
Formulation et caractérisation d'un béton allégé à base de sédiments marins

Zambon A.¹, Saiyouri N.¹, Sbartai M.¹, Duplaine H.²

¹ Institut de Mécanique et d'Ingénierie Département Génie Civil et Environnemental – I2M UMR CNRS 5295

² Entreprise Balineau, 3 Avenue Paul Langevin, 33600 Pessac

RÉSUMÉ. Cette étude présente le développement d'un béton innovant qui réutilise les sédiments marins en tant que matière première et en remplacement des granulats traditionnellement utilisés. Il est fabriqué à partir d'une mousse pour lui conférer une faible densité (1,2). Le béton développé dans cette étude est fabriqué à partir d'un sol artificiel pour palier au problème de variabilité de ce dernier. L'un des premiers objectifs a été de mettre en place une méthode de formulation, un procédé de fabrication et une base de données des caractéristiques de ce matériau. La méthode de formulation est basée sur la détermination d'un paramètre relié à la limite de liquidité des sédiments marins. Ce paramètre permet de fixer la quantité d'eau pour la fabrication du béton. La première démarche de la mise en place de la méthode de formulation a été de réduire le phénomène d'affaissement de la mousse pendant la fabrication du béton en déterminant une quantité d'eau optimale. Des éprouvettes ont été testées mécaniquement en compression à 28 jours. Les résultats ont montré que le rapport eau/limite de liquidité dépend de la quantité de ciment. Cette dernière a été ajustée pour atteindre une résistance en compression satisfaisante au minimum égale à 0,3MPa.

ABSTRACT. This study deals with the development of an innovative concrete which reuses marine sediments as raw material and as replacement of aggregates traditionally used. It is made from air-foam to confer it a lower density (1,2). The concrete made during the study use an artificial soil to address the variability of the soil. The experimental works aim to establish a mix design method, a manufacturing process and a database about the concrete characteristics. The mix design method is based on the determination of a parameter related to the liquid limit of marine sediments. This parameter permits to fix the water content in the manufacturing of the concrete. The first work was to reduce the air-foam collapse during the manufacturing of the concrete by using an optimal value of the water content. Mechanical tests has been led at 28 days. Results shows that the ratio water/liquid limit depend on cement content. This cement content was adjusted to reach accepted compressive strenght at least equal to 0,3MPa.

MOTS-CLÉS : sédiments marins, dragage, mousse, béton allégé, résistance mécanique.

KEY WORDS: marine sediments, dredging, air-foam, lightweight concrete, mechanical strength.

1. Introduction

L'activité de dragage consiste à enlever les fonds marins dans les ports dans le but de sécuriser la navigation et l'aménagement d'un quai en assurant une hauteur d'eau suffisante pour le passage des bateaux.

La quantité de sédiments dragués en France chaque année s'élève à environ 50 millions de mètres cubes [DUC 11]. Jusqu'à dans les années 80, la solution utilisée était le relargage en mer. Cependant cette méthode représente une menace pour l'écosystème littoral. Le devenir des sédiments marins issus du dragage a donc fait l'objet d'une réglementation qui impose de les mettre en dépôt. La valorisation des sédiments marins dans la formulation des bétons constitue un véritable enjeu écologique et économique [GRO 05]. Les sédiments marins sont issus de la désagrégation des roches. La fraction inférieure à $2\mu\text{m}$ correspond à la fraction d'argile. Les particules argileuses sont des phyllosilicates d'aluminium hydratés. Leur structure cristalline est en feuillet. Ces feuillets sont constitués de couches d'octaèdres d'alumine $\text{Al}(\text{OH})_6$ et de couches de tétraèdres de silice SiO_4 reliées par les atomes O et (OH) mis en commun. L'argile est dite active c'est-à-dire qu'elle a une capacité de gonflement au contact de l'eau due à l'insertion des molécules d'eau entre les feuillets de silice et d'alumine. Dans les sédiments marins on distingue la phase minérale et la matière organique. La proportion de matière organique est très faible par rapport à la phase minérale mais peut jouer un rôle sur les caractéristiques physiques, mécaniques et environnementales du sédiment. En effet la matière organique interagit avec les composés minéraux et modifie les caractéristiques géotechniques du sol comme la compressibilité [ACH 13]. Le béton développé dans cette étude est fabriqué à partir d'un sol artificiel pour pallier au problème de variabilité des prélèvements naturels. L'absence de matière organique dans notre sol artificiel est donc à prendre en compte sur l'applicabilité de nos résultats à un sol naturel.

