
Contribution à l'étude des indicateurs de durabilité des bétons à base des granulats recyclés

BERREDJEM Layachi¹, ARABI Nourredine², MOLEZ Laurent³

¹ Doctorant, Lab. M.G.E., Département de Génie Civil, U. B. M. - Annaba, BP N° 12 Sidi Ammar - Annaba - 23000 - Algérie; berredjem2423@gmail.com;

² Professeur, Lab. M.G.E., Département de Génie Civil, U. B. M. - Annaba, BP N° 12 Sidi Ammar - Annaba - 23000 - Algérie; nourredine.arabi@univ-annaba.dz ;

³ M. C, Lab. GCGM – EA 3913, INSA de Rennes, 20 Avenue des Buttes de Coësmes, Rennes Cedex 7 - 35708 - France; Laurent.Molez@insa-rennes.fr.

RÉSUMÉ. 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). Après identification et caractérisation physico-chimiques et mécaniques des granulats en particulier les recyclés, on a réalisé des essais de durabilité sur des bétons 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 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.

L'étude comparative entre les différentes compositions de bétons recyclés a montré des propriétés physiques et mécaniques acceptables vis-à-vis de la résistance mécanique et de la durabilité. Les granulats recyclés peuvent constituer un matériau de substitution à des granulats naturels.

ABSTRACT: This work is an experimental contribution to the study of the sustainability of various compositions of ordinary concrete without additives, made of natural and recycled aggregates with different combinations granular (sand and gravel). After identification and physico-chemical and mechanical characterization of the recycled aggregates in particular, durability tests were carried out on concrete target class C25/30, taking into account the same type and dosage of the cement and the same consistency class S2. The experimental procedure is to compare the strengths and the most critical sustainability indicators for these concretes are: porosity, permeability and leaching of ammonium nitrate.

The comparative study between different recycled concrete compositions showed acceptable physical and mechanical properties vis-à-vis the strength and durability. Recycled aggregates can be a substitute material for natural aggregates.

MOTS-CLÉS : granulats recyclés, porosité, lixiviation, durabilité, résistance mécaniques.

KEY WORDS: recycled aggregates, porosity, leaching, durability, mechanical strength.

1. Introduction

En développement durable, l'environnement est l'un des objectifs de sa réussite, par la diminution d'émissions des gaz à effet de serre, la réduction de la consommation énergétique, l'utilisation rationnelle des ressources naturelles et le recyclage des déchets [GAL 14]. Le recyclage des bétons peut s'intégrer dans ce concept. Les déchets de démolition et des chantiers génèrent des quantités importantes de déchets solides qui sont souvent entreposés dans des décharges sauvages. Leur valorisation dans le circuit de la construction constitue aujourd'hui les nouvelles opportunités d'approvisionnement en ressources granulaires comme une alternative aux granulats naturels qui ont tendance à un épuisement. En Algérie, 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 et la saturation des décharges publiques imposent de rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement en granulats pour béton afin de répondre aux besoins des grands chantiers mis en œuvre [ARA 11 et KEN 11]. Cependant, l'irrégularité des caractéristiques intrinsèques des granulats recyclés et l'absence de normes en vigueur freinent leur vulgarisation comme matériaux de base dans la formulation des bétons.

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 du matériau. Celles-ci sont considérées comme des indicateurs principaux de durabilité. Ils dépendent fortement du réseau poreux, de sa connectivité et de la teneur en eau du matériau [PIC 01].

L'absorption d'eau par immersion et la capillarité sont similaires, elles augmentent avec l'augmentation du taux de substitution des granulats naturels par ceux recyclés dans le béton [OLO 02 et AMO 12]. Le processus d'absorption d'eau d'un béton recyclé est analogue à celui d'un béton conventionnel et obéit aux mêmes lois. Toutefois, les bétons recyclés se caractérisent par une plus forte capacité d'absorption d'eau, menant à des difficultés de contrôle de la rhéologie du béton frais et par conséquent la résistance se trouve compromise [WIR 00, ZAH 04, ARA 11 et KEN 11]. Cela est dû à la présence de vieux mortier collé aux granulats [ARA 11 et MAR 09]. Dans la littérature très 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) [COR 09]. 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 et la porosité est la tare essentielle qui compromet la durabilité du béton.

