



HAL
open science

Propriétés mécaniques et durabilité des bétons à base de graviers et sables recyclés issus de béton de démolition

Layachi Berredjem, Nourredine Arabi, Laurent Molez, Raoul Jauberthie

► To cite this version:

Layachi Berredjem, Nourredine Arabi, Laurent Molez, Raoul Jauberthie. Propriétés mécaniques et durabilité des bétons à base de graviers et sables recyclés issus de béton de démolition . Deuxième Conférence Internationale Francophone Nouveaux Matériaux et Durabilité (NoMad 2015) , Nov 2015, Douai, France. hal-01366521

HAL Id: hal-01366521

<https://hal.science/hal-01366521>

Submitted on 14 Sep 2016

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.

Douai, France
5-6 Novembre 2015

PROPRIETES MECANIQUES ET DURABILITE DES BETONS A BASE DES GRAVIERS ET SABLES RECYCLES ISSUE DE BETON DE DEMOLITION.

BERREDJEM Layachi^A, ARABI Nourredine^A, MOLEZ Laurent^B, JAUBERTHIE Raoul^B.

^A Laboratoire Matériaux Géomatériaux et Environnement, Université Badji Mokhtar-Annaba, BP 12 Annaba
23000, Algérie

^B Laboratoire Génie Civil et Génie Mécanique, INSA de Rennes, 20 Avenue des Buttes de Coësmes,
Rennes Cedex 7, France

RESUMÉ :

L'utilisation de granulats recyclés présente les nouvelles tendances dans la construction comme une alternative aux granulats naturels. Cependant, une absorption d'eau élevée et des propriétés mécaniques pas assez bonnes des granulats recyclés influencent par conséquent, la résistance et la durabilité du béton durci. Pour une tenue pérenne du béton, il est nécessaire d'avoir des exigences de perméabilité à l'eau, au gaz et une résistance à la diffusion d'ions.

Ce travail est une contribution expérimentale à l'étude de la durabilité des différentes compositions de bétons ordinaires (naturels/recyclés) avec différentes combinaisons granulaires (sable et gravier). Et, pour se faire réaliser des caractérisations physico-chimiques et mécaniques, des granulats en particulier les recyclés et des bétons ont été menées. Les essais ont été réalisées sur une formulation de béton type : un dosage en ciment constant $C=400\text{kg/m}^3$, une même maniabilité du béton frais ($A_{ff}=70\pm 20\text{mm}$) et une classe de béton cible C25/30. La procédure expérimentale consiste à comparer les résistances mécaniques à long terme, des bétons conservés dans trois types de solutions (eau de robinet, Eau déminéralisée et eau très salée), ainsi que les indicateurs de durabilité les plus déterminants pour ces bétons à savoir : la porosité, la perméabilité et la lixiviation au nitrate d'ammonium avec deux concentrations (faible et forte).

Les propriétés physico-mécaniques et chimiques des granulats recyclés (GR) sont inférieures à celles des granulats naturels (GN). Cette étude comparative entre les différents bétons à base des granulats recyclés "issus de béton de démolition" et naturels, montre globalement que ces recyclés possèdent des caractéristiques acceptables vis-à-vis de la durabilité, dont la valorisation des granulats recyclés pour la fabrication des bétons semble une voie prometteuse.

MOTS CLES : granulats recyclés, porosité, lixiviation, durabilité.

1. INTRODUCTION :

L'industrie de la construction est le secteur moteur de développement économique. En termes environnementaux, le secteur du bâtiment est classé en troisième position en tant que consommateur d'énergie, et de ce fait il est un grand émetteur des gaz à effet de serre (CO₂) et un des générateurs de déchets solides (Pedro et al., 2014).

Le recyclage des bétons dans le circuit de la construction constitue aujourd'hui les nouvelles opportunités d'approvisionnement en ressources granulaires. Dans les dernières années, les propriétés des granulats recyclés de béton (GR) et les effets de leur incorporation dans le béton ont attiré l'attention de divers chercheurs (Hussainet al., 2003 ; Tabsh et Abdelfatah, 2009 ; Pedro et al., 2014). Malgré les avantages évidents pour l'environnement, ce matériau possède des propriétés distinctes de celles de granulats naturels (GN) qui ont entravé leur utilisation fréquente.

La principale différence entre granulats naturels et celui recyclé est la pâte cimentaire rattachée à la surface de ce dernier, qui est l'une des principales raisons de perte des qualités des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels (Pedro et al. 2014).

En Algérie, au cours de ces dernières années, la demande en granulats est de plus en plus accrue pour répondre aux besoins des grands chantiers mis en œuvre (Arabi et Berredjem, 2011 ; Kenai et Debied, 2011). Avec l'interdiction d'extraction des matériaux alluvionnaires, l'épuisement de certains gisements naturels de granulats, les difficultés de mise en place de nouvelles exploitations de carrières imposent de rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement en granulats. Cependant, l'irrégularité des caractéristiques intrinsèques, les propriétés physico-mécaniques faibles des granulats recyclés et l'absence de normes en vigueur freinent leur vulgarisation comme matériaux de base dans la formulation des bétons.

