

Liège, Belgique
8-9 Novembre 2018

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DIFFÉRÉ DES BÉTONS A HAUTES PERFORMANCES: EFFET DES CARACTÉRISTIQUES DU SQUELETTE GRANULAIRE

MAKANI Abdelkadir^A et VIDAL Thierry^B

A Université TAHRI Mohamed Béchar, Département de Génie Civil, LFGM (Laboratoire de Fiabilité du Génie Mécanique), BP 417 Béchar (08000), Algérie

B Université de Toulouse, UPS, INSA, LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions), 135, Avenue de Rangueil, F-31 077 TOULOUSE Cedex 4, France

Résumé : L'estimation du comportement différé des bétons a une grande importance pour la durabilité des ouvrages et ce pour plusieurs raisons. Les déformations de retrait peuvent induire des risques de fissuration et ainsi favoriser notamment le développement de la corrosion des armatures. Les déformations de fluage peuvent entraîner des flèches incompatibles avec le bon fonctionnement en service des ouvrages. Les règlements actuels (Européens et Américains) proposent des modèles analytiques permettant d'évaluer les déformations différées en prenant en compte différents paramètres (facteurs relatifs à la formulation, conditions d'environnement et paramètres de dimensions de l'élément de structure). L'expérience montre néanmoins une grande dispersion des valeurs de déformations différées mesurées et des écarts non négligeables avec les valeurs calculées selon ces règlements.

L'objectif de ce travail est de s'intéresser à un paramètre non pris en compte dans ces règlements qui pourrait être à l'origine des imprécisions de leurs prédictions : caractéristique du squelette granulaire. Le programme expérimental s'articule autour d'une étude comparative des comportements mécaniques instantanés et différés de Bétons à Hautes Performances (BHP) de même formulation de base (volume de pâte comparable)

Les résultats expérimentaux montrent que les caractéristiques du squelette granulaire (forme du granulat, rapport G/S) paraissent peu influentes sur les déformations instantanées et différées totales du béton. Néanmoins, les bétons avec granulats roulés présentent une meilleure résistance en compression mais une déformation différée endogène sensiblement plus élevée par rapport à celle des bétons avec granulat concassé. La confrontation des déformations mesurées avec les prédictions de l'Eurocode 2 montre que ce règlement sous-estime le comportement différé de tous les bétons étudiés.

Mots-clés : bétons à hautes performances, forme des granulats, rapport G/S, retrait, fluage, Eurocode 2.

1. INTRODUCTION

Les déformations différées des bétons doivent être prises en compte avec précision lors du dimensionnement des ouvrages de génie civil. Ces déformations peuvent engendrer des flèches excessives, des redistributions des contraintes dans les structures hyperstatiques et des pertes de précontrainte dans des éléments en béton précontraint, préjudiciables à la tenue des ouvrages en service. Les Bétons à Hautes performances (BHP) sont particulièrement concernés puisqu'ils sont très souvent utilisés pour ce type de construction.

Le fluage et le retrait du béton sont liés aux mouvements de l'eau en phase liquide et gazeuse au sein du réseau poreux, en relation avec le séchage du béton, qui vont générer des déformations et d'éventuelles fissures. Les mécanismes sont très complexes et de nombreux paramètres, propriétés des matériaux et conditions environnementales, peuvent être couplés (Benboudjema et al., 2005, Pons et Torrenti, 2008, Makani, 2011). Les granulats sont à considérer comme faisant parti des paramètres caractéristiques du béton pouvant être influents, du fait de leur effet direct sur le comportement mécanique et la durabilité des structures. Certains granulats, de par leur nature minéralogique et leur structure poreuse plus ou moins développée, pourraient être considérés comme des réservoirs d'eau pour la pâte de ciment avec laquelle ils sont en contact (Belaribi et al., 1997, Toma, 1999, Makani et Vidal, 2018). Ce transfert entre la pâte et les agrégats pourrait engendrer des variations des caractéristiques hydriques et, par conséquent, des variations dimensionnelles non négligeables. Les granulats représentant 60% à 75% du volume de béton, leur rôle est vraisemblablement prépondérant dans le comportement à long terme. Cependant, leur influence non pris en compte dans les règlements actuels pourrait être à l'origine des imprécisions de leurs prédictions.

