



PROJET DE R&D

-

**PN RECYBETON
(RECYclage complet des BETONS)**

2012 – 2016

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
1 POSITIONNEMENT DU PROJET	3
1.1 Objectifs principaux.....	3
1.2 Les enjeux de développement durable et le PN RECYBETON	3
1.3 Philosophie générale de la recherche	4
1.4 Organisation de la recherche	5
2 ETAT DE L'ART	6
2.1 Axe 1 – Aspects technologiques.....	6
2.2 Axe 2 – Aspects Matériaux	12
2.3 Axe 3 – Aspects Socio-économiques	21
2.4 Axe 4 – Aspects Environnementaux et sanitaires	22
2.5 Axe 5 – Aspects Réglementaires et normatifs.....	25
2.6 Références bibliographiques.....	30
3 VERROUS TECHNOLOGIQUES ET SCIENTIFIQUES A LEVER	31
3.1 Verrous technologiques	31
3.2 Verrous scientifiques.....	31
4 PROGRAMME DE RECHERCHE.....	32
4.1 Travaux d'accompagnement	32
4.2 Thème 1 : Technologies et procédés.....	32
4.3 Thème 2 : Matériaux et structure	33
4.4 Thème 3 : Développement durable.....	35
4.5 Thème 4 : Aspects réglementaires et normatifs	36
4.6 Thème 5 : Valorisation	36
5 ORGANISATION ET FONCTIONNEMENT	38
5.1 Organisation du projet	38
5.2 Fonctionnement opérationnel	39
6 BUDGET PREVISIONNEL	40
6.1 Budget prévisionnel.....	40
6.2 Plan prévisionnel de financement du P.N. sur les bases d'une réalisation en 4 ans	42
7 PARTENAIRES POTENTIELS.....	43
7.1 Partenaires ayant donné leur accord de principe	43
7.2 Partenaires potentiels	44
8 PLANNING PREVISIONNEL	45

1 POSITIONNEMENT DU PROJET

1.1 Objectifs principaux

En France on constate que, sur un total d'environ 300 millions de tonnes de déchets de chantier produits par an, seule une partie du béton qu'on y trouve est recyclée, principalement pour des travaux routiers.

Ce Projet National de Recherche et Développement vise principalement à changer cette tendance en accroissant la réutilisation de l'intégralité des matériaux issus des bétons déconstruits, y comprises les fines, comme constituants des nouveaux bétons.

Ce projet s'intéressera aussi au recyclage des matériaux issus de la déconstruction des bétons comme matière première dans la production de liants hydrauliques (pour produire le clinker ou comme constituant de nouveaux produits)

Difficilement envisageable économiquement hier, la réutilisation des matériaux issus de la déconstruction ouvre aujourd'hui de nouvelles perspectives. En effet, le coût environnemental augmente et justifie les recherches qui seront entreprises pour démontrer que la valorisation de ces matériaux réduit leur impact environnemental.

1.2 Les enjeux de développement durable et le PN RECYBETON

Le développement durable est devenu un véritable enjeu stratégique. Il touche de façon directe les matériaux de construction, que ce soit du point de vue des émissions de CO₂, de la consommation d'énergie, de la consommation des matières premières naturelles et de l'accès à leur ressource, ou de la génération de déchets (au moment de la construction et lors de la déconstruction). Cela crée de nouveaux enjeux, importants pour les professionnels de la construction, et en particulier pour les utilisateurs des ouvrages.

Il s'agit alors de répondre aux questions sur la façon d'aboutir à :

- des diminutions importantes d'émissions de GES,
- la réduction de la consommation énergétique,
- l'utilisation rationnelle des ressources naturelles dont l'accès devient de plus en plus difficile,
- la valorisation des matériaux de déconstruction pour limiter voire éliminer les mises en décharge.

Le recyclage complet du béton tentera d'apporter des réponses à toutes ces questions.

Tant au niveau national qu'international, des études allant dans cette direction ont déjà été menées (cf. 2. état de l'art et annexe). Le sujet était déjà présent à la fin du 20^{ème} siècle mais ce n'est que dans la première décennie de ce siècle que l'étude du recyclage du béton commence à prendre de l'importance, poussée par la prise de conscience des enjeux liés au développement durable.

Le contexte actuel est nettement marqué par les réflexions issues du Grenelle de l'Environnement. Il faut perfectionner les connaissances existantes pour adapter le secteur de la construction à l'approche développement durable et répondre à ce qui est devenu une demande sociétale.

Les matériaux de déconstruction, aujourd'hui essentiellement valorisés en remblai, représentent des volumes très importants. Par ailleurs, l'évolution des contraintes environnementales et administratives actuelles rend délicate et de plus en plus difficile l'ouverture de nouvelles carrières.

Or, à sa fin de vie, le patrimoine d'ouvrages et de structures de génie civil constitue un gisement potentiel important de granulats recyclés. Il faut aussi prendre en compte que, après déconstruction, le coût de la mise en décharge devient de plus en plus élevé.

Une enquête menée entre fin 2001 et mi 2002 par la FNTF avec l'ADEME et le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable a montré que l'activité des TP génère 280 millions de tonnes d'excédents (matériaux issus de la construction mais n'entrant pas dans la réalisation du chantier) et de déchets de chantier dont un tiers était éliminé et deux tiers valorisés. Parmi les déchets éliminés, la plus grande partie était stockée en site de classe 3 pour déchets inertes alors qu'une part non négligeable (29 Mt) était déposée dans des décharges brutes ne respectant pas la réglementation en vigueur [enquête citée en bibliographie et menée par M. Rubaud, J.F. Pasquet, F. Bourgeois, "Recyclage des matériaux de construction : les filières pour préserver l'environnement", Géosciences, n°1, BRGM, janvier 2006].

Une récente étude de l'ADEME, réalisée avec la FFB, estime que les déchets inertes provenant du bâtiment sont de l'ordre de 20 millions de tonnes. Ils sont composés de 56 % de produits inertes mélangés, de 17 % de produits à base de ciment, mortier et béton, de 19 % du béton armé et de 7 % des terres cuites et céramiques. Le 9 % de ces déchets proviennent de la construction neuve, 35 % des travaux de réhabilitation et 56 % des démolitions [<http://ww2.ademe.fr>].

Dans une approche de développement durable du recyclage et vu l'important volume de déchets mélangés, des moyens efficaces de séparation des composants des matériaux de démolition devront être implémentés. Ceci devrait être accompagné par la promotion de la déconstruction sélective des bâtiments et des structures de génie civil afin d'éviter les mélanges.

Enfin, on remarque l'importance des déchets provenant des produits à base de ciment, mortier et béton non armé. Ceux-ci, ajoutés à ceux correspondant au béton armé, constituent plus de 35 % du total des déchets inertes du bâtiment selon la dernière étude citée ci-dessus. Ceci montre la pertinence pour les professionnels de la construction de converger vers les objectifs énoncés par le PN RECYBETON.

1.3 Philosophie générale de la recherche

Afin de permettre une meilleure applicabilité des résultats du projet national sur le terrain, la recherche proposée s'appuiera à la fois sur des chantiers expérimentaux et des expérimentations en laboratoire sur la base de matériaux issus de sites de recyclage de béton.

Elle sera complétée par une étude socio-économique pour étudier l'intérêt et l'impact environnemental du développement de la filière.

En conséquence la recherche proposée comportera les éléments suivants :

- Elaboration et mise à disposition des différents laboratoires de stocks homogènes de gravillons, sables et fines issus du recyclage.
- Détermination des caractéristiques des matériaux recyclés.
- Elaboration de ciments incorporant des recyclés.
- Afin d'appréhender les impacts de l'introduction de recyclés dans le béton, mise au point d'une série de formulations de référence de bétons recyclés avec :
 - un liant élaboré avec des matériaux venant du recyclage et des granulats traditionnels,
 - un liant traditionnel et un mélange des granulats naturels et de granulats issus du recyclage en proportion variable,

- un liant élaboré avec des matériaux venant du recyclage et un mélange des granulats naturels et de granulats issus du recyclage en proportion variable.
- Etude de l'influence des caractéristiques des matériaux recyclés sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques des bétons.
- Etude des technologies et procédés de fabrication des granulats recyclés. En particulier : amélioration du tri en amont, possibilité de séparer les granulats de la fraction mortier, variabilité des caractéristiques des ressources disponibles.
- Etude des impacts socio-économiques du développement de la filière de recyclage des bétons et analyse de l'impact de celle-ci au niveau environnemental et sanitaire.
- Identification des leviers nécessaires pour le développement du recyclage.
- Valorisation des résultats de la recherche auprès des différents publics pendant et après le projet.

1.4 Organisation de la recherche

Pour aboutir aux objectifs principaux fixés par le projet, les différents aspects à aborder sont regroupés selon 3 thèmes principaux de recherche et développement :

- Technologies et procédés
- Matériaux et structures
- Développement durable

Pour aboutir à l'applicabilité des résultats de façon cohérente et efficace, un thème transversal traitera les aspects réglementaires et normatifs.

Un thème valorisation sera soigneusement traité dès le lancement jusqu'à la fin du projet et sera considéré comme un thème transversal.

En parallèle à la réalisation de ces 5 thèmes du projet, des travaux d'accompagnement permettront de garantir aux laboratoires de pouvoir disposer des stocks homogènes des matériaux à utiliser et des formulations de référence des bétons recyclés.

Dans l'organisation du PN détaillée au Chapitre 5, les responsables des 5 thèmes détaillés ci-dessus auront une participation active dans l'exécution des travaux et dans la prise de décisions pour le projet.

Pour la conduite des travaux d'accompagnement, une commission spéciale, du type Task-Group, sera constituée.

La description des recherches envisagées par thème est présentée au chapitre 4.

2 ETAT DE L'ART

2.1 Axe 1 – Aspects technologiques

2.1.1 Concassage et tri sélectif

Les méthodes de production des granulats recyclés doivent distinguer la phase de déconstruction et la phase d'élaboration. L'une et l'autre font appel à des procédés devant être adaptés d'une part à l'ouvrage « ressource » et d'autre part au matériau récupéré. Le choix de ces procédés conditionne les propriétés du matériau et les performances du produit fabriqué ultérieurement.

a. Déconstruction sélective et tri

De nombreuses études ont permis de démontrer la faisabilité technique et économique de la déconstruction sélective [RECYC-QUEBEC, 1999].

Les déchets inertes représentent théoriquement 94% des déchets de l'activité déconstruction mais en réalité, ce taux n'est que de 60% car certains déchets non inertes ne peuvent être séparés des autres : restes de plâtre sur les bétons, présence d'éléments de second œuvre comme le bois et les plastiques qui n'ont pu être retirés des murs [Laby, 2007]. Or à ce jour, si la valorisation du béton pur atteint un taux de 77,7%, le taux de recyclage des déchets inertes en mélange atteint tout juste les 12% [CGDD, 2010]. Cette situation devrait être améliorée car les plans de gestion des déchets du BTP recommandent de faire réaliser un diagnostic déchets de l'ouvrage à démolir. [METL, 2004 ; DRE Haute Normandie, 2005]. De plus la Directive européenne 2008/98/CE impose d'atteindre l'objectif de 70% en poids pour le réemploi des déchets non dangereux de construction et de démolition (...) d'ici 2020. C'est aussi par la conception des nouveaux ouvrages en prenant en compte leur future déconstruction et par le tri que l'on pourra améliorer le taux de recyclage [PDR, 2000 ; Bradley G., 2004].

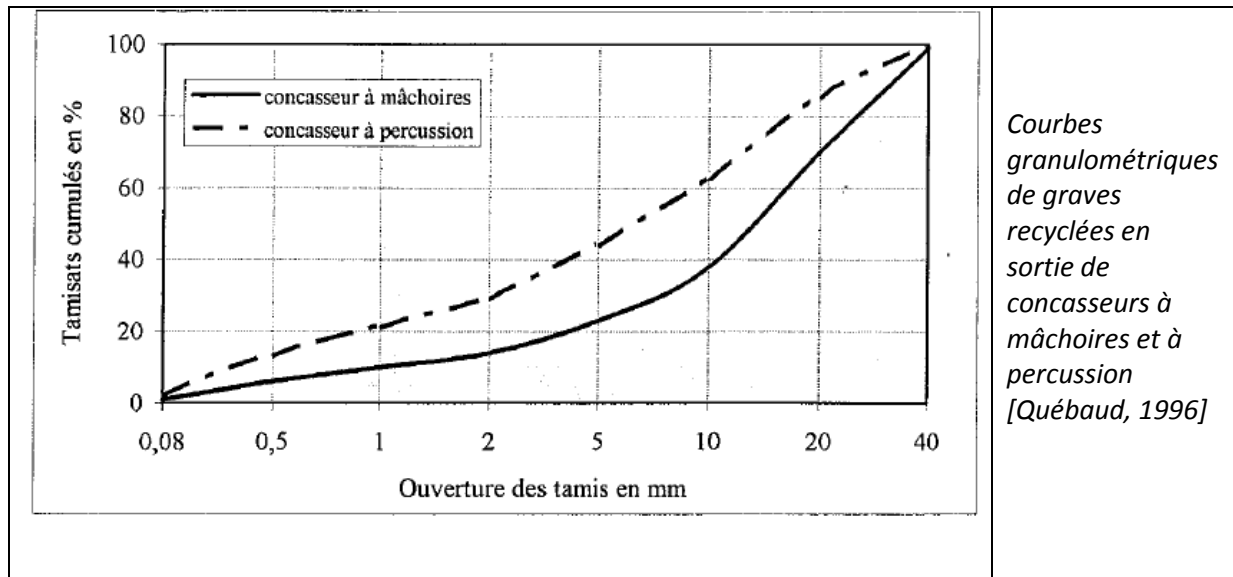
Bien que réel, le surcoût induit par la déconstruction sélective (accroissement de la durée de la déconstruction, multiplication des opérations et augmentation de la main-d'œuvre), n'est plus, dans beaucoup de cas, un obstacle car aujourd'hui toute déconstruction doit être précédée d'un audit avec inventaire 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 [Laby, 2007]¹.

b. Elaboration des granulats recyclés

L'élaboration des granulats recyclés est réalisée dans des installations fixes ou mobiles qui comprennent les mêmes grandes phases d'élaboration que les installations pour les granulats naturels (concassage, criblage et éventuellement lavage). Un prétraitement spécifique doit cependant être exécuté. Il consiste à réaliser le cisailage des ferrailles et la réduction des plus gros éléments.

Le concasseur à percussion présente une meilleure réduction de la granulométrie (avec moins d'éléments fins) et facilite la séparation des armatures du béton mais l'usure du matériel est importante et la granulométrie d'entrée limitée [Molin et al., 2004]. Il permet également d'obtenir une meilleure cubicité du matériau sortant [Québaud, 1996].

