



Utilisation de sédiments fins de barrage dans la fabrication de mortiers

Baptiste ANGER^{1,2}, Isabelle MOULIN³, Emmanuel PERIN³, François THERY¹,
Daniel LEVACHER²

1. EDF R&D, Département Eco-efficacité et Procédés Industriels (EPI), site des Renardières, 77818 Moret-sur-Loing. France.
2. Normandie Université, Unicaen, Laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C), UMR CNRS 6143, 24 rue des Tilleuls, 14000 Caen, France.
baptiste.anger@unicaen.fr
3. LERM, Laboratoire de Recherches et d'Etudes sur les Matériaux, 42-52, quai de la Rapée, CS71230, 75583 Paris cedex 12, France.

Résumé :

Les retenues hydroélectriques sont soumises à des dépôts de sédiments variables selon le bassin versant, la taille et la conception de la retenue. Pour des critères hydrauliques et d'efficacité de l'ouvrage ou d'usage du plan d'eau, il est nécessaire de gérer ces dépôts sédimentaires dans le respect de l'environnement et de la réglementation en donnant la priorité à la continuité sédimentaire. Dans certains cas, des impératifs liés à l'exploitation et à l'environnement peuvent contraindre les opérateurs à s'écarter des solutions de gestion usuelles et envisager une gestion à terre. EDF SA en tant que gestionnaire d'ouvrages hydrauliques se préoccupe de la valorisation potentielle des sédiments fins issus de ses ouvrages.

Cet article se focalise sur l'utilisation de sédiments en ajout dans des bétons. Trois types de sédiments ont été étudiés en formulation de mortier. Deux taux d'incorporation ont été évalués pour chacun des sédiments en substitution de 10% et 25% de ciment. Les mortiers ont été caractérisés aux états frais et durcis.

Mots clés : Sédiments de barrage, Caractérisation, Mortier, Résistance mécanique, Valorisation, Addition minérale.

1. Introduction

La démarche globale, entreprise par EDF SA, consiste en une approche multi-filières visant à pré-orienter les sédiments de barrage à partir des caractéristiques des sédiments à valoriser. Cette démarche est détaillée par ANGER *et al.* (2012 & 2013). Le présent article décrit une étude pour la valorisation de sédiments fins de barrage en addition minérale pour le béton.

Une addition est définie dans la norme NF EN 206-1 comme un "matériau minéral finement divisé et pouvant être ajouté au béton afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières". Deux catégories d'additions

Thème 8 – Gestion et valorisation des sédiments marins

minérales se distinguent : les additions quasiment inertes, de type I (additions calcaires et additions siliceuses), et les additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent, de type II (cendres volantes, fumées de silice, laitiers et métakaolin).

Dans le cadre général de l'utilisation des sédiments, dans les coulis, mortiers et bétons, LIMEIRA *et al.* (2011) ont confirmé que les sédiments sableux issus des dragages pouvaient être employés en substitution ou ajout de granulats. Des industriels ont aussi développé et breveté des procédés de traitement de sédiments pollués permettant ensuite une utilisation dans des mortiers ou bétons (AGOSTINI, 2006 ; CASSAT *et al.*, 2011). Des traitements thermiques ont également été utilisés pour détruire les matières organiques, néfastes dans les bétons et pour activer les propriétés pouzzolaniques des argiles composant les sédiments fins (BENKADDOUR *et al.*, 2009 ; BELAS *et al.*, 2009). Certains sédiments fins de barrage, possédant des espèces argileuses faiblement cristallisées peuvent aussi présenter une activité pouzzolanique relativement importante sans avoir subi de traitement thermique (RODRIGUEZ *et al.*, 2013).

Rappelons que d'une manière générale, les argiles influencent le comportement des bétons et mortiers. LE ROUX *et* UNIKOWSKI (1980) expliquent que les minéraux argileux agissent :

- par absorption d'eau : il existe vis-à-vis de l'eau une compétition entre l'argile et le ciment. Bien que la quantité d'eau soit globalement très largement suffisante pour hydrater la totalité du ciment, il n'est pas impossible que localement certains grains de clinker ne puissent pas s'hydrater ;
- par effet d'écran, l'argile venant s'opposer à la liaison liant-granat ;
- par effet pouzzolanique : les argiles, suivant leur nature, peuvent être attaquées par le liant et contribuer à la création de nouveaux hydrates, ce qui peut atténuer les effets négatifs dus aux deux mécanismes précédents ;
- par action sur la compacité : l'introduction d'éléments fins dans un mélange granulaire peut se traduire par une augmentation des résistances liée à une meilleure compacité.