L'étude présentée dans cet article a pour objectif d'apporter des informations relatives à l'influence de la forme des granulats sur les déformations instantanées et différées des bétons.

Le programme expérimental a été mené sur des BHP pour lesquels la connaissance précise du comportement mécanique est primordiale en vue d'un dimensionnement correct des ouvrages. Deux types de granulats (roulé et concassé) ont été utilisés dans la production de ces bétons de formulations semblables afin d'étudier l'effet de la forme des granulats sur la résistance en compression, le module d'élasticité, le retrait et le fluage.

2. MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

2.1 Caractérisations des matériaux et formulations

Au cours de la caractérisation expérimentale, un sable unique siliceux roulé (SnR), commun à toutes les formulations des BHP étudiés, et deux types de gravillons de nature minéralogique différente ont été testés. Ces granulats seront nommés par la suite selon la terminologie introduite au Tableau 1 qui présente quelques paramètres physiques et mécaniques permettant de caractériser les différents types de granulat.

	Sable 0/4	Gravillons 4/10	
Nomenclature	SnR : Siliceux Roulé	SiR : Siliceux Roulé	SiC : Siliceux Concassé
Densité	2,8		2,7
Absorption (%)	1,7	1,2	1,3
Porosité totale (%)	8,5	5,3	4,6

Tableau 1. Récapitulatif des propriétés physiques et mécaniques des différents granulats utilisés

Les densités et coefficients d'absorption des siliceux sont quasiment égaux. La porosité totale est légèrement supérieure pour le siliceux roulé par rapport à celui concassé.

Les différents BHP étudiés sont constitués d'un des deux gravillons (SiR et SiC) et d'un même sable de classe 0/4 (SnR). Les différents granulats sont lavés. Le liant est constitué d'un ciment CEM I 52,5R associé à de la fumée de silice (405 + 45 kg/m³). Pour assurer une maniabilité suffisante, un superplastifiant est ajouté à l'eau. Le rapport E/L est maintenu constant à 0,35 (Tableau 2). Les valeurs de la porosité accessible à l'eau mesurée à 90 jours selon la norme [AFREM, 1997] sont également indiquées.

Nomenclature	SiR : Siliceux Roulé	SiC : Siliceux Concassé
% Volumique des granulats	0,42	0,36
Rapport G/S	1,5	1,0
Sable (0/4)	755	944
Gravillon	1133	944
Ciment	405	
Fumé de silice	45	
Eau efficace	157,5	
Superplastifiant	8,7	8,2
Porosité (%)	9,6	15,4

Tableau 2. Formulation des deux bétons confectionnés (kg/m³)

La constitution du squelette est optimisée afin de réduire la ségrégation et minimiser l'effet de classe granulométrique. À partir de la méthode de Dreux-Gorisse (Dreux et Festa, 1995), les courbes granulométriques de la formulation SiC ont été décalées vers les tailles de grains plus faibles, en modifiant leur G/S, ceci afin de se rapprocher de celles de SiR (Voir la Figure 1).