L'incorporation de la mousse dans le béton permet d'obtenir une densité plus faible égale à 1,2. Ce béton correspond à un matériau de remblais. Les applications visées correspondent à des rénovations de quais maritime afin d'utiliser de manière in situ les sédiments marins dragués.

2. Méthodes et matériaux

2.1. Matériaux

Le béton développé dans cette étude a pour but de recycler des sédiments marins du bassin d'Arcachon (port du Rocher). Ces sédiments marins ont été caractérisés en mesurant la valeur au bleu de méthylène, la limite de liquidité et la granulométrie par tamisage de 5 échantillons (E1, E2, E3, E4, E5) d'un même prélèvement. La valeur au bleu de méthylène et la limite de liquidité permettent d'évaluer l'argilosité des sédiments.

La valeur au bleu de méthylène est mesurée avec la norme NFP 94-068 et est exprimée en grammes de colorant par kilogramme de sédiments. Les valeurs présentées tableau 1 indiquent que le sol est limoneux.

Tableau 1. Valeur au bleu de méthylène

Echantillon	E1	E2	E3	E4	E5
VBS	0,99	1,49	0,99	1,49	3,47
Argilosité	Limoneux	limoneux	limoneux	limoneux	limoneux-argileux

L'analyse granulométrique est effectuée par tamisage à l'aide d'une colonne de sept tamis d'ouverture 5mm, 2mm, 1mm, 0,4mm, 0,2mm, 0,1mm et 0,08mm (à noter que le tamisage à 0,08mm correspond à l'ancienne norme - la nouvelle norme s'effectue avec un tamis à 0,063mm pour distinguer le sable du limon). Les courbes granulométriques présentées sur la figure 1 indiquent une granulométrie assez proche pour les 5 échantillons.

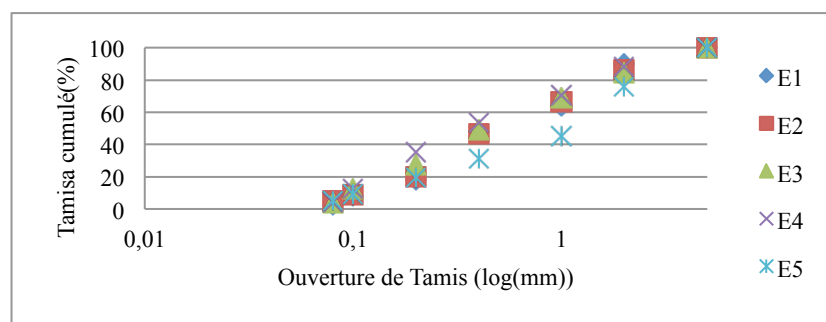


Figure 1. Courbes granulométriques des 5 échantillons de sédiments marins

La limite de liquidité a été mesurée sur 4 échantillons d'un même prélèvement. La valeur moyenne est égale à 98,85%. Cette mesure est stable d'un échantillon à un autre puisque le coefficient de variation de ces mesures est de l'ordre de 0,57%.

Les caractéristiques des sédiments marins prélevés varient peu d'un échantillon à l'autre. Cependant, dans le cadre de notre étude, pour s'assurer de la stabilité des caractéristiques du sol, un sol artificiel est utilisé. Il est constitué de bentonite calcique et de sable calibré de diamètre 0,125mm. La bentonite calcique se caractérise par la présence de cation Ca^{2+} entre les feuillets de silice et d'alumine ce qui lui confère une capacité de gonflement importante. Les proportions en bentonite et en sable sont fixées pour obtenir une limite de liquidité proche de celle des prélèvements du bassin d'Arcachon (site du Port du Roche). La composition du sol artificiel a été fixée à 80% de bentonite et de 20% de sable calibré de diamètre 0,125mm pour obtenir une limite de liquidité de 90%.