2. Matériel

2.1 Origine des sédiments

Plusieurs lots de sédiments fins, issus de trois retenues françaises exploitées par EDF SA ont été sélectionnés pour cette étude. Les sites échantillonnés ont été choisis de façon à refléter une diversité typologique des sédiments, liée aux caractéristiques des bassins versants et des retenues. De plus, ces sites pourraient constituer des gisements de matériaux. Les trois lots prélevés et étudiés ont été codifiés avec trois lettres : GAR, ISE et RHI.

2.2 Caractéristiques des sédiments

La granulométrie a été réalisée en utilisant un granulomètre laser de type Coulter LS230. Les mesures de la surface massique Blaine et de la masse volumique absolue ont été respectivement mesurées selon la norme NF EN 196-6 et la norme NF EN 1097-7.

La teneur en matière organique a été déterminée par calcination à 550 °C (NF EN 12879). La valeur au bleu qui permet d'évaluer l'argilosité a été mesurée selon la norme NF EN 933-9. L'analyse chimique élémentaire des éléments majeurs a été réalisée par spectrométrie d'émission plasma après fusion au métaborate de lithium. La teneur en sulfate a été déterminée par chromatographie ionique après attaque ménagée à l'acide chlorhydrique. La silice soluble a été dosée par spectrométrie d'émission plasma (ICP) après attaque acide. Les caractéristiques des sédiments étudiés sont données dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques des sédiments étudiés.

	Sédiments	GAR	ISE	RHI
<i>Paramètres physico-chimiques</i>	<i>Argile (< 2 µm)</i>	3,4	21,2	6,3
	<i>Limon (2 à 63 µm)</i>	60,6	78,8	67,5
	<i>Sable (> 63 µm)</i>	36,0	0,0	26,2
	<i>Surface massique Blaine (cm²/g)</i>	4370	>7 000	5120
	<i>Masse volumique absolue (g/cm³)</i>	2,55	2,68	2,50
	<i>Teneur en matière organique (%)</i>	9,1	3,6	6,9
	<i>VB (g/kg)</i>	14	18	24
	<i>Silice soluble (%)</i>	12,98	12,13	10,81
<i>Eléments chimiques majeurs</i>	<i>PF (%)</i>	13,4	14,4	22,8
	<i>SiO₂ (%)</i>	56,3	47,3	43,1
	<i>Al₂O₃ (%)</i>	14,7	14,1	7,9
	<i>Fe₂O₃ (%)</i>	5,59	4,94	3,00
	<i>CaO (%)</i>	4,13	13,03	18,43
	<i>MgO (%)</i>	1,93	2,10	2,44
	<i>TiO₂ (%)</i>	0,83	0,66	0,40
	<i>MnO (%)</i>	0,06	0,16	0,06
	<i>P₂O₅ (%)</i>	0,21	0,17	0,17
	<i>SrO (%)</i>	0,02	0,05	0,04
	<i>Na₂O (%)</i>	0,73	0,95	0,59
	<i>K₂O (%)</i>	1,82	2,14	1,16
	<i>SO₃ (%)</i>	0,15	0,09	0,06
<i>Minéralogie</i>	<i>Quartz (%)</i>	36	24	28
	<i>Calcite (%)</i>	4	19	24
	<i>Dolomite (%)</i>	2	3	7
	<i>Phyllosilicates (%)</i>	35	35	22
	<i>Anorthite (%)</i>	6	4	5
	<i>Albite (%)</i>	3	3	2
	<i>Corps amorphe (%)</i>	13	12	11

La minéralogie des sédiments a été déterminée par analyse de la diffraction des rayons X (DRX). L'appareil utilisé est un BRUCKER D8 Advance équipé d'une anticathode au cuivre. L'interprétation des diffractogrammes obtenus a permis de mettre

Thème 8 – Gestion et valorisation des sédiments marins

en évidence les phases cristallisées présentées dans le tableau 1. La quantification a été réalisée par modélisation du diffractogramme par calcul de Rietveld (logiciel TOPAS de Brucker).

2.3 Autres matériaux employés

Les mortiers sont confectionnés avec un ciment CEM I 52,5 N de l'usine Calcia de Beaucaire et un sable siliceux normalisé CEN conforme à la norme EN 196-1.