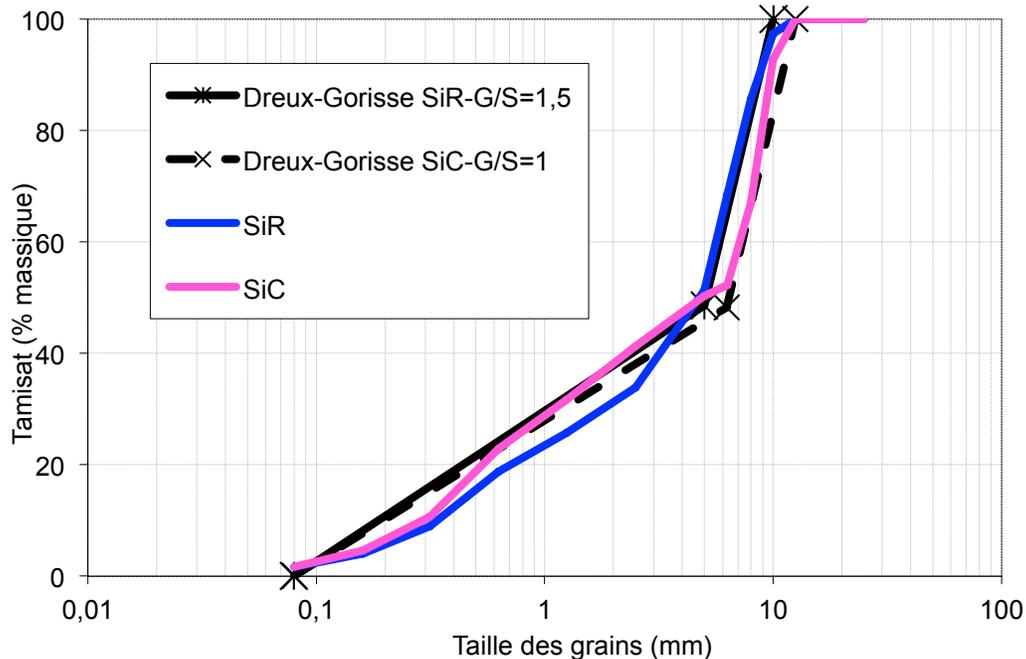


Figure 1. Optimisation du squelette granulaire pour les différentes formulations

Malgré seul ajustement du rapport G/S entre les deux formulations, pour optimiser la compacité du squelette granulaire, la porosité du BHP avec granulats siliceux concassés est significativement supérieure à celle du BHP avec granulats siliceux roulés. Bien que les formulations diffèrent peu, on constate que la différence de squelette granulaire ont un fort impact sur la porosité accessible à l'eau, malgré un rapport G/S ajusté pour optimiser la compacité granulaire des deux formulations. La forme du granulat pourrait également affecter la qualité de l'interface (fissuration ou décollement localisés due à des contraintes locales en lien avec la forme), ce qui favoriserait le développement d'un réseau percolant et contribuerait à une part complémentaire de porosité dans le cas du BHP avec granulats siliceux concassés.

2.2 Procédures expérimentales

Les échantillons coulés étaient des cylindres 11,8x23,6 cm. Six étaient destinés aux mesures de résistance mécanique en compression pour chacune des échéances, à savoir 3 et 28 jours et six pour le retrait. Après le coulage, les moules sont recouverts par un film plastique afin d'empêcher un départ de l'eau libre du béton par évaporation. Ils sont ensuite conservés dans une salle à $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ et $95 \pm 5\%$ d'humidité relative pendant 24 heures. Le démoulage a été effectué à un jour.

La caractérisation mécanique a été effectuée à 3 et 28 jours à l'aide d'une presse de 3000 kN de capacité maximale, asservie en force avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s. La résistance et le module d'élasticité longitudinal en compression ont été évalués suivant les recommandations (RILEM, 1972a&b). Les modules sont mesurés avec une cage extensométrique J2P munie de 3 capteurs de déplacement longitudinaux LVDT espacés régulièrement selon un angle de 120° (Figure 2-a). Ces capteurs sont reliés à une chaîne d'acquisition qui enregistre les évolutions des déformations en fonction de la force. Pour les mesures de déformations différées, deux modes de conservation ont été étudiés suivant les recommandations (RILEM, 1998). 3 éprouvettes sont conservées en mode endogène (sans échange hydrique) dès le démoulage et 3 autres en mode dessiccation. Les déformations de retrait sont relevées dès 1 jour après coulage à l'aide d'un rétractomètre (Figure 2-b). Les éprouvettes destinées au fluage ont été préparées dans des moules équipés d'inserts métalliques permettant la mise en place, après démoulage, du système de mesure de déplacement en utilisant des capteurs LVDT placés à l'intérieur des éprouvettes (Figure 2-c). Les éprouvettes sont chargées à 3 jours, soit une échéance assez représentative des dates d'application des charges (ou de mise en précontrainte) des BHP des ouvrages d'art. La charge de fluage représente 40 % de la résistance en compression mesurée à la date de mise en charge.

