

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA QUALITÉ DES GRANULATS SUR LES PERFORMANCES MÉCANIQUES ET DE DURABILITÉ DES BÉTONS

MARTIN Gauthier^A, BODET Raphaël^B, POTIER Jean-Marc^C, MAI-NHU Jonathan^A, FONTENY Sébastien^B, WALLER Vincent^{D,C}, ROUGEAU Patrick^A

^A CERIB, Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton, Epernon, France.

^B UNPG, Union Nationale des Producteurs de Granulats, France.

^C SNBPE, Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi, France.

^D Unibéton HeidelbergCement Group, France.

Résumé : Le développement durable et l'économie circulaire visent à optimiser l'utilisation des ressources locales de telle sorte que les impacts sur l'environnement (principalement la consommation d'énergie et le changement climatique) soient minimisés.

C'est dans ce contexte que le Cerib (Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton), l'UNPG (Union Nationale des Producteurs de Granulats) et le SNBPE (Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi) ont mené une étude visant à caractériser l'influence de la qualité des granulats sur les performances mécaniques et de durabilité des bétons.

L'objectif de ce travail est d'aboutir à une utilisation plus large des granulats de différentes qualités dans les bétons de structure, en considérant un niveau de performances équivalent pour garantir la sécurité des utilisateurs finaux. Les bétons étudiés dans ce projet sont inspirés de bétons étudiés dans le cadre du Projet National PERFDUB sur l'approche performantielle de la durabilité des bétons, seuls les granulats sont différents. Les bétons de l'étude ont été fabriqués selon la même méthodologie que celle du PN PERFDUB.

Les propriétés mécaniques et de durabilité des cinq bétons réalisés à partir de granulats de qualités différentes (codés B) en termes de forme (coefficient d'aplatissement), d'absorption d'eau et de résistance mécanique (résistance à la fragmentation) ont ainsi été caractérisées : perméabilité au gaz, migration des ions chlorure en régime transitoire et permanent, porosité accessible à l'eau, absorption d'eau par immersion et résistance à la carbonatation accélérée à 3 % et 50 %.

Les résultats obtenus sur les cinq bétons fabriqués sont comparés à ceux obtenus sur les bétons de références provenant du PN PERFDUB. L'étude confirme la possibilité de réaliser des bétons aussi résistants à la carbonatation et à la pénétration des ions chlorure que les bétons constitués exclusivement de granulats de code A en optimisant les compositions, et notamment les propriétés de la matrice cimentaire.

Concernant les performances mécaniques, une résistance à la fragmentation et un coefficient d'aplatissement codés B n'impactent que faiblement les performances mécaniques et de durabilité des bétons.

Mots-clés : granulats, résistance mécanique, durabilité, approche performantielle

1. INTRODUCTION

La présente étude vise à caractériser des bétons réalisés à partir de granulats de qualités différentes (codés B selon la norme NF P 18-545) avec pour objectif de comparer leurs performances mécaniques et de durabilité par rapport à un béton de référence (contenant des granulats codés A selon la norme NF P 18-545).

Pour cela, les performances mécaniques et de durabilité de cinq bétons réalisés à partir de granulats codés B en termes de forme (coefficient d'aplatissement), d'absorption d'eau et de résistance mécanique (résistance à la fragmentation) sont caractérisées.

Les essais de résistance à la compression de perméabilité au gaz, de migration des ions chlorure en régime transitoire, de porosité accessible à l'eau, d'absorption d'eau par immersion et de résistance à la carbonatation accélérée à 3 % (noté EN) et 50 % (noté NF) sont étudiés.

Les propriétés de ces bétons sont ensuite comparées à celles de bétons de référence, fabriqués et caractérisés dans le cadre du Projet National PERFDUB qui traite de l'approche performantielle de la durabilité.

2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1 Compositions

La formulation de chaque béton à étudier est basée sur celle d'un béton de référence issu du programme expérimental du PN PERFDUB. Les constituants utilisés sont similaires, à l'exception du granulat dont on souhaite évaluer l'influence sur les propriétés du béton.

