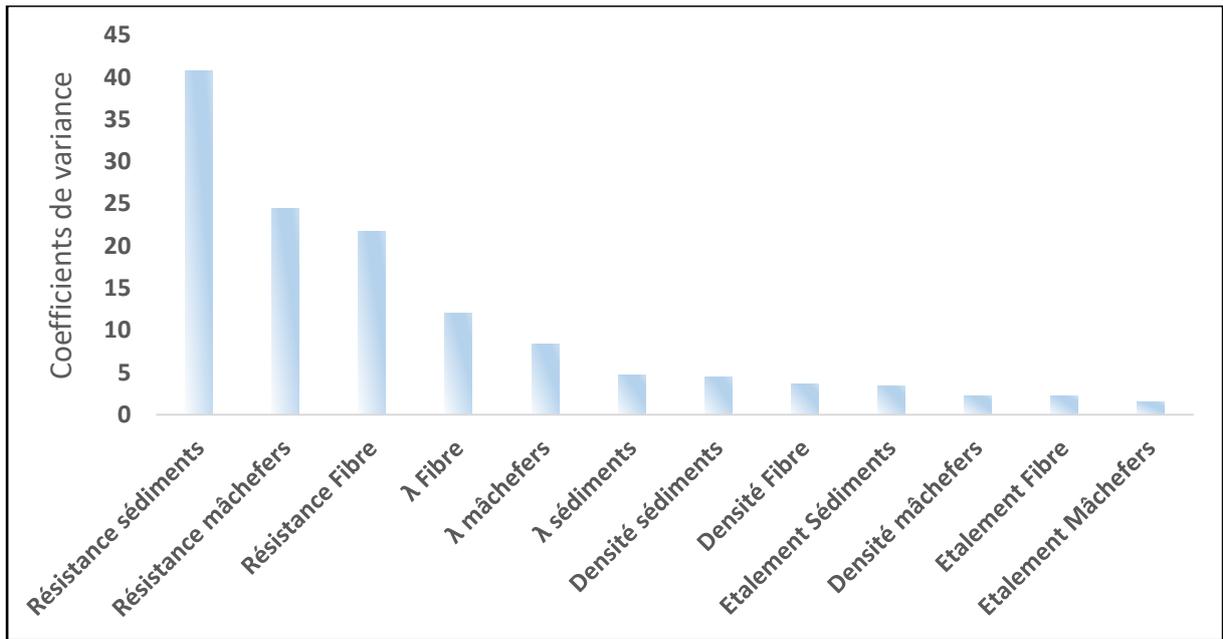


Figure 236. : Comparatif global des effets

4. CONCLUSION GENERALE

L'évaluation de l'effet de la substitution a révélé que les bétons mousse avec sédiments était 108% plus résistants, 10% plus ouvrables et 16% moins poreux que les bétons mousse sans sédiments. Le rapport résistance/densité a été amélioré de 86% en moyenne (de 34% à 194%) par rapport aux formulations sans sédiments. L'isolation thermique n'a pas été altérée.

Les sédiments peuvent constituer de très bons matériaux alternatifs au sable pour la conception de bétons mousse structurels et pour la construction de murs porteurs et isolants, de panneaux de façade, etc. À titre indicatif, les bétons mousse formulés à 50% de sédiments et 25% de mousse ont présenté une résistance de 13MPa pour une densité de 1700 kg/m³. Pour obtenir un matériau plus léger, il faut augmenter la mousse à 46% pour obtenir une densité plus faible de 1599 kg/m³ mais qui aura une plus faible résistance de 10 MPa.

Les résultats obtenus des bétons mousse avec mâchefers sont plus variables et dépendent des taux de substitution engagés. Ces résultats sont dans tous les cas tous concluants. Les mâchefers peuvent être utilisés dans des applications diverses et variées avec des taux de substitution intéressants. Ils seraient parfaitement adaptés à un usage plus structurel et isolant, jusqu'à un taux de substitution de 87% (cas particulier de 75% de mousse), où le rapport résistance / densité est en moyenne 111% supérieur par rapport à la formulation avec 100% de sable, et où les propriétés d'isolation sont augmentées. Au-delà de 87%, où les propriétés d'ouvrabilité et de légèreté sont améliorées, ils seraient plus adaptés à une utilisation comme matériau de remplissage et d'isolation thermique pour la réalisation de chapes auto-nivelantes.

Les mâchefers peuvent donc constituer des substituts au sable très intéressants pour la conception de bétons mousse destinés à divers emplois même structurels. Il sera toujours possible d'améliorer les performances mécaniques sans augmenter la densité en optimisant le procédé de traitement et d'élaboration des mâchefers. En effet les mâchefers pourraient être davantage purgés des éléments indésirables (dэфerrailage, criblage) [77] en augmentant par exemple la durée de maturation.

Les résultats obtenus des bétons mousse avec fibre sont également variables selon les taux de substitution. Mais, contrairement aux mâchefers, on ne peut retenir que les résultats correspondant aux taux de substitution supérieurs à 8% (cas particulier de 75% de mousse), car sinon les taux de substitutions seront considérés comme inintéressants car trop faibles. Ainsi, pour des taux supérieurs à 8%, les bétons mousse obtenus sont plus légers, plus isolants, plus poreux, moins résistants et moins fluides. La fibre de verre recyclée pourra donc constituer une bonne alternative au sable pour concevoir des bétons mousse légers et isolants à condition que cela n'engendre pas de surcoût à utiliser la fibre en grande quantité. Il est à noter que les fibres n'ont pas eu le rôle de renforts comme cela aurait pu être attendu.

La démarche scientifique adoptée a ainsi permis d'identifier les facteurs d'influence ayant impacté les propriétés du béton mousse. Les facteurs ayant permis les bonnes performances sont les fines et la faible densité des sédiments. Les principaux freins à l'obtention de meilleures performances notamment pour la porosité et la densité sont :

-La chaux vive présente dans les sédiments et les mâchefers qui a tendance à déstabiliser la mousse.

-Les métaux lourds et imbrûlés présents dans les mâchefers qui sont défavorables à la stabilité de la mousse.

-La morphologie tranchante des fibres qui a tendance à éclater les bulles générées par la mousse jusqu'à une certaine quantité.

