HAL
open science

Etude de la pouzzolanicité de graves recyclées

Hakim Hamdoun, Ph Turcry, Pierre-Yves Mahieux

To cite this version:

Hakim Hamdoun, Ph Turcry, Pierre-Yves Mahieux. Etude de la pouzzolanicité de graves recyclées. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. hal-01167690

HAL Id: hal-01167690

https://hal.science/hal-01167690v1

Submitted on 24 Jun 2015

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

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

Etude de la pouzzolanicité de graves recyclées

H. Hamdoun, Ph. Turcry, P.-Y. Mahieux
Université de La Rochelle, LaSIE, UMR 7356 CNRS, Av. Crépeau, 17000 La Rochelle

hakime.hamdoun@univ-lr.fr
philippe.turcry@univ-lr.fr
pierre-yves.mahieux@univ-lr.fr

RESUME : Le projet « Recyment » s'inscrit dans la problématique de la valorisation des bétons de démolition sous forme de matériaux pour les travaux routiers. La proportion non négligeable d'éléments en terre cuite dans ces matériaux est susceptible de conférer des propriétés pouzzolaniques de par leur caractère siliceux. Ce travail propose donc une étude de l'influence de la terre cuite dans une grave recyclée (GR). Pour cela, un mélange de GR avec du sable de terre cuite (5 ou 10 %) a été confectionné. Les résultats montrent que la portance après compactage Proctor est d'autant plus élevée que la proportion de terre cuite présente dans le mélange est élevée (augmentation jusqu'à 20 %). De plus, les cinétiques de prise sur pâtes soulignent également l'influence de la proportion de céramique des mélanges : les vitesses de prise augmentent lorsque la proportion de céramique augmente. L'ensemble de ces résultats tend à prouver le caractère pouzzolanique de la terre cuite.

Mots clés : déchets de démolition, graves recyclées, terres cuites, pouzzolanicité

ABSTRACT: The "Recyment" project investigates the potential use of mixed recycled aggregates in road construction. The significant proportion of terracotta elements in these materials is able to conferring pozzolanic properties. This paper presents a study on the influence of the terracotta into recycled aggregates. For this purpose, a mixture of recycled aggregates with terracotta sand (5 and 10%) was manufactured. The results show that after Proctor compaction the bearing capacity increases with the proportion of terracotta in the mixture (up to 20% increase). In addition, the setting tests show also the influence of the proportion of ceramic in the mixtures: setting rates increase when the proportion of ceramic increases. All these results tend to prove the pozzolanic nature of terracotta in recycled aggregates.

Keywords: construction wastes, recycled aggregates, ceramic materials, pozzolanicity

1. Introduction

Depuis une vingtaine d'année, la France et l'Europe incitent fortement, à travers lois, décrets et circulaires, le secteur du BTP à valoriser et recycler ses déchets. Parmi ces derniers, les matériaux issus de la démolition de bâtiments ou d'ouvrages d'art en béton ont sans aucun doute un fort potentiel de valorisation. Leur transformation par concassage / criblage en « graves recyclées » (GR) permet de réduire la mise en décharge des déchets inertes et la consommation de graves « naturelles » extraites et fabriquées en carrière.

Cette étude s'inscrit dans le projet « Recyment », financé en partie par l'ADEME, qui a pour but d'étudier la réactivité des GR en vue d'une réutilisation en techniques routières. Le présent travail se propose d'étudier le potentiel pouzzolanique de GR fabriquées industriellement par Planète Recyclage (partenaire du projet). Un tri de ces graves permet de mettre en évidence une forte proportion de matériaux cimentaires (supérieure à 80% en masse) ainsi qu'une proportion non négligeable (entre 3 et 5 %) de fragments de terre cuite (céramique). Leur nature siliceuse leur confère a priori des propriétés pouzzolaniques. Un matériau est dit pouzzolanique si, en présence d'eau, il présente la propriété de se combiner avec la chaux (oxyde et hydroxyde de calcium) pour former des silicates de calcium hydraté. La caractérisation de la pouzzolanicité des matériaux se base conjointement sur des manifestations mécaniques et chimiques au sein d'un mélange réactionnel.