Il est important de préciser que les bétons conservent également un rapport E_{eff}/L_{eq} (eau efficace sur liant équivalent) et une quantité d'eau efficace équivalents à leur béton de référence respectif et que les courbes granulaires sont les plus proches possibles. En effet, afin de pouvoir mener une étude comparative, les granulats du PN PERFDUB ont été substitués en volume. Seule l'adjuvantation des bétons a été adaptée afin de viser un affaissement/étalement initial similaire au béton de référence.

Les propriétés des granulats étudiés sont présentées dans le tableau 1.

Désignation	Béton(s) associé(s)	Minéralogie	Catégorie (Code) NF P 18-545, article 10	
Gr CM 0/4	Bétons B1 et B2	Alluvionnaire silico-calcaire	B	Ab = 4,5 %
Gr CM 8/22	Bétons B1 et B2	Alluvionnaire silico-calcaire	B	Ab = 3,7 % FI = 29 % LA = 36 %
Gr LGP 4/20	Béton B3	Alluvionnaire silico-calcaire	A, sauf FI code B	FI = 20 %
Gr Lu 4/20	Béton B4	Alluvionnaire silico-calcaire	A, sauf FI et Ab code B	Ab = 2,5 % FI = 27 %
Gr Mi 4/10	Béton B5	Alluvionnaire siliceux	A, sauf LA code B	LA = 36 %
Gr Mi 10/20	Béton B5	Alluvionnaire siliceux	A, sauf LA code B	LA = 36 %
G1 0/4 (PERFDUB)	Béton B4	Alluvionnaire	A	-
G3 0/4 (PERFDUB)	Bétons B3 et B5	Calcaire dur	A	-

Tableau 1. Propriétés des granulats étudiés.

Les compositions des bétons sont décrites dans les tableaux 2 et 3.

Constituants	Béton B1 (formulé à partir du béton de référence B34 du PN PERFDUB)		Béton B2 (formulé à partir du béton de référence B7 du PN PERFDUB) (BAP)		Béton B3 (formulé à partir du béton de référence B19 du PN PERFDUB)	
	Désignation	kg/m ³	Désignation	kg/m ³	Désignation	kg/m ³
Ciment	CEM III	373	CEM I	270	CEM II	355
Addition	-	-	Betocarb GY	190	-	-
Granulats	Gr CM 0/4	791	Gr CM 0/4	846	G3	817
	Gr CM 8/22,4	930	Gr CM 8/22,4	750	Gr LGP 4/20	1 039
Adjuvants	Optima 372	0,4 %/C	Tempo 12 Collaxim XR	2,6 %/C 0,6 %/C	Tempo 11	2,5 %/C
Eau totale	238		245		206	
Eau efficace	168		179		178	
E_{eff}/L_{eq}	0,45		0,60		0,50	
E_{eff}/L_{tot}	0,45		0,39		0,50	
Volume de pâte (L)	286		337		277	
G/S (coupure 4 mm)	1,15		0,88		1,29	
Mv réelle (kg/m³)	2 332		2 304		2 419	

Tableau 2. Compositions réelles des bétons B1, B2 et B3.

Constituants	Béton B4 (formulé à partir du béton de référence B34 du PN PERFDUB)		Béton B5 (formulé à partir du béton de référence B19 du PN PERFDUB)	
	Désignation	kg/m ³	Désignation	kg/m ³
Ciment	CEM III	369	CEM II	355
Granulats	G1	802	G3	822
	Gr Lu 4/20	1 021	Gr Mi 4/10	168
	-	-	Gr Mi 10/20	877
Adjuvants	Optima 372	0,7 %/C	Tempo 11	1,3 %/C
Eau totale	198		194	
Eau efficace	166		177	
E_{eff}/L_{eq}	0,45		0,50	
E_{eff}/L_{tot}	0,45		0,50	
Volume de pâte (L)	294		279	
G/S (coupure 4 mm)	1,30		1,35	
Mv réelle (kg/m³)	2 391		2 417	

Tableau 3. Compositions réelles des bétons B4 et B5.