PERSPECTIVE

Pour conclure, les résultats sont probants pour les sédiments, prometteurs pour les mâchefers et plus mitigés pour les fibres. Il serait intéressant :

- Pour les mâchefers de tester un plus grand nombre de formulations de béton mousse afin de pouvoir disposer d'un modèle plus complet.
- Pour les fibres de verre recyclé de les tester sous forme de poudre ayant subi un deuxième broyage.

Il serait intéressant de compléter cette étude par des essais de durabilité, des études d'impact environnemental et une analyse des coûts économiques et coûts énergétiques, ainsi une étude technico-économique pour la mise en place de la filière industrielle.

RÉFÉRENCES

- [1] "Plan National De Gestion Des Déchets," 2019.
- [2] B. C. H. Dolton, "Cellular Concrete: Engineering and Technological Advancement for Construction in Cold Climates," *Cematrix*, 2006.
- [3] P. J. Tikalsky, J. Pospisil, and W. MacDonald, "A method for assessment of the freeze-thaw resistance of preformed foam cellular concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 5, pp. 889–893, 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2003.11.005.
- [4] M. Mastali, A. Dalvand, and A. R. Sattarifard, "The impact resistance and mechanical properties of reinforced self-compacting concrete with recycled glass fibre reinforced polymers," *J. Clean. Prod.*, vol. 124, pp. 312–324, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.148.
- [5] M. Cong and C. Bing, "Properties of a foamed concrete with soil as filler," *Constr. Build. Mater.*, vol. 76, pp. 61–69, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.066.
- [6] "File:Structure-de-la-mousse-aux-différentes-échelles.png." .
- [7] C. Sylvie Cohen-addad (dir.), Sylvie Cohen-addad, *Les mousses STRUCTURE ET DYNAMIQUE*. .
- [8] M. Auriol, M. Auriol, and L. Dominique, "Influence des interactions physico-chimiques entre particules et composés organiques sur la stabilité de mousses minérales To cite this version : HAL Id : tel-01916971 Influence des Interactions Physico-Chimiques entre Particules et Composés Organiques su," 2018.
- [9] A. L. Fameau and A. Salonen, "Effect of particles and aggregated structures on the foam stability and aging," *Comptes Rendus Phys.*, vol. 15, no. 8–9, pp. 748–760, 2014, doi: 10.1016/j.crhy.2014.09.009.
- [10] H. Bertin and M. N. Fatin-rouge, "THESE DE DOCTORAT DE L ' UNIVERSITE DE BORDEAUX Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l ' Ingénieur Docteur de l ' Université de Bordeaux Mousses renforcées en polymère ou particules : application à la remédiation des sols pollués Sous la direction," 2019.
- [11] T. S. Horozov, "Foams and foam films stabilised by solid particles," *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, vol. 13, no. 3, pp. 134–140, 2008, doi: 10.1016/j.cocis.2007.11.009.
- [12] G. Kaptay, "Interfacial criteria for stabilization of liquid foams by solid particles," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 230, no. 1–3, pp. 67–80, 2003, doi: 10.1016/j.colsurfa.2003.09.016.
- [13] F. Carn, A. Colin, O. Pitois, and R. Backov, "Foam drainage study during plateau border mineralisation," *Soft Matter*, vol. 8, no. 1, pp. 61–65, 2012, doi: 10.1039/c1sm06778h.
- [14] E. K. K. Nambiar and K. Ramamurthy, "Air-void characterisation of foam concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 2, pp. 221–230, 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.10.009.
- [15] I. T. Koudriashoff, *Manufacture of Reinforced Foam Concrete Roof Slabs*. .
- [16] Madeleine Visagie; Elsabé Kearsley, "Properties of foamed concrete as influenced by air-void parameters," 2002.
- [17] F. Batool and V. Bindiganavile, "Fresh Properties of Fiber Reinforced Cement-Based Foam with Pozzolans," *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Civ. Eng.*, vol. 44, no. 0123456789, pp. 253–264, 2020, doi: 10.1007/s40996-020-00357-1.
- [18] H. Weigler and S. Karl, "Structural lightweight aggregate concrete with reduced density-lightweight aggregate foamed concrete," *Int. J. Cem. Compos. Light. Concr.*, vol. 2, no. 2, pp. 101–104, 1980, doi: 10.1016/0262-5075(80)90029-9.
- [19] G. Sang, Y. Zhu, G. Yang, and H. Zhang, "Preparation and characterization of high

- porosity cement-based foam material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 91, pp. 133–137, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.032.
- [20] A. Hajimohammadi, T. Ngo, P. Mendis, A. Kashani, and J. S. J. van Deventer, "Alkali activated slag foams: The effect of the alkali reaction on foam characteristics," *J. Clean. Prod.*, vol. 147, pp. 330–339, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.134.
- [21] P. J. Wilde, "Foam measurement by the microconductivity technique: An assessment of its sensitivity to interfacial and environmental factors," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 178, no. 2, pp. 733–739, 1996, doi: 10.1006/jcis.1996.0171.
- [22] S. Quebaud, M. Sibai, and J. P. Henry, "Use of Chemical Foam for Improvements in Drilling by Earth-Pressure Balanced Shields in Granular Soils," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 13, no. 2, pp. 173–180, 1998, doi: 10.1016/s0886-7798(98)00045-5.
- [23] M. Siva, K. Ramamurthy, and R. Dhamodharan, "Sodium salt admixtures for enhancing the foaming characteristics of sodium lauryl sulphate," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 57, pp. 133–141, 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.12.011.
- [24] I. S. Ranjani and K. Ramamurthy, "Relative assessment of density and stability of foam produced with four synthetic surfactants," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 43, no. 10, pp. 1317–1325, 2010, doi: 10.1617/s11527-010-9582-z.
- [25] R. C. Valore, *Foam and gas concretes*, in *Proceedings of the Conference presented as part of the 1960 fall Conferences of the Building Research Institut.* 1960.
- [26] P.J.M. Bartos, *Special Concretes - Workability and Mixing.* 1994.
- [27] J. Sathya Narayanan and K. Ramamurthy, "Development of solid, foam concrete interlocking blocks and studies on short masonry specimens," *Mason. Int.*, vol. 26, no. 1, pp. 7–16, 2013.
- [28] D. Weaire and R. Phelan, "The physics of foam," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 8, no. 47, pp. 9519–9524, 1996, doi: 10.1088/0953-8984/8/47/055.
- [29] TNW Akroyd, *Concrete: properties and manufacture.* 2016.
- [30] "https://www.concreteconstruction.net/how-to/materials/cellular-concrete_o."
- [31] D. C. Hughes and R. Amtsbüchler, "Pore structure and permeability of hardened cement paste," *Mag. Concr. Res.*, vol. 38, no. 137, pp. 230–231, 1986, doi: 10.1680/mac.1986.38.137.230.
- [32] E. P. Kearsley and P. J. Wainwright, "The effect of porosity on the strength of foamed concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 2, pp. 233–239, 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00665-2.
- [33] E. K. K. Nambiar and K. Ramamurthy, "Shrinkage Behavior of Foam Concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 21, no. 11, pp. 631–636, 2009, doi: 10.1061/(asce)0899-1561(2009)21:11(631).
- [34] M. R. Jones and A. McCarthy, "Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete," *Fuel*, vol. 84, no. 11, pp. 1398–1409, 2005, doi: 10.1016/j.fuel.2004.09.030.
- [35] A. A. Hilal, N. H. Thom, and A. R. Dawson, "Pore structure and permeation characteristics of foamed concrete," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 12, no. 12, pp. 535–544, 2014, doi: 10.3151/jact.12.535.
- [36] R. K. Dhir, M. D. Newlands, and Aikaterini McCarthy, *Use of foamed concrete in construction.* .
- [37] K. Lo M. Nehdi, Ashfaq Khan, "DEVELOPMENT OF DEFORMABLE PROTECTIVE SYSTEM FOR UNDERGROUND INFRASTRUCTURE USING CELLULAR GROUTS," *Aci Mater. J.*, 2002.
- [38] M. R. Jones and A. Mccarthy, "Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material," no. 1, pp. 21–31, 2005.

