

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

INFLUENCE DES GRANULATS RECYCLES SUR LA PERMEABILITE DU BETON FRAIS

SOUCHE Jean-Claude^A, DEVILLERS Philippe^B, SALGUES Marie^A, Eric GARCIA DIAZ^A

A IMT Mines Alès, Centre des Matériaux de l'École des Mines d'Alès

B LIFAM, ENSA de Montpellier, Univ Montpellier, Montpellier France

RESUMÉ: Immédiatement après la mise en œuvre, le matériau béton est soumis à deux phénomènes importants : la consolidation et le développement de la pression capillaire, conséquence du séchage si aucune cure appropriée n'est prévue. Durant les 2,5 premières heures, le béton est un mélange de grains humides qui vont subir un tassement concomitant avec le ressuage de l'eau. Il en résulte un gradient de pression dans la phase liquide qui est associé à un débit fluide dont le paramètre clef est la perméabilité du béton frais. Cette étude a donc consisté à étudier six bétons dont quatre bétons recyclés au très jeune âge sous des conditions de séchage sévère pour étudier la valeur de la perméabilité à l'état frais en fonction du temps.

A $E_{\text{eff}}/L_{\text{éq}}$ équivalent, les bétons recyclés sont soumis à des flux de séchage plus importants et à des capacités de ressuage différentes. Ces deux résultats traduisent le transfert de l'eau absorbée des granulats recyclés à la pâte sous séchage sévère. La valeur de la pression d'entrée d'air dans le béton est beaucoup plus dépendante du rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{éq}}$ que de la présence de granulats recyclés. Pour tous les bétons, la perméabilité décroît au cours du temps. A l'entrée d'air, la perméabilité des bétons recyclés est plus grande que celle des bétons témoins. L'ancienne pâte présente au sein des granulats recyclés influe sur les valeurs de la perméabilité des bétons recyclés. L'étude du coefficient de perméabilité permet d'illustrer les phénomènes de transferts qui se déroulent au sein du béton frais sous séchage sévère. Cette étude a également permis de mettre au point une nouvelle méthode de calcul de la perméabilité K du béton à l'état frais, basée sur la mesure de la pression capillaire et de son gradient dans la hauteur de l'échantillon.

MOTS CLES : flux d'évaporation, pression capillaire, ressuage, perméabilité, pression d'entrée d'air

1. INTRODUCTION

Le matériau béton prend vie dans le malaxeur dès que l'eau entre en contact avec les autres constituants. Dès la mise en place du béton frais dans les moules, la pesanteur et les effets du séchage modifient la microstructure du mélange humide de grains de différentes tailles : les particules solides sédimentent alors que l'eau ressuée vers la face supérieure de l'échantillon. Le gradient qui se met en place sur la hauteur de l'échantillon, dépend fortement de la valeur de perméabilité du béton frais (Powers, 1939) qui est un paramètre clef pour comprendre le comportement au jeune âge du béton frais

Pour les bétons recyclés, la forte capacité d'absorption d'eau des granulats recyclés a pour conséquences une augmentation de l'eau totale et une plus grande difficulté à maîtriser l'eau efficace au cours du temps. Les bétons recyclés présentent alors une aptitude plus importante au ressuage. Lorsque le béton frais est soumis au séchage, l'eau de surface s'évapore, puis le flux d'évaporation devient supérieur à la vitesse de ressuage et un ménisque se crée et pénètre dans le matériau. Une tension capillaire se développe dans la phase liquide, et la déformation mesurable qui en résulte est le retrait plastique. Conformément à l'équation de Laplace, la pression capillaire se développe au fur et à mesure que les pores de plus petits diamètres se dé-saturent pour assurer une alimentation en eau de la surface sous l'effet du flux de séchage. Le gradient de pression capillaire qui en résulte sur l'épaisseur de l'échantillon est lié à la capacité du milieu poreux à laisser passer le débit d'eau, c'est-à-dire, selon la loi de Darcy, la perméabilité du béton frais.

L'objectif de cet article est d'étudier l'influence de granulats recyclés sur la perméabilité de bétons frais. Une étude expérimentale du comportement de six bétons, (dont quatre recyclés) est réalisée. La détermination du coefficient de perméabilité, son évolution au cours du temps, la consolidation, le retrait plastique, la pression capillaire et le flux de séchage sont mesurés pour les six bétons qui sont soumis à un séchage sévère. Les essais sont réalisés au sein d'un tunnel ventilé équipé d'une soufflerie où la vitesse du vent, la température et l'hygrométrie sont régulées et contrôlées. La mesure directe du coefficient de perméabilité est difficile car le béton frais ne présente pas un réseau poreux stable quand il est soumis à la charge hydraulique et au débit d'eau (Picandet, Rangeard, Perrot, & Lecompte, 2011) d'un perméamètre.

