
Caractérisation environnementale de boues de centrale BPE et étude mécanique de leur incorporation à des mortiers

Mariane Audo¹, Pierre-Yves Mahieux¹, Philippe Turcry¹

¹ Université de La Rochelle, LaSIE, UMR 7356 CNRS, Av. Crépeau, 17000 La Rochelle

RÉSUMÉ. Cette étude a pour objectifs de caractériser d'un point de vue environnemental les boues de décantation générées en centrale de Béton Prêt à l'Emploi (BPE) et d'étudier leur incorporation au sein de matrices cimentaires. Pour ce faire, une campagne de caractérisation environnementale par lixiviation en bûchée unique a été menée sur plusieurs matériaux issus de différentes centrales BPE du département de la Charente-Maritime. Les résultats ont montré des teneurs en arsenic, chrome et fluorures lixiviés en limite des seuils d'acceptabilité, eu égard aux critères de classement des déchets inertes. Afin de limiter leur impact environnemental, ces matériaux ont donc été utilisés en tant qu'additions minérales dans la formulation de mortiers et bétons. Les résultats ont montré une influence importante de cette incorporation sur la rhéologie des mortiers et bétons à l'état frais, mais une influence limitée sur leurs propriétés mécaniques à long terme. Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet Recyla(B)², lauréat de l'appel à projets de R&D de l'ADEME (2013).

ABSTRACT. The aim of this study is to characterize the settled sludge coming from Ready-Mixed Concrete plants from an environmental point of view. Also, their inertization into cementitious materials, as well as their influence on the mechanical properties have been studied. To do so, several materials coming from ready-mixed concrete plants of the Charente-Maritime area were submitted to batch leaching tests. Results showed that arsenic, chromium and fluorides contents in leachates could be higher than the acceptance criteria for inert waste. Then, in order to reduce their environmental impact, those materials were used as mineral additions for mortars and concretes. Results showed a high influence of the mineral addition on the fresh state properties of the mortars and concretes. Nevertheless, the influence on the mechanical properties of the hardened materials was limited.

MOTS-CLÉS : centrale BPE, boues de décantation, additions minérales, recyclage, caractérisation environnementale

KEYWORDS: RMC plants, decantation sludge, mineral addition, recycling, environmental characterization

1. Introduction

Les centrales de Béton Prêt à l'Emploi (BPE) sont des installations classées pour la protection de l'environnement. À ce titre, elles se doivent d'adopter une politique de gestion particulièrement stricte de leurs effluents aqueux. C'est pourquoi les eaux utilisées pour le lavage des installations, malaxeurs et camions-toupies, ainsi qu'une partie des eaux pluviales, sont acheminées vers des bassins de décantation. Le curage régulier de ces bassins permet d'isoler des boues (ou « laitances »). Après un stockage temporaire sur site pour réduire leur teneur en eau, ces boues sont dirigées vers des Installations de Stockage de Déchets Inertes. Or, la production de 1 m³ de béton génère environ 35 kg de laitances sèches. La valorisation de ces sous-produits représente donc un enjeu économique majeur puisqu'à l'échelle de la France et de ses 37 millions de mètres-cubes de bétons produits annuellement, les coûts de stockage sont estimés à 9 millions d'euros par an.

Ces matériaux sont potentiellement polluants, du fait de leur pH fortement alcalin et de leurs teneurs élevées en éléments-traces métalliques [SEA 01]. Ainsi, une des voies de valorisation des laitances est de les utiliser en tant qu'additions minérales pour la fabrication de bétons. Or, très peu de données sont disponibles dans la littérature quant à la réincorporation des boues au sein de bétons. Il a déjà été montré cependant que l'utilisation d'eaux chargées comme eau de gâchage entraîne une diminution de la maniabilité des bétons à l'état frais [SU 02], [CHA 09]. La non-viabilité d'une utilisation des boues comme substitut au ciment a été démontrée dès 1975, du fait de leur faible pouvoir hydraulique [PIS 75]. Néanmoins, dans la même étude, il a été montré que de faibles taux de substitution de sable peuvent être envisagés sans pour autant modifier significativement la consistance ou la résistance à la compression des bétons.