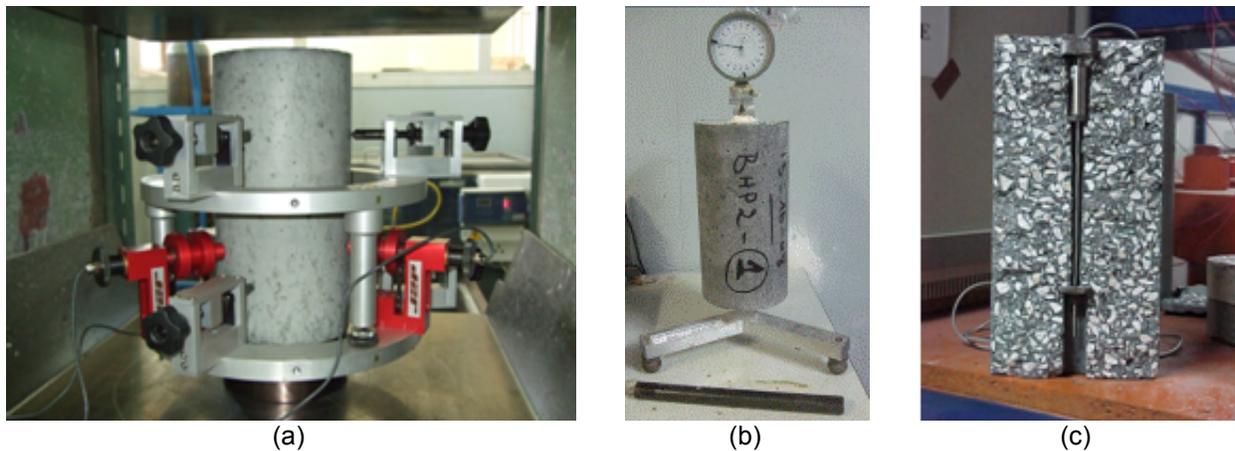


Figure 2. Dispositif de mesure de module d'élasticité (a), de retrait (b) et de fluage en compression (c)

3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSIONS

3.1 Comportement mécanique instantané

Les caractéristiques mécaniques instantanées des bétons à 3 jours, échéance de mise en fluage, et à 28 jours sont présentées dans le Tableau 2.

Caractéristiques	Échéance (j)	SiR	SiC
f_{cm} (MPa)	3	54,5	45,9
	28	82,2	72,1
E_{cm} (GPa)	3	30,8	32,7
	28	38,3	39,8

Tableau 2. Caractéristiques mécaniques :
 f_{cm} est la résistance moyenne en compression et E_{cm} est le module d'élasticité

À 3 et 28 jours, on constate des écarts significatifs aussi bien pour les résistances en compression que pour les modules d'élasticité, alors que les formulations sont très proches (rapport E/L et volume de pâte constants) traduisant une influence majeure du paramètre granulat :

- **Les résistances en compression** les plus élevées sont mesurées pour le béton avec granulats roulés. L'analyse comparative des résultats des BHP avec granulats siliceux roulés SiR et concassés SiC semble démontrer une meilleure résistance en compression avec la forme roulée. Ce résultat pourrait être relativisé du fait de la quantité moindre de granulat pour le béton SiC et la porosité plus élevée de cette formulation. Une forme concassée anguleuse pourrait provoquer un effet de coin avec une concentration de contraintes élevées au sein de la pâte avec formation de microfissures réduisant ainsi la résistance en compression.
- **Les modules d'élasticité** comparables des BHP dénotent du peu d'influence de la forme sur cette caractéristique mécanique, contrairement à la résistance en compression.

La Figure 3 présente les valeurs des modules d'élasticité de différents bétons obtenus expérimentalement par les différents auteurs (Alexander, 1996, Baalbaki et al., 1991, Cubaynes et Pons, 1996, de Larrard et Belloc, 1997, Mostofinejad et Nozhati, 2005, Muñoz, 2000, Schrage et Springenschimid, 1996, Meddah et al., 2010) en fonction de la résistance moyenne en compression. Ces valeurs sont confrontées avec celles calculées selon le règlement Eurocode 2.

