

PROJET DE R&D

RECYclage complet des BETONs

Acronyme : PN RECYBETON

PN RECYBETON - ETUDE DE FAISABILITE

1 – Présentation Générale

1.1 Objectifs du projet

1.2 La pertinence du sujet et les enjeux

1.3 Le contexte actuel : constat et description des besoins

2 – État de l'art

2.1 Axe 1 – Aspects technologiques

2.2 Axe 2 – Aspects Matériaux

2.3 Axe 3 – Aspects Socio-économiques

2.4 Axe 4 – Aspects Environnementaux et sanitaires

2.5 Axe 5 – Aspects Réglementaires et normatifs

3 – Programme de Recherche

3.1 – Travaux d'accompagnement

3.2 – Thème 1 : Technologies et procédés

3.3 – Thème 2 : Matériaux et structure

3.4 – Thème 3 : Développement durable

3.5 – Thème 4 : Aspects réglementaires et normatifs

3.6 – Thème 5 : Valorisation

4 – Budget global prévisionnel

5 – Comité de Pilotage et Partenaires potentiels

6 – Planning prévisionnel

1 – Présentation Générale

1.1 Objectifs du projet

- Réutilisation de l'intégralité des matériaux issus des bétons déconstruits, y comprises les fines, comme constituants des nouveaux bétons.
- Recyclage de matériaux issus de la déconstruction des bétons comme matière première pour la production de liants hydrauliques (pour produire le clinker ou comme constituant de nouveaux produits).

1 – Présentation Générale

1.2 La pertinence du sujet et les enjeux

Le **développement durable** est devenu un véritable enjeu stratégique dans ses trois dimensions (environnementale, économique et sociale). Il crée des nouveaux enjeux pour les professionnels de la construction et pour les utilisateurs des ouvrages.

Dans ce cadre, il est nécessaire de tenter d'aboutir à :

- des diminutions importantes d'émissions de GES,
- la réduction de la consommation énergétique,
- l'utilisation rationnelle des ressources naturelles,
- la valorisation des matériaux de déconstruction.

Le recyclage complet des bétons apportera des réponses à ces questions.

1 – Présentation Générale

1.3 Le contexte actuel : constat et description des besoins

Un constat : Les matériaux de déconstruction représentent des volumes très importants qui sont aujourd'hui essentiellement valorisés en remblai :

- Plus de 300 millions de tonnes de déchets de chantier produits par an (TP + Bâtiment), dont approximativement 1/3 est éliminé.
- Les granulats recyclés, utilisés principalement en travaux routiers, ne représentent qu'environ 5 % de la production nationale de granulats.
- Des 20 millions de tonnes de déchets issus des bâtiments, plus de 35% correspondent à des produits à base de ciment, mortier et béton.

Le patrimoine construit en béton constitue, à sa fin de vie, un gisement potentiel important de granulats recyclés qui pourraient être valorisés dans sa totalité.

Des besoins : Pour la valorisation des déchets de déconstruction, et en particulier ceux issus des bétons, des besoins fondamentaux doivent être satisfaits :

- La promotion de la déconstruction sélective pour éviter les mélanges.
- Des moyens efficaces de séparation et traitement des composants des matériaux de déconstruction
- La caractérisation des nouveaux matériaux réalisés à partir des bétons de déconstruction

2 – État de l'art

Le recyclage des bétons issus de la déconstruction est un sujet qui était déjà présent dans les dernières décades du 20ème siècle mais ce n'est que dans les premières années de ce siècle qu'il commence à prendre de l'importance, poussée par la prise de conscience des enjeux liés au développement durable.

L'état de l'art établi pour la présente étude de faisabilité le montre ainsi et il a permis de fixer les bases du programme de recherche du futur PN.

Il a été abordé selon les cinq axes thématiques principaux suivants :

- **Axe 1 – Aspects technologiques**
- **Axe 2 – Aspects Matériaux**
- **Axe 3 – Aspects Socio-économiques**
- **Axe 4 – Aspects Environnementaux et sanitaires**
- **Axe 5 – Aspects Réglementaires et normatifs**

2 – État de l'art

2.1 Axe 1 – Aspects technologiques

Cette partie est consacrée aux procédés utilisés ou qui pourraient être utilisés pour séparer le béton des autres déchets, pour ensuite séparer ses différents constituants, notamment les fines, de façon à les utiliser dans la fabrication du ciment et du béton.

2.1.1 Concassage et tri sélectif

Deux phases et des procédés différents : la déconstruction (liée à l'ouvrage "ressource") et l'élaboration (en rapport au matériau récupéré)

Déconstruction sélective et tri

La déconstruction sélective consiste en la séparation et tri des matériaux résiduels lors des travaux de démolition.

Avantages : production de matériaux de qualité beaucoup plus faciles à valoriser.

Inconvénients : durée plus longue de la déconstruction, multiplication des opérations et de la main d'œuvre

Des nombreuses études ont démonté la faisabilité technique et économique de la déconstruction sélective [RECYC-QUEBEC, 1999]

Le surcoût de la déconstruction sélective n'est plus un obstacle : toute déconstruction doit être précédée d'un audit avec inventaire systématique et complet des matériaux et identification des filières locales de recyclage. L'existence de ces filières locales justifie une déconstruction fine et un tri poussé (engagement 256 du Grenelle de l'Environnement)

2 – État de l'art

2.1.1 Concassage et tri sélectif

Élaboration des granulats recyclés et élimination des polluants

Une phase importante : le prétraitement, qui consiste au cisailage des ferrailles et la réduction des plus gros éléments.

Des appareillages classiques sont utilisés : cribles, concasseurs (à mâchoire, à percussion) mais des tris spécifiques sont appliqués aux granulats recyclés :

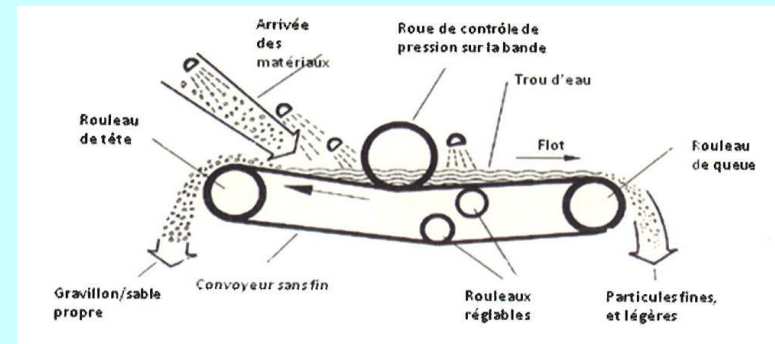
- déferrailage magnétique par "overband" ;
- retrait des contaminants légers (bois, carton, papier, plastique) par tri manuel, voie humide, jet d'air, flottation ("Aquamator", [Québaud, 1996])



Overband



Jet d'air



Aquamator

2 – État de l'art

2.1.1 Concassage et tri sélectif

Élaboration des granulats recyclés et élimination des polluants

Plus grande difficulté : séparation des grains de leur gangue de mortier.

