

---

# Etude des bétons recyclés à l'état frais sous séchage sévère

**Souche Jean-Claude<sup>1</sup>, Salgues Marie<sup>1</sup>, Garcia-Diaz Eric<sup>1</sup>, Devillers Philippe<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Ecole des Mines d'Alès (EMA), Centre des Matériaux des Mines d'Alès (C2MA), Alès, France (6 Avenue de Clavières 30319 ALES cedex, jean-claude.souche@mines-ales.fr)

<sup>2</sup> Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier (ENSAM), Montpellier, France

---

*RÉSUMÉ. Le programme national français RECYBETON vise à déplacer les limites scientifiques relatives à l'utilisation de granulats recyclés dans les bétons. Les granulats recyclés sont composés de deux parties: les granulats naturels du béton de première génération et le mortier qui adhère à sa surface. Le transfert de l'eau par la porosité de l'ancien mortier pourrait avoir un impact sur les propriétés du béton au jeune âge notamment sur son retrait plastique et sa fissuration. Le but de l'étude est de comprendre le mécanisme de vieillissement du béton frais recyclé dans des conditions de séchage sévères. Quatre bétons recyclés et deux bétons naturels sont étudiés pendant les 2 premières heures sous séchage contrôlé. Les résultats obtenus mettent en évidence la bonne relation entre la fissuration et les valeurs d'entrée d'air pour les bétons recyclés qui ont un comportement similaire aux bétons naturels.*

*ABSTRACT. The French National Program RECYBETON aims to move the scientific boundaries relative to the use of recycled aggregates into concrete. Recycled aggregates are composed of two parts: the natural aggregates of the first generation concrete and the mortar that adheres to its surface. Water transfer through the porosity of the old mortar could have an impact on properties of concrete at early age as plastic shrinkage and cracking. The aim of the study is to understand the aging mechanism of the fresh recycled concrete under severe drying conditions. Fours recycled concretes and two standard natural concretes are studied during the first 2.5 hours under controlled drying. The obtained results highlight the good relationship between cracking and air entry values for recycled concretes which have a similar behavior than natural ones.*

*MOTS-CLÉS: Bétons recyclés, séchage sévère, retrait plastique, fissuration, pression capillaire, valeur d'entrée d'air.*

*KEY WORDS: Recycled concretes, severe drying conditions, plastic shrinkage, cracking, capillary pressure, air entry value.*

---

---

## 1. Introduction

Dans le contexte du développement durable, la réutilisation des déchets de construction et de démolition est nécessaire pour préserver les ressources naturelles non renouvelables et pour dégager les sites de gestion des déchets. C'est l'objectif du programme national français RECYBETON (PN RECYBETON, 2011). Cependant, la réutilisation des granulats recyclés dans le béton doit lever quelques obstacles liés à la constitution des granulats recyclés composés des granulats naturels du béton de première génération et du mortier adhérent à sa surface. La teneur en mortier est comprise entre 20 et 60% en masse selon la taille des granulats (Hansen, 1992) (Brito and Alves, 2010) (Poon and Chan, 2006). Ainsi, les granulats recyclés ont une densité plus faible que celle des granulats naturels (Sanchez de Juan and Alaejos Gutierrez, 2004) sont plus friables (Quebaud, 1996) et sont plus poreux (Brito and Alves, 2010) (Etxeberria larranaga, 2004) (DAO, 2012) (Pepe, 2014).

L'ancien mortier modifie la liaison entre la pâte de ciment et les granulats (Ryu, 2002) (Otsuki et al., 2003) (Xiao et al., 2012), l'absorption d'eau des granulats recyclés (Bendimerad et al., 2015) (Ferreira et al., 2011) (Gomes et al., 2009) (LE, 2015) (Salgues et al., 2016), l'ouvrabilité des bétons recyclés (Kou, 2006) (Yong and Teo, 2009) (Xiao et al., 2012) ainsi que leur comportement mécanique.