Cette étude a donc pour objectif de valoriser les boues de décantation en tant qu'additions minérales pour bétons. Une première étude environnementale a été réalisée, afin de démontrer la nécessité de trouver des voies d'inertage de ces matériaux. Par la suite, des mortiers ont été formulés à partir de laitances, selon la méthode du Mortier de Béton Équivalent (MBE). Ces mortiers ont été caractérisés à l'état frais et à l'état durci, à différentes échéances (affaissement, porosité, résistance à la compression).

2. Programme expérimental

2.1. Matériaux d'étude

Les laitances étudiées ont été prélevées sur six centrales BPE en Charente-Maritime, nommées C1 à C6.

Le filler calcaire, les ciments CEM I 52,5 et CEM II/A 42,5 ont été fournis respectivement par Carmeuse (Saint-Porchaire), Lafarge (Saint-Pierre la Cour) et Calcia (Airvault). Leurs propriétés sont détaillées dans le tableau 1. Le sable 0/4 mm utilisé dans les mortiers a été fourni par la société Sablimaris Pallice (La Rochelle). L'affaissement des mortiers a été ajusté à l'aide du superplastifiant Chrysofluid Optima 220. Le sable fourni par la société SNL (Leucate) a été utilisé dans les mortiers normalisés.

Tableau 1. Propriétés des ciments et filler calcaire (FC) utilisés

	Propriétés physiques			Composition du clinker (%)					Teneurs en carbonates (%)	
	Densité (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Clinker (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaCO ₃	MgCO ₃
CEMI 52,5	3,15	3650	98	64,5	20,1	5,0	3,1	3,3	-	-
CEMII 42,5	3,12	3800	92	63,0	18,7	4,5	3,2	2,7	6,0	-
FC	2,70	3530	-	-	-	-	-	-	95,0	3,7

2.2. Caractérisation des matériaux bruts

2.2.1. Lixiviation

Les tests de lixiviation en bûchée unique ont été réalisés sur les laitances, selon la norme française NF 12457-2 [AFN 12457-2]. Une prise d'essai Mw du matériau, à la teneur en eau naturelle, contenant 90 g de matière sèche, est préparée. De l'eau milli-Q est ajoutée de telle sorte que le rapport liquide-solide soit de 10. L'ensemble est placé sous agitation mécanique pendant 24±0,5 h. Le mélange est ensuite filtré à 2 µm sur Büchner et le filtrat est récupéré pour analyses.

Les filtrats sont dilués au 10^{ème} et au 100^{ème} dans une solution aqueuse d'HNO₃ 5%. Ba, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb et Zn sont analysés à l'aide d'un appareil ICP-OES Varian Vista Pro. As, Cd et Se sont analysés à l'aide d'un appareil ICP-MS ThermoFischerScientific Xseries2.

Les filtrats sont dilués au 5^{ème} dans de l'eau milli-Q. F⁻, Cl⁻ et SO₄²⁻ sont analysés à l'aide d'un appareil de chromatographie ionique Metrohm équipée d'une colonne Metrosep A Supp 5 100/4.0.

2.2.2. Propriétés physiques et minéralogiques

Les teneurs en eau naturelle des boues ont été déterminées par séchage à 80 °C jusqu'à pesée constante. La distribution granulométrique des boues a été déterminée par tamisage de 500 g de poudre.

Les analyses de diffraction des Rayons X (DRX) ont été réalisées à l'aide d'un appareil Brücker, muni de la radiation Cu K α 1. Les mesures ont été réalisées entre 5 et 70 2 θ , par pas de 0.02 °. Les analyses thermogravimétriques (ATG) ont été réalisées à l'aide d'un appareil Setaram Setsys Evolution 16/18. Environ 100 mg d'échantillon sont chauffés de 20 °C à 1000 °C, à une vitesse de 10 °C/min, sous atmosphère d'argon.