Vegas *et al*. ont réalisé des essais de portance CBR sur des GR et montrent un gain de portance à moyen terme attribués notamment à l'hydraulicité des matériaux [VEG, 08]. Les auteurs montrent aussi que la présence de céramiques en faibles teneur (éclats de tuile en terre cuite par exemple) diminue certes la résistance à la fragmentation (évaluée par des essais Los Angeles) mais améliore la portance à moyen ou long termes car ces fines provoquent des réactions pouzzolaniques.

Les matériaux étudiés sont des mélanges d'une GR industrielle (0/31,5mm) et d'un sable issu de terres cuites concassées (0/4 mm). Les effets mécaniques de la présence de la terre cuite sont étudiés par des essais de poinçonnement CBR sur les mélanges, conservés en conditions endogènes ou sous eau, et des essais de prise. Les effets chimiques sont étudiés par la consommation d'hydroxyde de calcium de différents échantillons de la fraction fine.

2. Matériaux et méthodes

2.1. Matériaux étudiés

La GR étudiée a été produite par l'entreprise Planète Recyclage sur sa plateforme de La Rochelle. La matière première provient de divers chantiers de démolition. C'est donc un mélange de déchets, composé de béton, pierres et terres cuites. Les graves sont obtenues par un concassage (réduction de taille pour obtenir une fraction 0/80 mm). Au préalable, les plus gros éléments de béton armé sont concassés à l'aide d'une pince de démolition. Pendant le concassage, les éléments sont dé-ferraillés par un séparateur magnétique. Enfin, un criblage permet d'obtenir différentes fractions, dont la fraction 0/31,5 mm, qui nous intéresse ici.

La GR a été prélevée sur site puis versée dans un big bag d'environ 400 kg. La préparation des échantillons est réalisée selon la norme EN 932-1. En laboratoire, un échantillonnage par quartage a été réalisé, afin d'obtenir des échantillons homogènes et représentatifs de l'ensemble.

La GR a été mélangée avec un sable de granulométrie 0/4 mm obtenu par tamisage d'une grave de terre cuite 0/31,5 mm. Cette dernière a été fabriquée par Planète Recyclage, auparavant, par concassage de tuiles de terre cuite (lors de la démolition d'un bâtiment, les tuiles sont facilement séparées des autres matériaux). Trois mélanges ont été fabriqués pour différentes teneurs massiques en terre cuie : 0, 5 et 10% (Tableau 1).

Tableau 1 : Composition des mélanges (proportions massiques)

Désignation du mélange	Ensemble du mélange 0/31,5 mm		→	Fraction 0/100 µm du mélange	
	GR	Terre cuite		GR	Terre cuite
GR + 0%	100 %	0 %	→	100 %	0 %
GR + 5 %	95 %	5%	→	90,7 %	9,3 %
GR + 10 %	90 %	10 %	→	83,0 %	17,0 %

En plus des essais sur les mélanges de granulométrie 0/31,5 mm, des essais, décrits dans la suite, ont été réalisés sur la fraction 0/100 µm, qui a été jugée comme la plus réactive. Le Tableau 1 donne la composition massique de la fraction inférieure à 100 µm des mélanges.

2.2. Caractérisation des GR

2.2.1. Composition

Pour l'étude de la variabilité des paramètres physico-chimiques et mécaniques des GR, il est important de connaître leur composition. Un essai de classification des constituants est réalisé selon la norme NF EN 933-11. Les particules sont triées entre 4 et 31,5 mm pour une prise d'essai de 10 kg.

2.2.2. Essai Proctor

L'aptitude au compactage des graves est évaluée avec l'essai Proctor normal selon la norme NF EN 13286-2. Le principe de cet essai est de compacter les échantillons à différentes teneurs en eau. Les caractéristiques de compactage permettent de déterminer la teneur en eau optimale (w_{OPN}) pour laquelle les matériaux présentent la masse volumique sèche optimum (ρ_{dOPN}).

