



LE RECYCLAGE COMPLET DU BÉTON

COMMENT RECYCLER LE BÉTON DANS LE BÉTON

RECOMMANDATIONS DU PROJET NATIONAL RECYBETON



COMMENT RECYCLER LE BÉTON DANS LE BÉTON

RECOMMANDATIONS DU PROJET NATIONAL RECYBETON

MARS 2019



LE RECYCLAGE COMPLET DU BÉTON

COMMENT RECYCLER LE BÉTON DANS LE BÉTON

RECOMMANDATIONS DU PROJET NATIONAL RECYBETON





LE RECYCLAGE COMPLET DU BÉTON

Le Projet National RECYBETON (Le recyclage complet du béton) a regroupé 47 partenaires qui ont conjugué leurs efforts, durant six années (2012-2018), dans un projet de recherche collaborative impliquant des maîtres d'ouvrage, des entreprises de construction, des producteurs de matériaux, des ingénieries, des assureurs et, bien sûr, des organismes de recherche. Le projet a bénéficié du soutien du Ministère de la transition écologique et solidaire et de l'Agence nationale de la recherche dans le cadre du projet ECOREB (Eco-construction par le recyclage du béton).

RECYBETON a montré comment et à quelles conditions il est possible d'utiliser les granulats obtenus par concassage de bétons de déconstruction et des rebuts de production pour fabriquer du béton, avec des performances techniques, économiques et environnementales satisfaisantes.

Trois thématiques principales ont été considérées : les procédés et technologies, le comportement des matériaux et des structures, et l'impact environnemental. Les études menées ont comporté des travaux de laboratoire et de modélisation mais aussi la réalisation de cinq chantiers expérimentaux, étapes essentielles pour démontrer la crédibilité de la démarche.

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent document technique, faite sans l'autorisation de l'IRES, est illicite et constitue une contrefaçon.

Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (article L. 122-5 du Code de la propriété intellectuelle).

COMMENT RECYCLER LE BÉTON DANS LE BÉTON

RECOMMANDATIONS DU PROJET NATIONAL RECYBETON

Les recommandations du projet national RECYBETON « Comment recycler le béton dans le béton » identifient les possibilités ouvertes à l'usage des granulats recyclés dans les bétons et dressent une liste des bonnes pratiques aux différentes étapes de leur utilisation.

Le projet RECYBETON fait également, à travers ces recommandations, des propositions d'évolution des normes rendues possibles par l'expérience acquise dans le cadre des travaux réalisés. Enfin, des pistes sur des mécanismes incitatifs propres à aider au développement de ces pratiques de recyclage sont données.

Le document s'organise en cinq chapitres principaux, dont chacun a été rédigé avec l'objectif de s'adresser en particulier à un groupe d'acteurs identifiés. Le premier chapitre, intitulé « Pourquoi utiliser des granulats recyclés dans le béton ? » s'adresse en priorité aux maîtres d'ouvrages ; le deuxième chapitre, sur la « Production des granulats recyclés » concerne en premier lieu les producteurs de granulats ; le troisième chapitre traite de la « Production des bétons contenant des granulats recyclés » et s'adresse en priorité aux producteurs de béton ; le quatrième chapitre, sur « Spécifications liées à l'utilisation des granulats recyclés » est à destination des projeteurs et des ingénieries ; enfin, le cinquième chapitre « Mise en œuvre – Exemples de réalisation » intéressera principalement les entreprises de travaux.