Le volume de pâte correspond au volume de la gâchée retranché du volume des granulats. Par conséquent, les fines des granulats ne sont pas prises en compte dans ce mode de calcul.

La classe d'exposition, les rapports E_{eff}/L_{eq} et E_{eff}/L_{tot} (eau efficace sur liant total) et la classe de résistance des différents bétons étudiés sont répertoriés dans le tableau 4.

	Bétons B1, B4 et B34	Bétons B2 et B7	Bétons B3, B5 et B19
Classe d'exposition visée	XC4	XC4	XS3
E_{eff}/L_{eq}	0,45	0,60	0,50
E_{eff}/L_{tot}	0,45	0,39	0,50
Classe de résistance	C40/50	C25/30	C35/45

Tableau 4. Présentation des prescriptions de formulation des différents bétons étudiés.

Pour rappel, les indicateurs de durabilité pertinents pour les bétons formulés pour les classes d'expositions XC4 et XS3 sont respectivement la résistance à la carbonatation et la diffusion des ions chlorure.

Afin de pouvoir comparer les cinq bétons à étudier et ceux du PN PERFDUB, leurs propriétés à l'état frais sont similaires. En effet, la consistance visée au cône d'Abrams est de (180 +/- 30) mm pendant 1 heure et l'écart maximal sur le rendement volumique est fixé à $\pm 1,5$ %.

Les bétons B1 et B2 permettent d'étudier l'influence de la porosité des granulats sur les performances des bétons tandis que les influences de l'aplatissement et de la résistance à la fragmentation des granulats sont traitées par l'analyse des résultats des bétons B3, B4 et B5.

Le coefficient d'absorption d'eau WA24, le coefficient Los Angeles et le coefficient d'aplatissement sont mesurés respectivement selon les normes NF EN 1097-6, NF EN 1097-2 et NF EN 933-3.

Lors des fabrications, pour les bétons à étudier et les bétons de référence, les granulats présentent une teneur en eau au minimum 1 % supérieure à leur coefficient d'absorption d'eau respectif afin de maîtriser la quantité d'eau efficace pour l'hydratation du liant. Dans le cas contraire, ils doivent subir une étape de pré-humidification selon la méthode utilisée dans le projet national PERFDUB.

2.2 Préparation et Cure

Pour chaque composition de béton, des éprouvettes prismatiques (70*70*280) mm, cylindriques (110*220) mm et cubiques (150*150*150) mm sont préparées pour déterminer les propriétés physico-chimiques et mécaniques du béton. La mise en place est réalisée sur une table vibrante pour les prismes et les cubes et par une aiguille vibrante pour les cylindres. Afin de maîtriser l'homogénéité de l'ensemble des fabrications, les étapes de mise en place sont réalisées par le même opérateur. Les éprouvettes sont démoulées après 24 heures puis une cure humide est réalisée, correspondant à un séjour de 90 jours dans une pièce assurant un taux d'humidité supérieur à 95 %.

3. RÉSULTATS DES ESSAIS

Les figures 1 à 3 synthétisent les résultats de l'ensemble des essais mécaniques et de durabilité, en positionnant en base 100, pour chaque essai, le plus fort des résultats obtenus.

La figure 3 permet de comparer à la fois les bétons B1 et B2 entre eux car ils sont constitués des mêmes granulats mais aussi de comparer les bétons B1 et B7 (PERFDUB) (porosité du béton équivalente).

L'influence des différentes caractéristiques des granulats étudiés sont traitées dans la suite de l'article.

