



RECYBETON

Projet National RECYBETON

Le recyclage complet des bétons

Synthèse de la tranche 1

(juillet 2012 – septembre 2014)

Convention de subvention N° 12 MGC S 005

R/14/RECY/015

Octobre 2014

Sommaire

1	Introduction.....	2
2	Travaux d'accompagnement (thème 0)	2
3	Technologies et procédés (thème 1).....	5
4	Matériaux et structure (thème 2)	10
5	Développement durable (thème 3).....	18
6	Aspects réglementaires et normatifs (thème 4)	21
7	Valorisation (thème 5).....	24
8	Conclusion	25

Site internet : www.pnrecybeton.fr

Plateforme collaborative : www.omnispac.fr/pnrecybeton

Président : Jacques ROUDIER

Directeur : Horacio COLINA

Directeur Scientifique : François DE LARRARD

Gestion administrative et financière : IREX, 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr

1 Introduction

Ce rapport présente une synthèse des travaux du projet national RECYBETON, pour ce qui concerne la tranche 1 qui s'est déroulé du juillet 2012 à septembre 2014. 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 au printemps 2012), 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.

Compte-tenu de retards dans l'obtention des matériaux de référence nécessaires au fonctionnement des actions à caractère expérimental, la plupart des travaux n'ont pu démarrer qu'à la fin de l'année 2012. En accord avec la DRI, les équipes ont bénéficié d'un délai supplémentaire pour finaliser leurs travaux. Les rapports de recherche ayant été reçus à la mi-2014, le présent document en présente une synthèse, classée selon les grands thèmes du projet.

2 Travaux d'accompagnement (thème 0)

Les deux résultats attendus de la part du GT0 (groupe thématique 0) pour la tranche 1 du PN RECYBETON étaient :

- la sélection, la préparation et la fourniture des constituants (adjuvants, ciments, granulats) de référence pour l'ensemble des partenaires du projet ;
- la préparation d'une série de formules de béton de référence pour l'ensemble des partenaires du projet ;

L'objectif final était de s'assurer que les partenaires travaillent avec des constituants et des bétons similaires pour faciliter le rapprochement des résultats et les comparaisons inter-laboratoire.

2.1 Sélection, préparation et fourniture des constituants de référence.

Une première estimation des besoins en constituants a été faite après enquête auprès des partenaires. Les quantités obtenues ont été multipliée par 3 pour prendre en compte les tranches suivantes du projet.

Le tableau suivant présente la liste des constituants qui a été approuvée à l'occasion du CST élargi du 19 décembre 2012, ainsi que les quantités produites. A cette liste il faut ajouter 6 tonnes de grave 30/80 destinées aux essais sur le concassage.

Type	Nom	Quantité produites
Granulats naturels	0/4 semi concassé Lafarge de Sandrancourt (78)	88,5 tonnes
	4/10 concassé Lafarge de Givet (08)	57 tonnes
	6,3/20 concassé Lafarge de Givet (08)	61,5 tonnes
Granulats recyclés	0/4, 4/10, 10/20 plateforme DLB Gonesse	66 tonnes de sable 0/4
		66 tonnes de gravillon 4/10
		70,5 tonnes de gravillon 6.3/20
Ciment	CEM II/A-L 42.5 de Rochefort d'Holcim	38 tonnes
Filler calcaire	Betocarb HP-OG d'Omya	A la demande
Superplastifiant	MC PowerFlow 3140 MChimie	A la demande
Retardateur	Centrament Retard 370 MCChimie	A la demande

Les granulats naturels, classiquement utilisés pour la confection de béton, ont été fournis sous l'étroite collaboration de l'UNPG.

Les granulats recyclés sont issus d'une production spécifique effectuée sur la plateforme DLB de Gonesse (95) afin d'avoir des granulats composés essentiellement de béton concassé. Ainsi les gravillons 4/10 et 10/20 sont classés respectivement Rcu98 et Rcu99 selon la norme NF EN 933-11.

L'ensemble des granulats (environ 210 tonnes de granulats naturels et 200 tonnes de granulats recyclés) ont été fabriqués en une fois, conditionnés en big-bags de 500 kg ou 1000 kg, et palettisés pour faciliter la distribution aux partenaires du projet. Une première distribution massive a été effectuée fin 2012. Les matériaux restants (soit 2/3 de la production) sont stockés en big-bags sur le site HOLCIM du Plessis Belleville (60) pour être distribués au fur et à mesure des besoins des partenaires.

Un ciment unique, le CEM II/A-L 42.5 de Rochefort fourni par Holcim a été sélectionné. Ce genre de ciment est couramment utilisé pour la confection de bétons C25/30 et C35/45. Le ciment a été livré en vrac en 2 lots de 19 tonnes. Chaque lot a été homogénéisé et conditionné en usine en futs plastiques étanches de 60 litres, pour optimiser la conservation du ciment sur la durée du projet national. Le numéro de lot est rappelé sur chaque fut avant distribution aux partenaires.

Un filler calcaire, le Betocarb HP-OG d'Omya, a également été sélectionné pour améliorer le squelette granulaire des bétons, le cas échéant. Ce matériau relativement inerte et régulier a été livré en sacs de 25 kg palettisés. Il avait initialement envisagé d'utiliser des fines de dépoussiérage issues du concassage du béton à la place du filler. Un des partenaires (Clamens) a équipé son concasseur d'un aspirateur à filtre et il s'est avéré que les quantités produites sont très faibles (~ 2 kg/j). Cette voie de recyclage a donc été abandonnée.

MC Chimie, a été choisi par tirage au sort par le SYNAD pour fournir les adjuvants.

En conclusion, un gros effort logistique et financier a été produit pour assurer l'homogénéité des constituants entre les partenaires, non seulement pour la tranche 1 mais également tout au long du déroulement du projet.

2.2 Sélection des formules de béton de référence.

Un cahier des charges des bétons visés a tout d'abord été défini et validé à l'occasion du CST élargi du 19 décembre 2012.

Deux types de béton ont été visés avec des résistances modérées, puisqu'il est probable que le recyclage ne se fera pas à court terme dans des bétons haut de gamme :

- des bétons C25/30 correspond à une résistance à la compression moyenne de 30 MPa
- des bétons C35/40 correspond à une résistance à la compression moyenne de 40 MPa

Les bétons doivent être de classe de consistance S4 (affaissement compris entre 160 et 210 mm) pendant 90 minutes afin de faciliter la confection de corps d'épreuve pour les essais ultérieurs en laboratoire.

Les C25/30 sont de classe d'environnement XC1 et les C35/45 de classe XF1 selon la norme NF EN 206-1.

Un protocole de référence de pré-saturation des granulats a été fixé et distribué aux partenaires. Etant donnée leur forte absorption, les granulats recyclés seront utilisés dans un état d'humidité correspondant à 1% (en valeur absolue) au-dessus de l'absorption. Ceci permet de les saturer et d'éviter des raidissements précoces des bétons lié à l'absorption d'eau différée des granulats. On plafonne la sursaturation à 1% pour limiter les risques d'égouttage et l'installation de gradients d'humidité dans zones de stockage. A noter que l'influence de ce paramètre sur les propriétés des bétons est un sujet d'étude du GT2.

Les granulats naturels, quant à eux, seront utilisés dans leur état naturel car, même stockés en laboratoire, ils sont en général dans un état saturé, étant donnée leur faible absorption.

Le tableau suivant résume les formules qui ont été retenues. Dans ce tableau R signifie recyclé. Par exemple, 0R-30R signifie que 0% (en masse) du sable est recyclé (donc que le sable est naturel) et 30 % (en masse) des gravillons sont des recyclés.

Résistance	Sable	Gravillon
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

Un rapport sur la formulation de ces bétons a été fourni en version n°2 le 01/07/2013. Ce rapport décrit les propriétés de l'ensemble des constituants, la méthode de formulation adoptée, la méthode de fabrication (notamment la pré-saturation des granulats) et les compositions des 10 formules retenues. Il a été diffusé auprès des partenaires pour intégration dans leurs propres campagnes expérimentales, le cas échéant.

Il était initialement prévu de formuler des bétons contenant du ciment contenant du sable recyclé dans le cru (CR1) ou en cobroyage (CR2). Ces mélanges n'ont pas été formulés car le GT0 est en attente des résultats du GT1 qui doit élaborer ces ciments avec recyclés.

2.3 Conclusions

Les actions prévues dans la phase 1 pour le GT0 ont quasiment toutes été réalisées et ont permis aux partenaires de démarrer leurs actions de recherche.

Il reste toutefois quelques formules de béton à fournir (3 ou 4) quand les ciments recyclés auront été fournis par le GT1.

