

La possibilité de valorisation des sédiments marins fins dans le matériau béton

Mahmoud Hayek¹, Tara Soleimani², Marie Salgues¹, Youssef El Bitouri¹, Jean-Claude Souche¹, Eric Garcia-Diaz¹

¹LMGC, Univ Montpellier, IMT Mines Ales, CNRS, Ales, France

²HSM, Univ Montpellier, IMT Mines Ales, CNRS, IRD, Ales, France

ABSTRACT Chaque année, l'activité portuaire nécessite le dragage d'une importante quantité de sédiments marins qui finissent souvent stockés en décharge sous forme de déchets. Ces opérations sont coûteuses et néfastes pour l'environnement. Afin de minimiser ces rejets et d'optimiser les ressources dans une logique d'économie circulaire, cette étude vise à examiner la possibilité de valoriser des sédiments marins bruts sans aucun traitement pour le port de Pérols (PP) et après un pré-traitement par hydrocyclonage pour le port de Camargue (PC), ports situés sur la côte d'Occitanie en France. Cette valorisation consiste à substituer une partie du sable par ces sédiments fins bruts dans la formulation d'un béton ordinaire de classe XS2 C30/37. L'effet de la substitution du sable par 10, 20, 30, 40, 50% des sédiments de PC ou par 10, 15, 20 et 30% des sédiments de PP a été évalué. Les résultats montrent une diminution de la résistance mécanique avec l'augmentation du taux de substitution. Dans le cas des sédiments de PC, le pourcentage de substitution est limité à 40% si un béton de classe XS2 C30/37 est l'objectif. Pour des classes de béton inférieures, C20 à 25 par exemple, une substitution de sable par des sédiments à hauteur de 50% peut être envisagée. Dans le cas des sédiments de PP, La classe de béton maximale obtenue est C20 ou C25. Pour autant, il est possible de valoriser les fines de sédiments de dragages sans traitement coûteux économiquement ou environnementalement au sein de bétons destinés au milieu marin. Cette étude apporte donc des résultats préliminaires nécessaires à la valorisation durable des sédiments à moindre coût et à long terme.

Keywords Sédiments marins fins, économie circulaire, béton ordinaire, résistance mécanique

I. INTRODUCTION

En France, comme dans le monde, tous les ports sont soumis à des phénomènes d'envasement qui sont liés à la dynamique sédimentaire elle-même conséquence des conditions hydrodynamiques et de l'érosion du trait de côte. Ces dépôts constituent une entrave pour l'accès des navires aux installations portuaires et donc ça a un impact économique. Par conséquent, l'entretien des ports et la sécurisation de la navigation maritime constituent un enjeu pour le développement économique et le maintien des activités portuaires. Des campagnes de dragage sont donc nécessaires pour permettre d'évacuer les sédiments en excès et retrouver les tirants d'eau nécessaires à la navigation.

Chaque année, plusieurs centaines de millions de tonnes de sédiments sont donc draguées partout dans le monde (Agostini et al., 2007). En France, plus de 30 millions de tonnes sont draguées dans les ports dont plus de 70% du budget annuel des grands ports maritimes français sont dédiés aux opérations de dragage. Port Camargue (premier port de plaisance d'Europe) et

Port Pérols (port situé sur l'étang de l'Or) ne font pas exception et doivent répondre à ces défis. . La gestion de ces sédiments constitue donc un enjeu technique, économique et environnemental majeur, non seulement à cause de la quantité draguée, mais aussi en raison de l'évolution continue des législations nationale et européenne qui deviennent de plus en plus exigeantes pour la protection de l'environnement et la santé humaine. Selon la directive européenne n° 75/442/CE (JOCE, 1975), les sédiments de dragage sont classés en déchets sous la rubrique 17 05 05 (sédiments pollués) et la rubrique 17 05 06 (autres sédiments). En France, L'article 85 de la loi pour l'économie bleue (LOI N° 2016-816 du 20 Juin 2016 pour l'économie bleue) fixe au 1er janvier 2025 l'interdiction de rejet en mer des sédiments et résidus de dragage dépassant les seuils de pollution réglementaires. Ces seuils de pollution seront prochainement établis, probablement en complément des seuils N1 et N2 du code de l'environnement (Arrêté du 9 août 2006). Des solutions de stockage à terre, de valorisation ou des applications d'élimination appropriées doivent alors être trouvées pour les sédiments de dragage.

