
Déformations différées des Bétons à Hautes Performances : influence de la nature minéralogique des gravillons

A. Makani^{1*}, T. Vidal¹, G. Pons¹ et G. Escadeillas¹

¹Université de Toulouse, UPS, INSA, LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions), 135, Avenue de Rangueil, F-31 077 TOULOUSE Cedex 4, France

* e-mail : amakani@insa-toulouse.fr

RÉSUMÉ. Les déformations différées des bétons à hautes performances (BHP) s'avèrent souvent fortement sous estimées par les modèles réglementaires qui ne prennent pas en compte les caractéristiques des matériaux constitutifs et en particulier des granulats. Cet article présente une étude sur l'influence de caractéristiques des gravillons sur les déformations différées de BHP. Six bétons ont été préparés en utilisant la même pâte, mais en incorporant différents types de gravillons afin d'analyser les effets de leurs propriétés sur la résistance à la compression, le module d'élasticité, le retrait et le fluage des bétons. Les résultats indiquent que le type de granulats a une influence significative sur les déformations des BHP. La rigidité et la fraction volumique des gravillons ont une influence sur le module d'élasticité et les déformations différées. De plus, la résistance mécanique semble être corrélée aux caractéristiques de la qualité d'interface pâte-granulats (ITZ) qui dépend de la nature minéralogique et des propriétés géométriques des granulats. Les résultats expérimentaux sont comparés avec les valeurs calculées en utilisant le modèle de l'Eurocode 2, afin d'évaluer l'exactitude de leurs prédictions.

ABSTRACT. The time-dependent deformations of High Performances Concretes (HPC) are often severely underestimated by the commonly used models which do not consider the characteristics of incorporated materials, in particular aggregates. This paper presents a study on the influence of coarse aggregate characteristics on the deformations of HPC. Six concretes were prepared using the same cement paste but incorporating different types of aggregate to investigate the effect of aggregate properties on the compressive strength, modulus of elasticity (MOE), shrinkage and creep. The results indicate that the aggregate type has significant influence on the deformations. The stiffness and volume fraction of coarse aggregate have an influence on MOE and time-dependent deformations. In addition, the compressive strength of concrete seems to be correlated to the characteristics of the Interfacial Transition Zone (ITZ) which depends on the mineralogical nature and geometrical properties of aggregates. The experimental results were compared with the values calculated using the current Eurocode 2 model in order to assess the accuracy of the predictions.

MOTS-CLÉS : BHP, granulats, ITZ, comportement mécanique, retrait, fluage.

KEYWORDS: HPC, aggregates, ITZ, mechanical behaviour, shrinkage, creep.

1. Introduction

Les granulats, par leur forte proportion massique et volumique dans les formulations des bétons, constituent un paramètre influant du comportement macroscopique du béton (Neville, 1996, Alexander, 1996, Pons et Torrenti, 2008), plus particulièrement le comportement mécanique instantané et différé à long terme. Cependant, leur influence est peu ou non prise en compte dans les divers règlements en vigueur et pourrait être à l'origine des imprécisions de leurs prédictions. Ceci peut également s'expliquer par la difficulté à estimer et découpler l'impact des nombreuses caractéristiques des granulats sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons : nature minéralogique, géométrie/forme, porosité, absorption capillaire, performances mécaniques. L'étude présentée dans cet article a pour objectif d'apporter des informations relatives à l'influence du paramètre granulat sur les déformations instantanées et différées des bétons. Le programme expérimental a été mené sur six Bétons à Hautes Performances (BHP) pour lesquels la connaissance précise du comportement mécanique est primordiale en vue d'un dimensionnement correct des ouvrages. Six différents types de granulats (granite, calcaire, siliceux, grès et diabase concassés, siliceux roulé) ont été utilisés dans la production de ces bétons de formulations semblables afin d'étudier l'effet des propriétés des granulats sur la résistance en compression, le module d'élasticité, le retrait et le fluage uniaxiale en compression.

2. Matériaux et procédures expérimentales

2.1. Caractérisations physique et mécanique des granulats

Dans le cadre de ce travail, un sable unique siliceux roulé (SnR), commun à toutes les formulations des BHP étudiés, et six types de gravillons se différenciant par leur nature minéralogique et leur forme 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.