Par conséquent, cet article présente une nouvelle méthode de mesure indirecte de la perméabilité des bétons frais et de son évolution au cours du temps. Les quelques documents bibliographiques qui ont proposés une mesure de la perméabilité se concentrent sur la période où la vitesse de ressuage est constante (Powers, 1939) (Yim, Kim, & Kwak, 2014) (Ghourchian, Wyrzykowski, & Lura, 2016). Cet article est le premier à proposer une mesure du coefficient de perméabilité après la fin du ressuage par l'étude du gradient de pression capillaire contrôlé par le coefficient de perméabilité du matériau.

2. MATERIAUX ET METHODES

2.1 Matériaux utilisés

Un ciment CEM II/A-L 42.5 N a été utilisé pour tous les bétons formulés. Il a été associé à un filler calcaire destiné à améliorer la compacité du squelette granulaire du béton. Un superplastifiant a également été utilisé. Les types de granulats utilisés sont un gravier calcaire concassé (deux granulométries : 4/10 mm et 6.3/20 mm) et deux granulats recyclés (4/10 mm and 10/20 mm). Le tableau 1 précise quelques propriétés des granulats utilisés qui sont ceux du projet national RECYBETON et dont les caractéristiques sont précisées au sein de la référence (Sedran, 2013). Pour tous les bétons le sable est naturel.

Tableau 1. : Propriétés des granulats utilisés

type	classe granulométrique	densité (kg/m ³)	absorption d'eau (%)
Graviers calcaires	4/10	2710	0.62
	6.3/20	2710	0.57
Granulats recyclés	4/10	2290	5.60
	10/20	2260	5.80
sable	0/4	2550	1.00

2.2 Formulation des six bétons testés

L'eau efficace (E_{eff}) est définie comme la différence entre l'eau totale et l'eau absorbée par les granulats à l'absorption nominale. L'eau de pré-saturation est la quantité d'eau absorbée par les granulats avant malaxage. Le liant (L_{eq}) correspond à la totalité du ciment et à un quart de la quantité de fillers calcaires additionnels. Les formulations des bétons ont été mises au point dans le cadre du projet national RECYBETON pour permettre l'atteinte d'une ouvrabilité de 20 (\pm 3cm) au cône d'Abrams et des résistances respectives de 30 MPa et de 40 MPa pour les bétons de bâtiment et de génie Civil. Les coefficients¹ des granulats naturels et recyclés sont respectivement de 5,76 et 5,17, par conséquent la quantité de liant est plus importante dans les bétons recyclés.

Tableau 2. : Formulation des bétons testés (kg/m³)

	BN _{0,59}	BR _{0,60}	BR _{0,52}	GcN _{0,45}	GcR _{0,45}	GcR _{0,38}
Ciment	272	282	286	303	339	345
<i>dont filler calcaires</i>	30	21	31,5	33	37	38
superplastifiant	1.399	1.358	1.419	2.128	2.201	2.238
Filler calcaire	45	31	31	59	54	54
Graviers calcaires 6.3/20	825	-	-	821	-	-
Graviers calcaires 4/10	268	-	-	268	-	-
sable 0/4	785	806	817	781	790	803
Granulats recyclés 10/20	-	701	710	-	689	700
Granulats recyclés 4/10	-	163	165	-	160	162
eau	181	232	210	167	215	194
air entraîné (%)	0.9	1.8	2.9	1.0	1.9	2.7
E_{eff}/L_{eq}	0.59	0.60	0.52	0.45	0.45	0.38

2.2 Conditions expérimentales

Les essais ont été réalisés sur une durée de 2,5 heures (point 0 du temps = introduction de l'eau dans le malaxeur) au sein d'un tunnel ventilé (figure 1) sous un vent de $7,5 \pm 0,5 \text{ m.s}^{-1}$. Le tunnel est en circuit ouvert sur une salle régulée en température et en hygrométrie ($T=21^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ et $\text{RH}=53\% \pm 4$). La soufflerie est mise en route 35 min environ après insertion de l'eau dans le malaxeur (origine du temps).