- [39] D. K. Panesar, "Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents," *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 575–584, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.024.
- [40] C. Sun, Y. Zhu, J. Guo, Y. Zhang, and G. Sun, "Effects of foaming agent type on the workability, drying shrinkage, frost resistance and pore distribution of foamed concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 186, pp. 833–839, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.019.
- [41] E. K. K. Nambiar and K. Ramamurthy, "Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, no. 9, pp. 752–760, 2006, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.06.001.
- [42] S. K. and J.-D. WÖRNER, *FOAMED CONCRETE—MIXING AND WORKABILITY*. 1994.
- [43] E. K. K. Nambiar and K. Ramamurthy, "Influence of filler type on the properties of foam concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, no. 5, pp. 475–480, 2006, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2005.12.001.
- [44] J. R. C. Valore, "Insulating Concretes," *ACI J. Proc.*, vol. 53, no. 11, doi: 10.14359/11526.
- [45] *British Cement Association, Foamed Concrete; Composition and Properties*. 1994.
- [46] J. Jiang, Z. Lu, Y. Niu, J. Li, and Y. Zhang, "Study on the preparation and properties of high-porosity foamed concretes based on ordinary Portland cement," *Mater. Des.*, vol. 92, pp. 949–959, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.12.068.
- [47] A. Al-Shwaiter, H. Awang, and M. A. Khalaf, "The influence of superplasticiser on mechanical, transport and microstructure properties of foam concrete," *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.jksues.2021.02.010.
- [48] MEHTA P. K., "Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Pastes."
- [49] P Mellin, "Development of structural grade foamed concrete," *Univ. Dundee*, 1999.
- [50] F. Zulkarnain and M. Ramli, "Rational proportion for mixture of foamed concrete design," *J. Teknol.*, vol. 55, no. May, pp. 1–12, 2011, doi: 10.11113/jt.v55.73.
- [51] J. Rudolph C. Valore, "Cellular Concretes Part 2 Physical Properties," *ACI J. Proc.*, vol. 50, no. 6, doi: 10.14359/11795.
- [52] K. Ramamurthy, E. K. Kunhanandan Nambiar, and G. Indu Siva Ranjani, "A classification of studies on properties of foam concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 6, pp. 388–396, 2009, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006.
- [53] KONG RUIWEN, "Properties of high-strength foam concrete," 2004.
- [54] J. Rudolph C. Valore, "Cellular Concretes Part 1 Composition and Methods of Preparation," *ACI J. Proc.*, vol. 50, no. 5, doi: 10.14359/11794.
- [55] fRED C. McVORMICK, "A RATIONAL PROCEDURE FOR PROPORTIONING PRE-FORMED FOAM CELLULAR CONCRETE MIXES," 1964.
- [56] P. Li, H. Wu, Y. Liu, J. Yang, Z. Fang, and B. Lin, "Preparation and optimization of ultra-light and thermal insulative aerogel foam concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 205, pp. 529–542, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.212.
- [57] E. Kuzielová, L. Pach, and M. Palou, "Effect of activated foaming agent on the foam concrete properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 998–1004, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.122.
- [58] S. A. Barbhuiya, J. K. Gbagbo, M. I. Russell, and P. A. M. Basheer, "Properties of fly ash concrete modified with hydrated lime and silica fume," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 10, pp. 3233–3239, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.001.
- [59] "Global Waste Management Outlook." .