2.2.3. Réactivité hydraulique

L'activité hydraulique des boues a été évaluée conformément à la norme française NF P 18-508, relative aux additions minérales calcaires [AFN 18-508]. Un mortier normalisé de référence est formulé à partir d'un ciment CEM I, d'eau déionisée et d'un sable normalisé. Un deuxième mortier est formulé en substituant 25% de la masse du ciment par le passant à 100 μ m des laitances. Les mortiers sont démoulés à 24 h et conservés dans l'eau jusqu'à 28 jours, pour la détermination de leur résistance à la compression. L'indice d'activité (noté i) est alors défini comme le rapport entre la résistance du mortier avec laitances et la résistance du mortier de référence.

2.3. Caractérisation des mortiers formulés à partir de laitances

2.3.1. Méthode de formulation

Les mortiers ont été formulés selon le concept de Mortier de Béton Équivalent (MBE) [SCH 00]. Le MBE est obtenu après substitution des gravillons du béton par une quantité de sable développant la même surface. Il s'agit d'une méthode permettant de faciliter les essais en laboratoires.

La composition du béton de référence étudié est détaillée dans le tableau 2 (Réf.). Il s'agit d'un béton de type « XC1 C20/25 » selon la norme française NF EN 206-1 [AFN 206-1], de rapport E/C=0,6. Ce béton correspond à une composition produite dans les centrales BPE d'où proviennent les laitances étudiées. Le Mortier de Béton Équivalent dérivant de ce béton est appelé MBE dans le tableau 2.

La formulation des MBE à partir de laitances a été réalisée en substituant la totalité du filler calcaire ainsi qu'une partie du sable du MBE par les laitances (comme montré dans la suite, les laitances sont un mélange de sable et d'éléments fins inférieurs à 100 μ m – section 3.1.2). La substitution a été réalisée par minimisation des écarts entre les courbes granulométriques des mélanges « sable + filler » du MBE et « sable + laitances » des MBE avec laitances. Le choix a été fait d'incorporer les laitances aux mortiers à l'état de poudre et non à l'état de boue. Même si cela n'est pas envisageable d'un point de vue industriel, à l'échelle du laboratoire, cela permet une meilleure maîtrise des teneurs en eau.

Tableau 2. Composition des mortiers étudiés (kg/m³)

	Réf.	MBE	C1-MBE	C2-MBE	C3-MBE	C4-MBE	C5-MBE	C6-MBE
Gravillon 10/20	823	0	0	0	0	0	0	0
Gravillon 6/10	352	0	0	0	0	0	0	0
Sable 0/4	775	1476	1412	1428	1290	1391	1335	1427
Ciment CEM II/A 42,5	253	424	424	424	424	424	424	424
Filler calcaire	28	47	0	0	0	0	0	0
Laitances sèches	0	0	91	78	185	109	149	79
Eau	169	283	283	283	283	283	283	283
Superplastifiant (%)	0,6	0,2	0,6	0,8	0,6	0,5	0,8	0,9

Du superplastifiant a été ajouté de telle sorte que l'affaissement mesuré au mini-cône d'Abrams soit de 5 cm. Les mortiers ont été mis en place dans les moules 4*4*16 cm à l'aide d'une table vibrante. Après démoulage à 24 h, tous les mortiers ont été conservés dans l'eau jusqu'à leur caractérisation ultérieure.

2.3.2. Caractérisation des mortiers

À l'état frais, les mortiers sont caractérisés par leur affaissement au mini-cône d'Abrams (H=100 mm, d=50 mm). Les résistances à la compression ont été déterminées à 7 et 28 jours à l'aide d'une presse Zwick (vitesse de chargement = 2200 N/s, précharge = 3000 N). Les porosités accessibles à l'eau ont été mesurées à 28 jours selon la norme NF EN 1845-9 [AFN 1845-9].