3. Approche expérimentale

3.1 Formulation et confection des mortiers

Avant leur incorporation dans les mortiers, les sédiments ont subi un séchage à 60 °C jusqu'à poids constant et éventuellement un écrêtage à 250 µm avec l'objectif de retirer les éléments grossiers indésirables (débris végétaux, coquilles, etc.) dans les mortiers.

Tableau 2. Formulation des séries de mortier

Référence	Ciment (g)	Sable CEN (g)	Nature du sédiment	Sédiment (g)	Taux de substitution de ciment (%)	Eau (g)	E/C
T1	450	1350	-	-		225	0,50
GAR/10C	405	1350	GAR	45	10	237,5	0,59
ISE/10C	405	1350	ISE	45	10	237,5	0,59
RHI/10C	405	1350	RHI	45	10	235	0,58
GAR/25C	337,5	1350	GAR	112,5	25	267	0,79
ISE/25C	337,5	1350	ISE	112,5	25	255	0,76
RHI/25C	337,5	1350	RHI	112,5	25	250	0,74

Les formulations mortiers reposent sur la base d'un mortier de référence (T1) dit normal, selon la norme NF EN 196-1 :

- La première série (GAR/10C, ISE/10C et GAR/10C) correspond à une substitution en masse de 10% du ciment par du sédiment par rapport à la formulation témoin T1,
- La seconde (GAR/25C, ISE/25C et GAR/25C) correspond à une substitution de 25% de ciment par rapport à la formulation témoin T1.

Ces taux de substitution sont retenus afin de permettre une comparaison avec les indices d'activité de certaines additions actives et inertes couramment employées dans les bétons. La norme relative à la fumée de silice (NF EN 13263-1) spécifie que l'indice d'activité doit être calculé avec un taux de substitution de ciment de 10%. Pour les additions siliceuses (NF P 18-509) et additions calcaires (NF P 18-508), le taux de substitution de ciment des éprouvettes normalisées de mortier doit être de 25%.

Il a été choisi de travailler à consistance équivalente. La teneur en eau a donc été ajustée de manière à obtenir une consistance proche de celle du témoin. Le tableau 2 détaille ces formulations.

Pour chaque formulation de mortier, trois moulages (un par échéance) de trois éprouvettes prismatiques 4×4×16 cm ont été réalisés. Ces dernières ont été conservées en eau régulée à (20 ± 2) °C pour la détermination des résistances en compression.

3.2 Caractérisation des mortiers à l'état frais

Pour caractériser les mortiers à l'état frais, le temps de prise a été mesuré selon la norme NF P15-431. La maniabilité est déterminée d'après la norme NF EN 12350-5 (mesure de l'étalement à la table à secousse). De cet essai, on estime la demande en eau par rapport au témoin.

3.3 Caractérisation à l'état durci

Afin de connaître l'influence de l'ajout de sédiments dans les bétons, la détermination des résistances mécaniques en compression a été réalisée selon la norme NF EN 196-1 aux échéances de 7, 28 et 90 jours.

4. Résultats et discussion

4.1 Caractérisation des mortiers à l'état frais

Les résultats de la caractérisation des mortiers à l'état frais sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3. Résultats de la caractérisation à l'état frais des mortiers.

<i>Référence</i>	<i>Etalement (mm)</i>	<i>Demande en eau /T1 (%)</i>	<i>Début de prise (min.)</i>	<i>Fin de prise (min.)</i>
<i>T1</i>	<i>156</i>	<i>-</i>	<i>250</i>	<i>490</i>
<i>GAR/10C</i>	<i>162</i>	<i>+5,6</i>	<i>270</i>	<i>480</i>
<i>ISE/10C</i>	<i>161</i>	<i>+5,6</i>	<i>230</i>	<i>490</i>
<i>RHI/10C</i>	<i>161</i>	<i>+4,4</i>	<i>240</i>	<i>510</i>
<i>GAR/25C</i>	<i>160</i>	<i>+18,7</i>	<i>330</i>	<i>640</i>
<i>ISE/25C</i>	<i>160</i>	<i>+13,3</i>	<i>230</i>	<i>450</i>
<i>RHI/25C</i>	<i>151</i>	<i>+11,1</i>	<i>310</i>	<i>550</i>

L'introduction des sédiments entraîne une demande en eau supplémentaire variant de 11,1% à 18,7% pour une substitution de 25% de ciment par les sédiments. Cette demande en eau supplémentaire est bien sûr liée à la finesse des sédiments mais également à leur nature argileuse. Ces derniers éléments semblent avoir un rôle important puisque le sédiment GAR, riche en phyllosilicates présente une plus grande demande en eau que le sédiment le plus fin (ISE). Pour obtenir une consistance

équivalente à celle obtenue avec l'addition calcaire, un apport d'eau supplémentaire est nécessaire. Les sédiments n'ont pas d'effet positif sur la maniabilité du mortier.