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 et l'étude des indicateurs de durabilité sont réalisés 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 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.

2. Procédures expérimentales:

2.1. Matériaux utilisés :

- 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 ;
- L'eau de gâchage utilisée est l'eau de robinet exempte d'impuretés ;
- Les granulats utilisés sont des matériaux locaux :
 - ✓ Sable roulé (SD) « sable de dune » siliceux;
 - ✓ Granulats naturels concassé (GN), roche naturel calcaire;
 - ✗ Et, granulats recyclés (GR) fabriqués au niveau du laboratoire, ils sont obtenus après concassage dans un concasseur à mâchoire de blocs de vieux béton âgé plus de 30 ans.

Trois classes de fractions granulaires ont été choisies (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.

2.2. Méthodes et formulation :

La formulation des bétons ordinaires est basée sur la méthode de composition de Dreux-Gorisse [DRE 98], en prenant comme données de base :

- Une classe de béton cible de résistance C 25/30 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 ;
- Un même squelette granulaire de compacité constante ($c = 0,790$) ;

Pour les besoins de l'étude, un béton naturel (béton témoin BT) est fabriqué à base de 100% de granulats naturels, gravier concassé et sable roulé. Les graviers recyclés ont subi un pré-mouillage pendant 30 min avant gâchage pour s'affranchir d'une probable absorption par les granulats recyclés de l'eau de gâchage [ARA 11 et MEF 13]. Ils sont introduits dans le malaxeur à l'état saturé à surface sèche (SSS) et les naturels n'ont subi aucun pré-mouillage.

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

Tableau 1 : Compositions des mélanges granulaires

Types de bétons	Les sables		Les graviers			
	(SD) 0/0,315	(SR) 0/3,15	Naturels (GN)		Recyclés (GR)	
			GN1 (3,15/8)	GN2 (8/16)	GR1 (3,15/8)	GR2 (8/16)
B1	100 %		100 %	100 %		
B2		100 %	100 %	100 %		
B3	100 %				100 %	100 %
B4		100 %			100 %	100 %
B5	100 %		75 %	75 %	25 %	25 %

2.3. Préparation des éprouvettes :

Trois types d'éprouvettes ont été confectionnés pour chaque béton (voir Tableau 2). Après démoulage à 24 h ces éprouvettes sont conservées dans l'eau et à une température moyenne de 20°C.

Tableau 2 : les différents types d'éprouvettes correspondants aux essais réalisés

Cylindriques (Ø110x220 mm)	- La résistance à la traction par fendage à : 28, 90 et 180 jours	- En 12390-3
	- Porosité accessible à l'eau	- NF EN 18-459
Cubiques de 100 mm de côté	- Résistance à la compression à : 7, 14, 21, 28, 90, 180 et 270 jours	- En 12390-3
	- Essai de Perméabilité au gaz, carottes de : (Ø 40, h = 60 ± 01 mm)	- [ARL 07]
Prismatique (70x70x280 mm)	- Lixiviation au nitrate d'ammonium, Carottes de (Ø 40, h = 60 ± 01 mm)	-

2.4. Caractérisation des matériaux :

2.4.1. Les caractéristiques chimiques des matériaux :

Tableau 3 : Composition chimique du ciment CEM II/B 42,5 utilisé

Oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	SO ₃	P.A.F 975 °C
%	59,5	5,0	23,0	3,0	1,5	0,13	0,45	0,01	2,5	3,0

Tableau 4 : Compositions chimiques des graviers utilisés (réalisées par spectrométrie de fluorescence X)

Oxydes en %	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	SO ₃	PAF
G. Recyclé	44,63	26,34	1,01	4,96	0,23	2,36	0,035	0,028	0,6	1,20	0,027	0,06	18,6
G. Naturel	55,51	-	0,20	0,11	-	0,06	-	-	0,08	0,01	-	-	42,5

La composition chimique des granulats recyclés est analogue à celle du ciment, étant donné la présence de produits d'hydratation du ciment due à la présence de l'ancien mortier au sein des granulats. La proportion de chlorures présente au sein des granulats recyclés est inférieure à limite prescrite ($\leq 0,05\%$) [KEB 15], un excédent de chlorure peut accélérer les délais de prise du ciment. La probable altération de vieux béton par des impuretés peut restreindre l'utilisation des granulats recyclés. Le granulats naturel est de nature calcaire ce qui a donné des pertes au feu (PAF) assez importantes dues essentiellement à une décomposition du calcaire (CaCO₃) en oxyde CaO et CO₂ en PAF.