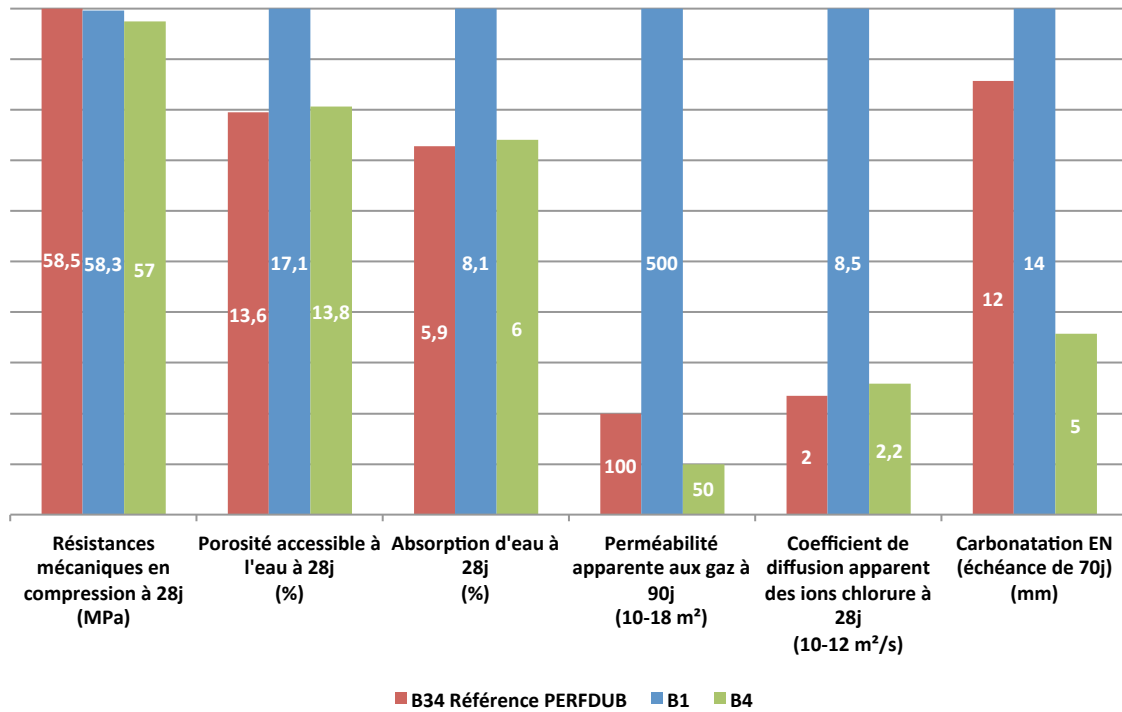


Figure 1. Comparaison des performances mécaniques et de durabilité entre les bétons B1 et B4 et leur béton de référence B34.