- [60] A. Neville, *PROPERTIE OF CONCRETE*. 1995.
- [61] N. Caille, C. Tiffreau, C. Leyval, and J. L. Morel, "Solubility of metals in an anoxic sediment during prolonged aeration," *Sci. Total Environ.*, vol. 301, no. 1–3, pp. 239–250, 2003, doi: 10.1016/S0048-9697(02)00289-9.
- [62] J. A. Baldock, C. A. Masiello, Y. Gélinas, and J. I. Hedges, "Cycling and composition of organic matter in terrestrial and marine ecosystems," *Mar. Chem.*, vol. 92, no. 1-4 SPEC. ISS., pp. 39–64, 2004, doi: 10.1016/j.marchem.2004.06.016.
- [63] R. Sutton and G. Sposito, "Molecular structure in soil humic substances: The new view," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 23, pp. 9009–9015, 2005, doi: 10.1021/es050778q.
- [64] C. Durand, "Caractérisation physico-chimique des produits de l'assainissement pluvial. Origine et devenir des métaux traces et des polluants organiques," 2003.
- [65] M. Filella, "Freshwaters: Which NOM matters?," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 7, no. 1, pp. 21–35, 2009, doi: 10.1007/s10311-008-0158-x.
- [66] C. H. Deconinck JF, *Bases de sédimentologie*. 2011.
- [67] C. H, *Clay sedimentology: Springer Berlin Heidelberg*. 2013.
- [68] Franck Marot, "Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques," 1997.
- [69] "Argile-et-mineraux-argileux-proprietes-physico-chimiques-et-proprietes-et-proprietes-collo @ www.memoireonline.com."
- [70] V. Chatain, "Caractérisation de la mobilisation potentielle de l'arsenic et d'autres constituants inorganiques présents dans les sols issus d'un site minier aurifère Caractérisation de la mobilisation potentielle de l'arsenic et d'autres constituants inorgan," 2004.
- [71] Lions J, "Etude hydrogéochemique de la mobilité de polluants inorganiques dans des sédiments de curage mis en dépôt: expérimentations, étude in situ et modélisations," 2004.
- [72] M. L. Cazalet, "Caractérisation physico-chimique d'un sédiment marin traité aux liants hydrauliques – Évaluation de la mobilité potentielle des polluants inorganiques .," *Thèse Dr. Insa.*, p. 239, 2012.
- [73] Jocelyn Ramaroson, "Calcination des sédiments de dragage contaminés : études des propriétés physico-chimiques," 2008.
- [74] "Etude des propriétés interfaciales des oxydes et hydroxydes métalliques," pp. 353–362, 1997.
- [75] Alloway BJ, *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability: Springer Netherlands*. 2012.
- [76] S. R. Stephens, B. J. Alloway, A. Parker, J. E. Carter, and M. E. Hodson, "Changes in the leachability of metals from dredged canal sediments during drying and oxidation," *Environ. Pollut.*, vol. 114, no. 3, pp. 407–413, 2001, doi: 10.1016/S0269-7491(00)00231-1.
- [77] M. Isaure, "Spéciation et transfert du zinc dans un dépôt de sédiment de curage contaminé : évolution le long du profil pédologique To cite this version : HAL Id : tel-00717491," 2012.
- [78] K. Siham, B. Fabrice, A. N. Edine, and D. Patrick, "Marine dredged sediments as new materials resource for road construction," *Waste Manag.*, vol. 28, no. 5, pp. 919–928, 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2007.03.027.
- [79] P. Y. S. L. S. Mongouin, "Characterization and valorization of polluted and treated river sediments in road," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*

- [80] G. Aouad, A. Laboudigue, N. Gineys, and N. E. Abriak, "Dredged sediments used as novel supply of raw material to produce Portland cement clinker," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 6, pp. 788–793, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.02.008.
- [81] M. Benzerzour, M. Amar, and N. E. Abriak, "New experimental approach of the reuse of dredged sediments in a cement matrix by physical and heat treatment," *Constr. Build. Mater.*, vol. 140, pp. 432–444, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.142.
- [82] T. A. Dang, S. Kamali-Bernard, and W. A. Prince, "Design of new blended cement based on marine dredged sediment," *Constr. Build. Mater.*, vol. 41, pp. 602–611, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.088.
- [83] J. L. Dalton, K. H. Gardner, T. P. Seager, M. L. Weimer, J. C. M. Spear, and B. J. Magee, "Properties of Portland cement made from contaminated sediments," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 41, no. 3, pp. 227–241, 2004, doi: 10.1016/j.resconrec.2003.10.003.
- [84] H. Du and S. D. Pang, "Value-added utilization of marine clay as cement replacement for sustainable concrete production," *J. Clean. Prod.*, vol. 198, pp. 867–873, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.068.
- [85] F. Agostini, F. Skoczylas, and Z. Lafhaj, "About a possible valorisation in cementitious materials of polluted sediments after treatment," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 4, pp. 270–278, 2007, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.11.012.
- [86] P. M. A. B. Fraj, M. Miraoui, F. Boinski, "Early Age and Durability Properties of Dredged Marine Sand Mortars," 2012.
- [87] J. Limeira, M. Etxeberria, L. Agulló, and D. Molina, "Mechanical and durability properties of concrete made with dredged marine sand," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 11, pp. 4165–4174, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.053.
- [88] V. Mymrin *et al.*, "Utilization of sediments dredged from marine ports as a principal component of composite material," *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 4041–4049, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.035.
- [89] H. Beddaa, A. Ben Fraj, F. Lavergne, and J. M. Torrenti, "Effect of potassium humate as humic substances from river sediments on the rheology, the hydration and the strength development of a cement paste," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 104, no. April, p. 103400, 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103400.
- [90] H. Chen and Q. Wang, "The behaviour of organic matter in the process of soft soil stabilization using cement," *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 65, no. 4, pp. 445–448, 2006, doi: 10.1007/s10064-005-0030-1.
- [91] K. E. Clare and P. T. Sherwood, "The effect of organic matter on the setting of soil-cement mixtures," *J. Appl. Chem.*, vol. 4, no. 11, pp. 625–630, 2007, doi: 10.1002/jctb.5010041107.
- [92] S. Saride, A. J. Puppala, and S. R. Chikyala, "Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays," *Appl. Clay Sci.*, vol. 85, no. 1, pp. 39–45, 2013, doi: 10.1016/j.clay.2013.09.008.
- [93] H. Tremblay, J. Duchesne, J. Locat, and S. Leroueil, "Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement," vol. 546, pp. 535–546, 2002, doi: 10.1139/T02-002.
- [94] X. Yang *et al.*, "Sustainable conversion of contaminated dredged river sediment into eco-friendly foamed concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 252, p. 119799, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119799.
- [95] E. Rozière, M. Samara, A. Loukili, and D. Damidot, "Valorisation of sediments in self-consolidating concrete: Mix-design and microstructure," *Constr. Build. Mater.*, vol. 81,