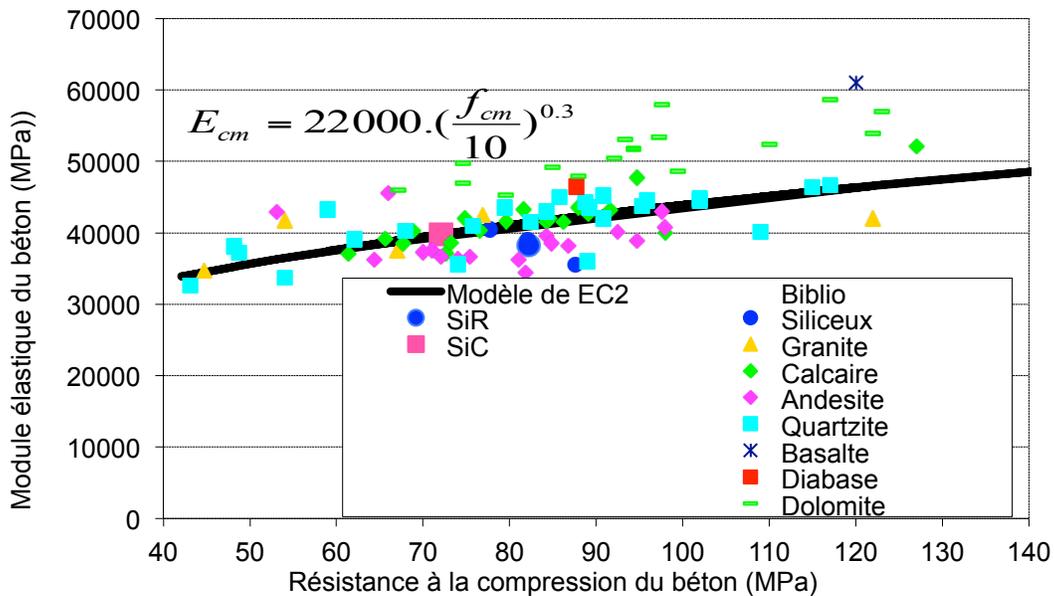


Figure 3. Evolution des modules d'élasticité de bétons en fonction de leur résistance à la compression mesurées à 28 jours

Les granulats utilisés sont également présentés dans la Figure 3. Les écarts constatés entre les valeurs expérimentales et celles calculées selon le modèle sont parfois importants. En outre, pour une même valeur de résistance en compression, on constate une forte dispersion des valeurs de modules d'élasticité et, réciproquement, des modules d'élasticité peuvent être semblables pour des résistances largement différentes.

3.2 Comportement différé libre : retraits endogène et total

La Figure 4 présente une confrontation des évolutions expérimentales de retrait endogène et total des différents bétons à base des granulats roulés et concassés avec les prédictions de l'Eurocode 2 (Eurocode 2, 2006).