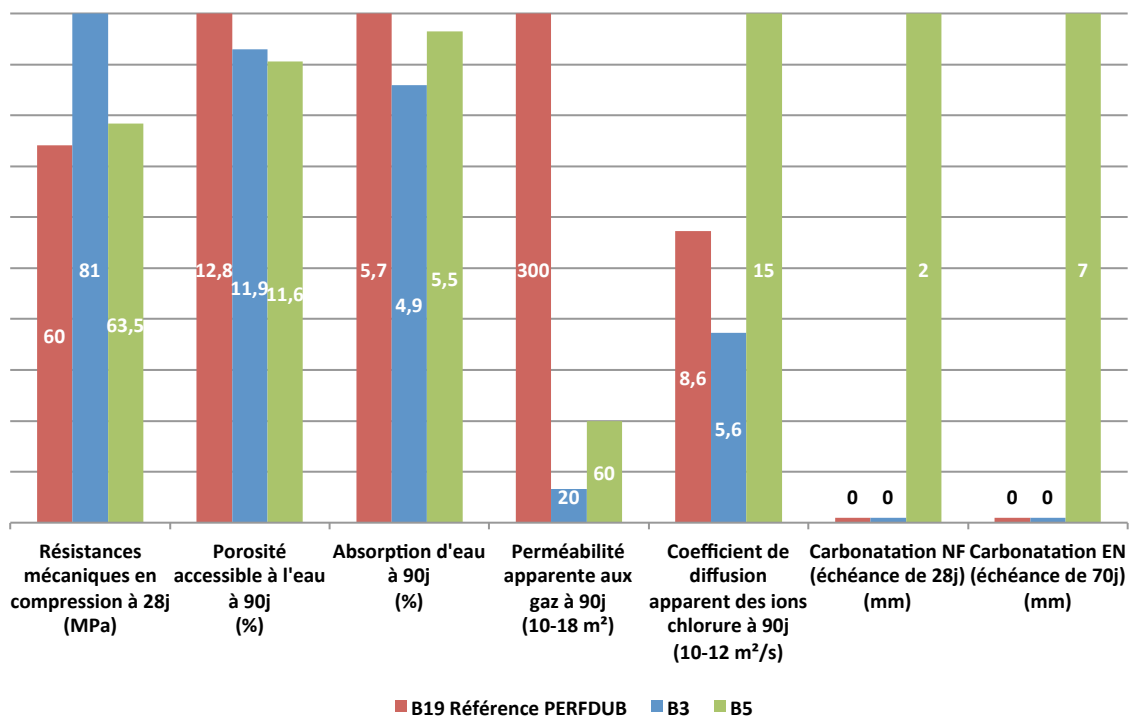


Figure 2. Comparaison des performances mécaniques et de durabilité entre les bétons B3 et B5 et leur béton de référence B19.

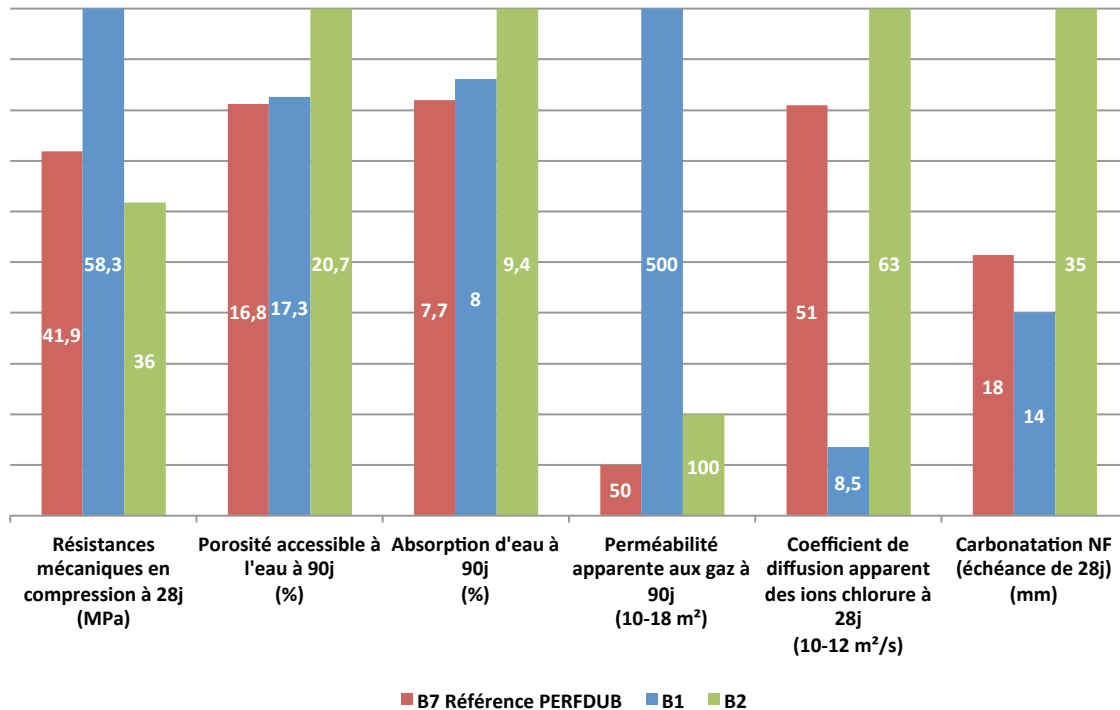


Figure 3. Comparaison des performances mécaniques et de durabilité entre les bétons B1, B2 et B7 (PERFDUB).