La valorisation des sédiments de dragage n'est pas un sujet récent et a attiré l'attention des chercheurs depuis des décennies. Aujourd'hui, en raison du coût élevé du stockage à terre, de la pénurie en ressources naturelles et en accord avec le développement des logiques d'économie circulaire dont le but est de recycler et de valoriser pour ne plus jeter, les recherches concernant la valorisation et l'utilisation des sédiments se sont intensifiées afin de proposer des solutions viables et acceptables techniquement et financièrement (Figure 1. Les données sont issues du « Web Of Science » en utilisant les mots clés suivants : « *sediments and concrete* » or « *sediments and mortar* »). Les produits qui en résultent sont majoritairement destinés au secteur de la construction.

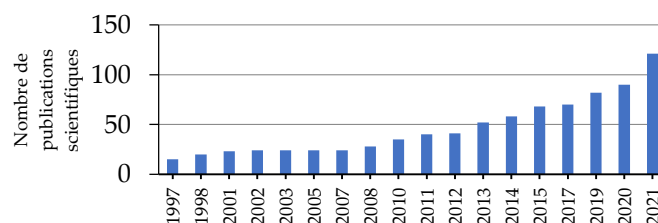


Figure 1. Nombre de publications scientifiques entre 1997 et 2021 concernant la valorisation des sédiments de dragage dans les matériaux de construction.

Sachant que le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde, les études de valorisation des sédiments de dragage ont été principalement dédiées aux essais d'incorporation (substitution) des sédiments dans des bétons ou dans d'autres types de matériaux cimentaires comme le mortier. Dans ces études, les sédiments ont été principalement utilisés comme un substituant du sable ou du ciment pour préparer des mortiers, des bétons ordinaires, des bétons de chaussée ou des bétons autoplaçants (Tableau 1). Des études plus approfondies ont été également effectuées afin d'évaluer l'effet de cette utilisation des sédiments sur la rhéologie et la durabilité du matériau cimentaire fabriqué (Tableau 1).

TABLEAU 1. Quelques études concernant la valorisation des sédiments marins dans les matériaux cimentaires.

Type d'essai	Type de matériau	Référence
Substitution du sable par 33%, 66% et 100% des sédiments de Port de Dunkerque (France)	Mortier ordinaire	(Agostini et al., 2007)
Substitution du ciment par 25% des sédiments de Port	Mortier autoplaçant	(Rozière et al.,

Autonome de Charleroi (Belgique)	Béton autoplaçant	2015)
Substitution du ciment par 10%, 20% et 30% des sédiments de Port de Dunkerque (France)	Mortier ordinaire Béton ordinaire	(Zhao et al., 2018)
Substitution du sable par 15%, 25%, 35%, 50% et 100% des sédiments de Golf Persique (Iran)	Béton de chaussée	(Moradi and Shahnoori, 2021)
Évaluation de l'effet de substitution du ciment par 8%, 16% et 33% des sédiments marins sur la pénétration de chlorure	Mortier ordinaire Pâte de ciment	(Ez-zaki and Diouri, 2018a)
Évaluation de l'effet de substitution du ciment par 10%, 20% et 30% des sédiments de Port de Dunkerque (France) sur la durabilité des matériaux cimentaires	Mortier ordinaire	(Amar et al., 2018)
Évaluation de l'influence des sédiments marins utilisés en tant que filler sur la rhéologie des matériaux cimentaires	Béton autoplaçant	(Ouédraogo et al., 2021)

Par ailleurs, les sédiments issus du dragage peuvent parfois contenir des polluants essentiellement dus aux rejets agricoles, industriels et urbains. Ils peuvent être de nature inorganique (Cd, Cr, Cu, Hg, N, Pb, Zn) et organiques (HAP, PCB ...) ou contenir des éléments nutritifs. Toutefois, les sédiments marins même non pollués restent salés et contiennent parfois des teneurs importantes de matières organiques ce qui peut poser finalement d'autres problèmes pour la valorisation à terre à suivre.