2.2.3. Essais de portance CBR

La résistance au poinçonnement des GR a été mesurée sur des échantillons compactés à la teneur en eau w_{OPN}. Les essais dits CBR sont réalisés selon la norme NF EN 13286-47. Un piston cylindrique de 19,3 cm^2 de section poinçonne à vitesse constante (1,27 $mm.min^{-1}$) l'échantillon de section 19,3 cm^2 et hauteur 19,5 cm. La contrainte appliquée est mesurée par la déformation d'un anneau dynamométrique (d'une capacité de 50 kN) associé au piston. Un système d'acquisition permet d'enregistrer la déformation de l'anneau. La résistance au poinçonnement est exprimée à l'aide de l'indice de portance calculé comme suit :

$$IP\ (\%) = \max\ (P(2{,}5mm)/7\ MPa\ ;\ P(5mm)/10{,}5mm) * 100$$

où P(2,5mm) et P(5mm) sont les valeurs de pression en MPa mesurées pour des enfoncements du piston de 2,5 et 5 mm respectivement.

Après compactage à l'optimum Proctor, les échantillons ont été conservés selon deux modes : en immersion dans l'eau ou dans des conditions endogènes (les échantillons sont recouverts d'un film plastique pour éviter tout échange hydrique). Des essais CBR ont été réalisés aux échéances suivantes : 0, 7, 30 et 90 jours. Pour chaque mode de conservation et chaque échéance, trois échantillons ont été testés.

2.3. Caractérisation de la fraction fine des mélanges

2.3.1. Etude de la prise sur pâtes

Un essai de prise, inspiré de l'essai de Vicat, a été utilisé pour évaluer, sur la fraction fine des mélanges (0/100 µm), la réactivité des éléments fins en présence d'eau (Figure 1). On suppose que la partie la plus réactive des graves est comprise dans ces éléments.

Les essais ont été réalisés sur des pâtes obtenues en mélangeant la fraction fine et une certaine quantité d'eau. Les rapports eau/fines ont été déterminés en suivant le protocole de détermination de la demande en eau proposé par Sedran (1999). Cette méthode consiste à déterminer la quantité d'eau à ajouter à une poudre pour faire passer la pâte d'un état solide à un état plastique. Pour les trois mélanges étudiés, un rapport eau/fines d'environ 0,26 a été ainsi mesuré. Cette valeur a été donc retenue pour toutes les pâtes testées.

Les pâtes sont placées dans des pots métalliques de 4 cm de diamètre et 4 cm de hauteur et recouvertes d'un film plastique pour éviter tout séchage (conditions endogènes). À différentes échéances, on mesure l'enfoncement d'une aiguille métallique qu'on laisse tomber (une masse de 100 g surmonte cette aiguille) dans l'échantillon depuis la surface de celui-ci. Les résultats sont exprimés à l'aide de R, rapport entre la distance h entre l'aiguille est le fond du moule et H la hauteur de matériau, explicité sur la figure 1. Pour R=0, l'aiguille s'enfonce totalement dans l'échantillon ; pour R=1, l'aiguille ne s'enfonce plus : le matériau s'est totalement solidifié.

