

17^e édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

IFSTTAR, Marne-la-Vallée, France
7 et 8 juillet 2016

UTILISATION DE GRANULATS DE BETON RECYCLES – INFLUENCE SUR LE COMPORTEMENT DIFFERE DU BETON

C. De Sa^A, F. Benboudjema^A

A Laboratoire de Mécanique et Technologie LMT, ENS Cachan, Université Paris-Saclay, Cachan, France

RÉSUMÉ : Le travail présenté ici vise à étudier et prédire numériquement la susceptibilité à la fissuration par déformation libre restreinte (thermique et hydrique) de différents bétons réalisés à l'aide de granulats recyclés, avec différents taux de substitution. Ce travail s'inscrit dans le cadre du Projet National RECYBETON.

Le séchage, l'hydratation, les déformations thermiques et hydriques, de fluage propre et de dessiccation et l'évolution des propriétés en fonction du degré d'hydratation ont été pris en compte dans les simulations réalisées. Le cas d'une restreinte totale et un chantier expérimental de dalles de parking en béton de granulats recyclés ont servi de base d'étude. Cette étude montre la possibilité d'utiliser des granulats recyclés sans risque de fissuration dans le cas d'une application de type de dallage. Il est également montré que le béton présentant le plus fort taux de substitution est le plus susceptible vis-à-vis de la fissuration par restreinte des déformations différées. Néanmoins, il est également montré que le béton de granulats naturels n'est pas le moins susceptible de fissurer par rapport à un béton de granulats recyclés.

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte général

Les problématiques climatiques actuelles nous amènent à repenser nos conceptions de bâtiments, représentant 40% de la consommation d'énergie primaire française. L'utilisation de granulats recyclés fait partie d'un outil stratégique intéressant pour réduire la consommation associée à la phase de construction d'un bâtiment. Or, ceux-ci ne représentent pour l'instant que 3,3% environ des 446 millions de tonnes de granulats produits par an et sont essentiellement mis en œuvre dans des applications routières. Les verrous scientifiques, technologiques et réglementaires actuelles empêchant une utilisation plus importante de bétons de granulats recyclés dans le bâtiment sont associés à la méconnaissance de leur comportement à court, moyen et long terme, à une mauvaise maîtrise de ce fait du taux de granulats maximal admissible et au manque de guide de recommandation sur leur utilisation.

Le Projet National RECYBETON (www.pnrecybeton.fr) mis en place en 2012 cherche à répondre à ces verrous. Plusieurs chantiers expérimentaux ont été associés aux travaux développés durant ce projet, afin de tester et valider les recherches élaborées dans le cadre du PN.

1.2 Comportement des bétons de granulats recyclés sous séchage

La piste du recyclage des granulats dans les bétons a déjà été explorée depuis quelques décennies (Bernier, 1983 ; Hansen, 1992). Néanmoins, il subsiste encore un certain nombre de freins à son développement. Ces granulats sont en effet moins résistants, ont une demande en eau plus élevée, sont plus poreux. Ces modifications de propriétés sont dues à la présence dans ces granulats d'une proportion de pâte résiduelle provenant de l'ancien béton qui modifie donc la structure du nouveau béton (cf. Figure 1). Tous ces facteurs peuvent affecter le comportement des structures en béton de granulats recyclés face aux sollicitations auxquelles elles vont être soumises. Il est notamment nécessaire d'étudier la susceptibilité à la fissuration par déformation libre/restreinte thermique et hydrique de ces bétons.

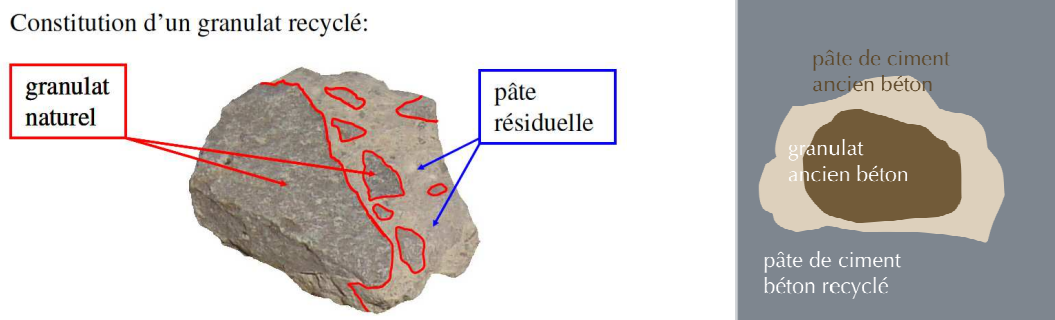


Figure 1. Constitution d'un granulat recyclé (Dao, 2012) et d'un béton de granulat recyclé.