TABLE DES MATIÈRES

CONTRIBUTEURS	3
SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS	5
Production des granulats recyclés	5
Taux de substitution des granulats recyclés et durabilité du béton	6
Dimensionnement des ouvrages	6
Mise au point des formulations des bétons	7
Production du béton contenant des granulats recyclés	7
Contrôle du béton contenant des granulats recyclés	7
Bilan environnemental	8
Assurabilité	8
INTRODUCTION	9
1. POURQUOI UTILISER DES GRANULATS RECYCLÉS DANS LE BÉTON ?	13
1.1. Responsabilité environnementale et économie circulaire	13
1.2. Le gisement des granulats recyclés	18
1.3. Contexte normatif et réglementaire actuel	24
1.4. Recommandations pour effectuer et améliorer le bilan environnemental des bétons contenant des granulats recyclés	29
1.5. Mesures incitatives	32
1.6. Aspect juridique et assurantiel	35
2. PRODUCTION ET CARACTÉRISATION DES GRANULATS RECYCLÉS	41
2.1. Origine des matériaux et réception des matériaux entrants	41
2.2. Techniques d'élaboration	43
2.3. Bonnes pratiques de gestion de plateforme	47
2.4. Utilisation des produits	49
2.5. Caractérisation et caractéristiques des granulats recyclés	51
2.6. Contrôles de fabrication - Marquage CE, étiquetage	54
2.7. Recommandations pour la caractérisation et le contrôle des granules recyclés	57
3. SPÉCIFICATIONS LIÉES À L'UTILISATION DES GRANULATS RECYCLÉS	59
3.1. Taux de substitution des granulats recyclés et durabilité du béton	59
3.2. Dimensionnement des ouvrages	62
4. PRODUCTION DES BÉTONS CONTENANT DES GRANULATS RECYCLÉS	69
4.1. Contrôle des constituants à réception - Stockage des granulats recyclés	69
4.2. Formulation des bétons recyclés	72
4.3. Propriétés des bétons recyclés	76
4.4. Procédé de fabrication	79
4.5. Contrôle de fabrication, bon de livraison, marquage CE, étiquetage et dispositions contractuelles	80

5. MISE EN ŒUVRE - EXEMPLES DE RÉALISATIONS	83
5.1. Précautions	83
5.2. Exemples	84
6. ANNEXES	93
6.1. Liste des partenaires du projet national RECYBETON	93
6.2. Exemples de déclarations de performances (DdP) dans le cadre du marquage CE des granulats	95
6.3. Exemple de Fiche technique Produit (FTP)	96
6.4. Exemple de CCTP type pour utilisation de bétons à base de granulats recyclés dans une opération de construction de bâtiment	97
6.5. Exemple de calcul des propriétés mécaniques d'un béton C25/30 en fonction du taux de recyclage	100
7. GLOSSAIRE	103

CONTRIBUTEURS

Composition du comité éditorial :

BODET Raphaël
COLINA Horacio
DE LARRARD François
DELAPORTE Brice
GHORBEL Elhem
MANSOUTRE Sandrine
ROUDIER Jacques

Rédacteurs des recommandations :

BEN FRAJ Amor
BODET Raphaël
BRAYMAND Sandrine
CHOMIKI Xavier
COLLIN Olivier
COLLONGE Didier
DANTEC Patrick
DE LARRARD François
DECREUSE Sophie
DECROIX Fabrice
FERAILLE Adélaïde
FONTENY Sébastien
FOURE Bernard
FRANCISCO Philippe
JEZEQUEL François
MERCIER François-Régis
MOULIN Isabelle
ORSETTI Stéphane

PILLARD Wilfried
POTIER Jean-Marc
ROUGEAU Patrick
SEDRAN Thierry
THONIER Henry
VACHOT Philippe
VUILLEMIN Pierre
WALLER Vincent

■ SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

Les travaux menés dans le cadre du projet RECYBETON permettent de formuler les recommandations suivantes pour l'utilisation des granulats recyclés pour la fabrication du béton, au-delà des règles de l'art que s'attache à respecter tout professionnel impliqué dans la conception et la réalisation de béton dans un ouvrage.

■ Production des granulats recyclés (§ 2)

Concernant la caractérisation et le contrôle des granulats recyclés, le projet national RECYBETON recommande de respecter les exigences propres aux granulats recyclés pour béton des normes NF EN 12620 et NF P 18-545, avec les ajustements suivants :

- lorsque le béton est soumis à un environnement XF3 ou XF4, chaque lot de gravillons recyclés utilisé doit faire l'objet d'un essai de gélivité ;
- pour la prévention de l'alcali-réaction, l'utilisation des essais crible (essai microbar et essai à l'autoclave) est à éviter ; il faut privilégier le bilan des alcalins et/ou l'essai à long terme ;
- les chlorures solubles doivent être déterminés dans l'eau et non dans l'acide.

Dans le cas de prémélanges de sable ou de gravillon, le taux de mélange doit être indiqué sur la fiche technique du produit.

