



RECYBETON

Projet National RECYBETON
Le recyclage complet des bétons

Synthèse de la tranche 2

(août 2013 – février 2015)

Convention de subvention N° 13 MGC S 005

R/15/RECY/026

Mars 2015

Sommaire

1	Introduction.....	2
2	Technologies et procédés (thème 1).....	2
3	Matériaux et structure (thème 2).....	9
4	Développement durable (thème 3).....	21
5	Aspects réglementaires et normatifs (thème 4).....	24
6	Chantiers expérimentaux.....	26
7	Valorisation (thème 5).....	28
8	Conclusion.....	30

1 Introduction

Ce rapport présente une synthèse des travaux du projet national RECYBETON, pour ce qui concerne la tranche 2 qui s'est déroulée d'août 2013 à février 2015.

A partir du programme du projet défini dans le rapport de montage, un ensemble de lignes d'actions a été défini par le CST (Comité Scientifique et Technique), suivi d'un appel d'offre (lancé en février 2013), à l'issue duquel des équipes ont été sélectionnées, parmi les adhérents au projet national, pour mettre en œuvre les actions de recherche formalisées par des lettres de commande.

Les rapports de recherche ayant été reçus en février 2015, le présent document en présente une synthèse, classée selon les grands thèmes du projet.

Le Projet National RECYBETON rassemble désormais 46 partenaires, à la suite de l'adhésion de 2 nouveaux partenaires par rapport à la tranche 1.

2 Technologies et procédés (thème 1)

Dans la tranche 2 du Projet National RECYBETON, l'activité du thème 1 s'est structurée autour de quatre sous-thèmes :

- sous-Thème 1.3 « Faisabilité d'utiliser des sables et fines de bétons concassés comme addition minérale dans les matériaux cimentaires »
- sous-Thème 1.5 « Technologies de séparation à sec des sables et des fines de recyclage »
- sous-Thème 1.6 « Technologie du tri sélectif de granulats béton concassé »
- sous-Thème 1.7 « Influence du malaxage sur la rhéologie de bétons de granulats recycles »

Les principaux résultats de ces études sont présentés dans cette synthèse.

2.1 Faisabilité d'utiliser des sables et fines de bétons concassés comme addition minérale dans les matériaux cimentaires (sous-thème 1-3)

Cette étude vise à établir la carte d'identité des sables de béton concassé (SBC) et des fines de béton concassé (FBC) (ou fines de dépoussiérage), à évaluer leurs activités hydraulique et pouzzolanique dans des pâtes, ainsi qu'à déterminer leur effet à court et moyen termes sur des mortiers (en vue notamment d'une évaluation normative). Quatre SBC (Paris, Lyon, Lille et Strasbourg) et une FBC (Paris) sont étudiés, la surface spécifique Blaine des SBC obtenue par broyage étant entre 4500 et 7500 cm²/g.

Les résultats de caractérisation montrent que les compositions chimiques et minéralogiques des SBC dépendent fortement de la nature des granulats constituant le béton d'origine, les teneurs en silice étant élevées pour les quatre origines. Seule la FBC présente des teneurs en calcium en hydrates (CH, Aft et C-S-H) supérieures. La morphologie des SBC est plutôt anguleuse, avec des grains multiphasiques comprenant de la pâte et des minéraux provenant des granulats. Celle des FBC se présente sous une forme plus arrondie avec moins de rugosité.

Les SBC et FBC entraînent une légère détérioration de la maniabilité des mortiers, mais les valeurs de **temps d'écoulement demeurent dans l'ordre de grandeur des ciments Portland et composés courants**. Les temps de prise ne sont pas modifiés, sauf pour les FBC qui accélèrent légèrement l'hydratation (confirmé par calorimétrie). La réactivité résiduelle des SBC et FBC demeure très faible, de l'ordre de quelques J/g. Leur mélange avec un ciment modifie peu l'hydratation de ce dernier. Seule l'eau de lixiviation des fines permet d'accélérer légèrement l'hydratation d'un CEM I.

L'évaluation de la réactivité pouzzolanique selon la méthode de Frattini montre que les fines ne possèdent pas de réactivité pouzzolanique en présence de ciment. Leur mélange avec de la chaux confirme néanmoins une légère activité, caractérisée par une consommation de chaux et une production d'hydrates de type C-S-H et C-A-S-H. Cette activité n'entraîne pas d'amélioration significative des performances mécaniques, les résistances étant proportionnelles à la quantité de ciment dans les mélanges (effet de dilution des fines). Les meilleurs résultats sont obtenus avec un CEM II, ce qui montre qu'il pourrait être avantageux de remplacer une fraction de ces ciments par des SBC ou FBC. Les propriétés de transfert et le retrait ne sont pas dégradés par l'utilisation de fines de bétons recyclés.

Il peut être conclu de ces essais que les SBC et FBC ne peuvent pas être considérées comme des additions de type II (pouzzolaniques), mais plutôt comme des additions de type I (fillers).

2.2 Technologies de séparation à sec des sables et des fines de recyclage (sous-thème 1-5)

Cette action a pour objectif d'établir une recherche bibliographique sur les technologies de séparation à sec des sables et des fines de recyclage. Il s'agit d'une phase préliminaire avant le choix d'une éventuelle technologie pour réaliser une étude plus approfondies, alors que, à notre connaissance, il n'y a aucun résultat pertinent de chantier C&DW (*Concrete and Demolition Waste*) à l'échelle industrielle dans cette direction.

La chaîne de valorisation des déchets de construction et de démolition passe par une succession de processus dont :

- une phase de réduction de la matière (démolition, concassage, broyage)
- une phase liée au processus d'élaboration comprenant des procédés intermédiaires. Ils visent un traitement des granulats de béton recyclé comprenant des procédés séparatifs précédant la phase d'homogénéisation lors du malaxage en centrale à béton.

C'est sur ce dernier point que porte la présente étude puisqu'il constitue l'un des verrous technologique et environnemental de la chaîne de valorisation des déchets de construction et de démolition. En effet, l'hétérogénéité en termes de nature et de taille des matériaux déconstruits détermine le choix des procédés séparatifs. Ces derniers représenteraient un surcoût économique non négligeable dans le cadre de l'investissement d'une usine de recyclage de C&DW.

L'état de l'art des procédés séparatifs particuliers est divisé en un revue des technologies gravimétriques (Sédimentation/Décantation, JIG, table vibrante, centrifugation) et des technologies physico-chimiques (Dual Energy X- rayon transmission, technologie du radar, télédétection par laser, spectroscopie Raman, séparation magnétique et électrique, flottation).

Technologies gravimétriques

La Figure 1 ci-dessous présente un diagramme récapitulatif des moyens technologiques capable de séparer, dans une gamme étendue de classes granulométrique, deux types de particules et se concentre sur les méthodes visant à séparer des particules de densités différentes.

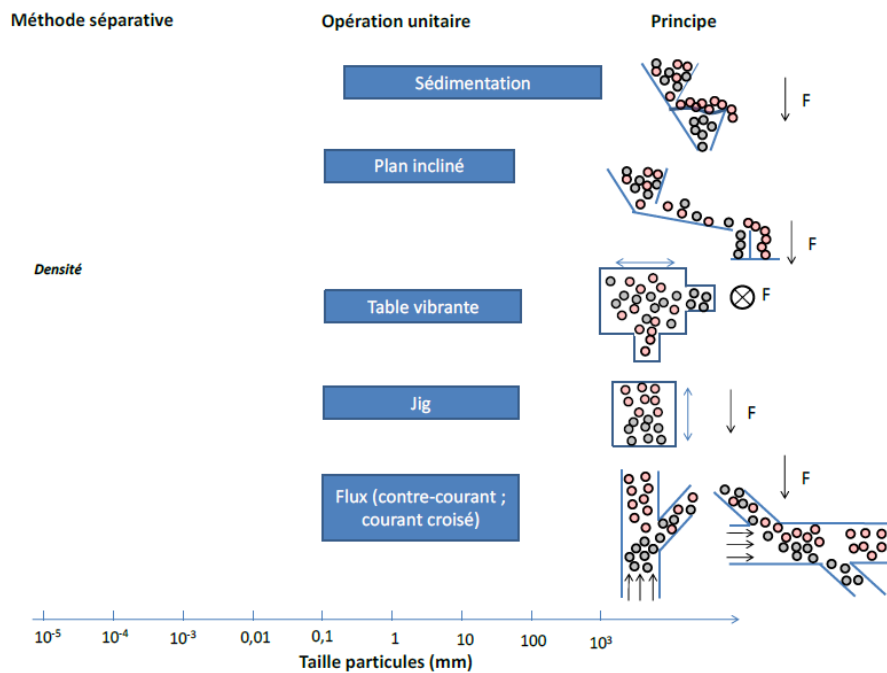


Figure 1. Procédés de séparation gravitaire

On peut utiliser un champ de pesanteur simple lors des techniques de sédimentation gravitaires, qui séparent deux phases non miscibles grâce à la différence de masse volumique entre ces phases, lors de la décantation, ou de l'écoulement sur plan incliné, lorsque la longueur du parcours effectué par une particule sur un plan incliné à la surface duquel s'écoule par gravité un film liquide dépend de deux actions: la sédimentation de la particule et le déplacement sur le fond. L'un des phénomènes mis en jeu est l'alluvionnement au cours duquel les grains lourds et gros sont les premiers à rencontrer le support et peuvent se trouver piégés alors que les grains légers et fins sont emportés par le courant. Les grains qui ont atteint le support se meuvent par saltation et la vitesse d'entraînement dépend peu de leur dimension mais de la racine carrée de leur masse volumique apparente. Ainsi, les grains ayant la masse volumique la plus élevée se trouveront à partie basse (ou intérieure s'il y a rotation) et ceux de masse volumique la plus faible, à la partie haute (ou extérieure).

Il est possible aussi d'ajouter un champ de force supplémentaire à la gravité. C'est le cas de la jig qui est une méthode de séparation physique par densité. Le principe est d'exercer une force sous forme d'un échelon de pression sur les particules. L'ensemble des particules est alternativement fluidisé puis sédimenté. La table vibrante a recours aux deux phénomènes physiques précédents puisqu'une circulation d'eau est alimentée perpendiculairement à un mouvement transversal. La sédimentation des particules s'effectue sur une surface plane inclinée transversalement. La concentration a lieu dans un film d'eau peu épais. Enfin, dans la centrifugation, la gravité est remplacée par la force centrifuge dont l'intensité peut être beaucoup plus grande, augmentant le champ de force et améliorant l'efficacité des séparateurs.

Technologies physico-chimiques

La Figure 2 concerne l'ensemble des technologies permettant de différencier les propriétés physico-chimiques des particules.

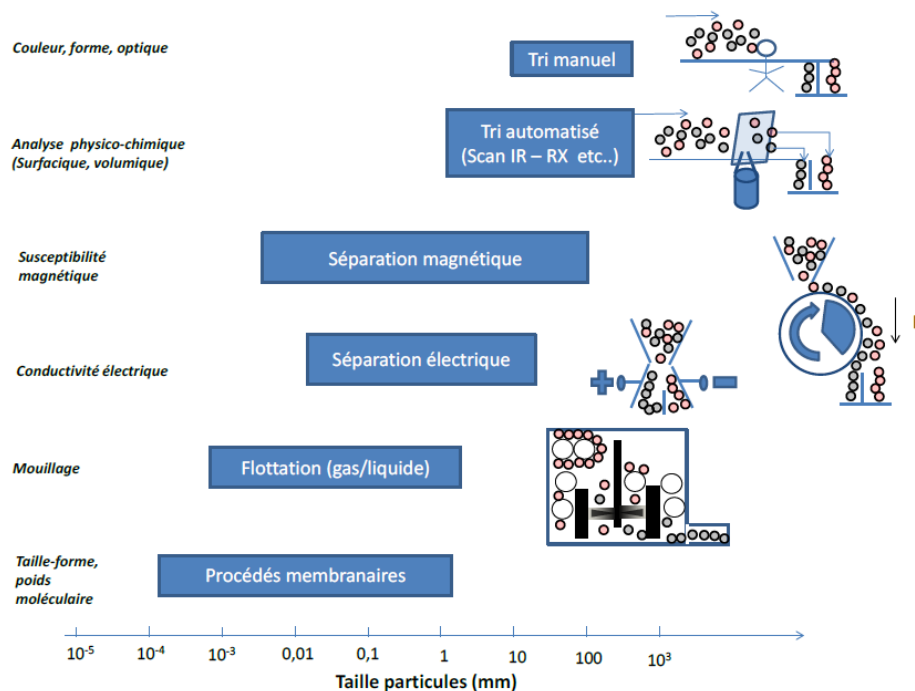


Figure 2. Procédés de séparation de particules sur critères physico-chimiques

Le tri automatique peut profiter des différentes mesures de propriétés physico-chimiques dont les avantages et les inconvénients ont été recensés : le « Dual Energy X- rayon transmission » ; la fluorescence induite par laser (LIF) ; la spectroscopie sur plasma induit par laser (LIBS) ; la spectrométrie de fluorescence X ; la technologie du capteur visuel ; l'imagerie thermique ; la spectroscopie proche infrarouge ; la technologie du TéraHertz ; la technologie du radar ; la télédétection par laser ; la spectroscopie Raman. L'intérêt de la séparation magnétique et électrique réside dans la séparation de matériaux non-ferromagnétiques. Enfin, la flottation est nécessairement une méthode de séparation humide.