La substitution de 10% de ciment par les sédiments ne modifie pas de manière significative les temps de début et fin de prise. Ces derniers restent identiques lorsque 25% de ciment est substitué par le sédiment le plus fin (ISE). Le temps de début de prise, pour une substitution de 25% de ciment par le sédiment GAR, augmente de 32%. Pour le même taux de remplacement, le sédiment référencé RHI entraîne une augmentation du temps de début de prise de 24%. Les temps de fin de prise, avec un taux de substitution égal à 25%, pour les sédiments référencés GAR et ISE sont respectivement supérieurs à celui du témoin, d'environ 31% et 12%.

4.2 Caractérisation des mortiers à l'état durci

Les résistances mécaniques en compression sont déterminées pour les échéances de 7, 28 et 90 jours. Dans l'étude, l'indice d'activité représente le rapport entre la résistance du mortier substitué (10 ou 25%) et la résistance du mortier témoin T1 à une échéance donnée.

Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 4 et représentés sur la figure 1. D'une manière générale, à 90 jours, les résistances en compression sur les mortiers contenant des sédiments sont plus faibles que celles obtenues sur le mortier témoin de 25 à 17% pour 10% de substitution et de 51 à 43% pour les mortiers substitués à 25%.

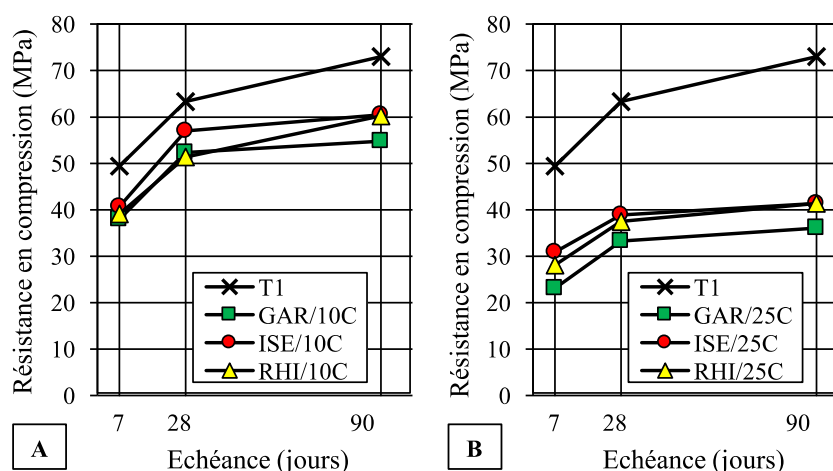


Figure 1. Evolution des résistances en compression pour les différents mortiers.

A. Ciment substitué par 10% de sédiment – B. Ciment substitué par 25% de sédiment.

Les résistances en compression les plus élevées sont obtenues avec le sédiment ISE mais peu d'écarts sont observés avec l'échantillon RHI. En revanche, les mortiers obtenus avec le sédiment GAR développent des résistances sensiblement plus faibles. Les indices d'activité à 28 jours et pour 25% de substitution de ciment sont inférieurs aux exigences imposées aux additions normalisées. En effet, les indices d'activité des

additions calcaires et siliceuses doivent respectivement être supérieurs à 0,71 (NF EN 18-508) et 0,70 (NF EN 18-509).

Par ailleurs et contrairement aux témoins, les résistances des mortiers substitués évoluent assez peu entre 28 jours et 90 jours.

Tableau 4. Résistances en compression pour les trois séries de mortier.

<i>Référence</i>	<i>Résistance en compression (MPa)</i>			<i>Indice d'activité (R_{sed}/R_{T1})</i>		
	<i>7 j.</i>	<i>28 j.</i>	<i>90 j.</i>	<i>7 j.</i>	<i>28 j.</i>	<i>90 j.</i>
<i>T1</i>	49,4	63,3	73,0	-	-	-
<i>GAR/10C</i>	38	52,3	54,8	0,77	0,83	0,75
<i>ISE/10C</i>	40,7	57	60,5	0,82	0,90	0,83
<i>RHI/10C</i>	39,1	51,4	60,2	0,79	0,81	0,82
<i>GAR/25C</i>	23,1	33,3	36,1	0,47	0,53	0,49
<i>ISE/25C</i>	30,9	38,9	41,4	0,63	0,61	0,57
<i>RHI/25C</i>	28,1	37,5	41,4	0,57	0,59	0,57