¹ Le prochain décret sur l'audit portant sur les déchets issus de la démolition de bâtiment, issu de l'engagement 256 du Grenelle, rendra obligatoire la réalisation d'un audit visant à fournir la nature, la quantité et la localisation des matériaux constitutifs des bâtiments et des déchets résiduels non constitutifs des bâtiments, pour les bâtiments d'une surface hors d'œuvre brute supérieure à 1000 m² et les bâtiments ayant accueilli une activité agricole, industrielle ou commerciale et ayant été le siège d'une utilisation, d'un stockage, d'une fabrication ou d'une distribution d'une ou plusieurs substances dangereuses.



c. Élimination des polluants

En ce qui concerne les appareillages spécifiques à l'amélioration des granulats recyclés, on trouve tous les appareillages ou méthodes permettant d'éliminer les impuretés. Ces impuretés sont principalement du métal (élimination manuelle ou par séparateur magnétique), du bois (élimination par flottation), du plâtre (tri manuel), du carton ou papier, du plastique (élimination par jet d'air). L'élimination des contaminants légers peut se faire par flottation du type « Aquamator », [Québaud, 1996].

<p><i>Élimination des matériaux légers par jet d'air</i></p>	<p><i>Déferrailage magnétique par « overband »</i></p>	<p><i>Principe de fonctionnement d'un « Aquamator »</i></p>

En Grande-Bretagne, un site Internet spécifique aux granulats durables a été développé entre 2003 et 2005 dans le cadre du programme Aggregain :

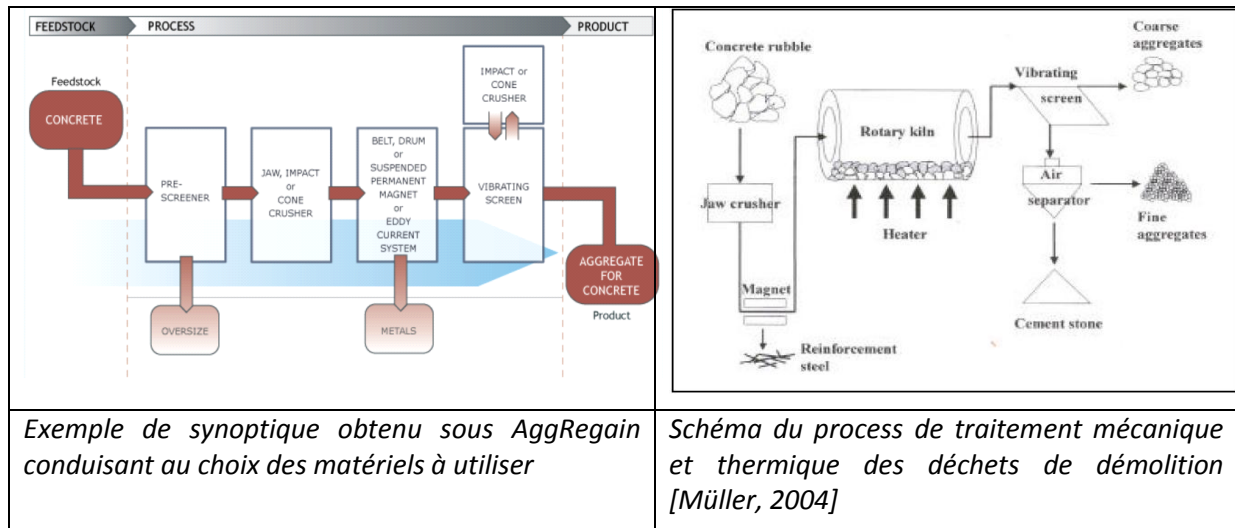
[\(http://aggregain.wrap.org.uk/recycling_infrastructure/\)](http://aggregain.wrap.org.uk/recycling_infrastructure/).

Pour l'élaboration des granulats recyclés, il décrit, en fonction des entrants et de l'usage souhaité pour les granulats recyclés, les matériels nécessaires pour les élaborer.

La plus grande difficulté actuelle concerne la séparation des grains de leur gangue de mortier. Des méthodes plus innovantes sont en cours de développement dans différents pays. En Allemagne, une

méthode a été développée pour séparer le mortier des granulats à l'aide d'impulsions sonores générées par des décharges électriques en milieu aqueux [Müller et al. 2, 2004]. Une méthode thermique est également testée [Müller et al. 2, 2004]. Des travaux similaires, menés par [Larbi, 2000], ont porté sur le traitement thermique de granulats siliceux. Ils montrent qu'un traitement à une température supérieure à 600°C permet d'abaisser la teneur en pâte de ciment de 55% à 5%. [Wan et al., 2007] propose des lavages, applicables à des granulats de type siliceux dans des milieux acides dilués : HCl, H₂SO₄ et H₃PO₄. Enfin, il est proposé également de s'affranchir des « désordres » dus à la présence du mortier (absorption) en réalisant une imprégnation du granulat recyclé par un polymère (alcool de polyvinyle) pendant 24 heures [Shi-Cong et al., 2010].

Il faut toutefois souligner que ces méthodes n'ont pas été appliquées à l'échelle industrielle.



2.1.2 Fabrication des ciments incorporant des fines de bétons recyclés

a. Introduction

Dans l'industrie du ciment, de nombreuses études ont conduit à l'utilisation effective de déchets industriels en vue de réduire la consommation de combustible fossile, le besoin en énergie et l'émission de dioxyde de carbone [Teller et al., 2000 ; Cimbéton, 2003 ; CSI, 2005 ; Schreiber et al., 2007 ; CSI, 2009 ; SFIC, 2010]. L'utilisation de ces produits concerne également la réduction de consommation des matières premières normalement utilisées pour la production du clinker : calcaire et argile [Cimbéton, 2005 ; Fridrichova et al., 2006 ; Chen et al., 2009].

En ce qui concerne l'emploi de fines dans le ciment lui-même, on doit distinguer entre ce qui peut être considéré comme l'utilisation de sous-produits devenus "courants" (cendres volantes, laitier granulé de haut fourneau, fumées de silice [CSI, 2005, Liu et al., 2008, Chen et al., 2009]) de celle des sous-produits dont l'utilisation est encore à l'état expérimentale comme les fines issues de la déconstruction (à partir de mélanges inertes [Bianchini et al., 2005, Galbenis et al., 2006], de matériaux céramiques [Puertas et al., 2010], du concassage du béton [Urcelay, 1997, Fridrichova et al., 2006]) ou celles issues des processus de fabrication des bétons (rejets de la fabrication des bétons [Yoda et al., 1992, Janssen et al., 2007]). On observe également des recherches sur l'utilisation d'autres matières premières alternatives, comme les fines issues du recyclage du verre, les boues de stations d'épuration séchées, les déchets de la fabrication du sucre, les sables de fonderie, les cendres d'incinération des déchets urbains, etc. [Krammart et al., 2003 ; Bhatti et al., 2004 ; Tsakiridis et al., 2004 ; Pavoine et al., 2011].

Pour l'obtention des fines issues de la déconstruction capables d'être utilisées dans la fabrication des ciments, outre les procédés classiques [Fridrichova et al., 2006], un nombre important de méthodes

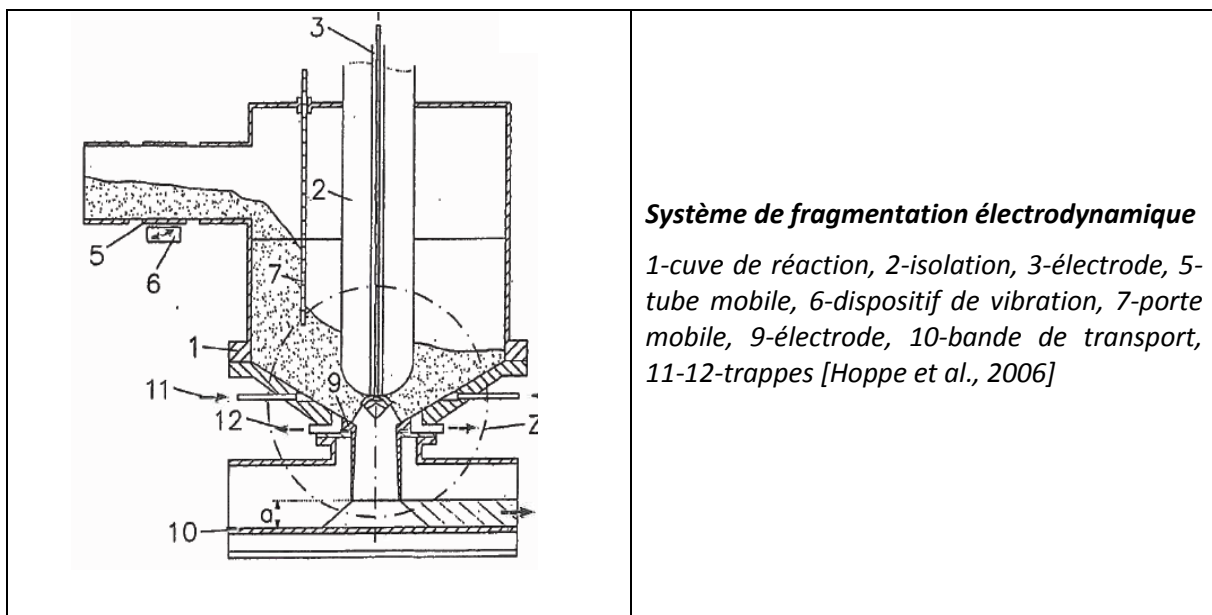
et appareils innovants ont été développés [Entzmann, 1981 ; Hoppe et al., 2002 ; Hoppe et al., 2006 ; Xiaolin, 2007 ; Chang et al., 2007 ; COFRAGE, 2009 ; Cummings et al., 2010].

b. Techniques de séparation des fines de granulats recyclés susceptibles d'être utilisées dans la fabrication des ciments

Comme il est dit au chapitre précédent (Élaboration des granulats de recyclage), il est nécessaire de mettre en œuvre des matériels spécifiques pour traiter les produits de déconstruction. Dans cette partie, nous considérons plus particulièrement les techniques de séparation qui conduisent à l'obtention de fines susceptibles d'être utilisées dans la fabrication des ciments. Les premières études ont débuté avec la mise en route dans les années 90, de programmes européens sur le recyclage de déchets de construction [Maultzsch, 1997] et ont été poursuivies dans le cadre d'un projet de recherche du programme Brite-Euram [Urcelay, 1997].

Des méthodes et appareils innovants, souvent donnant lieu à des brevets, ont été développés pour répondre à ce besoin [Entzmann, 1981 ; Hoppe et al., 2002 ; Fridrichova et al., 2006 ; Hoppe et al., 2006 ; COFRAGE, 2009 ; Xiaolin, 2007 ; Chang et al., 2007 ; Cummings et al., 2010]. Ces méthodes et moyens font appel à l'un des procédés suivants : désintégrateurs mécaniques, décharges électriques haute tension, fragmentation électro-hydraulique, traitement thermique, etc.

L'examen de ces travaux permet de vérifier l'existence d'un important mouvement de recherche vers les moyens les mieux adaptés pour réaliser le tri sélectif qui permettrait d'utiliser les fines dans la fabrication des ciments. Il reste des verrous technologiques et économiques à lever, mais la tendance est à la faisabilité de la démarche.



c. Utilisation des fines de béton recyclé dans la fabrication des ciments

L'analyse du cycle de fabrication du ciment nous montre que l'introduction des fines de béton recyclé dans le processus de fabrication de ciments en usine peut être réalisée soit comme composant du cru, soit comme ajout pendant l'étape de broyage ou après cette étape.

Utilisation en qualité de composant du cru dans la production du clinker

Dans une étude réalisée à Ferrara, Italie, [Bianchini et al., 2005] la partie fine de diamètre inférieur à 4 mm d'un matériau inerte de déconstruction a été analysée et un enrichissement en Al_2O_3 a été

constaté (probablement du fait des caractéristiques de l'habitat de la région), ce qui suggère que ces fractions peuvent être utilisées dans le cru du clinker, mélangées avec de la chaux.

En utilisant des techniques de laboratoire, Galbenis et Tsimas se sont intéressés à l'utilisation de granulats de béton recyclés (RCA) et granulats de maçonnerie recyclés (RMA), sélectionnés pour leur origine calcaire et siliceuse respectivement [Galbenis et al., 2006]. Cinq mélanges de poudres de matières premières pour le cru avec des proportions variées de RCA et de RMA ont été étudiés. Après un broyage à 90 μm et, un chauffage à des températures de 1350 °C, 1400 °C et 1450 °C pendant 1 h et tout de suite refroidis rapidement à l'air, il a été constaté, en comparaison avec le cru de référence, que leur réactivité en fonction de la chaux libre diminue avec les proportions de RCA et RMA. On note aussi une amélioration du bilan énergétique de la cuisson, sans que les propriétés du clinker en soient affectées négativement.

Une étude espagnole, réalisée aussi en laboratoire, utilisant exclusivement des déchets d'origine céramique pour réaliser le cru, a donné des résultats satisfaisants sur un ciment de type I fabriqué avec le clinker ainsi obtenu. Ce clinker avait des teneurs plus élevées en C_2S (belite) que dans les clinkers courants [Puertas et al., 2010].

L'étude la plus significative a été menée par une équipe tchèque de l'Université de Brno [Fridrichova et al., 2006]. La première partie de l'étude a consisté à analyser les caractéristiques minéralogiques, chimiques et granulométriques des échantillons de bétons concassés prélevés dans trois usines de traitement de déchets de construction. Constatant une différence importante de la teneur en CaO (inférieure) et de la teneur en SiO_2 (supérieure) à celle contenue dans les matières premières classiques du cru, il en a été tenu compte dans la préparation du cru pour fabriquer les types de clinker à étudier.

La seconde partie de l'étude traite de la préparation du cru avec l'incorporation des fines de béton recyclé en provenance d'une seule usine de traitement de déchets. Deux types de mélanges de matière première ont été réalisés : le premier pour produire un clinker Portland courant (alitique, 50 à 70 % de C_3S) et le second pour faire un clinker bélitique (à haute teneur en C_2S). Des systèmes à deux ou trois composants (ajout de calcaire et/ou correcteur de fer) ont été aussi testés.

Les meilleurs résultats dans les deux types de systèmes de mélanges correspondent à ceux à trois composants (le matériau issu du recyclage, du calcaire dosé pour corriger la plus forte teneur en SiO_2 , et un correcteur de fer) correspondant à un clinker alitique. Les propriétés mesurées sont voisines de celles du clinker Portland courant et le ciment préparé avec ce clinker a toutes les caractéristiques d'un CEM I 42,5 R.