De nombreuses études ont développé un traitement des sédiments de dragage à l'aide d'un procédé de traitement thermique (calcination) adéquat visant à éliminer la fraction organique et certains polluants (Dang et al., 2013; Ez-zaki and Diouri, 2018b; Hadj Sadok et al., 2021; Van Bunderen et al., 2019). Ce traitement thermique a présenté son efficacité dans l'amélioration des propriétés physico-chimiques des sédiments par l'élimination de certains composés qui pénalisent la valorisation ultérieure et permet l'activation de propriétés pouzzolaniques et la stabilisation des métaux lourds. Cependant, le coût environnemental (impact CO₂) et économique de ce processus reste élevé et significatif. Il diminue l'avantage environnemental et économique de la voie de valorisation ou de recyclage utilisée. Enfin, ces approches de laboratoire ne sont pas forcément facilement transposables aux quantités réelles à traiter compte tenu des moyens industriels présents ou absents à proximité des sites de dragages.

À ce jour, les études concernant l'utilisation des sédiments de dragage non traités ou simplement « séchés » restent peu nombreuses (Beddaa et al., 2022; Elmoueden Hamza et al., 2021; Zhao et al., 2018). Pour cette raison, et sachant que le sédiment est un matériau pluriel dépendant de chaque site de dragage, l'objectif de cette étude est d'étudier la faisabilité de l'utilisation des sédiments marins (Port-Camargue et Port-Pérols) à l'état brut après pré traitement qui sont à minima un ressuage (PP) et un hydrocyclonage puis un ressuage (PC). Le premier objectif de cette étude est de se concentrer sur la valorisation des fines issues de dragages, c'est-à-dire la partie dont la granulométrie est inférieure à 100 microns approximativement, soit la partie la plus problématique. Un autre objectif de cette étude est de partir des moyens industriels locaux, dans une logique d'économie circulaire en vue de développer des solutions économiques et environnementalement peu impactantes qui déboucheront sur la réalisation de plusieurs ouvrages expérimentaux. Au sein de ces ouvrages, des bétons écoconçus seront utilisés. Ils associeront des liants à teneur en clinker réduite (CEM III) à des sables fillerisés aux sédiments pour fabriquer un béton adapté au milieu marin immergé, soit une classe d'exposition XS2 d'après la norme NF EN 206 et de classe de résistance C30/37. Ainsi ce qu'on a extrait de la mer retournera à la mer.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

SITES DE DRAGAGE

Deux types de sédiments ont été utilisés dans cette étude. Les sédiments de Port-Camargue (PC) et les sédiments de Port-Pérois (PP). Les emplacements géographiques de dragage sont présentés sur la Figure 2. Après dragage, les sédiments de chaque port provenant de l'ensemble des sites ont été ressués au sein de géotubes pour être ensuite repris à l'aide de moyens mécaniques de TP et mis en dépôt. Des échantillons de 10 kg ont été prélevés pour chaque port afin de reproduire un sédiment moyen conservé dans des sacs plastiques fermés hermétiquement et transportés ainsi au laboratoire où ils ont été stockés dans une salle régulée à 20 ° C.



FIGURE 2. Localisation géographique des sites de dragage des sédiments de PC et de PP.

CARACTÉRISATION DES SÉDIMENTS DE PC ET DE PP

Chaque site de dragage fournit un type de sédiments bien spécifique, c'est pour cette raison que le processus de valorisation des sédiments de dragage doit, obligatoirement et dans un premier temps, passer par une étape de caractérisation physico-chimique permettant d'identifier la voie de valorisation la plus adéquate pour ces sédiments. Les essais physico-chimiques ainsi que la méthode utilisée et la norme associée sont listés dans le Tableau 2. Ces essais ont été réalisés en triplicata sur des sédiments préalablement séchés à 50°C pendant 72 h et les valeurs représentent la moyenne expérimentale des résultats d'essais.

TABLEAU 2. Principaux paramètres de qualification des sédiments de PC et PP.

	Paramètre	Méthode	Normes
Paramètres physiques	Granulométrie	Granulométrie Laser (Beckman Coulter S13320)	NF ISO 13320-1
	Densité	Pycnomètre à helium (Micromeritics AccuPyc 1330)	NF EN 1097-7
	Surface spécifique	Théorie de Brunauer, Emmett et Teller (BET) TRISTAR II PLUS 3030	NF EN ISO 18757
	Teneur en eau	Etuve à 105°C, Balance	
	Teneur en argile	Test au bleu de méthylène	NF P94-068
	Morphologie	Microscopie électronique à balayage (MEB)	
Paramètres chimiques	Composition élémentaire	Fluorescence X-ray (XRF)	DIN 51001
	Teneur en matière organique	Perte au feu COT-mètre (Vario TOC cube)	NF EN 12879
	Teneur en carbone	Analyse thermogravimétrique (STA 449 F5 Jupiter)	