Dans un béton recyclé comme dans un béton ordinaire, les agressions chimiques se portent principalement sur la pâte de ciment donnant ainsi les mêmes réactions chimiques avec les mêmes mécanismes d'agressions. Mais ces agressions sont d'autant plus graves que le béton est poreux et s'il contient de l'eau libre (Hussainet et al., 2003).

La durabilité d'une structure est en partie liée à la résistance qu'offrent les matériaux poreux constitutifs à la pénétration des agents agressifs. Si la porosité est le paramètre principal de cette résistance, deux autres grandeurs physiques sont importantes : la perméabilité et la diffusivité hydrique. Celles-ci se caractérisent par l'aptitude des bétons à véhiculer un fluide (en phases liquide et/ou vapeur). Ces deux paramètres sont considérés comme des indicateurs principaux de durabilité. Ils dépendent fortement du réseau poreux, de sa connectivité et de la teneur en eau du matériau (Picandet V., 2001).

Les granulats recyclés se caractérisent par une plus faible densité, une absorption d'eau beaucoup plus élevée et des résistances mécaniques inférieures à celle des granulats naturels (Pedro et al. 2014 ; Arabi et Berredjem, 2011). Ceci est expliqué par la porosité élevée de la pâte cimentaire (Ravindrarajah R.S. et al., 2001) qui influence les propriétés des bétons à base des recyclés à l'état frais et durci.

De nombreux auteurs ont conclu que la substitution des granulats naturels par les recyclés dans le béton, nécessite une augmentation de la quantité d'eau de gâchage supplémentaire pour pallier aux difficultés d'écoulement du béton frais et par conséquent ceci provoque des pertes de résistances à la compression, à la flexion ainsi que le module d'élasticité (Arabi et Berredjem, 2011, Mefteh et al., 2013 ; Pedro et al., 2014 ; Manuel et al., 2014). La littérature consultée pour cette thématique montre que les propriétés de durabilité ne sont aussi assez bonnes. Celle-là conclut que l'utilisation des taux de granulats recyclés élevés provoque une dégradation significative de certaines propriétés telles que les résistances à la pénétration de l'eau sous pression et la pénétration des ions chlorure. Il a été également constaté des valeurs plus élevées de retrait (Mas et al., 2012 ; Manuel et al., 2014).

L'absorption d'eau par immersion augmente avec l'augmentation du taux de substitution des granulats naturels par ceux recyclés dans le béton (Amorimet al. 2012). La pré-saturation "pré-mouillage" des granulats recyclés est légèrement préjudiciable à la tenue mécanique du béton et en particulier le rendement de la durabilité, par comparaison avec le procédé de compensation de l'eau de gâchage (Mefteh et al., 2013 ; Pedro et al., 2014).

Peu d'études se sont intéressées à l'étude des indicateurs de durabilité concernant des bétons formulés avec une intégration totale des granulats recyclés (sable et graviers) (Corinaldesi et al., 2009). L'étude de la durabilité des bétons à base de granulats recyclés s'avère donc une étape indispensable afin de leur

attribuer un domaine d'utilisation. L'objectif de ce travail est une contribution expérimentale à l'étude de la durabilité des différentes compositions de bétons ordinaires sans adjuvants, à base des granulats naturels et recyclés avec différentes combinaisons granulaires (sable et gravier). Des tests de caractérisation physico-chimiques et mécaniques des granulats en particulier les recyclés ont été effectués pour la mise en conformité avec les normes. L'étude des indicateurs de durabilité est réalisée sur des bétons de classe cible C25/30 en prenant en considération le même type et dosage du ciment et la même classe de consistance S2. La procédure expérimentale consiste à comparer les résistances mécaniques à long terme, des bétons conservés dans trois types de solutions (eau de robinet, eau déminéralisée et eau très salée), ainsi que les indicateurs de durabilité les plus déterminants pour ces bétons à savoir : la porosité, la perméabilité et la lixiviation au nitrate d'ammonium avec deux concentrations (faible et forte).