3 Technologies et procédés (thème 1)

Le thème 1 « Technologie et procédés » du programme de recherche RECYBETON est décliné en trois grandes sous-tâches :

- le concassage et le tri sélectif. Cette sous-tâche a été abordée partiellement en tranche 1 par l'étude de l'influence du type de concassage sur les propriétés des granulats recyclés. Il était convenu de traiter tout ou partie du tri sélectif en élargissant le périmètre de financement du projet (notamment grâce à un soutien de l'ADEME). Les demandes n'ayant pas abouti, il a été décidé d'aborder ce volet en tranche 2 du PN.
- le ciment incorporant des granulats recyclés ; cette sous-tâche est traitée en tranche 1 par l'étude du potentiel cimentier des sables de béton concassé, à l'échelle du laboratoire. Les acteurs de ce groupe de travail se sont mobilisés pour trouver des sources de financement complémentaires qui permettraient de passer à l'échelle industrielle (actions non abouties au moment de la rédaction de ce rapport).
- les bétons incorporant des granulats recyclés.

Les études engagées en tranche 1 ont été précédées d'un voyage d'étude au sein de deux pays frontaliers (Belgique et Royaume-Uni).

3.1 Voyage d'étude

Un voyage d'étude a été organisé en début de projet de manière à conforter l'étude bibliographique établie dans l'étude de faisabilité et à échanger avec des experts européens sur les pratiques actuelles de recyclage (technologies, aspects logistiques et sociétaux, aspects normatifs, etc...), les limites acceptables de taux d'incorporation, la conformité des produits, les critères réglementaires, les incitations à l'utilisation des granulats recyclés, etc.

Cinq membres du CST RECYBETON ont participé au voyage d'étude :

- ▶ *François Buyle-Bodin, Co-animateur du Thème n°3*
- ▶ *Bodgan Cazacliu, IFSTTAR, Co-animateur du Thème n°1*
- ▶ *Horacio Colina, ATILH, Directeur Technique*
- ▶ *François De Larrard, LAFARGE LCR, Directeur Scientifique*
- ▶ *Olivier Stéphan, UNPG, Secrétaire du Thème n°4 et membre du Thème n°2*

Le programme était le suivant :

Namur (20/11/2012) :

Le groupe de travail RECYBETON était invité par Tradecowal (Société Coopérative pour le TRAitement des DEchets de CONstruction en WALLonie). Les échanges avec la FEREDCO (FÉdération des REcycleurs de DEchets de CONstruction) et le CSTC (Centre Scientifique et Technique de la CONstruction) ont été suivis d'une visite de la plateforme de recyclage Recynam.

Londres (21 & 22/11/2012,) :

Le programme de la visite du groupe RECYBETON, invité par MPA (*Mineral Products Association*), était le suivant :

- échanges avec le MPA
- visites de 2 plateformes de recyclage : Day Aggregates, Hanson / Thames Materials
- visite du chantier WWF's Living planet centre avec utilisation de béton structurel recyclé

Le voyage d'étude a permis de recenser **un certain nombre de points de comparaison entre la situation en France et celle de deux pays frontaliers** :

- l'utilisation de bétons incorporant des matériaux recyclés au Royaume-Uni commence à émerger, même si la majorité des matériaux recyclés est dirigée vers les applications routières (couches non liées, graves hydrauliques) ;
- la réutilisation du sable recyclé engendre des difficultés dans les deux pays ;
- lors des visites, il n'a pas été constaté de différence significative, en termes de procédé, par rapport aux plateformes françaises ;
- les cadres normatifs anglais et belge sont similaires au corpus normatif français ;
- en Belgique, le recyclage a augmenté grâce à des subventions régionales attribuées aux plateformes de recyclage ;
- en Angleterre, la taxe sur les granulats naturels (» 1.65 £ / tonne) n'existe pas sur les recyclés ;
- en Angleterre, la certification BREEAM (similaire à HQE en France) est fortement prescrite et incite à l'utilisation de granulats recyclés.

3.2 Influence du type de concassage sur les différentes fractions granulaires

Dans cette étude, trois concasseurs de laboratoire – à mâchoires, à percussion et giratoire – sont utilisés pour étudier l'influence de la configuration du concassage d'un granulats de béton recyclé sur la qualité du produit après concassage. Les deux premiers concasseurs sont configurés suivant 3 réglages différents. Un granulats 10/20 de béton recyclé et un granulats 10/20 naturel sont concassés suivant ces 7 configurations. Pour chaque concasseur, on compare le résultat du concassage d'un 10/20 et d'un 0/20. Enfin, pour le concasseur giratoire, on les compare également avec le résultat du concassage d'un 10/14 et d'un 6/10. La présente étude propose une approche méthodologique permettant d'identifier les paramètres jugés pertinents pour l'évaluation des stratégies de concassage des granulats de béton recyclé.

Contrairement aux granulats naturels, les granulats issus de bétons de démolition sont constitués de deux phases. L'une est le granulats naturel d'origine, l'autre est le mortier adhérent. Le mortier adhérent, plus poreux et fragile que le granulats d'origine, est identifié comme étant la phase posant problème lors du recyclage dans une nouvelle génération de béton.

Des trois concasseurs de laboratoire employés dans cette étude, **c'est le concasseur giratoire qui produit les matériaux les plus satisfaisants d'un point de vue granulométrique**, c'est-à-dire la plus faible étendue granulaire pour un diamètre maximum donné. Mais c'est **le concasseur à percussion qui produit le matériau le plus satisfaisant du point de vue de la qualité des granulats**, c'est à dire la proportion en mortier adhérent la plus réduite. Ce matériau présente par conséquent les valeurs de LA (coefficient de Los Angeles), de MDE (Micro Deval) et d'absorption les plus favorables.

Il ne se détache pas de stratégie de concassage qui permette d'obtenir à la fois une fraction granulaire ciblée et de qualité optimale. Il existe différentes stratégies à adapter selon les besoins, qui vont de la recherche de la libération maximale du granulats naturel d'origine, jusqu'à la volonté de réemployer l'intégralité du matériau de démolition. La première stratégie à l'avantage de produire des matériaux aux propriétés quasi-équivalentes à celles d'un granulats naturel, mais l'inconvénient de produire une fraction de petite taille et une quantité très importante de fines. La deuxième stratégie à l'avantage de produire un granulats de taille importante, de produire peu de fines, mais l'inconvénient de produire des granulats ayant des propriétés physiques médiocres.

3.3 Ciments incorporant des granulats recyclés

Cette étude consistait à estimer le potentiel de recyclage des sables de béton concassé (SBC) de différentes origines et donc de compositions chimico-minéralogiques distinctes.

Ce potentiel se décline en trois solutions technologiques qui sont :

- ▶ l'introduction au cru de cimenterie comme matière première dite « de substitution » pour obtenir un clinker de qualité courante,
- ▶ l'introduction au ciment comme nouveau constituant principal autre que le clinker, en substitution d'un constituant courant comme le calcaire et
- ▶ l'introduction au béton comme nouvelle addition.

Pour se placer dans des conditions de variabilité maximale, il a décidé d'échantillonner des SBC issus de différentes stations de traitement réparties sur l'ensemble du territoire national. Le choix a été guidé pour obtenir des sables de granulométrie 0/4 ou 0/6 issus de bétons fabriqués à base de granulats de natures pétrographiques distinctes, c'est-à-dire :

- silico-calcaire : Lille (LIL) et Lyon (LYN) ;
- granitique : Strasbourg (STB) ;
- siliceux à base de silex : vallée de Seine (PRS).

Résultats concernant la caractérisation des sables de béton concassé

Les caractérisations physiques, chimique et minéralogiques ont été effectuées par deux laboratoires universitaires (IJL-Nancy et GEMH-Limoges) et un laboratoire cimentier (Calcia).

Caractérisation physique

L'analyse granulométrique (selon NF EN 933-1) montre que les fractions 0/4 sont très similaires entre elles et de même que les deux fractions 0/6. Le point commun à ces deux fractions granulaires est leur très faible proportion (2,5%) de particules fines ($d < 80 \mu\text{m}$). La caractérisation des différentes fractions de tailles inférieures à $250 \mu\text{m}$ après broyage révèle des valeurs de finesse BET compatibles avec une structure interne des grains par agrégats à toutes les échelles de taille et parfois à la présence de grains de morphologie fibreuse.

Pour la fine de dépoussiérage (FDD), elle présente une étendue granulaire qui va de $0,0004$ à 5mm pour un diamètre médian de $0,02\text{mm}$ ($10 \mu\text{m}$). La fraction supérieure à $80 \mu\text{m}$ est constituée d'agglomérats fragiles sous le fait de l'humidité du matériau.

Les masses volumiques absolues des quatre sables s'échelonnent entre $2,430 \text{ t/m}^3$ (FDD) et $2,525 \text{ t/m}^3$ (STB) de valeurs plus faibles que celle des matériaux naturels purs. C'est donc la présence de pâte de ciment hydraté (CSH) qui guide le résultat.