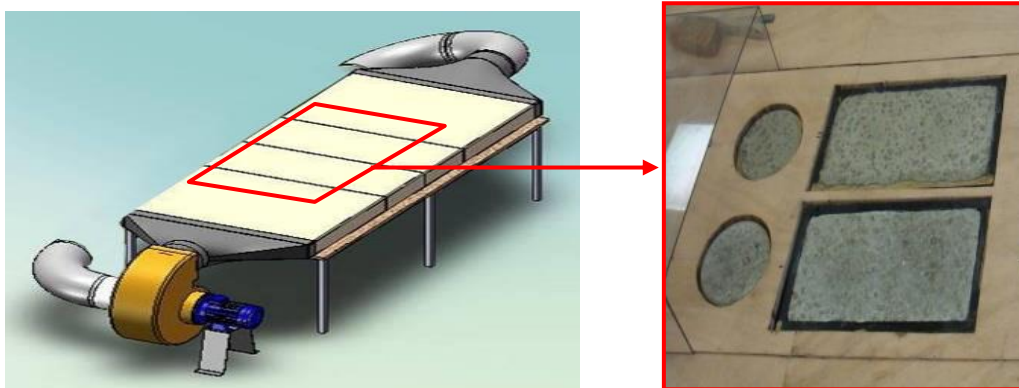


Figure 1 : schémas du tunnel ventilé, vue générale et vue des échantillons

¹ Modèle mécanique de Ferret modifié par EMP (Sedran, 2013)

Les essais sont réalisés grâce à un moule métallique de 30cm x 30cm x 8.2cm de dimensions enduit de téflon. Le béton est placé au sein d'une chaussette en polyane de manière à minimiser les frottements et donc de ne pas gêner les déformations de retrait plastique. La pression capillaire (P_c) est mesurée à deux hauteurs dans l'échantillon (20 et 42 mm depuis la surface de l'échantillon) à l'aide de céramiques poreuses insérées dans le béton. La mesure prend fin quand une bulle d'air pénètre dans le système (Figure. 2).

La mesure du tassement est effectuée à l'aide d'un capteur laser et d'une cible métallique de 2,5 cm² placée en surface du béton juste après sa mise en place (Souche, 2015). Le système permet ainsi de mesurer les déplacements verticaux du béton en surface en μm .

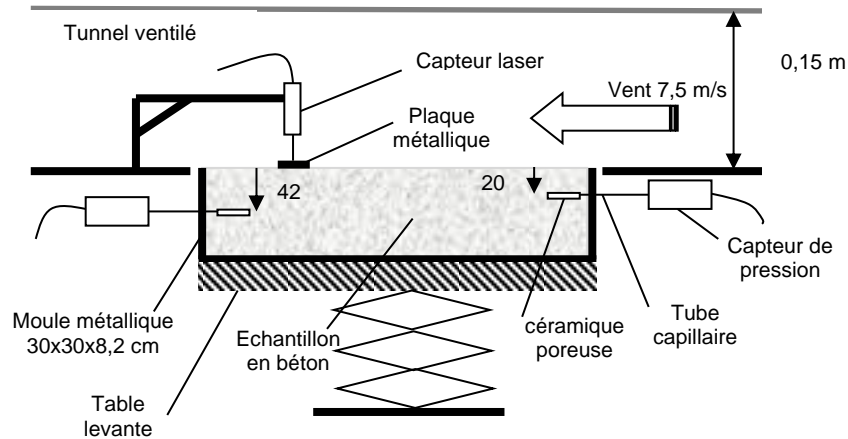


Figure 2 : système expérimental de mesures du tassement et de la P_c à différentes hauteurs de l'échantillon.

3. RESULTATS

3.1 Séchage et évaporation

Le flux d'évaporation du béton frais est contrôlé par la vitesse du vent, la température et le degré d'hygrométrie (RH). Ces deux derniers sont maintenus constants dans nos expériences.

Le flux d'évaporation peut être estimé à l'aide de la formule de Uno (Uno, 1998), (cf équation 1):

$$E \text{ (kg/m}^2\text{/hour)} = 5([T_c+18]^{2.5} - RH[T_a+18]^{2.5})(V+4)10^{-6} \quad \text{équation 1}$$

Pour nos conditions expérimentales (RH=53%, $T_c=22.7^\circ\text{C}$, $T_a=21^\circ\text{C}$ and $V= 27 \text{ km/h}$), la formule de Uno donne un flux de 0.86 kg/m²/heure. Il a également été mesuré expérimentalement pour les six bétons de l'étude à l'aide de moules cylindriques de 16 cm de diamètre et de 8,2cm de haut placés sur une balance (tableau 3).

Tableau 3. : Flux d'évaporation initial des six bétons testés (kg/m²/heure)

	BN _{0.59}	BR _{0.60}	BR _{0.52}	GcN _{0.45}	GcR _{0.45}	GcR _{0.38}
Initial evaporation flow	0.95	1.19	1.10	0.82	0.91	0.80

Durant les 2,5 premières heures, on constate que pour des conditions de dessiccation sévères, le flux d'évaporation dépend du béton testé. La formule de Uno (équation 1) donne un bon ordre de grandeur des valeurs mesurées. Pour des $E_{\text{eff}}/ L_{\text{EQ}}$ proches, le flux d'évaporation des bétons recyclés est plus important que celui des bétons témoins. Il semble diminuer quand le rapport $E_{\text{eff}}/ L_{\text{EQ}}$ décroît

conformément aux résultats de (Topcu & Elgun, 2004) (de 0,71 kg/m² à 0,59 kg/m² quand le rapport $E_{eff}/L_{Éq}$ varie de 0,59 à 0,35)

3.2 Mesures de pression capillaire

Le tableau 4 donne les résultats des mesures de pression capillaire (Pc). A $E_{eff}/L_{Éq}$ équivalent, les bétons recyclés ont des temps de démarrage de la Pc plus longs que les bétons témoins. En revanche, la présence de recyclés ne semble pas impacter la valeur de pression d'entrée d'air qui est plus dépendante du facteur $E_{eff}/L_{Éq}$ et de la famille de bétons considérés (bâtiment ou génie civil).