2. 2 Méthode de formulation

La méthode de formulation utilise le paramètre w/w_L qui correspond au rapport de la limite de liquidité (w_L) et de la teneur en eau du sol (w) qui correspond à la quantité d'eau à ajouter pour la fabrication du béton [HOR14]. Il existe une valeur optimale du rapport w/w_L . Cette valeur optimale est déterminée à partir de la courbe de la densité du béton à l'état frais en fonction de ce rapport. Les paramètres fixés pour une formulation sont le pourcentage massique de ciment C, le rapport w/w_L , le pourcentage volumique de mousse M (par rapport à la quantité totale de béton à fabriquer) et la masse totale de béton à fabriquer. Le calcul des constituants s'effectue de la manière suivante ;

- Calcul de la masse de ciment à partir du pourcentage massique de ciment fixé et de la masse de béton à fabriquer.
- Calcul de la masse du mélange « sol + eau » qui correspond à la masse de béton à fabriquer moins la masse de ciment.
- Calcul de la teneur en eau w du mélange « sol + eau » par rapport à la limite de liquidité du sol et la valeur du rapport w/w_L
- Calcul de la masse d'eau et la masse de sol avec la teneur en eau et la masse du mélange « sol+eau ».
- Calcul du volume de mousse à incorporer par rapport au volume de béton sans mousse et le volume de béton final.

La valeur optimale w/w_L est propre à la quantité de ciment. Le ciment utilisé correspond à un ciment de classe I (CEMI 52,5 N PM-CP 2). L'étude vise à minimiser la quantité de ciment. Le premier pourcentage massique de ciment testé est fixé à 4%. La vitesse de malaxage utilisée pour la fabrication des éprouvettes correspond à 30tr/min. Les moules utilisés sont cubiques de dimension $100 \times 100 \times 100 \text{mm}^3$ pour les essais mécaniques à la compression selon la norme EN 206. Avant de couler le béton frais, les moules sont huilés afin de faciliter le démoulage. Aucun procédé de mise en place n'est utilisé. En effet les mesures d'étalement au cône d'Abrams effectuées pour différentes formulations indiquent des valeurs qui s'étalent de 30cm à 80cm ce qui correspond à un béton très fluide. Au niveau des conditions de cure, pour palier le phénomène de fissuration et de retrait, les éprouvettes sont emballées dans un film plastique avec leurs moules pendant 7 jours. A cette échéance, les éprouvettes sont démoulées et placées dans des bacs à humidité contrôlée égale à 90%HR et à une température de 20°C. Les pourcentages de mousse testés pour cette quantité de ciment sont 0%, 25%, 50%, 75%. Pour une valeur de w/w_L , le rapport E/C est identique pour les différents pourcentages de mousse utilisés (tableau 2). Ce dernier présente les quantités des constituants pour des rapport w/w_L de 1,25 et 1,5

Tableau 2. Masses des constituants (kg pour 1m^3 de béton) et rapport E/C pour les différentes formulations testées pour $C=4\%$.

w/w_L	1,25				1,5			
M(%)	0	25	50	75	0	25	50	75
E	716,61	537,46	358,31	179,15	769,33	577,00	384,66	192,33
C	56,40	42,30	28,20	14,10	55,80	41,85	27,90	13,95
S	636,99	477,74	318,49	159,25	569,87	341,92	60,81	142,47
E/C	12,71				13,79			
w/w_L	1,75				2			
M(%)	0	25	50	75	0	25	50	75
E	822,06	616,54	411,03	205,51	814,63	610,97	407,31	203,66
C	56,00	42,00	28,00	14,00	52,80	39,60	26,40	13,20

S	521,94	313,17	260,97	130,49	452,57	339,43	181,03	90,51
E/C	14,68				15,43			

3. Résultats et discussions

Les courbes de la densité à l'état frais en fonction du rapport w/w_L pour les différents pourcentages de mousses et pour $C=4\%$ sont présentées sur la figure 2. Pour des valeurs de w/w_L faibles, les valeurs de la densité du béton frais pour différents pourcentages de mousse sont presque identiques. A partir d'une certaine valeur de w/w_L , la densité à l'état frais chute et les valeurs selon les différents pourcentages de mousse se différencient. Ces résultats sont en cohérences avec ceux de Horpibulsuk [HOR 14]. Ces observations s'expliquent par le phénomène d'affaissement de la mousse. Le ciment met en jeu des mécanismes d'hydratation qui nécessitent de l'eau. Le ciment consomme l'eau de la mousse provoquant ainsi son affaissement. La valeur optimale du rapport w/w_L correspond à la fin de la chute de la densité pour minimiser l'affaissement de la mousse et aussi limiter la porosité créée par l'excès d'eau. Dans notre étude, pour le pourcentage de ciment 4%, la valeur optimale w/w_L correspond à 1,6.