	Identification des minéraux	Diffraction des Rayons X (DRX) (diffractomètre D8 Advance, Bruker)	
	pH	pH-mètre	

FORMULATION DES BETONS ORDINAIRES INTEGRANT DES SEDIMENTS DE PC ET PP

La méthode de Dreux-Gorisse a été utilisée dans cette étude pour formuler des bétons intégrants, en substitution du sable, des sédiments de PC et de PP non traités comme correcteurs granulaires des sables à béton. La formulation de chaque béton a été effectuée selon la méthode de Dreux-Gorisse suite à l'analyse granulométrique du mélange sable-sédiment.

Plusieurs types de béton ont été préparés (Tableau 3) : 10% PC, 20% PC, 30% PC, 40% PC, 50% PC, 10% PP, 15% PP, 20% PP et 30% PP. Les deux lettres désignent le type du sédiment utilisé (Port-Camargue ou Port-Pérols). Les chiffres définissent le pourcentage de substitution massique du sable par les sédiments fins.

Le béton visé dans cette étude est un béton ordinaire de classe XS2 C30-37 (selon la norme NF EN 206-1) avec une classe d'affaissement S4 (hauteur d'affaissement : entre 160 et 210 mm).

Les différents bétons ont été confectionnés avec un rapport Eau/Ciment de 0,55, un liant composé de 70% de CEM1 52,5 N (Durabat® X-Trem : résiste aux eaux de mer et aux embruns marins) et 30% de laitier granulé de haut-fourneau moulu (LHF, Ecocem), un sable lavé 0/4 (Languedoc Roussillon Matériaux, (LRM), un gravillon calcaire concassé 6,3/14 (LRM) et un superplastifiant (SP) haut réducteur d'eau (MasterSure HES 1503, Master Builders solutions).

TABLEAU 3. Les constituants d'un m³ de béton incorporant ou non des sédiments de PC et de PP.

Nom Éléments (kg)	Témoin 0%	10% PC	20% PC	30% PC	40% PC	50% PC	10% PP	15% PP	20% PP	30% PP
Gravillon (6,3-14)	785,5	835,5	882	901,5	927,5	951	862	864	884,5	917,5
Sable (0-4)	1059,5	894,15	736,8	614,6	503,4	400	802	759,5	688	542
Sédiments	0	99,35	184,2	263,4	335,6	400	89,1	133,5	172	232,5
CEM1 52,5	238	238	238	238	238	238	238	238	238	238
Laitier HF	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102
Master Hes 1503 (SP) (Extrait sec = 0.35%)	0,2475	0,66	1,65	3,3	4,785	6,6	1,815	5,28	9,9	15,18
Eau totale	202	208,5	205,5	208	207,5	212,5	242	205,5	208	207,5
C+KA	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
Eau efficace	181,5	181,5	181,5	181,5	181,5	181,5	181,5	181,5	181,5	181,5
Rapport $E_{eff}/(C+KA)$	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
Rapport G/S	0,72	0,81	0,89	0,93	0,99	1,04	0,86	0,86	0,9	0,96
Volume de la pâte (L)	307,3	321,6	337,2	347,6	359,1	373,6	350,4	370,4	389,8	422,5
Module de finesse	3,23	2,78	2,37	2,18	1,95	1,70	2,54	2,50	2,31	1,98
% de SP	0,08%	0,20%	0,50%	1,00%	1,45%	2,00%	0,55%	1,60%	3,00%	4,60%
Test d'affaissement	S4	S4	S4	S4	S4	S4	S4	S4	S4	S4
Cône d'Abrams (mm)	164	168	177	166	190	208	200	174	180	184

RÉSISTANCE À LA COMPRESSION

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme EN 12390-3 à 1, 7 et 28 jours sur des éprouvettes 11 cm × 22 cm, démoulées à 24h et conservées ensuite dans l'eau à température

régulée. Les essais mécaniques de compression ont été réalisés sur une machine d'essai 3R. La vitesse de chargement utilisée était de 0,2 MPa / seconde pour les éprouvettes testées à 1 jour et de 0,5 MPa / seconde pour les éprouvettes testées à 7 et 28 jours.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES SÉDIMENTS DE PC ET DE PP

Les propriétés physico-chimiques des sédiments de PC et de PP utilisés dans cette étude sont récapitulées dans le tableau 4. Les sédiments de PC présentent un diamètre moyen de 177,49 μm et ils sont formés principalement de sables et de sables fins. Les sédiments de PP possèdent une taille plus fine dont le diamètre moyen est de 44,27 μm . Ces sédiments sont formés principalement de limons. L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) des deux sédiments met en évidence une composition cristalline quasi semblable. Les principaux minéraux détectés sont le Quartz (SiO_2), la Calcite (CaCO_3) et la muscovite ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH},\text{F})_2$).