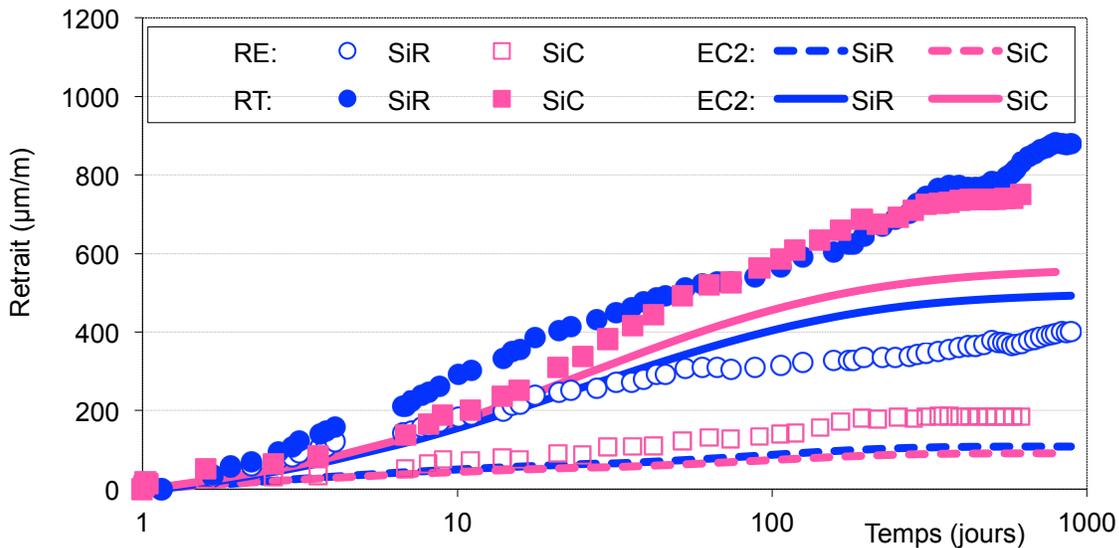


Figure 4. Évolution des retraits endogène (RE) et total (RT) des différents bétons en fonction du temps

En endogène, des écarts apparaissent. Les BHP avec granulats concassés présentent des retraits endogènes inférieurs. Ce résultat vient du fait que la porosité accessible à l'eau pour ces bétons est bien grande, avec des tailles de pores probablement supérieures et par conséquent des dépressions capillaires moins intenses.

Les évolutions des retraits totaux sont relativement similaires pour l'ensemble des BHP. Compte tenu du retrait endogène plus fort du BHP avec granulats siliceux roulés en déduit que le retrait de dessiccation est plus élevé pour le BHP avec granulats siliceux concassés. La même explication d'une porosité plus fine et plus faible pour le BHP avec granulats siliceux roulés peut être avancée. En dessiccation, la porosité accessible à l'eau supérieure du BHP avec granulats siliceux concassés facilite le séchage et augmente les amplitudes de retrait de dessiccation.

La confrontation de ces résultats avec des paramètres liés aux granulats tels que la porosité totale intrinsèque au granulat et capacité d'absorption ne permet pas de mettre en évidence une influence significative. Ceci peut être dû aux valeurs peu distinctes de ces propriétés.

La Figure 4 met également en évidence des sous-estimations importantes de l'Eurocode 2. Bien que ce modèle prévoie des écarts dus aux variations des résistances en compression, les différences entre valeurs expérimentales sont plus fortement marquées. On peut en déduire que d'autres paramètres non pris en compte interviennent. Étant donné que les paramètres intrinsèques aux formulations ont été fixés, l'influence du paramètre granulat semble avérée.

3.3 Comportement différé sous charge : fluages spécifiques propre et total

La Figure 5 permet de comparer les résultats expérimentaux de fluage spécifique propre et total des différents bétons à base des granulats roulés et concassés (déformation sous charge à laquelle on retranche les parts instantanées et dues au retrait et que l'on norme par rapport à la charge de fluage) et les prédictions de l'Eurocode 2 (Eurocode 2, 2006).