En termes de comportement mécanique, les résistances à la compression diminuent avec le taux de substitution de granulats naturels par des granulats recyclés. Il a été démontré que l'utilisation de 100% de granulats recyclés entraîne une perte de résistance de 25%, tandis qu'un remplacement partiel de granulats naturels par des granulats recyclés (moins de 30%) a peu d'impact sur les résistances à la compression (Brito and Alves, 2010) (Li, 2008) (Sanchez de Juan and Alaejos Gutiérrez, 2004) (Xiao et al., 2012) (Pepe, 2014). Il est possible d'obtenir des résistances à la compression similaires avec des bétons recyclés (Chakradhara Rao et al., 2010) (Li, 2008) en ajustant le rapport Eau/Liant (E/L) des bétons recyclés (Hansen, 1992), le superplastifiant, la quantité de ciment (Xiao et al., 2012) et le processus (saturation des granulats, eau ajoutée, malaxage, ...) (Domingo et al., 2009) (Gomes et al., 2009) (Tam et al., 2005).

A l'état frais, lorsque la consolidation est terminée, le principal phénomène physique est le développement de la pression capillaire conduisant à la fissuration (Radocea, 1994). En fonction des conditions de séchage, les bétons recyclés peuvent avoir des performances inférieures ou supérieures à celles des bétons naturels (Corinaldesi and Moriconi, 2010) (Bendimerad et al., 2016) (Bendimerad et al., 2015) (Souche, 2015b). Les effets de cure interne dus à la libération d'eau retenue par les granulats recyclés dans la pâte de ciment ont été mis en évidence (Corinaldesi and Moriconi, 2010) (Haejin, 2009) (Haejin, 2009) (Souche et al., 2015) (Salgues et al., 2016). Dans ce contexte, il est nécessaire de bien comprendre le mécanisme de vieillissement du béton recyclé à l'état frais en dessiccation.

La pression capillaire est identifiée comme le paramètre clé qui peut décrire le ressuage et le retrait plastique dans le béton au jeune âge (Souche, 2015b). La pression capillaire suit la loi de Laplace ; son développement est dû à la formation de ménisques à la surface du béton et dépend de l'hydratation du ciment et de la cinétique de séchage (Mbemba et al., 2013). En général, les bétons soumis à une atmosphère de séchage contrôlée connaissent trois périodes de dessiccation (Leonard, 2002) la période initiale où l'eau de ressuage à la surface supérieure s'évapore, la période à taux constant lorsque les ménisques sont localisés sur la surface supérieure où l'eau s'évapore, la période de chute quand les ménisques migrent de la surface vers le cœur du béton (Scherer, 1990) (Mbemba et al., 2013) (Mbemba, 2010). Il existe une compétition entre le débit d'eau ressuant et le séchage (Josserand, 2002). La pression capillaire dans les ménisques induit une tension dans la phase liquide et une consolidation du squelette solide. En effet, la tension dans le fluide crée une contrainte de compression dans le squelette qui tend à rapprocher les grains solides (Scherer, 1990) (Mbemba et al., 2013) (Mbemba, 2010).

Le développement des déformations sous séchage se fait en deux étapes. Tout d'abord, le degré de saturation reste proche de 100% et les déformations mesurées sont grandes et irréversibles. Deuxièmement, les déformations deviennent plus faibles et la fissuration est due aux contraintes limites ou aux gradients d'humidité. Dans cette seconde étape, même si le degré de saturation commence à diminuer légèrement, il reste proche de 100% jusqu'à la fissuration (Peron et al., 2009). Sous séchage sévère, la pression capillaire (en valeur absolue) et l'augmentation de retrait résultante augmentent (Souche, 2015a) (Wittmann, 1976). Enfin, la fissuration des bétons naturels se produit à un point critique, à la fin de la période de séchage à taux constant lorsque la pression d'entrée d'air est atteinte (Souche, 2015a) (Scherer, 1990) (Mbemba et al., 2013) (Slowik et al., 2008). Pendant la phase plastique, jusqu'à la fissuration, le béton frais est proche de la saturation (Mbemba et al., 2013) (Slowik et al., 2009).