Par contre, le clinker bélitique présente une très basse vitesse de réaction dans toutes les conditions de préparation et la résistance à la compression à 28 jours du ciment fabriqué avec ce clinker ne dépasse pas les 8 MPa.

Utilisation en qualité d'ajout au clinker

Dans la littérature, on trouve quelques références sur l'utilisation de fines issues du recyclage de béton comme ajout au ciment avant de formuler un nouveau béton [Yoda et al., 1992 ; Mindess et al., 2003 ; Janssen et al., 2007] mais nous n'avons pas trouvé de travaux se rapportant à l'ajout de ce type de fines directement à la sortie du four lors de l'étape de broyage, ce qui laisse ouverte les possibilités de recherche sur ce sujet.

d. Autres procédés de fabrication des ciments à partir d'éléments de béton recyclé

D'autres façons d'obtenir des ciments en utilisant des produits recyclés provenant du béton ou liées au béton sont trouvées dans la littérature. Les fines obtenues par séchage d'un mélange de déchets de boue de ciment provenant des usines de BPE ont été utilisées pour fabriquer un type de ciment [Yoda et al., 1992]. Il a été constaté une chaleur d'hydratation plus faible et un taux de carbonatation plus important. D'autres chercheurs ont aussi fabriqué à la même époque un nouveau béton utilisant

comme ciment des fines obtenues par broyage d'un béton réalisé en laboratoire, et en y incorporant des cendres volantes [Hansen, 1992]. La résistance en compression atteinte est très faible.

Costes et col. ont testé la "reclinkérisation" de fines obtenues par broyage d'un béton réalisé en laboratoire [Costes et al., 1998, 2007]. Ils ont obtenu des propriétés hydrauliques intéressantes et des résistances à la compression importantes.

L'influence de l'ajout de fines issues du lavage des camions de transport du béton (WOF) a été considérée par Janssen et col. [Janssen et al., 2007]. L'utilisation des WOF avec 5 % de substitution du ciment (3 %) et du laitier (2 %) peut engendrer une légère augmentation de résistance à la compression.

La réhydratation des fines issues des granulats de béton recyclé (FRCA) a été également étudiée [Shui et al., 2008]. Les résultats montrent une bonne réactivité des fines prétraitées thermiquement après addition de cendres volantes et son utilisation pour la confection des mortiers courants est conseillée.

2.1.3 Fabrication du béton incorporant des recyclés

a. Point sur l'utilisation de ces matériaux

L'utilisation des granulats provenant du recyclage du béton de démolition dans de nouveaux bétons n'est pas récente. Le premier état de l'art sur le sujet a en effet été publié par la RILEM en 1978 [Nixon, 1978].

En France, dans les années 1980, lors de la reconstruction de la voie lente de l'autoroute A 6, dans le département de l'Essonne, les anciennes dalles béton étaient concassées et les gravillons utilisés pour la réalisation de la couche de fondation en béton maigre [Charonnat et al., 1990].

Depuis cette date, peu de réalisations de grande ampleur sont à signaler dans notre pays.

b. Caractéristiques des bétons élaborés avec de tels granulats

Selon [Quebaud, 1996], la comparaison des performances par rapport à un béton de même composition formulé avec des granulats naturels donne les indications suivantes :

- Résistances à la compression et à la traction inférieures d'environ 10 à 30 %
- Densité plus faible
- Module d'élasticité inférieur de 15 à 40 %
- Moins bonne adhérence pâte / granulat
- Retraits plus élevés (50 à 100 %)

NOTA : La majorité des études existantes se limitent à l'utilisation de gravillons recyclés et déconseillent l'utilisation de sables recyclés dans les bétons.

Plusieurs études montrent que les propriétés d'un béton de granulats recyclés peuvent être améliorées, en particulier pour ce qui concerne leur résistance à la pénétration des chlorures, en remplaçant une partie du clinker par des particules fines ayant des propriétés pouzzolaniques.

c. Utilisation dans la fabrication de produits préfabriqués [Dehaut 2011]

Un certain nombre d'études ont été effectuées concernant la fabrication d'éléments préfabriqués avec des granulats recyclés.

Pour la majorité d'entre elles, le taux de substitution par des granulats recyclés est inférieur à 10 %. Pour ces dosages, en fonction de la « qualité » du granulat recyclé, on peut observer une

augmentation des temps de malaxage, étroitement lié au coefficient d'absorption d'eau du matériau. Au delà de ces dosages, on peut constater une diminution des performances des bétons tant pour la maniabilité que pour la résistance mécanique.

L'utilisation de granulats recyclés dans les produits en béton, en particulier à démoulage immédiat, est possible. Le taux d'incorporation dépendra notamment du traitement préalable (déconstruction sélective, concassage, criblage) des matériaux à recycler, l'objectif étant de se rapprocher le plus possible d'un produit naturel, possédant les caractéristiques d'un granulats conforme aux normes en vigueur.

Ainsi, pour permettre l'emploi de granulats recyclés, il faut caractériser ces granulats par des essais courants afin d'en définir la « Fiche Technique Produit » et les conditions d'emploi dans les produits en béton. Il faut, bien entendu, par des essais préalables en production, définir le dosage maximal à employer permettant de ne pas perturber, ni la production, ni les performances des produits fabriqués.

d. Utilisation dans le BPE

La capacité d'absorption d'eau des graviers recyclés est élevée. Ils doivent normalement être utilisés à une teneur en eau supérieure à leur capacité d'absorption. Ils doivent être stockés de façon à permettre de garder ces conditions constantes. Les granulats recyclés sont plus sensibles aux conditions environnementales lors du stockage que les granulats naturels. Il faut systématiquement mesurer leur teneur en eau et l'ajuster avant leur utilisation. Le pré-mouillage est une bonne solution pour maintenir le niveau de saturation souhaitée [Hallshowh, 2003].

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

- les gravillons recyclés peuvent être utilisés sans grandes difficultés dans la fabrication de bétons à faible résistance (inférieure à 20 MPa) ;
- sans grande précaution, ils sont également utilisables dans les bétons de résistance pouvant atteindre 40 MPa, mais en faible pourcentage.

2.2 Axe 2 – Aspects Matériaux

2.2.1 Granulats et fines recyclés

Les caractéristiques des granulats recyclés de béton et en particulier de la fraction sableuse de ces granulats diffèrent parfois assez notablement de celles des granulats naturels. Une partie de ces caractéristiques est en fait héritée de la fraction mortier de ces granulats.

a. Caractéristiques des granulats recyclés et régularité de ces caractéristiques

Une étude réalisée au Brésil [Angulo et al., 2010] a permis de constater la forte dispersion de la distribution granulaire de granulats recyclés en provenance d'une installation de recyclage. Ceci semble être une situation courante pour ce type de granulats, qui devient alors peu admissible sans correction pour une utilisation dans le béton.

b. Les caractéristiques héritées du mortier

Les granulats recyclés de béton diffèrent principalement des granulats naturels en ce qu'ils sont composés de deux fractions de nature différente : le granulats naturel et le mortier de ciment qui y est accroché. Ce mortier de ciment est la cause de la baisse des caractéristiques des granulats recyclés : densité plus faible, absorption d'eau plus élevée, teneurs en sulfates et en alcalins plus élevées [Sánchez et al., 2004]. La teneur en mortier dépend du cycle de concassage du béton et est

directement liée à la taille du granulat [Sánchez et al., 2004]. Aussi, certaines études ont été réalisées pour caractériser ce mortier [Yagishita et al., 1993 ; Abbas et al., 2007, 2009 ; Vasquez, 2002].

Il a également été constaté que les caractéristiques du mortier dépendaient des performances du béton d'origine [Padmini et al., 2009].

c. Granulométrie, teneur en fines et forme des gravillons

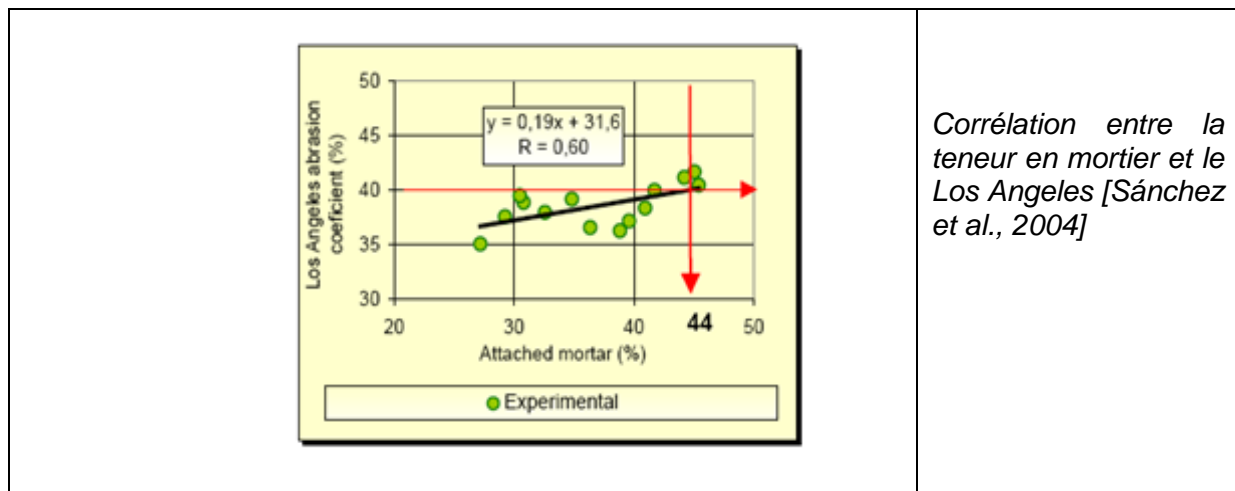
Ravindrarajah et son équipe montre déjà l'influence du choix du concasseur et des performances du béton ancien sur la régularité des courbes granulométriques [Ravindrarajah et al., 1985].

Weimann a montré que la défillerisation par voie humide permet quasiment de supprimer la contamination par des éléments indésirables (bois, métal, constituants autres que le béton,...). Ceux-ci restent inférieurs à 2%. Les sables obtenus ont également une teneur en matrice cimentaire plus faible que les sables élaborés à sec [Weimann et al., 2004].

Evangelista et de Brito ont montré que les granulats recyclés étaient plus anguleux et donc à l'origine d'une plus grande friction interne ce qui, en plus de l'absorption plus élevée, explique qu'à courbe et module de finesse égaux, la demande en eau du béton soit plus forte [Evangelista et al., 2010].

d. Caractéristiques mécaniques des granulats recyclés

La présence du mortier réduit la résistance aux chocs, à l'usure et au gel [Québaud, 1996 ; Ravindrarajah et al., 1985 ; Sanchez et al., 2004].



e. Caractéristiques chimiques des granulats recyclés

La présence de mortier dans les granulats recyclés modifie les caractéristiques chimiques des granulats recyclés par rapport à celles des granulats naturels.

Des équipes de chercheurs [Mahmoud, 2005 ; Sánchez et al., 2004] ont montré la différence de solubilité des chlorures dans l'eau et dans l'acide pour différentes teneurs en mortier.

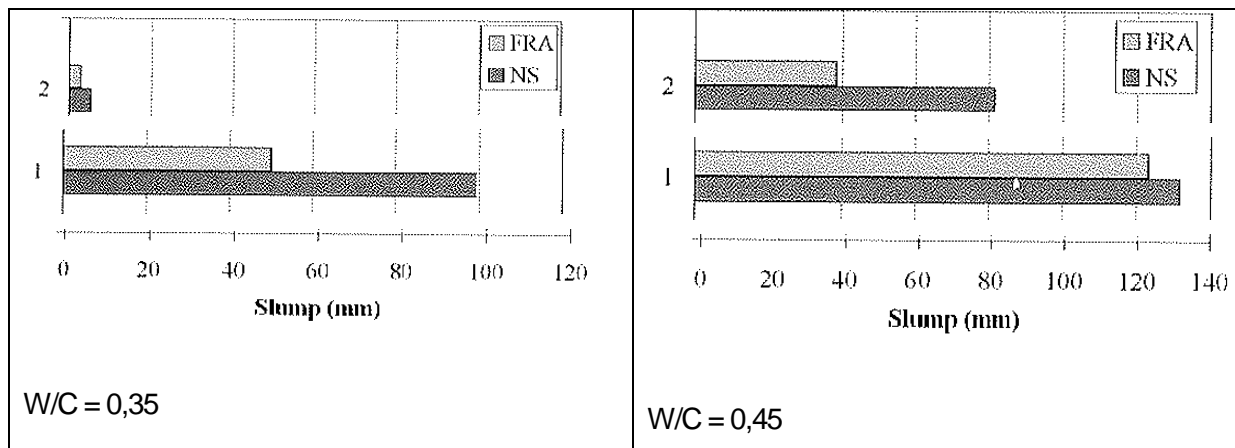
Sánchez de Juan et Alaejos Gutiérrez [Sánchez et al., 2004] ont établi une corrélation entre la teneur en sulfates et la quantité de mortier présent sur le granulat.

f. 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.

De nombreuses études ont confirmé ces résultats [Evangelista et al., 2004 ; Djerbi et al., 2010 ; Angulo et al., 2010 ; Sánchez et al., 2004 ; Mahmoud, 2005 ; Tam, 2005 ; DJE, 2011 ; Karthik, 2007 ; Katz, 2003 ; Kou et al., 2010]

Materials	Density (kg/m ³)	Packing density			Water Absorption (%)		<i>Physical properties of aggregates [Djerbi, 2011]</i>
		< 0.315	0.315-1.25	>1.25	24 h	72 h	
NS	2504	0.684	0.686	0.634	0.23	0.23	
FRA	2235	0.491	0.553	0.532	7.15	9.67	



Malgré la saturation de ce dernier pour une durée de 72 h, l’affaissement des mortiers à base de sable recyclé est inférieur à celui du sable naturel. Ceci peut être expliqué par l’effet de la compacité qui est plus faible pour le sable recyclé ainsi que la rugosité de la surface des grains de sable [Djerbi et al., 2010].

g. Autres caractéristiques

Les caractéristiques vis-à-vis de l’alcali-réaction de granulats recyclés ont été déterminées sur les granulats et sur la fraction mortier séparés selon les normes ASTM C1260 [Etxeberria, 2004]. Les produits sont qualifiés de potentiellement réactifs, ce qui correspond à la qualification par défaut adoptée au niveau français.

h. Caractéristiques chimiques des fines recyclées

L’utilisation de fines recyclées dans la formulation des bétons est souvent limitée. Les travaux de Shui et col. [Shui et al. 2008] montrent que la réactivité des fines recyclées peut être améliorée en utilisant un traitement thermique. La réhydratation des fines recyclées traitées est obtenue avec la formation des gels de C-S-H, d’ettringite et de chaux (Fig. 11). Cependant, les caractéristiques de la microstructure de ce produit réhydraté sont faibles par rapport à la pâte cimentaire.