■ Taux de substitution des granulats recyclés et durabilité du béton (§ 3.1)

Le projet national RECYBETON recommande, au vu des études réalisées et dans le respect des exigences de durabilité du béton :

- de prendre en compte un nouveau taux de sulfates plafond pour le granulat recyclé, en limitant plus sévèrement le taux de sulfates pour l'ensemble des granulats de la formule ;
- d'utiliser le bilan des alcalins ou l'essai à long terme pour évaluer le risque de développement de l'alcali-réaction d'une formule de béton recyclé ;
- d'utiliser des valeurs limites de taux d'incorporation des granulats recyclés supérieures aux valeurs indiquées dans la norme NF EN 206/CN:2014, pour les gravillons recyclés de type 1 ou 2, et pour les sables recyclés présentant une absorption d'eau limitée. Ces valeurs dépendent, pour chaque type de granulat recyclé considéré, de la classe d'exposition du béton et du rapport E_{eff}/L_{equi} . Ces valeurs limites sont valables quelle que soit la résistance à la compression du béton.

■ Dimensionnement des ouvrages (§ 3.2)

L'usage des granulats recyclés peut s'envisager non seulement pour le béton armé, mais aussi pour le béton précontraint dans des conditions cependant plus restrictives. Pour le dimensionnement des ouvrages en béton contenant des granulats recyclés, le projet national RECYBETON recommande :

- d'utiliser les règles actuelles de calcul définies dans l'Eurocode 2 lorsque le taux d'incorporation des granulats recyclés est faible, hors usage dans le béton précontraint ;
- de modifier forfaitairement certains modèles de calcul de l'Eurocode 2 pour des taux intermédiaires. Sont concernés par ces modifications : la densité, la résistance en traction, le module d'élasticité, le fluage et le retrait, la relation ($\sigma - \epsilon$) en compression pour l'analyse non-linéaire, l'analyse des effets du second ordre et certains paramètres d'état limite de service (ELS) et d'état limite ultime (ELU) ;
- pour les dosages les plus élevés, en complément des modifications forfaitaires précédentes, de mettre en place des procédures afin de limiter la variabilité des propriétés du béton recyclé, et de contrôler expérimentalement les propriétés mécaniques critiques du matériau.

■ Mise au point des formulations des bétons (§ 4.2)

Pour la formulation des bétons contenant des granulats recyclés, le projet national RECYBETON recommande d'appliquer la démarche générale de formulation des bétons (à base de granulats naturels), sous réserve de prendre en compte certaines spécificités, en veillant notamment à :

- prendre une marge de sécurité plus importante sur la résistance à la compression moyenne visée ;
- vérifier certaines propriétés secondaires (par exemple le module élastique, la résistance en traction, le retrait ou le fluage) lorsqu'elles sont critiques pour le projet de construction ;
- évaluer le rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{equi}}$ en prenant en compte la proportion volumique des granulats recyclés ;
- ajuster l'eau efficace en fonction de la proportion des granulats recyclés et de la nature des granulats naturels ;
- prendre en compte l'absorption d'eau importante des granulats recyclés dans le calcul de l'eau totale du mélange.

■ Production du béton contenant des granulats recyclés (§4.4)

L'utilisation de granulats recyclés dans le béton nécessite quelques adaptations dans son procédé de fabrication. Les recommandations RECYBETON portent sur :

- le stockage de coupures supplémentaires ou l'utilisation de prémélanges ;
- l'impact des moindres performances du granulat recyclé : absorption plus forte, humidité potentiellement plus forte, résistance à l'attrition et à la fragmentation plus faible.

■ Contrôle du béton contenant des granulats recyclés (§ 4.5)

Lorsque la présence de granulats recyclés dans le béton est prise en compte dans la conception de l'ouvrage, la densité du béton devra être contrôlée en même temps que la résistance en compression. De plus, pour les forts taux de recyclage, les propriétés mécaniques critiques pour le projet devront être également surveillées par un programme de contrôle approprié.

Par ailleurs, le bon de livraison du béton prêt à l'emploi doit être adapté selon les taux de substitution adoptés.