Le choix d'une méthode de séparation correspondrait à des caractéristiques physiques et/ou chimiques des matériaux déterminées en amont. Des techniques de recyclage à sec seraient adaptées dans le cas de matériaux granulaires dont les différences de densité sont importantes. Dans le cas de matériaux de densités proches, on préférera des méthodes gravimétriques humides comme les tables vibrantes ou des séparateurs centrifuges comme les Falcon par exemple.

2.3 Technologie du tri sélectif de granulats béton concassé – essais en laboratoire

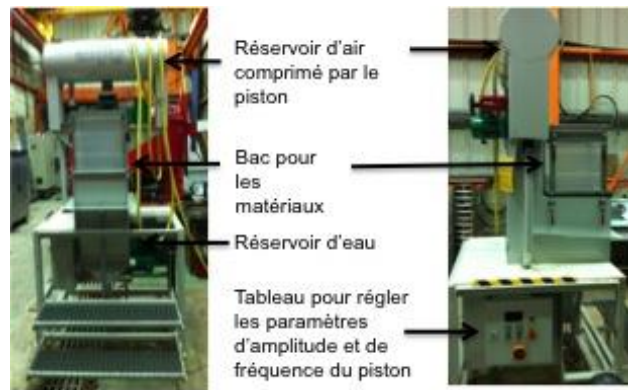
L'étude en laboratoire se propose d'évaluer :

- la capacité du procédé « jig à eau » de trier par densimétrie. Les mélanges traités sont composés de granulats de béton recyclé, de brique et de plâtre. Des essais de masse volumique et d'absorption d'eau sont réalisés pour caractériser les matériaux réarrangés après le traitement par la jig ;
- la capacité de détection des technologies optiques et NIR appliquées au tri des matériaux de déconstruction. Ces essais de faisabilité à l'université d'Aix-la-Chapelle en Allemagne concernent un échantillon de 30 particules regroupant le béton, l'enrobé bitumineux, la céramique, le plâtre, le verre, le métal et le mortier. Ils s'appuient sur la comparaison des signaux renvoyés par le matériau béton et ceux des autres matériaux. Les différences entre

les signaux renvoyés permettent d'estimer la faisabilité d'un traitement industriel par ces procédés d'analyse.

Essais sur jig à eau

Les essais à l'échelle du laboratoire se sont focalisés sur l'efficacité du principe de la jig à eau (cf. photo ci-jointe) pour trier le béton, la brique et le plâtre. Ont été testés différents mélanges granulaires (binaires et ternaires) variant en proportion volumique de chaque type de matériau. Après chaque essai de jig à eau, des mesures de masse volumique et d'absorption d'eau ont été réalisés sur les matériaux récupérés dans les tiroirs constituant le bac de la jig.



Ces mesures de masse volumique définissent un profil de densité dans le bac de la jig après l'essai. Le nouvel arrangement granulaire évalué par ce profil, permet d'estimer si l'arrangement granulaire obtenu respecte une décroissance de la densité selon la hauteur du bac de la jig.

La capacité de ce procédé à séparer des particules de béton et de plâtre s'avère satisfaisante (Figure 3). Outre l'observation visuelle, qui permet de constater l'efficacité du système, les analyses d'essais ont été réalisées en regardant les caractéristiques des couches horizontales (masse volumique et absorption) et leur évolution sur la hauteur de la jig. Un exemple typique de résultat de l'analyse est présenté dans la Figure 3. Les mesures de masse volumique sur les matériaux de chaque tiroir corrélient l'observation visuelle de l'état final. En effet, le profil de masse volumique composé d'un plateau puis d'une chute décrit correctement l'arrangement granulaire final.

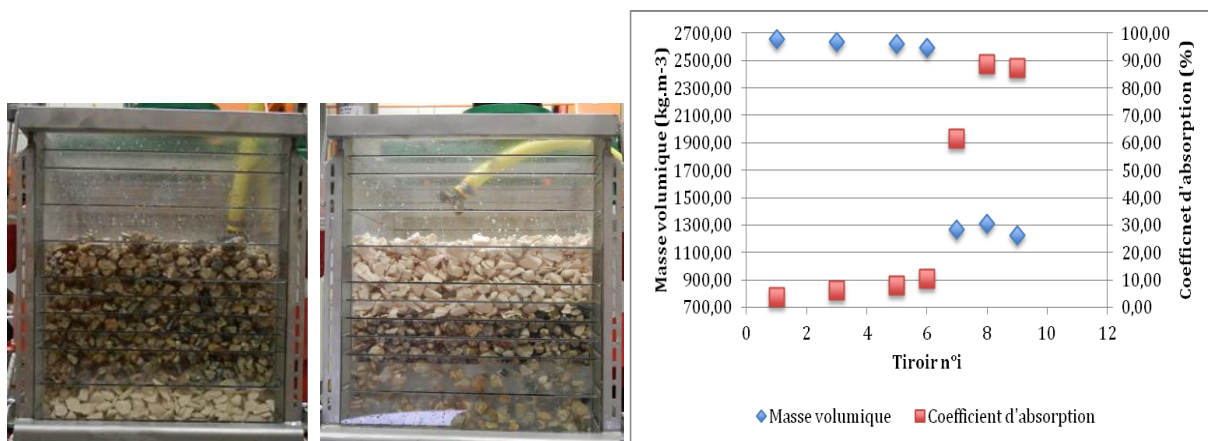


Figure 3. État initial de l'essai 3 (droite) et état après essai (gauche) - (composition moyenne 40% en volume plâtre concassé, 60% béton concassé) - Profil vertical de masse volumique et de coefficient d'absorption pour l'essai 3 (composition moyenne 40% en volume plâtre concassé, 60% béton concassé)

D'un point de vue général, les quatorze essais démontrent la capacité de tri de la jig à eau appliqué aux matériaux de type béton, brique et plâtre. **L'efficacité de ce procédé de tri est valable aussi bien pour les mélanges binaires que pour les mélanges ternaires.**

Il apparaît aussi que le matériau plâtre est trié de manière reproductible dans les mélanges où il est présent. Ce phénomène est remarquable, que le mélange soit composé de deux ou trois matériaux. Ceci s'explique par une grande différence de masse volumique entre le plâtre et les deux autres matériaux (brique et béton concassé).

Pour ce qui concerne la brique, ce matériau apparaît plus difficile à extraire dans un mélange avec des granulats de béton concassé. Cela est dû à une faible différence de masse volumique entre la brique et le béton concassé notamment. Il est possible d'améliorer le tri avec une part importante de brique (voir les essais avec 40 % de granulats de brique).

En définitif, le procédé « jig à eau » semble un procédé pertinent pour le tri des matériaux de type béton, brique et plâtre. L'efficacité de tri paraît correcte jusqu'à des niveaux assez faibles de matériaux « indésirables » (environ 10 %). Il semble aussi pertinent d'intégrer ce procédé avec d'autres procédés, comme les procédés NIR par exemple, pour affiner le tri en fin de chaîne.

Essais de capteurs de tri optique

Cette campagne expérimentale s'est déroulée dans le laboratoire de l'université d'Aix-la-Chapelle, dans le laboratoire de la société COMEX (Pologne) et à l'IFSTTAR. Les matériaux de démolition à traiter contiennent les matériaux suivants : granulats de béton concassé, mortier, brique, céramique, agrégat d'enrobé bitumineux, plâtre, verre, métal, dont la taille varie de 10 à 30mm.

Les tests optiques et par NIR ont donné des résultats prometteurs. La brique est rouge, le gypse est blanc, l'enrobé bitumineux est sombre, le verre est transparent, et le métal est gris foncé. En ce qui concerne le capteur optique, la simulation de tri peut clairement différencier ces particules des particules de béton. Le tri du mortier et de la céramique pourrait être plus difficile. La céramique apparaît dans de nombreuses couleurs différentes, de sorte que certaines particules peuvent avoir un schéma de couleur similaire par rapport aux particules de béton. Le mortier a généralement un système de couleur semblable à celui du béton. Mais dans des conditions humides, ces petites différences peuvent être augmentées, de sorte que la simulation permet d'obtenir un produit propre dans des conditions humides.

En général, la simulation de tri optique des particules humides atteint de meilleurs résultats que le tri à sec, en particulier en ce qui concerne le matériau de type mortier. Néanmoins, le système de couleur du mortier n'a pas toujours de grandes différences avec celui du béton. Un test sur un système industriel de tri est nécessaire pour prouver si les différences sont assez grandes pour trier le mortier avec une récupération significative.

Les mesures NIR montrent également la faisabilité de distinguer les 7 matériaux du matériau béton. En particulier pour le mortier et la céramique, cette technologie peut constituer une bonne combinaison avec le tri optique.

2.4 Influence du malaxage sur la rhéologie de bétons de granulats recyclés (sous-thème 1-7)

Au cours du malaxage, les granulats d'un béton subissent des sollicitations qui modifient leur granulométrie. Cette étude s'intéresse à cette variation granulométrique au travers d'essais après malaxage dans une pâte de ciment et avec une formulation type béton.

Les différentes modalités étudiées sont le **type de malaxeur, sa vitesse et sa configuration, le temps de malaxage, l'état hydrique initial du granulat (sec/saturé), les propriétés d'usure du granulat recyclé** (MDE 21 et 27). Une comparaison est donnée avec des essais réalisés lors de la tranche 1 du PN, avec agitation des granulats en l'absence de la pâte de ciment. Enfin, des essais d'affaissement ont été réalisés pour une partie des bétons fabriqués.

Le premier point d'étude est la création de passant à 2,5mm pour un granulat recyclé 10/14mm et la création de passant 0,5mm pour un sable recyclé 0.5/4mm. Pour le granulat recyclé 10/14, on observe un taux de création de passant à 2,5mm, fortement dépendant du type de malaxage, qui s'échelonne de 0,5%/min lors d'un malaxage dans un malaxeur planétaire jusqu'à 2,1%/min pour la configuration la plus extrême d'un malaxeur Eirich.

Le sable recyclé 0,5/4 mm subit le même protocole et le résultat de passant à 0,5mm obtenu est 5.9%/min pour le malaxeur Eirich avec une configuration classique contre-courant et une agitation de 500 tours/min.

Le second point de ce projet vise l'étude de l'étendue de la variation granulométrique à travers des essais au vidéogranulomètre sur les granulats après malaxage. Les sollicitations exercées vont entraîner de l'attrition ou de la fragmentation, phénomènes analysés au cours de la cinétique de réduction de la taille de granulats. Ces résultats s'ajoutent aux essais réalisés lors la tranche 1, essai de malaxage sur le granulat de béton seul, à l'état sec ou en présence d'eau. On met en évidence que la pâte cimentaire protège le granulat et diminue la vitesse de création des particules inférieures à 2,5mm.

L'étude de la réduction de taille d'un granulat recyclé avec une moins bonne résistance à l'usure selon l'essai Micro Deval, a permis d'interpréter la cinétique du passant en fonction du temps. Il semblerait que l'interface mortier adhérent/granulats naturel des granulats recyclés avec un « bon » MDE fragilise les granulats en début de malaxage, qui devient plus résistant lors d'un malaxage plus long suite à l'émergence du granulat naturel d'origine. Pour les granulats avec un « mauvais » MDE une évolution linéaire de la création de passant à 2,5mm avec le temps de malaxage est observée. Il semblerait que la plus forte proportion de mortier dans ces granulats retarde l'apparition du granulat naturel d'origine.

L'étude complémentaire de l'angularité des échantillons permet d'avoir une meilleure compréhension de l'ensemble des phénomènes. En effet, l'angularité des granulats recyclés baisse en début de malaxage lorsque le granulat perd son mortier adhérent. Elle augmente par la suite, lorsqu'on fait ressortir le granulat naturel présent dans le granulat recyclé. En ce qui concerne le granulat recyclé avec un « mauvais » MDE, ce phénomène n'apparaît pas car le grain est composé en moindre mesure de granulat naturel.