- pp. 1–10, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.080.
- [96] H. A. L. Id, "Formulation et caractérisation physique d'un béton léger de mousse et à base d'argile : valorisation des sédiments fins de dragage Agnès Zambon To cite this version : HAL Id : tel-02049784 DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX," p. 243, 2019.
- [97] AMORCE, "État des recyclage des mâchefers en ance Enquête," 2018.
- [98] S. Kaibouchi, "Mâchefers d'Incinération d'ordures Ménagères : Contribution à l'étude des mécanismes de stabilisation par carbonatation et influence de la collecte sélective," 2004.
- [99] E. Rendek, G. Ducom, and P. Germain, "Influence of waste input and combustion technology on MSWI bottom ash quality," *Waste Manag.*, vol. 27, no. 10, pp. 1403–1407, 2007, doi: 10.1016/j.wasman.2007.03.016.
- [100] ADEME, *Déchets chiffres-clés*. 2016.
- [101] and T. van de W. "Bin Hu, Peter Rem, "Fine heavy non-ferrous and precious metals recovery in bottom ash treatment," *Turn. waste into ideas*, pp. 1-8(Lisbon, Portugal : ISWA/APESB2009), 2009.
- [102] and P. B. A. W. D. Vries, P.C. Rem, "A new method for dry classification," *Turn. waste into ideas*, p. pp.1–10, 2009.
- [103] P. P. & C.-S. L. B. F, *Phases minérales de basse température et processus de maturation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères, Colloque MIOM 2001, actes, Orléans, 16-18 octobre 2001, BRGM.,.* 2001.
- [104] A. Amokrane, J.-M. Blanchard, H. Billard, L. Chatelet Snidaro, T. Delineau, and C. Bourdier, "Le devenir des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères Partie 2 : traitement des mâchefers. Effet de la maturation, du tamisage, du déferrillage et du lavage à l'eau," *Déchets, Sci. Tech.*, no. 11, pp. 31–38, 1998, doi: 10.4267/dechets-sciences-techniques.900.
- [105] "International Ash Working Group, 1997. 'Municipal solid waste incinerator residues. .
- [106] C. B. P. F. et J. P. Freyssinet P., Piantone P., Azaroual M., Itard Y. and G.-F. L. Baudron J.C., Hau J.M., Guyonnet D., *Evolution chimique et minéralogique des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères au cours de la maturation*. 1998.
- [107] "Maturation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères : mise au point d'un test prévisionnel," 2000.
- [108] "mâchefers d'incinération d'ordures ménagères par le," 2000.
- [109] A.M. *Ministre de l'écologie du développement durable des transports et du logement. Arrêté ministériel du 18 novembre 2011 relatif au recyclage en technique routière des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux.,.*
- [110] and K. B. Kim Crillesen, Jørgen Skaarup, *Management of bottom and ash from wte and plants : An overview of management options and treatment methods. Technical report, Working Group on Thermal Treatment of Waste, ISWA*. 2006.
- [111] J. R. Minane, "Contribution à l'élaboration de sables de mâchefers améliorés en vue d'une valorisation dans la formulation de matériaux cimentaires," 2017.
- [112] G. Bröns-Laot, "Evaluation environnementale de la valorisation de mâchefers d'incinération d'ordures ménagères en remplissage de carrière," 2012.
- [113] G. Pepin, B. Bartet, M. Nomine, G. Pepin, B. Bartet, and M. Nomine, "Caractéristiques et détermination de la matière organique dans les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) To cite this version : HAL Id : ineris-00972238 mâchefers d'incinération d'ordures menageres (MIOM)," *Colloq. MIOM*, pp. 146–151, 2014.

- [114] *Ministère de l'Environnement Français. Circulaire dppr/sei/bpsied n°94-iv-1 du 09/05/94 relative à l'élimination des mâchefers d'incinération des résidus urbains.* .
- [115] S. (Service d'études sur les transports les routes et leurs Aménagements), *Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière. Les mâchefers d'incinération de déchets non dangereux (MIDND).* 2012.
- [116] B. F. & P. P. C.-L. B., *Bottom ash from municipal waste incineration : mineralogy and distribution of metals.* 1999.
- [117] P. P. & C.-S. L. B. F., *Phases minérales de basse température et processus de maturation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères, Colloque MIOM 2001, actes, Orléans,*. 2001.
- [118] M. J. . B. P. & T. G. Delville N., *Phases reliques et phases de haute température : répartition des métaux lourds , Colloque MIOM 2001, actes, Orléans.* 2001.
- [119] W. Incineration, "BOTTOM ASHES FROM VARIOUS GRATE AND FIRING EXAMINATION Low-pollution," pp. 273–292, 1994.
- [120] B. F. & P. P. C.-L. B., *Bottom ash from municipal waste incineration : mineralogy and distribution of metals.* 1999.
- [121] L. F. & K. A. Eypert-Blaison C., Yvon J., *Spéciation des métaux dans les mâchefers et reconstitution des réactions.* 2000.
- [122] N. Singh, M. Mithulraj, and S. Arya, "Influence of coal bottom ash as fine aggregates replacement on various properties of concretes: A review," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 138, no. July, pp. 257–271, 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.07.025.
- [123] L. B. Andrade, J. C. Rocha, and M. Cheriaf, "Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 609–614, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.05.003.
- [124] M. Singh and R. Siddique, "Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 72, pp. 20–32, 2013, doi: 10.1016/j.resconrec.2012.12.006.
- [125] N. M. Ibrahim, K. N. Ismail, R. Cheamat, and P. J. Peng, "Effect of pre-treated incineration bottom ash as sand replacement material to compressive strength of foamed concrete," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2030, no. November, 2018, doi: 10.1063/1.5066844.
- [126] P. E. Regan and A. R. Arasteh, *Lightweight aggregate foamed concrete.* 1990.
- [127] P. Onprom, K. Chaimoon, and R. Cheerarot, "Influence of Bottom Ash Replacements as Fine Aggregate on the Property of Cellular Concrete with Various Foam Contents," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/381704.
- [128] H. Hansika and A. Nanayakkara, "Investigation on Properties of Cellular Lightweight Concrete Blocks with Bottom Ash," *MERCon 2019 - Proceedings, 5th Int. Multidiscip. Moratuwa Eng. Res. Conf.*, pp. 424–429, 2019, doi: 10.1109/MERCon.2019.8818756.
- [129] I. Fonseka and A. Nanayakkara, "Development of Foam Concrete Blocks with Bottom Ash," *MERCon 2020 - 6th Int. Multidiscip. Moratuwa Eng. Res. Conf. Proc.*, pp. 90–95, 2020, doi: 10.1109/MERCon50084.2020.9185223.
- [130] CReCoF, "Guide du recyclage des composites," p. 13, 2017.
- [131] S. P. Yap, C. H. Bu, U. J. Alengaram, K. H. Mo, and M. Z. Jumaat, "Flexural toughness characteristics of steel-polypropylene hybrid fibre-reinforced oil palm shell concrete," *Mater. Des.*, vol. 57, pp. 652–659, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.01.004.
- [132] H. M. Akil, M. F. Omar, A. A. M. Mazuki, S. Safiee, Z. A. M. Ishak, and A. Abu Bakar, "Kenaf fiber reinforced composites: A review," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 8–9, pp. 4107–