■ Bilan environnemental (§ 1.4)

Le caractère éco-respectueux des bétons de granulats recyclés issus de la déconstruction est peu valorisé par les méthodes actuelles de calcul de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), notamment au regard de l'indicateur lié au prélèvement de ressources renouvelables.

Le projet national RECYBETON recommande :

- de pratiquer l'ACV, selon la norme EN 15804/CN, en utilisant les données de la filière lorsqu'elles sont disponibles et validées, en attendant la publication des règles et exigences décrites dans les PCR (Product Category Rules) à paraître ;
- de compléter l'ACV par l'évaluation de nouveaux indicateurs d'impacts : par exemple, économie en granulats naturels, accroissement de la part recyclée des déchets générés par la déconstruction ou flux transportés en t.km ;
- d'adapter le circuit d'acheminement des matériaux et la formulation des bétons recyclés de manière à minimiser les indicateurs d'impact.

■ Assurabilité (§ 1.6)

Pour le producteur de granulats recyclés ou de bétons contenant des granulats recyclés, le respect de l'ensemble des présentes recommandations facilite l'assurabilité complète quoique facultative des matériaux recyclés du fait de produits défectueux, vices cachés ou responsabilité avec ou sans faute.

Pour l'entreprise de travaux, l'utilisation de bétons contenant des granulats recyclés entre dans le périmètre de l'assurance décennale obligatoire liée à certains ouvrages. A noter que l'utilisation de bétons contenant des granulats recyclés au-delà des pratiques reconnues comme des techniques courantes nécessite impérativement l'information préalable à l'assureur.

Sur un plan plus général, le projet RECYBETON a également identifié un certain nombre d'éléments susceptibles de contribuer au développement des pratiques de recyclage du béton dans le béton :

- prise en compte du recyclage dans certains documents de planification : ceci concerne en particulier le volet prévention et gestion des déchets des Schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET) ainsi que les documents d'urbanisme (schémas de cohérence territoriale, plans locaux d'urbanisme intercommunaux, plans locaux d'urbanisme) ;
- prise en compte de l'utilisation de granulats recyclés dans la certification environnementale des bâtiments, les référentiels en vigueur faisant peu de différence entre l'utilisation de granulats recyclés et celle de granulats naturels.

■ INTRODUCTION

La réutilisation des dizaines de millions de tonnes de matériaux issus de la démolition de béton de bâtiments ou d'infrastructures qui sont produits en France chaque année, est une nécessité pour réduire l'empreinte anthropique. Des efforts importants ont déjà été faits, qui contribuent à préserver l'environnement, à économiser les ressources naturelles épuisables tout en ayant un sens économique. Dans le même temps, les exigences de recyclages se formalisent. Au niveau européen, la directive -cadre 2008/98/CE relative aux déchets fixe un objectif de 70 % de valorisation sous forme de matière des déchets du secteur du bâtiment et des travaux publics à l'horizon 2020. Cet objectif est transposé dans le droit français par la loi relative à la transition écologique pour la croissance verte du 17 août 2015 et incorporé au code de l'environnement (art L 541-1).

Un très bon taux de recyclage est d'ores et déjà atteint au niveau du territoire métropolitain ; ce résultat, fruit de plusieurs décennies d'efforts, est atteint avec une valorisation faite essentiellement dans le domaine routier.

Les acteurs du secteur du béton ont souhaité développer une autre forme de valorisation, plus ancrée dans la logique de l'économie circulaire. Tel est l'objet du projet national RECYBETON (le recyclage complet du béton), qui s'est concentré sur la **réutilisation des granulats obtenus par concassage de bétons de déconstruction** et des rebuts de production, et s'est donné comme objectif de montrer **comment et à quelles conditions il était possible d'utiliser ces produits pour fabriquer du béton, avec des performances techniques, économiques et environnementales satisfaisantes**.