Enfin, des essais d'affaissements au cône ont été réalisés pour examiner la maniabilité. La variation de taille des granulats a une influence sur la maniabilité car celle-ci augmente jusqu'à 180 secondes de malaxage puis diminue à 300 secondes.

3 Matériaux et structure (thème 2)

Le thème 2 traite des sujets relatifs aux caractéristiques des granulats recyclés et des bétons obtenus à partir de ces granulats recyclés. Ce thème a été décomposé en 4 sous-groupes :

- Sous-groupe 2A : Caractéristiques des granulats recyclés
- Sous-groupe 2B : Caractéristiques des bétons à l'état frais et durcissant
- Sous-groupe 2C : Caractéristiques des bétons durcis – comportement mécanique
- Sous-groupe 2D : Caractéristiques des bétons durcis – durabilité, feu, thermique

Tous les sous-groupes ont été actifs en tranche 2 y compris pour les sous-groupes 2C et 2D sur des sujets couverts par le projet ANR ECOREB qui fait notamment l'objet de deux thèses.

3.1 Sous-groupe 2A : Caractéristiques des granulats recyclés

Titre du Rapport : Etude de variabilité des caractéristiques des granulats recyclés issus de diverses sources et suivi – Partie 2 : variabilité dans le temps
Auteurs : François JEZEQUEL, Christian CLERGUE
Laboratoire : SIGMA BETON

Objectifs

L'objectif de la seconde phase de cette action est d'étudier les granulats disponibles sur le marché français actuellement et pour deux de ces plateformes (DLB Gonesse et Plattard ANCYCLA) de réaliser un suivi sur une durée de deux ans de la variabilité des caractéristiques avec un prélèvement tous les deux mois.

Résultats

Les analyses réalisées sur les granulats recyclés montrent que la majorité des normes d'essais ne posent pas de problème. Il est à noter que ces résultats seront complétés par une étude statistique réalisée à partir de l'ensemble des données obtenues lors de cette étude de variabilité.

Si le maintien du niveau de certaines caractéristiques (aplatissement, valeur de bleu de méthylène, ...) satisfait parfaitement aux exigences pour une utilisation dans le béton, d'autres paramètres sont beaucoup plus variables (classification des constituants, absorption d'eau, sulfates solubles dans l'eau, ...).

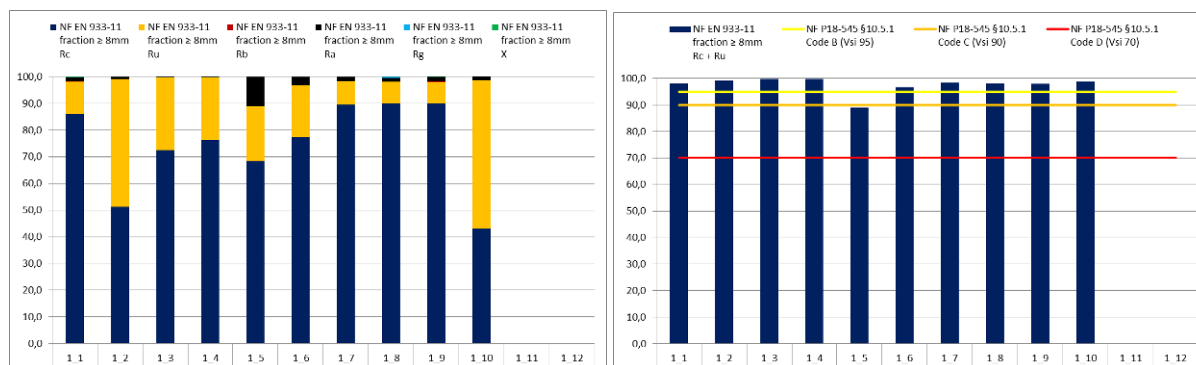


Figure 4. Analyse des constituants de la plateforme A dans le temps (1^{er} graphe : tous constituants, 2^{sd} graphe : constituants principaux et comparaison aux niveaux de spécification)

Cette variabilité conduit à des changements de qualification des granulats recyclés (passage de type 1 en type 3) d'un prélèvement à l'autre.

Pour certaines caractéristiques (sulfates solubles dans l'eau, variabilité de l'absorption d'eau,...) cela peut même conduire pour certaines périodes de production à une impossibilité d'utilisation de ces granulats recyclés pour un usage béton.

Les constituants des granulats recyclés sont liés avec les niveaux de ces caractéristiques et une sélection du gisement pourra seule permettre d'atténuer la variabilité des granulats recyclés.

N°	Plateforme	Lot	Coupure testée	Remarque	NF P18-545 §10.2.1 Code "F"	NF P18-545 §10.1.3 Code "Gr"	NF P18-545 §10.1.4 Code "FI"	NF P18-545 §10.2.3 Code "P"	NF P18-545 §10.5.1 Code "CR"	NF P18-545 §10.1.1 Code "LA"	NF P18-545 §10.3.1 Code "Ab"	NF P18-545 §10.5.2 Code "SS"	NF P18-545 §10.5.4 Code "A"	NF P18-545 §10 Code ...
1	Plateforme DLB de Gonesse	1_1	Sable 0/4	-	f_A			P_A			Ab_D	SS_B	A_B	D
2	Plateforme DLB de Gonesse		Gravillon 4/10	-		Gr_A	FI_A			LA_A	Ab_B			B
3	Plateforme DLB de Gonesse		Gravillon 10/20	-		Gr_A	FI_A		CR_C	LA_B	Ab_B	SS_B	A_B	C
4	Plateforme DLB de Gonesse	1_2	Sable 0/6,3	-	f_A			P_A			Ab_D	SS_D	A_D	D
5	Plateforme DLB de Gonesse		Gravillon 6,3/20	-		Gr_A	FI_A		CR_B	LA_A	Ab_B	SS_B	A_D	D
9	Plateforme DLB de Gonesse	1_3	Sable 0/6,3	-	f_A			P_A			Ab_D	SS_D	A_B	D
10	Plateforme DLB de Gonesse		Gravillon 6,3/20	-		Gr_A	FI_A		CR_B	LA_A	Ab_D	SS_B	A_B	D
11	Plateforme DLB de Gonesse	1_4	Sable 0/6,3	-	f_A			P_A			Ab_B	SS_B	A_B	B
12	Plateforme DLB de Gonesse		Gravillon 6,3/20	-		Gr_A	FI_A		CR_B	LA_A	Ab_C	SS_B	A_D	D
15	Plateforme DLB de Gonesse	1_5	Sable 0/6,3	-	f_A			P_A			Ab_D	SS_D	A_B	D
16	Plateforme DLB de Gonesse		Gravillon 6,3/20	-		Gr_A	FI_A		Hors code	LA_A	Ab_C	SS_B	A_B	Hors code
17	Plateforme DLB de Gonesse	1_6	Sable 0/6,3	-	f_A			P_A			Ab_D	SS_D	A_B	D
18	Plateforme DLB de Gonesse		Gravillon 6,3/20	-		Gr_A	FI_A		CR_C	LA_A	Ab_C	SS_B	A_D	D
19	Plateforme DLB de Gonesse	1_7	Sable 0/6,3	-	f_A			P_A			Ab_D	SS_D	A_D	D
20	Plateforme DLB de Gonesse		Gravillon 6,3/20	-		Gr_A	FI_A		CR_C	LA_A	Ab_B	SS_B	A_D	D
25	Plateforme DLB de Gonesse	1_8	Sable 0/6,3	-	f_A			P_A			Ab_D	SS_D	A_D	D
26	Plateforme DLB de Gonesse		Gravillon 6,3/20	-		Gr_A	FI_A		CR_B	LA_B	Ab_C	SS_B	A_B	C
29	Plateforme DLB de Gonesse	1_9	Sable 0/6,3	-	f_A			P_A			Ab_D	SS_D	A_D	D
30	Plateforme DLB de Gonesse		Gravillon 6,3/20	-		Hors code	FI_A		CR_C	LA_A	Ab_C	SS_B	A_D	Hors code
33	Plateforme DLB de Gonesse	1_10	Sable 0/6,3	-	f_A			P_A			Ab_D	SS_D	A_B	D
34	Plateforme DLB de Gonesse		Gravillon 6,3/20	-		Gr_A	FI_A		CR_B	LA_B	Ab_B	SS_B	A_B	B
37	Plateforme DLB de Gonesse	1_11	Sable 0/6,3	-	f_A			P_A			Ab_D	SS_D	???	???
38	Plateforme DLB de Gonesse		Gravillon 6,3/20	-		Gr_A	FI_A		???	LA_B	Ab_B	SS_B	???	???
41	Plateforme DLB de Gonesse	1_12	Sable 0/6,3	-	f_A			P_A			Ab_D	???	???	???
42	Plateforme DLB de Gonesse		Gravillon 6,3/20	-		Gr_A	FI_A		???	???	Ab_C	???	???	???

Figure 5. Résultats des essais de classification des constituants de gravillons recyclés réalisés sur les gravillons recyclés soumis à l'étude de variabilité dans le temps

N°	Plateforme	Lot	Coupure testée	Remarque	NF P18-545 §10.2.1 Code "F"	NF P18-545 §10.1.3 Code "Gr"	NF P18-545 §10.1.4 Code "FI"	NF P18-545 §10.2.3 Code "P"	NF P18-545 §10.5.1 Code "CR"	NF P18-545 §10.1.1 Code "LA"	NF P18-545 §10.3.1 Code "Ab"	NF P18-545 §10.5.2 Code "SS"	NF P18-545 §10.5.4 Code "A"	NF P18-545 §10 Code ...
6	Plateforme ANCYCLA de Villefranche sur Saône	2_1	Sable 0/4	Coupure réalisée en laboratoire	f_A			P_A			Ab_B	SS_B	A_B	B
7	Plateforme ANCYCLA de Villefranche sur Saône		Gravillon 4/10	Coupure réalisée en laboratoire		Gr_A	FI_A			LA_A	Ab_B			B
8	Plateforme ANCYCLA de Villefranche sur Saône		Gravillon 10/22,4	Coupure réalisée en laboratoire		Gr_A	FI_A		CR_B	LA_A	Ab_B	SS_B	A_B	B
13	Plateforme ANCYCLA de Villefranche sur Saône	2_2	Sable 0/6,3	Coupure réalisée en laboratoire	f_A			P_A			Ab_D	SS_B	A_D	D
14	Plateforme ANCYCLA de Villefranche sur Saône		Gravillon 6,3/20	Coupure réalisée en laboratoire		Hors code	FI_A		CR_B	LA_A	Ab_D	SS_B	A_D	Hors code
21	Plateforme ANCYCLA de Villefranche sur Saône	2_3	Sable 0/6,3	Coupure réalisée en laboratoire	f_A			P_A			Ab_D	SS_B	A_B	D
22	Plateforme ANCYCLA de Villefranche sur Saône		Gravillon 6,3/20	Coupure réalisée en laboratoire		Hors code	FI_A		CR_B	LA_A	Ab_C	SS_B	A_B	Hors code
23	Plateforme ANCYCLA de Villefranche sur Saône	2_4	Sable 0/6,3	Coupure réalisée en laboratoire	f_A			P_A			Ab_D	SS_B	A_B	D
24	Plateforme ANCYCLA de Villefranche sur Saône		Gravillon 6,3/20	Coupure réalisée en laboratoire		Gr_A	FI_A		CR_B	LA_A	Ab_C	SS_B	A_B	C
27	Plateforme ANCYCLA d'ANSE	2_5	Sable 0/6,3	Coupure réalisée en laboratoire	f_A			P_A			Ab_D	SS_D	A_B	D
28	Plateforme ANCYCLA d'ANSE		Gravillon 6,3/20	Coupure réalisée en laboratoire		Hors code	FI_A		CR_C	LA_A	Ab_B	SS_B	A_D	Hors code
31	Plateforme ANCYCLA d'ANSE	2_6	Sable 0/6,3	Coupure réalisée en laboratoire	f_A			P_A			Ab_D	SS_D	A_B	D
32	Plateforme ANCYCLA d'ANSE		Gravillon 6,3/20	Coupure réalisée en laboratoire		Hors code	FI_A		CR_C	LA_B	Ab_B	SS_B	A_B	Hors code
35	Plateforme ANCYCLA d'ANSE	2_7	Sable 0/6,3	Coupure réalisée en laboratoire	f_B			P_A			Ab_D	SS_B	A_B	D
36	Plateforme ANCYCLA d'ANSE		Gravillon 6,3/20	Coupure réalisée en laboratoire		Hors code	FI_A		CR_C	LA_B	Ab_C	SS_B	A_B	Hors code
39	Plateforme ANCYCLA d'ANSE	2_8	Sable 0/6,3	Coupure réalisée en laboratoire	f_A			Hors code			Ab_D	SS_B	???	Hors code
40	Plateforme ANCYCLA d'ANSE		Gravillon 6,3/20	Coupure réalisée en laboratoire		Gr_A	FI_A		???	LA_B	Ab_C	SS_B	???	???
43	Plateforme ANCYCLA d'ANSE	2_9	Sable 0/6,3	Coupure réalisée en laboratoire	f_A			P_A			Ab_D	???	???	???
44	Plateforme ANCYCLA d'ANSE		Gravillon 6,3/20	Coupure réalisée en laboratoire		Hors code	FI_A		???	???	Ab_D	???	???	Hors code
45	Plateforme ANCYCLA d'ANSE	2_10	Sable 0/6,3	Coupure réalisée en laboratoire	???			???			???	???	???	???
46	Plateforme ANCYCLA d'ANSE		Gravillon 6,3/20	Coupure réalisée en laboratoire		???	???		???	???	???	???	???	???
47	Plateforme ANCYCLA d'ANSE	2_11	Sable 0/6,3	Coupure réalisée en laboratoire	???			???			???	???	???	???
48	Plateforme ANCYCLA d'ANSE		Gravillon 6,3/20	Coupure réalisée en laboratoire		???	???		???	???	???	???	???	???
49	Plateforme ANCYCLA d'ANSE	2_12	Sable 0/6,3	Coupure réalisée en laboratoire	???			???			???	???	???	???
50	Plateforme ANCYCLA d'ANSE		Gravillon 6,3/20	Coupure réalisée en laboratoire		???	???		???	???	???	???	???	???