Au temps d'entrée de l'air, la fissuration apparaît dans une zone drainée qui devient un point faible et où se développe de fortes contraintes dans le béton (Slowik et al., 2008). En raison de la relation contrainte-déformation (Roziere et al., 2015) à très jeune âge, les surpressions locales conduisent à l'initiation de la fissure (Scherer, 1990) (Mbemba et al., 2013) (Slowik et al., 2008) (Zeitschrift et al., 1968). Ce comportement est bien modélisé et décrit en utilisant un modèle d'élément distinct 2D (Slowik et al., 2009) (Slowik and Ju, 2011). La taille des particules et la taille des pores de la pâte de ciment sont les principaux facteurs à connaître pour estimer la pression d'entrée d'air (Souche, 2015a) (Scherer, 1990) (Slowik et al., 2009) (Slowik and Ju, 2011).

Des résultats similaires sont obtenus pour les sols à grains fins (Peron et al., 2009) (Fredlund and Xing, 1994) (Devilleers and El Youssoufi, 2009). Pour les sols à grains fins, il est possible de tracer la courbe de caractéristiques sol-eau qui est définie comme la relation entre la teneur en eau et la pression capillaire, qui est la différence entre la pression de l'air poreux et la pression de l'eau interstitielle (Fredlund and Xing, 1994). La valeur d'entrée d'air est la valeur de la pression capillaire lorsque l'air commence à pénétrer dans les pores les plus grossiers du sol (Peron et al., 2009) (Fredlund and Xing, 1994) (Devilleers and El Youssoufi, 2009). Lorsque l'air pénètre dans les pores du sol, des zones drainées localisées apparaissent et créent des défauts ainsi que l'initiation de fissures (Scherer, 1990). Malgré le vieillissement du béton il est possible de modéliser le matériau poreux «béton frais» comme un sol cohésif (Mbemba, 2010) (Slowik et al., 2008) (Acker et al., 2008), en particulier pour déterminer la valeur d'entrée d'air de la pression capillaire (Peron et al., 2009) (Fredlund and Xing, 1994). Ce modèle permettra d'évaluer la valeur d'entrée d'air des bétons frais (Souche, 2015a) (Mbemba, 2010).

## **2. Objectifs de l'étude**

Cet article vise à mesurer la pression capillaire jusqu'à la fissuration et à comparer cette valeur avec la valeur d'entrée d'air déterminée à partir de sols à grains fins. Cette approche s'applique aux bétons naturels et recyclés. La comparaison entre la fissuration et la valeur d'entrée d'air permet de vérifier si la pression capillaire joue un rôle majeur dans le retrait plastique. Une relation entre la valeur d'entrée d'air et la pression capillaire au moment de la fissuration au jeune âge a été mise en évidence. Enfin, cette étude a proposé une comparaison entre les diamètres de pores impliqués dans la valeur d'entrée d'air calculée selon l'équation de Laplace et la distance maximale entre les grains de la pâte. Cette distance maximale est calculée selon la théorie de l'empilement granulaire aléatoire par adaptation du concept d'épaisseur maximale de pâte (EMP) (De-Larrard François, 1999).

## **3. Principaux résultats**

Comme pour les bétons naturels, la pression capillaire est le paramètre majeur induisant des déformations, des contraintes et des fissures dans les bétons recyclés à l'état frais soumis à un séchage sévère. La fissuration et l'entrée d'air sont corrélées. L'air pénètre dans le béton frais lorsque le matériau n'a pas de capacité de déformation et de faible contrainte admissible (Roziere et al., 2015). La concentration de contrainte locale conduit à la création d'une zone de faiblesse où la fissuration s'initie.

La pression capillaire au moment de la fissuration et la valeur d'entrée d'air calculée sont dans les mêmes ordres de grandeur pour chaque béton, naturel ou recyclé, d'une famille donnée (béton de construction ou de génie civil). La teneur en eau du béton a un fort effet sur le ressuage, la pression capillaire et l'entrée d'air. Il explique les différences entre les deux familles de béton construction et de génie civil.