3. Résultats et discussions

3.1. Caractérisation des laitances

3.1.1. Lixiviation

Les résultats des analyses chimiques des lixiviats des laitances sont présentés dans le tableau 3. Sont également indiqués dans ce tableau les seuils à ne pas dépasser pour que les laitances puissent être classées dans la catégorie des déchets inertes. Une attention particulière doit être portée aux teneurs en arsenic et en chrome, car celles-ci sont parfois légèrement supérieures aux seuils des déchets inertes. Il apparaît également que la teneur en fluorures peut également être problématique. Seule une valeur par excès a pu être déterminée, et cette valeur, quelle que soit la centrale d'origine des laitances, est toujours supérieure au seuil des déchets inertes. Même si ces résultats sont provisoires, il est difficile pour l'heure de classer les laitances en tant que déchets inertes. Or ce classement est très important pour les centrales BPE car si le coût de stockage des déchets inertes est estimé à 8 €/t, il est cinq fois plus élevé pour le stockage de déchets non dangereux [POY 12].

Tableau 3. Composition des lixiviats des laitances et comparaison aux seuils de classement des déchets (mg/kg de matière sèche)

	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
C1	0,21	14,59	<0,001	0,51	1,30	<0,11	<0,11	<0,11	<0,02	0,70
C2	<0,02	15,01	<0,001	0,44	<0,11	<0,11	<0,11	<0,11	<0,02	<0,56
C3	0,54	12,53	<0,001	0,37	0,23	<0,11	<0,11	<0,11	<0,02	<0,56
C4	0,15	17,70	<0,001	0,31	0,32	<0,11	<0,11	<0,11	<0,02	<0,56
C5	<0,02	13,41	<0,001	0,64	<0,11	<0,11	<0,11	<0,11	<0,02	0,71
C6	<0,02	14,16	<0,001	0,12	0,31	<0,11	<0,11	<0,11	<0,02	<0,56
Déchets inertes	0,5	20	0,04	0,5	2	0,5	0,4	0,5	0,1	4
Déchets non-dangereux	2	100	1	10	50	10	10	10	0,5	50

	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
C1	< 10.78	377.91	8.45
C2	<6.02	31.23	4.19
C3	<8.37	39.91	5.65
C4	<4.61	49.91	13.27
C5	<8.77	182.81	5.07
C6	<8.76	39.47	3.84
Déchets inertes	10	800	1000
Déchets non-dangereux	150	15000	20000

Au regard de cette étude, il apparaît primordial de proposer des solutions permettant d'éviter le stockage des laitances en installations de stockage spécialisées. La voie de valorisation en tant qu'addition minérale pourrait être une voie à privilégier, permettant en plus de piéger les éléments-traces métalliques dans la matrice.

3.1.2. Caractérisation physique et minéralogique des laitances

Les analyses granulométriques réalisées sur les six matériaux ont montré une dispersion élevée entre 100 µm et 4 mm (figure 1). Ainsi, la teneur en fines (<100 µm) est comprise entre environ 20% (C3) à 55% (C2).

Mises à part les laitances de C6, les matériaux étudiés présentent tous un D_{max} de 4 mm ; leur granulométrie est donc adaptée à une substitution totale d'additions minérales, accompagnée d'une substitution partielle du sable.