Pour ce faire, 47 partenaires¹ ont conjugué leurs efforts durant six années (2012-2018), dans un projet de recherche collaborative impliquant des maîtres d'ouvrage, des entreprises de construction, des producteurs de matériaux, des ingénieries, des assureurs et, bien sûr, des organismes de recherche. RECYBETON

1. La liste des partenaires du projet national RECYBETON est fournie en annexe 6.1

a été labellisé « projet national » en 2011 par le comité d'orientation pour la Recherche appliquée en génie civil (RAGC). Le budget du projet s'est monté à 5,3 M€ et a bénéficié du soutien du Ministère de la transition écologique et solidaire et de l'Agence nationale de la recherche dans le cadre du projet ECOREB (Eco-construction par le recyclage du béton). Le projet était administré par l'Irex. Trois thématiques principales ont été considérées : les procédés et technologies, le comportement des matériaux et des structures, et l'impact environnemental. Les études menées ont comporté des travaux de laboratoire et de modélisation mais aussi la réalisation de cinq chantiers expérimentaux, étapes essentielles pour démontrer la crédibilité de la démarche.

Le projet national RECYBETON a produit différents livrables, la plupart publiés, qui rendent compte des acquis scientifiques : un ouvrage scientifique, dans ses versions française¹ et anglaise² et des rapports de recherche³.

Les partenaires du projet ont souhaité aussi donner aux résultats de leurs travaux une dimension plus opérationnelle en vue de promouvoir et accompagner l'utilisation des **granulats recyclés** dans la production de nouveaux bétons utilisés pour la construction ou la réhabilitation des bâtiments et des infrastructures de demain. Tel est l'objet du présent **document de recommandations** qui identifie les **possibilités ouvertes à l'usage des granulats recyclés dans les bétons** et qui dresse une **liste des bonnes pratiques** aux différentes étapes de leur utilisation. Le projet fait également des **propositions d'évolution des normes et règlements** rendues possibles par l'expérience acquise dans le cadre des travaux réalisés : la substance de ces propositions figure dans le présent document, mais elles feront aussi l'objet d'un document spécifique détaillé. Enfin, des **pistes sur des mécanismes incitatifs** propres à aider au développement de ces pratiques de recyclage sont données.

Le document s'organise en cinq chapitres principaux, dont chacun a été rédigé avec l'objectif de s'adresser en particulier à un groupe d'acteurs identifiés :

- le premier chapitre, intitulé « Pourquoi utiliser des granulats recyclés dans le béton ? » s'adresse en priorité aux maîtres d'ouvrages ;
- le deuxième chapitre, sur la « Production des granulats recyclés » concerne en premier lieu les producteurs de granulats ;
- le troisième chapitre traite de la « Production des bétons contenant des granulats recyclés » et s'adresse en priorité aux producteurs de béton ;
- le quatrième chapitre, sur « Spécifications liées à l'utilisation des granulats recyclés » est à destination des projeteurs et des ingénieries ;

1. de Larrard F., Colina H. (coordinateurs), « Le béton recyclé », traduit par A. Lecomte, Collection de l'IFSTTAR, 2018.

2. de Larrard F., Colina H. (ed.), « Concrete Recycling – Research & Practice », CRC Press, Taylor & Francis, New-York.

3. <http://pnrecybeton.fr/rapports>

enfin, le cinquième chapitre « Mise en œuvre – Exemples de réalisation » intéressera principalement les entreprises de travaux.

Les recommandations ainsi formulées sont le fruit d'un travail de rédaction collective, coordonné par un comité éditorial (la liste des rédacteurs et des membres du comité éditorial figure en avant-propos) et validé par les partenaires du projet réunis au sein du Comité Directeur de RECYBETON.

Avertissement : dans le présent document, on entend par granulats recyclés (GR) les matériaux obtenus par concassage de béton, issus de la filière du bâtiment et des travaux publics – déconstruction et rebuts de production de béton –, éventuellement mélangés à des constituants secondaires (autres matériaux de démolition) en faible quantité, et correspondant aux granulats recyclés de type 1, 2 ou 3 décrits dans la norme NF EN 206/CN.

■ 1. POURQUOI UTILISER DES GRANULATS RECYCLÉS DANS LE BÉTON ?

■ 1.1. Responsabilité environnementale et économie circulaire

Deux prises de parole gouvernementales en avril 2018 illustrent comment le secteur de la construction est concerné par les transformations de l'économie vers un modèle plus circulaire. Ces deux approches très différentes influenceront les pratiques des acteurs : celle du Premier Ministre publiant « 50 mesures pour une économie 100% circulaire - (Feuille de Route Economie Circulaire) » et celle du Ministre de la Transition écologique et solidaire présentant les plans d'action territoriaux « Qualité de l'air » en réponse aux inquiétudes de la Commission européenne face à une situation sanitaire qui ne s'améliore pas dans de nombreux pays européens dont la France. Ces deux annonces seront développées plus loin dans la partie « Incitations » (§ 1.5).