2. Matériaux et Procédures expérimentales :

2.1. Matériaux utilisés :

Les matériaux utilisés dans ce travail sont des matériaux locaux :

- Le ciment utilisé est de classe CEMII/B 42,5 produit par la cimenterie de Hadjar-Essoud (Algérie) conforme à la norme EN 197-1 ;
- Les granulats utilisés sont de deux types :
 - ✓ Granulats naturels : gravier naturel concassé (GN) et Sable naturel concassé (SN), "granulats de carrière", provenant d'une roche naturelle calcaire ;
 - ✓ Granulats recyclés : gravier recyclés (GR) et sable recyclé (SR), fabriqués au niveau du laboratoire, ils sont obtenus après concassage dans un concasseur à mâchoire de blocs d'un vieux béton de structure.
- ✓ L'eau de gâchage utilisée est l'eau de robinet exempte d'impuretés ;

On a choisi de concevoir trois classes granulaires 0/3,15 ; 3,15/8 et 8/16, Celles-ci permettent d'avoir des bétons ternaires avec un étendu granulaire meilleur et une formulation adaptée aux exigences voulues "Consistance et Résistance" ainsi un gravier recyclé avec un minimum de pâte cimentaire rattachée aux granulats (Sánchez et al., 2004 ; Ravindrarajah et al., 2001). Les analyses granulométriques des granulats réalisées selon la norme NF EN 933-1, elles sont représentées dans la figure 1.

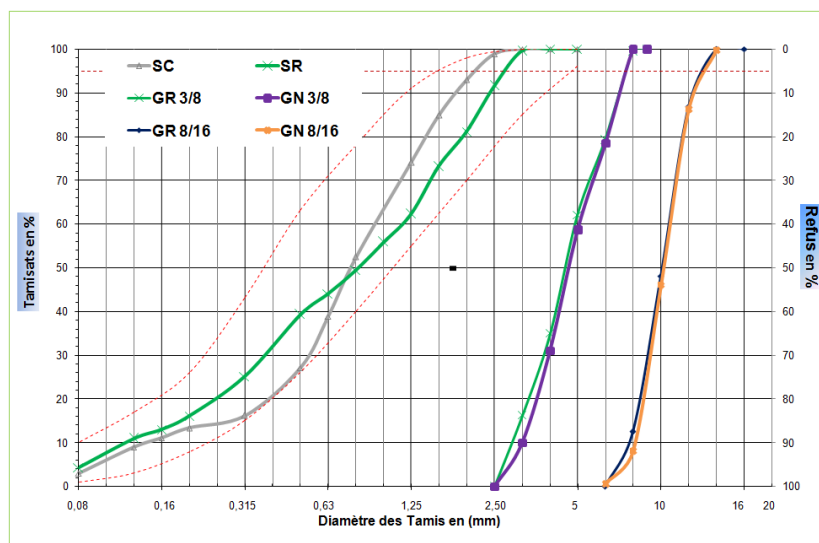


Figure 1 : Analyses granulométriques des granulats utilisés

2.2. Méthodes et formulation :

La formulation des bétons ordinaires est basée sur la méthode de composition de Dreux-Gorisse (Dreux G. et Festa J., 1998), en prenant comme données de base :

- Une classe de béton cible de résistance C25/30 et de classe d'environnement EA2 ;
- Un dosage en ciment constant pour tous les mélanges, 400 kg pour 1m³ de béton ;
- Une même consistance plastique (classe S2), essai réalisé au cône d'Abrams, NF EN 12350-2 ;
- Un même squelette granulaire de compacité constante ($c = 0,790$) ;

Pour les besoins de l'étude, un béton témoin naturel (BT) est fabriqué à base de granulats naturels, gravier et sable concassé (GN et SC). Seuls les graviers recyclés (GR) ont subi un pré-mouillage pendant 24 h avant gâchage pour s'affranchir d'une probable absorption par les granulats recyclés de l'eau de gâchage (Arabi et Berredjem, 2011; Hussain H. et Levacher D., 2003 ; Mefteh et al., 2013). Ils sont introduits dans le malaxeur à l'état saturé à surface sèche (SSS) et les autres granulats sont utilisés à l'état naturel.

L'étude porte sur cinq bétons ordinaires de compositions différentes (naturels/recyclés), avec différentes combinaisons granulaires (sable et gravier), Tableau 1.

Composants		M _{v,abs} kg/m ³	Unité	Types du Béton				
				BT (BNN)	B2 (BNR)	B3 (BRN)	B4 (BRR)	B5 (BNRN)
CEM II/B 42,5		3,10	kg/m ³	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Sable Concassé (SN)		2,50		578,35	--	578,35	--	578,35
Sable Recyclé (SR)		2,40		--	571,08	--	571,08	--
Gravier Naturel 3/8 (GN1)		2,54		184,67	167,89	--	--	138,51
Gravier Naturel 8/16 (GN2)		2,60		928,00	928,00	--	--	696,00
Gravier Recyclé 3/8 (GR1)		2,42		--	--	175,95	159,95	43,99
Gravier Recyclé 8/16 (GR2)		2,45		--	--	874,46	874,46	218,62
Gravier/Sable (G/S)		-		1,92	1,92	1,82	1,81	1,90
Eau	Calculée	01	L	186,82	186,82	186,82	194,13	186,82
	Ajoutée			64,26	69,78	73,03	79,01	35,25
	Totale			251,08	256,60	259,85	273,14	222,07
E/C		-	0,63	0,64	0,65	0,68	0,56	
Affaissement		-	cm	6,50	7,50	7,00	7,00	6,00
Masse volumique	Réelle	-	kg/m ³	2320,83	2270,39	2276,71	2207,07	2299,65
	Calculée	-		2342,10	2323,56	2288,61	2278,63	2297,53