2.2.2 Bétons recyclés à l’état frais et durcissant

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

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

- la masse volumique des granulats recyclés est plus faible que celle des granulats naturels, du fait de leur teneur en mortier ;
- la granularité des granulats peut faire apparaître des teneurs en fines importantes, en particulier lorsque le sable recyclé est utilisé ;
- les granulats recyclés étant obtenus par concassage, leur rugosité de surface est importante, et leur compacité relativement faible. Ceci est un autre facteur tendant à augmenter la demande en eau efficace ;
- cette demande en eau efficace peut être traitée soit par un volume de pâte plus élevé (se traduisant par un supplément d'eau de 5 à 15% d'après la littérature [Hansen, 1992]), soit par l'utilisation d'adjuvants plastifiants/superplastifiants utilisés en réducteur d'eau, soit enfin par une combinaison de ces deux stratégies ;
- la demande en eau totale du béton est encore accrue par l'absorption d'eau importante des granulats recyclés. Dans les 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. Pendant le durcissement, en cas d'auto-dessiccation, un mouvement inverse de l'eau (des granulats vers la matrice) peut intervenir ;
- quelle que soit la stratégie de formulation, 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, sans parler des liants anciens qui viennent encore augmenter la proportion de pâte de ciment durcie dans le mélange final ;
- enfin, le béton peut contenir en quantité notable certaines espèces génératrices de gonflement, et notamment les sulfates, résidus de plâtre adhérent à certains granulats recyclés – même si ces matériaux sont, en principe, écartés des stocks destinés à la réutilisation.

Les connaissances disponibles sur les relations entre la composition des bétons et leurs propriétés d'usage laissent ainsi augurer d'un certain nombre de tendances, qu'on énumère dans les paragraphes suivants. Ces tendances sont parfois confirmées par la littérature, alors que cette dernière est encore rare pour certaines propriétés.

b. Masse volumique à l'état frais

Elle est généralement plus faible que celle des bétons classiques, du fait de la quantité de mortier ancien jouant le rôle de granulat. Les valeurs reportées sont en général comprises entre 2000 et 2200 kg/m³ [Hansen et Narud, 1983, Gomez-Soberon, 2002, cités dans Topçu et al., 2004].

c. Teneur en air « naturelle » du béton frais

La forme et la rugosité des granulats peuvent impliquer une plus grande difficulté pour les bulles d'air à s'extraire du béton pendant la vibration. C'est ainsi qu'en moyenne, certains auteurs trouvent des teneurs en air occlus légèrement plus importantes dans les bétons de granulats recyclés, l'écart étant de l'ordre de 0,6 % [Hansen et Narud, 1983 cité dans Topçu et al., 2004].

d. Rhéologie du béton à l'état frais (valeur initiale et évolution)

Si l'on substitue des granulats naturels par des granulats recyclés, on constate une perte de maniabilité [Topçu et al., 2004]. Cependant, la formulation est généralement mise au point avec un objectif de consistance initiale (exprimée sous forme d'affaissement au cône). Tout l'éventail des valeurs d'affaissement est a priori envisageable avec des matériaux recyclés, avec des dosages en eau plus forts que pour les bétons ordinaires. Par contre, les possibles phénomènes d'absorption d'eau différée par les granulats (dont l'essentiel se produit dans les 15 premières minutes de la vie

du béton) et l'utilisation d'adjuvants, en présence d'impuretés diverses modifiant la chimie de l'hydratation précoce, augmentent le risque de perte rapide de maniabilité [Ravindrarah et al., 1987]. Certains auteurs préconisent d'ailleurs de pré-saturer par immersion dans l'eau les granulats recyclés avant utilisation en béton prêt-à-l'emploi [Kashino et Takahashi, 1988, cités par Hansen, 1992]. Enfin, dans les cas où l'on utilise des superplastifiants, il faut s'attendre à des valeurs de viscosité plastique plus élevées que dans les bétons ordinaires, sauf si les mélanges contiennent beaucoup de fines. Cependant, les références manquent en la matière.

e. Temps de prise

La réduction du rapport eau efficace/ciment, et la présence d'alcalins libérés par les granulats recyclés est un facteur de diminution du temps de prise [Ravindrarah et al., 1987], [Ivanyi et al., 1985, cités par Hansen, 1992], mais l'usage de superplastifiant agit dans le sens inverse.

f. Chaleur d'hydratation

L'augmentation des dosages en liants neufs tend à faire croître l'exothermie des bétons recyclés. La réduction du rapport eau efficace/ciment joue dans le sens inverse, mais 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.

g. Durcissement

Le granulat recyclé, surtout s'il est de qualité médiocre, exerce un effet plafond sur la résistance finale plus notable que dans le cas des granulats naturels. De ce fait, à même résistance à 28 jours, la résistance à des âges antérieurs est un peu plus élevée [Ravindrarah et Tam, 1985], comme on le constate classiquement avec les bétons de granulats légers. Les résistances au très jeune âge sont cependant influencées par le temps de prise, qui peut varier dans un sens ou dans l'autre, comme dit plus haut.

h. Retrait plastique

Ce phénomène est lié aux conditions atmosphériques, au ressuage et à la cure dont le matériau fait l'objet dès après sa mise en œuvre. La présence de fines en quantité importante et l'absorption différée d'eau par les granulats réduit le ressuage [Mukai et al., 1979, cité par Hansen, 1992], et augmente donc le risque de retrait plastique en cas de cure insuffisante.

i. Retrait endogène

Ce phénomène est lié à l'auto-dessiccation, qui apparaît préférentiellement dans les bétons à faible rapport eau/ciment. On a dit que le rapport eau efficace/ciment est plutôt plus bas pour les bétons de granulats recyclés. Cependant, les granulats contiennent une importante réserve d'eau, capable de suppléer à la raréfaction de l'eau présente dans les pores de la matrice. Le retrait endogène est donc réduit pour ces bétons [Cusson et al., 2006 ; Sato et al., 2007]. L'incorporation de granulats recyclés constituerait même une stratégie efficace pour réduire le retrait endogène des BHP [Kim, 2009].

2.2.3 Bétons recyclés à l'état durci – Performances mécaniques

a. Introduction

On s'intéresse dans cette partie tout particulièrement aux travaux réalisés pour évaluer les caractéristiques mécaniques et prédire le comportement des bétons recyclés. Souvent, il s'agit de remplacer une partie ou la totalité des gravillons naturels par des gravillons recyclés [Gomez-Soberon, 2002 ; Katz, 2003 ; Casuccio et al., 2008 ; Corinaldesi et al., 2009 ; Corinaldesi, 2010 ;

Domingo-Cabo et al., 2009 ; Chakradhara et al., 2011 ; González-F. et al., 2011]. Quelques travaux traitent, également, des bétons formulés avec du sable recyclé [Khatib, 2005 ; Evangelista et al., 2007]. Très peu d'études concernent des bétons formulés avec l'ensemble des granulats (sable+graviers) recyclés [Corinaldesi et al., 2009]. Une synthèse bibliographique des corrélations entre les différentes caractéristiques mécaniques a été publiée par Li [Li, 2008].

b. Résistance à la compression

Toutes les études montrent que la résistance à la compression des bétons fabriqués avec des granulats recyclés peut être de 5 à 40% plus faible que celle d'un béton formulé avec des granulats naturels.

De façon générale les études menées ont montré que la résistance à la compression dépend :

- du taux de substitution pour un rapport E/C constant. La diminution de la résistance à la compression est peu significative lorsque le taux de remplacement des graviers est inférieur ou égal à 25% et de sable inférieur à 30% [Chakradhara et al., 2011 ; Kou et al., 2009 ; Casuccio et al., 2008 ; González-F. et al., 2011 ; Evangelista et al., 2007]. Généralement, cette diminution est attribuée à une porosité plus importante dans les bétons de granulats recyclés [Gomez-Soberon, 2002] et une mauvaise interface granulats/liant [Xingand Zhou, 1998] ;
- des paramètres de formulation et plus particulièrement le rapport E/C [Kou et al., 2008 ; Corinaldesi et al., 2009 ; Corinaldesi, 2010 ; Belén, 2011]. Angulo [Angulo et al., 2010] montre qu'une porosité des granulats inférieure à 17% affecte peu les résistances à la compression, quel que soit le rapport E/C ;
- de la qualité du béton de démolition dont les granulats sont issus [Xiao et al., 2006 ; Casuccio et al., 2008]. Ainsi [Casuccio et al., 2008] montrent que le module d'élasticité est plus important si les granulats sont issus d'un béton de haute résistance à la compression ;
- de la nature des ajouts d'origine minérale [Gonzalez-F. et al., 2008 ; Corinaldesi et al., 2009 ; Achtemichuk et al., 2009 ; Corinaldesi, 2010] ;
- des conditions de cure [Chakradhara et al., 2011]. Il apparaît de façon claire que le béton à granulats recyclés conservé dans l'air après une cure humide partielle possède une résistance supérieure à celle d'un béton conservé en milieu humide ;
- de la nature du ciment [Crentsil, 2001] ;
- du malaxage [Tam et al., 2007] qui joue un rôle important au jeune âge. Le procédé TSMA (prémalaxage des granulats et eau incorporé en plusieurs étapes) conduisant à des résistances à la compression plus importantes.

Les courbes contrainte-déformation en compression ont fait l'objet d'analyse par certains auteurs [Li, 2008 et Belen, 2011]. L'allure générale n'est pas affectée par la substitution des gravillons naturels avec des recyclés. Cependant un déplacement des courbes est observé pour des taux de substitution élevés. Un modèle a été établi en se basant sur celui suggéré à l'Eurocode 2. Des écarts sont observés notamment pour des taux de substitutions importants.

c. Résistance à la traction et à la flexion et énergie de rupture

Les résultats issus des essais de traction uniaxiale, de fendage et de flexion ont montré que la résistance à la traction diminue également en augmentant le taux de substitution en granulats recyclés [Chakradhara et al., 2011 ; Kou et al., 2010 ; Yang et al., 2011 ; Evangelista et al., 2007]. Les

relations empiriques établies entre la résistance à la flexion et à la compression des bétons naturels selon les codes ACI, CEB ou chinois ne peuvent pas être appliquées aux bétons à granulats recyclés [Xiao et al., 2006].

Les essais de flexion conduits par [Casuccio et al., 2008] montrent que l'énergie de rupture des bétons à granulats recyclés est inférieure à celle des bétons à granulats naturels (27–45%). Les mécanismes de rupture semble dépendre de la nature du béton de démolition [Etxeberria et al., 2007 ; Casuccio et al., 2008 ; Li, 2008].

d. Résistance à la fatigue

Très peu de travaux traitent de la résistance à la fatigue des bétons recyclés. Il semble, d'après Kawamura et col. [Kawamura et al., 1992], que la résistance à la fatigue en flexion des bétons fabriqués avec du sable naturel et des graviers recyclés est supérieure à celle d'un béton normal, du fait de la liaison forte qui existe entre la matrice cimentaire (où se produit la rupture) et les granulats recyclés [Casuccio et al., 2008 ; Etxeberria et al., 2007].

e. Module élastique

Tous les auteurs ont signalé la faible rigidité des bétons à granulats recyclés [Xiao et al., 2006 ; Tam et al., 2007 ; Li, 2008 ; Casuccio et al., 2008 ; Chakradhara et al., 2011 ; Evangelista et al., 2007 ; Corinaldesi, 2010].

f. Fluage et Retrait de séchage

Du fait de la forte présence d'ancien mortier à la surface des granulats et de la forte porosité des granulats, les déformations de fluage et de retrait de séchage sont nettement supérieures à celles des bétons à granulats naturels [Achemichuk et al., 2009 ; Domingo-Cabo et al., 2009 ; Hasaba et al., 1981, Hansen et al., 1985, Domingo et al., 2010]. Tam et col. [Tam et al., 2007] ont, également, souligné l'importance du procédé d'élaboration sur les déformations de fluage.

Le modèle établi dans le cadre du CEB-FIB semble le mieux adapté pour la description des déformations différées des bétons, avec des taux de substitutions en granulats recyclés supérieurs à 20%.

g. Bétons à granulats recyclés armés

La présence de gravillons recyclés ne semble pas modifier le comportement d'une poutre en béton armé sollicitée en flexion sous charge statique et dynamique [Mukai et al., 1978]. Par contre, en présence de fines, le moment de flexion et le l'effort tranchant sont réduits de 15% dans le cas des bétons recyclés [Mukai et al., 1992].

La capacité portante des poteaux armés et fabriqués avec granulats recyclés est inférieure de 25% [Kazizaki et al., 1992].

Des travaux plus récents ont traité de l'adhérence entre les armatures lisses ou haute résistance et les bétons à granulats recyclés [Corinaldesi et al., 2009 et Corinaldesi, 2010].

2.2.4 Durabilité des bétons constitués de granulats issus de la déconstruction

a. Introduction

De nombreuses études ont été réalisées pour étudier le comportement en durabilité du béton contenant des granulats recyclés. En préliminaire, il faut signaler qu'il existe plusieurs façons de générer une formule de béton recyclé par rapport à une formule témoin, selon le choix du paramètre gardé constant ; ce choix influe bien entendu sur le résultat de la comparaison.

b. Propriétés de durabilité des bétons

Absorption d'eau des bétons

Les absorptions par immersion ou par capillarité sont nettement augmentées dans le cas des bétons de granulats recyclés. Ceci s'applique en particulier à l'absorption par capillarité, du fait d'une plus grande quantité de pores capillaires [Evangelista et al., 2010 ; De Brito et al., 2010 ; Comes, 2009].

Perméabilité

Selon [Rasheeduzzafar et al, 1984], lorsque le rapport E/C est supérieur à 0,55, la présence de granulats de recyclage ne modifie pas cette propriété. Par contre pour des faibles valeurs du rapport E/C, la perméabilité des bétons recyclés est supérieure à celles des bétons conventionnels.

Carbonatation

La carbonatation est particulièrement affectée par l'incorporation de granulats recyclés [De Brito et al., 2010]. La cinétique de carbonatation est plus rapide pour les bétons incorporant du sable issu de béton concassé [Evangelista et al., 2010]. Les travaux de Katz [Katz, 2003] confirment aussi l'évolution de la carbonatation.

Rasheeduzzafar et col. [Rasheeduzzafar et al, 1984] ont montré que le potentiel de corrosion dans les bétons fabriqués avec des granulats recyclés est légèrement supérieur à celui d'un béton conventionnel.