Dispositifs en cours de développement :

- Séparation du mortier par impulsions sonores générées par décharges électriques en milieux aqueux [Müller et al, 2004]
- Séparation du mortier par traitement thermo-mécanique [Müller et al, 2004]
- Nettoyage "chimique" des granulats [Wan et al., 2007]
- Imprégnation des granulats recyclés par un polymère (PVA : alcool de polyvinyle) [Shi-cong et al., 2010]

2 – État de l'art

2.1.2 Fabrication des ciments incorporant des fines de bétons recyclés

L'utilisation de fines dans la production de ciment doit être distinguée entre celle qui emploie des sous-produits déjà devenus "courants" (cendres volants, laitier de haut fourneau, fumées de silice) de celle provenant des déchets de la construction qui reste encore au stade expérimental.

Techniques de séparation des fines de granulats recyclés susceptibles d'être utilisés dans la fabrication des ciments

La séparation des fines issues de la déconstruction qui soient utilisables pour fabriquer des ciments est le principal verrou technologique à lever.

Deux méthodes sont actuellement considérés :

Utilisation des procédés conventionnels : Études réalisées en République Tchèque [Fridichova et al., 2006] utilisant des fines provenant des usines de recyclage comme matière première du cru pour fabriquer du clinker.

Utilisation des procédés innovants : Procédés encore au niveau "invention" (brevets [Entzmann, 1981 ; Hoppe et al., 2002 ; Hoppe et al., 2006 ; Xiaolin, 2007 ; Chang et al., 2007]) ou expérimental [COFRAGE, 2009]. Restent des problèmes d'ordre technologique ou économique à résoudre pour son implémentation à niveau industriel.

2 – État de l'art

2.1.2 Fabrication des ciments incorporant des fines de bétons recyclés

Utilisation des fines de béton recyclé dans la fabrication des ciments

Les fines issues du béton recyclé peuvent être introduites dans le processus de fabrication des ciments soit comme des composants du cru, soit comme ajout au clinker.

Utilisation en qualité de composante du cru

L'étude la plus significative pour utiliser des granulats de béton recyclé pour fabriquer du ciment a été réalisée par une équipe tchèque de l'Université de Brno [Fridrichova et al., 2006]. Les aspects les plus importants de cette étude sont :

- Des fines de 3 usines de traitement de déchets ont été comparées pendant 2 ans (2003 et 2004) : composition chimique et minéralogique homogène (diff. < 10 %), teneurs en CaO inférieur et en SiO₂ supérieure aux teneurs des matières premières classiques du cru.
- Les fines provenant d'une usine, sélectionnée par sa proximité à la cimenterie, ont été testés pour produire du clinker. Des ajouts de calcaire et de correcteur en Fer ont été réalisés pour s'approcher au cru classique.
- Très bons résultats pour la fabrication de clinker alitique (> 50 % de C₃S) et du ciment associé (caractéristiques similaires au CEM I 42,5 R) ont été obtenus, ce qui n'est pas encore le cas pour le clinker bélitique (à haut teneur en C₂S).

2 – État de l'art

2.1.2 Fabrication des ciments incorporant des fines de bétons recyclés

Utilisation des fines de béton recyclé dans la fabrication des ciments

Utilisation en qualité d'ajout au clinker

L'ajout des fines issues du béton recyclé directement à la sortie du four n'est pas traité dans la littérature → voie intéressante de recherche.

Quelques travaux présentent leur utilisation comme ajout au ciment pour réaliser un nouveau béton. Cette utilisation s'avère intéressante pour améliorer la vitesse d'hydratation des ciments à haute teneur en laitier de haut fourneau (40 % [Janssen et al., 2007]).

Autres procédés de fabrication des ciments à partir de béton recyclé

- Utilisation de fines obtenues par séchage des boues de ciment des usines de BPE [Yoda et al., 1992] → faible chaleur d'hydratation mais taux de carbonatation plus important.
- Reclinkérisation de fines obtenues par broyage de béton réalisé en laboratoire [Costes et al., 1998] → propriétés hydrauliques et résistances à la compression intéressantes.
- Ajout de fines issues du lavage des camions de transport du béton en substitution du ciment (3 %) et du laitier (2 %) [Janssen et al., 2007] → légère augmentation de la résistance à la compression.

2 – État de l'art

2.1.3 Fabrication du béton incorporant des recyclés

Point sur l'utilisation de ces matériaux

- Premier état de l'art sur l'utilisation des granulats du recyclage du béton dans des nouveaux béton réalisée par la RILEM en 1978.
- Utilisation en béton routier dans la reconstruction de la voie lente de l'A6 dans l'Essonne durant les années 1983 à 1986 [Charonnat et al., 1990].

Caractéristiques des bétons élaborés avec ces granulats

Les travaux de Quebaud [Quebaud, 1996] concluent que, en comparaison avec un béton de même composition formulé avec des granulats naturels, pour ces bétons :

- Les résistances à la compression et à la traction sont inférieures d'environ 10 à 30 %
- la densité est plus faible.
- Le module d'élasticité est inférieur de 15 à 40 %
- L'adhérence pâte/granat est moins bonne.
- Les retraits sont plus élevés (> 50 %)

D'autres études montrent que ces propriétés peuvent être améliorées.

2 – État de l'art

2.1.3 Fabrication du béton incorporant des recyclés

Utilisation dans la fabrication de produits préfabriqués

Des études ont été effectuées concernant la fabrication d'éléments préfabriqués avec des granulats recyclés [Dehaut, 2011].

Généralement : taux d'incorporation des granulats recyclés $< 10 \%$ de la fraction à substituer. Pour ces dosages, on peut observer une augmentation des temps de malaxage (lié à la valeur d'absorption d'eau du matériau). Au delà de ces dosages, on constate une diminution des performances des bétons.

L'utilisation de granulats recyclés dans les produits en béton, en particulier ceux à démoulage immédiat, est possible.