Tableau 1 : Compositions des bétons formulés

3. Méthodes expérimentales :

3.1. Les essais réalisés :

Les essais réalisés sur les bétons d'étude sont : l'absorption capillaire, la porosité accessible à l'eau, la perméabilité au gaz et la lixiviation au nitrate d'ammonium avec deux concentrations 1,5 Mol/L et 06 Mol/L.

3.2. Mesure de l'absorption d'eau par capillarité :

L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs, la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité) (Assié S., 2004). Les échantillons utilisés sont des carottes (\varnothing 40 mm, $h = 60 \pm 01$ mm) prélevées sur des éprouvettes prismatiques $70 \times 70 \times 280 \pm 01$ mm, puis séchées jusqu'à une masse constante dans une étuve à $80 \pm 2^\circ\text{C}$. Elles sont ensuite immergées dans une nappe d'eau de hauteur 3mm durant 24 h. Les

mesures de masse et pénétration d'eau sont prises à des intervalles : 15, 30, 60, 120, 240, 360, 480 et 1440 min.

3.3. Porosité accessible à l'eau (Peau) :

Les mesures de porosité accessible à l'eau ont été réalisées conformément à la norme NF EN 18-459 et selon la méthode LCPC n° 58 (Levy et al., 2004) qui préconise d'abord une saturation sous vide des échantillons pendant 4h à l'aide d'un dessiccateur avec une pompe suivie par l'introduction progressive du liquide d'imprégnation "de l'eau" jusqu'à l'émersion totale des éprouvettes et de maintenir cette pression réduite pendant 24h. Après les pesées sont mesurées hydrostatiquement (M_{eau}) et à l'air libre (M_{SSS}) "masse saturée à surfaces sèches", avec une précision de 0,01 % puis les échantillons sont séchées (M_s) dans d'une étuve ventilée maintenue à une température $T = 105 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à stabilisation de la masse ($M_2 - M_1 \leq 0,05\%$). Chaque essai a été réalisé sur deux prélèvements 50 mm d'épaisseur découpé au centre d'éprouvettes cylindrique 110x220mm. La porosité est calculée selon la formule suivante :

$$P = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_{SSS} - M_{eau}} \times 100 \quad [1]$$

Avec: M_{SSS} est la masse saturée à surfaces sèches, M_s la masse sèche et M_{eau} la masse dans l'eau.

3.4. Essai de perméabilité au gaz d'Hélium :

La perméabilité et la diffusivité hydrique sont les principaux paramètres caractérisant l'aptitude des bétons à véhiculer un fluide en phases liquide et/ou vapeur. Ces deux paramètres dépendent fortement du réseau poreux, de sa connectivité et de la teneur en eau du matériau (Vincent P., 2001). La mesure de la perméabilité aux gaz permet de quantifier de façon plus réaliste l'aptitude d'un béton après sa dessiccation à se laisser traverser par un fluide sous gradient de pression totale. Le principe de la mesure de la perméabilité apparente est de maintenir une différence de pression constante du gaz, entre les deux extrémités de l'échantillon et de mesurer le débit résultant lorsque le régime est établi.

Les échantillons utilisés sont des carottes ($\varnothing 40$, $h = 60 \pm 01$ mm) prélevées des éprouvettes prismatiques 70x70x280mm séchées à une température $105 \pm 05^\circ\text{C}$ dans une étuve ventilée jusqu'à une masse constante puis conservées dans une enceinte étanche. La perméabilité a été mesurée à l'aide d'un perméamètre à charge constante de type CEMBUREAU (Arliquie G. et Hornain H., 2007) avec des pressions de percolation $P_1 = 2 \text{ bars}$ et de confinement $P_c = 5 \text{ bars}$.

3.5. Essai de lixiviation au nitrate d'ammonium :

Dans le béton, la quantité de portlandite est un indicateur de durabilité important vis-à-vis de la protection des armatures. Elle a un double rôle : l'un est préjudiciable puisque elle est très sensible aux agressions chimiques, en particulier aux attaques acides qui provoquent une lixiviation à cause de sa forte solubilité et l'autre un rôle rempart puisqu'il est capable de tamponner la solution interstitielle à un pH de 12,5 jusqu'à dissolution complète. La réserve basique que constituent les cristaux de portlandite est donc primordiale pour assurer et maintenir la passivation des armatures au cours du temps.