Migration des chlorures

Les études réalisées donnent des résultats contradictoires. Quelques auteurs [De Brito et al., 2010 ; Kou et al., 2010] montrent que le remplacement des gravillons naturels par les gravillons recyclés favorise la propagation des chlorures. L'imprégnation de ces granulats par une solution de polyvinyle alcool réduit cette diminution de résistance à la migration [Kou et al., 2010].

Abbas et col. [Abbas et al., 2009] trouvent quant à eux des coefficients de diffusion du même ordre de grandeur que ceux des bétons traditionnels.

Dans une étude relative aux bétons auto-plaçants composés de sable et de gravillons issus de béton concassé, l'accroissement de la quantité de sable recyclé améliore la résistance à la migration des chlorures. En revanche, d'autres auteurs [Evangelista et al., 2010] ont observé le résultat inverse.

Selon Otsuki et col. [Otsuki et al, 2003] le mode de malaxage (en deux étapes) peut améliorer le comportement du béton, ce que confirment de façon encore plus nette Kong et col. [Kong et al., 2010] en pratiquant un malaxage en trois étapes.

Résistance aux sulfates

Concernant la résistance aux sulfates, l'équipe de Nishibayashi [Nishibayashi et al., 1992] a montré que la résistance aux attaques sulfatiques d'un béton à base de granulats recyclés est similaire (ou légèrement inférieure) à celle d'un béton composé de granulats traditionnels.

Résistance aux cycles de gel-dégel

La majorité des études rapportent que la résistance au gel-dégel d'un béton recyclé est inférieure à celle des bétons conventionnels [Buck, 1977 ; Malhotra, 1978 ; Coquillat, 1982] et qu'elle dépend notamment du degré de saturation en eau du matériau [Zaharieva et al., 2004].

D'autres chercheurs [Richardson et al., 2011] montrent qu'en utilisant un agent entraîneur d'air, les bétons à base de granulats recyclés peuvent s'avérer aussi durables aux cycles de gel dans l'air, dégel dans l'eau, que les bétons composés de granulats naturels.

Résistance à l'abrasion

Selon les travaux de De Brito et Alves [De Brito et al., 2010], la résistance à l'abrasion tendrait à augmenter avec le taux de substitution en granulats recyclés ce qui résulterait d'une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice cimentaire.

Evolution de la microstructure à long terme

Kou et col. [Kou et al, 2011] ont étudié l'évolution à long terme des caractéristiques microstructurales et mécaniques de bétons à base de granulats recyclés. Entre 28 jours et 5 ans, la résistance mécanique de ces bétons augmente davantage que celle du béton traditionnel (+ 52 à 62% contre + 34%). Les auteurs expliquent ces résultats par une auréole de transition de meilleure qualité. Ils observent également une diminution de la porosité totale du béton ce qu'ils attribuent à la poursuite de l'hydratation du liant. La diminution de porosité la plus forte est observée pour le granulats recyclé possédant la porosité et l'absorption d'eau les plus élevées. Un autre point à considérer concerne le lien éventuel entre la perméabilité des bétons à base de granulats recyclés, a priori plus élevée, et les effets liés à la cure sur la microstructure.

2.2.5 Comportement des bétons recyclés sous très hautes températures.

- **Introduction**

L'étude bibliographique a révélé l'existence d'un nombre très limité de documents sur le comportement à très hautes températures des bétons composés avec des granulats recyclés. On peut toutefois considérer que l'augmentation de la porosité, l'absorption plus grande ainsi que la perméabilité, du fait de la présence des granulats recyclés, auront plutôt comme conséquence un moins bon comportement de ces bétons sous très haute température.

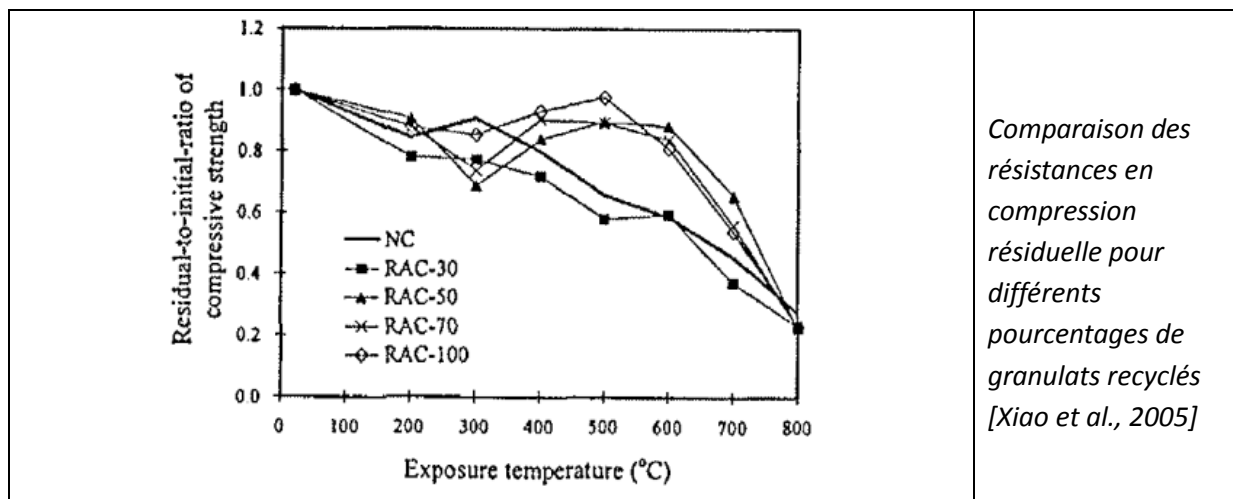
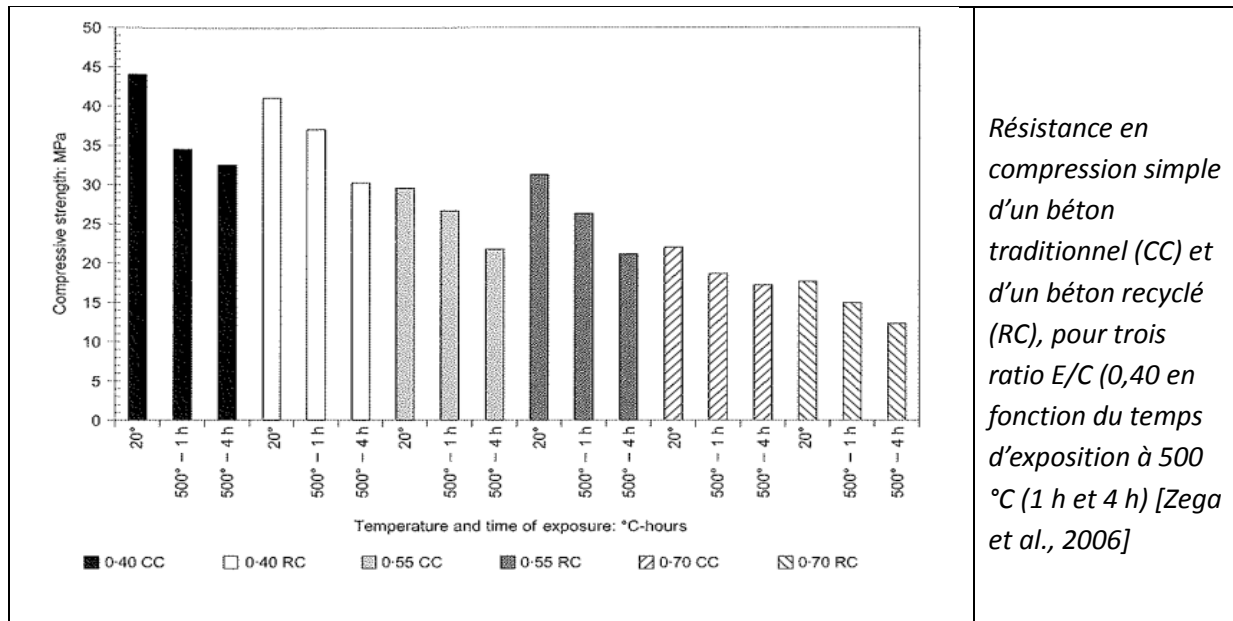
- **Comportement à chaud des bétons contenant des granulats recyclés**

Résistances mécaniques

Selon Zega [Zega et al., 2006] un béton à base de granulats recyclés se comporte mieux qu'un béton traditionnel ayant le même ratio E/C de 0,40 lorsqu'il est soumis à une température de 500 °C pendant une heure. La chute relative de résistance est deux fois plus faible pour le béton contenant 75 % de granulats recyclés. Ce résultat est confirmé dans l'étude menée par Xiao et col. [Xiao et al, 2007].

Ecaillage

Xiao et Zhang [Xiao et al, 2007] ont montré que les bétons recyclés, ayant une résistance mécanique à température ambiante inférieure à 50 MPa, contenant 30, 50, 70 ou 100 % de granulats recyclés n'avaient pas présenté d'écaillage jusqu'à 800 °C.



2.3 Axe 3 – Aspects Socio-économiques

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

Certaines données de l'analyse technico-économique menée par l'ADEME sur 39 plateformes de tri/valorisation [ADEME, 2010] font ressortir différents obstacles à leur acceptabilité:

- La pression foncière, d'autant plus importante que la plate-forme est située en zone urbaine
- Les oppositions au cours de l'enquête publique (craintes de la population et des associations)
- Les pressions environnementales liées au bruit et à la poussière.

L'étude comparative menée par la région Wallonie [Group One, 2001]) et comportant une étude de cas sur la France fait ressortir le fait que « les oppositions émanent principalement des associations de défense de l'environnement, la population paraissant très passive et désintéressée par rapport aux enjeux ». Cette étude fait également ressortir certains points comme la sensibilité de la population aux nuisances et risques liés au transport par camion ou aux infiltrations.

Cependant, un point très positif ressort de cette étude : les habitants reconnaissent la nécessité et l'utilité sociale des actions de retraitement, de recyclage (...) et de réduction du volume des déchets inertes.

b. Les impacts évités par l'utilisation de ces matériaux

Aucune donnée chiffrée n'existe sur ce sujet.

Dans le rapport de Bio Intelligence Service [BIOIS, 2010] sur les déchets réalisé pour le compte de la Commission Européenne, il est indiqué que les impacts de l'élaboration des granulats recyclés sont équivalents à ceux des granulats naturels. En particulier, les émissions de bruit et de poussières constituent l'un des problèmes les plus importants.

En ce qui concerne l'économie de gisement, ce même rapport indique que « le recyclage permet d'éviter l'utilisation des ressources et de l'espace correspondant aux carrières de granulats naturels » [BIOIS, 2010].

« Les impacts évités du transport et des processus des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels sont quasiment nuls. Dans certains cas, toutefois, la proximité des granulats recyclés par rapport aux lieux de consommation permet de réduire les coûts de transport. » Dans ce cas, on constate une « diminution de la consommation de carburant et d'émission de gaz à effet de serre » [BIOIS, 2010].

Le rapport conclut toutefois que « le bénéfice environnemental du recyclage du béton est probablement modéré ».

On estime que le prix de la tonne de granulat, l'énergie grise et les émissions de gaz à effet de serre associés doublent tous les 30 à 50 km [BRGM, 2010]. Cependant, l'évitement de la mise en décharge est aussi un aspect positif, qui ne doit pas être oublié.

Une étude danoise [Lauritzen, 2004] indique que la démolition et le recyclage doivent être analysés ensemble pour aboutir à un management stratégique. En effet, le recyclage vers le béton n'est pas toujours le plus raisonnable du point de vue environnemental et il faut tenir compte des paramètres locaux et régionaux pour optimiser ce recyclage.

c. Effets de l'activité de recyclage sur l'emploi

Les données obtenues auprès de l'UNICEM pour l'emploi donnent un chiffre moyen de 0,4 emploi pour 10 000 tonnes produites pour les roches meubles et pour l'ensemble des granulats (incluant le recyclage) de 0,39 emploi pour 10 000 tonnes.

Si l'on se réfère à l'étude de l'ADEME sur les 39 plates-formes de recyclage [ADEME, 2010], les plates-formes les plus susceptibles de produire des granulats recyclés pour le béton (plates-formes avec tri mécanisé de déchets inertes) donnent également un chiffre de 0,4 emploi pour 10 000 tonnes produites.

L'activité de recyclage, au vu de ces chiffres ne semble donc pas particulièrement créatrice d'emploi en remplacement des carrières.

2.4 Axe 4 – Aspects Environnementaux et sanitaires

a. Règlementation existante pour les installations classées pour la protection de l'environnement

Les plateformes de recyclage sont des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) qui sont 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 ».

Dans le cadre de ces rubriques, des prescriptions sont applicables aux plateformes en termes de poussières, de bruit et eau.

Concernant le bruit,

On distingue les bruits émis par l'ICPE, ceux émis par les matériels employés hors des bâtiments et enfin les bruits liés au trafic routier. Sur le fondement de l'article R512-8, du code de l'environnement, l'étude d'impact doit analyser les effets de l'installation sur la commodité du voisinage (bruits, vibrations, ...) et indiquer les performances attendues en ce qui concerne les conditions d'apport à l'installation des matières destinées à y être traitées et du transport des produits fabriqués.

Dans les zones à émergence réglementée (immeubles habités, zones constructibles) le tableau suivant s'applique [rubrique 2515, 1997 ; rubrique 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)

Ces prescriptions restent applicables dans le projet d'arrêté type pour la rubrique 2515 qui devrait paraître en 2011 [pr2515, 2010].

- **Concernant les poussières,**

Les rubriques 2515 et 2517 prévoient à ce jour que :

- Les stockages extérieurs doivent être protégés des vents en mettant en place des écrans, chaque fois que nécessaire, ou être stabilisés pour éviter les émissions et les envols de poussière. En cas d'impossibilité de les stabiliser, ils doivent être réalisés sous abri ou en silo,
- Les fillers (éléments fins inférieurs à 80 µm) doivent être confinés (sachets, récipients, silos, bâtiments fermés),
- Les voies de circulation et aires de stationnement des véhicules sont (...) convenablement nettoyées de manière à prévenir les envols de poussières,
- Les véhicules sortant de l'installation n'entraînent pas de dépôt de poussière ou de boue sur les voies de circulation.

Le projet d'arrêté 2515 renforce ces dispositions et prévoit de surveiller la qualité de l'air ou les retombées de poussières [pr2515, 2010] et de décrire le dispositif de mesure dans le dossier de demande d'enregistrement. De plus, une valeur limite d'émission de poussières canalisées est fixée à 40 mg/m³. Dans le cas des émissions diffuses, un réseau de plaquettes permettant la mesure des retombées de poussières dans l'environnement est mis en place en périphérie de l'installation mais aucune limite n'est fixée.