L'analyse morphologique des fractions les plus fines en microscopie électronique à balayage montre un mélange de grains issus des granulats et d'hydrates provenant de la pâte de ciment durcie. Dans certain cas, on note la présence sporadique de faciès fibreux.

L'étude de broyabilité montre que les quatre sables ont un comportement assez similaire et que les temps de broyage sont du même ordre de grandeur pour obtenir 99% de passant à $200 \mu\text{m}$, correspondant à des finesses de l'ordre de 4000 à $4900 \text{ cm}^2/\text{g}$. L'ordonnement des valeurs s'explique par les différences de constitution minéralogique ; ainsi le comportement le plus difficile au broyage correspond au sable granitique.

Caractérisation chimique et minéralogique

Les résultats sont également assez homogènes et montrent que la composition chimique est dominée par le silicium (45 – 55% SiO₂) et par le calcium (20-25% CaO), puis viennent le fer (1,0 – 2,0 Fe₂O₃) et l'alumine (2,5 – 5% Al₂O₃) et enfin des proportions non négligeables d'alcalins (0,5 – 1,2% Na₂O / K₂O).

Ce domaine de composition chimique correspond à des cortèges minéralogiques constitués principalement de Quartz et de Calcite expliquant les teneurs en SiO₂ et CaO, avec des proportions mineures de feldspaths et de micas expliquant les éléments mineurs (fer, alumine et alcalins), ainsi que des traces de gypse expliquant les teneurs en SO₃. Ces teneurs en gypse sont particulièrement détectables par analyse thermique (ATG-ATD).

Résultats concernant l'aptitude à la cuisson

L'étude d'aptitude à la cuisson révèle que, compte tenu des compositions chimiques et minéralogiques des SBC, il est possible de les incorporer à un cru de cimenterie avec des taux de substitution massique variant entre 11% (STB et PRS), 15% (LIL et LYN) et 29% (FDD), soit en substitution de l'argile soit en substitution du calcaire argileux.

L'étude séquentielle des réactions à hautes températures montre que celles-ci se réalisent normalement avec formation des phases du clinker démontrant la bonne réactivité de tous les constituants.

Les aptitudes à la cuisson (AC) présentent des indices certes dégradés par rapport à l'indice du cru de référence mais restant compatibles avec une pratique industrielle. La prise en compte de l'ensemble des échantillons (yc la FDD) permet de conclure que les compositions siliceuses granitique et silex (STB et PRS) sont plus difficiles à cuire que les compositions silico-calcaires (LIL et LYN) et elles-mêmes plus difficiles à cuire que la FDD, de granulométrie plus fine et de composition moins siliceuse. **Une optimisation de finesse de broyage est donc à prévoir à l'échelle industrielle.**

Enfin, **il faut noter que si les compositions utilisées permettent d'obtenir des compositions usuelles de clinkers, il reste impossible d'effectuer une substitution quantitative sans modifier les réglages du clinker d'accueil.** Cet aspect fut rencontré dans l'étude de composition à partir de deux clinkers distincts issus des données de référence de Holcim et de Calcia.

Résultats concernant la réactivité des fines en milieu basique

L'étude préalable à l'incorporation des SBC comme nouveaux constituants principaux des ciments autre que le clinker a été réalisée d'une part en étudiant la réactivité résiduelle des SBC en solution aqueuse basique (Eau déminéralisée pH=7,2) et d'autre part en suivant les réactions d'hydratation de ciments de laboratoire à base de SBC, ces deux suivis étant effectués par conductimétrie des solutions aqueuses, éventuellement complétés de dosages d'espèces en solution.

La réactivité résiduelle des SBC en solution aqueuse basique

Cette étude a été réalisée à 25°C en effectuant des coulis [Eau déminéralisée + SBC] caractérisés un rapport Eau/Solide de 4. Les courbes de conductimétrie des solutions d'hydratation des SBC bruts en fonction du temps montrent une progression rapide dans les trente premières minutes puis la contribution suit une progression relativement monotone en fonction du temps avec des valeurs

finales de conductivité d'autant plus élevée que la finesse est grande ; toutefois, la dispersion en fonction de la finesse est relativement limitée. Les pH relevés en fin d'essai sont basiques et compris entre 10,7 et 11,3, ce qui ne va pas entraver les réactions d'hydratation. Enfin, l'étude de l'impact du vieillissement montre que plus les surfaces sont fraîches, plus la conductivité (et donc la réactivité) est forte.

Le potentiel de réactivité à l'eau des SBC du fait des résidus de pâte de ciment hydratés est donc très restreint et limité aux 30 premières minutes. L'impact sur l'hydratation des ciments devrait être également restreint.

L'hydratation des ciments de laboratoire

Cette étude a été réalisée en fabricant des ciments de laboratoire par mélanges d'un ciment CEM II/A-LL 42,5N (au calcaire) avec 30% en masse de SBC. Ces ciments de laboratoire ont été ensuite hydratés sous forme de coulis à E/C = 4 pour pouvoir suivre les réactions d'hydratation par conductimétrie (évolution de la conductivité de la solution en fonction du temps) et dosage des espèces en solution aux échéances caractéristiques.

Les courbes de conductimétrie de tous les ciments de laboratoire présentent l'allure caractéristique des ciments courants de type CEM II, en particulier celle du le CEM II/A-LL 42,5N pris comme référence. On confirme ainsi que l'impact de la réactivité des SBC est limitée.

Sur la courbe de conductivité, l'échéance du « point de rebroussement », qui correspond à la précipitation de la Portlandite Ca(OH)_2 , est proportionnelle au temps de prise sans toutefois permettre la prédiction d'une valeur exacte. Tous les ciments de laboratoire présentent un décalage dans le temps de ce point de rebroussement (dans le sens d'un allongement par rapport au ciment de référence) ; d'autre part la valeur finale de la conductivité est plus faible que pour le ciment de référence, ce qui est confirmé par la baisse de concentration des espèces en solution.

Cette dernière caractéristique s'interprète en termes de baisse quantitative des espèces en solution par dilution du fait des SBC qui, on l'a vu dans l'étude de réactivité, n'apportent qu'une contribution très limitée.

L'effet des SBC introduits comme constituant des ciments est proportionnel à leur degré de finesse et inversement proportionnel à leur taux d'évènement, impliquant une étape de broyage dans le procédé cimentier.

4 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

Seuls les deux premiers sous-groupes ont été abordés en tranche 1, sachant que les deux suivants ont été en bonne partie couverts par le projet ANR ECOREB qui fait notamment l'objet de deux thèses.

4.1 Sous-groupe 2A : Caractéristiques des granulats recyclés

Titre du Rapport : Etude de variabilité des caractéristiques des granulats recyclés et suivi

Auteurs : François JEZEQUEL, Christian CLERGUE

Laboratoire : SIGMA BETON

Objectifs

L'objectif de cette action est d'étudier les granulats disponibles sur le marché français actuellement et susceptibles de pouvoir être utilisés dans les bétons de granulats recyclés. Cette étude porte sur 13 plateformes réparties sur la France métropolitaine pour lesquels les granulats recyclés obtenus font l'objet d'une analyse unique et pour deux de ces plateformes (DLB Gonesse et Plattard ANCYCLA) d'un suivi sur une durée de deux ans avec un prélèvement tous les deux mois pour suivre la variabilité de ces caractéristiques.

Résultats

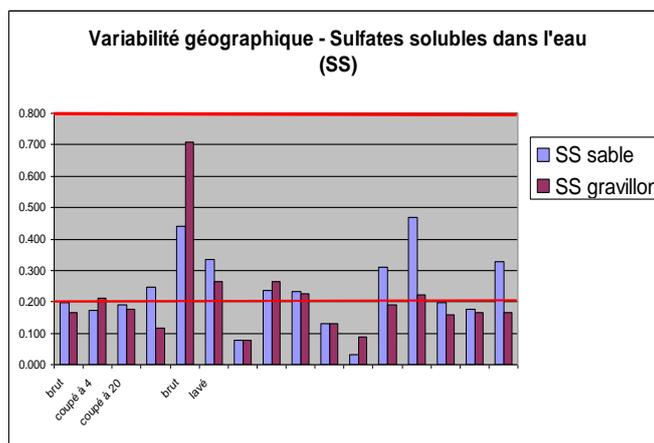
Les analyses réalisées sans exploitation statistique sur les granulats recyclés montrent que la majorité des normes d'essais ne posent pas de problème et que les niveaux de spécification sont adaptés. Toutefois, certains essais ou les spécifications associées dans la norme NF EN 12620 sont susceptibles d'entraver le développement de l'utilisation des granulats recyclés dans le béton :

- **Absorption d'eau des gravillons recyclés**
Les gravillons recyclés présentent une absorption d'eau élevée (de 3 à 7% pour la majorité d'entre eux). Cette absorption d'eau est liée à la pâte de mortier issue du béton de déconstruction qui reste adhérente en surface des gravillons. Elle est d'autant plus élevée que la fraction gravillon est petite.
- **Absorption d'eau des sables recyclés**
L'absorption d'eau des sables présente des valeurs très élevées (2/3 des sables présentent des valeurs supérieures à 5%) liées à la forte teneur en mortier résiduel. La norme d'essai adaptée de l'EN 1097-6 en conservant les fines est difficile à appliquer pour les sables recyclés et présente des résultats très dispersés. Il est pourtant nécessaire de qualifier la demande en eau des éléments fins des sables.
- **Sulfates solubles dans l'eau**
Plus de 60% des granulats recyclés présentent des teneurs en sulfates solubles dans l'eau supérieures au seuil de spécification de 0.2% fixé dans la norme granulats pour béton.