Les échantillons utilisés sont des carottes ($\varnothing 40$, $h = 60 \pm 01$ mm), elles sont mis dans un bain en solution de nitrate d'ammonium [NH_4NO_3] pendant 14 jours, avec deux concentrations 1,5 mol/L et 6 mol/L, surélevées sur un lit de billes plastiques avec une agitation manuelle et sans renouvellement de solution.

4. Résultats et discussions :

4.1. Béton frais :

L'absorption d'eau élevée des granulats recyclés (GR et SR) affecte le comportement rhéologique du béton frais. Cette absorption est constatée dans les compositions à base de ces granulats (Arabi et Berredjem, 2011). Pour s'affranchir de celle-là, une quantité d'eau supplémentaire est indispensable pour conserver une ouvrabilité plastique similaire. L'absorption est la conséquence de la présence d'une structure alvéolaire de l'ancien mortier collé aux granulats recyclés. A l'état frais, le béton recyclé présente des densités plus faibles en comparaison à celle du béton de référence qui est due principalement aux caractéristiques intrinsèques des granulats recyclés. De nombreuses études ont confirmé ces résultats (Marta Sánchez de J. et Gutiérrez P. A., 2009 ; Arabi et Berredjem, 2011 et Kenai S., Debieb F., 2011).

4.2. Béton durci

4.2.1. Résistances mécaniques :

Le démoulage des éprouvettes est effectué après 24h et puis elles sont conservées sous l'eau de robinet pendant 28 jours, date de référence de comparaison des résistances mécaniques. Les éprouvettes sont plongées dans trois différentes solutions (eau de robinet, eau déminéralisée et eau trop salée (5 Mol/L)) pendant une année de conservation. La figure 2 montre que la résistance en compression des bétons recyclés est inférieure à celle du béton naturel, elle dépend fortement des performances mécaniques des granulats (Neville A.M., 2000). La baisse de résistance est de l'ordre de 6,5% pour le béton B3 et de 12 % pour le béton B4 constitué de granulats recyclés.

L'évolution de la résistance au cours du temps des bétons dans les solutions n'est pas homogène. Après une année de conservation les bétons naturels dépassent la valeur de 50 MPa (résistance en compression), tandis que le béton B5, composé de 75 % de granulats naturels et 25% de granulats recyclés présente une meilleure résistance que le béton témoin dans les eaux potable et salée.