Le tableau 5 rappelle les valeurs limites associées à la durabilité potentielle des bétons selon le guide AFGC (AFGC, 2004).

Durabilité potentielle →	Classes et valeurs limites				
	Très faible	Faible	Moyenne	Élevée	Très élevée
Porosité accessible à l'eau (%)	> 16	14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9
Coefficient de diffusion apparent des chlorures (10 ⁻¹² m²/s)	> 50	10 à 50	5 à 10	1 à 5	< 1
Perméabilité apparente aux gaz (10 ⁻¹⁸ m²)	> 1 000	300 à 1 000	100 à 300	10 à 100	< 10

Tableau 5. Synthèse des classes et valeurs limites (indicatives) relatives aux indicateurs de durabilité généraux ou de substitution selon le guide AFGC.

3.1 Influence de la porosité des granulats sur les performances mécaniques et durabilité des bétons

3.1.1 Béton B1 (comparaison avec le béton de référence PERFDUB B34)

L'essai de résistance mécanique est réalisé sur cubes (150*150*150) mm pour le béton B1 et sur des cylindres (110*220) mm pour le béton B34. En prenant en compte cette différence de géométrie, malgré une même classe de résistance à la compression visée, les bétons B1 et B34 ne font pas partie de la même classe de résistance.

3.1.2 Béton B2 (comparaison avec le béton de référence PERFDUB B7)

Le béton B2 est comparé à son béton de référence B7 et peut également être comparé au béton B1 car ils sont constitués des mêmes granulats. Les bétons B2 et B7 sont des bétons auto-plaçants.

Notons que l'essai de résistance mécanique est réalisé sur cubes (150*150*150) mm pour le béton B2 et sur des cylindres (110*220) mm pour le béton B7. Les résultats présentés sont les résultats bruts sans transposition.

Comme précédemment avec les bétons B1 et B34, les bétons B2 et B7 n'appartiennent pas à la même classe de résistance.

3.1.3 Discussions

Concernant les résistances mécaniques, l'augmentation de la porosité des granulats a un impact sur les résistances mécaniques à la compression (Figures 1 et 2, bétons B1, B2 et B4) qu'il convient de prendre en considération dans l'interprétation des résultats (en pratique, la formulation serait corrigée afin d'atteindre la classe de résistance visée).

Concernant les indicateurs de durabilité, le coefficient d'absorption d'eau des granulats influence de manière prévisible la porosité globale du béton. En effet, ces granulats étant plus poreux que les granulats de référence, ils influencent les performances des bétons relatives aux propriétés de transfert avec un degré qui dépend de la compacité de la matrice cimentaire et des caractéristiques intrinsèques des granulats. Toutefois, cette augmentation de la porosité globale des bétons peut être calculée par des modèles simples (Schmitt et al., 2015). Ce modèle permet de prendre en compte la porosité des granulats dans le calcul des seuils à ne pas dépasser à l'instar de bétons confectionnés avec des granulats recyclés.

Il est également important de préciser que même si la porosité globale du matériau est affectée par l'utilisation de granulats poreux, cet indicateur général de durabilité ne permet pas à lui seul d'appréhender le comportement des bétons vis-à-vis des risques de corrosion des armatures par carbonatation du béton d'enrobage ou par pénétration des ions chlorure. En effet, la porosité des granulats n'a pas les mêmes effets que celle de la matrice cimentaire (Schmitt et al., 2015).