Blocs frais avec 7,3% de granulats recyclés [Dehaut, 2011]

2 – État de l'art

2.1.3 Fabrication du béton incorporant des recyclés

Utilisation dans le BPE

La capacité d'absorption d'eau des graviers recyclés étant élevée, elle impose :

- Utilisation des granulats en saturation avec surface sèche
- Pré-mouillage pour maintenir le degré de saturation

En première analyse, on a constaté [Hallshowh, 2003] que les gravillons recyclés :

- peuvent être utilisés de façon courante pour fabriquer des bétons à faible résistance (< 20 MPa) ;
- peuvent être utilisés en faibles pourcentages pour réaliser des bétons pouvant atteindre jusqu'à 40 MPa.

2 – État de l'art

2.2 Axe 2 – Aspects matériaux

2.2.1 Granulat et fines recyclés

Les caractéristiques des granulats recyclés de béton, particulièrement la fraction sableuse, diffèrent de celles des granulats naturels, une partie de ces caractéristiques étant héritée de la fraction mortier.

Caractéristiques des granulats recyclés et régularité de ces caractéristiques

La dispersion de la distribution granulaire des granulats recyclés d'une installation de recyclage semble être une situation courante [Angulo et al., 2010] → peu admissible sans correction pour une utilisation pour faire du béton.

Les caractéristiques héritées du mortier

- Le mortier qui reste accroché aux granulats est cause de : densité plus faible, absorption plus élevée, teneur en sulfates plus élevée [Sanchez et al., 2004]
- La teneur en mortier varie selon les fractions considérées (4/8 mm → 33 à 55 % ; 8/16 mm → 23 à 44 %) [Sanchez et al., 2004]
- Le béton d'origine a une influence sur la teneur en pâte de ciment des granulats recyclés [Padmini et al., 2009]

2 – État de l'art

2.2 Axe 2 – Aspects matériaux

2.2.1 Granulat et fines recyclés

Granulométrie, teneur en fines et forme de gravillons

- La courbe granulométrique est fonction du concasseur utilisé et du béton initial [Ravindrarajah et al., 1985]
- La défillerisation par voie humide permet d'obtenir des sables avec une teneur en matrice cimentaire plus faible que les sables élaborés à sec [Weimann et al., 2004]
- Les granulats recyclés sont anguleux → plus grande friction interne [Evangelista et al., 2010]

Caractéristiques mécaniques des granulats recyclés

La présence du mortier réduit la résistance aux chocs, à l'usure et au gel, coefficient d'abrasion de Los Angeles plus élevé [Québaud, 1996 ; Sanchez et al., 2004]

Caractéristiques chimiques des granulats recyclés

- Différence de solubilité des chlorures dans l'eau et dans l'acide selon la teneur en mortier [Mahmoud, 2005 ; Sanchez et al., 2004]
- Teneur en sulfates liée à la quantité de mortier présent sur le granulat [Sanchez et al., 2004]

2 – État de l'art

2.2 Axe 2 – Aspects matériaux

2.2.1 Granulat et fines recyclés

Propriétés physiques des granulats recyclés

Les propriétés physiques des granulats recyclés sont différentes de celles des granulats naturels. Ils ont le plus souvent une densité plus faible et une absorption d'eau plus élevée;

L'affaissement des mortiers à base de sable recyclé est inférieur à celui avec du sable naturel, ce qui peut être expliqué par la compacité plus faible pour le sable recyclé ainsi que par la rugosité de la surface des grains de sable [Djerbi et al., 2010]

Autres caractéristiques

Les produits issus du recyclage sont qualifiés PR (potentiellement réactifs) vis-à-vis de l'alcali-réaction, selon les normes ASTM C1260 [Etxeberria, 2004]

Caractéristiques chimiques des fines recyclés

L'utilisation des fines recyclés dans les formulations des bétons est souvent limitée. Pourtant, des travaux montrent que la réactivité des fines recyclées peut être améliorée en utilisant un traitement thermique [Shui et al., 2008]

2 – État de l'art

2.2 Axe 2 – Aspects matériaux

2.2.2 Bétons recyclés à l'état frais et durcissant

Spécificités de formulation des bétons recyclés pouvant influencer leurs propriétés à l'état frais et au jeune âge

Par rapport aux bétons de granulats naturels, les bétons avec des recyclés présentent des particularités de formulation :

- masse volumique plus faible ;
- teneurs en fines importantes, en particulier lorsque le sable recyclé est utilisé ;
- rugosité de surface importante et compacité relativement faible ;
- demande en eau totale du béton accrue par l'absorption d'eau importante des granulats recyclés ;
- dans le cas où les granulats sur stock ne sont pas saturés en eau, une reprise d'eau des granulats dans le mélange intervient dans les heures qui suivent le malaxage ;
- l'obtention d'une résistance finale passe par des rapports eau/liants égaux ou plus faibles qu'avec des granulats naturels, et implique des dosages en liants neufs plus importants.

2 – État de l'art

2.2 Axe 2 – Aspects matériaux

2.2.2 Bétons recyclés à l'état frais et durcissant

Masse volumique à l'état frais

Généralement plus faible que celle des bétons classiques, du fait de la quantité de mortier ancien. Valeurs rapportées : comprises entre 2000 et 2200 kg/m³ [cité par Topçu et al., 2004]

Teneur en air "naturelle" du béton frais

La forme et la rugosité des granulats peuvent créer une plus grande difficulté pour les bulles d'air à s'extraire du béton pendant la vibration. Les teneurs en air occlus trouvées sont légèrement plus importantes que dans les bétons de granulats naturels [cité par Topçu et al., 2004]

Rhéologie du béton à l'état frais

La substitution des granulats naturels par des granulats recyclés peut donner lieu à :

- besoin de plus d'eau efficace → plus d'eau totale à même slump ;
- plus de risque de perte rapide de maniabilité [Ravindrarajah et al., 2004] ;
- dans le cas d'utilisation de superplastifiants, des possibles valeurs de viscosité plastique plus élevée.

2 – État de l'art

2.2 Axe 2 – Aspects matériaux

2.2.2 Bétons recyclés à l'état frais et durcissant

Temps de prise

La réduction du rapport eau efficace/ciment et la présence d'alcalins libérés par les granulats recyclés diminue le temps de prise [Ravindrarajah et al., 1987] mais l'utilisation de superplastifiant agit dans le sens inverse.

Chaleur d'hydratation

La présence d'une réserve d'eau dans les granulats va dans le sens d'une meilleure hydratation du ciment et donc d'un dégagement thermique plus fort.

Durcissement

La résistance au très jeune âge dépend du temps de prise, mais après prise, à même résistance à 28 jours, les valeurs à des âges antérieurs est un peu plus élevée pour les bétons avec du recyclé [Ravindrarajah et al., 1985]

Retrait plastique

La présence de fines en quantité importante et l'absorption différée d'eau par les granulats réduit le ressuage [cité par Hansen, 1992] et augmente donc le risque de retrait plastique en cas de cure insuffisante.