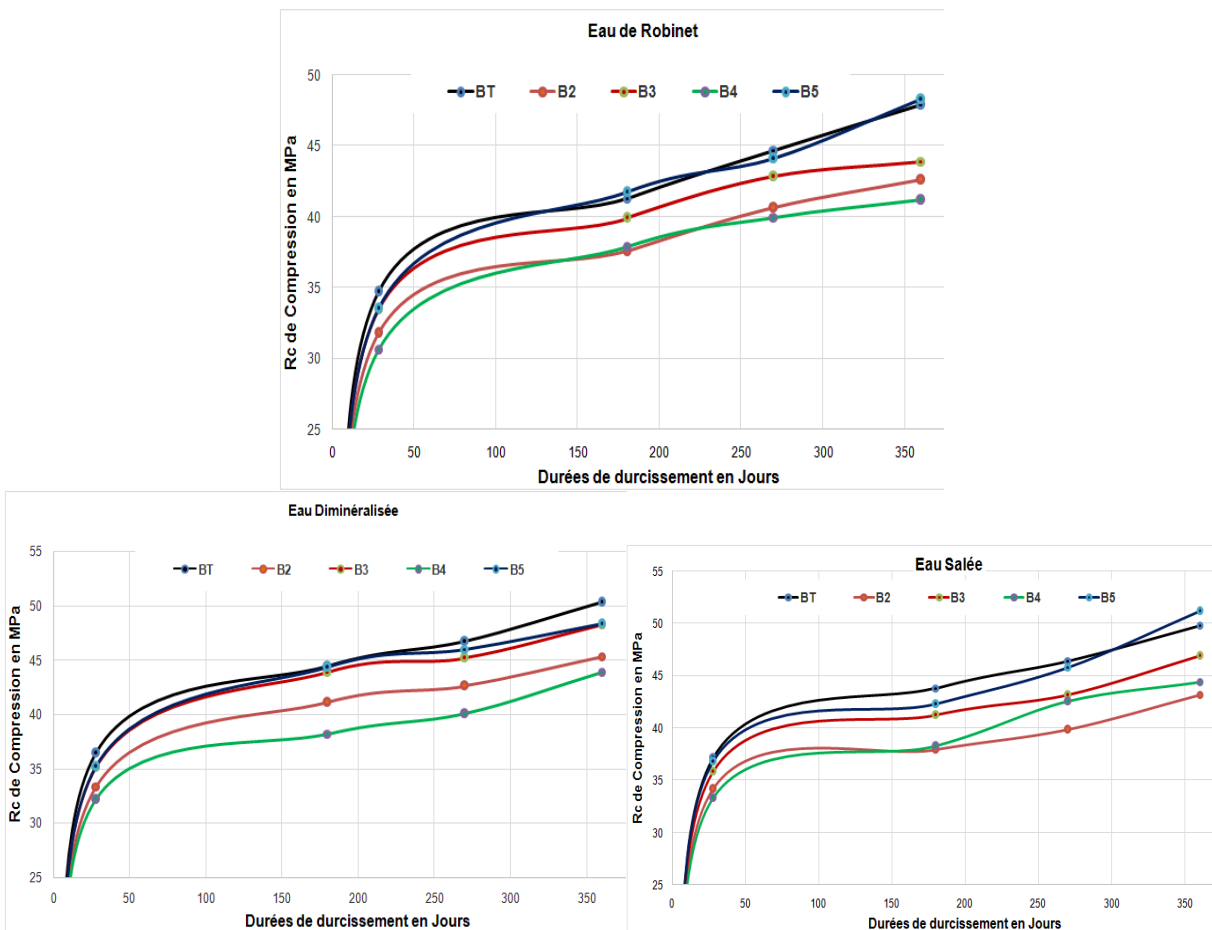


Figure2: Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps dans différentes solutions

4.2.2. Essai d'absorption d'eau par capillarité :

On constate sur la figure 3, que l'absorption d'eau par capillarité de tous les bétons est similaire. La cinétique de variation des masses, dès la première heure de l'essai, est importante ; en particulier pour les bétons à base de sable recyclé, les bétons B2 et B4, et qui reste remarquable jusqu'à 24h. Cela est dû à la qualité du sable recyclé, qui contient de la pâte cimentaire poreuse et qui renferme une partie importante de fines formées suite à l'utilisation du concasseur à mâchoires (Quebaud M., 1996). L'absorption pour le béton témoin BT est identique à celle du béton B5. Cependant, dans les dernières heures l'absorption d'eau par capillarité tend à s'accroître légèrement pour le béton B5 qui contient 25 % de granulats recyclés.

Les valeurs maximales d'absorptions d'eau par capillarité sont constatées pour le béton B3 à base de gravier recyclé et sable naturel concassé, probablement dû au pourcentage important des fines dans ce sable.

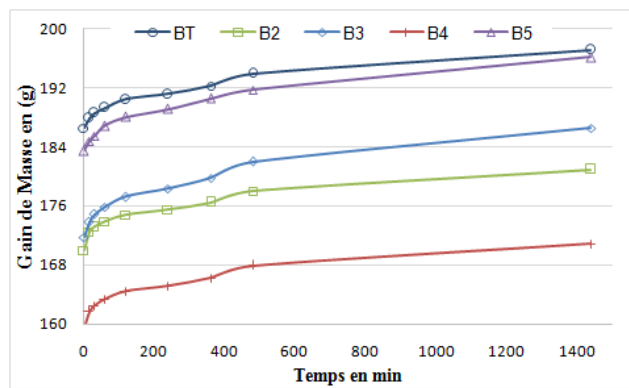


Figure3: L'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps

4.2.3. Porosité accessible à l'eau

Les propriétés de durabilité des bétons sont étroitement liées à la structure poreuse du matériau, la porosité est donc considérée comme un indicateur de durabilité. Les valeurs des porosités accessibles à l'eau des bétons à 90 jours d'âge sont présentées dans la figure 5.

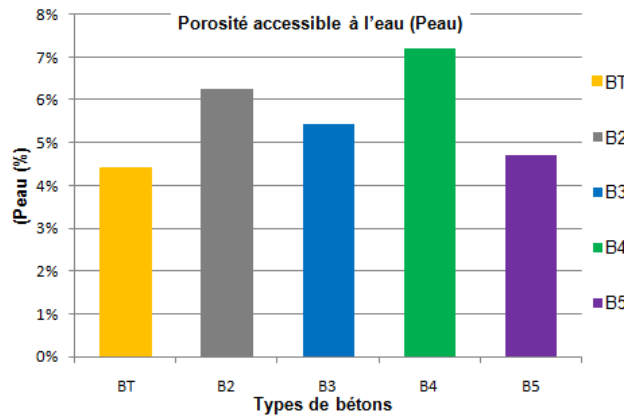


Figure4 : la Porosité accessible à l'eau des bétons formulés

Les résultats obtenus (figure 4) montrent que la porosité accessible à l'eau augmente avec l'augmentation de substitution en granulats recyclés, néanmoins, avec le sable recyclé, le béton B4 et le béton B2 avec une porosité accessible à l'eau de 164 % et 142 % respectivement. Elle est liée directement à la porosité des granulats et au rapport E/C qui est élevé pour les bétons recyclés.