En raison de la granulométrie et des autres paramètres évalués (notamment la surface spécifique, la teneur en argile, la teneur en matière organique), il apparaît que la valorisation des sédiments de PP dans la partie sableuse du béton pourrait poser plus de difficultés que celle des sédiments de PC.

TABLEAU 4. Propriétés physico-chimiques des sédiments de PC et de PP.

Paramètre	Résultats	PC	PP
Granulométrie	Diamètre (d) moyen (μm)	117,49	44,27
	d_{50} (μm)	94,35	24,83
	Sables 200 $\mu\text{m} < \varnothing < 2000$ μm (%)	12,76	2
	Sables fins 63 $\mu\text{m} < \varnothing < 200$ μm (%)	48,7	22
	Limons 2 $\mu\text{m} < \varnothing < 63$ μm (%)	36,3	70,40
	Argiles $\varnothing < 2$ μm (%)	2,24	5,6
Densité	Densité moyenne (g/cm^3)	2,66	2,47
Surface spécifique	Surface spécifique moyenne (m^2/g)	3,13	10,97
Teneur en eau	Teneur moyenne en eau (%)	17,7%	59,2%
Teneur en argile (Test au bleu de Méthylène)	VBS ($\text{g}/100\text{g}$)	0,81	5,35
	Classe	Sols limoneux	Sols limoneux argileux

Morphologie (MEB)	Analyse qualitative	Morphologie disparate, grande densité, grande diversité de particules, de quelques μm à 330 μm	Morphologie disparate, beaucoup d'espace intergranulaire, beaucoup de petits agrégats, de quelques μm à 250 μm
Éléments chimiques et oxydes (XRF)	Analyse élémentaire	Constitués principalement de SiO_2 (53%), Al_2O_3 (10%), et Fe_2O_3 (3%) et CaO (13%)	Constitués principalement de SiO_2 (30%), Al_2O_3 (9%), Fe_2O_3 (3%), CaO (20%) et SO_3 (4%)
Teneur en matière organique	Teneur moyenne en carbone organique totale (%)	2,69	7,08
Identification des minéraux (DRX)	Similitudes	Calcite (CaCO_3), Quartz (SiO_2) et muscovite ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH},\text{F})_2$)	
	Différences	La quantité de Quartz est plus importante dans le cas de PC	
pH	pH moyen	8,67	8,42

LA RÉSISTANCE A LA COMPRESSION DES BETONS PRÉPARÉS

Les résistances à la compression des bétons incorporant des sédiments de PC sont présentées sur la Figure 3. Les résultats montrent que l'intégration de sédiments de PC dans le sable conduit à une diminution de la résistance à la compression. Ces résultats sont cohérents avec la littérature qui souligne l'effet négatif des sédiments utilisés comme sable sur les résistances mécaniques des matériaux cimentaires (Elmoueden Hamza et al., 2021; Junakova et al., 2015; Kazi Aoual-Benslafa et al., 2014; Moradi and Shahnoori, 2021). À l'inverse des études citées, les sédiments utilisés sont ici non traités, ce qui signifie que l'empilement granulaire ainsi que la composition chimique (ions de l'eau de mer, substances organiques) des sédiments de PC pourraient expliquer cette diminution.

La résistance mécanique à 28 jours montre que toutes les formulations préparées à l'exception de celle à base de 50% PC appartiennent à la classe C30/37, ce qui montre qu'un ouvrage maritime à base de béton ordinaire XS2, C30/37 peut être préparé en complétant les sables jusqu'à un taux d'intégration de 40% de sédiments de PC.

Le béton préparé avec un taux de sédiments de 50% appartient à la classe de résistance C20/25, il pourrait être alors utilisé pour une classe d'exposition de XC1 ou XC2.