Les phénomènes mécaniques contribuant à la fissuration sous séchage du béton sont liés à deux échelles :

- A l'échelle macroscopique :
 - Le mécanisme d'auto-contraintes lié au gradient hydrique : le séchage en surface induit des gradients hydriques, de déformations et donc de contraintes au sein de la structure, (Bazant et al, 1982), responsables de la fissuration superficielle de ces structures,
 - La restreinte « hydrique » : le retrait de dessiccation est empêché par un élément externe (e.g. le sol) générant des contraintes de traction et pouvant conduire à une fissuration traversante et/ou à un décollement,
- A l'échelle mésoscopique, le retrait de la pâte de ciment est empêché par les granulats naturels (qui ne subissent pas de dessiccation), entraînant une fissuration à l'interface entre ces deux matériaux (une décohésion entre la pâte de ciment et les granulats et le développement de fissures intergranulaires (Perraton et al, 2001)).

Les observations et conclusions faites sur des bétons de granulats naturels en terme de fissuration vis à vis du séchage peuvent dans le cas d'incorporation de pourcentages plus ou moins importants de granulats recyclés être remises en cause. En effet, le volume de pâte de ciment des bétons de granulats recyclés est plus important d'où un retrait plus important, mais le volume de granulats naturels étant alors plus faible, la restreinte est en échange moins grande.

Différentes études expérimentales ont été menées dans le cadre du PN RECYBETON permettant de caractériser le comportement à l'échelle du matériau et à l'échelle de la structure de différentes compositions de béton, contenant différentes fractions volumiques en granulat et sable recyclé. Un chantier expérimental de dalles de parking situé à Chaponost a permis d'observer sur structure réelle les effets du séchage sur le comportement de la structure.

L'objectif des travaux numériques menés au LMT et présentés ici est de modéliser le comportement des dalles de parking de ce chantier expérimental et de prédire leur risque de fissuration éventuel vis à vis du séchage.

2. PRESENTATION DES TRAVAUX REALISES

2.1 Chantier expérimental de Chaponost

Le chantier expérimental de Chaponost a consisté en la réalisation d'environ 400 m² de dalles de parking en béton armé. Six zones ont été définies correspondant respectivement à 6 formulations de béton de granulats recyclés testées (cf. Figure 2). Des joints sont réalisés par sciage tous les 5 m sur l'épaisseur de la dalle. Un suivi visuel après coulage de ces dalles a été réalisé, qui a révélé une fissuration au niveau des joints de dalle, sans fissuration surfacique superficielle des dalles (cf. Figure 3).

% Sable 0/4 % Granulat 4/20	0	30	100
0	Béton référence granulats roulés	30S-0G	
30	0S-30G	30S-30G	
100	0S-100G		100S-100G

Figure 2. Formulations des 6 zones de dallage du chantier expérimental de Chaponost. Désignation des formulations: XS-YG : X% de substitution en sable et Y% de substitution en granulats.



Figure 3. Fissuration observée au niveau des joints de sciage sur les dalles.

2.2 Modélisation

Une modélisation éléments finis thermo-hydro-mécanique faiblement couplée est proposée pour les simulations réalisées. N'ayant pas d'informations sur l'hydratation du matériau, le choix a été fait de ne pas considérer de modèle d'hydratation complet mais de prendre en compte l'évolution des caractéristiques mécaniques et du fluage au cours du temps dues à l'hydratation. Ainsi, les effets de l'hydratation sur le séchage (isotherme de désorption, perméabilité...) n'ont pas été pris en compte. Ce choix se justifie également par le fait que la cinétique de séchage est lente.

2.2.1 Modèle thermo-chimique

L'évolution de l'hydratation est obtenue par l'utilisation d'une affinité chimique (Regourd et Gautier, 1980 ; Lackner et Mang, 2004) dans une notation proposée par Ulm et al. (Ulm et Coussy, 1998) :

où E_a est l'énergie d'activation [J.mol^{-1}], R est la constante des gaz parfaits $8,3145 \text{ [J.K}^{-1}\text{mol}^{-1}]$, T est la température [K], ξ est le degré d'hydratation et $\tilde{A}(\xi)$ est l'affinité chimique normalisée [s^{-1}].