Figure 6. Résultats des essais de classification des constituants de gravillons recyclés réalisés sur les gravillons recyclés soumis à l'étude de variabilité dans le temps. Les points d'interrogation correspondent à des mesures non encore disponibles, mais qui seront effectuées d'ici à la fin du PN.

3.2 Sous-groupe 2B : béton frais et durcissant

Concernant ce sous-groupe une étude démarrée en tranche 1 a été terminée durant la tranche 2 :

Titre du Rapport de phase 2 : Evolution de la rhéologie du béton recyclé frais en fonction du malaxage, du pourcentage de gravillons recyclés et de l'état de pré-saturation
Auteurs : Vu NAM NGUYEN, Franck CASSAGNABERE, Martin CYR, Michel MOURET
Laboratoire : LMDC de l'Université de Toulouse

Objectifs

L'objectif de cette étude concerne le comportement à l'état frais de bétons contenant des sables et gravillons recyclés (C25/30 et consistance S4). Le but principal était d'étudier l'évolution de la rhéologie des bétons entre 0 et 90 minutes, en fonction de la teneur en eau initiale des granulats recyclés (pourcentage de l'absorption – Ab). La résistance en compression à 28 jours a aussi été déterminée.

Résultats

Les mélanges étudiés ont inclus : un béton avec 100% de gravillon recyclés utilisés à trois niveaux de saturation (Absorption + 1%, 0,75Ab, 0,3Ab) et un béton avec une substitution massique de 30% de sable recyclé (1,2Ab, 1,0Ab, 0,87Ab, 0,5Ab, 0,33Ab).

La quantité totale d'eau est demeurée constante pour chaque type de composition (100% de gravillon recyclé ou 30% de sable recyclé).

Les résultats ont montré que les affaissements ont été dégradés dans le temps, quel que soit le taux de saturation des granulats recyclés. Les affaissements les moins bons ont été obtenus pour les granulats saturés ou sursaturés (moins d'eau immédiatement disponible dans le mélange pour assurer la rhéologie).

Les viscosités (déduites de courbes couple-vitesse de rotation) ont augmenté dans le temps, spécialement pour les taux de saturation les plus bas. Les viscosités les plus faibles ont été obtenues lorsque les granulats recyclés étaient proches de leur niveau de saturation, sans être sursaturés.

La résistance en compression des bétons était :

- plus faible lorsque les gravillons recyclés étaient sous-saturés ;
- pratiquement non affectée pour les sables recyclés sous ou sursaturés ;
- diminuée lorsque les sables recyclés étaient proches de leur niveau de saturation.

On note donc que les différents paramètres du béton (rhéologie, viscosité, résistance en compression) varient en sens inverse en fonction du taux de saturation initiale. Les résultats apparaissent comme répétables, à défaut d'être facilement explicables.

3.3 Sous-groupe 2C : Caractéristiques des bétons durcis – comportement mécanique

Titre du Rapport : Fissuration des parties d'ouvrage liées à la dessiccation – Modèle de prédiction de la fissuration des dalles du chantier de Chaponost

Auteurs : C. DE SA et F. BENBOUDJEMA

Laboratoire : LMT-Cachan

Objectifs

Identifier par la réalisation d'un modèle prédictif le risque de fissuration d'ouvrages en béton incorporant des granulats recyclés. Le modèle prédictif sera confronté aux observations de terrain réalisées sur le chantier expérimental de Chaponost sur lequel 9 formulations de béton avec différents taux d'introduction de granulats recyclés ont été coulées.

Bilan des travaux précédents

Prédiction du risque de fissuration en séchage, sans prise en compte des effets de l'hydratation et du fluage propre et de dessiccation : pas de risque constaté sauf au niveau du sciage des joints, quelle que soit la composition de béton recyclé.

Résultats :

Identification des paramètres des simulations complètes :

- Avec influence de l'hydratation sur les propriétés mécaniques : E , f_t et f_c .
- Un modèle linéaire en fonction du degré d'avancement est considéré pour E . On considère un seuil de percolation à 0,1 (valeur classique de la littérature).
- Un modèle non linéaire en fonction du degré d'avancement pour f_c et f_t , où l'on vient calibrer l'exposant en puissance en fonction des résultats du GeM. A noter des différences constatées sur les résistances en compression mesurées pour la composition 0S100G entre les essais effectués au GeM et chez SIGMA Beton.
- Avec prise en compte du fluage propre, du fluage de dessiccation, du retrait endogène.
- Le fluage propre est identifié à partir des essais de retrait à l'anneau du GeM (et extrapolé pour les compositions non testées par le GeM).

- Le fluage de dessiccation n'ayant pas donné lieu à des essais expérimentaux, on utilise des valeurs de la littérature pour identifier le coefficient de fluage de dessiccation, en fonction du rapport E/C
- Le retrait endogène mesuré par le GeM a donné des valeurs faibles. Il semble donc négligeable par rapport au retrait de dessiccation (il a tout de même été identifié pour les simulations finales).

L'ensemble de ces identifications ont été réalisées. A noter, un manque d'essais expérimentaux permettant de calibrer les différents modèles, ce qui a amené à de multiples hypothèses dans les identifications réalisées. Le manque d'informations sur la pâte de ciment et les granulats a également empêché la tenue de simulations mésoscopiques (qui auraient nécessité alors de plus amples hypothèses).

Les parties dédiées aux modèles et à l'identification des paramètres est réalisée. Les résultats préliminaires sur dalles avec modèle simplifié sont également déjà obtenus.

En complément, une simulation sur dalles avec le modèle complet (prise en compte des évolutions supposées d'humidité relative et de température - données d'une station météo de Lyon), est en cours avec l'ensemble des paramètres précédemment calibrés.

Titre du Rapport : Adhérence béton recyclé / armatures HA

Auteurs : G. WARDEH

Laboratoire : L2MGC

Objectifs

L'étude s'intéresse au comportement d'adhérence acier/béton dans le cas de 6 bétons de granulats recyclés correspondant à 2 classes de résistance : C25/30 et C35/40 ainsi que 2 formulations de référence. Différents types d'essais ont été conduits : essais d'arrachement, essais tirants, essais sur poutre. Dans le cas des essais d'arrachement, des observations systématiques des surfaces de ruptures ont également été réalisées, afin d'étudier les mécanismes de rupture y compris à l'échelle microscopique.

Essais d'arrachement

Les essais d'arrachement ont montré que, d'un point de vue qualitatif, le comportement à l'arrachement et les mécanismes de ruine associés, restent les mêmes que ceux observés pour les bétons courants. Quantitativement, les contraintes ultimes d'adhérence observées pour les bétons de granulats recyclés restent du même ordre de grandeur que celles mesurées pour les bétons normaux de référence. Dans tous les cas, les valeurs mesurées restent au moins 5 fois supérieures aux valeurs de calcul issues de l'Eurocode 2.

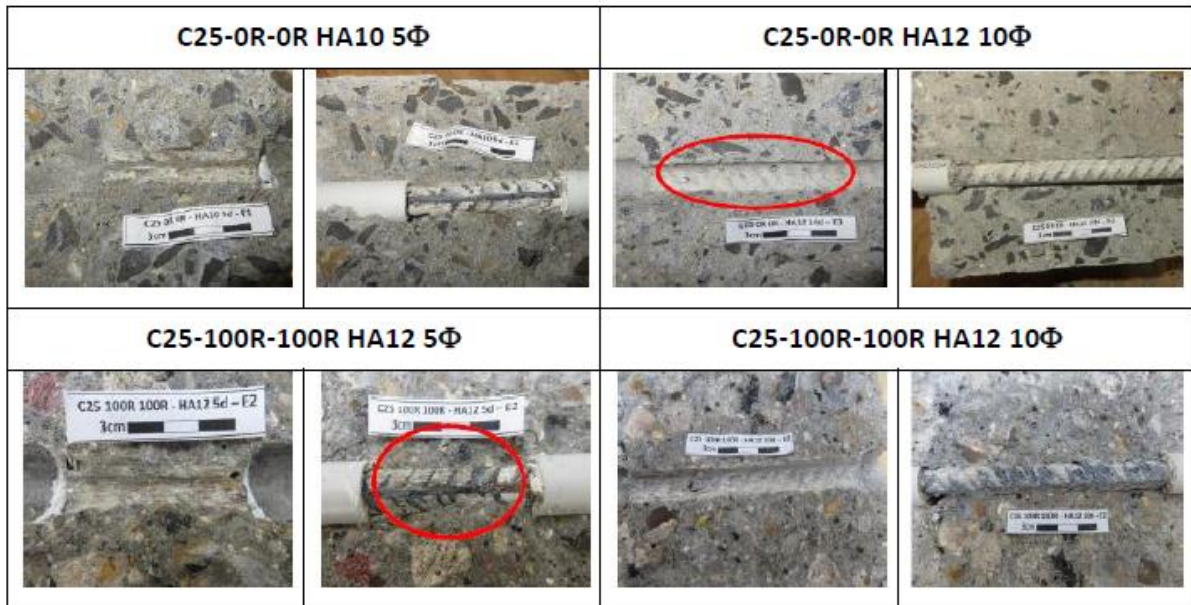


Figure 7. Etat de l'interface acier/béton pour la série C25/30

Essais sur Tirants et essais sur poutres

Ces essais ont permis de s'intéresser à la question de la fissuration. Les bétons de granulats recyclés ont présenté plutôt un peu plus de fissuration (en nombre) que les bétons courants. Les essais sur poutres ont montré par ailleurs que les ouvertures des fissures restent du même ordre de grandeur que dans le cas des bétons normaux, quelle que soit la classe de résistance du béton (C25/30 ou C35/40). Les prévisions de l'Eurocode 2 en matière de fissuration restent donc valables pour les formulations à base de recyclés qui ont été étudiées.