Cette spécification est susceptible de créer une entrave à leur utilisation alors que d'autres pays utilisent un seuil supérieur (par exemple 0.8% pour la Suisse).

- **Chlorures solubles dans l'acide**

Les résultats obtenus en appliquant la norme d'essai européenne NF EN 1744-5 donne des résultats incohérents entre les fraction sable et gravillons recyclés. Le chantier expérimental réalisé à Chaponost (69) semble confirmer que la norme d'essai n'est pas pertinente. Se pose également la question de savoir pourquoi on utilise une extraction acide des chlorures alors que le béton est un milieu basique.



Au vu des résultats obtenus sur les productions de granulats recyclés actuellement disponibles sur le territoire français, il est nécessaire dans le cadre des phases 2 à 4 du PN RECYBETON :

- D'étudier l'impact sur les performances et la durabilité des bétons d'une augmentation du seuil de sulfates solubles dans l'eau des recyclés de 0.2 à 0.8%. (étude prévue dans le cadre de la phase 3 du PN)
- De trouver une méthode de mesure fiable et reproductible de l'absorption d'eau des granulats recyclés (et en particulier des sables) afin de mieux maîtriser l'eau efficace dans les bétons. Ce paramètre a en effet une forte influence sur la résistance et la durabilité des bétons ainsi que sur leur facilité de mise en œuvre (au travers du maintien de rhéologie).
- De se rapprocher des autres pays européens pour évaluer la pertinence de la norme d'essai de chlorures solubles dans l'acide et la possibilité de la remplacer par la mesure des chlorures solubles dans l'eau (comme pour les granulats naturels).

Titre du Rapport : Validité des normes d'essais sur les granulats recyclés (Réf : AAA/CM/13386)

Auteurs : Abdelghafour AÏT ALAIWA & Robert LAVAUD

Laboratoire : CTG Italcementi

Objectifs

Le CTG a effectué une série d'analyse des caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques des trois coupures de granulats recyclés issus du thème 0 (0/4, 4/10 et 10/20, Rcu90 ou Rcu95) et de trois coupures de granulats naturels (0/4, 4/10 et 6.3/20). Les essais réalisés sont ceux actuellement pratiqués et spécifiés dans les normes NF EN 12620 et NF P 18-545. Les résultats obtenus permettent de juger de la pertinence des différentes méthodes d'essai appliquées aux granulats recyclés.

Résultats

Il ressort des analyses réalisées sur les granulats recyclés que :

- la teneur en sulfates solubles du sable est nettement plus élevée que celle relevées sur les gravillons recyclés,
- la teneur en chlorures solubles dans l'eau du sable est très supérieure à celle mesurée sur les gravillons alors que la teneur en chlorures solubles dans l'acide est similaire sur les 3 fractions,
- l'influence sur le temps de prise de la pâte de ciment est plus marquée sur le sable que sur les gravillons,
- les gravillons recyclés sont systématiquement classés comme gélifs,
- l'absorption d'eau des granulats recyclés est classée en code C (gravillons) ou D (sables) ce qui est très élevé par rapport aux granulats naturels étudiés

L'exploitation statistique des résultats fait ressortir une forte dispersion des essais pratiqués sur les granulats recyclés. Cette dispersion peut être liée à l'échantillonnage, à la préparation des échantillons ou à la méthode d'essai elle-même (cf. exploitation du paramètre sur les chlorures solubles dans l'acide du sable recyclé ci-dessous)

Certains essais réalisés sur les granulats recyclés posent des problèmes en termes de niveaux de valeur ou de répétabilité des essais.

- **Modification du temps de prise (NF EN 1744-6)**
Les granulats recyclés étudiés ne présentent pas un effet notable sur cette caractéristique. L'essai est toutefois peu précis car la spécification (A10) est du même ordre de grandeur que la caractéristique à mesurer et que la dispersion de l'essai réalisé sur ciment.
- **Chlorures solubles dans l'acide (NF EN 1744-5)**
L'essai est peu précis et présente une forte dispersion (coefficient de variation de l'ordre de 70%). Cette constatation recoupe les résultats de l'étude de variabilité sur les granulats recyclés et le chantier expérimental de Chaponost. Ce point doit faire l'objet d'investigations aux niveaux français (plus de matériaux testés) et européen (retour des autres pays).
- **Gel/dégel (NF EN 1367-1)**
Les granulats recyclés sont classés comme gélifs. Il est nécessaire dans le cadre des études de durabilité de vérifier si cette classification a réellement un impact sur la gélivité du béton.
- **Absorption d'eau (NF EN 1097-6)**
Les granulats recyclés classent le sable en catégorie D et les gravillons en catégorie D. Cela interdit de fait leur utilisation dans des bétons présents dans certains environnements agressifs. Il est nécessaire de vérifier si cette valeur élevée d'absorption a un véritable impact sur la durabilité des bétons.

Titre du Rapport : Etude de la validité des normes d'essai mécaniques pour les granulats recyclés

Auteurs : Erwan HAMARD & Bogdan CAZACLIU

Laboratoire : Laboratoire GPEM-IFSTTAR

Objectifs

Le programme expérimental mis en œuvre par l'IFSTTAR vise à :

- étudier l'évolution de la fragmentation et de l'usure des granulats de béton recyclé avec la durée de la sollicitation mécanique, sur quatre classes granulaires 4/6, 6/10, 10/14 et 14/20 ;
- associer cette évolution à une diminution de la quantité de pâte dans le granulat (avec effet sur la masse volumique et l'absorption).

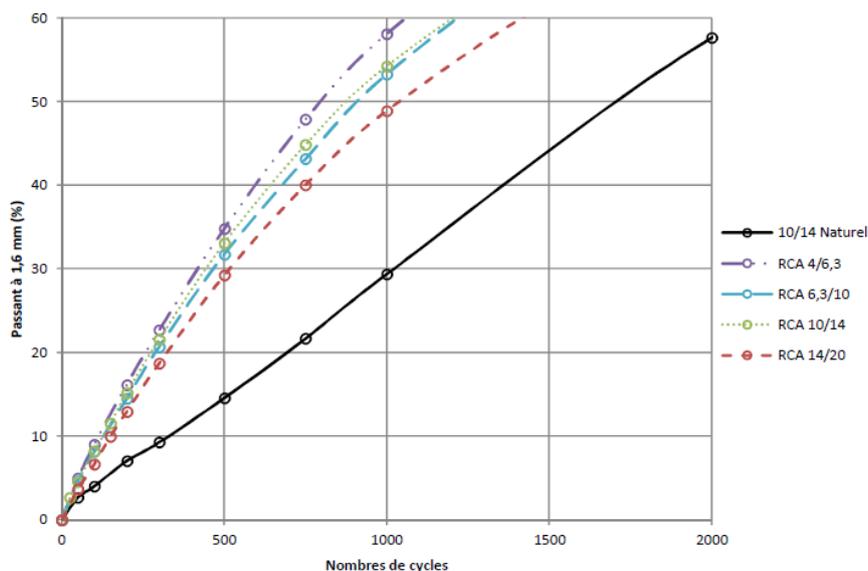
Ces résultats sont complétés en étudiant :

- la fragmentation des mêmes granulats lors du malaxage à sec dans un malaxeur de laboratoire, à différents temps de malaxage,
- l'usure des mêmes granulats lors du brassage humide dans une bétonnière, à différents temps de brassage.

Résultats

Essai Los Angeles

On note lors des essais Los Angeles que le comportement des granulats recyclés est très différent de celui des granulats naturels. Au-delà de 60% de passants à 1.6 mm la courbe s'infléchit et correspond probablement à un effet protecteur des éléments fins vis-à-vis de la fragmentation. On note également que les fractions les plus grosses (10/14 mm et 14/20 mm) sont moins sensibles à la fragmentation que les fractions les plus fines (4/6.3 mm et 6.3/10 mm). La variation des courbes de Los Angeles en fonction du nombre de cycles est bien corrélée avec la teneur en mortier du gravillon initial.