Tableau 4. : Résultats des mesures de pression capillaire

	BN _{0,59}	BR _{0,60}	BR _{0,52}	GcN _{0,45}	GcR _{0,45}	GcR _{0,38}
Age de démarrage de la pression capillaire (heures)	0.95	1.22	0.83	0.86	0.92	0.80
Age de l'entrée d'air (hours)	1.92	2.25	1.92	1.92	2.00	1.67
Pression capillaire à l'entrée d'air (hPa)	94	91	117	152	143	181

Les valeurs obtenues pour les bétons de génie civil sont cohérentes avec celle qu'obtient Slowick (15 kPa) pour des bétons dont le rapport $E_{eff}/L_{Éq} = 0,41$.

La figure 3 montre qu'il y a deux phases dans le développement de la Pc. Durant une première phase, la différence de Pc s'accroît jusqu'à atteindre un maximum au moment où l'air pénètre dans le réseau poreux. Après ce point, le béton se dé-sature et la différence de Pc entre les deux capteurs s'amenuise.

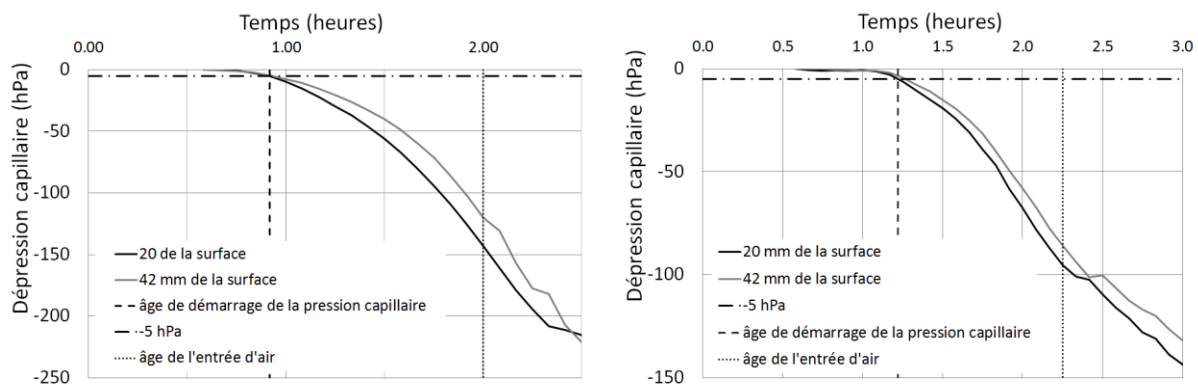


Figure 3 : courbes de pression capillaire pour le béton GcR_{0,38} (à g) et pour le béton BR_{0,60} (à d)

3.3 TASSEMENT

Lors de l'essai, un délai de quelques minutes existe entre la mise en place du béton dans les moules et le démarrage des mesures. Or le tassement démarre immédiatement après la mise en place du béton et la détermination du tassement total nécessite donc une interprétation des courbes brutes enregistrées (figure 4). Le point de démarrage de la Pc correspond au moment où l'eau en surface de l'échantillon est évaporée. A cet instant, la perte d'eau par évaporation et la valeur du tassement total ont la même valeur. La courbe de tassement est donc « recalée » pour traduire le tassement total. A l'origine, la pente du tassement est extrapolée car la vitesse de ressuage initiale est constante jusqu'au démarrage de l'essai, (Josserand et al 2006). Cette interprétation nous permet de reconstituer les courbes de tassement total

dès la mise en place de l'essai dans les moules. Des essais de validation de la démarche ont été menés dans le cadre de l'étude (Souche, 2015).