- 4121, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.04.008.
- [133] M. Arockiasamy, H. P. Ball, and R. E. Galer, "Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete," *ACI Mater. J.*, vol. 90, no. 1, pp. 1–10, 1993, doi: 10.14359/4046.
- [134] W. Abbas, E. Dawood, and Y. Mohammad, "Properties of foamed concrete reinforced with hybrid fibres," *MATEC Web Conf.*, vol. 162, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201816202012.
- [135] Y. R. Atewi, M. F. Hasan, and E. Güneyisi, "Fracture and permeability properties of glass fiber reinforced self-compacting concrete with and without nanosilica," *Constr. Build. Mater.*, vol. 226, pp. 993–1005, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.08.029.
- [136] P. Asokan, M. Osmani, and A. D. F. Price, "Assessing the recycling potential of glass fibre reinforced plastic waste in concrete and cement composites," *J. Clean. Prod.*, vol. 17, no. 9, pp. 821–829, 2009, doi: 10.1016/j.jclepro.2008.12.004.
- [137] F. Tittarelli and G. Moriconi, "Use of GRP industrial by-products in cement based composites," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 3, pp. 219–225, 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.11.005.
- [138] P. Asokan, M. Osmani, and A. Price, "Improvement of the mechanical properties of glass fibre reinforced plastic waste powder filled concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 4, pp. 448–460, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.017.
- [139] A. Steshenko, A. Kudryakov, V. Konusheva, and O. Syrkin, "Structure formation control of foam concrete," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1800, 2017, doi: 10.1063/1.4973017.
- [140] A. Yazdanbakhsh, L. C. Bank, C. Chen, and Y. Tian, "FRP-Needles as Discrete Reinforcement in Concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 29, no. 10, p. 04017175, 2017, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002033.
- [141] E. Kuzielová, L. Pach, and M. Palou, "Evolution of lightweight foam concretes by water procedure," *Ceram. - Silikaty*, vol. 59, no. 1, pp. 10–16, 2015.
- [142] C. H. L. Z. L. Q. W. Wang, "Influence of Curing Conditions on the Compressive Strength of Foamed Concrete," *DEStech Trans. Environ. Energy Earth Sci.*
- [143] C. Hu, H. Li, Z. Liu, and Q. Wang, "Research on properties of foamed concrete reinforced with small sized glazed hollow beads," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/5820870.
- [144] Y. H. M. Amran, N. Farzadnia, and A. A. A. Ali, "Properties and applications of foamed concrete; A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 990–1005, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112.
- [145] E. K. Tsuchida T, "The lightweight treated soil method. New geomaterials for soft ground engineering in coastal areas.," 2004.
- [146] D. Jain, A. K. Hindoriya, and S. S. Bhadauria, "Evaluation of properties of cellular light weight concrete," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2158, no. September, 2019, doi: 10.1063/1.5127158.
- [147] M. Sanchez Angulo, "Dynamique des sédiments fins en milieu marin et agitation portuaire," pp. 1–88, 2009.
- [148] "<https://www.designenbretagne.com/recy-fib-100-fibre-pour-beton/>."
- [149] N. A. Shuaib and P. T. Mativenga, "Energy demand in mechanical recycling of glass fibre reinforced thermoset plastic composites," *J. Clean. Prod.*, vol. 120, pp. 198–206, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.01.070.
- [150] N. SEBAIBI, "Valorisation Des Composites Thermodurcissables Issus Du Recyclage Dans Une Matrice Cimentaire : Application Aux Betons a Ultra-Haute Performance," p. 189,

- 2010.
- [151] BRGM, "Valorisation à terre des sédiments de dragage : retour d'expérience en France et à l'international," p. 117, 2017.
- [152] M. Antoun, "Vers une meilleure compatibilité ciment/mâchefer (MIDND) dans la formulation de matériaux cimentaires intégrant un ciment sulfo-alumineux," vol. 072, 2019.
- [153] J. M. Chimenos, A. I. Fernández, L. Miralles, M. Segarra, and F. Espiell, "Short-term natural weathering of MSWI bottom ash as a function of particle size," *Waste Manag.*, vol. 23, no. 10, pp. 887–895, 2003, doi: 10.1016/S0956-053X(03)00074-6.
- [154] Y. Xu and D. D. L. Chung, "Carbon fiber reinforced cement improved by using silane-treated carbon fibers," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 5, pp. 773–776, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(99)00015-0.
- [155] J. R. Correia, N. M. Almeida, and J. R. Figueira, "Recycling of FRP composites: Reusing fine GFRP waste in concrete mixtures," *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 15, pp. 1745–1753, 2011, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.05.018.
- [156] V. O. Ikem, A. Menner, A. Bismarck, and L. R. Norman, "Liquid screen: A novel method to produce an in-situ gravel pack," *SPE J.*, vol. 19, no. 3, pp. 437–442, 2014, doi: 10.2118/141256-PA.
- [157] A. Schwartzentruber and C. Catherine, "Method of the concrete equivalent mortar (CEM) - a new tool to design concrete containing admixture," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 33, no. 232, pp. 475–482, 2000, doi: 10.1007/bf02480524.
- [158] D. Zhang, Z. Li, J. Zhou, and K. Wu, "Development of thermal energy storage concrete," vol. 34, pp. 927–934, 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2003.10.022.
- [159] Laboratoire central des ponts et chaussées, *Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons (Méthode d'essai)*. .
- [160] A. B. Abell, K. L. Willis, and D. A. Lange, "Mercury intrusion porosimetry and image analysis of cement-based materials," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 211, no. 1, pp. 39–44, 1999, doi: 10.1006/jcis.1998.5986.
- [161] AFPC-AFREM 11-12, "compte-rendu des journées technique. Durabilité des bétons. INSA toulouse 1997," 1997.
- [162] P. N. Ouédraogo, F. Becquart, and M. Benzerzour, "Contribution à la valorisation de sédiments de dragage portuaire issus de lagunage actif dans la formulation de matériaux cimentaires autoplaçants," vol. 37, no. 1, p. 253, 2019.
- [163] A. F. Lewis, *SEA-DREDGED AGGREGATES FOR CONCRETE PROCEEDINGS OF A SYMPOSIUM HELD AT FULMER GRANGE, SLOUGH, ON 9 DECEMBER 1968*. .
- [164] J. S. Booth, A. G. Dahl, J. S. Booth, and A. G. Dahl, "some geotechnical properties of a marine sediment A Note on the Relationships Between Organic Matter and Some Geotechnical Properties of a Marine Sediment," no. October 2014, pp. 37–41, 2008, doi: 10.1080/10641198609388191.
- [165] P. Taylor *et al.*, "Strength Development of Solidified / Stabilized Organic Waste and Optimum Treatment Design Strength Development file:///C:/Users/EL MOUEDEN/Desktop/video/ouvrabilité/Compressive_strength_prediction_of_lightwei ght_foa (1).pdf of Solidified / Stabilized Orga," no. October, pp. 37–41, 2014, doi: 10.1080/10473289.2003.10466302.
- [166] "1990. Printed," vol. 20, no. c, pp. 517–524, 1990.
- [167] T. Tian, Y. Yan, Z. Hu, Y. Xu, Y. Chen, and J. Shi, "Utilization of original phosphogypsum for the preparation of foam concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 115, pp. 143–152,