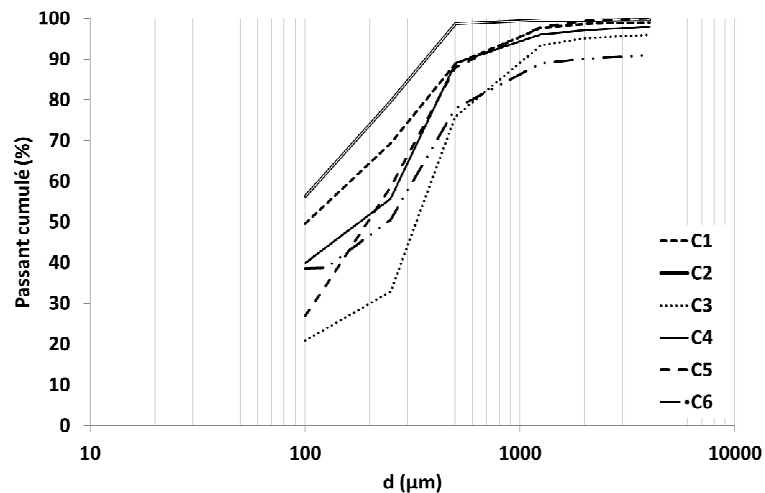


Figure 1. Distribution granulométrique des six matériaux étudiés

Les résultats des analyses DRX menés sur les six laitances ont montré une composition qualitative similaire pour tous les matériaux. Un exemple d'analyse est fourni en figure 2. Les refus à 100 μm sont majoritairement constitués de quartz et de calcite, ainsi que d'agrégats de portlandite. Les passants à 100 μm sont quant à eux également constitués de quartz, de calcite, de portlandite, mais également de gypse, de carboaluminates de calcium hydratés, C-S-H et de silicates de calcium anhydre. La présence de matière non hydratée au sein de ce matériau laisse espérer une réactivité hydraulique des laitances.

Les teneurs en calcite et portlandite ont pu être quantifiées par ATG. Un exemple de courbe DTG est fourni en figure 3. Les pics entre 25 et 250 $^{\circ}\text{C}$ correspondent à la libération de l'eau libre ainsi qu'à la déshydratation des phases hydratées : C-S-H et carboaluminates de calcium hydratés. Le pic entre 420 et 480 $^{\circ}\text{C}$ correspond à la déshydratation de la portlandite et le pic entre 600 et 750 $^{\circ}\text{C}$ correspond à décarboxylation de la calcite. Enfin, le pic entre 750 et 1000 $^{\circ}\text{C}$ pourrait être attribué à la décarbonatation des carboaluminates de calcium ou à la décarbonatation d'une autre forme de CaCO_3 . Des teneurs en calcite comprises entre 13,0 et 20,0% ont été mesurées, et des teneurs en portlandite comprises entre 7,8 et 12,3%. Cette variabilité en fonction de la centrale d'étude peut s'expliquer par la nature des matériaux utilisés pour la fabrication des bétons différents d'une centrale à une autre. Néanmoins, cette variabilité reste limitée et la composition globale des laitances reste la même, quel que soit le lieu de prélèvement.