2.4.2. Les caractéristiques physiques :

Les caractéristiques physiques et mécaniques sont déterminées conformément aux normes en vigueur et les résultats d'essais sont présentés dans le tableau 5.

Tableau 5 : Les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats utilisés

	Les granulats	Les sables		Les graviers				Normes
		SD	SR	GN1	GN2	GR1	GR2	
	mm	0/3,15	0/3,15	3,15/8	8/16	3,15/8	8/16	
Les caractéristiques physiques								
Masse volumique apparente	kg/m ³	1,04		1,46	1,4	1,14	1,09	NF EN 1097-6
Masse volumique réelle	kg/m ³	2,56		2,66	2,54	2,28	1,98	NF EN 1097-6
Module de finesse	MF	1,83	2,08					NF EN 933-1
Coefficient d'aplatissement	A %			18,8		10,1		NF EN 933-3
Equivalent de sable	ES (%)	90,31	87,52					NF EN 933-8
Propreté superficielle	P %			4,3		7,2		NF EN-1097-2
Teneur en eau	W %	0,28	1,35	0,3	0,16	4,57	1,93	NF EN 1097-6
Absorption d'eau Abs	Abs %	1,91	9,7	4,3	2,4	6,8	5,3	NF EN 1097-6
Les caractéristiques mécaniques								
M.D.E				24,1		38,6		NF EN 1097-1
L.A.				31,4		39,52		NF EN 1097-2

On constate d'après le tableau 5 que tous les granulats sont propres et la présence du vieux mortier de ciment rattaché aux granulats recyclés affecte ces propriétés [AGR 11]. Les caractéristiques physiques et mécaniques de ces derniers sont sensiblement inférieures à celles des granulats naturels. Une absorption d'eau par les granulats recyclés assez conséquente est constatée, ce qui est due à la présence de l'ancien mortier qui poreux. La valeur de la résistance mécanique, évaluée à partir de l'essai Los Angeles, pour les granulats recyclés était au-dessous des limites indiquées par les normes les plus restrictives, c'est-à-dire 40 et 50 [PAC 13].

2.5. Les essais de durabilité:

Les indicateurs de durabilité des bétons concernés dans cette étude sont : l'absorption capillaire, la porosité accessible à l'eau, la perméabilité au gaz et la lixiviation au nitrate d'ammonium.

2.5.1. 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) [ASS 04]. Les échantillons utilisés sont des carottes (\varnothing 40 mm, h = 60±01 mm) prélevées sur des éprouvettes prismatiques 70x70x280 ± 01 mm, puis séchées jusqu'à une masse constante dans une étuve ventilée à 80±2°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. Le coefficient d'absorption capillaire est défini par la relation suivante [ARL 07] :

$$= \frac{m - m_0}{S \cdot h}$$

: Les masses de l'éprouvette initiale et à l'échéance donnée (kg) ; () : la section en (m²).

2.5.2. Essai de perméabilité au gaz d'Hélium :

Le principe de la mesure de la perméabilité apparente est de maintenir une différence de pression constante du gaz, d'Hélium, 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±01 mm) prélevées des éprouvettes prismatiques 70x70x280 mm séchées à 105°C et conservées dans une enceinte étanche. La perméabilité a été mesurée à l'aide d'un perméabilimètre à charge constante de type CEMBUREAU [ARL 07] avec des pressions de percolation = 5 et de confinement = 8.

2.5.3. 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 qui préconise d'abord une saturation sous vide des échantillons suivi par pesée hydrostatique puis un séchage à 105°C, et selon la méthode LCPC n° 58 [LEV 04]. Chaque essai a été réalisé sur deux prélèvements 50 mm d'épaisseur découpé au centre d'éprouvettes cylindrique 110x220 mm.