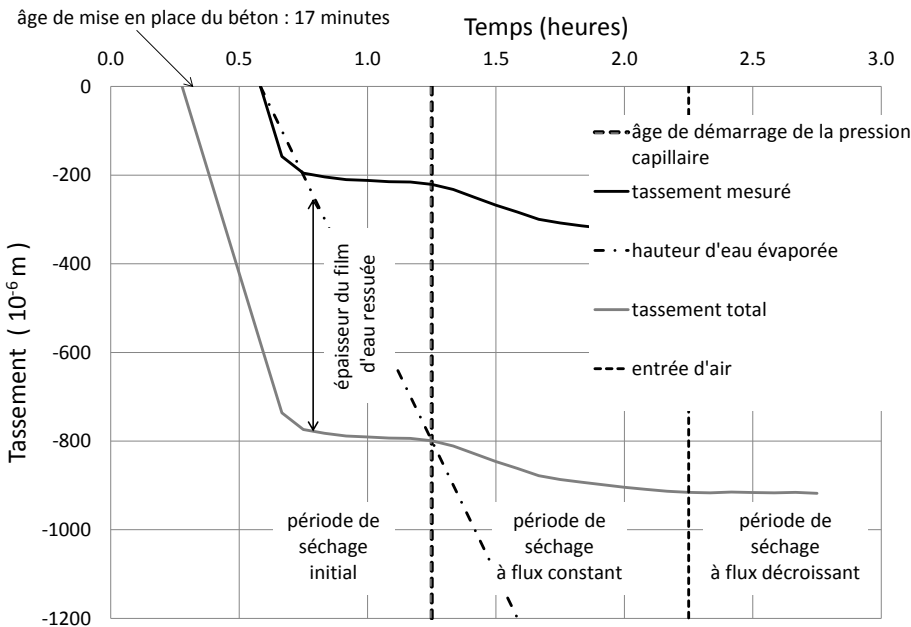


Figure 4 : courbes de tassement pour le béton BR_{0,60}

Il en résulte le tableau 5 qui précise les valeurs caractéristiques du ressuage des bétons testés.

Tableau 5. : valeurs caractéristiques du ressuage

	BN _{0,59}	BR _{0,60}	BR _{0,52}	GcN _{0,45}	GcR _{0,45}	GcR _{0,38}
Vitesse initiale de ressuage (µm / heure)	1260	1894	1764	958	562	538
Amplitude de ressuage (10 ⁻⁶ m)	355	791	276	226	302	201

Le tableau 5 récapitule les valeurs caractéristiques des bétons testés. On constate que la vitesse initiale de ressuage est systématiquement supérieure pour les bétons de bâtiment et qu'elle décroît avec le rapport E_{eff}/L_{EQ} .

A E_{eff}/L_{EQ} équivalent, l'amplitude de ressuage semble augmenter avec la présence de granulats recyclés. Les valeurs obtenues dans le tableau 5 sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par Josserand (Josserand, Coussy, & de Larrard, 2006) (de l'ordre de 700 µm pour une hauteur d'échantillon de 80 mm).

(Poon, Kou, & Lam, 2006) met en évidence des capacités de ressuage supérieures pour les bétons recyclés ($E_{eff}/L_{EQ} = 0,55$) contrairement à (Yang, Chung, & F.Ashour, 2008) qui trouve le contraire.

Cette étude semble montrer que dans des conditions de dessiccation sévères, des granulats associés à un rapport E_{eff}/L_{EQ} bas tendent à diminuer la vitesse de ressuage alors que la présence de recyclés associée à un rapport E_{eff}/L_{EQ} haut tendent à l'augmenter.

En termes de cinétiques, pour les bétons BR_{0,60}, BN_{0,59}, BR_{0,52} et GcN_{0,45}, le tassement de consolidation se termine avant que le retrait plastique ne démarre. Les phénomènes sont donc découplés (figure 4) et l'amplitude de ressuage correspond au tassement total au palier de la courbe.

Pour les deux autres bétons GcR_{0,45} et GcR_{0,38} le retrait plastique démarre avant la fin de la consolidation. Les deux phénomènes coexistent (figure 4). L'amplitude de ressuage est calculée au moment du démarrage de la Pc. Elle est donc sous-estimée mais ne prend en compte que les déformations de consolidation.

4. SYNTHÈSE ET DISCUSSION

A la sortie du malaxeur, le béton est soumis au milieu ambiant et il perd de l'eau sous l'effet du séchage convectif. Celui-ci est décrit selon trois périodes : la période initiale où l'évaporation intervient depuis une fine pellicule d'eau en surface du béton, la période de séchage à flux constant quand l'évaporation se produit depuis des ménisques situés en surface du béton, puis la période de ralentissement où le flux décroît quand les ménisques pénètrent dans le matériau. La limite entre les périodes 2 et 3 est appelée l'entrée d'air.