Retrait endogène

L'importante réserve d'eau des granulats recyclés fait que le retrait endogène est réduit pour ces bétons [Cusson et al., 2006 ; Sato et al., 2007]

2 – État de l'art

2.2 Axe 2 – Aspects matériaux

2.2.3 Bétons recyclés à l'état durci – Performances mécaniques

L'étude des performances mécaniques des bétons recyclés a été réalisée en considérant le remplacement d'une partie ou de la totalité des gravillons naturels par des gravillons recyclés, peu de travaux considèrent des bétons formulés avec du sable recyclé et très peu concernent des bétons formulés avec l'ensemble de granulats recyclés (sable + graviers).

Résistance à la compression

La résistance à la compression des bétons avec des granulats recyclés peut être de 5 à 40 % plus faible. Elle dépend, entre autres facteurs :

- du taux de substitution pour un rapport E/C constant : diminution peu significative pour un taux < 25 % pour les graviers ou de < 30 % pour le sable [Chakradhara et al., 2011 ; Kou et al., 2009, Casuccio et al., 2008, Evangelista, 2007]
- des paramètres de formulation et plus particulièrement le rapport E/C [Corinaldesi, 2010 ; Belén, 2011]
- de la qualité du béton de démolition dont les granulats sont issus [Xiao et al., 2006; Casuccio et al., 2008]
- des conditions de cure (conservé à l'air après cure humide partielle → plus résistants) [Chakradhara et al., 2011]
- du malaxage qui joue un rôle important au jeune âge (pré-malaxage des granulats et eau incorporée en plusieurs étapes → résistances plus importantes) [Tam et al., 2007]

2 – État de l'art

2.2 Axe 2 – Aspects matériaux

2.2.3 Bétons recyclés à l'état durci – Performances mécaniques

Résistance à la traction

La résistance à la traction des bétons recyclés diminue également en augmentant le taux de substitution en granulats recyclés [Chakradhara et al., 2011 ; Kou et al., 2010 ; Yang et al., 2011]

Résistance à la fatigue

La résistance à la fatigue en flexion des bétons fabriqués avec du sable naturel et des graviers recyclés serait supérieure à celle d'un béton normal [Kawamura et al., 1992 ; Etxeberria et al., 2007 ; Casuccio et al., 2008]

Module élastique

La tendance est à des valeurs plus faibles pour les bétons avec des granulats recyclés [Xiao et al., 2006 ; Tam et al., 2007 ; Li, 2008 ; Corinaldesi, 2010 ; Chakradhara et al., 2011]

Fluage et retrait de dessiccation

Les déformations de fluage et du retrait de dessiccation, du fait de la présence d'ancien mortier dans les granulats et leur forte porosité, sont supérieures à celles des bétons avec granulats naturels [Hasaba et al., 1981 ; Achtemichuk et al., 2009 ; Domingo et al., 2010]

Bétons recyclés armés

Seule la présence de sable recyclé paraît affecter le comportement des poutres en flexion [Mukai et al., 1992] et la capacité portante des poteaux avec granulats recyclés est diminué de 25 % [Kazizaki, 1992]

2 – État de l'art

2.2 Axe 2 – Aspects matériaux

2.2.4 Bétons recyclés à l'état durci – Durabilité

Il existe plusieurs façons de générer une formule de béton recyclé par rapport à une formule témoin, selon le paramètre gardé constant. Ce choix influe sur la comparaison.

Propriétés de durabilité des bétons

Absorption d'eau

L'absorption, plus particulièrement par capillarité, est nettement augmentée dans les bétons avec granulats recyclés [Comes, 2009 ; Evangelista et al., 2010 ; De Brito et al., 2010]

Perméabilité

Pour des faibles valeurs du rapport E/C, la perméabilité des bétons recyclés est supérieure à celle des bétons conventionnels [Rasheeduzzafar et al., 1984]

Carbonatation

La carbonatation est affectée par l'incorporation de granulats recyclés, avec une cinétique de carbonatation plus rapide [De Brito et al., 2010 ; Evangelista et al., 2010]. le potentiel de corrosion est légèrement supérieur à celui d'un béton conventionnel [Rasheeduzzafar et al., 1984]

Migration de chlorures

Les résultats sont contradictoires, allant d'une augmentation de la propagation de chlorures [Kuo et al., 2010] à des coefficients de diffusion du même ordre de grandeur que ceux des bétons traditionnels [Abbas et al., 2009]

2 – État de l'art

2.2 Axe 2 – Aspects matériaux

2.2.4 Bétons recyclés à l'état durci – Durabilité

Résistance aux sulfates

La résistance aux attaques sulfatiques d'un béton avec des granulats recyclés est similaire ou légèrement inférieure à celle d'un béton avec des granulats naturels [Nishibayashi et al., 1992]

Résistance aux cycles gel-dégel

La résistance au gel-dégel d'un béton recyclé est inférieure à celle des bétons conventionnels [Buck, 1977 ; Malhotra, 1978 ; Coquillat, 1982] et dépend du degré de saturation en eau [Zaharieva et al., 2004]. Avec l'utilisation d'un entraîneur d'air, les bétons recyclés peuvent s'avérer aussi performants que les bétons conventionnels [Richardson et al., 2011]

Résistance à l'abrasion

La résistance à l'abrasion tendra à augmenter avec le taux de substitution en granulats recyclés [De Brito et al., 2010]

Évolution de la microstructure à long terme

Dans une étude sur l'évolution microstructurale des bétons avec des granulats recyclés allant jusqu'à 5 ans, il a été observé que l'auréole de transition est de meilleure qualité que celle des bétons conventionnels et que la porosité totale diminue grâce à la poursuite de l'hydratation du liant [Kou et al., 2011] La conséquence est que la résistance mécanique augmente d'avantage que celle du béton traditionnel.