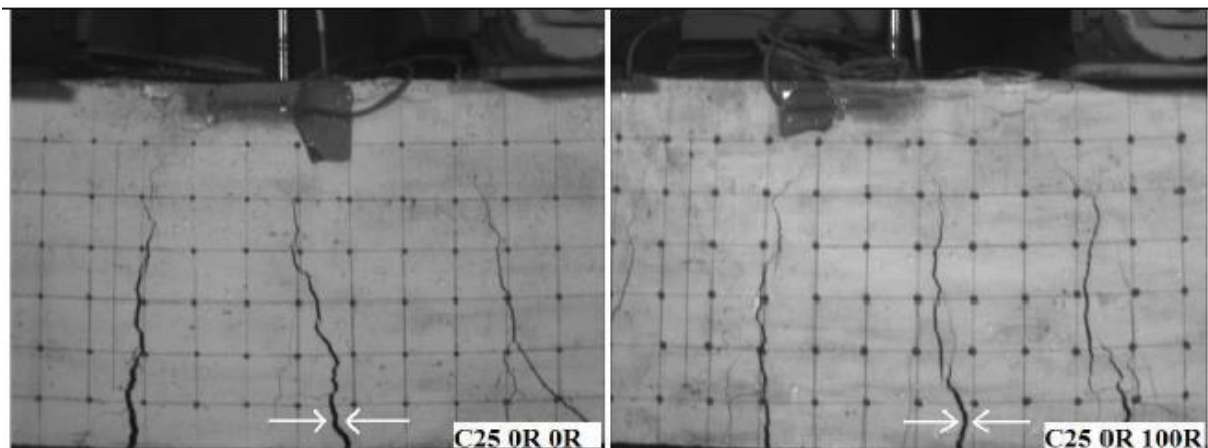


Figure 8. Fissures filmées par la caméra

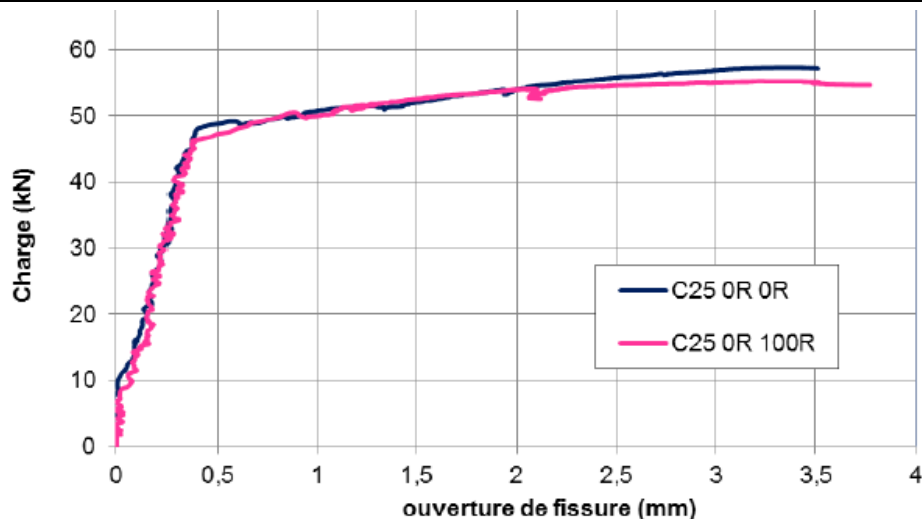


Figure 9. Ouverture de fissure en fonction du chargement

Résultats de l'étude

Cette étude permet de conclure que, pour les compositions étudiées, l'Eurocode 2 permet une prise en compte satisfaisante des propriétés d'adhérence acier/béton des bétons de granulats recyclés, sans remettre en question de manière significative le niveau de sécurité qu'il procure pour les bétons courants.

Etat d'avancement de l'ANR Ecoreb sur Etude du comportement mécanique sous chargements statique, cyclique et différé des bétons recyclés

Auteurs : Elhem GHORBEL

Laboratoire : L2MGC

Dans le cadre de la thèse de Nguyen Minh Duc six formulations ont été choisies à savoir trois de la série C25/30 et trois de la série C35/45. Les formulations sont les suivantes :

- C25/30 0R 0R, C25/30 30R 30 et C25/30 0R 100R
- C35/45 0R 0R, C35/45 30R 30 et C35/45 0R 100R

Programme expérimental

Les travaux réalisés jusqu'au présent sont :

- Caractérisation des propriétés mécaniques travers d'essais uniaxiaux (compression, traction par fendage)
- Etude du comportement de 6 six bétons sous chargements monotones et suivi de la relation contrainte-déformation ainsi que les déformations au pic et ultime.
- Etude de l'évolution des propriétés mécaniques et des déformations caractéristiques en fonction des taux de substitution en granulats recyclés.
- Enrichissement des modèles établis dans l'EC2 en introduisant le taux de substitution des granulats recyclés.
- Etude du comportement de 6 six bétons sous chargement cyclique et caractérisation de l'endommagement. L'évolution de l'endommagement est évaluée à partir de l'évolution du module d'élasticité statique.
- Réalisation des essais dit interrompus à des degrés d'endommagement définis afin de corrélérer l'endommagement à la microstructure des bétons étudiés.
- La caractérisation de la microstructure à travers des essais de résistivités électriques.

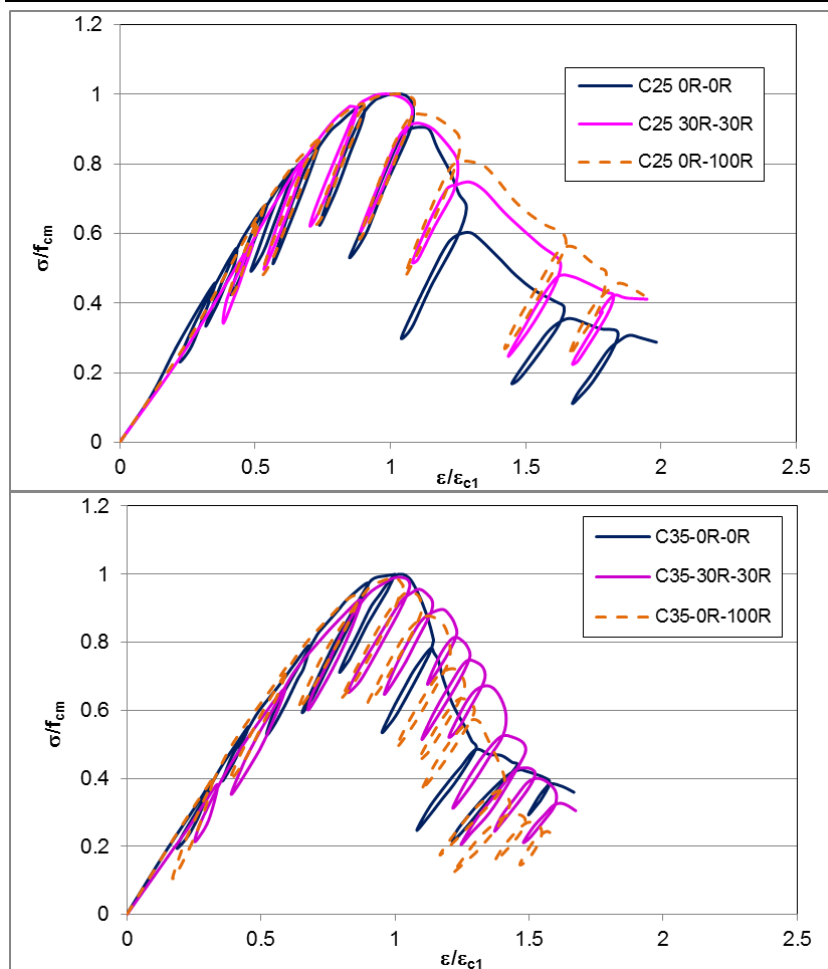


Figure 10. Comportement du béton lors des cycles chargement-déchargement

Production scientifique

- Article soumis à International Conference on Sustainable Structural Concrete, La Plata, Argentine 15-18 September 2015.
- Résumé accepté et article à soumettre à CONCREEP-10 Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete and Concrete Structures, September 21-23, 2015 | Vienna, Austria.
- Résumé accepté et article à soumettre à l'AUGC 2015.

3.4 Sous-groupe 2D : Caractéristiques des bétons durcis – durabilité, feu, thermique

Titre du Rapport : Alkali-réaction (applicabilité de la démarche RAG)

Auteurs :

Laboratoire : Université de Lorraine, DOUAI, LMDC

Objectifs

Les travaux visent à statuer sur l'applicabilité de la démarche RAG pour les bétons réalisés à base de granulats recyclés. L'objectif de l'étude est bien in fine d'identifier dans les recommandations les points nécessitant d'être revus dans le cas des GBR.

Le référentiel pour l'alkali-réaction est désormais le fascicule de documentation P 18-464. Cette norme remplace les recommandations LCPC de 1994.

Résultats

L'étude est réalisée sur 5 types de GBR de provenances différentes (Paris x 2, Strasbourg, Lille, Lyon). La proportion pâte/granat des GBR est variable selon la provenance des GBR. Toutes les analyses ont été effectuées sur des échantillons prélevés à l'issue d'un quartage. On note une absorption d'eau des GBR entre 3 % (Lyon) et 6,8 % (Paris et Lille). La granulométrie des gravillons de Lyon se distingue des autres car ces matériaux contiennent beaucoup de fines (courbe granulométrique plus étalée). Le matériau de Lille est atypique et contient beaucoup de brique (pour mémoire l'absorption d'eau de la brique est proche de 30 %).

Les analyses par diffractométrie de rayons X (DRX) mettent en évidence la présence importante de quartz, calcite, albite et de microlite (échantillon de Strasbourg). On note la présence de minéraux réactifs et de pyrite dans certains granulats calcaire (en particulier en provenance de Strasbourg).

Le FD P 18-542 fixe une limite haute à 4 % pour les espèces réactives. Un taux inférieur signifie « pas d'espèces réactives ».

Les teneurs en alcalins totaux sont élevés pour le matériau de Strasbourg, Lyon et Lille (respectivement autour de 1,3 ; 1 et 0,9) et moins pour Paris (0,6). Les matériaux de Lille et Paris libèrent beaucoup d'alcalins (K_2O et Na_2O) alors que les matériaux de Strasbourg et de Lyon en libèrent peu.

Le matériau de Lille libère beaucoup d'alcalins et présente les caractéristiques suivantes : $R_c + R_u = 77$ %. Leur usage est limité à la classe d'exposition X0. Les matériaux de Lyon et Strasbourg ne libèrent pas de silice alors que les deux matériaux de Paris en libèrent beaucoup et se trouvent dans la classification PR. Le matériau de Lille se trouve à la limite entre une qualification NR et PR.

Une étude des déformations a été réalisée sur des éprouvettes 4x4x16 (cm) autoclavées. Les mortiers étudiés présentaient un rapport C/G égal à 0,5. Des essais bilatéraux ont été réalisés entre l'école des mines de Douai et Nancy sur le granulat de Paris (4/10). Les expansions mesurées par les deux laboratoires sont très proches.

Au total, trois protocoles ont été testés :

- ▶ Protocole 1. Prise en compte de l'absorption ; présaturation des granulats ;
- ▶ Protocole 2. Prise en compte de l'absorption : non présaturation des granulats (toute l'eau est incorporée au moment du malaxage) ;
- ▶ Protocole 3. Essai conventionnel (non prise en compte de l'absorption d'eau par les granulats).

Dans le cas de ces essais croisés préliminaires, l'essai conventionnel (mode opératoire n° 3) est le plus discriminant. Néanmoins, la compacité de la pâte liée au volume réel d'eau efficace dans les mélanges ayant certainement un rôle, il paraît important d'intégrer l'absorption d'eau des GBR. Dans le cas des GBR et du mode opératoire conventionnel, la mise en place est parfois plus difficile avec le protocole 3.

On s'oriente donc à ce jour (à confirmer par la suite) vers une préconisation du protocole 1 (proche des conditions d'utilisation), protocole qui reste discriminant.

Pour les mortiers réalisés avec les matériaux de Paris, les résultats montrent une expansion des éprouvettes de

- 0,29 % pour un rapport C/G égale à 0,5 ;
- 0,38 % pour rapport C/G égal à 1,25 ;
- et 0,3 % pour un rapport C/G égal à 2,5.

Essais à venir :

- Les cartographies des échantillons par MEB/EDS. Les premiers résultats mettent en évidence la présence de Al et Si aux mêmes endroits que les alcalins. On retrouve la présence de feldspath et de quartz ;
- Des essais à long terme sur béton, sur éprouvettes 7*7*28 (cm), sont prévus (3 mois d'essai minimum). Il est convenu que le ciment de référence sera de préférence le ciment CEM I utilisé pour l'étude réalisée sur les éprouvette 4*4*16 (cm) ;
- Il est prévu de tester également l'impact des additions minérales. Deux additions sont envisagées : métakaolin et laitier, il reste à choisir l'une d'entre elles.

Les résultats d'expansion sur mortiers montrent que tous les gravillons de GBR étudiés dans le cadre de ce projet seraient classés comme réactifs d'après cette méthode.

Le gravillon GBR de Paris 4/10 dépasse très largement le seuil d'expansion (2 fois le seuil et plus en fonction du C/G) ainsi que celui de Lille dans une moindre mesure (moins de 2 fois le seuil). Ces résultats sont cohérents avec le classement « PR » (potentiellement réactifs) obtenu par les essais de dosage en silice soluble. De même, il a été observé que ces matériaux libèrent une quantité significative d'alcalins.

Les gravillons GBR de Lyon et Strasbourg dépassent le seuil d'expansion beaucoup plus modérément (voire ne le dépasse pas dans le cas du GBR Lyon avec C/G = 2,5). Les résultats sur mortiers viennent cette fois en contradiction avec ceux obtenus par les essais de dosage en silice soluble qui les avaient classés comme « NR » (non-réactifs). Toutefois, dans le cas du gravillon de Lyon, il a été identifié que les éléments fins qu'il renferme étaient à l'origine d'une libération d'alcalins significative pouvant intervenir dans la réaction. De même, il a été constaté que le gravillon GBR de Strasbourg contient dans sa phase granulaire des grains bruts (granulat du béton d'origine) pouvant présenter une réactivité important et donc être à l'origine de cette expansion malgré que le GBR de Strasbourg libère peu d'alcalins et peu de silice. En effet, un mortier de GBR de Strasbourg enrichi en grains bruts (donc appauvri en pâte de ciment durcie) présente un niveau d'expansion très important de l'ordre de 0,33 %.