2.5.4. Essai de lixiviation au nitrate d'ammonium:

Les échantillons utilisés sont des carottes (\varnothing 40, h = 60 mm), elles sont mis dans un bain en solution de nitrate d'ammonium $[\text{NH}_4\text{NO}_3]$ de concentration 6 mol/L surélevées sur un lit de billes plastiques avec une agitation manuelle périodique et sans renouvellement de solution, les mesures sont prises à des échéances de 14 et 28 jours.

3. Résultats et discussions :

3.1. Béton frais :

L'absorption d'eau des granulats recyclés (GR et SR) est pratiquement inévitable et affecte le comportement rhéologique du béton frais. Cette absorption est constatée dans les compositions à base de ces granulats [ARA 11]. 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 ainsi les sables recyclés sont caractérisés par une structure anguleuse et, par conséquence, une surface spécifique plus développée.

À l'état frais, le béton recyclé présente des densités plus faibles en comparaison à celle du béton de référence qui est due principalement à la densité faible des granulats recyclés. De nombreuses études ont confirmé ces résultats [MAR 09, ARA 11 et KEN 11].

3.2. Béton durci

3.2.1. Les Résistances mécaniques :

D'après les figures 1 et 2, la résistance à la compression des bétons recyclés évolue au cours du temps d'une façon similaire que le béton témoin; cependant, elle chute en fonction du remplacement en granulats recyclés, sables B2 et gravier B3 et les deux en même temps B4. A 28 jours le béton B5, composé de 75 % de granulats naturels et 25% de granulats recyclés présente une meilleure résistance que ce soit en compression ou en traction par fendage. Pour le béton B4 constitué de granulats recyclés, la chute de résistance est de l'ordre de 23% par rapport au béton B5 et 16% par rapport au béton témoin B1. Ces résultats sont comparables à une moyenne de 10 à 30% trouvée par d'autres chercheurs [KEN 11, HUS 03]. La cinétique de la résistance des bétons à base des granulats recyclés est remarquable par rapport au béton témoin. Après 09 mois de conservation sous l'eau, la résistance du B5 est supérieure à celle du B4 de 10 MPa.