Les évolutions des champs de température sont obtenues à partir de l'équation de la chaleur qui inclue un terme source représentant le dégagement de chaleur de la réaction d'hydratation:

(2)

où L est la chaleur latente d'hydratation [J.m^{-3}], k est la conductivité thermique du béton [$\text{W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$] et C est la capacité thermique du matériau [$\text{J.m}^{-3}\text{.K}^{-1}$] qui peut être prise constante (Waller, 1999) ou fonction de la température et du degré d'hydratation. Compte tenu de la faible épaisseur de la dalle de parking, le terme lié au dégagement de chaleur lors de l'hydratation a été négligé.

2.2.2 Modélisation du séchage

Le séchage est un phénomène complexe. De multiples mécanismes sont mis en jeu simultanément: perméation, diffusion, convection, sorption/désorption. Dans ce travail, nous nous proposons de prendre en compte uniquement le mécanisme de perméation de l'eau liquide qui semble prédominant lors du séchage à température ambiante pour ce type de matériau. Ainsi, l'utilisation de la conservation de la masse d'eau liquide conduit à la résolution de l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_l \theta) + \nabla \cdot (\rho_l k_{rl} \nabla p_c) = 0$$

(3)

avec p_c la pression capillaire, k_{rl} la perméabilité relative à l'eau liquide, K la perméabilité intrinsèque, μ_l la viscosité dynamique de l'eau liquide et ϕ la porosité accessible à l'eau.

L'isotherme de désorption (courbe teneur en eau en fonction de l'humidité relative, ramenée à la courbe S_i vs p_c) et la perméabilité relative à l'eau liquide sont décrites à l'aide du modèle de van Genuchten (1980) (a , b étant des paramètres matériaux) :

$$S_i = \frac{1}{1 + b(p_c/a)^n}$$

(4)

$$k_{rl} = S_i^{2n+2}$$

(5)

La pression capillaire est reliée à l'humidité relative h via la loi de Kelvin :

$$p_c = \frac{\rho_l RT}{M_l} \ln(h)$$

(6)

Où M_l la masse molaire de l'eau, ρ_l la masse volumique de l'eau liquide.

2.2.2 Modélisation des déformations différées

Retrait endogène : Les résultats de la littérature montrent une évolution du retrait endogène quasiment linéaire par rapport au degré d'hydratation à partir d'un seuil de percolation (Laplante, 1993 ; Mounanga et al., 2006). La modélisation de l'évolution du retrait endogène (ε_{au}) choisie est donc la suivante (Ulm et Coussy, 1998) :

$$\varepsilon_{au} = \alpha (\xi - \xi_c)$$

(7)

Fluage de dessiccation: Le modèle proposé par Bažant et Chern (1985) a été considéré pour la prédiction des déformations de fluage de dessiccation intrinsèque :

(14)

où ϵ_{dc} est la déformation de fluage de dessiccation et λ_{dc} est un paramètre matériau.

2.2.3 Modélisation du comportement mécanique induit

Évolution des propriétés mécaniques: L'augmentation du module d'Young E et la résistance en traction f_t sont modélisées par les relations suivantes (De Schutter, 1999 ; Stefan et al., 2010) :

$$E(\xi) = E_{\infty} \bar{\xi}^{a_E}$$

$$f_t(\xi) = f_{t\infty} \bar{\xi}^{a_{ft}}$$

(15)

où $f_{t\infty}$ est la résistance en traction finale (i.e. quand $\xi = \xi_{\infty}$), E_{∞} est le module d'Young final (i.e. quand $\xi = \xi_{\infty}$), a_E et a_{ft} sont les paramètres gouvernant les évolutions des lois.

Un modèle d'endommagement est utilisé pour caractériser de manière indirecte l'évolution de la fissuration :

(16)

avec D la variable d'endommagement comprise entre 0 (matériau sain) et 1 (matériau complètement fissuré). Physiquement, cette variable D est définie comme le rapport entre la surface des microfissures et celle de la section totale du matériau et $\tilde{\sigma}$ est la contrainte effective, qui ne s'applique alors plus que sur la partie non endommagée.