Par ailleurs, la chute des résistances mécaniques en pourcentage (par rapport au témoin) à 1,7 et 28 jours est présentée sur la Figure 3. Ces résultats mettent en évidence un effet de retard de la montée en résistance mécanique pour les hauts taux de substitution en sédiment au jeune âge (entre 1 et 7 jours). Ce retard peut être attribué à l'adjuvantation plus importante des bétons à base de sédiments pour des taux de substitution en sédiments croissants.

Entre 7 et 28 jours, cet effet retard n'est plus visible et la cinétique de montée en résistance des bétons est identique pour chaque formulation. Les écarts de résistance des bétons pourraient alors être attribués à la dégradation de la qualité de la pâte par substitution du sable, par l'adjuvantation supplémentaire et par l'empilement granulaire différent des sables. Des interactions chimiques pourraient se produire entre l'adjuvant et les sédiments amenant ainsi à une diminution de la résistance mécanique.

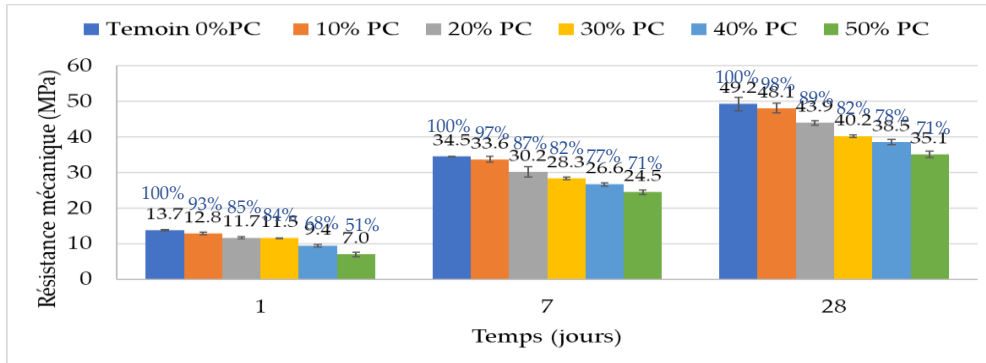


FIGURE 3. Résistances à la compression des bétons incorporant des sédiments de PC.

En outre, les résistances à la compression des bétons incorporant des sédiments de PP sont présentées au sein de la Figure 4. Comme pour les sédiments de PC, l'incorporation des sédiments de PP dans les bétons provoque une diminution de la résistance mécanique. A 28 jours, les bétons préparés avec les sédiments de PP montrent une résistance à la compression inférieure à 38 MPa, ce qui indique que ces bétons n'atteignent pas à la classe C30/37.

Le béton préparé avec 30% des sédiments de PP sont cohérents avec une classe de résistance de C16/20 soit un usage comme béton de blocage en travaux routiers par exemple. Les bétons préparés avec 10, 15 et 20% de sédiments peuvent correspondre à une classe de résistance C20/25, et pourraient être utilisés pour des classes d'exposition XC1 ou XC2 sous réserve que d'autres indicateurs de durabilité soient vérifiés toutefois.

Les sédiments fins de PC comprennent 52,9% de silices et ont une granularités moyenne proche de 120 μm . En revanche, les sédiments de PP comprennent encore 30,4 % de silices mais ont une part importante de particules plus fines (dmoyen proche de 44 μm) et une teneur plus élevée en matières organiques (COT > 7 %) et argiles (VBS = 5,4 g/100g). Ces sédiments possèdent donc une grande surface spécifique (10,97 m^2/g), ce qui se traduit par une absorption d'eau beaucoup plus importante qu'un sable normal et même que les matériaux de PC. Cela a rendu plus difficile l'incorporation de ces sédiments dans la formulation de béton et a nécessité l'utilisation d'un fort dosage en superplastifiant (le retard de prise provoqué par le SP a été démontré par un essai calorimétrique), provoquant un effet retard plus important.