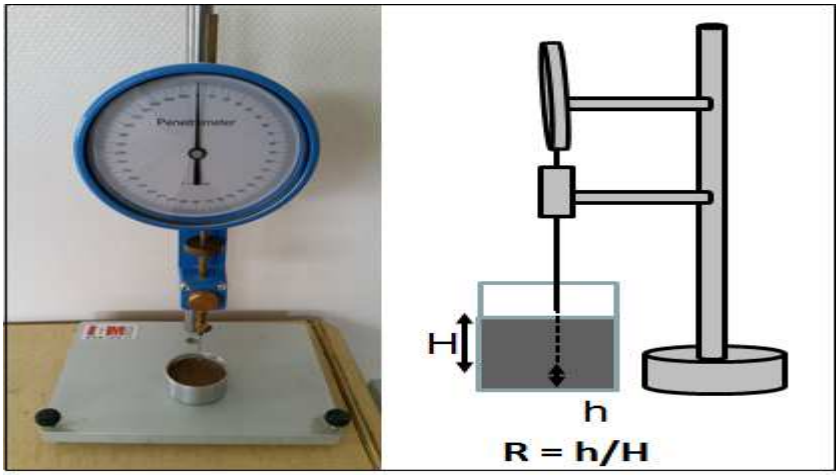

Figure 1. *Dispositif de l'essai de prise.*

2.3.2. Etude de la pouzzolanicité de la terre cuite (consommation de $Ca(OH)_2$)

Les réactions pouzzolaniques ont pour conséquence une consommation de la chaux du matériau. Pour mettre en évidence la pouzzolanicité du sable de terre cuite utilisé dans les mélanges, nous avons utilisé l'essai proposé par Sanchez *et al.* [SAN, 06]. 100 g d'échantillon de ce sable de granulométrie 0/100 µm sont mis en contact avec une solution de $Ca(OH)_2$ à 17,68 10^{-3} mol.L^{-1}. Le pH de la solution est mesuré sur une période de 90 jours, ce qui permet de mettre en évidence la consommation des ions hydroxydes. Pour comparaison, un essai a également été réalisé sur un échantillon de GR tamisé à 4 mm.

3. Résultats et discussions

3.1. Composition de la GR

L'essai de classification sur la fraction 4/31,5 mm montre logiquement une proportion élevée de matériaux « inertes » : béton (65,3%) et granulats naturels (24,7%). Pour l'étude de la réactivité des GR, la connaissance de la proportion de béton est intéressante puisqu'elle pourrait engendrer une hydraulicité résiduelle (du fait de la présence de ciment anhydre classiquement observée dans les bétons anciens). La GR étudiée comporte aussi une proportion non négligeable des éléments en terre cuite (4,8%) qui pourrait provoquer des réactions pouzzolaniques. La GR présente également des éléments bitumineux en proportion non négligeable (4,8 %) et d'autres éléments (plastique, bois, verre, etc.) dans des proportions moindres (< 1%).

3.2. Essais Proctor

La Figure 2 reporte les résultats de l'essai Proctor. Selon ce protocole, la GR présente une teneur en eau optimale de 8 % pour le compactage. Ces résultats montrent également qu'un ajout de sable de terre cuite modifie la teneur en eau optimale. En effet, pour un ajout de 5 et 10 % de sable de terre cuite augment la teneur en eau optimale de 2 %. Ce résultat peut s'expliquer du fait que les éléments en terre cuite utilisés en maçonnerie sont susceptibles de présenter des porosités variant de 5 à 30 % (Kornman, 2005) et donc autant d'eau qui ne participe pas à l'arrangement des grains lors du compactage.