Les résultats des bétons B1 et B2 confirment le rôle déterminant du rapport E_{eff}/L_{eq} sur les propriétés de transfert. Effectivement, à granulats équivalents, plus il sera élevé et plus la profondeur de carbonatation sera importante. Les bétons ayant un rapport E_{eff}/L_{eq} faible sont moins poreux et le dioxyde de carbone a plus de difficultés à pénétrer dans la matrice cimentaire. La porosité des granulats semble toutefois jouer un rôle moins important sur la carbonatation que le rapport E_{eff}/L_{eq} . Par exemple, à porosité équivalente, le béton B1 C40/50 et le béton B7 C25/30 ne présentent pas la même profondeur de carbonatation. De façon logique le béton B1 (E_{eff}/L_{eq} plus faible) résiste mieux à la pénétration du dioxyde de carbone. Cette même tendance se dégage également pour la diffusion des ions chlorure (Figure 4).

Cela montre que l'utilisation de granulats plus poreux est possible en optimisant la matrice cimentaire, c'est-à-dire soit en diminuant légèrement le rapport E_{eff}/L_{eq} (paramètre physique lié à la compacité du matériau) soit en utilisant un liant à base de laitier CEM III ou CEM I (ou CEM II/A) + laitiers (paramètre chimique permettant notamment d'améliorer les performances du béton vis-à-vis de la diffusion des ions chlorure).

Par ailleurs, la perméabilité au gaz des bétons B1 et B2 formulés avec des granulats présentant une forte absorption d'eau est supérieure à celle d'un béton contenant des granulats peu poreux (Figure 4).

Cependant, malgré son rapport E_{eff}/L_{eq} plus important, le béton B2 est moins perméable à l'oxygène que le béton B1. Le béton B2 contient une quantité importante d'addition calcaire. Cette addition calcaire donnerait lieu à des pores capillaires de plus petites dimensions et diminuerait ainsi la perméabilité du béton (Hamami et al., 2009). On peut noter que même si le rapport E_{eff}/L_{eq} du béton B2 est plus important que celui du béton B1, le rapport E_{eff}/L_{tot} du béton B2 est plus faible car son liant est constitué d'un CEM I et d'une addition calcaire qui n'est pas prise en totalité dans le liant équivalent.

3.2 Influence du coefficient d'aplatissement sur les performances mécaniques et de durabilité

3.2.1 Béton B3 (comparaison avec le béton de référence PERFDUB B19)

Les bétons B3 et B19 ont une résistance bien supérieure à la classe de résistance visée C35/45. L'essai de résistance mécanique est réalisé sur cubes (150*150*150) mm pour le béton B3 et sur des cylindres (110*220) mm pour le béton B19. Malgré cette différence de géométrie, le gravillon ayant un coefficient d'aplatissement FI de 20 % ne conduit pas à une diminution des performances mécaniques du béton.

3.2.2 Béton B4 (comparaison avec le béton de référence PERFDUB B34)

Ce béton est comparé à son béton de référence B34. De plus, le béton B4 peut être directement comparé au béton B1 de la présente étude car à l'exception des granulats utilisés, ils sont similaires.

Le béton B4 a des performances mécaniques similaires au béton B1. Malgré des résistances inférieures au béton B34 (en prenant en compte la géométrie des éprouvettes), ils respectent la classe de résistance visée C40/50.

3.2.3 Discussions

Concernant les indicateurs de durabilité, le béton B3 a des performances identiques voire supérieures au béton de référence B19 avec notamment une perméabilité au gaz quinze fois plus faible.

Le béton B4 voit les mêmes tendances que pour le béton B3 se dessiner. En effet, le béton B4 a lui aussi des indicateurs de durabilité identiques voire meilleurs que son béton de référence B34 avec notamment une perméabilité au gaz deux fois plus faible.

Cependant, le gain de performance du béton B4 par rapport à son béton de référence B34 est plus limité que le gain du béton B3 par rapport à son béton de référence B19. Cela pourrait s'expliquer par l'utilisation d'un gravillon avec un coefficient d'aplatissement plus élevé. De plus, le béton B4 est constitué d'un gravillon à la fois codé B en aplatissement mais également codé B en absorption d'eau et donc par conséquent un peu plus poreux que le gravillon du béton B3.

Les performances mécaniques des bétons B1 et B4, réalisés à partir de granulats présentant un coefficient d'aplatissement identique, sont comparables.