En considérant un découplage des déformations dues aux différents phénomènes (fluage, retrait, évolution de la température,...), le calcul de la déformation élastique peut se faire à partir de l'équation suivante :

(17)

où ϵ , ϵ_{bc} , ϵ_{dc} , ϵ_{ds} , ϵ_{au} , ϵ_{th} sont respectivement les déformations totales, de fluage propre, de fluage de dessiccation, de retrait de dessiccation, de retrait endogène et thermique.

Les paramètres à identifier sont nombreux. Certains paramètres du modèle ont été calibrés à partir de simulations d'essais effectués dans les laboratoires Sigma Béton (e.g. essais de retrait libre et de retrait à l'anneau pour toutes les formulations testées) et GeM (essais à l'anneau pour la formulation 0S-100G) qui ont également participé au PN RECYBETON. Les données manquantes ont été extrapolées à l'aide des résultats de la littérature associée à ces problématiques.

2.3 Conditions de simulation des dalles

2.3.1 Maillage

Les dalles du chantier de dimensions initiales 5 m par 5 m ont été modélisées en 3 dimensions, et seul un quart de dalle a été maillé pour des raisons de symétrie (voir Figure 4). Le sol est également maillé sur une profondeur de 1m sous la dalle.

2.3.1 Conditions aux limites

La face supérieure de la dalle, ainsi que les joints, sont soumises à l'évolution de la température et de l'humidité relative environnante (e.g. Figure 5a). Ne disposant pas de mesures d'humidité/température sur le lieu même du chantier, des données météorologiques de Lyon ont été considérées pour estimer celles-ci. La Figure 5b présente par exemple la variation d'humidité relative à Lyon imposée. On peut observer des fluctuations très importantes de l'humidité relative constatées durant cette période d'observation considérée, avec néanmoins un minimum observé aux alentours de 20% d'humidité relative et une humidité relative moyenne importante, de l'ordre de 65%. Le sol n'est quant à lieu pas soumis à des variations d'humidité relative.

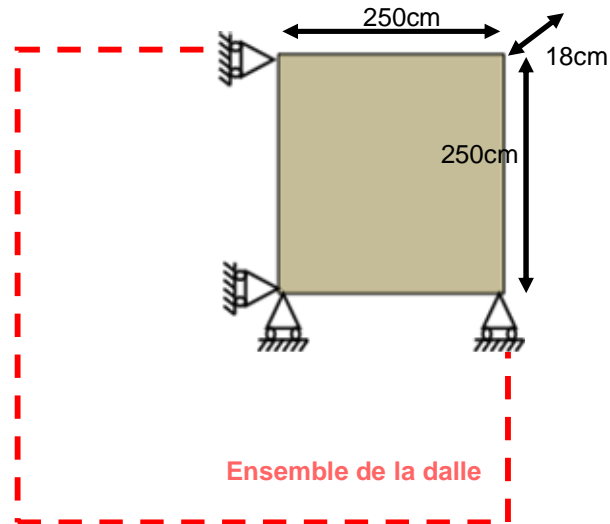


Figure 4. Maillage d'un quart de dalle de parking du chantier Chaponost.

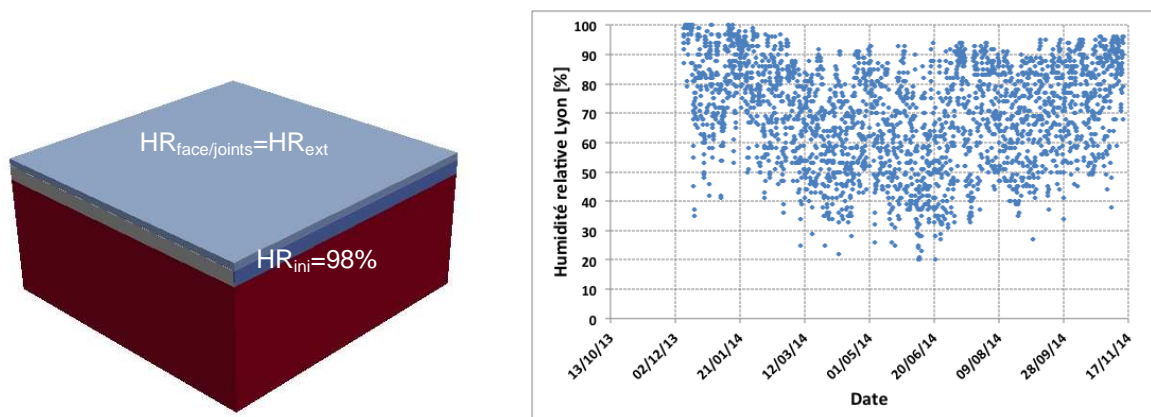


Figure 5. a) Conditions aux limites hygrométriques imposées sur le quart de dalle ; b) Evolution de l'humidité relative extérieure HR_{ext} durant la période d'étude.