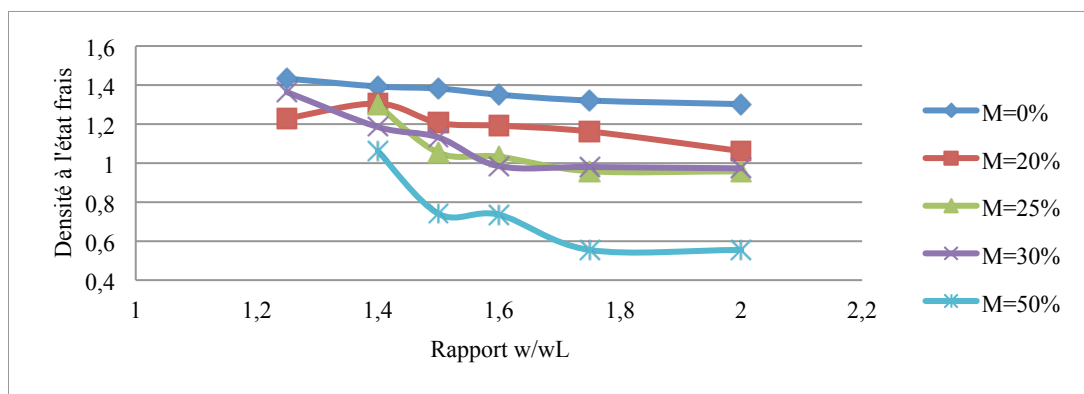


Figure 2. Densité à l'état frais en fonction du rapport w/w_L pour $C=4\%$

Pour ces formulations, la résistance mécanique n'est pas satisfaisante. La quantité de ciment est donc augmentée pour les formulations à tester pour la suite. Les pourcentages de mousse $M=50\%$ et $M=75\%$ sont abandonnés car les densités sont largement inférieures à la densité visée dans le cadre de notre étude (1,2). Pour la suite de cette étude, le pourcentage de ciment $C=8\%$ est testé. Le tableau 3 présente les quantités des constituants des formulations testées.

Tableau 3. Masses des constituants (kg pour $1m^3$ de béton) et rapport E/C pour les différentes formulations testées pour $C=8\%$.

w/w_L	1,6			1,7		
M(%)	20%	25%	30%	20%	25%	30%
E(kg/m ³)	612,45	574,17	535,89	620,90	582,10	543,29
C(kg/m ³)	90,24	84,60	78,96	89,28	83,70	78,12
S(kg/m ³)	425,31	398,73	372,15	324,65	136,83	355,09
E/C	6,79			6,95		
w/w_L	1,8			2		
M(%)	20%	25%	30%	20%	25%	30%
E(kg/m ³)	637,12	597,30	557,48	624,55	585,51	546,48
C(kg/m ³)	89,60	84,00	78,40	84,48	79,20	73,92
S(kg/m ³)	314,63	368,70	344,12	346,97	260,23	242,88
E/C	7,11			7,39		

La figure 3 représente la densité en fonction du rapport w/w_L pour les trois pourcentages de mousse $M=20\%$, $M=25\%$ et $M=30\%$. Le résultat indique une valeur optimale de w/w_L égale à 1,8 pour le pourcentage de ciment correspondant à 8%