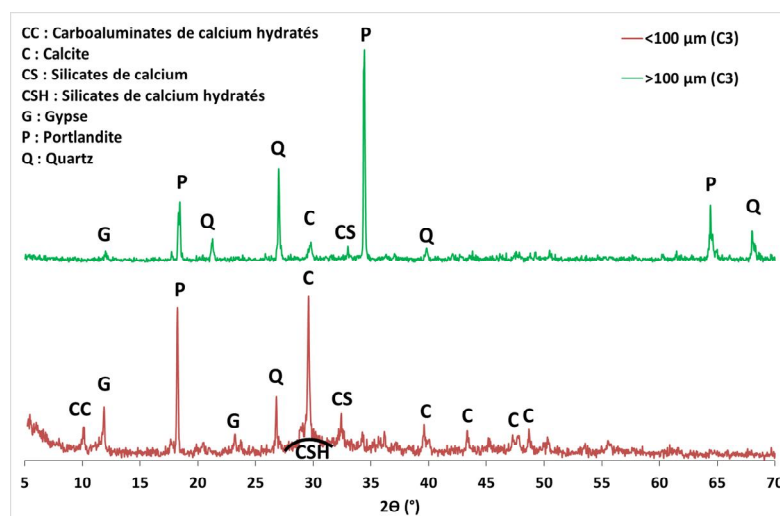
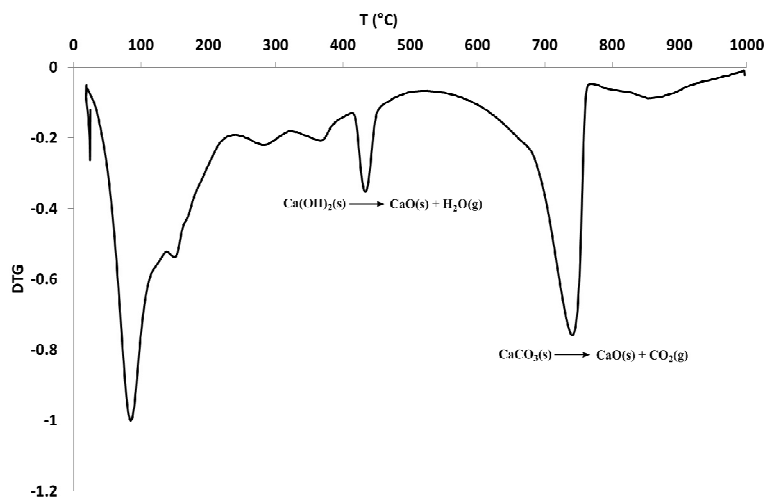
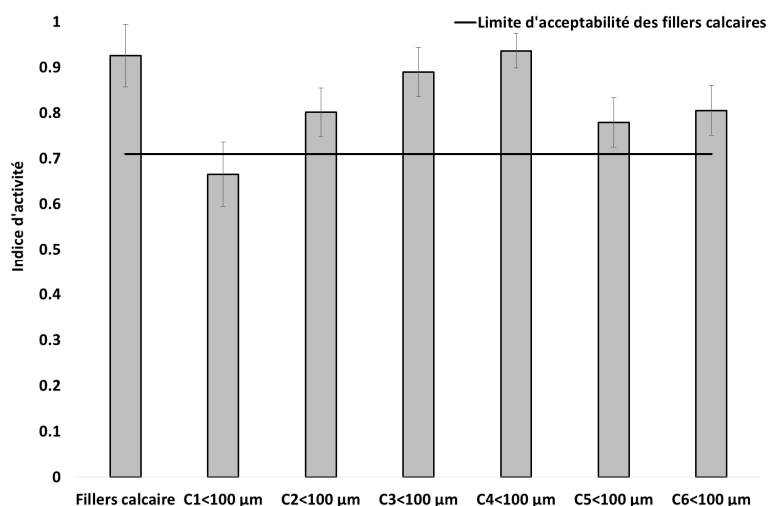


Figure 2. Exemple de diffractogramme obtenu sur les laitances de C3 (anticathode au cuivre)**Figure 3.** Exemple de courbe DTG obtenue sur les laitances de C3

3.1.3. Réactivité hydraulique

Toutes les fines de laitances (fractions <100 μm), excepté celles de C4, présentent un indice d'activité plus faible que celle d'un filler calcaire (figure 4). Leur hydraulicité doit par conséquent être très faible. La norme NF P 18-508 spécifie qu'un filler calcaire doit présenter un indice d'activité supérieur à 71% pour pouvoir être utilisé en tant qu'addition minérale pour béton. Mises à part les fines provenant de la centrale de C1, qui présentent un coefficient d'activité de 66%, toutes les fines de laitances testées présentent un indice d'activité supérieur à 71% (variant entre 78 et 93%), les rendant potentiellement admissibles au rang d'additions minérales pour béton.