Evolution du passant à 1,6 mm en fonction du nombre de cycles subis lors de l'essai Los Angeles pour les différentes fractions granulométriques centrée sur le domaine de linéarité du matériau naturel

L'analyse granulométrique montre que les ruptures occasionnées par l'essai Los Angeles produisent des éléments plus fins et d'autant plus riches en mortier adhérent que la fraction est fine.

Essai Micro-Deval

L'évolution des passants à 1,6 mm n'est linéaire ni pour les fractions de granulat recyclé ni pour le granulat naturel. Cependant les fractions de granulats recyclés présentent des passants à 1,6 mm environ 5 fois plus élevés que le granulat naturel. La fraction 4/6,3 mm du granulat recyclé se détache nettement des autres fractions de recyclé avec des passants à 1,6 mm plus importants.

Le diamètre moyen évolue de manière importante entre 0 et 1000 tours. Ensuite, au-delà de 1000 tours, les granulats s'usent progressivement, ce qui réduit leur diamètre et libère des éléments fins riches en mortier.

Malaxage à sec

La production d'éléments inférieurs à 1,6 mm, lors du malaxage à sec des fractions 10/14 et 14/20 mm de granulat recyclé, est d'autant plus importante que le temps de malaxage est élevé.

Le diamètre moyen du matériau 10/14 mm d'origine et des matériaux produits lors du malaxage à 10, 40, 60 et 120 s est centré sur le diamètre 12 mm. A partir de 300 s, ce diamètre moyen diminue pour tendre vers 10 mm à 1800 s.

Brassage humide

La teneur en éléments inférieurs à 1,6 mm augmente lors du brassage humide du granulat de béton recyclé. Il n'existe pas de différence notable entre la création d'éléments inférieurs à 1,6 mm au cours du brassage humide entre les fractions 10/14 et 14/20 mm.

Au final, on peut avancer les conclusions suivantes :

- le passant à 1,6 mm semble pertinent pour décrire la création d'éléments fins lors des essais Los Angeles et Micro-Deval,
- pour un même béton de démolition, la résistance à la fragmentation du granulat est d'autant plus importante que celui-ci est pauvre en mortier adhérent,
- au cours de l'essai Los Angeles, le granulat de béton recyclé la création d'éléments inférieurs à 1,6 mm est d'abord dépendante du mortier adhérent puis dépendante du granulat naturel d'origine. Deux nouveaux paramètres présentés dans cette étude permettent de décrire ce comportement bi-modal, le « LAm ad » et le « LAg nat »,
- on peut distinguer deux phases au cours de l'usure des granulats de béton recyclé pendant l'essai Micro-Deval : lors de la première phase, comme pour les granulats naturels, les éléments s'émoussent et prennent une forme plus arrondie ; lors de la seconde phase, l'usure du mortier adhérent libère une partie du granulat naturel d'origine jusque-là protégé par le mortier. Le granulat naturel étant plus résistant à l'usure que le mortier, l'usure concerne principalement le mortier adhérent, ce qui a pour effet de libérer le granulat naturel d'origine et modifie la forme des grains, qui, bien qu'émoussés, deviennent plus anguleux,
- on observe un effet de seuil à 6 mm lors de l'essai de Micro-Deval. Les fractions supérieures à 6 mm semblent s'user dans des proportions identiques, alors que les fractions inférieures à 6 mm sont plus sensibles à l'usure,
- l'essai de LA semble représentatif de la création d'éléments inférieurs à 1,6 mm générés par le malaxage à sec pour des sollicitations allant de 0 à 100 cycles de LA, ce qui correspond approximativement à une durée de malaxage allant de 0 à 5 min.
- l'essai Micro-Deval semble représentatif du taux d'éléments inférieurs à 1,6 mm généré lors du brassage humide pour des sollicitations allant de 0 à 12 000 cycles de MDS, ce qui correspond approximativement à des durées de brassage humide allant de 0 à 1 h 30.

4.2 Sous-groupe 2B : béton frais et durcissant

Titre du Rapport : Evaluation des méthodes de caractérisation des granulats naturels appliquées aux recyclés : mesure de masses volumiques et d'absorption d'eau

Auteurs : Cléo LANEYRIE, Anne-Lise BEAUCOUR, Albert NOUMOWE

Laboratoire : L2MGC de l'Université de Cergy-Pontoise

Objectifs

L'objectif est double :

- tester sur des granulats recyclés la norme NF EN 1097-6 [1] pour la mesure de la masse volumique et du coefficient d'absorption d'eau et si besoin proposer des aménagements à ces protocoles,
- mettre au point un protocole permettant d'apprécier la cinétique d'absorption des granulats recyclés.

Résultats

Pour la mesure de l'absorption des gravillons recyclés, l'écart type relatif plus important pour l'étude de reproductibilité traduit le caractère hétérogène marqué de ces matériaux. Pour les sables recyclés, le séchage Buchner est plus adapté à ces matériaux rugueux et minimise l'erreur due à la perte de matière soit au final un écart type relatif plus faible. **Ce séchage Buchner conduit à une valeur d'absorption 1,6 fois plus élevée que le protocole normalisé.** Avec les fines l'absorption augmente de 1,5% environ en valeur absolue soit de l'ordre de 13% en relatif.

En ce qui concerne la mesure de la cinétique d'absorption, pour celle des gravillons recyclés, le coefficient d'absorption d'eau à 24 h est mesuré selon la NF EN 1097-6. **Après 5 minutes 85% de l'absorption à 24 heures est atteinte (92% à 10 minutes).** Comme pour l'étude d'absorption à 24 heures il est observé le caractère hétérogène des gravillons. De plus les auteurs ont mesuré une absorption postérieure à 24 heures pouvant durer plusieurs semaines.

Pour le sable recyclé, le coefficient d'absorption d'eau à 24 h est mesuré selon le protocole NF EN 1097-6 modifié avec séchage Buchner. **Après 10 minutes, 100% de l'absorption à 24 heures est atteinte avec fines et sans fines.** L'absorption mesurée avec les fines est supérieure d'environ 1 point à celle mesurée sans les fines. De plus, la dispersion des résultats est plus importante en présence de fines.

Cette étude a permis de montrer la pertinence du protocole de la NF EN 1097-6 pour apprécier l'absorption à 24 heures des gravillons recyclés du projet national. Les auteurs proposent un aménagement au protocole de cette norme pour le sable recyclé en remplaçant le séchage sous courant d'air chaud par un séchage sur Buchner. Ils obtiennent avec cette méthode une meilleure répétabilité mais l'absorption mesurée est 1,6 fois plus élevée. Selon les auteurs : la forme anguleuse des grains recyclés et la présence de fines induisent une cohésion supplémentaire qui s'oppose au glissement du sable même lorsque la surface est sèche. Le séchage excessif du sable sous courant chaud entraîne alors une sous-estimation du coefficient d'absorption, d'autant plus importante que le sable est riche en fines. Toutefois les auteurs évoquent la possibilité d'un séchage insuffisant sous Buchner, la dépression exercée pouvant s'avérer insuffisante pour vaincre les tensions capillaires les plus élevées présentes dans les ménisques les plus fins, l'absorption mesurée serait alors surestimée. Une étude de demande en eau est réalisée sur mortier et tend à montrer la pertinence du protocole modifié proposé.

Un protocole basé sur le pycnomètre à eau a été mis au point pour estimer la cinétique d'absorption des granulats recyclés du projet national :

- pour les gravillons l'absorption mesurée à 10 minutes est de l'ordre de 90% de l'absorption normalisée à 24 heures.
- pour le sable l'absorption mesurée à 10 minutes correspond à l'absorption à 24 heures.

Titre du Rapport : Incertitude de mesure et pertinence des essais de masse volumique et absorption d'eau sur les granulats recyclés
Auteurs : François JEZEQUEL / Christian CLERGUE
Laboratoire : SIGMA BETON

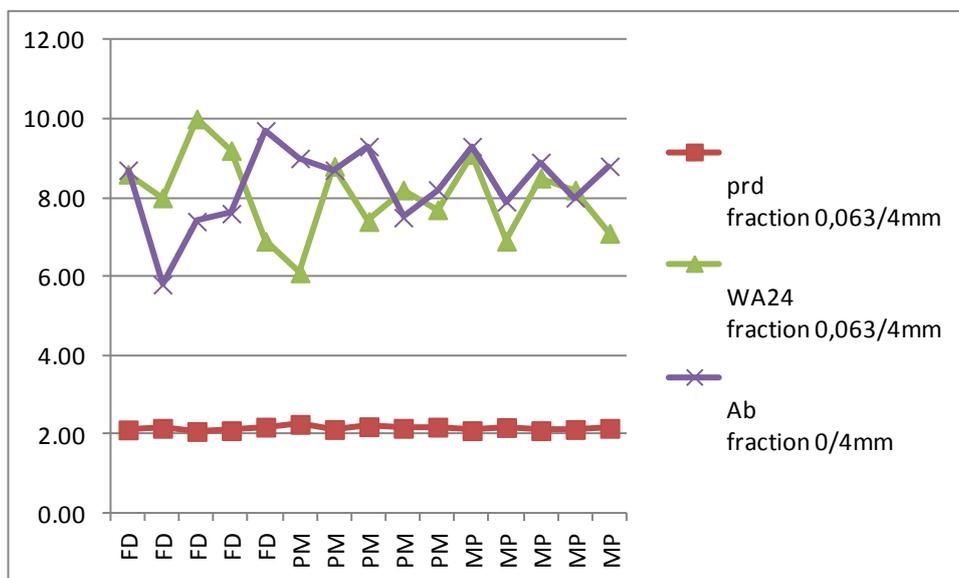
Objectifs

On souhaite calculer la répétabilité et la reproductibilité de chaque essai afin de déterminer l'incertitude de mesure et ainsi juger de la pertinence des différentes méthodes d'essai (absorption d'eau avec et sans fines).