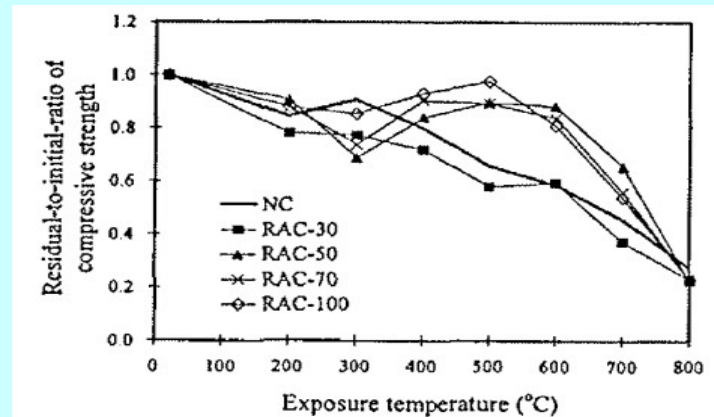
2 – État de l'art

2.2 Axe 2 – Aspects matériaux

2.2.5 Bétons recyclés à l'état durci – Comportement sous haute température

Variation des résistances mécaniques

Du côté de la variation de la résistance à la compression, un béton à base de granulats recyclés se comporte mieux qu'un béton traditionnel avec même rapport E/C de 0,40, lorsqu'il est soumis à une température de 500 °C pendant 1 heure, et de façon similaire après 4 heures [Zega et al., 2006]. Pour des teneurs en granulat recyclé supérieures ou égales à 50 %, il y aurait même une récupération de résistance autour de cette température [Xiao et al., 2007]



Résistances à la compression résiduelles selon différents pourcentages de granulats recyclés [Xiao et al., 2007]

Écaillage

Des bétons recyclés, de résistance à la compression inférieure à 50 MPa, contenant 30, 50, 70 ou 100 % de granulats recyclés n'ont pas présenté d'écaillage jusqu'à 800 °C [Xiao et al., 2007]

2 – État de l'art

2.3 Axe 3 – Aspects socio-économiques

Acceptabilité des Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)

Une étude ADEME sur 39 plateformes de tri/valorisation [ADEME, 2010] fait ressortir :

- Une pression foncière d'autant plus importante que la plateforme est située en zone urbaine.
- Des oppositions au cours d'une enquête publique (craintes de la population et des associations)
- Des pressions environnementales liées au bruit et à la poussière.

Un point très positif ressort cependant d'une étude comparative réalisée par la région belge de Wallonie [Group One, 2001] : les habitants reconnaissent la nécessité et l'utilité sociale des actions de retraitement, de recyclage, ..., et de réduction du volume des déchets inertes.

Impacts évités par l'utilisation de ces matériaux

Le rapport BIOIS [BIOIS, 2010] réalisé pour le compte de la C. E. fait ressortir que :

- le recyclage permet d'éviter l'utilisation des ressources et de l'espace correspondant aux carrières de granulats naturels;
- la proximité des granulats recyclés par rapport aux lieux de consommation permet de réduire les coûts de transport et dans ce cas, on constate une diminution de la consommation de carburant et d'émission de GES.

Effets de l'activité de recyclage sur l'emploi

Les données obtenues auprès de l'UNICEM et par l'étude ADEME [ADEME, 2010] donnent un chiffre de 0,4 emploi pour 10000 tonnes de granulats produites.

2 – État de l'art

2.4 Axe 4 – Aspects environnementaux et sanitaires

Règlementation existante pour les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)

Les plateformes de recyclage sont des ICPE soumises à déclaration, enregistrement ou autorisation sous les rubriques 2515 (broyage, concassage, criblage, ensachage, pulvérisation, nettoyage, tamisage, mélange, ...) et/ou 2517 (station de transit de produits minéraux solides)

Bruit

Dans les zones à émergence réglementée (immeubles habités, zones constructibles) le tableau suivant s'applique [rubriques 2515 et 2517, 1997] :

| Niveau de bruit ambiant existant (incluant le bruit de l'installation) | Emergence admissible de 7 h à 22 h hors dimanches et jours fériés | Emergence admissible de 22 à 7 h et dimanches et jours fériés |
|--|---|---|
| >35 dB(A) et ≤ 45 dB(A) | 6 dB(A) | 4 dB(A) |
| >45 dB(A) | 5 dB(A) | 3 dB(A) |

Poussières

Les rubriques 2515 et 2517 prévoient, entre autres :

- stockages protégés des vents ;
- fillers (< 80 µm) confinés ;
- véhicules sortant de l'installation sans faire de dépôt de poussière ou de boue.

Le nouveau projet d'arrêté pour la rubrique 2515 prévoit la surveillance de la qualité de l'air et des retombées de poussière

2 – État de l'art

2.4 Axe 4 – Aspects environnementaux et sanitaires

Eau

Les limitations de la rubrique 2515 portent sur le pH (entre 5,5 et 8,5 dans le nouveau projet d'arrêté), les matières en suspension pouvant être rejetées en milieu naturel (limitées à 35 mg/l dans le nouveau projet d'arrêté), la température (<30°C) et les hydrocarbures totaux (<10 mg/l)

Travaux du TC 351 sur les substances dangereuses

- Les mesures des relargages pourraient être réalisées sur la base de différentes méthodes d'essais mises au point par le TC 351, consistant en une lixiviation ou une percolation.
- Pour les granulats recyclés de bétons risque de que certains paramètres soient limitant, tels que le pH et la fraction soluble.

Il serait nécessaire d'obtenir des données sur le relargage ou non de substances dangereuses par les bétons incluant des granulats recyclés.

Travaux du TC 350 sur la durabilité des travaux de construction et qualité environnementale des bâtiments

Des déclarations environnementales auraient à être produites pour les différents produits de construction. Le recyclage du béton dans le béton serait un plus dans ces déclarations environnementales, favorable au marquage CE dans le cadre du futur RPC.

L'utilisation de matériaux recyclés dans la conception du bâtiment est prise en compte dans les systèmes d'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments (HQE, BREAM, Green Building, ...) de même que la gestion durable des déchets de démolition.

2 – État de l'art

2.5 Axe 5– Aspects réglementaires et normatifs

Les normes granulats

- Normes européennes d'essais : Des essais spécifiques pour les granulats recyclés ont été développés (classification, teneur en sulfates solubles dans l'eau, teneur en chlorures solubles dans l'acide) La plupart des normes pour les granulats naturels sont aussi applicables.
- Normes européennes de spécifications : elles sont en général adaptées aux granulats recyclés sauf l'EN 13139 pour les mortiers.
- La norme française de codification des granulats [XP P 18-545, 2008] incorpore déjà les granulats recyclés dans le champ d'application mais ce n'est que la version actuellement en révision qui introduira toutes les spécificités relatives aux granulats recyclés.

Les normes ciments

- Dans la norme harmonisée des ciments courants EN 197-1, il faudra changer la définition des constituants secondaires pour que les fines de déconstructions puissent être considérées dans cette catégorie. Pour qu'elles soient considérées comme un onzième constituant principal des ciments il faudra les définir en fonction de paramètres tels que teneur maximale en sulfates et chlorures, valeur maximale de perte au feu et de teneur en carbone organique total.
- La norme des ciments à maçonner EN 431-1 spécifie que ce ciment doit être constitué de clinker Portland, de matières inorganiques et, selon le cas, de matières organiques. Les fines peuvent donc être incorporées sous réserve que les teneurs en sulfates et en chlorures permettent au ciment à maçonner de respecter les exigences de la norme.