Il est à noter que la tendance des résultats d'expansion sur mortiers réalisés cette fois à partir des sables de GBR étudiés donnerait un classement des sables de GBR de Strasbourg, Lyon et Lille comme non réactifs. Seul le sable de GBR Paris serait expansif.

Travaux sur la durabilité menés dans le projet ANR ECOREB

Laboratoires : CERIB, IFSTTAR, Université de Cergy

L'objectif de cette étude est de caractériser et comprendre l'influence de l'incorporation de granulats recyclés sur la durabilité des bétons : carbonatation, migration des chlorures, gel/dégel, perméabilité, porosité.

Résultats

L'étude de durabilité est réalisée sur 12 bétons (tableau 1).

Tableau 1. Récapitulatif des formulations de bétons pour l'étude de la durabilité

Classe de résistance mécanique à 28 jours	Pourcentage de sable et gravillons recyclés
C25/30	0R0R, 30R30R, 0R100R
C35/45	0R0R, 10R10R, 20R30R, 30R30R, 0R50R, 0R100R
C45/55	0R0R, 30R30R, 0R100R

Au total six essais ont été réalisés à différentes échéances (28, 56, 91 et 365 jours) :

- absorption d'eau (NF EN 13369) ;
- porosité accessible à l'eau (XP P 18-459) ;

- essai de carbonatation accéléré (norme européenne 4% de CO₂) ;
- immersion dans l'eau, suivi des variations dimensionnelles ;
- coefficient de diffusion aux ions chlorures (XP P 18-462) ;
- perméabilité au gaz (XP P 18- 463, méthode Cembureau).

Concernant l'étude de résistance au gel/dégel, cinq bétons de classe C30/37 sont prévus : 0R0R, 10R10R, 20R30R, 30R30R, 0R50R. Les fabrications seront réparties sur 2015 de la façon suivante : trois fabrications courant mars et les deux dernières courant août. L'air entrainé visé se situera entre 4% et 5 %.

Les essais commenceront après 28 jours de cure humide. Les essais NF XP 18-420 et NF 18-424 seront effectués au CERIB et l'essai NF 18-425 à Cergy.

Les essais au MEB et de porosimétrie mercure sont en cours à l'IFSTTAR.

Les résultats concernant la résistance à la compression, la porosité, la diffusion des chlorures, la carbonatation et la perméabilité sont présentés ci-dessous :

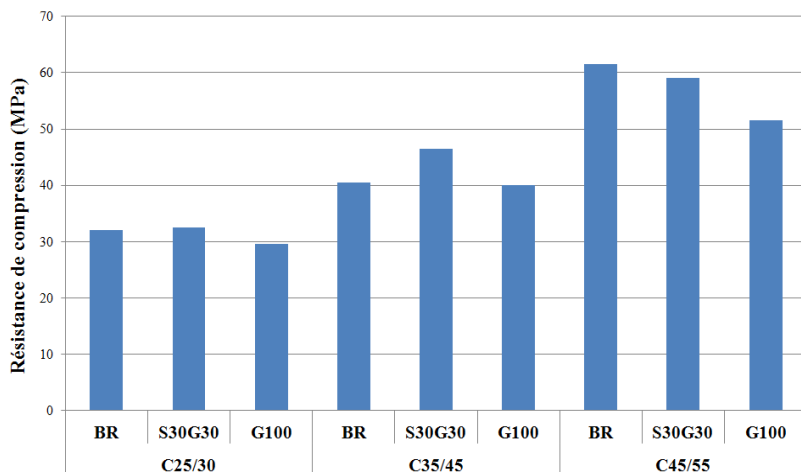


Figure 11. Résistance à la compression des bétons

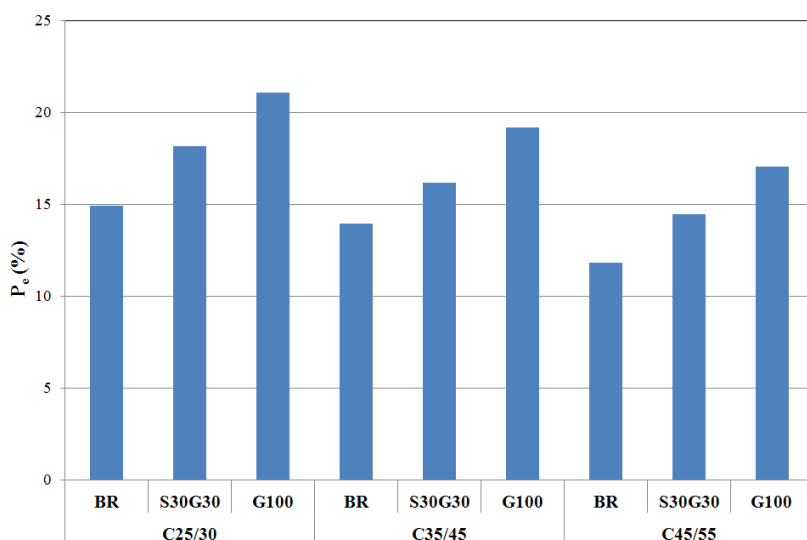


Figure 12. Porosité accessible à l'eau des bétons

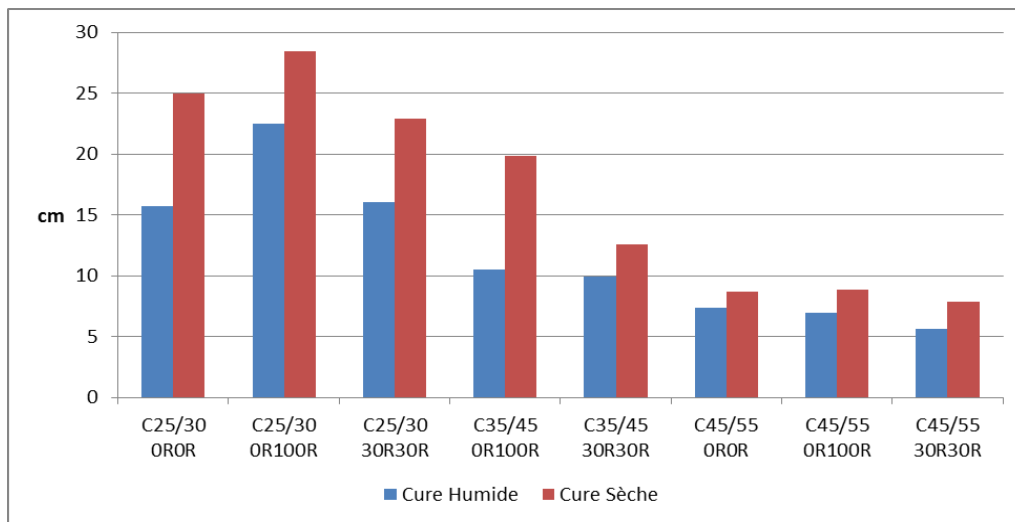


Figure 13. Résultats de carbonatation accélérée obtenus après 90 jours d'essai

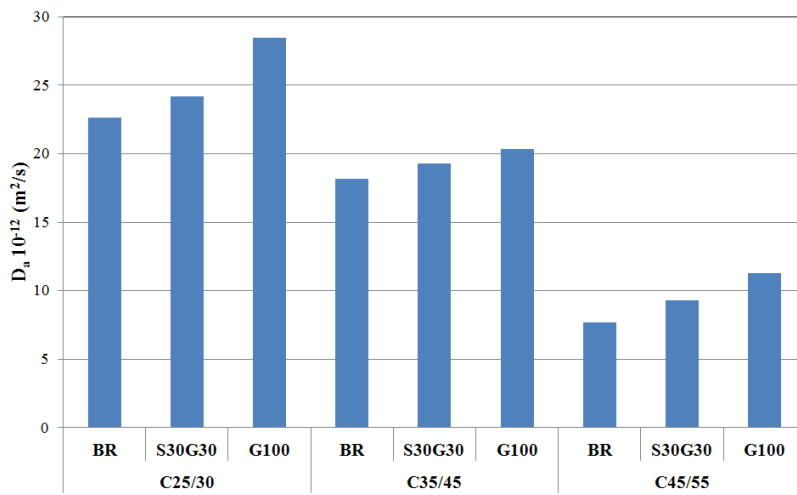


Figure 14. Coefficient de diffusion des ions chlorure

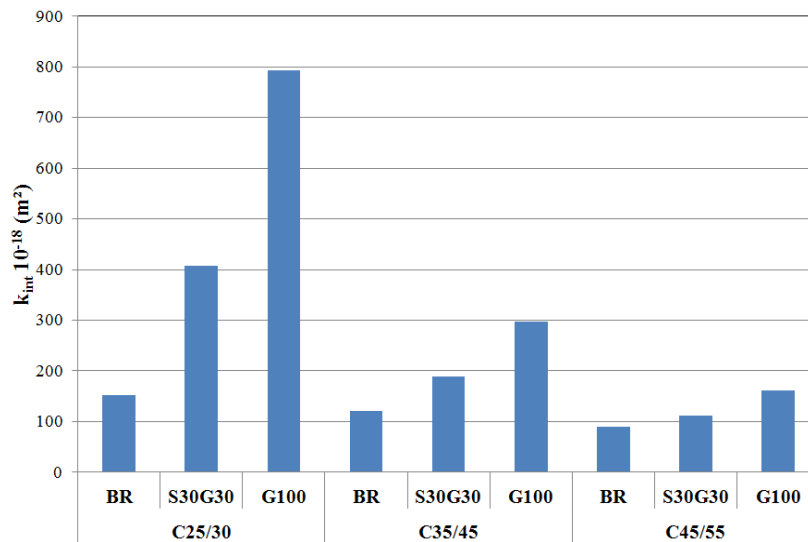


Figure 15. Perméabilité au gaz

Premières observations :

- ▶ La substitution des granulats naturels par des granulats recyclés peut conduire à une diminution de la résistance en compression des bétons. Néanmoins, cette diminution peut facilement être compensée en ajustant d'autres paramètres comme le rapport E/L en particulier.
- ▶ Le taux de substitution des granulats recyclés influe sur la porosité à l'eau des bétons. Cette augmentation est due à la matrice cimentaire du béton d'origine contenu dans les granulats recyclés.
- ▶ La substitution des granulats naturels par des granulats recyclés a peu ou pas d'impact sur la carbonatation, à résistance égale. Par contre, on observe un impact sur les autres propriétés de transfert : effet notable sur la diffusivité des chlorures et important sur la perméabilité au gaz. On observe cependant que la diminution du rapport E/L permet de compenser cet effet des granulats recyclés.

4 Développement durable (thème 3)

Deux actions ont été lancées dans le cadre du thème 3 de la tranche 2 RECYBETON :

- action 3-3 - Caractérisation du comportement environnemental de bétons recyclés (INSAVALOR)
- action 3-4 - Evaluation environnementale du béton de granulats recyclés (action collaborative Icube Strasbourg, CEREMA, Laboratoire Navier)

4.1 Caractérisation du comportement environnemental de bétons recyclés (action 3-3)

Dans le cadre de l'action 3.3, l'objectif est de porter à la connaissance des partenaires du PN d'une part les principaux travaux scientifiques réalisés sur le thème du relargage des bétons contenant des granulats recyclés au cours des dix dernières années et d'autre part de comparer d'un point de vue expérimental les différences entre le comportement à la lixiviation des éléments potentiellement polluants contenus dans des bétons à base de granulats recyclés et le comportement de bétons à base de granulats naturels.

La caractérisation de l'émission de substances dans l'eau à partir de matériaux de construction relève de l'Exigence Fondamentale n°3 «Hygiène, Santé et Environnement» du Règlement n°305/2011 du 9 Mars 2011 qui s'appuie sur les travaux du CEN TC351 «Produits de construction: Evaluation de l'émission de substances dangereuses» pour développer des méthodes d'évaluation normalisées pour les Etats membres en matière d'émission de substances dangereuses réglementées. L'essai préconisé par le CEN TC351 pour les matériaux monolithiques (TS2) est celui qui a été retenu dans cette étude pour caractériser le comportement des différentes formulations de béton en conditions dynamiques.