Plusieurs phénomènes notables peuvent influencés les résistances à la compression des mortiers. Pour obtenir une consistance similaire aux mortiers témoins, la demande en eau est plus élevée avec l'ajout de sédiments. Il y a alors un excès d'eau vis-à-vis des réactions d'hydratation du ciment qui conduisent à la prise et au durcissement. Cet excès d'eau, suite à son évaporation, se transforme en vide (porosité) qui affectera la résistance du mortier. Par ailleurs, les sédiments renferment des matières organiques et des minéraux argileux qui peuvent aussi perturber la prise hydraulique et affecter la résistance mécanique des mortiers. Ces effets négatifs sont atténués par le léger caractère pouzzolanique des minéraux argileux lorsqu'ils sont attaqués par le liant et l'action sur la compacité des éléments fins.

5. Conclusions

Les essais en laboratoire réalisés dans le but d'étudier la faisabilité d'une utilisation des sédiments de barrage comme addition béton, ont permis de dégager les points essentiels suivants :

- Les demandes en eau des sédiments sont relativement élevées et seraient à mettre en relation avec leur nature argileuse plus que leur finesse ;
- La présence de matière organique pourrait être à l'origine d'un retard de prise pour les sédiments GAR et RHI ;
- Les résistances mécaniques obtenues sur des mortiers substitués sont proches d'un sédiment à l'autre bien que légèrement supérieures pour le sédiment ISE, sédiment le plus fin.

Au final, les sédiments fins de barrage étudiés, utilisés comme addition béton ne permettent pas d'obtenir des performances équivalentes à celles des additions

normalisées de type calcaire ou siliceuse. Néanmoins, et bien que n'ayant pas d'atout particulier pour cet usage, leur incorporation dans certains bétons est envisageable. Des essais complémentaires permettraient d'optimiser leurs conditions d'usage, notamment par l'emploi d'adjuvant pour limiter l'apport d'eau.

Notons qu'un tonnage significatif du béton produit en France est utilisé pour les éléments non structurants dans lesquels des sédiments pourraient être incorporés. Les différentes caractéristiques obtenues diffèrent peu d'un sédiment à l'autre mais la finesse, la teneur en argile et en matière organique semblent être les paramètres les plus influents.

6. Références bibliographiques

- ANGER B., THERY F., LEVACHER D. (2012). *Pour une caractérisation minimale des sédiments fins : application d'une démarche pour leur valorisation en matériaux routiers*, XII^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, 12-14 juin 2012, Cherbourg, France, pp 973-984. <http://dx.doi.org/10.5150/jngcgc.2012.107-A>
- ANGER B., LEVACHER D., THERY F. (2013). *A minimal characterization identification approach for pre-selecting dam fine sediments reuse option*, 8th International SedNet conference, 6-9 November 2013, Lisbon, Portugal.
- AGOSTINI F. (2006). *Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins*. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, 207 p.
- BELAS N., BESSEGHIER N., MEBROUKI A., BOUHAMOU N. (2009). *Vers une protection de l'environnement en valorisant la vase draguée du barrage comme composant du béton*. Matériaux & Techniques, Vol. 97, pp 231-240. <http://dx.doi.org/10.1051/mattech/2009039>
- BENKADDOUR M., KAZI AOUAL F., SEMCHA A. (2009). *Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle*. Revue Nature et Technologie, pp 63-73.
- CASSAT P., MOUDILOU E., LE ROLLAND B. (2011). *Method of Treating Marine Sediments and Use of the Resulting Solid Product in Mortars or Concretes*. Brevet n° EP20090783532 20090929.
- LIMEIRA J., ETXEBERRIA M., AGULLÓ L., MOLINA D. (2011). *Mechanical and durability properties of concrete made with dredged marine sand*. Constr. Build. Mater., Vol. 25, pp 4165-4174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.053>
- RODRIGUEZ O., KACIMI L., LOPEZ-DELGADO A., FRIAS M., GUERRERO A. (2013). *Characterization of Algerian reservoir sludges for use as active additions in cement: New pozzolans for eco-cement manufacture*. Constr. Build. Mater., Vol. 40, pp 275-279. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.10.016>
- LE ROUX A., UNIKOWSKI Z. (1980). *Mise en évidence de l'influence des fines argileuses dans les granulats à béton*. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, novembre-décembre 1980, réf. 2514, pp 101-108.