Néanmoins, les indicateurs de durabilité sont plus favorables pour le béton B4 que pour le béton B1 (Figure 1). La plus forte porosité des granulats du béton B1 peut expliquer les résultats obtenus sur les indicateurs de durabilité et confirment les tendances observées dans le paragraphe 3.1.

3.3 Influence du coefficient Los Angeles du gravillon sur les performances mécaniques et de durabilité

3.3.1 Béton 5 (comparaison avec le béton de référence PERFDUB B19)

Le béton étudié est comparé à son béton de référence B19. De plus, le béton B5 peut être directement comparé au béton B3 de la présente étude car à l'exception des granulats utilisés, ils sont similaires.

L'essai de résistance mécanique est réalisé sur cubes (150*150*150) mm pour le béton B5 et sur des cylindres (110*220) mm pour le béton B19. En prenant en compte cette différence de géométrie, on constate que le béton B5 présente une résistance mécanique inférieure à celle du béton B19.

Les gravillons 4/10 mm et 10/20 mm codés B en coefficient Los Angeles semblent affaiblir de manière prévisible les performances mécaniques des bétons. Une différence de 17,5 MPa est notée entre le béton B3 et le béton B5 (même matrice cimentaire, granulats différents).

3.3.2 Discussions

Concernant les indicateurs de durabilité, le béton B5 a des performances identiques ou supérieures à son béton de référence pour la porosité accessible à l'eau, l'absorption d'eau et la perméabilité au gaz.

Cependant, la diffusion des ions chlorure et la pénétration du dioxyde de carbone sont ici favorisées par l'utilisation de granulats à plus faible résistance mécanique.

Par ailleurs, sur quasiment l'ensemble des indicateurs de durabilité, le béton B5 présente des performances inférieures au béton B3.

4. CONCLUSIONS

Les résultats de cette étude montrent qu'il est possible, pour des bétons constitués de granulats de qualités différentes (codés B) en termes de forme (coefficient d'aplatissement), d'absorption d'eau et de résistance mécanique (résistance à la fragmentation), de garantir des performances de durabilité au moins équivalentes à celles de bétons constitués de granulats codés A :

- l'utilisation de granulats codés B en coefficient d'aplatissement n'a pas d'impact négatif sur les indicateurs de durabilité ;
- l'utilisation de granulats codés B en termes de coefficient d'absorption d'eau influence logiquement la porosité globale du béton et les performances relatives à certaines propriétés de transfert avec un degré qui dépend surtout de la compacité de la matrice cimentaire ; pour les environnements agressifs vis-à-vis des risques de corrosion des armatures, en adaptant la composition de la matrice cimentaire (nature du liant, rapport E_{eff}/L_{eq}), il est possible de réaliser des bétons présentant des propriétés de transfert équivalentes à des bétons comportant des granulats de faible absorption d'eau. En effet, la formulation de ces bétons a été réalisée en substituant les granulats des bétons de référence du PN PERFDUB par les granulats étudiés en considérant tout autre paramètre de composition égal par ailleurs. Une optimisation de la composition des bétons à qualifier, pour un cahier des charges identique aux bétons de référence, permettrait d'améliorer encore les propriétés de durabilité des bétons B1 à B5 ;
- enfin, l'utilisation de granulats codés B en coefficient Los Angeles conduit de manière prévisible à une diminution des performances mécaniques des bétons mais permet tout de même d'atteindre aisément la classe de résistance visée en considérant une substitution volumique des granulats de référence par les granulats étudiés.

RÉFÉRENCES

- AFGC (2004), *État de l'art et Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité*, France.
- Hamami AEA (2009), *Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires*, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, France.
- Schmitt L, Mai-Nhu J, Rougeau P, Djerbi Tegger A, Saillio M (2015), *Durabilité des structures en béton incorporant des granulats recyclés*, Conférence Internationale Francophone NoMaD, Nouveaux Matériaux et Durabilité, Douai, France.