Pour les bétons de construction et de génie civil, les différences de valeurs d'entrée d'air dépendent davantage de la qualité de la pâte que de la nature des granulats. L'espace entre particules dans la pâte de ciment semble être un facteur clé.

La quantité d'air entraîné semble être plus élevée pour les bétons recyclés et les taux de séchage augmentent avec la porosité du béton. Pour les bétons recyclés, une porosité plus élevée et donc un taux de séchage plus élevé pourraient avoir un effet significatif sur les variations de la pression capillaire et du ressuage au fil du temps.

## **4. Bibliographie**

Acker, P, Torrenti, J-M, Guérinet, M. 2008. La maîtrise de la fissuration au jeune âge : condition de durabilité des ouvrages en béton, ENPC. 29 p.

- Bendimerad, A, Roziere, E, Loukili, A. 2015. Combined experimental methods to assess absorption kinetics of natural and recycled aggregates. *Materials and Structures* 48: 3557–3569.
- Bendimerad, AZ, Rozière, E, Loukili, A. 2016. Plastic shrinkage and cracking risk of recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials* 121: 733–745.
- Brito, J, Alves, F. 2010. Concrete with recycled aggregates: the Portuguese experimental research. *Materials and Structures* 43: 35–51.
- Chakradhara Rao, M, Bhattacharyya, SK, Barai, S V. 2010. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures* 44: 205–220.
- Corinaldesi, V, Moriconi, G. 2010. Recycling of rubble from building demolition for low-shrinkage concretes. *Waste management (New York, N.Y.)* 30: 655–9.
- DAO, D-T. 2012. (Multi-) recyclage du béton hydraulique. In french, PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes.
- De-Larrard François. 1999. Structures granulaires et formulation des bétons. LCPC. 411 p.
- Devillers, P, El Youssoufi, S. 2009. Comportement hydromécanique de sols non saturés : identification du coefficient de Biot. *Hermès-Lavoisier journal X*: 1–13.
- Domingo, a., Lázaro, C, Gayarre, FL, Serrano, M a., López-Colina, C. 2009. Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete. *Materials and Structures* 43: 1147–1160.
- Etxeberria larranaga, M. 2004. Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete. Thèse de doctorat.
- Ferreira, L, de Brito, J, Barra, M. 2011. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Magazine of Concrete Research* 63: 617–627.
- Fredlund, DG, Xing, A. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal* 31: 521–532.
- Gomes, M, Brito, J, Bravo, M. 2009. Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance. *Materials and Structures* 42: 663–675.
- Haejin, K. 2009. Crushed returned concrete aggregate in new concrete : characterization, performance, modeling, specification and application. Thèse de doctorat.
- Hansen, TC. 1992. Recycling of demolished Concrete and Masonry. 159 p.
- Josserand, L. 2002. Ressuage des bétons hydrauliques. Thèse de doctorat.
- Josserand, L, Coussy, O, de Larrard, F. 2006. Bleeding of concrete as an ageing consolidation process. *Cement and Concrete Research* 36: 1603–1608.
- Kou, S. 2006. Reusing recycled aggregates in structural concrete. Thèse de doctorat.
- LE, T. 2015. Absorption des granulats recyclés. Thèse de doctorat.
- Leonard, A. 2002. Etude du séchage convectif de boues de station d'épuration. In french, PhD Thesis, Université de Liège.
- Li, X. 2008. Recycling and reuse of waste concrete in China. *Resources, Conservation and Recycling* 53: 36–44.
- Mbemba, E. 2010. Influence du vent et de la cure sur le comportement des bétons au très jeune âge. In french, PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes.
- Mbemba, E, Devillers, P, Buisson, C, Ahmed, L. 2013. Influence of mix design parameters and drying conditions on