2 – État de l'art

2.5 Axe 5– Aspects réglementaires et normatifs

Les normes béton

- La norme de spécification du béton NF EN 206-1 n'inclut pas encore de prescriptions relatives à l'emploi de granulats recyclés. La révision de l'annexe nationale française, à paraître en 2012, fixera ces dispositions.
- La norme fixant les règles communes pour les produits préfabriqués en béton NF EN 13369 est actuellement en cours de révision et il est prévu des dispositions relatives à l'utilisation de granulats recyclés dans un processus fermé.

Conception, dimensionnement et exécution des ouvrages en béton

Les Eurocodes ne prévoient de forme explicite l'emploi de granulats recyclés et distinguent la nature minéralogique des granulats employés (calcaire ou siliceuse) Par conséquent, l'utilisation des granulats recyclés serait limité à des stocks dont la nature minéralogique des granulats de déconstruction soit maîtrisée. Une révision des Eurocodes intégrant le cas particulier des granulats recyclés serait souhaitable.

Des normes d'exécution des ouvrages en béton devront aussi être revues ou complétées pour permettre l'utilisation des granulats recyclés :

- le Fascicule 65 du CCTG (pour les ouvrages relevant de marchés publics) ;
- le NF DTU 21 ;
- le code des assurances (pour les ouvrages soumis à l'obligation de garantie décennale)

PN RECYBETON - ETUDE DE FAISABILITE

2 – État de l'art

2.5 Axe 5– Aspects réglementaires et normatifs

Analyse des normes dans les autres pays européens

| Pays | Référentiel | Types de granulats recyclés | Taux max | Résistance des bétons | Environnement | Autre |
|-----------|-------------------------------|---|-------------------------------|---|-----------------------------------|--|
| Allemagne | DIN 1045-2 | Type 1 : béton pur | 45 % | Néant Pas autorisé pour béton précontraint | X0, XC | Pas de granulat en dessous de 2 mm |
| | | | 35 % | | XF1, XF3 | |
| | | | 25 % | | XA1 | |
| | | Type 2 : maçonnerie | 35 % | | X0, XC | |
| | | | 25 % | | XF1, XF3 | |
| | | | 25 % | | XA1 | |
| Hollande | NEN 8005 | Béton pur | 20 % | | | |
| | | Maçonnerie | 10 % | | | |
| | CUR Recommandation 112 | Béton pur (gravillons seulement) | <50 % 50 à 100 % | C12/15 à C53/65 <=C20/25 >C20/25 | Toute classe Sauf XD et XS | Calculs d'élasticité, fluage et retrait à corriger |
| Danemark | DS 2426 | Béton concassé et maçonnerie | 30 % sable 100 % gravillon | | X0 et XC1 | |
| | DS/EN 1992-1-1 | Béton de structure uniquement | 10 % sable 20 % gravillon | >C30/37 | X0 et XC1 | |
| Italie | NTC : DM 14th January 2008 | Maçonnerie démolition | 100 % | =C8/10 | | Renforcement des contrôles 1/100 t et par jour de production |
| | | Béton de démolition | 30 % 60 % | C30/37 C20/25 | | |
| | | Utilisation interne Béton de préfa de classe supérieure à C45/55 | 15 % | C45/55 | | |

PN RECYBETON - ETUDE DE FAISABILITE

2 – État de l'art

2.5 Axe 5– Aspects réglementaires et normatifs

| | | | | | | | | |
|--|------------------------|--|---|----------------------|--------------------------------------|----------------------|---------|--------------------------|
| Suède | BÅ 99 SS 137003 | RA1 : 100% béton et roche | | | XC1, XC2, XF1 | Uniquement gravillon | | |
| | | RA2 : >80% béton et roche | | | X0, XC1, XC2 | Uniquement gravillon | | |
| Norvège | NB 26 | Type I : 99% béton et roches | 5 % sable 10 % gravillons | C20/25 | | | | |
| | | Type II : 95% béton, roches et briques | 10 % sable 30 % gravillon | C20/25 | | | | |
| | | | 20 % gravillon | C45/55 | | | | |
| Royaume Uni | BS 8500-1 BS 8500-2 | RCA = béton pur RA=mélange | 20 % gravillon | RC20/25 à RC40/50 | | Uniquement gravillon | | |
| Suisse | Cahier Technique 2030 | RC-C : béton RC-M : mélange | Recycling concrete | | Exposition class | | | |
| | | | Contents | X0 | XC1(CH) dry XC2(CH) XC3(CH) | XC1(CH) wet | XC4(CH) | XD(CH), XF(CH), XA |
| | | | RC-C $R_c \geq 25\%$ by mass $R_b < 5\%$ by mass | permissible | | | | ① |
| | | | RC-M $5\% \text{ by mass} \leq R_b \leq 25\%$ by mass and $R_c + R_b \geq 25\%$ by mass | permissible | | | ① | not permissible |
| | | | $R_b > 25\%$ by mass | permissible | ① | ① | | |
| ① Permissible following appropriate preliminary investigations | | | | | | | | |
| Sables et gravillons sont admis | | | | | | | | |

3 – Programme de Recherche

Les résultats de l'état de l'art et les apports des partenaires ont permis de définir ce projet de programme de recherche.

Il comporte des travaux d'accompagnement et 5 thèmes principaux.

3.1 Travaux d'accompagnement

Pour optimiser l'obtention de résultats et pouvoir les comparer, il est indispensable que les laboratoires disposent :

- de stocks homogènes de granulats et de ciments recyclés ;
- de la mise au point d'une série de formulations de référence de bétons recyclés.

3 – Programme de Recherche

3.2 Thème 1 : Technologies et procédés

D'abord il faut séparer le béton des autres déchets, ensuite perfectionner la séparation de ses différents constituants et enfin optimiser les procédés pour utiliser ces constituants dans la fabrication de ciment ou autre liant hydraulique ou des nouveaux bétons.

T1.1 : Concassage et tri sélectif

- analyse des systèmes d'élimination des phases indésirables dans l'élaboration des granulats recyclés, identification des bonnes pratiques et amélioration des techniques ;
- identification de la variabilité des ressources en granulats recyclés disponibles sur le territoire français ;
- étude des techniques d'échantillonnage des granulats recyclés afin d'apprécier les grandeurs moyennes et les dispersions ;
- étude en laboratoire de la séparation pâte-granat avec évaluation du coût énergétique et faisabilité d'un développement industriel.