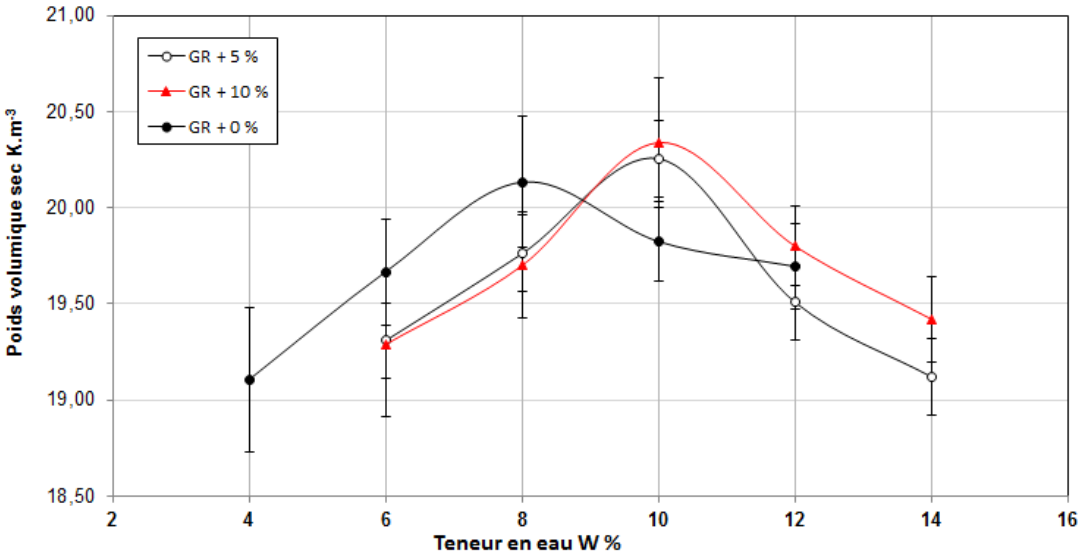

Figure 2. *Courbes Proctor des mélanges GR+0, GR+5, GR+10*

3.3. Evolution de la portance et influence des éléments en terre cuites

Sur la Figure 3, l'indice de portance de la GR à 0% de terre cuite n'évolue presque pas sur la période considérée (quel que soit le mode de conservation). On en déduit que la GR étudiée est peu réactive : elle présente à une hydraulicité et/ou une pouzzolanicité assez faible (des mesures à plus long terme sont bien sûr nécessaires pour confirmer cette tendance).

En revanche, dans le cas d'une addition de sable de terre cuite à 5 ou 10%, la portance augmente sensiblement au cours du temps quel que soit le mode conservation. Les cinétiques sont différentes selon le mode de conservation. En conservation endogène, l'évolution est presque linéaire entre 0 et 30 jours; l'augmentation est moins marquée entre 30 et 90 jours. En immersion, la portance augmente surtout entre 0 et 7 jours puis se stabilise entre 7 et 90 jours. De plus, en conservation endogène, il n'y a pas de différence marquée entre les mélanges à 5 et 10 % de terre cuite alors qu'en immersion l'évolution de la portance double avec cet apport en terre cuite.

Ces premiers résultats indiquent une influence significative de la terre cuite sur la résistance au poinçonnement, qui devra être confirmée avec des mesures à plus long terme et sur d'autres mélanges.

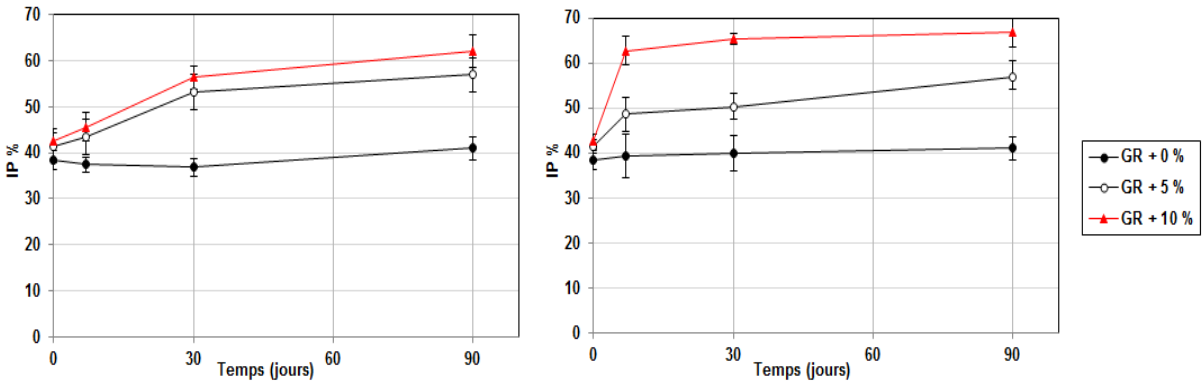

Figure 3. *Indice de portance des GR en présence de 0, 5 et 10 % de terre cuite en conservation endogène (à gauche) et en immersion (à droite) en fonction du temps.*

3.4. Etude de la prise sur pâtes

Sur la Figure 4 ont été tracés les rapports notés R de la distance entre l'aiguille et le fond du moule et la hauteur totale de matériau. Les cinétiques de prise soulignent l'influence de la présence de terre cuite : les vitesses de prise augmentent avec la proportion de céramique (dans la première semaine d'essai). Au bout de 7 semaines (50 jours), la solidification est bien plus marquée pour les mélanges à 5 et 10% de terre cuite que pour les fines de la GR.

Ces résultats témoignent d'une certaine réactivité des fines, même en l'absence de terre cuite. Celle-ci ne se traduit pas à l'échelle macroscopique, comme l'ont montré les essais CBR sur la GR à 0% d'addition. Notons que la prise des pâtes étudiées est loin d'être complète car R reste bien inférieur à 1.