On constate que les densités sont relativement comparables, entre 2,7 (pour le granite, diabase et calcaire) et 2,9 pour le granulat de grès (GrC). Les valeurs des coefficients d'absorption d'eau sont également proches, autour de 1 % même si le granulat de diabase (DiC) absorbe une proportion d'eau supérieure à celle des autres granulats (1,6 %). L'analyse des porosités totales montre que les valeurs les plus élevées sont obtenues pour la diabase (5,5 %) et les granulats siliceux (5,4 % et 5,3 %), le granulat le moins poreux étant le grès (3,2 %).

Les mesures des caractéristiques mécaniques, qui n'ont pu être réalisées que sur les échantillons de roches dont sont issus les granulats de grès, calcaire et diabase, conduisent à des résultats significativement différents. Ainsi, le calcaire (CaC) et le

grès (GreC) sont relativement résistants avec des valeurs de 224 MPa et de 203 MPa par rapport à la diabase à 136 MPa. Les valeurs de module d'élasticité en compression varient presque dans le même sens, à savoir le grès (97 GPa), le calcaire (80 GPa) et la diabase (48 GPa). Ces valeurs sont relativement proches de celles constatées sur des granulats de même nature minéralogique dans des études antérieures (Alexander, 1996, de Larrard et Belloc, 1997).

Forme	Sable		Gravillons				
	Roulé		Concassé				
Nature	Siliceux			Granite	Diabase	Grès	Calcaire
Classe	0/4	4/10	6,3/10	4/10	6,3/10	6,3/10	4/12,5
Nomenclature	SnR	SiR	SiC	GraC	DiC	GreC	CaC
Densité	2,8			2,7	2,7	2,9	2,7
Absorption (%)	1,7	1,2	1,1	0,9	1,6	1,0	1,3
Porosité totale (%)	8,5	5,3	5,4	3,9	5,5	3,2	4,6
Résistance (MPa)	-	-	-	-	136	203	224
Module, E _g (GPa)	-	-	-	-	48	97	80

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

2.2. Caractérisation des matériaux de base et formulations

Les différents BHP étudiés sont constitués d'un des différents gravillons (SiR, SiC, GraC, GreC, DiC et CaC) et d'un même sable de classe 0/4 (SnR). Le liant est constitué d'un ciment CEM I 52,5R associé à de la fumée de silice. Pour assurer une maniabilité suffisante, un superplastifiant est ajouté à l'eau. Le rapport E/L et le volume de pâte sont maintenus constants.

Toutes les compositions étudiées au cours de ce travail sont présentées dans le **Tableau 2**. Les quantités de granulats sont données en masse de matériaux à l'état sec et les dosages en superplastifiant sont présentés en masse de produit liquide. Deux dosages en granulats sont utilisés, 1133 et 944 kg/m³ associés respectivement à deux dosages en sable de 755 et 944 kg/m³, pour tenir compte des différences de granulométrie des granulats et optimiser le squelette granulaire.

Nomenclature	SiR	GraC	CaC	SiC	GreC	DiC
Fraction volumique, V _g (%)	0,42	0,45	0,45	0,36	0,34	0,37
Sable sec (0/4)	755			944		
Gravillon sec	1133			944		
Ciment	405					
Fumée de silice	45					
Eau efficace	157,5					
Superplastifiant	8,7	11,5	6,9	8,2	4,2	5,2
Masse volumique théorique	2469	2459	2435	2438	2486	2410

Tableau 2. Formulations des BHP avec différents granulats (kg/m³)

2.3. Méthodes expérimentales

Les échantillons coulés étaient des cylindres 11,8x23,6 cm. Six étaient destinés aux mesures de résistance mécanique et de module d'élasticité en compression pour chacune des échéances, à savoir 3 et 28 jours, six pour le retrait et six pour le fluage uniaxial en compression. 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 ° . 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. 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. 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. 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, domaine d'application des BHP. La charge de fluage représente 40 % de la résistance en compression mesurée à 3 jours

3. Résultats 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 3**.

Caractéristiques	Échéance (j)	SiR	SiC	GraC	CaC	GreC	DiC
f_{cm} (MPa)	3	54,5	45,9	52,9	66,7	44,0	42,4
	28	82,2	72,1	76,9	94,7	66,7	69,4
E_{cm} (GPa)	3	30,8	32,7	35,9	36,1	32,8	29,9
	28	38,3	39,8	42,5	47,7	42,9	35,1