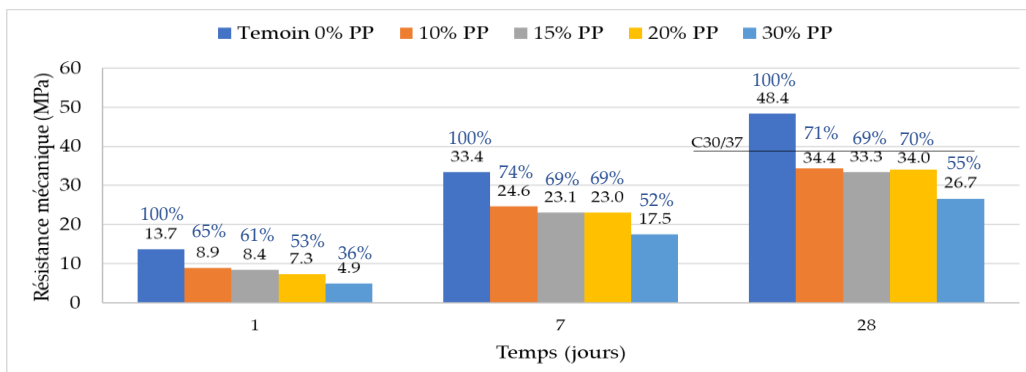


FIGURE 4. Résistances à la compression des bétons incorporant des sédiments de PP.

IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude présente la première partie du projet ECODREDGE MED II qui vise à des voies de valorisation pertinentes, écologiquement et économiquement viables, pour les sédiments dragués en favorisant une approche d'économie circulaire par la valorisation des sédiments de dragage sans traitement lourd avant intégration dans le matériau béton ou dans des graves traitées routières. Un chantier expérimental de plus de 6000 mètres carrés de Graves traitées au liant ont permis d'incorporer près de 25 % de sédiments de PC pour réhabiliter des voiries portuaires à Port Camargue. D'autres voies de valorisations, (BAP, bétons de chaussée, bétons de structures...) ont été, sont en cours ou seront mises au point dans le cadre du projet ci-dessus.

Dans ce papier, les premiers résultats concernant la possibilité de valorisation de deux sédiments marins provenant de Port-Camargue et de Port-Pérois au sein de la partie sableuse du béton ont été présentés. L'objectif était d'utiliser ces sédiments dans l'état avec un minimum de traitement pour fabriquer un béton ordinaire marin XS2 de classe C30/37.

Au préalable, la caractérisation physico-chimique des sédiments de PC et de PP a permis d'identifier des propriétés physiques et chimiques différentes pour les deux sédiments étudiés. Les sédiments de PC sont principalement des sables fins et des sables. Ils sont riches en Quartz (53%) et possèdent une faible teneur en matière organique (2,69%) et en argile (VBS = 0,81 g/100g). Les sédiments de PP sont principalement des limons. Ils possèdent une surface spécifique élevée (10,97 m²/g) et une forte teneur en matière organique (7,08%) et en argile (VBS = 5,35 g/100g).

La mesure de la résistance à la compression des bétons contenant en substitution du sable 10, 20, 30, 40 et 50% des sédiments de PC ou 10, 15, 20 et 30% des sédiments de PP montre que :

- La résistance mécanique diminue suite à l'augmentation de sédiments au sein du sable. Cette baisse de résistance est plus grande dans le cas des sédiments de PP à cause de leurs propriétés physiques et chimiques.
- Le béton ordinaire XS2, C30/37 est possible seulement dans le cas des sédiments de PC avec un pourcentage de substitution de sable inférieur ou égal à 40%.
- Pour un pourcentage de 50% de sédiments de PC la résistance n'excèdera pas celle d'un béton ordinaire C20/25
- La valorisation des sédiments de PP dans le matériau béton est possible seulement dans le cas où la classe de résistance envisagée reste modeste (de l'ordre de 20 à 25 MPa à 28 jours) avec un pourcentage de 10, 15 et 20% de sédiments et même 16 MPa avec un pourcentage de substitution de 30%.

Cette étude montre donc que la valorisation des sédiments de dragage dans le matériau béton est possible sans forcément passer par une étape de prétraitement lourde des sédiments avant valorisation. Les propriétés physico-chimiques de chaque type de sédiments sont les premières informations à récupérer pour analyser et optimiser la voie de valorisation choisie.