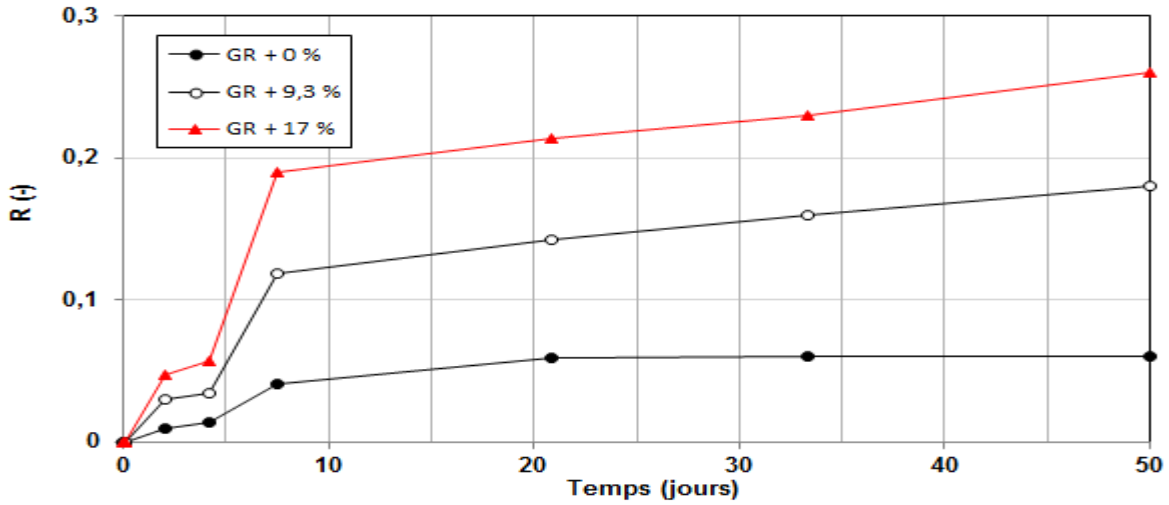

Figure 4. *Cinétique de prise des GR en présence de 0, 5 et 10 % de terre cuite.*

3.5. Etude de la pouzzolanicité (consommation de $Ca(OH)_2$)

La cinétique de consommation d'hydroxyde de calcium par le matériau est mise en évidence par une diminution significative du pH. En dessous d'un pH de 12,4, la portlandite $Ca(OH)_2$ est instable. Elle se dissout et intervient dans les réactions pouzzolaniques pour la formation de nouveaux hydrates. La silice, présente en grande quantité dans les terres cuites, réagit avec la portlandite et conduit à la formation de silicates de calcium hydratés (CSH en notations cimentaires), ce qui peut induire une baisse de pH, selon l'équation suivante :

$$Ca(OH)_2 + xSiO_2 \rightarrow yCSH$$

La Figure 5 présente l'évolution du pH qui traduit les cinétiques de consommation de $Ca(OH)_2$ par la terre cuite et la GR. Ce résultat tend à expliquer l'évolution des résistances au poinçonnement et les cinétiques de prise en présence de terre cuite. En effet, la terre cuite et la GR provoque une baisse du pH (probablement due à une précipitation des ions OH^- avec des ions relargués par les matériaux) ce qui provoque la dissolution de la portlandite et permet les ions Ca^{2+} d'intervenir dans les réactions pouzzolaniques. Cependant afin de confirmer cette hypothèse, un dosage du Ca^{2+} restant dans la solution doit être réalisé afin de déterminer la quantité de Ca^{2+} fixé par les matériaux.