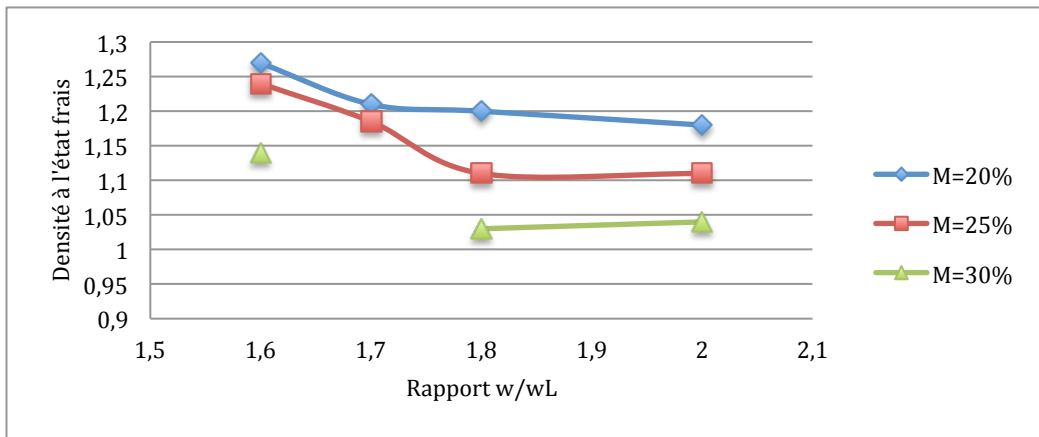


Figure 3. Densité à l'état frais en fonction du rapport w/w_L

Pour caractériser la rhéologie du béton frais, l'étalement au cône d'Abrams est mesuré. La figure 4 montre que lorsque le rapport w/w_L augmente, l'étalement augmente également et la relation est quasiment linéaire. Pour une valeur w/w_L inférieure à 1,8, les valeurs d'étalement pour les différents pourcentages de mousse sont très proches. Elles se différencient à partir de $w/w_L=1,8$. Cette observation est en adéquation avec la valeur optimale de w/w_L déterminée à 1,8 précédemment et qui correspond à une minimisation de l'affaissement de la mousse. Le phénomène d'affaissement de la mousse a donc un impact sur l'étalement du béton frais.

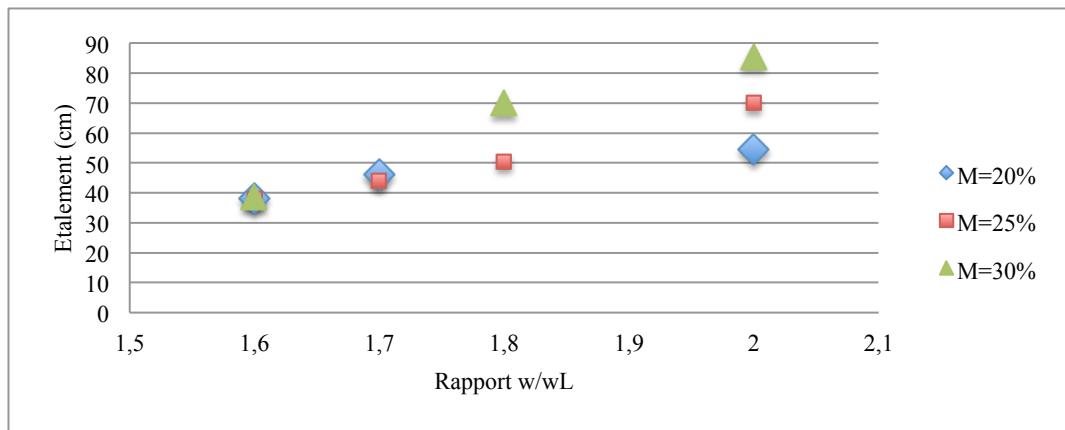


Figure 4. Etalement à l'état frais en fonction du rapport w/w_L

Les formulations correspondant à $C=8\%$, avec w/w_L égale à 1,8 et 2 et avec un pourcentage volumique de mousse correspondant à $M=20\%$, $M=25\%$ et $M=30\%$, sont caractérisées mécaniquement à 28 jours. Un essai de compression à la presse est effectué selon la norme EN 206 sur des éprouvettes cubiques de 100mm de côté. L'essai est piloté en déplacement avec une vitesse de 0,0015mm/s. Quatre extensomètres sont fixés sur l'éprouvette pour mesurer les déformations ; deux extensomètres à la vertical, deux à l'horizontal (figure 5 à gauche). Pendant l'essai, l'écartement des quatre extensomètres et la force sont mesurés toutes les 0,02 secondes. A partir de ces données, la courbe de la contrainte en fonction de la déformation des capteurs A et B (capteurs qui mesurent la déformation longitudinale) a été tracée pour chaque essai. Les courbes d'une même formulation ont été superposées pour évaluer le comportement mécanique global et l'élasticité du béton de cette formulation. La fiabilité de chaque essai est évaluée en observant la différence des courbes entre le capteur A et B et l'allure globale des courbes. La figure 5 à droite présente la superposition des courbes de tous les essais (à gauche) et la superposition des courbes jugées fiables (à droite) pour chaque formulation. Globalement, pour toutes les formulations, les courbes présentent un domaine linéaire assez limité. Le module d'Young a été calculé de sur la droite du domaine élastique. Les résultats obtenus sont présentés tableau 4.