Il est à remarquer, par ailleurs que les valeurs de la porosité des bétons demeurent remarquablement supérieures à celles du béton témoin qui a une porosité accessible à l'eau égale à 4,42 % et pour le béton B5 cette porosité est de 4,72 %.

4.2.4. Perméabilité apparente aux gaz (Kgaz)

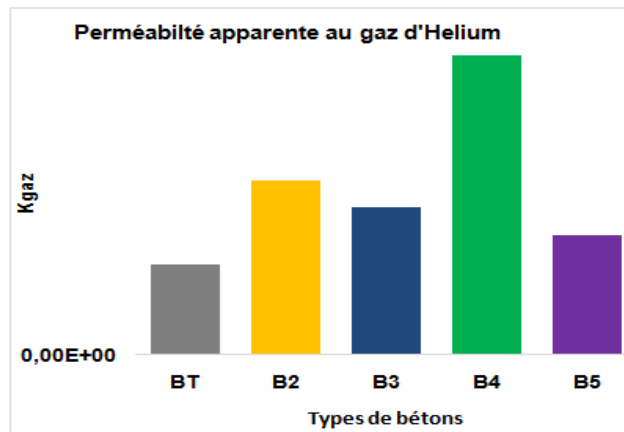


Figure5: La perméabilité apparente au gaz (Kgaz) des différents bétons

On constate d'après la figure 5 que la perméabilité apparente des bétons recyclés est très importante par rapport aux autres bétons particulièrement pour le béton B4 à base de 100 % de granulats recyclés. Ceci est attribué à la présence d'une quantité de pâte cimentaire rattachée aux granulats recyclés assez importante. Puisque les résistances mécaniques en compression à 28 jours des bétons d'étude, et qui sont de 31 MPa pour le B4 et de 40 MPa pour le B5, sont supérieures à 25 MPa (la résistance cible) et que le coefficient apparent de perméabilité $K_{gaz} > 10^{-15} m^2$; ces bétons sont classés comme bétons peu poreux.

4.2.5. Lixiviation au nitrate d'ammonium :

Les dégradations des bétons constatées visuellement sont analogues, la dégradation est homogène sur toutes les faces de l'échantillon, sauf sur la face de pose, la dégradation est moindre car la solution est restée sans renouvellement et avec une agitation faible (manuelle).

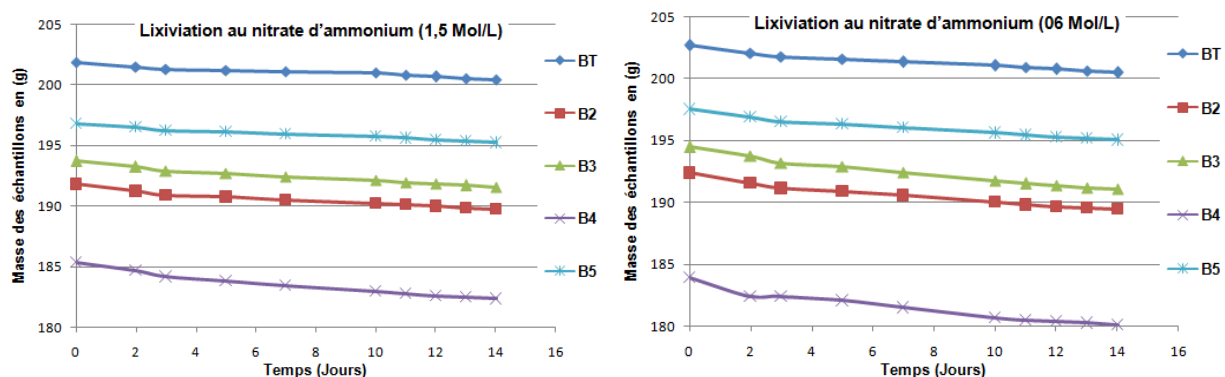


Figure6 : Comparaison entre les pertes de masses des bétons en fonction du temps pour les deux concentrations d'acides

Selon la figure 6, on constate que la cinétique de dégradation des bétons est importante dans la solution à forte concentration d'acide (6Mol/L de NH_4NO_3), en particulier durant les premières 48h, elle très remarquable pour le béton B4. Elle reste rapide jusqu'à 14 jours. Alors pour la solution de faible concentration d'acide la lixiviation est analogue pour tous les bétons. Les lixiviations maximales sont prélevées pour les bétons à base des granulats recyclés pour les deux concentrations d'acide, en particulier le B4 avec un pourcentage de 2,08 % et 1,52 % pour le béton B2, cela est dû à la porosité des granulats d'une part et la teneur en portlandite d'autre part, alors que les bétons à base des graviers naturels BT et B5 montrent une résistance importante aux attaques des acides figure 7.