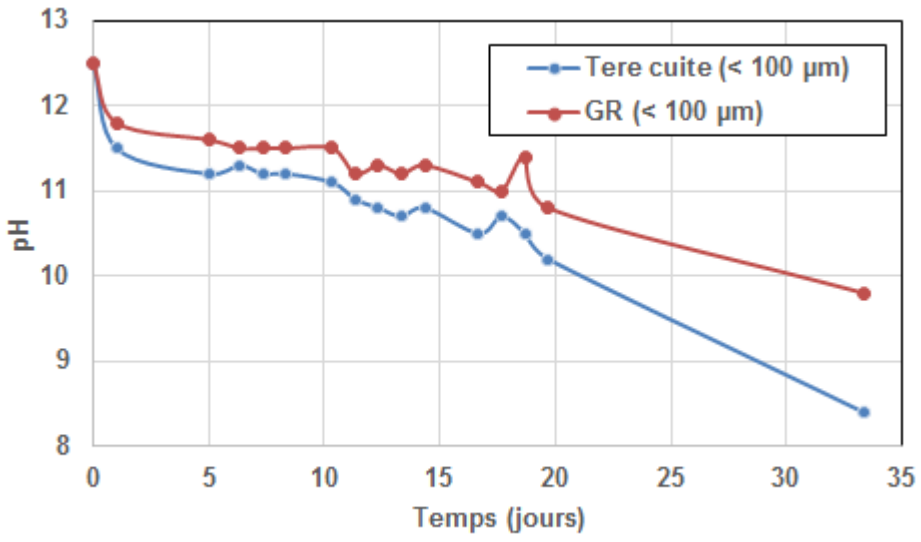

Figure 5 . *Evolution du pH en fonction du temps.*

4. Conclusion

Dans le but d'évaluer le potentiel pouzzolanique des fragments de terre cuite présents dans une GR, des mélanges d'une GR 0/31,5 mm fabriquée industriellement additionnée de 0, 5 ou 10% d'un sable de terre cuite (0/4 mm) ont été étudiés d'un point de vue mécanique, physique et chimique.

Les premiers résultats montrent une augmentation de la portance au cours du temps des mélanges contenant de la terre cuite quel que soit leur mode conservation (sous eau ou en conditions endogènes). La portance est d'autant plus importante que la proportion de terre cuite présente dans le mélange est élevée, ce qui tend à prouver le caractère pouzzolanique de la terre cuite. Les essais de prise soulignent également l'influence de la terre cuite : on observe un phénomène de solidification d'autant plus marqué que la proportion de terre cuite augmente.

La cinétique de consommation d'hydroxyde de calcium par la GR et la terre cuite est mise en évidence par une diminution significative du pH. La dissolution de la portlandite en-dessous d'un pH de 12,4 est plus rapidement mise en évidence dans la terre cuite.

Afin de suivre la quantité des ions Ca^{2+} fixés par les matériaux, un dosage de ses ions sera réalisé à différentes échéance 7, 30 et 90 jours. L'étude se focalisera ensuite sur la caractérisation microscopique de la pouzzolanicité et de l'hydraulicité potentiellement due à la présence de ciment anhydre notamment par des analyses minéralogiques.

Ces premiers résultats laissent entrevoir la possibilité d'une optimisation des performances des graves recyclées par recomposition de leur composition à l'échelle industrielle.

5. Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet « Recyment » financé par l'ADEME avec pour partenaire les entreprises Charier TP et Planète Recyclage.

6. Références bibliographiques

[AFN, 10] AFNOR, NF EN 13286-2. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques – Partie 2. Méthodes d'essai de détermination en laboratoire de la masse volumique de référence et de la teneur en eau - Compactage Proctor. 01/12/2010.NF EN 13286-2.

[AFN, 12 AFNOR, NF EN 13286-47. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 47 : méthode d'essai pour la détermination de l'indice portant Californien (CBR), de l'indice de portance immédiate (IPI) et du gonflement linéaire. 07/2012. NF EN 13286-47.

[KOR, 05] M. Kornmann, Matériaux de construction en terre cuite : fabrication est propriétés. Broché, 2005.

[SAN, 06] Sánchez de Rojas MI, Marí F, Rivera J, Frías M. Morphology and properties in blended cements with ceramic wastes as a pozzolanic material. J. Am. Ceram. Soc., 89(12), 2006, 3701–5.

[SED, 99] T. Sedran, Rhéologie et rhéometrie des bétons - Application aux bétons autonivelants PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1999.

[VEG, 08] I. Vegas, J.A. Ibanez, J.T. San Jose, A. Urzelai, Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction, Waste Management, 28,2008, 565-574.