**Figure 4.** Indices d'activités des fractions <100 μm des laitances

3.2. Caractérisation des mortiers formulés à partir des laitances

Lors de la fabrication des mortiers à base de laitances, celles-ci se sont avérées avoir une influence importante sur la rhéologie. Les laitances semblent avoir un effet rétenteur d'eau, par absorption d'eau au sein de leur porosité, ou par adsorption de l'eau à la surface des particules. Cet effet empêche donc une partie de

l'eau de gâchage de participer à la fluidification du mélange. Ainsi, sans superplastifiant, un affaissement nul a été mesuré pour tous les mortiers formulés avec laitances alors qu'un affaissement de 2 cm a été mesuré pour le mortier MBE de référence. Afin d'atteindre l'affaissement visé de 5 cm, tous les mortiers à base de laitances ont dû être additivés de quantités de superplastifiant (0,5 à 0,9%) plus importantes que pour la référence (0,5%).

Les mêmes cinétiques de durcissement sont observées pour tous les mortiers, même si les résistances à la compression sont variables (figure 5). Après 7 jours de cure, les mortiers fabriqués à partir des laitances de C3, C4 et C5 présentent des résistances plus faibles que celle du mortier de référence, alors que les mortiers fabriqués à partir des laitances de C2 et C6 présentent des résistances plus élevées. La résistance du mortier fabriqué à partir des laitances de C1 est sensiblement la même que celle du mortier de référence. Les mêmes tendances sont observées après 28 jours de cure. Cette variabilité de la résistance à la compression semble être indépendante de la porosité des mortiers. Il est admis qu'une porosité plus élevée entraîne une diminution de la résistance à la compression [YUD 72]. Pour autant, les mesures à 28 jours de porosité accessible à l'eau (tableau 4) ont montré une porosité supérieure de tous les mortiers formulés avec laitances en comparaison du mortier de référence, sans aucune corrélation avec les résistances à la compression. Une régression linéaire multiple a cependant montré l'influence de la quantité de laitances et de leur teneur en fines (<100 µm) sur les résistances à la compression des mortiers. Ainsi, plus la quantité de fines de laitances incorporées au mortier est élevée, plus sa résistance est faible. Une variabilité dans les propriétés intrinsèques des laitances (surface spécifique, porosité, teneur en ciment anhydre, etc.) pourrait expliquer les différences de résistance des mortiers ; des caractérisations physiques supplémentaires des laitances doivent venir confirmer cette hypothèse.

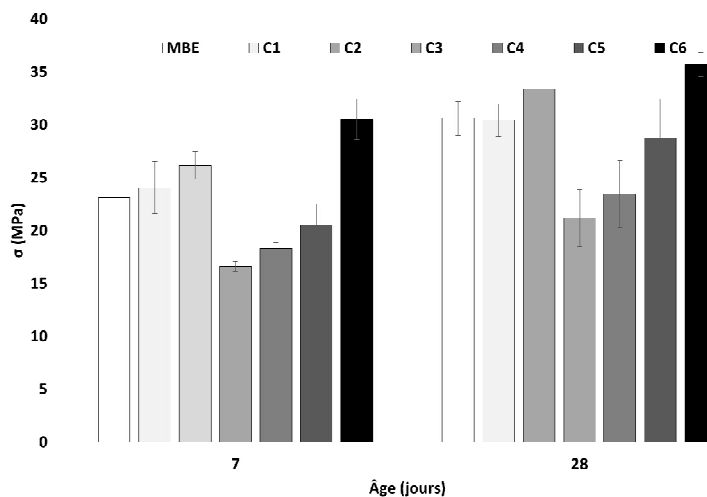


Figure 5. Résistance à la compression des mortiers âgés de 7 et 28 jours

Tableau 4. Porosité accessible à l'eau des différents mortiers

	MBE	C1-MBE	C2-MBE	C3-MBE	C4-MBE	C5-MBE	C6-MBE
Porosité accessible à l'eau à 28 jours (%)	21,0	22,5	23,4	25,6	23,7	24,5	23,1