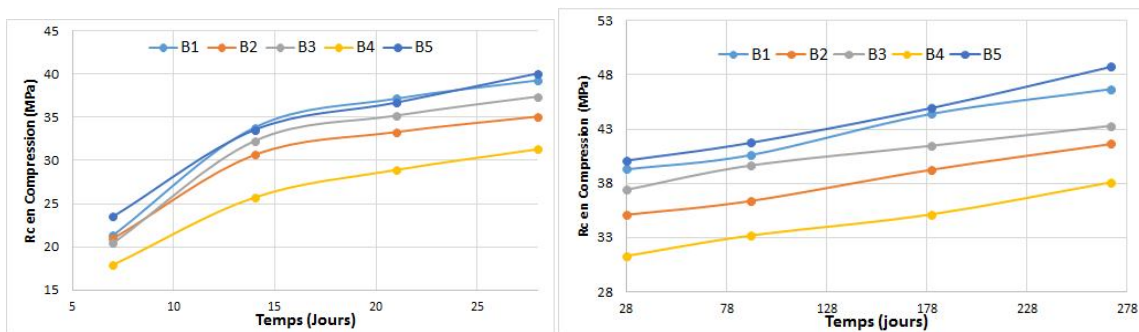


Figure 1: Evolution de la Résistance à la compression en fonction du temps

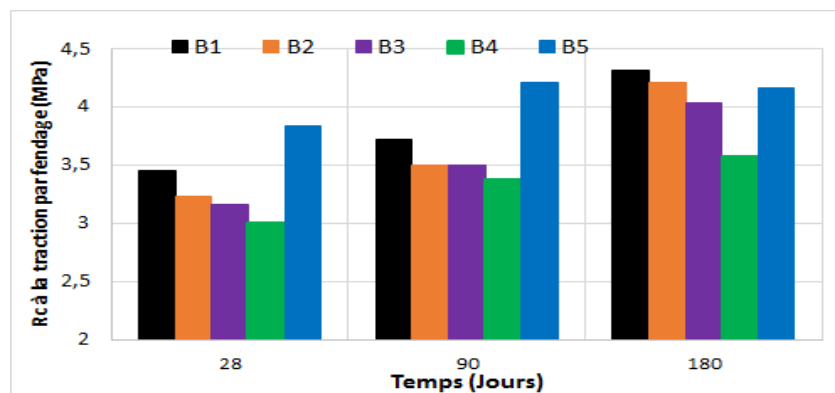


Figure 2: La Résistance à la traction par fendage en fonction du temps

3.2.2. Essai d'Absorption d'eau par capillarité :

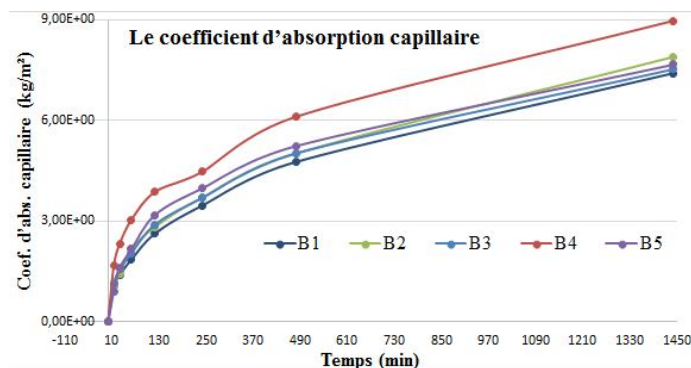


Figure 3: L'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps

On remarque dans la figure 3, que dès la première heure de l'essai, la cinétique d'absorption capillaire de tous les bétons augmente rapidement en particulier le béton B4 à base des granulats recyclés 100%. L'augmentation de l'absorption des bétons est similaire sauf pour les bétons à base de sable recyclé B2 et B4, qui est importante jusqu'à 24 h, cela est due à la porosité des granulats recyclés qui contiennent de la pâte cimentaire poreuse et surtout les sables recyclés qui renferment une partie importante de fines formée suite à l'utilisation du concasseur à mâchoires [QUE 96].

3.2.3. La Porosité accessible à l'eau (Peau):

D'après le tableau 6 les valeurs maximales des absorptions d'eau par capillarité sont constatées pour le béton B4 à base des granulats 100% recyclés et pour le béton B3 à base de gravier recyclé et sable de dune. Ce comportement est attendu à cause du comportement des granulats recyclés, qui présentent un pourcentage d'absorption d'eau plus élevé.

Tableau 6 : la Porosité accessible à l'eau des bétons formulés

Type de béton	Porosité accessible à l'eau (P _{eau})
B1 (BT)	5,31 %
B2	7,20 %
B3	7,11 %
B4	7,39 %
B5	6,25 %

3.2.4. Perméabilité apparente aux gaz (Kgaz)

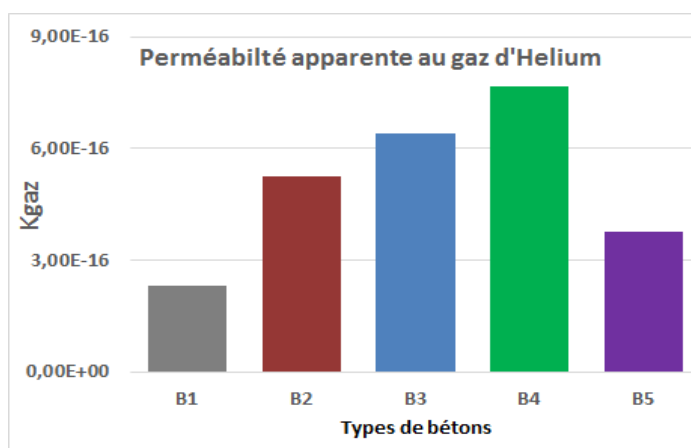


Figure 4: La perméabilité apparente au gaz (Kgaz) des différents bétons

On constate d'après la figure 4 que la perméabilité apparente du béton recyclé B4 est très importante par rapport aux autres bétons et elle diminue en fonction du remplacement des granulats naturels par les recyclés les graviers en premier lieu ensuite les sables.