3 – Programme de Recherche

T1.2 : Ciment incorporant des recyclés

- estimation du potentiel cimentier de plusieurs sources de béton concassé par incorporation de la partie fine dans le cru ;
- estimation du potentiel cimentier de plusieurs sources de béton concassé par mélange de fines avec le clinker dans un ciment composé ;
- évaluation de l'intérêt de fines de béton concassé comme addition minérale dans de nouveaux bétons.

T1.3 : Bétons incorporant des recyclés

- optimiser les séquences de malaxages des bétons incorporant des granulats recyclés (introduction différée, malaxage prolongé, double malaxage, tout procédé permettant d'optimiser le malaxage à des coûts compatibles avec les exigences économiques) ;
- étude des aspects pratiques de la fabrication industrielle de bétons utilisant des recyclés (stockage, dosage, contrôle de la teneur en eau) dans le cadre d'un **chantier expérimental**.

3 – Programme de Recherche

3.3 Thème 2 : Matériaux et structure

Il est important d'élargir l'emploi de tous les granulats issus du concassage des bétons de déconstruction, y inclus la partie fine, dans des usages autres que les remblais et routes, en particulier dans les bétons de structure.

T2.1 : Granulats et fines recyclés

- évaluation des méthodes de caractérisation des granulats naturels appliqués aux recyclés (granulométrie, absorption d'eau, retrait, hauteur de succion d'eau, cycles gel-dégel) ;
- évaluation de l'applicabilité des recommandations pour la prévention des désordres dus à la RAG de l'IFSTTAR aux granulats recyclés supposés potentiellement réactifs (dont détermination des alcalins libérables) ;
- étude d'une méthode de caractérisation en continu des granulats recyclés (dont teneur en sulfates solubles dans l'eau).

3 – Programme de Recherche

T2.2 : Bétons recyclés à l'état frais et durcissant

- étude de la rhéologie du béton recyclé en fonction de l'état de présaturation des granulats recyclés ;
- étude des compatibilités ciments – superplastifiants – granulats recyclés.

T2.3 : Bétons recyclés à l'état durci – comportement mécanique

- comportement du béton recyclé en compression/traction et en fatigue (notamment pour des applications routières) ;
- comportement structurel des poutres en flexion/effort tranchant et des poteaux sous sollicitation monotone et cyclique afin de juger de l'applicabilité des Eurocodes ;
- étude de l'adhérence béton recyclé et armature avec réalisation des essais sur élément de structure, afin de juger de l'applicabilité des Eurocodes ;
- étude des déformations différées : fluage, relaxation

3 – Programme de Recherche

T2.4 : Durabilité des bétons recyclés à l'état durci

- étude de l'hydratation et l'évolution de la microstructure des bétons à base de granulats recyclés (cure interne, auréoles de transition, porosité, liaisons anciennes/nouvelles pâtes) ;
- détermination des paramètres contrôlant la corrosion des armatures, la carbonatation, la migration des ions chlorures (notamment en prenant en compte la variabilité des constituants par une approche probabilistique) ;
- retrait de dessiccation des bétons recyclés ;
- résistance des bétons à base de granulats recyclés aux cycles gel-dégel avec ou sans sels de déverglaçage afin de juger de l'applicabilité des recommandations IFSTTAR (ex-LCPC) ;
- définir des indicateurs de durabilité et étudier l'applicabilité des modes opératoires de mesures aux bétons recyclés pour fixer des seuils.

T2.5 : Bétons recyclés – feu, thermique

- mesure des propriétés physiques des bétons recyclés en fonction de la température dont la conductivité thermique ;
- étude du comportement en compression – traction à différentes températures (de 20 à 1050 °C), des résistances résiduelles et de l'écaillage.

3 – Programme de Recherche

3.4 Thème 3 : Développement durable

T3.1 : Aspects socio-économiques

- analyse de l'intérêt socio-économique du recyclage du béton ;
- mesures d'accompagnement possibles pour le développement d'une filière de recyclage du béton, en liaison avec les différents marchés (route, bâtiment, génie civil) ;
- gestion local de la ressource en granulats.

T3.2 : Aspects environnementaux et sanitaires

- qualifier les eaux de lavage des granulats ;
- étudier la lixiviation/percolation des bétons recyclés ;
- réaliser des FDES et ACV comparées entre les bétons neufs et les bétons recyclés aux différentes échelles (matériau, élément de structure ou construction)

3 – Programme de Recherche

3.5 Thème 4 : Aspects réglementaires et normatifs

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

On veillera à l'identification de la réglementation, des incitations et des freins à l'utilisation de béton recyclé dans les différents pays européens et au niveau français, pour proposer des adaptations ou des modifications.

3.6 Thème 5 : Valorisation

- création d'un site internet et intranet ;
- rédaction d'une synthèse de résultats et de recommandations, y compris constitution d'un comité de relecture ;
- édition d'un guide technique français-anglais ;
- présentation publique des résultats à Paris et en province (3 à 4 réunions) ;
- actions de formation et participation à des conférences ou séminaires.

PN RECYBETON - ETUDE DE FAISABILITE

4 – Budget global prévisionnel

| Description des thèmes de recherche | Budget global en k€ HT | Part PN en k€ HT |
|---|------------------------|------------------|
| TRAVAUX D'ACCOMPAGNEMENT | | |
| Sélection et préparation de stockes homogènes de granulats et de ciments recyclés | 150 | 60 |
| Mise au point d'une série de formulations de référence de bétons recyclés | 120 | 40 |
| TOTAL (0) | 270 | 100 |
| THEME 1 - TECHNOLOGIES ET PROCEDES | | |
| Concassage et tri sélectif : - élimination des phases indésirables : identification des bonnes pratiques, amélioration des techniques - identification de la variabilité de la ressource en granulats recyclés - techniques d'échantillonnage des granulats recyclés - séparation pâte / granulat : étude en laboratoire, évaluation du coût énergétique, faisabilité d'un développement industriel | 550 | 220 |
| Ciment incorporant des recyclés : - estimation du potentiel cimentier par incorporation dans le cru - estimation du potentiel cimentier par mélange s avec le clinker - évaluation de l'intérêt des fines de béton concassé comme addition minérale dans le béton | 510 | 180 |
| Bétons incorporant des recyclés : - optimisation des séquences de malaxage - étude des aspects pratiques de fabrication industrielle - chantier expérimental | 380 | 140 |
| TOTAL (1) | 1440 | 540 |