- **Concernant l'eau,**

Seule la rubrique 2515 fixe des prescriptions sur les rejets d'eau résiduaux en fonction du milieu dans lequel elles sont rejetées (milieu naturel, réseau d'assainissement collectif, ...). Les limitations portent sur le pH (entre 5,5 et 9,5), les matières en suspension (inférieures à 500 mg/l voire 100 mg/l, la température (< 30 °C) et les hydrocarbures totaux (< 10 mg/l). Les rejets en nappe sont interdits (2515, 1997).

Dans le projet d'arrêté 2515 [pr2515, 2010], les limitations restent valides pour la température mais le pH est limité à la zone 5,5-8,5 sauf en cas de neutralisation alcaline, ce qui est susceptible de poser problème aux installations de granulats recyclés. De plus, le seuil de MES pouvant être rejetées dans le milieu naturel devrait être limité à 35 mg/l.

b. Règlementations applicables aux installations de recyclage sur chantier

Les équipements utilisés sur les chantiers et produisant des tonnages significatifs (travaux sur site de Travaux Publics, de Démolition...) sont considérés comme des ICPE au titre de la rubrique 2515 en raison de leur puissance. Les prescriptions décrites au chapitre précédent s'appliquent donc aussi pour les installations de recyclage sur chantier.

Pour les installations sur chantier, les impacts sur les riverains doivent être pris en compte [DGUICH, 2007].

• Bruit

L'article R48-5 du Code de la Santé Publique traite des bruits de voisinage et prévoit que « sera punie (...) toute personne qui à l'occasion de chantiers (...) aura été à l'origine d'un bruit de nature à porter atteinte à la tranquillité du voisinage (...).

De plus des arrêtés municipaux exigent parfois le respect de niveaux sonores maxima en limite de parcelle mais plus fréquemment apportent des prescriptions sur les plages horaires [DGUICH, 2007].

• Poussières

L'article 99.7 du règlement sanitaire départemental concerne les abords des chantiers et stipule que « les entrepreneurs de travaux exécutés sur la voie publique ou dans les propriétés qui l'avoisinent doivent tenir la voie publique en état de propreté aux abords de leurs ateliers ou chantiers (..) » [DGUICH, 2007].

L'article 96 du règlement sanitaire départemental stipule que « (...) toutes les opérations d'entretien des habitations et autres immeubles ainsi que les travaux de plein air s'effectuent de manière à ne pas disperser de poussière dans l'air, ni porter atteinte à la santé ou causer une gêne pour le voisinage » [DGUICH, 2007] mais aucun seuil d'émission n'est associé.

c. Travaux du TC 351 sur les substances dangereuses

Le TC 351 traite pour l'ensemble des produits de construction de l'évaluation des émissions de substances dangereuses. Parmi les types d'émissions traitées par le TC 351 on trouve les émissions dans le sol et l'eau par les produits de construction et les émissions dans l'air ambiant. Ces aspects ne couvrent le produit qu'à partir de sa mise en œuvre et sont liés à des scénarios d'utilisation.

Les mesures des relargages pourraient être réalisées sur la base de différentes méthodes d'essais mises au point par le TC 351 et consistant en une lixiviation ou une percolation.

Pour les granulats recyclés des bétons, plusieurs paramètres peuvent être limitant dont principalement le pH et la fraction soluble.

En ce qui concerne l'utilisation de ces granulats dans le béton, comme nous ne disposons pas de bases de données montrant que les bétons de ce type ne relarguent pas de substances dangereuses (de nombreuses données existent pour les bétons réalisés à partir de granulats naturels), il sera nécessaire de réaliser des essais avant de pouvoir conclure.

d. Travaux du TC 350 sur la durabilité des travaux de construction

5 groupes de travail ont été constitués au sein du TC 350 :

- Performance environnementale des bâtiments,
- Description du cycle de vie des bâtiments,
- Produits,
- Performance économique des bâtiments,
- Evaluation de la performance sociale des bâtiments.

Dans le cadre de ces travaux, des déclarations environnementales devront être produites pour les différents produits de construction. Les travaux du CEN/TC 350 se limitent pour l'heure au bâtiment. En revanche, le recyclage pourrait être pris en compte dans les indicateurs de développement durable propres aux ouvrages de génie civil découlant des travaux internationaux de l'ISO/TC59/SC17.

Le recyclage du béton dans le béton serait un plus dans ces déclarations environnementales et ce d'autant plus que la notion d'utilisation durable des ressources naturelles sera intégrée comme exigence fondamentale pour le marquage CE des produits de construction dans le cadre du futur Règlement Produits de Construction.

e. Qualité environnementale des bâtiments et recyclage

Différents systèmes d'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments existent : Green Building, LEED, BREAM, HQE. L'utilisation de matériaux recyclés dans la conception du bâtiment est prise en compte dans ces systèmes d'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments de même que la gestion durable des déchets de démolition. Toutefois, on peut regretter que ces dispositifs ne soient pas plus incitatifs à l'utilisation de granulats de béton recyclé dans le béton. En effet, le recyclage est considéré de manière globale et les matériaux recyclés servent le plus souvent au terrassement. [CSI, 2009]

2.5 Axe 5 – Aspects Réglementaires et normatifs

a. Les normes granulats

Les normes européennes sur les granulats traitent des granulats recyclés dans les normes d'essais et dans les normes de spécifications. La plupart des normes d'essais sur granulats naturels s'appliquent également aux granulats recyclés, mais certaines normes d'essais ont été développées spécifiquement pour répondre aux problématiques particulières des granulats recyclés.

La classification des constituants des granulats recyclés [NF EN 933-11, 2009] permet de classer les constituants principaux (béton, granulats non liés, briques, ...) et les polluants (bois, verre, plastique, ...) en fonction de leur pourcentage en masse. Pour les éléments légers (flottants), ceux-ci sont mesurés en volume (cm^3/kg). Cette norme vient en remplacement de la classification pétrographique des granulats naturels [Gentilini, 2009].

La teneur en sulfates solubles dans l'eau [NF EN 1744-1, 2010] a été développée dans l'article 10.2 de la norme NF EN 1744-1 sur la base d'un essai français préexistant. Elle permet de déterminer la présence de plâtre dans les granulats recyclés.

La teneur en chlorures solubles dans l'acide [NF EN 1744-5, 2007] permet de prendre en compte les chlorures présents en surface du granulats recyclé et ceux présents dans la phase mortier du granulats recyclé.

Certains constituants des granulats recyclés sont susceptibles de modifier le temps de prise du béton (accélération ou retard) ; une norme d'essai a été mise au point [NF EN 1744-6, 2007] pour quantifier ces modifications.

En ce qui concerne les autres caractéristiques des granulats, la plupart des méthodes de mesure doivent être examinées pour vérifier s'il est nécessaire de les adapter aux granulats recyclés. C'est le cas pour la plupart des caractéristiques liées à la durabilité (gel/dégel, alcali-réaction, retrait au séchage,...) mais aussi d'autres essais plus classiques comme l'analyse granulométrique, le Los Angeles, l'absorption d'eau,... [Schouenborg, 2004].

Pour les granulats pour bétons, la norme de spécifications [NF EN 12620+A1, 2008] introduit des exigences sur les granulats recyclés en ajoutant des catégories pour certains essais (LA, MDE, ...) à celles existantes pour les granulats naturels et en faisant référence aux essais des 4 normes spécifiques aux granulats recyclés.

Pour les granulats pour mortier, la norme de spécifications [NF EN 13139, 2003] n'a pas été modifiée et n'offre donc pas la possibilité d'utiliser des granulats recyclés.

En ce qui concerne la norme française de codification des granulats [XP P 18-545, 2008], si elle incorpore déjà les granulats recyclés dans le champ d'application, seul l'essai supplémentaire de teneur en sulfates solubles dans l'eau est spécifié. Elle est actuellement en cours de révision [prNF P 18-545, 2010] pour introduire toutes les spécificités relatives aux granulats recyclés et devrait paraître dans le courant de l'année 2011. Pour les usages béton, les spécifications retenues dans la version soumise à l'enquête concerneront les teneurs suivantes :

- Rcu : teneur en béton, mortier, granulats non liés et matériaux routiers traités aux liants hydrauliques
- Rb : teneur en briques, tuiles, autres éléments de terre cuite et en béton cellulaire
- Ra : teneur en enrobés
- XRg : teneur en matériaux autres non flottants : plâtre, plastique, bois, métal, ... et en verre
- FL : teneur en éléments flottants (mesurée en volume)

ainsi que les sulfates solubles dans l'eau, les chlorures solubles dans l'acide (valeur à déclarer) et la modification du temps de prise (id.).

Autres caractéristiques : identiques aux granulats naturels

Les produits entrant dans la fabrication du béton sont soumis à l'actuelle directive produits de construction (89/106/CE), qui sera remplacé prochainement par une réglementation européenne. Ce nouveau texte introduit l'exigence d'utilisation durable des ressources naturelles au travers des produits constitutifs du béton (granulats, ciments, ...). Cette réglementation préconise en particulier la réutilisation ou la recyclabilité des ouvrages de construction, de leurs matériaux et de leurs parties après démolition ainsi que la durabilité des ouvrages de construction. L'ensemble des normes harmonisées de produits constitutifs du béton sera revu à l'aune de cette réglementation.

b. Les normes ciments

Les normes européennes traitant des ciments utilisables dans des bétons de structure sont au nombre de quatre. Il y a également lieu de mentionner la norme européenne des ciments à maçonner ainsi que la norme française traitant du ciment prompt naturel. Pour des raisons pratiques, il est proposé que le projet ne considère que la norme des ciments courants EN 197-1 qui couvre la quasi-totalité des ciments entrant dans les bétons de structure, ainsi que la norme des ciments à maçonner EN 413-1 qui pourrait constituer un débouché intéressant pour des excédents de fines ou des fines impropres à entrer dans un béton de structure.

La norme des ciments courants EN 197-1

L'EN 197-1 est en cours de révision (au stade du vote formel). La norme définit 27 ciments courants classés en cinq types principaux (CEM I à CEM V). La composition de ces ciments intègre dix constituants principaux, des constituants secondaires (dans la limite de 5 % pour tous les ciments) et éventuellement des additifs (1 % en masse dont 0,5 % d'additifs organiques, valeur ramenée à 0,2 % dans la version en cours d'adoption).

La définition des constituants secondaires est donnée en 5.3 : "ce sont des matériaux naturels ou des matériaux minéraux dérivés du processus de fabrication du clinker ou des constituants spécifiés en 5.2, sauf s'ils sont déjà inclus en tant que constituants principaux du ciment". La prise en compte des fines de déconstruction imposerait la révision de cette définition.

L'incorporation des fines de déconstruction du béton comme onzième constituant principal imposerait de définir ces fines à l'aide de paramètres pertinents tels que teneur maximale en sulfates et en chlorures, valeur maximale de perte au feu et de teneur en carbone organique total.

L'EN 197-1 est une norme européenne harmonisée. Toutes les exigences de la norme, y compris la composition, sont harmonisées, ce qui constitue une particularité à prendre en compte car il n'y a pas de place pour développer des compléments nationaux.

Une modification de l'EN 197-1 implique d'obtenir un consensus au niveau du CEN/TC 51 Ciment et chaux de construction. Pour obtenir un tel consensus, il y aura lieu de prouver le respect des performances.

La norme des ciments à maçonner EN 413-1

La norme des ciments à maçonner couvre des produits " Généralement utilisés en Europe pour le montage des briques et des blocs et pour les enduits intérieurs et extérieurs".

La composition des ciments à maçonner y est définie avec moins de précision que celle des ciments courants dans l'EN 197-1. L'article 4 spécifie que : "Le ciment à maçonner doit être constitué de clinker Portland, de matières inorganiques et, selon le cas, de matières organiques...".

La teneur minimale en clinker Portland est de 25 % pour les MC 5 (non produits en France) et de 40 % pour les MC 12,5 et MC 22,5.

Les fines de déconstruction peuvent donc d'ores et déjà être incorporées au ciment à maçonner sous réserve que les teneurs en sulfates et en chlorures permettent au ciment à maçonner de respecter les exigences de la norme, respectivement 3,0 % de SO₃ et 0,10 % de Cl⁻.

La norme EN 413-1 pourrait permettre une utilisation des fines de déconstruction du béton, mais en dehors de l'objectif de produire un nouveau béton.

c. Les normes béton

La norme de spécification du béton [NF EN 206-1, 2004 et ses amendements] n'inclut pas aujourd'hui de prescriptions relatives à l'emploi de granulats selon la codification définie par la norme XP P 18-545, codification elle-même établie sur la base de la norme spécifications des granulats [NF EN 12620+A1, 2008]. La révision de l'annexe nationale française, à paraître en 2012, fixera ces dispositions.

Par ailleurs, l'utilisation de granulats recyclés devrait être explicitement introduite dans l'annexe nationale française, en parallèle des travaux européens du CEN/TC 104/SC1/TG 19, les modalités restant à définir. Une piste envisagée aujourd'hui consiste à introduire une matrice codification du granulat recyclé / classe d'exposition du béton permettant de définir un seuil maximal d'incorporation.

La norme européenne fixant les règles communes pour les produits préfabriqués en béton [NF EN 13369 :2004+A1, 2004 et son amendement 2006] est actuellement en cours de révision. Ce projet prévoit les dispositions relatives à l'utilisation de granulats recyclés, mais dans un processus fermé.

d. Conception, dimensionnement des ouvrages

A l'instar du BAEL et du BPEL 99, les normes européennes de conception des ouvrages en béton (Eurocode 2) applicables depuis mars 2010 considèrent le seul emploi de granulats d'origine naturelle et ne prévoient pas l'emploi de granulats recyclés.

Les Eurocodes distinguent la nature minéralogique – calcaire ou siliceuse – des granulats employés dans le béton, ce paramètre intervenant dans les calculs de conception (par exemple sur la déformation élastique du béton – cf. §3.1.3 de l'EC2-1-1 – ou sur le comportement au feu).

Les décrets et arrêtés relatifs à la résistance au feu des produits, d'éléments de construction et d'ouvrages promulgués prochainement imposeront l'utilisation des Eurocodes. Par conséquent, l'usage des granulats recyclés serait réglementairement limité à des stocks différenciés selon la nature minéralogique des granulats issus de déconstructions maîtrisés ; dans ce cas, il convient d'assurer la traçabilité de la nature des granulats employés lors de la construction (non prévu par la norme NF EN 206-1) et de pouvoir caractériser un mélange de granulats concassés. A défaut, et en attendant une révision des Eurocodes intégrant le cas particulier des granulats recyclés, une alternative pourrait consister à retenir le coefficient le plus défavorable en matière de calcul pour les mélanges de granulats concassés de natures minéralogiques différentes.

f. Exécution des ouvrages en béton

La norme européenne d'exécution des ouvrages en béton [NF EN 13670 et son annexe nationale à paraître] ne fixe aucune disposition particulière relative aux granulats à employer puisque cela va figurer logiquement dans l'annexe nationale de la norme NF EN 206-1.