Tableau 3. 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 calcaires. Ce résultat pourrait être corrélé à la plus forte résistance de ces granulats. Cependant, cette hypothèse ne peut expliquer les résistances semblables des BHP avec granulats de diabase et de grès aux deux dates alors que, à même proportion de granulats, leurs résistances propres sont très différentes (136 MPa pour la diabase contre 203 pour le grès). L'obtention d'une résistance en compression élevée du béton ne semble donc pas uniquement assujettie à celle du granulat utilisé. La qualité de l'interface granulat-pâte (ITZ) de ciment pourrait jouer un rôle. D'après de Larrard et Belloc, la résistance en compression des bétons est conditionnée principalement par l'interface entre les deux phases pour les classes de résistance faibles à modérées et par la contrainte ultime en compression du granulat dans le cas où elle se rapproche de celle du béton (de Larrard et Belloc, 1997). Dans le cas particulier des granulats calcaires, des études ont montré que les germinations en épitaxie sur la calcite (Farran, 1956, Maso, 1967, Javelas et al., 1975, Chaid et al., 2010) du silicate de calcium hydraté se produisent plus facilement au contact des cristaux de calcite. Ce phénomène engendrerait une liaison forte entre la calcite et les C-S-H au niveau de l'interface, d'où des résistances mécaniques améliorées. 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. 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 les plus forts sont également obtenus pour les BHP avec granulat calcaire. En revanche, alors que les BHP avec granulats de grès et de diabase se caractérisaient par des résistances en compression proches, les écarts de leurs modules d'élasticité sont significatifs. Selon Neville, le module d'élasticité dépend du module d'élasticité des granulats et de la fraction volumique qu'ils occupent dans la matrice cimentaire (Neville, 1996). Ainsi, le module d'élasticité le plus faible est effectivement mesuré pour le DiCH. En revanche, le classement des deux valeurs de modules des granulats disponibles, 97 GPa pour le grès et 80 GPa pour le calcaire ne coïncident pas avec celui des bétons associés, à savoir 47,7 et 42,9 GPa respectivement pour le BHP avec granulats calcaire et de grès. Néanmoins, la quantité supérieure de granulats calcaires pourrait expliquer cette inversion des ordres. Les modules d'élasticité comparables des BHP à base de granulat siliceux dénotent du peu d'influence de la forme sur cette caractéristique mécanique, contrairement à la résistance en compression. Un taux de chargement plus faible pourrait aussi expliquer ce phénomène grâce au maintien de l'intégrité de l'interface pâte-granulat.

3.2. Comportement différé : retraits et fluages spécifiques

La **Figure 1** présente une confrontation des évolutions expérimentales de retrait endogène et total des différents bétons avec les prédictions de l'Eurocode 2 (Eurocode 2, 2006).