PN RECYBETON - ETUDE DE FAISABILITE

| THEME 2 - MATERIAUX ET STRUCTURE | | |
|---|-------------|------------|
| <p>Granulats et fines recyclés :</p> <ul style="list-style-type: none"> - évaluation des méthodes de caractérisation des granulats naturels appliquées aux recyclés - évaluation de l'applicabilité des recommandations RAG du LCPC aux granulats recyclés supposés PR - méthode de caractérisation en continu des granulats recyclés | 470 | 170 |
| <p>Bétons recyclés à l'état frais et durcissant :</p> <ul style="list-style-type: none"> - rhéologie du béton recyclé frais en fonction de l'état de présaturation - compatibilité ciment-superplastifiants-granulats recyclés | 260 | 100 |
| <p>Bétons recyclés à l'état durci - mécanique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - comportement en traction/compression et en fatigue (en vue des applications routières) - comportement structurel de poutres en flexion/effort tranchant et de poteaux sous sollicitations monotones et cycliques ; applicabilités des Eurocodes - adhérence béton recyclé / armature - étude des déformations différées : fluage/relaxation | 620 | 235 |
| <p>Bétons recyclés à l'état durci - durabilité :</p> <ul style="list-style-type: none"> - hydratation et évolution de la microstructure des bétons à base granulats issus de la déconstruction - paramètres contrôlant la corrosion des armatures, carbonatation, migration des ions chlorures - retrait de dessiccation des bétons recyclés - résistance des bétons à base de granulats recyclés aux cycles de gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage - indicateurs de durabilité | 800 | 300 |
| <p>Bétons recyclés - feu, thermique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - mesure des propriétés physiques des bétons recyclés en fonction de la température - comportement en traction/compression à différentes températures, résistances résiduelles et écaillage | 270 | 100 |
| TOTAL (2) | 2420 | 905 |

PN RECYBETON - ETUDE DE FAISABILITE

| | | |
|---|-------------|-------------|
| THEME 3 - DEVELOPPEMENT DURABLE | | |
| Aspects socio-économiques : intérêt socio-économique et mesures d'accompagnement possibles d'une filière de recyclage du béton en liaison avec les différents marchés et la gestion locale de la ressource en granulats | 240 | 90 |
| Aspects environnementaux et sanitaires : - eau de lavage des granulats recyclés et lixiviation/percolation des bétons recyclés - FDES et ACV comparées béton neuf/béton recyclé | 250 | 90 |
| TOTAL (3) | 490 | 180 |
| THEME 4 - ASPECTS REGLEMENTAIRES ET NORMATIFS | | |
| Sujet transversal | 150 | 50 |
| TOTAL (4) | 150 | 50 |
| THEME 5 - VALORISATION | | |
| Création d'un site internet | 20 | 8 |
| Rédaction d'une synthèse des résultats | 70 | 30 |
| Edition d'un guide français/anglais et diffusion | 70 | 35 |
| Présentation publique des résultats, conférences, participations à des congrès internationaux, actions de formation | 90 | 37 |
| TOTAL (5) | 250 | 110 |
| TOTAL HT (€) | 5020 | 1885 |
| Frais de gestion administratifs et financiers (5%) | 251 | 251 |
| TOTAL HT (€) | 5271 | 2136 |

5 – Comité de Pilotage et Partenaires potentiels

Comité de Pilotage

Les travaux sont conduits par un Comité de Pilotage constitué par un représentant de chaque secteur :

| | |
|---------------------|--------------------------------|
| Horacio COLINA | ATILH |
| François De LARRARD | IFSTTAR |
| Sophie DECREUSE | UNPG |
| François DUVAL | Syndicat des Recycleurs du BTP |
| Eric GARCIA-DIAZ | Ecole de Mines d'Alès |
| Philippe GOTTELAND | FNTF |
| Lofti HASNI | GINGER CEBTP |
| Mathieu HIBLOT | SNED |
| Jean-Marc POTIER | SNBPE |
| Patrick ROUGEAU | CERIB |
| Alain TRUDEL | SYNAD |
| Didier VALEM | FFB |

PN RECYBETON - ETUDE DE FAISABILITE

5 – Comité de Pilotage et Partenaires potentiels

Partenaires potentiels (liste provisoire)

MAITRES D'OUVRAGE

ANDRA

ADP

CEA

SETRA

ENTREPRISES ET SYNDICATS D'ENTREPRISES

CEMENTYS

QUILLE

EIFFAGE

EFG – BTP

FFB

FNTP

SYNDICAT DES RECYCLEURS DU BTP

SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRISES DE DEMOLITION

SYNDICAT NATIONAL DES ADJUVANTS POUR BETONS ET MORTIERS

SYNDICAT NATIONAL DU BETON PRET A L'EMPLOI

SYNDICAT PROFESSIONNEL DES ENTREPRENEURS DES CHAUSSEES EN BETON ET D'EQUIPEMENTS ANNEXES

UNION DE LA MACONNERIE ET DU GROS OEUVRE

UNION NATIONALE DES ENTREPRENEURS DE SOLS INDUSTRIELS

UNION NATIONALE DES PRODUCTEURS DE GRANULATS

VINCI – CONSTRUCTION

PN RECYBETON - ETUDE DE FAISABILITE

5 – Comité de Pilotage et Partenaires potentiels

INDUSTRIELS

CEMEX
CIMENTS CALCIA
HOLCIM
LAFARGE CIMENTS
UNIBETON
VICAT

CENTRES DE RECHERCHE – LABORATOIRES PUBLICS OU SEMI-PUBLICS

BRGM
CERIB
CETE IdF
CETU
CSTB
IFSTTAR

CENTRES DE RECHERCHE – LABORATOIRES PRIVES

ATILH
CEBTP – GINGER GROUPE
CTG – ITALCEMENTI GROUP
LERM

PN RECYBETON - ETUDE DE FAISABILITE

5 – Comité de Pilotage et Partenaires potentiels

ECOLEES D'INGENIEUR ET UNIVERSITES

ECOLE POLYTECHNIQUE D'ORLEANS

ECOLE CENTRALE DE LILLE

ECOLE CENTRALE DE NANTES

ECOLE DE MINES D'ALES

ECOLE DE MINES DE DOUAI

ENPC – INSTITUT NAVIER

ENS CACHAN

ESTP

INSA DE TOULOUSE

UNIVERSITE D'ARTOIS

UNIVERSITE DE BORDEAUX 1

UNIVERSITE DE CERGY PONTOISE

UNIVERSITE DE NANTES

UNIVERSITE DE LA ROCHELLE

UNIVERSITE DE LILLE 1

Soit un total de 50 partenaires potentiels

MERCI DE VOTRE ATTENTION