Complémentaires à la norme européenne NF EN 13670 en tant que dispositions nationales, le fascicule 65 et le DTU 21 sont actuellement en révision pour mise en cohérence.

Pour ce qui concerne les ouvrages relevant de marchés publics, le fascicule 65 du CCTG Travaux interdit l'emploi de granulats de béton concassés. Les granulats récupérés sont également réservés à des bétons de résistance en compression inférieure à C35/45, et en proportion inférieure ou égale à 5% de la quantité totale de granulats.

Le DTU 21 [NF P 18-201, 2004] pour l'exécution des ouvrages de bâtiment privés considère uniquement l'emploi de granulats courants référencés dans le BAEL et le BPEL (et bientôt dans l'Eurocode 2).

De manière générale, pour ce qui concerne l'ensemble des ouvrages soumis à l'obligation de garantie décennale, l'emploi de granulats recyclés ne peut être considéré comme pratique traditionnelle et conforme aux règles de l'art au sens du code des assurances (annexe 1 de l'article 243-1 du code des assurances) tant que cet emploi n'est pas prévu dans l'ensemble des textes normatifs sus-cités.

g. Analyse des normes dans les autres pays européens : normes nationales, guides d'application, réglementations.

Un bilan de la prise en compte des granulats recyclés pour une utilisation dans le béton dans les différents pays européens est actuellement en cours au sein du TC104/SC1/TG19 afin d'adapter la norme EN 206-1, dont les spécifications ne permettent pas l'utilisation de ces granulats malgré leur incorporation dans la norme NF EN 12620+A1.

Dans la plupart des pays européens, la substitution de granulats naturels par des granulats recyclés est possible jusqu'à 20%, et parfois plus (cf. tableau de synthèse ci-après).

Dans la majorité des cas, les granulats recyclés sont regroupés en catégories selon qu'ils contiennent une forte proportion de béton ou qu'ils sont mélangés (cf. tableau de synthèse pages suivantes). En général, l'incorporation de la fraction sableuse est limitée voire, dans certains cas, interdite.

On notera enfin que même si l'utilisation de granulats recyclés dans le béton est autorisée dans la pratique dans plusieurs pays européens elle n'est pas très développée (Suède, Norvège, ...)

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 %	C12/15 à C53/65	Toute classe	
	50 à 100 %		<=C20/25 >C20/25	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 %	C30/37		
			60 %	C20/25		
	Utilisation interne Béton de préfa de classe supérieure à C45/55	15 %	C45/55			
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	RCA = béton pur	20 % gravillon	RC20/25 à		Uniquement gravillon
	BS 8500-2	RA=mélange		RC40/50		

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

2.6 Références bibliographiques

Voir l'Annexe Références bibliographiques.

3 VERROUS TECHNOLOGIQUES ET SCIENTIFIQUES A LEVER

La recherche bibliographique approfondie réalisée pour établir l'état de l'art a permis de détecter les verrous qui devront être levés pour aboutir aux objectifs du projet. Le programme de recherche détaillé dans le chapitre suivant apportera les outils nécessaires pour les lever.

On peut les séparer en verrous technologiques et verrous scientifiques, selon qu'il soit nécessaire de faire appel à des moyens technologiques nouveaux ou à l'amélioration des moyens existants pour les résoudre, ou selon que les questions scientifiques qu'ils posent puissent être résolues à l'aide des moyens disponibles actuellement.

3.1 Verrous technologiques

Les principaux verrous technologiques détectés sont :

- Certains déchets non inertes ne peuvent pas être séparés complètement des bétons de déconstruction (ferraille, restes de plâtre, éléments de second œuvre comme le bois et le plastique). Des moyens existent mais il faut encore les perfectionner.
- Il est difficile de séparer de façon nette la partie fine de la partie grossière du béton concassé, ainsi que de séparer les grains de leur gangue de mortier. Des moyens innovants sont en train d'être développés.
- Il n'y a pas de retours d'expériences concernant l'ajout de fines issues du recyclage des bétons dans l'étape de broyage, après refroidissement du clinker. Ceci pourrait nécessiter des adaptations des broyeurs ou du système de broyage.
- La capacité d'absorption d'eau des granulats recyclés est élevée et ils sont plus sensibles aux conditions environnementales que les granulats naturels. Ceci crée des problèmes de stockage et lors du malaxage pour faire du béton. Des techniques et procédés pour aboutir à des conditions optimales d'utilisation de ces granulats se sont développés mais il reste encore des améliorations à réaliser.

3.2 Verrous scientifiques

Les principales questions scientifiques qui se présentent sont :

- Les caractéristiques minéralogiques, chimiques et granulométriques des granulats de béton concassé peuvent varier selon leur provenance. Pour leur utilisation pour faire du ciment ces caractéristiques doivent être parfaitement déterminées.
- Les propriétés physiques et mécaniques d'un béton élaboré avec des granulats recyclés sont moins bonnes que celles d'un béton de même composition formulé avec des granulats naturels. Les propriétés de ces bétons doivent être améliorées pour pouvoir élargir leur domaine d'application.
- Très peu d'études ont été réalisées sur des bétons formulés avec du sable recyclé et moins encore sur des formulations contenant l'ensemble de granulats recyclés. Pour généraliser l'utilisation des bétons recyclés, l'étude de ces types de formulations devrait être approfondie.
- L'acceptabilité des plateformes de tri/valorisation des déchets de construction est compromise par des craintes de la population et des associations de protection de l'environnement (bruit, poussière, rejets de l'eau utilisée). Des études poussées pour évaluer les impacts environnementaux, accompagnées de mesures concrètes, seront nécessaires pour faire comprendre l'aspect finalement favorable du recyclage pour le développement durable.

4 PROGRAMME DE RECHERCHE

Les résultats de l'état de l'art, qui ont permis de déterminer les besoins en recherche et les verrous à lever, et les apports effectués par les partenaires pendant les différentes réunions de travail ont permis de définir le programme de recherche ci-après.

4.1 Travaux d'accompagnement

Afin d'être en mesure de comparer les résultats des différents essais, il est indispensable que tous les laboratoires disposent pour réaliser leurs essais :

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

Ces travaux d'accompagnement constituent un préalable à toutes les autres recherches et en particulier les travaux conduisant à obtenir des granulats recyclés homogènes, bien triés et répondant aux critères de sélection minimaux pour une utilisation dans le béton.

La formulation de bétons recyclés aura lieu dans un second temps en étudiant les possibilités de formuler des bétons avec différents pourcentages de granulats recyclés, avec le sable et les gravillons ou seulement les gravillons, en substituant ou non une partie du ciment par un ciment incorporant du recyclé.

En fonction de la validation de ces formulations de bétons, on pourrait obtenir jusqu'à une vingtaine de formules qui pourront toutes ou pour partie être utilisées dans les différents thèmes de recherche.

4.2 Thème 1 : Technologies et procédés

L'effort portera sur le "tri sélectif" visant d'abord à séparer les différents déchets inertes générés par la déconstruction pour éviter leur mélange. Une fois le béton séparé des autres déchets, il faudra étudier les moyens de perfectionner la séparation de ses différents constituants pour extraire notamment les fines, dont la matrice cimentaire. Enfin, les procédés qui permettront d'utiliser ces constituants pour fabriquer des nouveaux bétons ou du ciment, voire des nouveaux matériaux hydrauliques, devront être optimisés.

4.2.1 T1.1 : Concassage et tri sélectif

La correcte réalisation de cette partie est fondamentale dans le processus qui conduira au recyclage complet des bétons. C'est pour cela que le programme prévoit :

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

4.2.2 T1.2 : Ciment incorporant des recyclés

Un des objectifs principaux du projet est l'utilisation des matériaux issus de la déconstruction des bétons pour produire du ciment. Cette partie sera alors consacrée à :

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

4.2.3 T1.3 : Bétons incorporant des recyclés

La fabrication des bétons incorporant des recyclés étant le point d'intérêt principal du projet, pour aboutir à une correcte réalisation de ces bétons, il est prévu :

- d'optimiser les séquences de malaxages des bétons incorporant des granulats recyclés (introduction différée, malaxage prolongé, éventuellement double malaxage et tout procédé susceptible d'optimiser le malaxage à des coûts compatibles avec les exigences économiques). Les conditions d'élaboration de ces bétons seront également étudiées (stockage des constituants, dosage, contrôle de la teneur en eau) ;
- de réaliser des chantiers expérimentaux : des expérimentations de coulage de béton sur site sont prévues. Celles-ci permettront de valider les préconisations d'optimisation des séquences de malaxage et conditions d'élaboration des bétons recyclés. Le choix de ces expérimentations sera fonction des critères à valider et des propositions de participants.

4.3 Thème 2 : Matériaux et structure

Il faut repenser l'utilisation des granulats résultants du tri des déchets. Les granulats recyclés ne représentent aujourd'hui qu'environ 5 % de la production française de granulats et ils sont principalement utilisés dans les remblais et usages routiers. Il est important d'élargir l'emploi de tous les granulats issus du concassage des bétons de déconstruction dans des bétons traditionnels, en particulier dans les bétons de structure, pour lesquels la partie fine résultante du concassage est peu ou pas du tout utilisée.

4.3.1 T2.1 : Granulats et fines recyclés

Une correcte caractérisation des granulats recyclés est nécessaire pour maîtriser des paramètres qui auront un rôle déterminant dans les propriétés des matériaux à réaliser avec ces granulats. Pour y aboutir, ce sous-thème comprendra :

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

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

Etape clé dans la vie des bétons, à l'origine des facteurs qui auront une influence dans leur durabilité, il faut connaître l'impact qu'auront les granulats recyclés sur le comportement des bétons à l'état frais et durcissant. A ce titre, il est prévu de réaliser des études :

- de la rhéologie du béton recyclé frais en fonction de l'état de présaturation des granulats recyclés ;
- des compatibilités ciments-superplastifiants-granulats recyclés ;
- du comportement au retrait plastique.

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

L'utilisation des bétons recyclés pour réaliser des éléments de structure nécessite une connaissance approfondie de leur comportement mécanique. Dans ce but, il est prévu des études sur :

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

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

Les nouveaux bétons réalisés avec des matériaux issus des bétons concassés seront mieux acceptés si leur durabilité est prévue. Ainsi, pour pouvoir estimer cette durabilité, il sera nécessaire d'étudier :

- l'hydratation et l'évolution de la microstructure des bétons à base de granulats issus de la démolition (cure interne, auréoles de transition, porosité, liaisons anciennes/nouvelles pâtes) ;
- les 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 probabiliste) ;
- le retrait de dessiccation des bétons recyclés ;
- la 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 indications de durabilité et étudier l'applicabilité des modes opératoires de mesures aux bétons recyclés pour fixer des seuils.

4.3.5 T2. 5 : Bétons recyclés – feu, thermique

Les bétons recyclés, du fait de leur nouveauté, n'ont pas encore été soumis à des phénomènes thermiques importants. Pourtant, il est important de connaître leur tenue au feu pour pouvoir les utiliser dans des structures. L'appréciation du comportement en température des bétons recyclés nécessitera de :

- la mesure des propriétés physiques des bétons recyclés en fonction de la température dont la conductivité thermique ;
- l'étude du comportement en compression-traction à différentes températures (de 20 à 1 050° C), des résistances résiduelles et de l'écaillage.

4.4 Thème 3 : Développement durable

4.4.1 T3.1 : Aspects socio-économiques

Il existe des obstacles d'ordre économique tels que les coûts liés aux traitements préalables des déchets et aux techniques de transformation en vue d'une utilisation en tant que nouveaux matériaux. Des recherches tendant à réduire ces coûts, en améliorant les méthodes et les procédés et en particulier en améliorant le tri en relation avec le thème 1, seront menées pour accompagner le développement d'une filière de recyclage du béton.

L'étude de l'impact d'un meilleur maillage du territoire en installations de traitement de matériaux de démolition afin d'améliorer le taux de collecte sera considérée. On visera à mettre en relation les besoins avec les ressources disponibles en matériaux naturels et recyclés à l'échelle d'un territoire, globalement ou localement

Au niveau sociétal, avec des actions de valorisation, les évolutions d'ordre psychologique et culturel induites par l'utilisation des bétons réalisés avec des matériaux recyclés seront accompagnées. Présentés de façon adéquate, ces bétons pourront être perçus comme écologiques et conformes à l'approche du développement durable, à l'instar d'autres produits recyclés (plastiques, papiers, cartons...) L'aspect gains pour le développement durable sera mis en exergue.

Les pratiques mises en place au niveau national et européen et leur impact sur la valorisation des matériaux de démolition seront analysées. Sur la base de l'expérience européenne, des politiques incitatives à la réutilisation des déchets de la construction et leurs impacts seront identifiés.

Le développement de ces bétons passe par une étude socio-économique, la détermination des mesures d'accompagnement étant nécessaire pour créer une véritable filière de recyclage des bétons en liaison des différents marchés possibles (routes, bâtiments, etc. ...) en fonction des contraintes locales et de la ressource en granulats naturels ou recyclés. Cette étude s'appuiera sur une analyse détaillée du maillage des centres de collecte de matériaux de démolition et des zones de consommation (en s'appuyant sur les premiers plans de gestion des déchets du BTP). Une étude plus précise pourra être réalisée sur quelques zones (régions Parisienne, Lyonnaise, Lilloise et Toulousaine) pour évaluer l'impact socio-économique du développement d'une telle filière.

Afin d'obtenir une bonne représentativité des données, cette étude devra être menée sur une période d'au moins 3 ans.

4.4.2 T3.2 : Aspects environnementaux et sanitaires

La réalisation des FDES et ACV, l'étude de l'eau de lavage des granulats recyclés et de la lixiviation/percolation des bétons recyclés complétera l'analyse de l'impact environnemental et sanitaire des nouveaux produits réalisés avec des granulats de bétons recyclés.

Cette partie du projet, de grande importance pour définir l'incidence des nouveaux bétons sur le développement durable, implique que l'on puisse :

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

4.5 Thème 4 : Aspects réglementaires et normatifs

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.

Ces freins existent plutôt par absence de guides de recommandations que par l'existence de dispositions restrictives. La normalisation (tant au niveau européen que français) est bien avancée en ce qui concerne l'utilisation des granulats recyclés en travaux routiers. La réglementation pénalise la mise en installations de stockage et tend à optimiser l'utilisation des matériaux issus du recyclage, mais le travail à accomplir demeure conséquent. Au-delà des normes existantes, il est nécessaire de disposer des recommandations encadrant l'utilisation des granulats recyclés selon la destination des bétons produits avec ces granulats. Ce guide de recommandations sera un des produits forts du projet.