3. RESULTATS DE SIMULATION

3.1 Simulation de la dalle de parking

Un exemple de champs de température et d'avancement de l'hydratation est reporté sur la Figure 6 à 20 jours. On peut constater que le degré d'hydratation est quasi homogène dans l'épaisseur de la dalle malgré les variations de température du fait de la relative faible épaisseur de la dalle de parking.

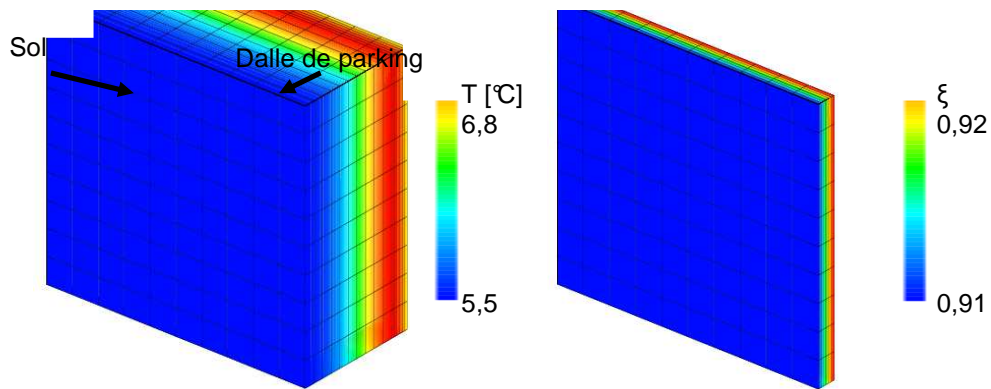


Figure 6. Champs de température et avancement de degré d'hydratation à 20 jours (béton 0S-100R).

Le champ d'endommagement résultant de la sollicitation thermo-hydrigue environnante imposée pour les dalles du chantier expérimental est reporté Figure 7 pour tous les bétons étudiés en fin de calcul dans le cas où les déformations thermiques et hydriques sont prises en compte. Comme cela était attendu, une fissuration se produit au niveau de l'entaille (joint) de la dalle de parking. Aucune différence significative n'est obtenue entre les différentes formulations.

Aucune autre fissuration n'est visible sur la structure, cela témoigne du rôle prépondérant joué par le joint. On n'observe pas de fissuration en surface. Cela est dû à la faible rigidité du substrat, la valeur importante de l'humidité relative moyenne du site (cf. Figure 5).

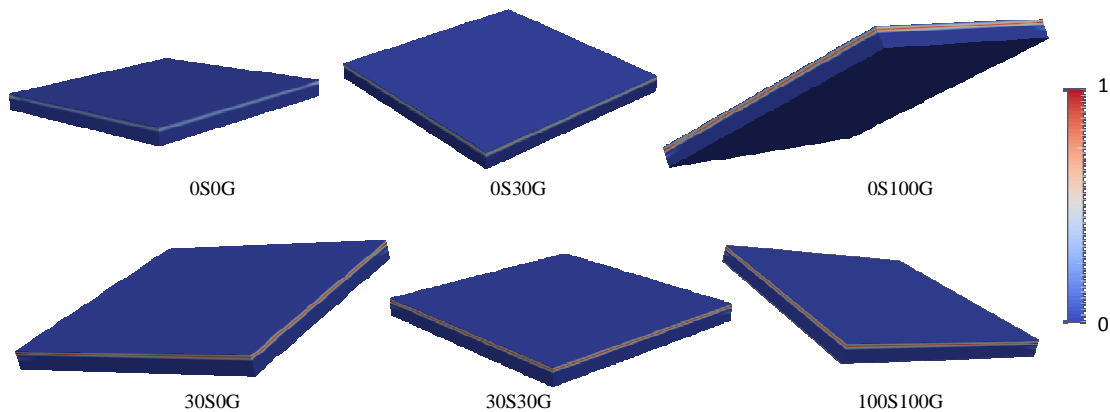


Figure 7. Champs d'endommagement D en fin de calcul dans le cas où les déformations thermiques et hydriques sont prises en compte.