- Otsuki, N, ASCE, M, Miyazato, S, Yodsudjai, W. 2003. influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonatation of concrete. *Journal of materials in civil engineering* 15: 443–451.
- Pepe, M. 2014. A conceptual model to design recycled aggregate concrete for structural applications ; PhD thesis, Università degli studi di Salerno.
- Peron, H, Hueckel, T, Laloui, L, Hu, LB. 2009. Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: experimental characterisation and mechanisms identification. *Canadian Geotechnical Journal* 46: 1177–1201.
- PN RECYBETON. 2011. RECYclage complet des BETONS. 54 p.
- Poon, C-S, Chan, D. 2006. The use of recycled aggregate in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling* 50: 293–305.
- Quebaud, M. 1996. Caractérisation des granulats recyclés. Etude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats. Thèse de doctorat.
- Radocea, A. 1994. A model of plastic shrinkage. *Magazine of concrete research* 46: 125–132.
- Roziere, E, Cortas, R, Loukili, A. 2015. Cement & Concrete Composites Tensile behaviour of early age concrete : New methods of investigation. *Cement and Concrete Composites* 55: 153–161.
- Ryu, J. 2002. An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties. *Magazine on concrete Research* 54: 7–12.
- Salgues, M, Souche, J-C, Devillers, P, Garcia-diaz, É. 2016. Influence of initial saturation degree of recycled aggregates on fresh cement paste characteristics : consequences on recycled concrete properties Influence of initial saturation degree of recycled aggregates on fresh cement paste characteristics : conseq. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*: 1–15.
- Sanchez de Juan, M, Alaejos Gutierrez, P. 2004. Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. In: *RILEM Conf on the Use of Recycled materials in building and Structures.*, p 0–9.
- Sanchez de Juan, M, Alaejos Gutiérrez, P. 2004. Influence of recycled aggregate quality on concrete properties. In: *RILEM Conf on the Use of Recycled materials in building and Structures.*, p 0–9.
- Scherer, GW. 1990. Theory of Drying. *Journal of the American Ceramic Society* 73: 3–14.
- Slowik, V, Hübner, T, Schmidt, M, Villmann, B. 2009. Simulation of capillary shrinkage cracking in cement-like materials. *Cement and Concrete Composites* 31: 461–469.
- Slowik, V, Ju, JW. 2011. Discrete modeling of plastic cement paste subjected to drying. *Cement and Concrete Composites* 33: 925–935.
- Slowik, V, Schmidt, M, Fritsch, R. 2008. Cement & Concrete Composites Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value. 30: 557–565.
- Souche, J-C. 2015a. Etude du retrait plastique des bétons à base de granulats recyclés avec mesure de l'influence de leur degré de saturation. In french, PhD Thesis, Université de Montpellier, Ecole des Mines d'Alès.
- Souche, J-C. 2015b. Etude du retrait plastique des bétons à base de granulats recyclés avec mesure de l'influence de leur degré de saturation. In french PhD Thesis.
- Souche, J-C, Salgues, M, Devillers, P, Garcia-diaz, É. 2015. Influence of initial saturation degree of recycled aggregates on fresh cement paste characteristics : consequences on recycled concrete properties. In: *IBAUSIL. Weimar: IBAUSIL*, p 1–8.

- 
- Tam, VWY, Gao, XF, Tam, CM. 2005. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research* 35: 1195–1203.
- Wittmann, F. 1976. On the action of capillary pressure in fresh concrete. *Cement and concrete research* 6: 49–56.
- Xiao, J, Li, W, Fan, Y, Huang, X. 2012. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011). *Construction and Building Materials* 31: 364–383.
- Yong, PC, Teo, DC. 2009. Utilisation of Recycled Aggregate as Coarse Aggregate in Concrete. *UNIMAS E-Journal of Civil Engineering* 1: 1–6.
- Zeitschrift, A, Link, P, Dienst, E, Eth, E. 1968. Fissures de retrait se formant avant la fin de prise. *Bulletin du ciment* 11: 6.