Résultats

Les essais de masse volumique et d'absorption réalisés sur les gravillons recyclés présentent une variabilité du même ordre que ceux réalisés sur granulats naturels (variation de 2.27 t/m³ à 2.31 t/m³ pour la masse volumique, 4.1% à 5.2% pour l'absorption).

Les essais réalisés sur sable recyclé présentent une variabilité nettement plus élevée avec des valeurs d'absorption d'eau qui varient pour le sable sans fines de 6.1% à 10.0% et pour le sable avec les fines de 5.8% à 9.7%. Ces valeurs de dispersion sur un seul échantillon avec plusieurs opérateurs semblent difficilement compatibles avec l'exigence d'une étendue de 4 points pour l'absorption d'eau des sables recyclés.



Variabilité des essais de masse volumique (ρ_{rd}) et absorption sans fines (WA24) et avec fines (Ab) sur le sable recyclé. FD = technicien 1 ; PM = technicien 2 ; MP = technicien 3.

Titre du Rapport de phase 1 : 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 est d'étudier la sensibilité de la rhéologie du béton recyclé par rapport à différent paramètre de formulation dont l'état de pré-saturation et le pourcentage d'incorporation des gravillons et du sable recyclés du projet national

Résultats

Série OR-100R

Les bétons à base de gravillons recyclés présentent une aptitude initiale à la maniabilité supérieure au béton de référence : à T_0 la demande en super-plastifiant des bétons recyclés est plus faible que celle du béton de référence pour atteindre l'affaissement visé de 21 cm. Lorsque les gravillons sont sursaturés (Ab +1%) les évolutions des affaissements du béton recyclé et du béton de référence sont comparables.

Les bétons à base de gravillons recyclés sous-saturés (33%Ab et 75%Ab) présentent à 45 minutes et selon les cas à 90 minutes des affaissements supérieurs au béton à base de gravillons recyclés sursaturés (Ab+1%). Ce résultat pourrait s'expliquer selon les auteurs par une quantité d'eau inter-granulaire plus importante pour les bétons à base de gravillons recyclés sous-saturés et donc une absorption incomplète par ces matériaux sur une partie ou la totalité de la période investiguée.

La substitution complète de gravillons recyclés aux gravillons naturels entraîne toujours la dégradation de la classe de résistance C25/30. Cette baisse de résistance est très marquée lorsque l'état hydrique des gravillons est très en-deçà du coefficient d'absorption (0,3 Ab) et ceci quelle que soit l'échéance à laquelle les éprouvettes ont été confectionnées. Ce dernier résultat tendrait à confirmer une absorption incomplète des gravillons recyclés dans le béton surtout lorsqu'ils sont initialement faiblement saturés.

Série 30R-OR

Contrairement à la série à base de gravillons recyclés il n'a pas été possible d'identifier à ce stade pour cette série un mécanisme unificateur. Des essais complémentaires seront mis en œuvre en septembre 2013 à la fois pour vérifier les comportements singuliers (homogénéité du sable) et ajouter deux degrés de pré-saturation supplémentaires.

Lorsque les gravillons recyclés sont dans un état hydrique plus humide que l'état saturé superficiellement sec (état SSS), les bétons recyclés du projet national ont une meilleure aptitude à la maniabilité que le béton naturel de référence. C'est aussi l'état hydrique pour lequel il a été observé la plus faible dégradation de la résistance à la compression à 28 jours. Lorsque les gravillons recyclés sont dans un état hydrique moins humide que l'état saturé superficiellement sec (état SSS) les bétons recyclés du projet national présentent des affaissements plus élevés que le béton de référence ou le béton recyclé à base de gravillons recyclés sursaturés durant les 45 voire selon les cas les 90 premières minutes. Ces affaissements plus élevés sont vraisemblablement dus à un excès d'eau inter-granulaire suite à une absorption incomplète des gravillons recyclés. Pour les matériaux initialement peu saturés (30% de l'absorption normalisé), cet excès d'eau se traduit à 28 jours par une dégradation plus marquée des résistances. Des essais seront réalisés sur 4 formules complémentaires (en parallèle de la phase 2 du PN) pour affiner la compréhension des effets de la pré-saturation sur la rhéologie des bétons de granulats recyclés.

5 Développement durable (thème 3)

Pour mieux comprendre l'avancement actuel du thème 3, il convient de rappeler les éléments de l'appel à proposition de recherche de la tranche 1 le concernant.

L'appel à propositions de recherche portait sur les sous-thèmes 3.1 et 3.2.

3-1 Analyse socio-technico-économique de bassins de production de granulats naturels et recyclés. Échelle nationale.

Identification des filières, des flux de production, des transports et des gisements. Consommation de granulats et type d'utilisation - Organisation de la filière de recyclage (gisement, plateforme de recyclage, site de valorisation, transports) - type de technologie utilisée (concasseurs mobiles / fixes) - Ordre de grandeur des prix des granulats selon les régions et des coûts de procédés.

3-2 Analyse socio-technico-économique de bassins de production de granulats naturels et recyclés. Échelle locale sur trois bassins.

Modélisation des filières, des flux de production, des transports, et des gisements. Potentialités de développement du recyclage du béton dans le béton. Évaluation du gisement actuel (et potentiel) de granulats naturels - évaluation du gisement actuel (et potentiel) de granulats recyclés - Organisation de la filière de recyclage (gisement, plateforme de recyclage, site de valorisation, transports) à l'échelle régionale: flux - Recherche de pistes d'amélioration

La première proposition acceptée est portée par le LGCgE et le TVES (Université Lille 1) - Professeur Olivier Blanpain, Cité scientifique, 59655 Villeneuve d'Ascq.

La réponse propose d'analyser le dispositif logistique (transports, sites de production, de traitement, de valorisation et d'utilisation des granulats et/ou des produits de substitution issus du recyclage) des filières ciment et béton de la région Nord-Pas de Calais et de le caler à un Système d'Information Géographique SIG.

Cette analyse intégrera notamment l'appropriation des valeurs portées par le projet (développement durable) auprès des différents acteurs (institutionnels, professionnels) et des populations concernées (riverains des sites). Ces axes de recherche seront menés au travers d'une approche multi scalaire : France métropolitaine d'une part en collaboration avec les autres lauréats de l'appel d'offre, Région N-PdC d'autre part comme cas d'étude opérationnelle et de calage de la méthodologie.

La réponse se subdivisait en deux opérations principales de recherche.

Opération 1 - Analyse géographique, socio-économique, et intégration sous SIG.

L'objectif était de développer une méthodologie spatialement intégrée et multi scalaire. La modélisation et la constitution des bases de données à références spatiales utiliseront les référentiels géographiques et les données disponibles aux échelles nationale, régionale et locale appropriées. Concernant l'analyse de l'appropriation des valeurs socio-économiques et environnementales du projet, il s'agissait d'évaluer les représentations des principaux acteurs de la filière sur la notion de durabilité environnementale (cycle de vie et usages potentiels des matériaux) associée aux échelles régionales et locales. La démarche employée s'attachait à intégrer les enjeux territoriaux. Une analyse du caractère opérationnel de la méthodologie devait être réalisée au travers d'une étude de cas localisée sur la communauté urbaine de Lille.

Enfin, le couplage SIG-modèle de simulation devait s'appuyer sur les bases de données à références spatiales précédemment réalisées.

Opération 2 – Analyse socio-économique et environnementale comparée des filières granulats naturel / produits issus du recyclage des bétons.

Il s'agissait de développer et d'appliquer une méthode permettant de définir les avantages et inconvénients de chaque filière potentielle de valorisation des sous-produits issus du recyclage du béton. Cette méthode devait s'appuyer sur des outils d'inventaire de cycle de vie (ICV) en évaluant les différentes solutions sur l'ensemble des processus mis en œuvre de la naissance à la mort (ou recyclage ou deuxième vie) des produits. Les filières comparées étaient celles actuellement mises en œuvre ou en cours de réflexion en région N-PdC. Les principales variables étudiées étaient les variables énergétiques (y compris les énergies grises), les variables économiques et les variables d'impacts sur l'environnement (eau, air, sol). Notons que la méthode élaborée ne devait s'attacher à comparer que ce qui est différent entre les différentes solutions afin de conserver une relative facilité de mise en œuvre et qu'elle soit transposable à d'autres bassins d'étude.