3.1 Conditions de restrainte totale

Pour discriminer quantitativement les différentes formulations, des simulations de restrainte totale des dalles en béton, plus restrictives ont été menées, avec une analyse élastique en configuration unidimensionnelle (cf. Figure 8). On suppose alors que la déformation de retrait de dessiccation est uniforme. Les contraintes sont alors uniformes. On peut définir l'indice de fissuration sous la forme :

$$\text{---} \quad (18)$$

Où σ_I est la contrainte principale maximale. Si cet indice est supérieur à 1, cela signifie qu'il y aura fissuration.

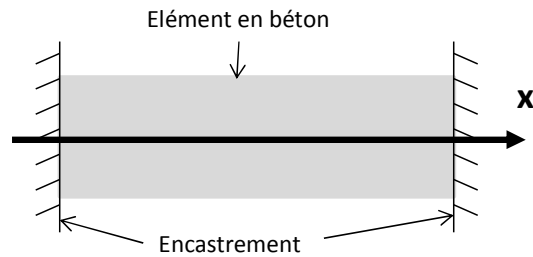


Figure 8. Restreinte totale d'un élément en béton (par exemple : un buton entre 2 parois moulées, un plancher entre 2 voiles considérés comme infiniment rigides).

L'évolution de l'indice de fissuration est reportée sur la Figure 9, pour les 6 compositions de bétons. On constate que le béton de granulats recyclés à 100 % de taux de substitution est celui qui à l'indice de fissuration le plus élevé, et donc le plus susceptible de fissurer par retrait gêné, même si c'est celui qui possède le fluage (propre et dessiccation) le plus important. L'écart est très important par rapport aux autres bétons. Par contre, il n'était pas forcément attendu que le béton de référence (sans granulats recyclés) soit plus susceptible de fissurer que d'autres bétons à base de granulats recyclés (le 0S-100G et le 30S-0G). Cela est dû au fait que ces 2 bétons possèdent une résistance en traction plus élevée, un module d' Young plus faible et un fluage plus important que le béton de référence. Notons tout de même que l'écart reste faible et qu'il faut également considérer la probable plus grande dispersion de la résistance en traction.

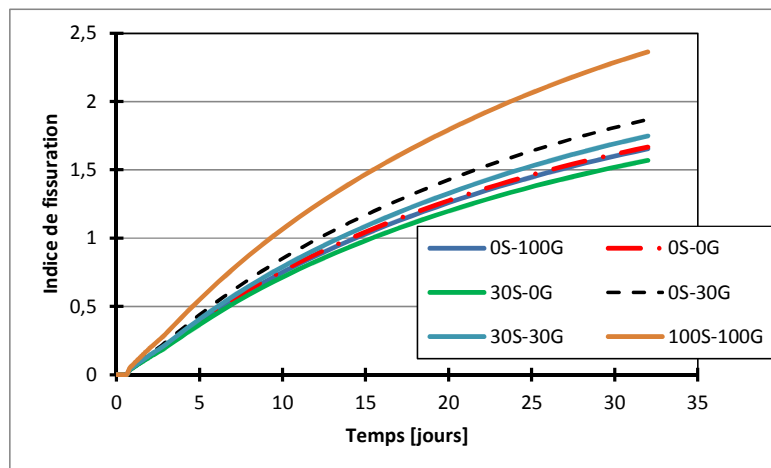


Figure 9. Évolution de l'indice de fissuration pour les différentes formulations dans le cas d'une restrainte totale. Seul le retrait de dessiccation est pris en compte de façon uniforme.