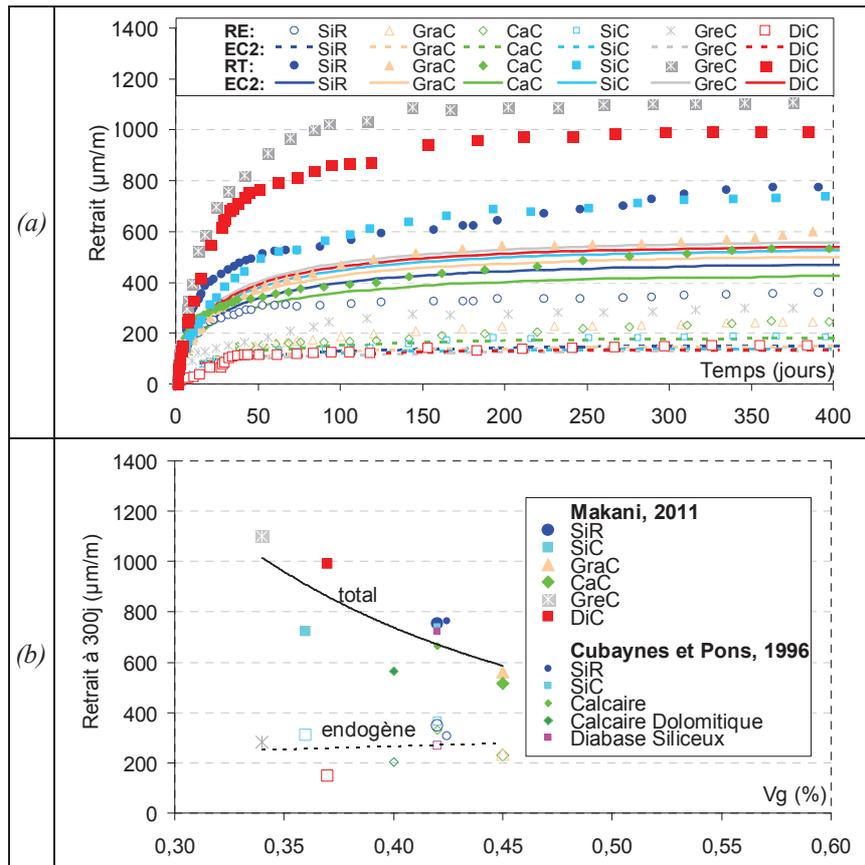


Figure 1. Évolution des retraits endogène (RE) et total (RT) en fonction : (a) du temps et (b) de la proportion volumique des gravillons (V_g)

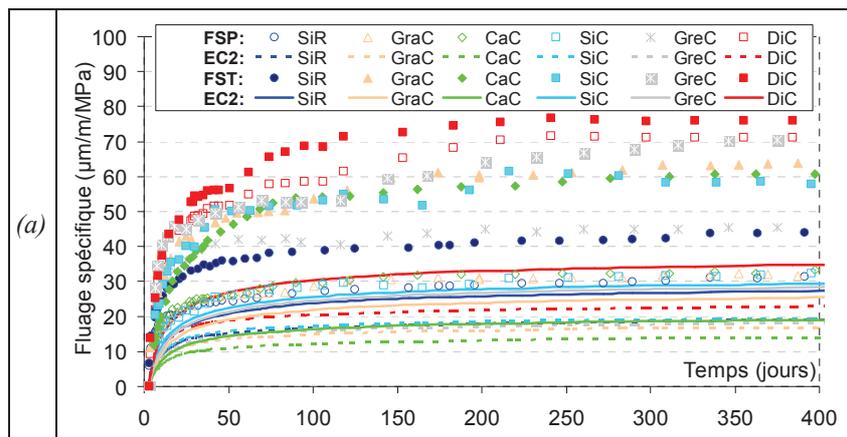
Les évolutions des retraits endogènes sont relativement similaires pour l'ensemble des BHP. Les valeurs des BHP avec granulats de grès et de silice roulés sont toutefois sensiblement supérieures. En dessiccation, des écarts apparaissent. Les BHP avec granulats calcaire et de granite développent de faibles déformations. Ceux avec granulats siliceux présentent des retraits totaux supérieurs. Leurs évolutions semblables ne semblent pas révéler un effet de la forme. Enfin, les granulats de diabase et de grès se distinguent par les plus forts retraits totaux. Ce résultat est à

mettre en parallèle avec les plus faibles résistances en compression obtenues sur ces BHP. Une ITZ de qualité médiocre ainsi qu'une proportion plus faible en granulats pourrait accentuer la part de retrait de dessiccation et réduire la résistance. La confrontation de ces résultats avec des paramètres liés aux granulats tels que la capacité d'absorption ne permet pas de mettre en évidence une influence significative. Ceci peut être dû aux valeurs peu distinctes des coefficients d'absorption.

La **Figure 1-a** met 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.

La **Figure 1-b** montre les déformations de retrait des différents bétons après 300 jours en fonction de la fraction volumique des gravillons utilisés. Les résultats obtenus sur des BHP équivalents en terme de formulations et de matériaux utilisés (Cubaynes et Pons, 1996) sont aussi indiqués. En mode endogène, il est difficile de trouver des corrélations, les écarts étant peu significatifs. En revanche, les déformations de retrait total semblent diminuer lorsque la proportion volumique des granulats augmente. Les granulats restreindraient la contraction de la pâte. Cet effet serait d'autant plus effectif que l'amplitude de déformation serait grande comme en mode dessiccation. Pour une même nature minéralogique, cette tendance n'est pas forcément toujours nette, comme pour les BHP avec granulats siliceux ou calcaire, reflétant l'effet d'autres facteurs relatifs aux granulats. Ainsi, la qualité de l'interface pourrait réduire le retrait comme le démontre les valeurs plus faibles pour les BHP à base de granulats calcaire.