4. Conclusions

Les laitances étudiées ont montré un potentiel polluant non négligeable. En effet, leurs teneurs en arsenic, chrome et fluorures, sont parfois supérieures aux seuils d'acceptabilité des déchets inertes. La gestion hors site pouvant donc être environnementalement et économiquement difficile, la perspective d'une réincorporation des constituants des bétons contenus dans les laitances prend donc une importance particulière (recyclage en boucle fermée). Néanmoins, cette utilisation en tant qu'additions minérales soulève deux problématiques principales :

- une modification de la rhéologie à l'état frais des bétons, nécessitant un ajout de superplastifiant pour obtenir une plasticité équivalente à celle du béton de référence ;

- une variabilité des résistances à la compression à 28 jours selon les laitances étudiées.

Des essais de lixiviation sur monolithe doivent aussi être menés pour confirmer l'efficacité de l'inertage des laitances au sein des mortiers.

5. Remerciements

Les auteurs remercient l'ADEME pour le financement du projet, ainsi que tous les partenaires industriels du projet.

6. Bibliographie

- [AFN 196-6] NORME AFNOR NF EN 196-6, « Méthodes d'essai des ciments – Partie 6 : détermination de la finesse », 2012.
- [AFN 206-1] NORME AFNOR NF EN 206-1, « Bétons – Partie 1 : spécification, performances, production et conformité », 2014
- [AFN 1097-7] NORME AFNOR NF EN 1097-7, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 7 : détermination de la masse volumique absolue du filler – Méthode au pycnomètre », 2008.
- [AFN 1586-2] Norme AFNOR NF EN 1586-2, « Caractérisation des déchets – Essai de lixiviation de conformité – Essai de lixiviation en bûchée unique pour des monolithes avec un rapport liquide/surface (L/A) fixe, pour des prises d'essai de dimensions minimales fixes », 2012
- [AFN 1845-9] NORME AFNOR NF EN 1845-9, « Béton – Essai pour béton durci – Essai de porosité et de masse volumique », 2010
- [AFN 18-508] NORME AFNOR NF P 18-508, « Additions pour bétons hydrauliques – Additions calcaires – Spécifications et critères de conformité », 2012
- [AFN 12457-2] NORME AFNOR NF EN 12457-2, « Caractérisation des déchets – Lixiviation – Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues – Partie 2 : essai en bûchée unique avec un rapport liquide-solide de 10 L/kg et une granularité inférieure à 4 mm (sans ou avec réduction granulométrique », 2002.
- [CHA 09] CHATVEERA B., LERTWATTANARUK, P., « Use of ready-mixed concrete plant sludge water in concrete containing additive or admixture », *Journal of Environmental Management*, vol. 90, n° 5, 2009, p. 1901-1908.
- [PIS 75] PISTILLI M. F., PETERSON, C. F., « Properties and possible recycling of solid waste from ready-mixed concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 5, 1975, p. 249-260.
- [POY 12] PÖYRY SAS, Étude sur le prix d'élimination des déchets inertes du BTP, Étude technique menée par PÖYRY SAS, juin 2012, ADEME
- [SCH 00] SCHWARTZENTRUBER A., CATHERINE C., « La méthode du Mortier de Béton Équivalent (MBE) – Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés », *Materials and structures*, vol. 33, n° 8, 2000, p. 475-482.
- [SEA 01] SEALEY B. J., PHILLIPS, P. S., HILL, G. J., « Waste management issues for the UK ready-mixed concrete industry », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 32, n° 3-4, 2001, p. 321-331
- [SU 02] SU N., MIAO B., LIU F.-S., « Effet of wash water and underground water on properties of concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 32, n° 5, 2002, p. 777-782.
- [YUD 72] YUNDENFREUND M., HANNA K. M., SKALNY J., OLDER I., BRUNAUER S., « Hardened Portland cement pastes of low porosity V. Compressive strength », *Cement and Concrete Research*, vol. 2, n° 6, 1972, p. 731-743