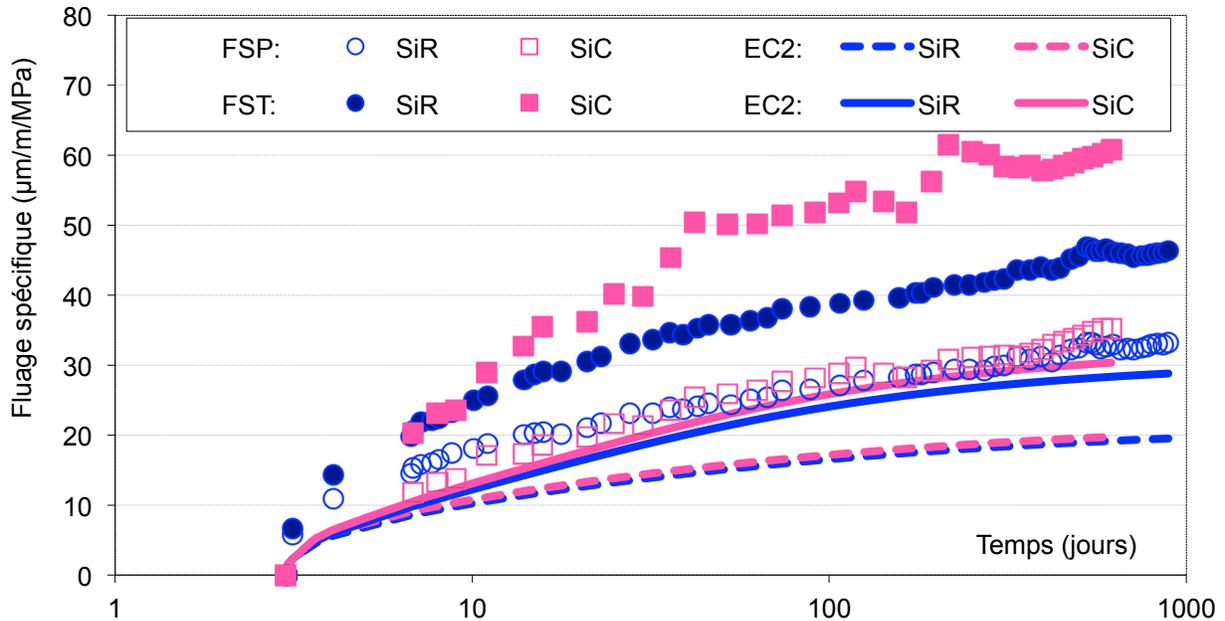


Figure 5. Évolution des fluages spécifiques propre (FSP) et total (FST) des différents bétons en fonction du temps

En endogène, les fluages spécifiques propres sont très proches. En mode dessiccation, les BHP avec granulats siliceux roulés se distinguent par un fluage spécifique total plus faible. Les amplitudes de fluage les plus intenses sont produites par les BHP de granulats concassés. Ce phénomène semble concordant avec l'hypothèse selon laquelle le fluage de dessiccation constitue une part complémentaire de retrait de dessiccation. Cet écart est donc lié à la porosité supérieure qui est à l'origine du retrait de dessiccation plus important dans le cas du BHP avec granulats siliceux concassés.

Enfin, l'Eurocode 2 sous-estime le fluage spécifique pour toutes les configurations et démontre des imprécisions en n'intégrant que les paramètres de résistance en compression, module d'élasticité du béton et retrait de dessiccation.

4. CONCLUSIONS

Cet article présente le comportement mécanique instantané et différé de différents BHP de notre étude ne se différenciant que par la forme de leurs granulats et leurs quantités via un rapport G/S distinct pour optimiser leurs compacités granulaires. Malgré des formulations caractérisées par un même rapport E/L et volume de pâte soit comparable, les résultats montrent d'importantes différences.

- Le comportement instantané
- ✓ Une meilleure résistance en compression est constatée avec la forme roulée. Ce résultat s'explique par une porosité plus faible pour cette formulation qui pourrait être liée à un rapport G/S ajusté pour optimiser la compacité granulaire et par conséquent une quantité différente de granulats. La forme du granulat pourrait également influencer sur une part de la porosité accessible à l'eau dans l'hypothèse où la qualité de l'interface serait affectée, ce qui favoriserait la formation d'un réseau percolant plus développé dans le cas du granulat concassé.
- ✓ Les valeurs comparables des modules élastiques des BHP indiquent un peu d'influence de la forme des granulats sur cette caractéristique mécanique.

- Le comportement différé libre
 - ✓ Les BHP avec granulats concassés présentent des retraites endogènes inférieures. Ceci pourrait être justifié par une porosité accessible à l'eau et des tailles de pores capillaires supérieures, d'où des dépressions capillaires moins intenses.
 - ✓ Les évolutions des retraites en dessiccation sont relativement comparables pour l'ensemble des BHP. Le retrait de dessiccation est donc plus élevé pour le BHP avec granulats siliceux concassés du fait d'un séchage supérieur induit par une plus forte porosité accessible à l'eau.

- Le comportement différé sous charge
 - ✓ Le fluage spécifique propre est quasiment identique pour les différents matériaux étudiés.
 - ✓ Les BHP avec granulats concassés se déforment davantage en mode de dessiccation. Les amplitudes de fluage les plus intenses sont produites par les BHP de granulats concassés. Ce phénomène semble concordant avec l'hypothèse selon laquelle le fluage de dessiccation constitue une part complémentaire de retrait de dessiccation qui est lui-même plus intense pour ce béton.