Durant la première période du séchage, le béton est recouvert d'une fine pellicule d'eau, le flux d'évaporation est proche de celui d'un plan d'eau à la même température. Les phénomènes de tassement et de ressuage sont dus aux seules forces de gravité. Le ressuage (tableau 5) est lié à la quantité d'eau du béton (tableau 2) et la hauteur d'eau ressuée est fonction de l'âge de mise en place du béton et de la vitesse initiale de ressuage. Durant cette période, la vitesse de ressuage initiale est homogène sur toute la hauteur du béton et est reliée au coefficient de perméabilité par le biais de la loi de Darcy (équation 2).

$$V_{IR} = K(\Phi_0)\Phi_0.(d_s - 1) \quad (\text{Équation 2})$$

Φ_0 est la compacité initiale du béton, K est le coefficient de perméabilité (m/s) and, d_s la densité spécifique des grains. Le tableau 6 récapitule les valeurs de perméabilité initiale calculées pour chaque béton étudié. Pour les bétons de bâtiment, les granulats recyclés ont tendance à augmenter la valeur de perméabilité initiale. Pour les bétons de génie civil à plus faibles E_{eff}/L_{EQ} , les granulats recyclés ont tendance à faire baisser le coefficient de perméabilité.

Tableau 6. : Coefficient de perméabilité initiale

	BN _{0.59}	BR _{0.60}	BR _{0.52}	GcN _{0.45}	GcR _{0.45}	GcR _{0.38}
Compacité initiale	0.823	0.807	0.818	0.835	0.820	0.834
Densité spécifique des grains	2.688	2.476	2.476	2.692	2.492	2.492
Coefficient de perméabilité initiale (m/s)	2.6E-07	4.5E-07	4.1E-07	1.9E-07	1.3E-07	1.2E-07

Des coefficients de perméabilité du béton frais basés sur le modèle de Powers donnent des valeurs de l'ordre de 10^{-7} à 10^{-9} m/s, (E_{eff}/L_{EQ} varie de 0,4 à 0,6) (Ghourchian et al., 2016). Avec un rapport E/C qui varie de 0,4 à 0,6. (Assaad & Harb, 2012) ont mesuré expérimentalement des coefficients de perméabilité de $5,4 \cdot 10^{-7}$ m/s (E/C = 0,4) et $8,2 \cdot 10^{-7}$ m/s (E/C = 0,55). Quand le flux d'évaporation devient plus important que le débit de ressuage, l'eau ressuée en surface est évaporée et des ménisques liquides se créent en surface. La pression capillaire se développe (tableau 4) et le squelette solide se comprime et des déformations de retrait volumique compensent la perte d'eau due au séchage. Un gradient de pression apparaît sur la hauteur de l'échantillon. Il en résulte une baisse du coefficient de perméabilité au cours du temps (figure 5).

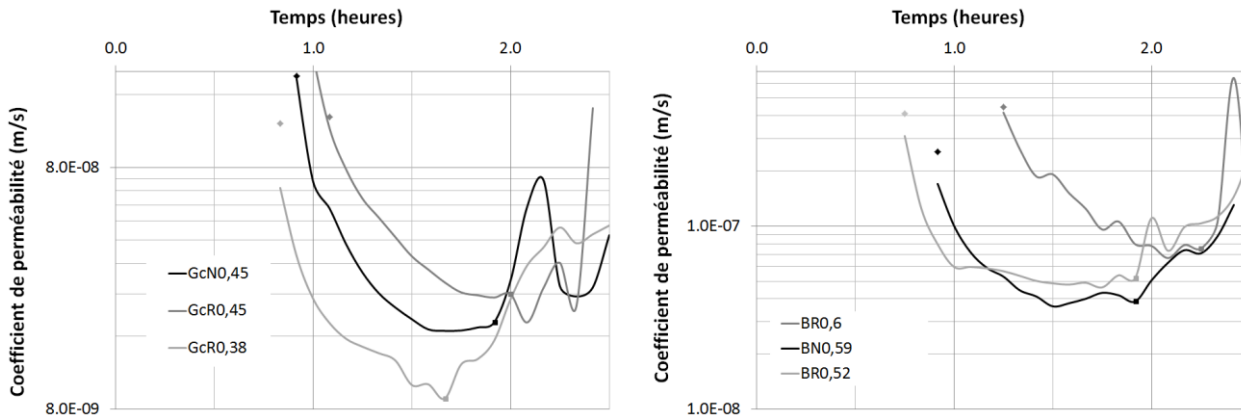


Figure 5 : coefficient de perméabilité = f(temps), bétons de génie civil (à g), bétons de bâtiment (à d)

Les valeurs des gradients de pression capillaire sont fonction de la capacité du milieu à laisser passer l'eau et donc au coefficient de perméabilité.

Pour les quatre bétons BR_{0,60}, BN_{0,59}, BR_{0,52} and GcN_{0,45} la présence d'une fine pellicule d'eau de ressuage en surface ne permet pas l'identification du coefficient de perméabilité tant que l'eau de surface n'a pas été évaporée et tant que la pression capillaire ne se développe pas. Pour les deux bétons GcR_{0,45} and GcR_{0,38} la concomitance des phénomènes de consolidation et de retrait ne permet la détermination du coefficient de perméabilité que lorsque la consolidation et le ressuage sont terminés.