4. CONCLUSIONS

Une étude approfondie de la susceptibilité à la fissuration par retrait restreint de différents bétons à base de granulats recyclés a été menée. Ces résultats ont permis l'identification de nombreux paramètres intervenant dans la modélisation des déformations différées, et du risque de fissuration en cas de restrainte : hydratation, séchage, retraits, fluages et évolutions des propriétés mécaniques. Il a été possible de dégager plusieurs résultats intéressants en se basant sur le chantier de Chaponost et sur le cas d'une restrainte idéale :

- Les joints de dilatation ont joué parfaitement leur rôle, une fissuration s'y produit, permettant ainsi de réduire la restrainte globale ;
- Conformément aux résultats obtenus dans le laboratoire Sigma béton, le béton ayant le plus fort taux de substitution (tous les granulats sont recyclés) est le plus susceptible de fissurer par retrait

géné. Ce béton a d'ailleurs un indice de fissuration bien plus élevé que les autres bétons (qui ont des indices assez proches) ;

- Le béton de référence n'est pas le béton le moins susceptible de fissurer par retrait généré. Cela n'est pas prévisible au premier abord. En effet, bien qu'il ait le plus faible retrait, il a le plus fort module d'Young, une résistance en traction un peu plus faible que d'autres bétons à base de granulats recyclés (en partie) et le plus faible fluage. Ce résultat est à prendre avec précaution car nous n'avons pas toutes les données et les bétons (hors le 100 % recyclé) ont une susceptibilité à la fissuration proche. Il est à noter également l'importante variabilité sur la résistance en traction.

Cette étude permet de valider les capacités de prédiction numérique du comportement de structures en béton de granulats recyclés. De plus, pour des utilisations du type dallage, une substitution totale en granulats recyclés semble être envisageable sans risque de fissuration superficielle. Dans le cadre du PN RECYBETON, d'autres chantiers expérimentaux plus ambitieux sont menés actuellement dans le cadre d'utilisation en bâtiment pour valider ces premiers résultats prometteurs et optimiser les taux de substitution en granulats et sable recyclés pour le bâtiment.

5. REFERENCES

- Bažant, Z.P. et Chern, J.C. (1985) Concrete Creep at Variable Humidity: constitutive law and mechanism, *Materials and Structures*, 18: 1-20.
- Bažant, Z.P. et Raftshol, W.J. (1982) Effect of cracking in drying and shrinkage specimens, *Cement and Concrete Research*, 12: 209-226.
- Bernier, G. (1983) *Le recyclage de béton sous forme de granulats*, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France.
- Dao, D. T. (2012) *(Multi)-recyclage du béton hydraulique*, Thèse de doctorat, IFSTTAR, Centre de Nantes, France.
- De Schutter, G. (1999) Hydration and temperature development of concrete made with blast-furnace slag cement, *Cement and Concrete Research*, 29: 143-149.
- Hansen, T. (1992) *Recycling of demolished concrete and masonry*, Rilem report 6, E & FN SPON, McGraw Hill, London, England.
- Lackner, R. et Mang, H.A. (2004) Chemoplastic material model for the simulation of early age cracking: From the constitutive law to numerical analyses of massive concrete structures, *Cement and Concrete Composite*, 26: 551-562.
- Laplante, P. (1993) *Propriétés mécaniques des bétons durcissants : analyse comparée des bétons classiques et à très hautes performances*, Collection Etudes et Recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées – série Ouvrages d'Art OA13 –LCPC, Paris, France.
- Mounanga, P., Baroghel-Bouny, V., Loukili, A. et Khelidj, A. (2006) Autogenous deformations of cement pastes: Part I. Temperature effects at early age and micro–macro correlations, *Cement and Concrete Research*, 36: 110-122.
- Perraton, D. et Aïtcin, P.C. (2001) Perméabilité du béton de peau. Le choix du granulats peut-il s'avérer un élément plus déterminant que le rapport E/C ?, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 232: 59-72.
- Regourd, M. et Gautier, F. (1980) Comportement des ciments soumis au durcissement accéléré, *Annales de l'ITBTP*, 387.
- Stefan, L., Benboudjema, F., Torrenti, J.M. et Bissonnette, B. (2010) Prediction of elastic properties of cement pastes at early ages, *Computational Materials Science*, 47: 775-784.
- Torrenti, J.M. et Benboudjema, F. (2005) Mechanical threshold of concrete at an early age, *Materials and Structures*, 38: 299-304.
- Ulm, F.-J. et Coussy, O. (1998) Couplings in early-age concrete: From material modeling to structural design, *International Journal of Solids and Structures*, 35: 4295-4311.
- Waller, V. (1999) *Relations entre la composition des bétons, exothermie en cours de prise et résistance en compression*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.