Une communication fondée sur des résultats concrets et destinée, entre autres, aux experts de la normalisation est aussi prévue.

Globalement, ce thème traitera des incidences de la réglementation et les freins qu'elle peut impliquer à l'utilisation du béton recyclé, d'une part au niveau européen et d'autre part au niveau français, pour proposer des adaptations ou modifications des différentes réglementations.

4.6 Thème 5 : Valorisation

La valorisation se déroulera en plusieurs phases :

Phase 1 : au lancement du projet

- Création d'un site Internet et d'un site Intranet

Le site Internet sera dédié à la communication externe sur le projet et contiendra le programme du projet, son budget et la liste des partenaires du projet. Il sera ouvert à tout public et permettra de communiquer à chaque étape du projet sur son avancement.

Le site Intranet sera dédié à la communication entre les partenaires du projet et sera accessible à eux seuls. Il constituera un outil d'échange en temps réel sur les résultats des recherches et sur la gestion administrative et financière du projet.

- Réunion de lancement du projet

Une réunion publique sera organisée pour le lancement du projet. Tous les partenaires déclarés du projet y seront convoqués et tous les organismes et sociétés susceptibles d'être intéressés par le projet y seront invités.

Phase 2 : pendant le projet

Pendant la phase d'avancement du projet, des conférences seront organisées pour faire le point sur le déroulement des recherches et informer l'ensemble des professions partenaires des premiers résultats obtenus.

Le projet communiquera avec les professions partenaires par :

- Le site Internet
- Des articles scientifiques et techniques validés par un comité de lecture
- Des participations et contributions à des congrès et séminaires.

Formation :

Dès lors que les résultats obtenus seront applicables d'un point de vue pratique, des formations pourront être montées au sein des organismes habituels de formation des professions partenaires. Des présentations pourront également avoir lieu par des participants au projet au sein des universités et écoles d'ingénieurs afin de sensibiliser au plus tôt les étudiants.

Cas particulier des chantiers expérimentaux :

Compte tenu de l'importance des chantiers expérimentaux dans le développement des bétons recyclés, ces chantiers feront l'objet d'une large communication.

Phase 3 : fin du projet

La fin du projet sera marquée par des actions de valorisation et de diffusion des résultats :

- La rédaction d'une synthèse de résultats et de recommandations, y compris constitution d'un comité de relecture ;
- La publication de la synthèse des résultats de l'étude sur le site Internet du Projet ;
- La rédaction puis l'édition d'un guide technique en français/anglais ;
- La présentation publique des résultats à Paris et en province (3 à 4 réunions) ;
- Des actions de formation et la participation à des conférences ou séminaires.

NOTA – Complémentarité avec le projet ANR COFRAGE

Des contacts ont été pris avec le projet ANR COFRAGE afin que ces deux projets se complètent. Notamment au niveau technique, où la prise en compte des nouvelles technologies de fragilisation/fragmentation des bétons recyclés et de leurs coûts opératoires est prévue dans le projet COFRAGE, et au niveau des aspects socio-économiques, car ce projet ANR traite aussi des enjeux économiques et sociétaux de la démarche.

5 ORGANISATION ET FONCTIONNEMENT

5.1 Organisation du projet

La Charte du PN RECYBETON jointe au présent rapport précise les droits et obligations des partenaires, l'organisation et le mode de fonctionnement du projet.

La gouvernance du projet est assurée par :

- Un Comité Directeur

Le Comité de décision est le Comité Directeur. Il est composé d'un représentant par partenaire ayant signé la Charte et il est conduit par le Président du Projet. Assistent également au Comité Directeur le Directeur du Projet, le Directeur Scientifique et les représentants des catégories professionnelles et maîtres d'ouvrage membres du Comité de Coordination, défini ci-après, le représentant de l'IREX et les représentants de la DRI.

Le Comité Directeur se réunit ordinairement 1 ou 2 fois par an mais il peut être convoqué de façon extraordinaire. Les attributions et le fonctionnement du Comité Directeur sont définis dans la Charte.

Le Président du Comité Directeur est élu lors de l'Assemblée Constitutive du PN RECYBETON.

- Un Comité Scientifique et Technique

Le Comité Scientifique et Technique assure la coordination scientifique et technique du projet. Il est animé par le Directeur Scientifique, assisté du Directeur du Projet. Il regroupe les responsables des thèmes du PN RECYBETON et le représentant de l'IREX

Le Comité Scientifique et Technique se réunit 3 ou 4 fois par an. Une réunion élargie réunissant les membres réguliers du comité et tous les partenaires qui souhaitent y participer sera programmée une fois par an.

Les attributions et le fonctionnement du Comité Scientifique et Technique sont définis dans la Charte.

- Un Comité de Coordination

Le Comité de Coordination coordonne et prend toute décision ne pouvant pas attendre les réunions du Comité Directeur. Il est mandaté par le Comité Directeur. Il regroupe le Directeur du Projet, le Directeur Scientifique, un responsable par thème du PN RECYBETON, un représentant de l'IREX et un représentant des entités suivantes :

- les entreprises de la déconstruction,
- le secteur des producteurs de recyclés,
- les fabricants de produits qui pourraient incorporer du recyclé (béton et liants hydrauliques),
- les entreprises de construction pouvant utiliser ces produits,
- les maîtres d'ouvrage,

qui représentent les domaines principaux du PN RECYBETON.

Il se réunit au tant que de besoin et il est animé par le Directeur du Projet, assisté du Directeur Scientifique.

5.2 Fonctionnement opérationnel

Le fonctionnement opérationnel est assuré par l'intermédiaire des responsables des thèmes principaux du PN RECYBETON.

3 thèmes principaux peuvent être regroupés globalement de façon séparée selon le domaine de recherche:

- Technologies et procédés
- Matériaux et structures
- Développement Durable

2 autres thèmes principaux sont transversaux :

- Aspects réglementaires et normatifs
- Valorisation

A ces deux thèmes transversaux il faut ajouter les travaux d'accompagnement qui sont eux aussi transversaux.

La matrice fonctionnelle ci-après sert de support pour le fonctionnement du projet et permet d'identifier les responsables opérationnels :

MATRICE FONCTIONNELLE			Thèmes de recherche		
			Technologies et procédés	Matériaux et structures	Développement Durable
Thèmes transversaux	Valorisation	Responsables : A designer	Responsables : Bogdan CAZACLIU (IFSTTAR) Laurent IZORET (EFB)	Responsables : Sophie DECREUSE (CEMEX – UNPG) Eric GARCIA-DIAZ (E. de M. d'Alès)	Responsables : François BUYLE-BODIN (Univ. Lille 1) Guillaume HABERT (IFSTTAR)
	Aspects réglementaires et normatifs	Responsables : Raphaël BODET (UNPG) Wilfried PILLARD (FFB)			

Travaux d'accompagnement : ils seront conduits par un Task-Group.

6 BUDGET PREVISIONNEL

6.1 Budget prévisionnel

Description des thèmes de recherche	Budget global en k€ HT	Part PN en k€ HT
TRAVAUX D'ACCOMPAGNEMENT		
Sélection et préparation de stocks homogènes de granulats recyclés et de ciments incorporant du recyclé	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		
<u>Concassage et tri sélectif :</u> - 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	500	220
<u>Ciment incorporant des recyclés :</u> - estimation du potentiel cimentier par incorporation dans le cru - estimation du potentiel cimentier par mélanges avec le clinker - évaluation de l'intérêt des fines de béton concassé comme addition minérale dans le béton	460	180
<u>Bétons incorporant des recyclés :</u> - optimisation des séquences de malaxage - étude des aspects pratiques de fabrication industrielle - chantiers expérimentaux	480	140
TOTAL (1)	1440	540
THEME 2 - MATERIAUX ET STRUCTURE		
<u>Granulats et fines recyclés :</u> - évaluation des méthodes de caractérisation des granulats naturels appliquées aux recyclés - évaluation de l'applicabilité des recommandations RAG de l'IFSTTAR (ex-LCPC) aux granulats recyclés supposés PR - méthode de caractérisation en continu des granulats recyclés	470	170
<u>Bétons recyclés à l'état frais et durcissant :</u> - rhéologie du béton recyclé frais en fonction de l'état de présaturation - compatibilité ciment-superplastifiants-granulats recyclés - retrait plastique	260	100

<u>Bétons recyclés à l'état durci - mécanique :</u> - 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
<u>Bétons recyclés à l'état durci - durabilité :</u> - hydratation et évolution de la microstructure des bétons à base de 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
<u>Bétons recyclés - feu, thermique :</u> - 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
THEME 3 - DEVELOPPEMENT DURABLE		
<u>Aspects socio-économiques :</u> 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
<u>Aspects environnementaux et sanitaires :</u> - 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 (K€)	5020	1885
Frais de gestion administratifs et financiers (5%)	251	251
TOTAL HT (K€)	5271	2136

Le budget s'élève à 5 271 K€ HT. Le programme peut être affiné compte-tenu des premiers résultats du projet COFRAGE. Le ou les thèmes qui pourraient être proposés dans un programme ANR ou un projet ADEME, en vue de son financement, seront déterminés.

6.2 Plan prévisionnel de financement du P.N. sur les bases d'une réalisation en 4 ans

- **Montant total du budget prévisionnel** **5271,00 k€ HT**

- **Montant total des ressources financières prévisibles** **2216,20 k€ HT**

Dont :

- Subventions de l'Etat
5271,00 x 0.20 = 1054,20 k€ HT

- Cotisations des partenaires (T= taux de base= 4500 €/an)

Maîtres d'ouvrage à 2T x 4 = 8T

Entreprises à 3T x 3 = 9T

Entreprises ou Syndicats d'entreprises à 2T x 3 = 6T

Entreprises ou Syndicats d'entreprises à 1T x 4 = 4T

Industriels à 2T x 6 = 12T

Laboratoires publics et privés à 1T x 5 = 5T

Laboratoires publics et privés à 0.5T x 4 = 2T

Ecoles et universités à 0.2 T x 15 = 3T

TOTAL : 49T/an

Soit pour 4 ans : 220,5 k€ HT/an x 4 882 k€ HT

- Participation exceptionnelle des partenaires (estimation provisoire) 280 k€ HT

- **Apports en nature des partenaires** **3054,8 k€ HT**

7 PARTENAIRES POTENTIELS

7.1 Partenaires ayant donné leur accord de principe

Les partenaires suivants ont participé dès le début aux travaux qui ont conduit au montage du PN RECYBETON et ont exprimé leur accord de principe à participer aux travaux du projet :

SYNDICATS D'ENTREPRISES

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
UNION DE LA MAÇONNERIE ET DU GROS OEUVRE
UNION NATIONALE DES PRODUCTEURS DE GRANULATS

CENTRES DE RECHERCHE – LABORATOIRES PUBLICS OU SEMI-PUBLICS

CERIB
IFSTTAR

CENTRES DE RECHERCHE – LABORATOIRES PRIVES

ATILH
CEBTP – GINGER GROUPE

ECOLES D'INGENIEUR ET UNIVERSITES

ECOLE DE MINES D'ALES
ECOLE DE MINES DE DOUAI
ESTP
UNIVERSITE DE CERGY PONTOISE
UNIVERSITE DE LA ROCHELLE

Sans avoir participé aux travaux mais avec une participation active aux réunions plénières ou aux échanges électroniques sur le projet, les partenaires suivants ont manifesté leur accord à continuer dans le projet :

ENTREPRISES

CEMENTYS
QUILLE
EIFFAGE
VINCI – CONSTRUCTION
CLAMENS

INDUSTRIELS

CEMEX
CIMENTS CALCIA
HOLCIM
LAFARGE CIMENTS
UNIBETON
VICAT

CENTRES DE RECHERCHE – LABORATOIRES PUBLICS OU SEMI-PUBLICS

BRGM
CETU

CENTRES DE RECHERCHE – LABORATOIRES PRIVES

CTG – ITALCEMENTI GROUP
LERM

ECOLES D'INGENIEUR ET UNIVERSITES

ECOLE POLYTECHNIQUE D'ORLEANS
ECOLE CENTRALE DE LILLE
ECOLE CENTRALE DE NANTES
ENPC – INSTITUT NAVIER
ENS CACHAN
INSA DE STRASBOURG – UNIVERSITE DE STRASBOURG
INSA DE TOULOUSE – UPS TOULOUSE
UNIVERSITE D'ARTOIS
UNIVERSITE DE BORDEAUX 1
UNIVERSITE DE NANTES
UNIVERSITE DE LILLE 1

7.2 Partenaires potentiels

Outre les partenaires qui ont déjà participé aux travaux ou aux réunions préalables du PN RECYBETON, d'autres ont exprimé leur intérêt au projet sans y avoir participé, ou bien ont été invités à y participer sans pour autant être présents lors des réunions. Ils sont considérés comme des partenaires potentiels. Cette liste n'est que provisoire.

MAITRES D'OUVRAGE

ANDRA
ADP
CEA
EDF
SETRA

ENTREPRISES ET SYNDICATS D'ENTREPRISES

SYNDICAT PROFESSIONNEL DES ENTREPRENEURS DES CHAUSSEES EN BETON ET D'EQUIPEMENTS
ANNEXES
UNION NATIONALE DES ENTREPRENEURS DE SOLS INDUSTRIELS
YPREMA

CENTRES DE RECHERCHE – LABORATOIRES PUBLICS OU SEMI-PUBLICS

CSTB

ECOLES D'INGENIEUR ET UNIVERSITES

ENTPE – LYON
INSA DE LYON
ENSG - NANCY

8 PLANNING PREVISIONNEL

	1ère année					2ème année					3ème année					4ème année				
Travaux d'accompagnement																				
Stocks homogènes de granulats recyclés et ciments incorporant des recyclés et formulations de référence de bétons recyclés																				
Technologies et procédés																				
Concassage et tri sélectif																				
Ciment incorporant des recyclés																				
Bétons incorporant des recyclés (chantiers expérimentaux)																				
Matériaux et structure																				
Granulats et fines recyclés																				
Bétons recyclés à l'état frais et durcissant																				
Bétons recyclés à l'état durci – Mécanique																				
Bétons recyclés à l'état durci – Durabilité																				
Bétons recyclés à l'état durci – Feu, thermique																				
Développement durable																				
Aspects socio-économiques																				
Aspects environnementaux et sanitaires																				
Aspects réglementaires et normatifs																				
Sujet transversal : incidence de la réglementation sur le recyclage																				
Valorisation																				
Sites Internet et Intranet																				
Communication scientifique et technique																				
Rapport de synthèse et guide de recommandations																				
Diffusion de résultats, conférences publiques																				