La seconde proposition acceptée est portée par le Laboratoire d'Excellence Intelligences des Mondes Urbains (IMU) - UMR 5600 Environnement Ville Société (EVS), Vincent Veschambre, École Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon, 3 rue Maurice-Audin, BP 170, 69512 Vaulx-en-Velin cedex

Elle se positionnait à l'échelle locale sur le territoire du Grand Lyon et en amont sur la problématique du devenir des produits de démolition. Elle s'appuyait sur une thèse de géographie et visait à établir un diagnostic territorialisé de la filière démolition à échelle locale. Le paradigme de la ville durable invite en effet de plus en plus à reconstruire la ville sur elle-même, et à gérer de manière soutenable les ressources naturelles, notamment minérales. C'est pourquoi les déchets inertes issus de la démolition sont de plus en plus utilisés dans la construction de nouveaux matériaux de construction, alors qu'ils sont majoritairement recyclés dans les travaux publics. Dans quelle mesure la filière démolition/reconstruction est-elle structurellement et fonctionnellement adaptée à des objectifs d'augmentation du recyclage des déchets inertes dans le bâtiment ?

Cette activité fortement territorialisée doit être menée à une échelle locale, celle du Grand Lyon. Les matériaux produits par la démolition sont des pondéreux qui nécessitent des modes de transport et des infrastructures appropriés, mais qui sont produits par un secteur émietté de PME ; d'autre part, les producteurs de déchets de chantiers sont dispersés, alors que les installations de recyclage sont peu nombreuses, mais doivent rester proches des lieux de production, et accessibles. Les professionnels de la démolition sont des acteurs potentiels de la mise en œuvre de l'ambitieux Plan Climat du Grand Lyon (réduire de 20 % les GES d'ici 2020). L'objectif général de la thèse est d'établir une étude socio-économique et territorialisée de la filière démolition dans le Grand Lyon, de l'activité dite de « déconstruction » à la production et au stockage de granulats de béton recyclé.

Ces deux équipes de Lille et de Lyon ont travaillé très étroitement, ce qui conduit à un rapport unique et au développement d'un outil unique permettant d'analyser la pertinence de la filière recyclage complet du béton en s'appuyant sur les outils de type SIG (Systèmes d'information géographique).

Deux territoires sont étudiés : un territoire « local » - le grand Lyon avec une échelle d'analyse de 1 hectare et un territoire régional – la région Nord Pas de Calais avec une échelle d'analyse de 4 hectares.

L'outil développé considère les lieux de gisement (les sites de démolition et les carrières), les lieux de transformation (les sites de recyclage, prédéfinis ou à définir, mobiles ou fixes), les sites de stockage et d'élimination (les décharges), et enfin les lieux de valorisation (pour Recybéton les centrales de BPE et les préfabricants).

Il repose sur un système d'information géographique SIG, qui permet de conduire une analyse en termes d'attractivité ou de répulsion d'un lieu vis-à-vis d'une activité industrielle.

Ainsi à l'échelle de l'agglomération lyonnaise pourra être analysée la pertinence d'un schéma d'évacuation des déchets de déconstruction vers des sites de valorisation potentiels, et à l'échelle de la région Nord Pas-de-Calais un schéma global de filière pourra être élaboré.

La phase de collecte de données a conduit à l'établissement de quatre types de contraintes spatiales : la contrainte attractivité, la contrainte répulsivité, la contrainte réglementaire et la contrainte incitative (selon une démarche similaire à celle du projet ANR RGCU ASURET qui portait sur l'implantation potentielle de sites de traitement de sédiments de canaux dans la région Nord Pas de Calais).

Il est clair que l'objectif de RECYBETON n'est pas d'organiser une filière, mais d'analyser les possibilités d'adaptation au recyclage complet du béton de filières existantes. Mais qui peut le plus peut le moins. L'outil permet *a minima* de mettre en regard la pertinence d'une filière avec son contexte géographique.

La méthodologie de traitement des données des SIG est détaillée dans la deuxième partie du rapport. L'outil développé permet la visualisation des différentes contraintes sur les deux territoires en intégrant leurs différents types. **Cela est déjà une première avancée, et permet de dire pour un territoire donné, connaissant ses caractéristiques de gisement et de transformation, s'il est apte à permettre le développement de la filière recyclage complet du béton.**

Par ailleurs, d'autres propositions avaient été faites sur les thèmes 3.3 et 3.4, dans l'hypothèse d'un cofinancement ADEME, qui n'a pas été obtenu.

3.3 : Étude des eaux en contact avec les granulats de bétons recyclés : Position par rapport aux seuils, moyens de traitement - Granulats concassés exposés aux eaux de pluie sur la plateforme de recyclage.

3.4 : Évaluation environnementale du béton de granulats recyclés : FDES et ACV comparées entre les bétons neufs et les bétons recyclés à l'échelle du matériau - ACV comparées pouvant donner lieu à une FDES.

Ces propositions seront représentées en tranche 2. La proposition initiale 3.4 a été simplement élargie à de nouveaux partenaires (in fine CETE IdF, ENPC et Strasbourg) et acceptée par le CST. La proposition 3.3 a été discutée au CST et au comité de pilotage. Elle s'est finalement recentrée sur la capacité de relargage des bétons à base de granulats recyclés et confiée à l'INSA de Lyon.

Il faut maintenant pouvoir disposer de données plus complètes (par exemple des données de flux, de potentialité de gisements, ou d'élimination en décharge) et d'analyses territoriales d'opportunité en termes d'écologie industrielle (par exemple proximité d'un industriel de préfabrification et d'un recycleur). **Ainsi une collaboration avec les CERC est envisagée en tranche 3.**

6 Aspects réglementaires et normatifs (thème 4)

Ce sujet est un sujet transversal du projet car des obstacles réglementaires ou normatifs freinent encore le développement du recyclage des matériaux de construction dans ses divers aspects et ils seront abordés au fur et à mesure de leur traitement.

Le travail effectué en tranche 1 s'est basé sur la distinction entre textes relatifs aux produits, la conception des ouvrages et l'exécution.

Les textes normatifs examinés couvrent :

- ▶ les matériaux : textes de spécifications et normes d'essais ;
- ▶ les règles de conception permettant de justifier les ouvrages en béton armé ou béton précontraint (Eurocodes, code modèle fib) ;
- ▶ les règles d'exécution (normes européennes et françaises, ex. : DTU...) .

Les textes réglementaires examinés couvrent les différents codes législatifs et réglementaires français avec un point spécifique sur les freins identifiés.

Enfin, des textes relevant d'initiative locale en déclinaison de la réglementation tels que les guides ont permis de mettre en évidence une forte utilisation en techniques routières.

L'analyse de ces textes montre que l'utilisation des granulats recyclés obéit à la philosophie générale suivante :

- une caractérisation de leur qualité en corrélation avec la variabilité de leurs propriétés (classification, absorption d'eau, résistance au gel-dégel...) ;
- une modération dans leur usage dans les bétons de structure (taux d'incorporation).

L'analyse des textes a montré que la traditionnalité d'usage s'effectue en techniques routières.

6.1 Identification des freins dans les textes normatifs

Les normes d'exécution et de conception des ouvrages ne constituent pas en tant que tel un frein ou une incitation à l'utilisation des granulats recyclés. Dans la majorité des cas l'utilisation des granulats recyclés n'y est pas citée. La majeure partie d'entre elles renvoie à 5 textes qui traitent des constituants du béton, du béton prêt à l'emploi ou des produits préfabriqués en béton.

Note : lorsque l'utilisation de granulats recyclés n'était pas citée dans un texte, celui-ci a été jugé neutre c'est-à-dire ne constituant ni un frein ni une incitation au recyclage.

L'analyse des textes a mis en évidence la prédominance des documents suivants :

- NF EN 12620, NF EN 13139 et NF P18-545 pour le matériau granulat ;
- NF EN 206-1/CN pour le matériau béton ;
- NF EN 13369 pour les produits préfabriqués en béton.