Ces restrictions étant prises en compte, pendant la seconde période du séchage (flux constant), le transport d'eau au sein du béton répond à la relation de Darcy généralisée (équation 3) (Coussy, Baroghel-Bouny, Dangla, & Mainguy, 2001) :

$$J_w = \frac{K}{\rho_w g} \cdot \nabla p_c \quad (\text{Équation 3})$$

J_w (m/s) est le flux au travers des pores en surface, K (m/s) est le coefficient de perméabilité du squelette solide, ρ_w (kg/m³) est la masse spécifique de l'eau, g (m/s²) est l'accélération de la pesanteur, ∇p_c (Pa/m) est le gradient de pression capillaire en surface.

Il est constaté que la perméabilité du réseau poreux décroît au fur et à mesure que le réseau se draine et se consolide sous l'effet de la pression capillaire (figure 5).

Au fur et à mesure que le séchage progresse, le rayon des ménisques d'eau diminue, la pression capillaire se développe induit une augmentation de la contrainte de compression du squelette solide. Sous cet effet, le squelette solide devient plus raide et s'oppose à la déformation imposée par la phase liquide. Quand la déformation maximale du squelette est atteinte et qu'il n'est plus possible d'approvisionner la surface en eau, le ménisque atteint un rayon minimal et pénètre à l'intérieur du matériau. Ce moment correspond à l'entrée d'air et à la fissuration de retrait plastique qui lui est associée (Slowik, Schmidt, & Fritsch, 2008) (Souche, 2015).

L'entrée d'air est dépendante de la quantité d'eau efficace dans la pâte du béton. Les granulats recyclés ne semblent pas impacter la valeur de l'entrée d'air qui est une caractéristique intrinsèque de la pâte. Après l'entrée d'air, le béton devient un milieu non saturé, la mesure de la pression capillaire n'est plus valide et l'identification du coefficient de perméabilité n'est plus possible (figure 5).

Tableau 7. : Coefficient de perméabilité à l'entrée d'air

	BN _{0,59}	BR _{0,60}	BR _{0,52}	GcN _{0,45}	GcR _{0,45}	GcR _{0,38}
Coefficient de perméabilité à l'entrée d'air (m/s)	3.9E-08	7.5E-08	5.2E-08	1.8E-08	2.4E-08	8.8E-09

Les résultats obtenus (tableau 7) sont à mettre en relation avec les mesures faites au perméamètre à charge fixe pour les six bétons étudiés (Souche, 2015). Ces résultats mettent en lumière qu'à l'entrée d'air les granulats recyclés conduisent à une augmentation du coefficient de perméabilité pour des rapports $E_{eff}/L_{\dot{E}Q}$ fort ou faible. De plus, la perméabilité des bétons recyclés à l'entrée d'air est croissante avec le rapport $E_{eff}/L_{\dot{E}Q}$ (figure 6).

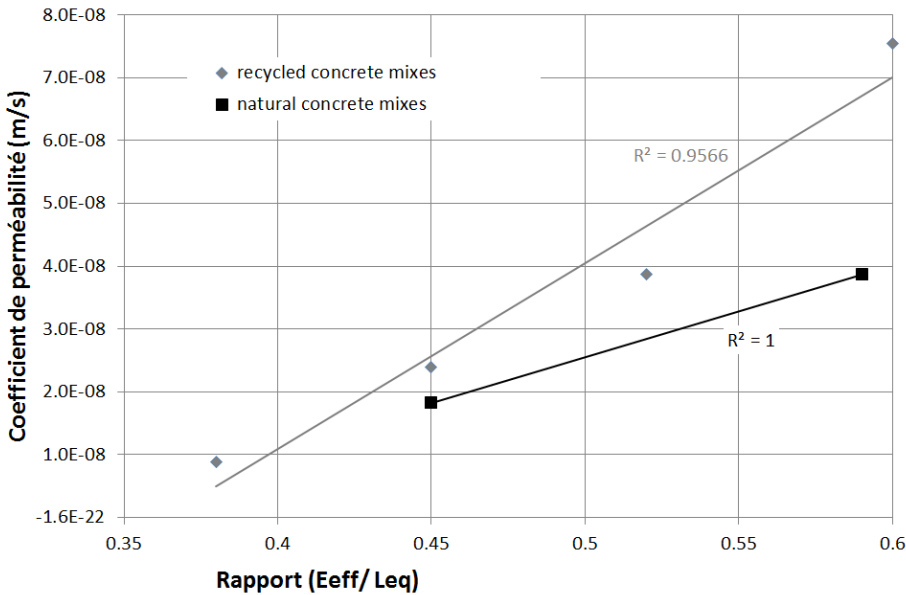


Figure 6 : coefficient de perméabilité à l'entrée d'air en fonction du rapport $E_{eff}/L_{\dot{E}Q}$