3.2.5. Lixiviation au nitrate d'ammonium:

Tableau 7 : Profondeur de dégradation des bétons au Lixiviation au nitrate d'ammonium (6mol/L)

Type de béton	Profondeur de dégradation (mm)	
	à 14 j	à 28 j
B1 (BT)	5,42	10,15
B2	5,83	10,69
B3	5,91	10,33
B4	6,28	11,25
B5	5,46	9,94

Les dégradations des bétons constatées sont analogues (tableau 7) et la dégradation est homogène sur les faces de haut et latérale de l'échantillon, par contre sur la face base qui est la face de pose la dégradation est moindre car la solution est restée sans renouvellement et avec une agitation faible (manuelle). Les dégradations maximales sont prélevées pour le béton B4 à base des granulats recyclés alors que le béton à base des graviers naturels et sable recyclé B2 montre une résistance importante aux attaques des acides, cela est dû probablement à sa compacité.

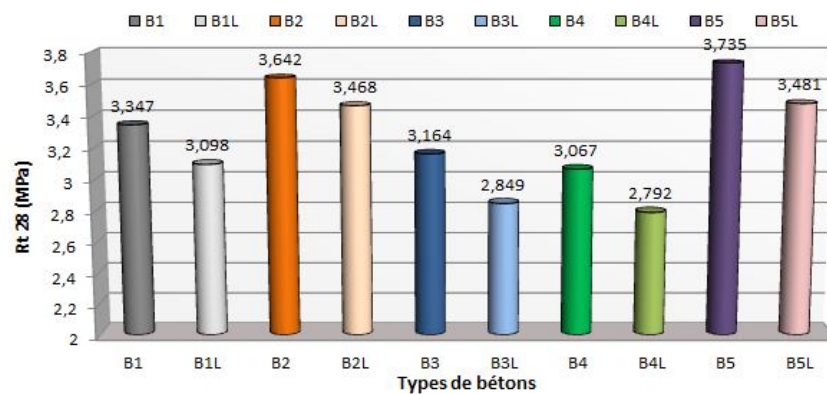


Figure 6 : Comparaison entre les résistances à la traction par fendage des bétons avant et après attaque de l'acide à 14 jours

La lixiviation semble être un phénomène diffusif. La figure 6 montre la diminution de la résistance à la traction après l'attaque de l'acide en fonction de la présence des granulats recyclés dans le béton. L'attaque de l'acide sur tous les bétons est remarquable et la dégradation maximale constatée de 9,96 % pour le béton B3 à base des graviers recyclés et sable naturel alors que le béton B2 donne une diminution de 4,78 % et qui a montré une résistance significative par rapport aux autres. D'une manière générale la lixiviation est analogue pour tous les bétons.

4. Conclusion :

Les bétons à base de granulats recyclés se caractérisent par une densité faible, une plus forte capacité d'absorption d'eau élevée et une forte porosité que le béton naturel. Cela est dû sans doute à la proportion en volume importante des pores capillaires [KEN 11]. Les valeurs élevées d'absorption d'eau du béton à base de granulats recyclés sont une indication propre de la porosité et de la perméabilité élevées de ce type de béton. L'influence de l'absorption capillaire sur la dégradation au nitrate d'ammonium ne semble pas prépondérante.

La résistance mécanique d'un béton est fondamentalement liée aux performances mécaniques des granulats [NEV 00] dont les propriétés mécaniques des bétons à base des granulats recyclés sont inférieures à celles des bétons à base des granulats naturels mais avec une différence non significative, seulement 4 MPa enregistrée à 28 jours et jusqu'à 10 MPa à l'âge de 06 mois. L'humidification préalable des graviers recyclés assure une plasticité permettant une mise en œuvre adéquate. La substitution des graviers naturels de 25% par des graviers recyclés dans la composition du béton n'a pas influencée ces caractéristiques et le taux de substitution peut atteindre 40% [MEF 13].

D'une manière générale, 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 durabilité.