Les résultats de variation observée du relargage des matériaux fragmentés permettent de montrer que l'apport de granulats recyclés, dans les conditions du programme RECYBETON, ne se traduit pas par une modification significative du relargage. Ces résultats sont cohérents avec les travaux de recherche recensés sur le comportement à la lixiviation des bétons recyclés.

En conditions dynamiques, seuls le baryum, les chlorures et les sulfates présentent des concentrations détectables dans les résultats. L'évolution de leur relargage dans le temps est caractéristique d'un mécanisme par diffusion ce qui est cohérent avec la bibliographie.

Toutes les formulations testées au cours de cette étude se sont montrées conformes aux valeurs limites définies dans le projet d'Arrêté de sortie de statut de déchet des granulats issus de déchets du BTP pour un usage routier de type 3 (le plus restrictif).

Par conséquent, ces bétons à base de granulats recyclés en fin de vie, pourraient être valorisés sans problèmes en technique routière, quel que soit leur taux d'incorporation de granulats recyclés, dans les conditions de formulation du programme RECYBETON. La vérification de l'influence de la

carbonatation sur le relargage des bétons recyclés et du béton témoin pourrait être une perspective de complément intéressant pour cette étude.

4.2 Evaluation environnementale du béton de granulats recyclés (action 3-4)

Dans l'action 3.4 on s'est intéressé au bilan environnemental des bétons avec différentes proportions de granulats recyclés et formulés selon le cadre du PN, donnés dans le tableau suivant.

Tableau 2. Les différentes formulations de bétons de l'étude (Sedran, 2013)

Constituant (kg/m ³)		C25/30-0R-0R	C25/30-0R-30R	C25/30-0R-100R	C25/30-30R-0R	C25/30-30R-30R	C25/30-100R-100R	C35/45-0R-0R	C35/45-0R-100R	C35/45-30R-30R	C35/45-100R-100R
Formules sur granulats secs	Eau d'ajout	190	210	244	213	228	303	185	238	220	284
	Ciment	270	276	282	276	277	326	299	336	321	381
	Filler Calcaire	45	31	31	31	31	50	58	53	44	70
	Sable	780	813	806	549	500	-	771	782	491	-
	Sable recyclé 0/4	-	-	-	235	218	673	-	-	214	663
	Gravillon Givet 4/10	267	228	-	190	171	-	264	-	168	-
	Gravillon recycle 4/10	-	-	163	-	145	304	-	158	142	299
	Gravillon Givet 6,3/20	820	462	-	829	552	-	810	-	542	-
	Gravillon recycle 10/20	-	296	701	-	167	442	-	682	164	435
	Superplastifiant	1,31	1,51	1,4	1,16	1,08	1,18	2,1	2,18	1,64	2,78
	Retardateur de prise	0	0	-	1,1	1,1	2,6	0	0	1,3	3
	Eau efficace (kg/m ³)	180	185	189	185	185	199	175	185	179	184
Formules sur granulats humides	Eau d'ajout	177	178	178	179	177	186	172	173	170	169
	Ciment	270	276	282	276	277	326	299	336	321	381
	Filler Calcaire	45	31	31	31	31	50	58	53	44	70
	Sable	788	821	814	554	505	0	779	790	496	0
	Sable recyclé 0/4	0	0	0	258	240	740	0	0	235	729
	Gravillon Givet 4/10	268	229	0	191	172	0	265	0	169	0
	Gravillon recycle 4/10	0	0	174	0	155	324	0	168	151	319
	Gravillon Givet 6,3/20	824	464	0	833	555	0	814	0	544	0
	Gravillon recycle 10/20	0	316	749	0	178	472	0	728	175	465
	Superplastifiant	1,31	1,51	1,4	1,16	1,08	1,18	2,1	2,18	1,64	2,78
	Retardateur de prise	0	0	0	1,1	1,1	2,6	0	0	1,3	3
	Eau efficace (kg/m ³)	180	185	189	185	185	199	175	185	179	184

Le bilan environnemental a été réalisé suivant la méthode d'Analyse de Cycle de Vie (ISO 14040) en prenant pour unité fonctionnelle : « Produire 1m³ de béton de classe de résistance comprise entre C25/30 et C35/45 » ; C25/30 et C35/45 correspondant aux classes de résistance à la compression selon la norme EN 206-1.

Les ACV ont été réalisées en conformité avec la norme 15804+A1, en utilisant deux logiciels différents : GaBi appuyé sur une base de données propres et SimaPro appuyé sur la base de données Ecoinvent. Les données environnementales relatives aux granulats naturels et recyclés ont cependant été produites par l'UNPG. Différentes méthodes de calculs des indicateurs d'impact ont été utilisées : EDIP, CML et CED.

Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure suivante. Ils montrent que c'est le béton fabriqué avec 100% de granulats recyclés qui est le plus impactant sur toutes les catégories d'impact représentées ici. Cependant on peut noter que les bétons fabriqués avec des taux de granulats recyclés inférieurs à 100% ont des impacts environnementaux du même ordre de grandeur que les bétons à base de granulat naturel. Concernant le béton recyclé à 100%, une analyse de sensibilité a montré que c'est principalement l'augmentation de la teneur en ciment dans ces bétons qui explique leur plus forte empreinte environnementale (voir tableau 1). Cette quantité plus importante de ciment s'explique par la nécessité de tendre vers des classes de résistances mécaniques ciblées ainsi que par des exigences en termes de durabilité telles que celles formulées dans la norme EN 206. Il convient de noter également que ces différences ne sont pas très significatives. De façon générale toute surqualité se révèle préjudiciable en termes d'impacts environnementaux. Notons également que, contrairement à ce que l'on aurait pu penser, l'indicateur épuisement des ressources (ADP) est également plus important pour le béton fabriqué avec 100% de granulat recyclés. Cela tient au fait que cet indicateur mesure la dépletion de la ressource à une échelle mondiale sans prendre en compte les spécificités locales et le contexte territorial. Or si les granulats sont bien présents sur la surface terrestre ils sont loin d'être idéalement répartis. Ce travail de contextualisation de la ressource en vue d'évaluer un indicateur moins globalisé pourrait faire l'objet d'un travail complémentaire.

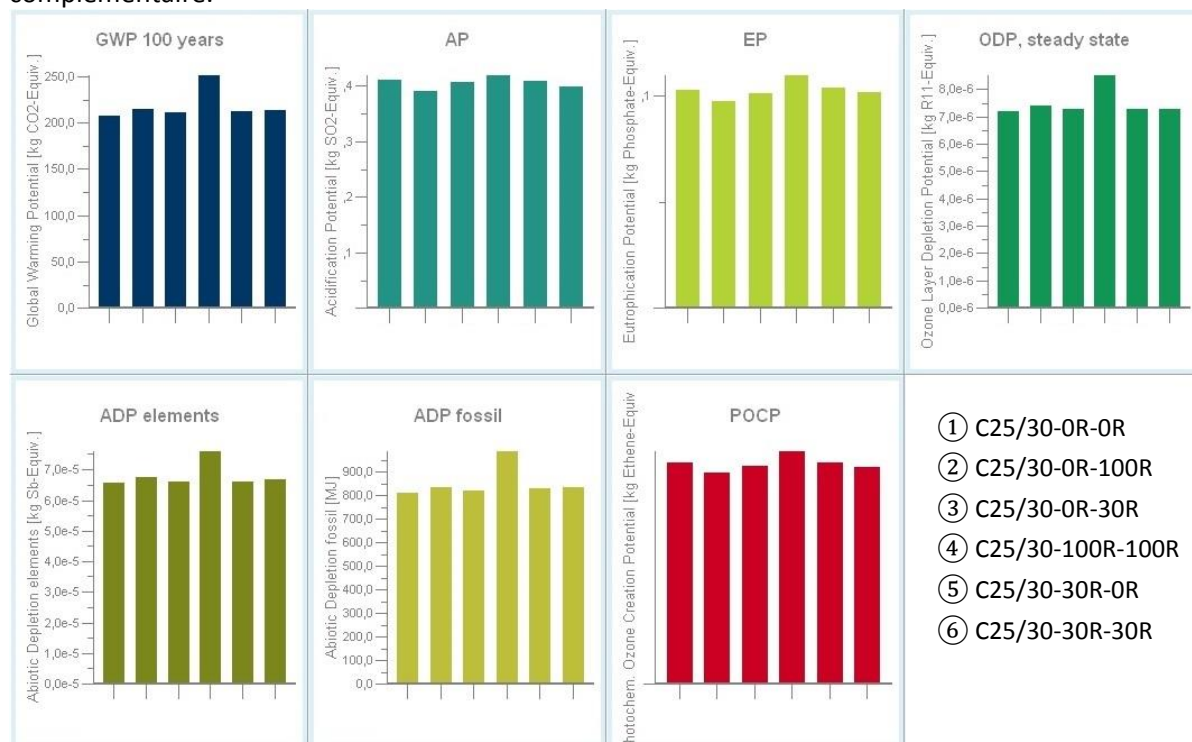


Figure 16. Comparaison des bétons de classe de résistance C25/30 avec la méthode CML 2001, en utilisant le logiciel GaBi. Légende: GWP: Global Warming Potential; AP: Acidification Potential; EP: Eutrophication Potential; ODP: Ozone Layer Depletion; ADP: Abiotic Depletion; POCP: Photochemical Ozone Creation Potential.

Une analyse de sensibilité sur les distances de transport a été réalisée. De fortes variations liées aux distances de transport entre les différents échantillons ont été observées, principalement pour les échantillons formulés avec des granulats recyclés (car il est également nécessaire de transporter plus de ciment). La différence en valeurs est de 300 t.km environ. La conséquence sur l'ACV semble plutôt

dépendre de l'origine des composants des échantillons que de leur nature ou de leurs procédés de fabrication. Il semble donc plus pertinent d'effectuer une ACV propre au lieu de confection et aux origines des différents composants du béton. Peu importe le caractère respectueux de l'environnement d'un matériau utilisé s'il est nécessaire d'augmenter largement la valeur de transport pour l'obtenir. Il semble intéressant d'étudier de manière fine les territoires pour quantifier l'influence de ces distances de transport en vue d'établir des potentielles zones d'intérêt d'utilisation de granulats recyclés dans les bétons. Enfin notons que cette première étude s'appuie essentiellement sur les formulations du PN, qui s'appuient sur les stocks de matériaux constitués au début du PN. En plus de la localisation de l'approvisionnement qui influe sur les distances de transport, il pourrait être intéressant d'étendre l'analyse en intégrant une variabilité liée à la qualité des granulats. Enfin, notons que les indicateurs retenus dans les normes et logiciels utilisés ne traitent pas de l'impact des solutions étudiées sur la mise en décharge. Or, c'est bien un argument classique du recyclage que de réduire cette mise en décharge, selon les vœux de la Commission Européenne.

5 Aspects réglementaires et normatifs (thème 4)

Pour faire suite aux travaux menés dans le cadre de la tranche 1, le GT 4 « normalisation et réglementation » s'est intéressé aux retours d'expériences des pays autres que la France, en différenciant ceux qui relèvent de l'Europe des autres au travers d'une cartographie présentée ci-dessous (Figure 17).



Figure 17. Carte des pays pour lesquels des textes ont été examinés

Cette synthèse identifie à la fois les obstacles et les incitations (qu'ils soient d'ordre réglementaire ou normatif) au développement du recyclage du béton. Force est de constater qu'il existe une disparité assez forte sur l'utilisation de granulats recyclés dans les bétons de structure.

Les constats suivants se déclinent en plusieurs axes :

D'un point de vue économique, l'accès à la ressource est un paramètre important. Le fait que les pays pour lesquels des difficultés d'approvisionnement existent ont été amenés très tôt à s'intéresser au potentiel de réutilisation des granulats recyclés. Le cas typique au sein de l'Union Européenne est celui des Pays-Bas qui disposent depuis 1986 de textes définissant les conditions d'utilisation. Par exemple, les recommandations 112 du CUR (qui ne constituent pas un texte

normatif mais plutôt un guide pratique) autorisent une substitution jusqu'à 50 % en volume des gravillons et ceci quelle que soit les classes d'exposition du béton. La valeur de 50 % peut même être portée à 100 % si l'on exclut les deux classes XS et XD.

Le Japon est un exemple intéressant dans le sens où trois normes existent qui définissent les caractéristiques des granulats recyclés en fonction de leur utilisation dans les bétons appelés H, M ou L. On notera que les caractéristiques de ces granulats font l'objet d'une fiche d'identification très dense.