Figure 7 :Photos montrant l'attaque du nitrate d'ammonium (1,5 Mol/L) sur les bétons après 14 jours.

5. Conclusion :

Il ressort de cette étude que les performances mécaniques sont généralement satisfaisantes pour tous les bétons recyclés. Cependant, l'incorporation du sable recyclé dans le béton fait augmenter sa porosité et sa vulnérabilité aux agents agressives, suite à la présence de la pâte cimentaire importante, caractérisée par une forte porosité.

La substitution des graviers naturels par les recyclés à un pourcentage de 25 % n'a pas influencé les propriétés principales de béton, mécanique ou de durabilité, ce pourcentage peut atteindre 40 % trouvé par d'autre chercheurs (Hussain et a. 2003, Meftah et al. 2013).

Cette étude comparative entre les bétons naturels et les granulats recyclés a mis en évidence que ces derniers possèdent des caractéristiques acceptables en termes de résistance et de durabilité, et la valorisation des granulats recyclés, en particulier les graviers, pour la fabrication des bétons semble une voie prometteuse. Cependant, l'utilisation des granulats recyclés dans le béton armé en présence d'un environnement agressif est fortement déconseillée, d'autant plus que leur coefficient d'absorption est élevé.

6. Remerciements :

Les auteurs de l'article remercient vivement tout le personnel du département de génie civil de l'INSA de Rennes et du laboratoire LGCGM pour l'aide précieuse apportée pour la réalisation de ce travail.

7. Références :

- Amorim P., de Brito J. et Evangelista L. (2012), Concrete made with coarse concrete aggregate: influence of curing on durability, *Materials Journal*, 109 (02): 195–204;
- Arabi N. & Berredjem L. (2011), Valorisation des déchets de démolition comme granulats pour bétons, *déchets - revue francophone d'écologie industrielle*, 60: 25-30;
- Arliguie G. et Hornain H. (2007), *GranDuBé : Grandeurs associées à la Durabilité des Bétons*, Paris, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées;
- Assié Stéphan (2004), *Durabilité des bétons autoplaçants*, Thèse de Doctorat INSA de Toulouse, France;
- Corinaldesi V., Moriconi G. (2009), Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 23(8): 2869–2876;

- De Juan, Marta Sanchez, and Pilar Alaejos Gutiérrez, (2009), Study on the Influence of Attached Morter Content on the Properties of Recycled Concrete Aggregate, *Construction and building Materials*, 23(2): 872-877;
- Dreux G. et Festa J. (1998), *Nouveau Guide du Béton*, 8^{ème} édition, Paris, Edition Eyrolles, France;
- Hussain H. & Levacher D.(2003), Recyclage de béton de démolition dans la fabrication des nouveaux bétons, *XXI^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Université la rochelle, France;
- Kebaili O., Mouret M., Arabi N. and Cassagnabere F., (2015), "Adverse Effect of the Mass Substitution of Naturel Aggregates by Air-Dried Recycled Concrete Aggregates on the Self-Compacting Ability of Concrete: Evidence and Analysis through en Example", *Journal of Cleaner Production*, 87: 752-761;
- Kenai S., Debieb F. (2011), Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassé, *Materials and Structures*, 44: 815–824 ;
- Levy S. M. et Helene P. (2004), Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development, *Cement and Concrete Research*, 34(18): 1975–1980;
- Manuel G. Beltrán, Francisco A., Auxi B., Jesús A. and Antonio R. (2014), Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates, *construction and building Materiels*, 72: 231-238;
- Marta Sánchez de J. et Gutiérrez P. A. (2009), Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, 23: 872-877;
- Mas B, Cladera A, Del Olmo T, Pitarch F. (2012), Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use, *Construction and Building Materiels*, 27:612–622;
- Mefteh H., Kebaili O., Oucief H., Berredjem L. et Arabi N. (2013), Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete, *Cleaner Production*, 54:282-288;
- Neville A.M. (2000), *Les propriétés du béton*, Paris, Edition Eyrolles;
- Pedro D., de Brito J. et Evangelista L. (2014), Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structurel concrete, *construction and building Materiels*, 71: 141-151;
- Quebaud M. (1996), *Caractérisation des granulats recyclés: Étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats*, Thèse de doctorat, Université d'Artois;
- Ravindrarajah R.S., Steward M. & Greco D. (2001), Variability of Recycled Concrete Aggregate and its Effects on Concrete Properties, *2nd International Conference on Engineering Materials*, San Jose, USA;
- Sánchez de Juan M.et P. Alaejos Gutierrez (2004), Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *RILEM, Actes du colloque Use of Recycled Materials in Building and Structures*, Barcelone, Espagne ;
- Tabsh SW, Abdelfatah A. (2009), Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and building Materials*, 23: 1163–1167;
- Vincent Picandet (2001), *Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydrique des bétons*, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France.