Remerciements :

Les auteurs de l'article remercient vivement tout le personnel du laboratoire LGCGM de l'INSA de Rennes pour l'aide apportée à la réalisation des essais de durabilité.

5. Bibliographie:

- [AGR 11] AGRELA, F., SANCHEZ DE JUAN M., AYUSO J., GERALDES V. L., JIMENEZ J. R., 2011. « Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 25, n°10, 2011, p. 3950–3955.
- [AMO 12] AMORIM P., DE BRITO J. ET EVANGELISTA L., « Concrete made with coarse concrete aggregate: influence of curing on durability », *Materials Journal*, vol. 109, n° 02, 2012, p. 195–204.
- [ARA 11] ARABI N. ET BERREDJEM L., « Valorisation des déchets de démolition comme granulats pour bétons », *déchets - revue francophone d'écologie industrielle*, vol. 60, 2011, p. 25-30.
- [ARL 07] ARLIGUIE G. ET HORNAIN H., *GranDuBé : Grandeurs associées à la Durabilité des Bétons*, Paris, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2007.
- [ASS 04] ASSIE STEPHAN, Durabilité des bétons autoplaçants, Thèse de Doctorat INSA de Toulouse, 2004.
- [COR 09] CORINALDESI V., MORICONI G., « Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 23, n°8, 2009, p. 2869–2876.
- [DRE 98] DREUX G. ET FESTA J., *Nouveau Guide du Béton*, 8^{ème} édition, Paris, Edition Eyrolles, 1998.
- [GAL 14] GALVÍN A.P., AGRELA F., AYUSO J., BELTRÁN M.G. ET BARBUDO A., « leaching assessment of concrete made of recycled coarse aggregate: physical and environmental characterisation of aggregates and hardened concrete », *Waste Management*, vol. 34, 2014, p. 1693–1704.
- [HUS 03] HUSSAIN H. ET LEVACHER D., « Recyclage de béton de démolition dans la fabrication des nouveaux bétons », XXI^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil, 2003.
- [KEB 15] KEBAILI O., MOURET M., ARABI N. ET CASSAGNABERE F., « Adverse effect of the mass substitution of natural aggregates by air-dried recycled concrete aggregates on the self-compacting ability of concrete: evidence and analysis through an example », *Journal of Cleaner*, vol. 87, 2015, p. 752-761.
- [KEN 11] KENAI S. ET DEBIEB F., « Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassé », *Materials and Structures*, vol. 44, 2011, p. 815–824.
- [LEV 04] LEVY S. M. ET HELENE P., « Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development », *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n° 18, 2004, p. 1975–1980.
- [MAR 09] MARTA SÁNCHEZ DE J. ET GUTIÉRREZ P. A., « Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate », *Construction and Building Materials*, vol. 23, 2009, p. 872-877.
- [MEF 13] MEFTEH H., KEBAILI O., OUCIEF H., BERREDJEM L. ET ARABI N., « Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete », *Cleaner Production*, vol. 54, 2013, p. 282-288.
- [NEV 00] NEVILLE A.M., *Les propriétés du béton*, Paris, Edition Eyrolles, 2000.
- [OLO 02] OLORUNSGO FT, PADAYACHEE N., « Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes », *Cement and Concrete Research*, vol. 32, n° 2, 2002, p.179–185.
- [QUE 96] QUEBAUD M., Caractérisation des granulats recyclés: Étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats, Thèse de doctorat, Université d'Artois, 1996.
- [PAC 13] PACHECO-TORGAL F., TAM V.W.Y., LABRINCHA J.A., DING Y., DE BRITO J., *Hand book of Recycled Concrete and Demolition Waste*, Wood head Publishing, Cambridge, UK, 2013, p. 646.
- [PIC 01] PICANDET VINCENT, Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydrique des bétons, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2001.
- [WIR 00] WIRQUIN E., ZAHARIEVA R H., BUYLE-BODIN F., « Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité-Application aux bétons de granulats recyclés », *Materials and Structures*, vol. 30, 2000, p. 403-408.
- [ZAH 04] ZAHARIEVA R. ET AL., « Frost resistance of recycled aggregate concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n° 10, 2004, p.1927–1932.