La comparaison entre les valeurs de coefficients de perméabilité initiale et à l'entrée d'air (tableaux 6 et 7) montre que la perméabilité chute de plus de 80 % pour tous les bétons. A titre de comparaison, par mesure directe au perméamètre, Picandet et al. ont obtenu une valeur de perméabilité de bétons frais égales à $0.32 \cdot 10^{-7}$ m/s ($E_{eff}/L_{\dot{E}Q} = 0,3$) et de $1.88 \cdot 10^{-7}$ m/s ($E_{eff}/L_{\dot{E}Q} = 0,4$) (Picandet et al., 2011). Ces valeurs sont proches des valeurs de perméabilité initiales déterminées dans cette étude.

5. CONCLUSION

L'étude présentée dans cet article se concentre sur la perméabilité des bétons frais sous des conditions de dessiccation sévères. Une nouvelle méthode de détermination de la valeur de pression d'entrée d'air et du coefficient de perméabilité en exploitant la mesure du gradient de pression capillaire a été proposée..

Les formulations des bétons ont fait varier le rapport $E_{eff}/L_{\dot{E}Q}$ et la quantité de granulats recyclés. Sur la base des résultats précédemment présentés les conclusions suivantes sont proposées :

- Le flux d'évaporation des bétons est proche de $1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ et il est plus important pour des bétons recyclés : à $E_{eff}/L_{\dot{E}Q}$ équivalent, ils représentent + 25 % pour les bétons de bâtiment et + 11 % pour les bétons de génie civil. Il est donc probable que les granulats recyclés soient en mesure de restituer l'eau initialement absorbée.
- L'utilisation de graviers recyclés dans le béton augmente l'amplitude de ressuage. A $E_{eff}/L_{\dot{E}Q}$ comparable, on note + 222% pour les bétons de bâtiment et + 34 % pour les bétons de génie civil. Là encore, on peut penser que les graviers recyclés restituent de l'eau initialement absorbée.
- La pression d'entrée d'air n'est pas influencée par l'emploi de granulats recyclés, en revanche elle est fortement dépendante de la quantité d'eau efficace et du rapport $E_{eff}/L_{\dot{E}Q}$.
- Pour des rapports $E_{eff}/L_{\dot{E}Q}$ importants, la perméabilité initiale des bétons recyclés est plus importante que celle des bétons témoins. En revanche, dans tous les cas, la présence de granulats recyclés augmente le coefficient de perméabilité à l'entrée d'air (+92% pour les bétons de bâtiment, +33% pour les bétons de génie civil).

6. REFERENCES

- Assaad, J., & Harb, J. (2012). Use of the falling-head method to assess permeability of freshly mixed cementitious-based materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25, 580–588.
- Coussy, O., Baroghel-Bouny, V., Dangla, P., & Mainguy, M. (2001). Evaluation de la perméabilité à l'eau liquide des bétons à partir de leur perte de masse durant le séchage. *Revue Française de Génie Civil*, 5(2–3), 269–284. <https://doi.org/10.1080/12795119.2001.9692307>
- Ghourchian, S., Wyrzykowski, M., & Lura, P. (2016). The bleeding test: A simple method for obtaining the permeability and bulk modulus of fresh concrete. *Cement and Concrete Research*, 89, 249–256. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.016>
- Josserand, L., Coussy, O., & de Larrard, F. (2006). Bleeding of concrete as an ageing consolidation process. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1603–1608.
- Picandet, V., Rangeard, D., Perrot, A., & Lecompte, T. (2011). Permeability measurement of fresh cement paste. *Cement and Concrete Research*, 41, 330–338.
- Poon, C. S., Kou, S. C., & Lam, L. (2006). Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. *Materials and Structures*, 40(9), 981–988. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9192-y>
- Powers, T. C. (1939). Bleeding of Portland cement paste, mortar and concrete treated as a special case of sedimentation. *Research Laboratory of Portland Cement Association Bulletin 2*.
- Sedran, T. (2013). *Mise au point des formules de béton de référence*.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.03.002>
- Souche, J.-C. (2015). *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.
- Topcu, I. B., & Elgun, V. B. (2004). Influence of concrete properties on bleeding and evaporation. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 275–281. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.07.004>
- Uno, P. J. (1998). Plastic shrinkage Cracking and Evaporation Formulas. *ACI Materials Journal*, 95, 365–375.
- Yang, K.-H., Chung, H.-S., & F.Ashour, A. (2008). Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Materials Journal*, 5–6, 289–296.
- Yim, H. J., Kim, J. H., & Kwak, H. G. (2014). Experimental simulation of bleeding under a high concrete column. *Cement and Concrete Research*, 57, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.12.011>