Suite aux résultats obtenus, des recherches supplémentaires sont nécessaires afin de (i) expliquer la diminution de la résistance mécanique des bétons intégrant des sédiments dans leur formulation (ii) optimiser la formulation des bétons incorporant les sédiments de PC et de PP, (iii) tester l'effet de l'utilisation des sédiments en substitution du sable sur la durabilité des bétons

fabriqués (porosité, perméabilité, attaque chlorure, attaque sulfatique...etc) (iv) analyser l'impact économique et environnemental de cette valorisation.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Union Européenne, la Région Occitanie, la Préfecture de la Région Occitanie pour le portage financier de ce projet. Ils remercient Ad-OCC pour son accompagnement. Ils remercient les personnels des ports de Port Camargue et de Pérols et en particulier M^{rs} Yan Roux et Willy Paramé pour leur Accueil et leur bienveillance. Ils remercient également les partenaires du projet Eurovia et DTE, LRM, HSM, Microbie Environnement et LIB Industries pour le travail collaboratif et riche qui est mené dans le cadre de cette étude et de ce projet. Les auteurs remercient en fin les étudiants Amélie, Emeric, Enguerrand, Léna, Omar, Paul, et Tom pour leurs implications dans ce travail.

REFERENCES

- Agostini, F., Skoczylas, F., Lafhaj, Z., 2007. About a possible valorisation in cementitious materials of polluted sediments after treatment. *Cem. Concr. Compos.* 29, 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.012>
- Amar, M., Benzerzour, M., Safhi, A. el M., Abriak, N.E., 2018. Durability of a cementitious matrix based on treated sediments. *Case Stud. Constr. Mater.* 8, 258–276. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.01.007>
- Beddaa, H., Fraj, A. Ben, Lavergne, F., Torrenti, J.M., 2022. Reuse of Untreated Fine Sediments as Filler: Is It More Beneficial than Incorporating Them as Sand? *Buildings* 12, 211. <https://doi.org/10.3390/buildings12020211>
- Dang, T.A., Kamali-Bernard, S., Prince, W.A., 2013. Design of new blended cement based on marine dredged sediment. *Constr. Build. Mater.* 41, 602–611. <https://doi.org/10.1016/j.CONBUILDMAT.2012.11.088>
- Elmoueden Hamza, Mouhamadou Mouhamadou, Zambon Agnes, ABRIAK Nour Edine, Benzarzour Mahfoud, 2021. The use of Dredged Marine Sediment in the Formulation of Air-foamed Concrete. <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-336587/V1>
- Ez-zaki, H., Diouri, A., 2018a. Chloride penetration through cement material based on dredged sediment and shell powder. *J. Adhes. Sci. Technol.* 32, 787–800. <https://doi.org/10.1080/01694243.2017.1378068>
- Ez-zaki, H., Diouri, A., 2018b. Microstructural and physicomechanical properties of mortars-based dredged sediment. *Asian J. Civ. Eng.* 2018 201 20, 9–19. <https://doi.org/10.1007/S42107-018-0084-6>
- Hadj Sadok, R., Belas, N., Tahlaiti, M., Mazouzi, R., 2021. Reusing calcined sediments from Chorfa II dam as partial replacement of cement for sustainable mortar production. *J. Build. Eng.* 40, 102273. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102273>
- Junakova, N., Junak, J., Balintova, M., 2015. Reservoir sediment as a secondary raw material in concrete production. *Clean Technol. Environ. Policy* 17, 1161–1169. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-0943-8>
- Kazi Aoual-Benslafa, F., Kerdal, D., Mekerta, B., Semcha, A., 2014. The Use of Dredged Sediments as Sand in the Mortars for Tunnel Lining and for Environmental Protection. *Arab. J. Sci. Eng.* 39, 2483–2493. <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0805-9>
- Moradi, S., Shahnoori, S., 2021. Eco-friendly mix for Roller-Compacted Concrete: Effects of Persian-Gulf-Dredged marine sand on durability and resistance parameters of concrete. *Constr. Build. Mater.* 281. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122555>
- Ouédraogo, N.P., Becquart, F., Benzerzour, M., Abriak, N.E., 2021. Influence of fine sediments on rheology properties of self-compacting concretes. *Powder Technol.* 392, 544–557. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.035>
- Rozière, E., Samara, M., Loukili, A., Damidot, D., 2015. Valorisation of sediments in self-consolidating concrete: Mix-design and microstructure. *Constr. Build. Mater.* 81, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.080>
- Van Bunderen, C., Snellings, R., Vandewalle, L., Cizer, Ö., 2019. Early-age hydration and autogenous deformation of cement paste containing flash calcined dredging sediments. *Constr. Build. Mater.* 200, 104–115. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.12.090>
- Zhao, Z., Benzerzour, M., Abriak, N.E., Damidot, D., Courard, L., Wang, D., 2018. Use of uncontaminated marine sediments in mortar and concrete by partial substitution of cement. *Cem. Concr. Compos.* 93, 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.07.010>