D'un point de vue technique, on retiendra les éléments suivants :

- Il est avéré, et ceci quel que soit le pays que l'utilisation des granulats recyclés est très bien maîtrisée dès lors qu'ils sont réemployés en techniques routières. En effet, les exigences en termes de qualité sont moindres que pour une utilisation en béton de structure. Les Etats-Unis, le Canada et le Québec ont, à ce titre, mené un nombre important d'études qui mettent en exergue les problématiques de variabilité.
- Il est aussi avéré qu'il y a une différence de traitement entre les gravillons et les sables. Il est communément admis que les sables posent un problème pour leur réutilisation et sont de facto dans beaucoup de cas limités à des bétons pour lesquels le risque est fortement réduit (typiquement classe d'exposition XO au sens de la norme NF EN 206-1/CN). Des exceptions existent cependant comme au Japon, en Chine ou aux Pays-Bas.
- La majeure partie des textes examinés montre que les caractéristiques intrinsèques et de fabrication de ces granulats conduisent à différents niveaux de qualité : les paramètres de composition (fonction bien évidemment du processus de recyclage et des matériaux issus du processus de déconstruction) en sont l'exemple typique. Il est évident qu'un granulats recyclé à forte teneur en béton présentera une aptitude plus importante et que les éléments secondaires (briques, asphalte, plastique, bois, ...) viendront perturber de manière notable ces qualités. C'est d'ailleurs dans ce sens que la norme française NF EN 206/CN a été bâtie avec l'introduction des trois types (correspondant aux classifications Rcu95, Rcu90 et Rcu70). Dans les pays anglo-saxons, on retrouve l'équivalent de cette classification au travers des dénominations RA et RCA. Il est intéressant de noter que pour les pays comme l'Allemagne ou l'Autriche, on rencontre une dénomination « brique recyclée ».
- En complément du point précédent, les paramètres physiques et chimiques (absorption d'eau, masse volumique, teneur en chlorures, teneur en sulfates ...) donnent aussi lieu à une classification de ces granulats. A titre d'exemple, les documents allemands proposent des valeurs limites sur l'absorption d'eau qui varient de 10% pour Rcu90 à 15% pour Rcu70 (*voir plus haut le point qui traite de la validité des méthodes d'essais*).
- Lorsque l'on s'intéresse ensuite au matériau béton, là aussi on remarquera une limitation d'usage qui est fonction de la classe d'exposition du béton et/ou de la classe de résistance, ce qui conduit la plupart du temps à des tableaux à double entrée, tels que proposés dans la norme NF EN 206/CN. Il est cependant difficile de résumer en un seul tableau récapitulatif les dispositions retenues par chaque pays et le lecteur est invité à regarder pays par pays. Quoiqu'il en soit, des substitutions à 100 % pour les gravillons sont autorisées (Pays-Bas, Suisse, Japon ou Chine) mais elles s'accompagnent de dispositions complémentaires (contrôles et carte d'identité précise du granulats, par exemple).
- L'utilisation des gravillons recyclés pour les bétons précontraints est elle aussi proscrite, ce qui semble tout à fait justifié eu égard à cette technique de construction sensible au fluage, et ce constat fait l'objet d'un consensus international.
- La variabilité de la ressource peut être prise en compte par l'augmentation des fréquences de contrôle (cas de la Norvège). On notera que la position prudente prise dans la norme NF EN 206/CN est assez cohérente avec la pratique de la Norvège, même si tous les pays n'ont pas imposés un renforcement des contrôles.
- D'un point de vue structurel, la valeur des paramètres comme le module élastique, le coefficient de retrait ou de fluage peut être affectée pour des bétons recyclés. La position

que l'on retrouve dans les pays qui ont pris en compte ce point s'effectue par l'introduction de coefficients de pondération (cas de la Suisse, de l'Espagne).

- Enfin, certains pays comme l'Allemagne proposent de nouvelles méthodes d'essais lorsque celles utilisées classiquement pour les granulats ne semblent pas appropriées. C'est typiquement le cas pour l'absorption d'eau. Les Allemands s'intéressent à la valeur d'absorption mesurée à 10 minutes et non à 24 heures. Le cas des sulfates solubles a aussi amené les pays comme le Royaume-Uni et l'Allemagne à choisir la méthode basée sur leur détermination dans l'acide et non dans l'eau.

D'un point de vue socio-économique, une étude menée en Australie s'est intéressée aux raisons pour lesquelles le développement d'une filière de recyclage pouvait être freinée. Au-delà des aspects techniques (retours d'expériences probants), on retiendra que ces freins sont liés aux investissements initiaux importants demandés.

Enfin, n'oublions pas **les aspects environnementaux** qui ont amenés un certain nombre de pays (Autriche, Allemagne, Pays-Bas) à définir des seuils de relargage de substances polluantes (métaux lourds entre autres).

6 Chantiers expérimentaux

6.1 Dallage de Chaponost

Il s'agissait de la première réalisation en vraie grandeur à base de béton recyclé sous l'égide de RECYBETON.

Il concerne un parking d'environ 2100 m², divisé en 6 zones, chacune construite avec un béton recyclé. Les bétons présentent des taux de substitution des granulats naturels (gravillons et/ou sables) par des recyclés, variant de 0 à 100 %, selon les zones. La fabrication, le transport et la mise en œuvre se sont déroulés en décembre 2013 sans modification des pratiques habituelles. L'adjuvantation des bétons a été adaptée, et le dosage en liant a été augmenté pour les taux de substitution les plus élevés.

Une caractérisation approfondie des différents bétons a montré qu'en fonction de la proportion de granulats recyclés, on assiste à un abaissement du module élastique et à un accroissement des retraits (avant et après prise). Cependant, la théorie ne laisse pas augurer d'une augmentation du risque de fissuration par retrait empêché, prévision jusqu'à présent confirmée par l'expérience. Ce chantier **a donc confirmé pleinement la faisabilité du recyclage du béton dans le béton dans ces conditions industrielles.**

L'article «Recyclage du béton dans le béton – le chantier expérimental de Chaponost » de la RGRA n°924 de décembre 2014 décrit très bien ce chantier expérimental et ses enseignements.



Figure 18. Photos du chantier expérimental du Chaponost

Dans le cadre de ce chantier expérimental, les laboratoires partenaires de RECYBETON associés au suivi, aux essais et à la modélisation sont :

- SIGMA BETON,
- LAFARGE LCR,
- LMT Cachan.

Les contrôles ont été réalisés par le CEREMA (anciennement CETE de Lyon).

6.2 Chantier CNM (Contournement Nîmes Montpellier)

Une expérimentation a été réalisée par BOUYGUES TP dans le cadre de RECYBETON sur le chantier CNM (Contournement Nîmes Montpellier) dont la maîtrise d'ouvrage est assurée par la société Oc'Via (Partenariat Public Privé). Cette expérimentation consistait principalement à vérifier la faisabilité industrielle et technique de l'utilisation d'un béton (produit par UNIBETON) à base de granulats recyclés sur un ouvrage du projet CNM (188 ouvrages dont 172 Ouvrages d'Art, 12 viaducs et 1 tranchée de 1200 m ; 300 000 m³ de béton).

La première étude comparative s'est focalisée sur la formulation, la convenance, la mise en œuvre et le suivi à long terme sur ouvrage d'un béton témoin contenant 20% de gravillons recyclés ayant les caractéristiques suivantes : C35/45, S4, XF1 -XA1, $E_{eff}/C = 0.45$. Les granulats recyclés utilisés sont des granulats issus de la démolition présentant des caractéristiques conformes à un granulats recyclés de type 1. Un piédroit et la traverse supérieure d'une passerelle (pont-cadre Véloroute) ont été coulés avec 20 % de gravillons recyclés durant l'été 2014.



Figure 19. Photos du chantier expérimental du pont véloroute (CNM – crédit photo Bouygues TP)

Une deuxième étude comparative sur le même béton mais avec 40% de gravillons recyclés a été réalisée en vue d'une application sur chantier en 2015 / 2016. De plus, un suivi dans le temps (avec carottages) sera fait sur une prolongation béton « in-situ » de l'ouvrage.

Les gravillons 6/20 (LRM, Eurovia) sont issus de la démolition et leurs caractéristiques sont les suivantes :

- Absorption d'eau : 6,1% – 7,3%
- LA = 29
- MDE = 29
- Qualif./Alcali-réaction = NR

Les résultats des caractérisations en laboratoire montrent que les bétons contenant des gravillons recyclés (20% et 40%) présentent des caractéristiques à l'état frais et à l'état durci comparables à celle du béton de référence. Les paramètres de durabilité sont satisfaisants même si les valeurs sont un peu plus défavorables pour les bétons à base de gravillons recyclés :

- Rc₂₈ témoin : 44 MPa ; slump = 190 mm
 - ✓ Avec 20% recyclé : 38 MPa ; slump = 215 mm
 - ✓ Avec 40% recyclé : 41 MPa ; slump = 220 mm
- petite dégradation constatée en traction par fendage
- porosité : de 12,8% (témoin) à 14,6%
- retrait total (µm/m) à 90 jours : 468 (témoin) à 573
- retrait endogène : 19 (témoin) à 129
- perméabilité à l'O₂ : non contrôlé sur témoin – 213 – 149
- carbonatation accélérée : 2mm à 14j / 20% ; 0mm à 56j / 40%
- RAG en cours

7 Valorisation (thème 5)

La valorisation du Projet National RECYBETON consiste principalement à travailler sur :

- la maintenance d'un site internet www.pnrecybeton.fr qui offre au grand public une information générale sur le projet et sur son actualité ;
- la publication d'articles scientifiques et/ou techniques
- la participation des acteurs du projet à des conférences / workshop

7.1 Articles scientifiques et techniques

Les travaux du PN RECYBETON ont conduit à la publication de 4 articles scientifiques ou techniques :

Titre	Revue	Auteur(s)
Cinétiques d'absorption des granulats naturels et recyclés	32èmes Rencontres de l'AUGC, Orléans, 4 au 6 juin 2014	Ahmed Z. BENDIMERAD, Emmanuel ROZIERE, Ahmed LOUKILI
Évaluation des méthodes de caractérisation des granulats naturels appliquées aux recyclés : mesures de masses volumiques et cinétiques d'absorption d'eau	32èmes Rencontres de l'AUGC, Orléans, 4 au 6 juin 2014	Cléo LANEYRIE, Anne-Lise BEAUCOUR, Albert NOUMOWE, Béatrice LEDESERT, Ronan L. HEBERT

Combined experimental methods to assess absorption rate of natural and recycled aggregates	Materials and Structures, Octobre 2014	A. Z. Bendimerad, E. Roziere, A. Loukili
Recyclage du béton dans le béton – le chantier expérimental de Chaponost	RGRA n°924, décembre 2014	François de Larrard, Duc-Tung Dao, Didier Mialon, Damien Rogat

7.2 Conférences / Workshop

Les travaux du PN RECYBETON ont conduit à la présentation du projet et/ou de ses résultats partiels dans plusieurs conférences / workshops :

Conférence / Workshop	Lieu	Intervenant
Assises de l'éco-construction et de l'éco-rénovation du Conseil Général de Seine-et-Marne (CG77) le 28 novembre 2013	Conseil Général de Seine-et-Marne	Brice DELAPORTE
Conférence "Matériaux bio-sourcés et construction : Quel avenir en Île-de-France ?" - 11 février 2014	ARENE Ile-de-France	Adélaïde FERAILLE
Forum des Travaux Publics - 15 mai 2014	FNTF	Horacio COLINA
Journées Scientifiques (RF)2B du 3 juillet 2014	Regroupement Francophone pour la Recherche et a Formation sur le Béton	François de LARRARD
WORKSHOP « Recycling concrete into concrete: a scientific and industrial perspective » – 8 juillet 2014 (Ecole des Ponts ParisTech)	Chaire Ecole des Ponts ParisTech / LAFARGE	Horacio COLINA / Raphaël BODET
Workshop « Les bétons recyclés » le 7 octobre 2014	Université de la Grande Région (UNI-GR)	François de LARRARD/Raphaël BODET

8 Conclusion

La tranche 2 du projet national RECYBETON s'inscrit en continuité de la tranche 1. Elle a permis de confirmer un certain nombre de résultats déjà présents dans la littérature scientifique, et aussi d'obtenir quelques résultats plus originaux. Toutes les thématiques ont été abordées, et une première concrétisation de l'effort collectif a pu être atteinte au travers des chantiers expérimentaux. Ceux-ci ont confirmé la faisabilité du recyclage du béton dans le béton, dans deux contextes très différents – parking (ouvrage privé) et ouvrage d'art. L'étude des normes et textes réglementaires étrangers ouvre la voie à de possibles évolutions de l'environnement normatif français et européen.

Les deux prochaines tranches permettront aux partenaires de lancer l'intégralité du programme initial de recherche/développement, de continuer l'expérimentation en vraie grandeur et d'intensifier la communication afin qu'à l'issue de ses travaux, RECYBETON puisse véritablement amorcer la boucle vertueuse du béton dans le béton.

* * *