Les points suivants ressortent de l'analyse de ces textes :

- l'utilisation des éléments fins est difficile dans le contexte normatif actuel à l'exception d'une utilisation dans le cru de cimenterie car la source « fines de recyclage » n'est pas prise en compte dans la norme NF EN 197-1 et ne constitue pas une source d'additions au sens de la norme NF EN 206-1 ;

- La norme NF EN 12620 prévoit l'utilisation de granulats recyclés dans le béton. Des essais spécifiques ont été développés pour qualifier ces granulats recyclés (NF EN 1744-5, NF EN 1744-6, NF EN 933-11) et sont spécifiés dans la norme NF EN 12620. Les différents niveaux de spécifications disponibles dans la norme ne constituent pas un frein à l'utilisation des granulats recyclés. Les granulats recyclés entrent dans le champ du marquage CE ;
- La norme NF EN 13139 autorise l'utilisation de granulats recyclés qui entrent dans son champ d'application mais ne prescrit pas d'essais complémentaires. Leur utilisation dans les mortiers est donc possible sans aucune limitation. Attention toutefois aux risques liés à la présence de sulfates solubles dans l'eau (plâtre) qui ne seraient pas détectés. Les granulats recyclés entrent dans le champ du marquage CE ;
- La norme NF P18-545 autorise l'utilisation des granulats recyclés aussi bien dans les utilisations de béton de bâtiment (article 10) que dans les utilisations de béton routier (article 9). Les spécifications retenues peuvent parfois être contraignantes ; par exemple la catégorie de sulfates solubles dans l'eau à 0,2 (article 9 et article 10) élimine plus de 50% de la production de granulats recyclés sans que l'on sache s'il y a un véritable impact sur la durabilité des bétons. De plus, la norme NF P18-545 est sécuritaire en ce qui concerne les pré-mélanges de granulats recyclés et de granulats naturels puisque dès lors qu'un granulats naturel contient du granulats recyclé, il doit être soumis à l'ensemble des essais sur granulats recyclés ;
- La norme NF EN 206-1/CN autorise l'utilisation des granulats recyclés dans le béton. Toutefois elle introduit des dispositions spécifiques susceptibles de constituer un frein à l'utilisation de granulats recyclés :
 - o taux de substitution différenciés selon la classification des granulats et la classe d'exposition, qui introduit un déséquilibre d'utilisation entre sable et gravillons ;
 - o spécifications contraignantes sur certains paramètres (sulfates solubles dans l'eau, modification du temps de prise, ...) ;
 - o renforcement des fréquences d'essais sur les granulats recyclés par rapport au marquage CE (frein économique) ;
 - o limitation de la résistance des bétons dans lesquels les recyclés peuvent être utilisés, etc.

La norme NF EN 206-1/CN constitue la pierre angulaire des freins à l'utilisation de granulats recyclés dans le béton. Il est important que les autres thèmes du PN RECYBETON se consacrent à la levée de ces freins et en particulier en rassurant sur les impacts à long terme (durabilité) des granulats sur les bétons.

En ce qui concerne les autres documents, on pourra noter l'examen des référentiels métiers (SNCF ou EDF). Le CCTG d'EDF se contente de renvoyer à la norme NF P18-545 mais l'IN0034 SNCF constitue un véritable frein en interdisant l'introduction de recyclés.

On peut enfin se poser la question des normes d'essais sur granulats dont la pertinence doit être démontrée pour les granulats recyclés, certaines d'entre elles semblant poser problème dans la pratique (absorption d'eau, gel-dégel, chlorures solubles dans l'acide, ...). Le thème 2 devra apporter une réponse sur la pertinence de ces normes.

Les EUROCODES ne traitent pas explicitement des granulats recyclés, en effet, on peut supposer qu'à l'époque de leur rédaction, ce point n'était pas d'actualité. En outre, la norme béton (NF EN 206-1 d'avril 2004) n'en parlait pas non plus mais renvoyait à la NF EN 12620 de 2003 qui, dans son domaine d'application, autorisait les granulats recyclés. Ainsi, une lecture « brute » de ces 3 textes pouvait laisser à penser que les bétons à base de granulats recyclés étaient couverts par l'Eurocode 2. Cependant, l'état de l'art montre que le comportement mécanique du béton est modifié par

l'incorporation de granulats recyclés dès lors que le pourcentage d'incorporation est significatif. Il est donc naturel de s'interroger sur les éventuelles modifications à apporter à l'Eurocode 2 pour prendre en compte les spécificités de comportement des bétons de granulats recyclés, en particulier, la relation entre le module élastique et la résistance en compression, le retrait, le fluage et la tenue au feu. Pour ce dernier point, il semble intéressant de se pencher sur les graphiques donnés en fonction de la nature des granulats (calcaire ou siliceux) pour savoir si ils constituent une courbe enveloppe dans laquelle sont intégrés les granulats recyclés. Ce point devra être vérifié par le thème 2 tant en termes de résistances mécaniques que de dimensionnement d'ouvrages ou de résistance au feu.

6.2 Identification des freins et des incitations au recyclage dans les textes réglementaires

A ce jour, le seul domaine réglementaire pour la sortie du statut de déchet est à l'état de projet et ne vise que le domaine routier. Ainsi, les granulats recyclés entrant dans la composition des bétons de bâtiments et d'ouvrages du génie-civil ne sont actuellement pas concernés. Aujourd'hui, il n'existe ni flux ni filière de recyclage identifiés pour ce marché potentiel. Or, il s'agit d'un préalable incontournable afin d'envisager la sortie du statut de déchets pour les granulats de béton recyclés. Conformément au principe du pollueur-payeur, les coûts de la gestion des déchets sont supportés par le producteur de déchets initial ou par le détenteur actuel ou antérieur des déchets. La Directive cadre européenne pour les déchets, précise toutefois que les États membres peuvent décider si les coûts de la gestion des déchets doivent être supportés en tout ou en partie par le producteur du produit qui est à l'origine des déchets et/ou faire partager ces coûts aux distributeurs de ce produit. Les matériaux provenant de la démolition d'ouvrages ne sont pas soumis à la taxe générale sur les activités polluantes. Seuls sont soumis à la TGAP les matériaux d'extraction obtenus à partir de roches concassées ou fractionnées (circ. 10/04/14).

Il existe par ailleurs des aides financières pour l'achat d'équipement pour le recyclage. Comme le stipule le code de la construction et de l'habitation, les entreprises de construction et les fabricants de matériaux de construction de la construction peuvent recevoir de l'Etat une aide financière sous forme de prêts pour l'achat de leurs équipements (R141-1). Ces prêts favorisent notamment la création de centrales à béton, l'acquisition de matériel spécialisé de manutention et de mise en œuvre, et l'équipement d'installations permettant la fabrication en atelier d'éléments préfabriqués en béton (R141-2).

7 Valorisation (thème 5)

Au titre de la première tranche étaient prévues :

- la création d'un site internet y compris l'hébergement et sa mise en service ;
- la création d'un site intranet réservé aux partenaires du projet, sous la forme d'une plateforme d'échange de fichiers informatiques ;
- la création de forums de discussions réservés aux partenaires du projet.

Ces trois objectifs ont été remplis. Le site internet externe est en ligne depuis 2012, à l'adresse suivante :

<http://www.pnrecybeton.fr>

Il offre au grand public une information générale sur le projet et sur son actualité.

Une plate-forme collaborative (de type intranet) a été également créée (<http://www.omnispace.fr/pnrecybeton>), et constitue un outil précieux pour les participants au projet. Elle permet de stocker toute la documentation – comptes rendus de réunion, présentations, documents de travail, rapports divers – et de dialoguer, soit par un système de messagerie, soit par des forums. Il existe ainsi un forum de discussion accessible à l'ensemble des membres, et un autre réservé au CST.

8 Conclusion

La tranche 1 du projet national RECYBETON, à présent terminée, a permis à cette initiative de prendre son envol. Aujourd'hui, onze comités sont actifs :

- le comité directeur (CODIR), qui se réunit une à deux fois par an pour entériner les phases importantes du projet ;
- le comité de coordination (CC), chargé de prendre des décisions rapides en lieu et place du CODIR ;
- le comité scientifique et technique (CST), « cœur du réacteur », qui définit les tranches de recherche, organise leur lancement, recueille et valide les résultats ;
- six groupes techniques (GT0 à GT5), qui gèrent l'avancement des différentes thématiques, depuis les actions d'accompagnement jusqu'à la valorisation ;
- un nouveau GT (le GT6), groupe transversal chargé d'étudier la possibilité d'opérer en carrière des mélanges de granulats naturels et de granulats recyclés ;
- et enfin, le bureau, comité restreint qui se réunit une fois par mois pour assurer la bonne marche du projet au quotidien.

Le projet accroît actuellement sa visibilité par de nouveaux recrutements (44 entités adhèrent aujourd'hui à RECYBETON), par la multiplication des ouvrages expérimentaux et par de nombreuses opportunités de présentation du projet dans différents séminaires et journées techniques. La dynamique créée se poursuit dans le cadre de la tranche 2 (en cours), de la tranche 3 (en cours de lancement), sans oublier le projet ANR ECOREB qui complète RECYBETON par un pan de recherches à caractère plus académique. Il reste une tranche 4 à définir et à financer, afin que tous les objectifs initiaux du projet soient atteints.

* * *