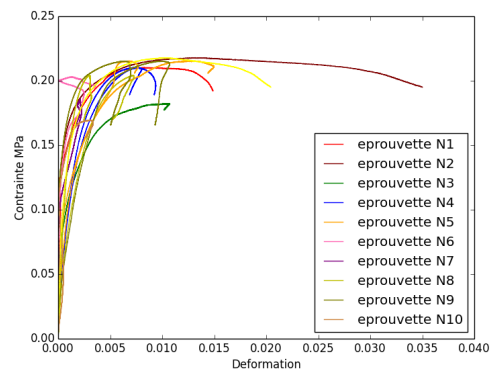


Figure 5. A gauche (Photographie du dispositif de l'essai mécanique sur la presse), à droite : Superposition des courbes contraintes en fonction de la déformation pour la formulation $w/w_L=1,8$ et $M=20\%$

Tableau 4. Valeur du module d'Young calculés à partir de la superposition des courbes jugées fiables pour chaque formulation.

w/w_L	1,8	1,8	2	2
M (%)	20	25	20	25
Module d'Young (MPa)	100	100	80	7

Les résistances mécaniques mesurées sont inférieures à 0,22 MPa pour l'ensemble des formulations. Ces valeurs diminuent significativement en fonction de l'augmentation de la quantité de mousse et le rapport w/w_L . La résistance au pénétromètre a aussi été mesurée à 28 jours. La résistance au pénétromètre étant une mesure locale, il est nécessaire de l'effectuer plusieurs fois (une dizaine de fois dans le cadre de notre étude) pour moyenner l'ensemble des mesures. Ces mesures fragilisant le matériau, elles sont effectuées après le test mécanique. Les résultats présentés sur le tableau 5 montrent que la résistance au pénétromètre est plus élevée que la résistance mécanique à la presse. Un des objectifs de l'étude consiste à relier ces deux grandeurs pour évaluer la résistance mécanique du béton au jeune âge. Cependant une régression linéaire présentée sur la figure 6 indique un coefficient de corrélation faible. De plus pour une même formulation, les mesures au pénétromètre présentent un écart type assez important. L'utilisation du pénétromètre ne semble pas adapté à notre matériau. Par contre, elle peut être une indication qualitative du suivi de la cure. Par la suite, un scléromètre sera utilisé pour évaluer la résistance mécanique au jeune âge.

Tableau 5. Résistances mécaniques à la compression (q_u) et résistances au pénétromètre (p)

w/w _L	M(%)	C(kg/m ³)	q _u (MPa)	Moyenne q _u	Variabilité de q _u	p	Variabilité de p
1,8	20	89,6	0,21	0,21	6%	0,36	9%
			0,22			0,38	
			0,18			0,37	
			0,21			0,32	
			0,22			0,29	
			0,20			0,35	
			0,19				
			0,20				
			0,22				
1,8	25	84	0,10	0,11	10%	0,20	20%
			0,11			0,22	
			0,11			0,17	
			0,13			0,29	
			0,12			0,18	
2	20	84,48		0,12	6%	0,24	11%
			0,12			0,19	
			0,11			0,19	
			0,11				
			0,13			0,23	
0,12							
2	25	79,2	0,08	0,08	14%	0,18	11%
			0,10				
			0,08			0,2	
			0,07			0,12	

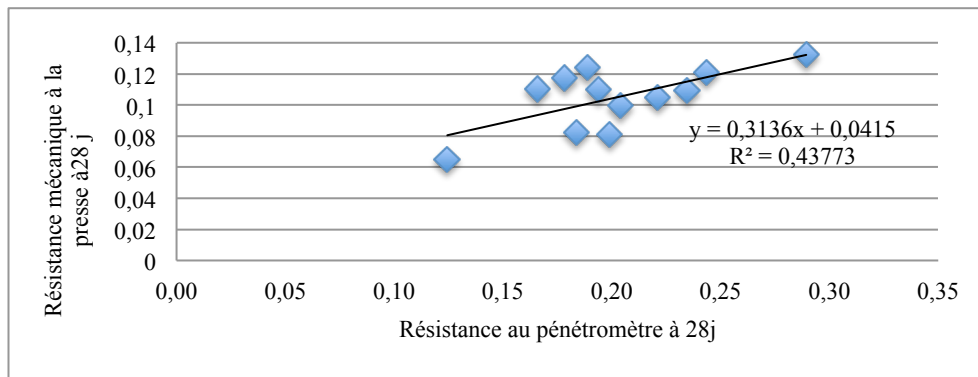


Figure 6. Relation entre résistance mécanique à la compression et la résistance au pénétromètre (à 28jours).