La **Figure 2** permet de comparer les résultats expérimentaux de fluage spécifique propre et total (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).



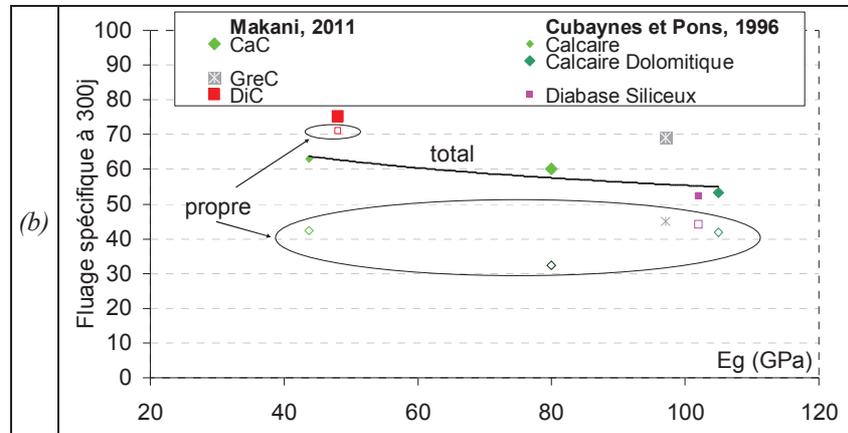


Figure 2. Évolution des fluages spécifiques propre (FSP) et total (FST) des bétons en fonction : (a) du temps et (b) du Module d'élasticité des granulats (E_g)

Comme pour le retrait endogène, les fluages spécifiques propres sont très proches pour la majorité des BHP même si des valeurs un peu plus importantes sont constatées pour les BHP avec granulats de grès et surtout avec ceux de diabase. En mode dessiccation, les BHP avec granulats calcaire, granite, et siliceux concassé présentent des évolutions semblables. Le BHP avec granulats siliceux roulés se distingue par un fluage spécifique total plus faible. Les amplitudes de fluage les plus intenses sont produites par les BHP de grès et de diabase. Ce résultat confirme les déformations supérieures de retrait total observées pour ces deux matériaux. Ce phénomène semble concordant avec l'hypothèse selon laquelle le fluage de dessiccation constitue une part complémentaire de retrait de dessiccation. Comme pour le retrait total, le comportement de ces deux BHP peut être associé à leur proportion plus faible en granulats et à une interface pâte-grulats de qualité médiocre. Enfin, l'Eurocode 2 sous-estime le fluage spécifique pour toutes les configurations (**Figure 2-a**) et démontre des imprécisions en n'intégrant que les paramètres de résistance en compression, module d'élasticité du béton et retrait de dessiccation.

La **Figure 2-b** montre les valeurs de fluage spécifique des différents bétons obtenues à 300 jours en fonction du module d'élasticité des granulats pour lesquels les essais de caractérisation mécanique ont pu être réalisés (résultats issus de notre étude et des travaux de Cubaynes et Pons (Cubaynes et Pons, 1996)). En mode endogène, les écarts entre les valeurs de fluage propre spécifique sont faibles comme pour le retrait. On constate dès lors peu d'effet du module d'élasticité, notamment pour les granulats calcaires, bien que leurs modules d'élasticité soient très différents. En condition dessiccation, l'influence du module d'élasticité semble plus claire, notamment pour une même nature minéralogique (calcaire et diabase). En revanche, le BHP avec granulats de grès se caractérisant par le module d'élasticité le plus élevé, développe un important fluage spécifique, bien qu'inférieur à celui du BHP avec

granulat de diabase. La proportion plus réduite en granulat pour ces deux BHP peut aller dans le sens d'un fluage supérieur. Dans le cas du BHP à base de granulat de grès, on peut avancer l'hypothèse d'un gradient de déformation entre pâte et granulat, lié aux différences de rigidité des deux phases, qui provoquerait une microfissuration. Cet endommagement accentuerait les déformations sous charge. Le fluage serait influencé par l'intégrité et la qualité de l'ITZ, comme le montrent les valeurs les plus faibles relevées pour les BHP avec granulats calcaires.

4. Conclusions

Cette étude présente le comportement mécanique instantané et différé de six BHP ne se différenciant que par la nature minéralogique, la forme et la proportion volumique de leurs granulats. Malgré des formulations caractérisées par un même rapport E/L et volume de pâte, les résultats montrent d'importantes différences.