- 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.028.
- [168] N. B. R. G. P. Griffin, "investigation into the air void characteristics of foamed concrete," *RMC Mater. CEMEX UK Oper. United Kingdom*.
- [169] G. BRUERE, "some influences on admixture requirements in concrete," *6th Annu. Conf. NRMCA, Sydney*.
- [170] R. Achour, R. Zentar, N. E. Abriak, P. Rivard, and P. Gregoire, "Durability study of concrete incorporating dredged sediments," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 11, p. e00244, 2019, doi: 10.1016/j.cscm.2019.e00244.
- [171] S. Wei, C. Yiqiang, Z. Yunsheng, and M. R. Jones, "Characterization and simulation of microstructure and thermal properties of foamed concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 1278–1291, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.027.
- [172] H. Ez-Zaki, A. Diouri, S. Kamali-Bernard, and O. Sassi, "Composite cement mortars based on marine sediments and oyster shell powder," *Mater. Constr.*, vol. 66, no. 321, 2016, doi: 10.3989/mc.2016.01915.
- [173] G. Pecqueur, C. Crignon, and B. Qu  n  e, "Behaviour of cement-treated MSWI bottom ash," *Waste Manag. Ser.*, vol. 1, no. C, pp. 541–547, 2000, doi: 10.1016/S0713-2743(00)80065-3.
- [174] K. Rübner, F. Haamkens, and O. Linde, "Use of municipal solid waste incinerator bottom ash as aggregate in concrete," *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, vol. 41, no. 4, pp. 459–464, 2008, doi: 10.1144/1470-9236/07-036.
- [175] U. M  ller and K. Rübner, "The microstructure of concrete made with municipal waste incinerator bottom ash as an aggregate component," *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 8, pp. 1434–1443, 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.03.023.
- [176] A. Bhardwaj and N. Singh, "Effect of coal bottom ash on strength and durability properties of concrete," *4th UKIERI Concr. Congr. Concr. Glob. Build. 5 - 8 March 2019 Jalandhar, Punjab, India*, vol. 4, no. 951002002, pp. 2013–2015, 2015.
- [177] N. Ghafoori and J. Bucholc, "Investigation of Lignite-Based Bottom Ash for Structural Concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 128–137, 1996, doi: 10.1061/(asce)0899-1561(1996)8:3(128).
- [178] G. Samson, "Synthèse et propriétés des mousses minérales To cite this version :," 2016.
- [179] T. Zhang and Z. Zhao, "Optimal Use of MSWI Bottom Ash in Concrete," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 8, no. 2, pp. 173–182, 2014, doi: 10.1007/s40069-014-0073-4.
- [180] A. Marto and C. S. Tan, "Properties of coal bottom ash from power plants in Malaysia and its suitability as geotechnical engineering material," *J. Teknol.*, vol. 78, no. 8–5, pp. 1–10, 2016, doi: 10.11113/jt.v78.9603.
- [181] A. A. Al-Rawas, A. W. Hago, R. Taha, and K. Al-Kharousi, "Use of incinerator ash as a replacement for cement and sand in cement mortars," *Build. Environ.*, vol. 40, no. 9, pp. 1261–1266, 2005, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.10.009.
- [182] L. Bertolini, M. Carsana, D. Cassago, A. Quadrio, and M. Collepardi, "MSWI ashes as mineral additions in concrete," vol. 34, pp. 1899–1906, 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.02.001.
- [183] P. Pimienta and D. P. Bentz, "Effects of the incorporation of Municipal Solid Waste Incineration fly ash in cement pastes and mortars I. Experimental study," vol. 32, pp. 303–311, 2002.
- [184] Andrade LB., "Methodology of assessment to use of bottom ash of thermoelectric power plants as aggregate in concrete," 2004.
- [185] Z. Yu, J. Ma, G. Ye, K. van Breugel, and X. Shen, "Effect of fly ash on the pore structure