La résistance mécanique minimum acceptée correspondant à 0,3MPa. Le pourcentage de ciment égal à 8% est jugé donc insuffisant. De nouvelles formulations avec une quantité de ciment plus importante et correspondant à C=12% et C=15% sont étudiées.

La valeur optimale du rapport w/w_L pour le pourcentage de ciment C=12% correspond à 1,9 (Figure 7). Pour la suite de l'étude des essais mécaniques à 28jours et 90 jours seront menés.

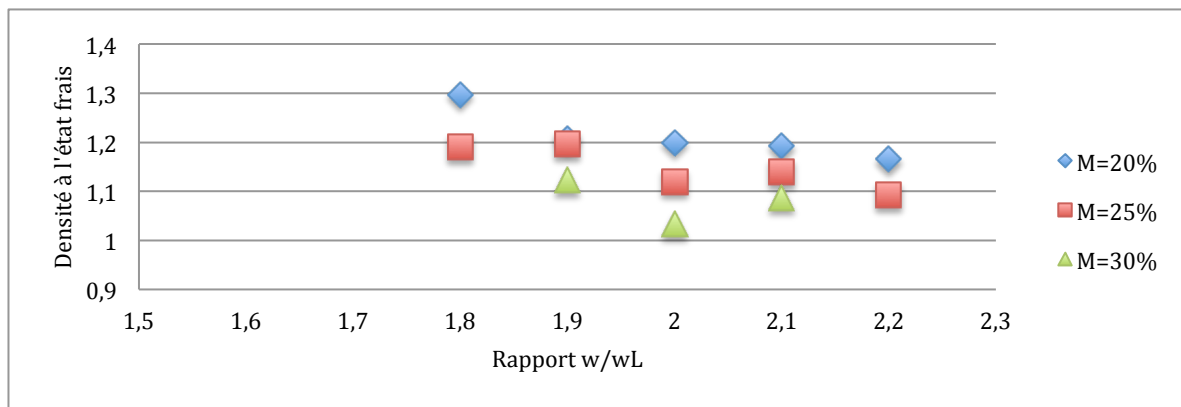


Figure 7. Courbe densité à l'état frais en fonction du rapport w/w_L pour C=12%

4. Conclusion

L'objectif de cette étude est de développer un béton allégé qui réutilise les sédiments marins issus de l'activité du dragage. La première démarche a consisté à mettre en place la méthode de formulation qui fixe un pourcentage de ciment, un pourcentage volumique de mousse, une quantité d'eau. La quantité d'eau est fixée par le rapport w/w_L. w et w_L correspondent respectivement à la teneur en eau et à la limite de liquidité des sédiments marins. L'étude a permis de démontrer que la valeur optimale du rapport w/w_L dépend de la quantité de ciment ; pour C=4% et C=8%, les valeurs optimales du rapport w/w_L correspondent respectivement à 1,6 et 1,8. Ces pourcentages de mousse ne permettent pas d'obtenir une résistance mécanique satisfaisante pour l'application visée. Pour C=12% et M=20% la valeur optimale du rapport w/w_L correspond à 1,9 et pour M=25% et M=30%, la valeur optimale correspond à 2. Pour compléter cette étude, des essais mécaniques de caractérisation seront menés pour valider l'approche proposée.

5. Remerciement

Les travaux présentés dans cet article ont pu être réalisés grâce au financement de l'entreprise Balineau que nous remercions.

6. Références bibliographiques

- [DUC 11] DUCLAY E. « Sédiments de dragage. Grenelle de la Mer », 2011.
- [GRO 05] GROSDÉMANGE D., « Guide pour la gestion des opérations de dragage », *Fédération Française des Port de Plaisance*, 2005.
- [HOR 14] HORPIBULSUK S., WIJITCHOT A., NERILITKNORBUREE S., « Factors influencing unit weight and strength of lightweight cemented clay », *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol.47, p101-109, 2014.
- [MAN 14] MANCERA A. « Etude préliminaire pour la formulation de béton allégé à base de sédiments marins », *Université Bordeaux*, 2014.
- [ACH 13] ACHOUR R. « Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiments de dragage », 2013.