La résistance en compression semble conditionnée par la qualité de l'interface pâte-granulat (ITZ), avec notamment les valeurs plus fortes observées pour le BHP avec granulats calcaires probablement grâce au phénomène d'épitaixie. Ce paramètre paraît moins influent pour les modules d'élasticité, par le taux de chargement moins important (30 % de la résistance à la rupture). On constate que les BHP sont d'autant plus rigides qu'ils incorporent une fraction volumique élevée de granulat de fort module d'élasticité. Toutefois, les modèles actuels confirment cette dernière tendance.

Les évolutions des retraits endogènes sont relativement similaires pour l'ensemble des BHP, avec néanmoins des valeurs supérieures pour les BHP avec granulats de grès et de diabase. En mode dessiccation, les écarts sont plus significatifs avec les valeurs les plus faibles pour les BHP de granulats de granite et calcaire et les valeurs supérieures pour ceux avec granulats de grès et de diabase. Les retraits totaux tendent à augmenter avec la proportion volumique des granulats. Cela démontrerait que le granulat restreint la contraction de la pâte. En outre, comme pour les résistances en compression, la qualité de l'interface pourrait influencer comme l'illustrent les plus faibles retraits totaux des BHP avec granulats calcaires.

Le fluage spécifique propre est quasiment identique pour la plupart des matériaux, avec des amplitudes plus élevées pour les BHP avec granulat de grès et de diabase. En condition de dessiccation, les écarts sont plus importants. Les BHP avec granulat de grès et de diabase se déforment également davantage, confirmant leurs déformations supérieures de retrait total. L'analyse montre que les fluages spécifiques totaux diminuent lorsque le module d'élasticité du granulat augmente. Toutefois, le BHP de grès se singularise par un fluage spécifique total intense malgré une grande rigidité de ce granulat. Ce résultat, à modérer du fait de la proportion volumique inférieure, pourrait provenir d'un endommagement par microfissuration à l'interface pâte-granulat dû à un gradient de déformation entre les deux phases de rigidité très différentes. L'intégrité de l'ITZ, qui peut également être liée à sa qualité et par la nature des granulats, réduirait le fluage total, comme le montrent les plus faibles valeurs obtenues pour le BHP avec granulats calcaires.

De manière générale, 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.

5. Bibliographie

- Alexander M. G. « Aggregates and the Deformation Properties of Concrete ». *ACI Materials Journal*. 1996, Vol. 93, no. 6, n°6, p. 569-577.
- Chaid R., Jauberthie R., Boukhaled A. « Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons ». *Lebanese Science Journal*. 2010, Vol. 11, n°1, p. 91-103.
- Cubaynes J. F., Pons G. « 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, 1996.
- de Larrard F., Belloc A. « The Influence of Aggregate on the Compressive Strength of Normal and High-Strength Concrete ». *ACI Materials Journal*. 1997, Vol. 94, n°5, p. 417-426.
- Eurocode 2. *EN 1992-2, Design of concrete structures. Concrete bridges*. 2006.
- Farran J. « Contribution minéralogique à l'étude de l'adhérence entre les constituants hydratés des ciments et les matériaux enrobés ». *Revue des Matériaux de Construction*. 1956, n°490-491, 155-172.
- Javelas R., Maso J. C., Ollivier J. P., Thenoz B. « Observation directe au microscope électronique par transmission de la liaison pâte de ciment-granulats dans des mortiers de calcite et de quartz ». *Cement and Concrete Research*. 1975, Vol. 5, n°4, p. 285-293.
- Maso J. C. *La nature minéralogique des agrégats, facteur essentiel de la résistance des bétons à la rupture et à l'action du gel*. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier, Toulouse, 1967.
- Neville A. M. *Properties of Concrete*. Fourth and Final Edition, John Wiley & Sons, New-York, USA, 1996. 546 p.
- Pons G., Torrenti J. M. *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, 2008.
- RILEM. « Recommandations RILEM CPC4 Compression test on concrete ». *Materials and structure*. 1972a, Vol. 6, n°30.
- RILEM. « Recommandations RILEM CPC8, Modulus of elasticity of concrete in compression ». *Materials and Structures*. 1972b, Vol. 6, n°30, p. 507-512.