La confrontation des déformations mesurées avec les prédictions analytiques montre que les prédictions du modèle Eurocode 2 sous-estiment les déformations différées et ne permettent pas de retrouver les écarts entre les amplitudes des différents BHP. Cette étude démontre ainsi les limites de ce modèle dans l'estimation du comportement mécanique à long terme de ces matériaux.

Sur la base des analyses des comportements mécaniques instantanés et différés des BHP de notre étude, nous allons réaliser une étude de la microstructure et de la porosité de ces matériaux afin d'apporter des indications et informations complémentaires, et d'infirmer ou confirmer les hypothèses avancées pour expliquer les différences constatées. Ceci peut faire l'objet d'autres publications.

Remerciements

Le présent travail a été réalisé au sein du Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) à l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Toulouse. Je voudrais manifester mes remerciements aux personnels enseignants-chercheurs, administratifs et techniques du LMDC.

RÉFÉRENCES

- AFREM (1997), AFPC-AFREM, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Toulouse.
- Alexander M. G. (1996), Aggregates and the Deformation Properties of Concrete, *ACI Materials Journal*, 93 (6): 569-577.
- Baalbaki, W., Benmokrane B., Chaallal O., et Aitcin P.-C. (1991), Influence of Coarse Aggregate on Elastic Properties of High-Performance Concrete, *ACI Materials Journal*, 88 (5), 499-503.
- Belaribi, N., Pons G., et Perrin B. (1997), Delayed behaviour of concrete: Influence of additions and aggregate characteristics in relation to moisture variations, *Cement and Concrete Research*, 27 (9) :1429-1438.
- Benboudjema, F., Meftah F., Heinfling G., Lemaou F., et Torrenti J. (2005), Effets différés. Fluage et retrait, Comportement mécanique du béton, sous la dir. de J.-M. Reynouard et G. Pijaudier-Cabot, Hermès.
- Cubaynes J. F. et Pons G. (1996), Influence of the type of coarse aggregates on shrinkage and creep of high strength concrete, *4th Symposium on Utilization of High-Strength /High Performance Concrete*. Paris.

- de Larrard F. et Belloc A. (1997), The Influence of Aggregate on the Compressive Strength of Normal and High-Strength Concrete, *ACI Materials Journal*, 94 (5): 417-426.
- Eurocode 2 (2006), EN 1992-2, Design of concrete structures. Concrete bridges.
- Makani A. (2011), Influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement mécanique différé des bétons, *Thèse de doctorat*. INSA, Toulouse.
- Makani A. et Vidal T. (2018), Influence of initial water content of aggregates on the compressive strength and the shrinkage of High Performance Concretes, *MATEC Web of Conferences* 149, CMSS-2017.
- Meddah, M. S., Zitouni S., et Belâabes S. (2010), Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete, *Construction and Building Materials*, 24 (4), 505-512.
- Mostofinejad, D., et Nozhati M. (2005), Prediction of the Modulus of Elasticity of High Strength Concrete, *Iranian Journal of Science & Technology*, 29 (B3), 311-321.
- Muñoz, P. (2000), Rhéologie des bétons durcis : Approche couplée de la modélisation des retraits et fluages de bétons à hautes et très hautes performances, *Thèse de doctorat*, INSA, Toulouse.
- Pons G. et Torrenti J. M. (2008), Retrait et fluage. La durabilité des bétons, Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement. Sous la direction de Jean-Pierre OLLIVIER et Angélique VICHOT, *Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, Paris.
- RILEM. (1972a), Recommandations RILEM CPC4 Compression test on concrete, *Materials and structure*, 6 (30).
- RILEM. (1972b), Recommandations RILEM CPC8, Modulus of elasticity of concrete in compression, *Materials and Structures*, 6 (30): 507-512.
- RILEM (1998), Recommandations RILEM TC 107-CSP Measurement of time-dependent strains of concrete, *Materials and Structures*, 6 (31): 507-512.
- Schrage, I., et Springenschimid R. (1996), Creep and shrinkage data of high-strength concrete, *4th Symposium on Utilization of High-Strength /High Performance Concrete*, Paris.
- Toma, G. (1999), Comportement des bétons au jeune âge, *Thèse de doctorat*, Université de Laval, Canada, université de Laval, Canada.