- of cement paste under a curing period of 3 years,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 144, pp. 493–501, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.182.
- [186] Z. Pavlík, M. Keppert, M. Pavlíková, P. Volfová, and R. Černý, “Application of MSWI bottom ash as alternative aggregate in cement mortar,” *WIT Trans. Ecol. Environ.*, vol. 148, no. April 2016, pp. 335–342, 2011, doi: 10.2495/RAV110311.
- [187] H. J. H. B. P. Tang, Q.L. Yu, R. Yu, “The application of MSWI bottom ash fines in high performance concrete,” *Build. Mater. Perform.*
- [188] M. Machaka, J. Khatib, A. Elkordi, H. Ghanem, and O. Baalbaki, “Selected properties of concrete containing municipal solid waste incineration bottom ash (MSWI-BA),” *Sustain. Constr. Mater. Technol.*, vol. 2, no. July, 2019, doi: 10.18552/2019/idscomt5099.
- [189] N. Saikia *et al.*, “Assessment of Pb-slag, MSWI bottom ash and boiler and fly ash for using as a fine aggregate in cement mortar,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 154, no. 1–3, pp. 766–777, 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.10.093.
- [190] M.-J. Yang, H.-Y. Wang, and H.-Y. Wang, “Effects on Strengths of Cement Mortar When Using Incinerator Bottom Ash as Fine Aggregate,” *World J. Eng. Technol.*, vol. 02, no. 03, pp. 42–47, 2014, doi: 10.4236/wjet.2014.23b007.
- [191] P. Shen, H. Zheng, J. Lu, and C. S. Poon, “Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash (IBA) aggregates in high-strength pervious concrete,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 174, no. March, p. 105736, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105736.
- [192] M. Małek, M. Jackowski, W. Łasica, M. Kadela, and M. Wachowski, “Mechanical and material properties of mortar reinforced with glass fiber: An experimental study,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 3, pp. 1–14, 2021, doi: 10.3390/ma14030698.
- [193] D. Vafaei, R. Hassanli, X. Ma, J. Duan, and Y. Zhuge, “Sorptivity and mechanical properties of fiber-reinforced concrete made with seawater and dredged sea-sand,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 270, no. xxxx, p. 121436, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121436.
- [194] A. Dehghan, K. Peterson, and A. Shvarzman, “Recycled glass fiber reinforced polymer additions to Portland cement concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 146, pp. 238–250, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.011.
- [195] B. Chen and J. Liu, “Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 5, pp. 913–917, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.07.035.
- [196] B. Chan, *Recycled and secondary aggregates in concrete*, vol. 88, no. 15–16. 2010.
- [197] M. Małek, M. Jackowski, W. Łasica, and M. Kadela, “Characteristics of recycled polypropylene fibers as an addition to concrete fabrication based on portland cement,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 8, 2020, doi: 10.3390/MA13081827.
- [198] E. T. Dawood, “Effect of glass fibers on mechanical properties of structural lightweight foamed concrete (SLFC),” pp. 1–21, 2013.
- [199] T. Mishurova, F. Léonard, T. Oesch, D. Meinel, G. Bruno, and N. Rachmatulin, “Evaluation of fiber orientation in a composite and its effect on material behavior Evaluation of fiber orientation in a composite and its effect on material behavior,” no. November, 2017.
- [200] R. Ralegaonkar, H. Gavali, P. Aswath, and S. Abolmaali, “Application of chopped basalt fibers in reinforced mortar : A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 164, pp. 589–602, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.245.
- [201] Saint-Jalmes A, “physical chemistry in foam drainage and coarsening,” *Soft Matter*, vol. Vol.2, p. P.836-49, 2006.

- [202] P. O. CANTAT I, COHEN ADDAD S, SAINT-JALMES A, ELIAS F, HOHLER R, "Mousses liquides: structure et dynamique."
- [203] AMORCE, *Recueil d'exemples de chantiers ayant valorisé des mâchefers*. 2014.
- [204] J. Kamp, J. Villwock, and M. Kraume, "Drop coalescence in technical liquid/liquid applications: A review on experimental techniques and modeling approaches," *Rev. Chem. Eng.*, vol. 33, no. 1, pp. 1–47, 2017, doi: 10.1515/revce-2015-0071.

ANNEXES

ANNEXE 1 LE MALAXAGE RAPIDE

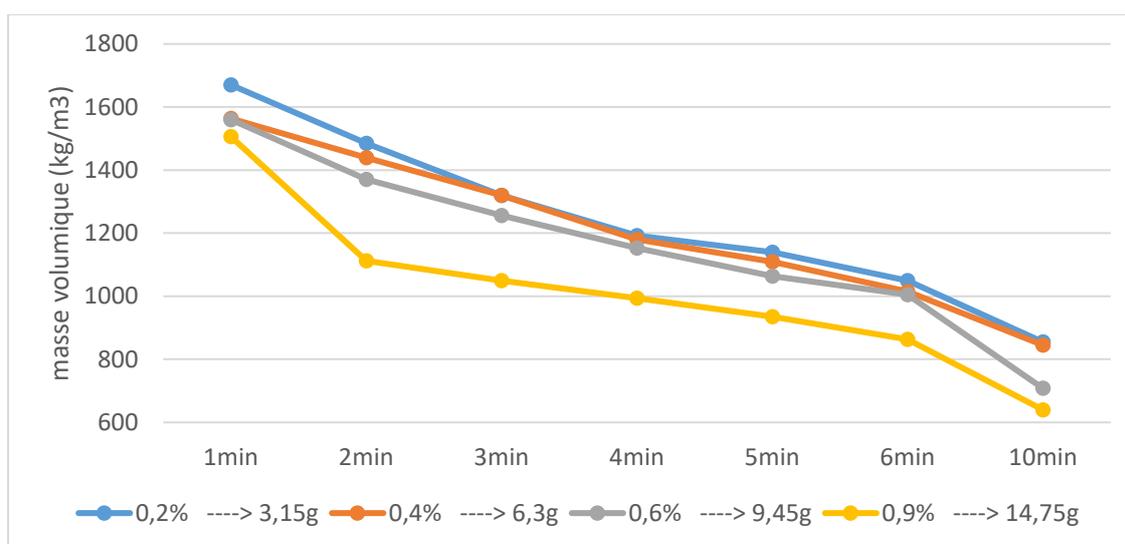
La mousse utilisée est de type Sika

Le malaxage rapide consiste à mélanger l'agent moussant avec tous les composants, dans un malaxeur équipé d'un batteur, pour obtenir une pâte minérale

Le malaxage permet d'emprisonner des bulles d'air dans la suspension concentrée, modifiant de ce fait la rhéologie de l'ensemble et permettant à la mousse de se créer et de se stabiliser. Le temps de malaxage nécessaire à la formation et à la stabilisation du volume de mousse minérale peut être assez long et est largement influencé par la vitesse de malaxage. Cette méthode de moussage permet en général de former des mousses minérales avec des teneurs en eau assez basses, en revanche les teneurs en tensio-actifs sont assez élevées.

Pour l'obtention de la mousse il est nécessaire d'avoir une grande vitesse de malaxage d'où le nom de malaxage rapide

Lors des essais, différents dosages de l'agent moussant ont été testés : 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.9% par rapport au ciment soit, 3.15g, 6.3 g, 9.45 g, et 14.75 g. Les autres composants ont gardé un dosage fixe. Le temps et la vitesse de malaxage ont été variés pour chaque dosage et la densité à l'état frais est ensuite mesurée.



La Figure 237 présente les densités à l'état frais du matériau en fonction de différents temps de malaxage de la mousse, avec différents dosages de l'agent moussant.

On observe que plus temps de malaxage augmente, plus la densité à l'état frais diminue. De plus ce paramètre influe plus que le simple ajout de la mousse. Autrement dit on obtient de meilleurs résultats, si on augmente le temps de malaxage que si l'on ajoute de la mousse.

Ce résultat est d'autant plus appréciable quand on sait que l'agent moussant coûte très cher.