■ 1.1.1. Le concept d'économie circulaire

Dans une économie véritablement circulaire, les ressources sont régénérées au sein des cycles biologiques, récupérées ou restaurées dans des cycles techniques. Typiquement, les granulats appartiennent à ces derniers, pour lesquels il n'y a pas de consommation mais des usages. Le schéma ci-dessous en rappelle les étapes qui obéissent à trois principes :

- préserver le capital naturel ;
- optimiser l'exploitation de ressources ;
- identifier et éliminer les externalités négatives.



LES 7 ETAPES DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE

Schéma proposé par Eatiz

Figure 1 schéma général de l'économie circulaire

■ 1.1.2. L'évolution environnementale : les repères pour le BTP

Pour comprendre les transformations actuelles, il n'est pas inutile de brosser à grands traits l'évolution environnementale de notre économie :

- 1972 – rapport Meadows “The Limits to Growth” commissionné par le Club de Rome premier rapport alertant sur la gestion des ressources de la planète ;
- 1975 – première loi relative à l'élimination des déchets introduisant :
 - la notion de déchet : « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon »
 - la récupération des éléments et matériaux réutilisables ou de l'énergie
 - la **responsabilité élargie du producteur (REP)** pouvant faire « **obligation aux producteurs**, importateurs et distributeurs de produits ou éléments et matériaux entrant dans leur fabrication **de pourvoir ou de contribuer à l'élimination des déchets** qui en proviennent » ;
 - la possibilité par l'Etat de **fixer une « proportion minimale de matériaux** ou éléments récupérés dans la fabrication d'un produit ou d'une catégorie de produits ».
- Instruction technique du 20 janvier 1980 pour la mise en décharge des déchets industriels définissant des classes d'imperméabilité en fonction des déchets (spéciaux, banals ou inertes) ;

- 1987 : introduction du concept de «développement durable» (rapport Brundtland publié par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement) ;
- Loi du 13 juillet 1992 (modifiée le 2 février 1995) définissant les principes fondamentaux d'une réelle politique de gestion des déchets ;
- Circulaire du 15 février 2000 : Planification de la gestion des déchets du BTP au niveau des départements ;
- Directive Cadre « déchets » du 19 novembre 2008 dont le but est de renforcer les objectifs de valorisation ;
- **2009-2010 – les lois Grenelle I et II** : mesures **d'économie d'énergie pour les bâtiments** (audits énergétiques, réglementation thermique, etc.), meilleure planification territoriale (schémas de cohérence écologique,...) ainsi que des mesures spécifiques telles le **diagnostic-déchets obligatoire pour la démolition** de certains bâtiments et les **plans départementaux de gestion des déchets du bâtiment et des travaux publics** ;
- 2010 – ordonnance déchet du 17 décembre 2010 : place la valorisation comme mode prépondérant de gestion, introduit la possibilité de sortie du statut de déchet pour certaines catégories ;
- **2014 – loi Alur** (loi pour l'accès au logement et un urbanisme rénové) premiers schémas de l'économie circulaire, les **schémas régionaux des carrières**, bâtis sur l'appréciation globale de **l'économie des matières minérales** et de l'énergie associée, incluant le transport et le recyclage à l'échelle d'un territoire ;
- **2015 – loi** relative à la transition énergétique pour la croissance verte, qui est aussi une loi sur **l'économie circulaire et les déchets**, inscrivant dans les codes de l'environnement, de l'énergie et dans le droit de la commande publique de nouveaux concepts :

« **l'économie circulaire** vise à dépasser le modèle économique linéaire (...) en appelant à une **consommation sobre et responsable des ressources naturelles et des matières premières primaires** ainsi que, par ordre de priorité, à la prévention de la production de déchets, notamment par le **réemploi** des produits, et suivant la hiérarchie des modes de traitement des déchets, à une **réutilisation**, à un **recyclage** ou, à défaut, à une **valorisation** des déchets».

« La **commande publique durable** est mise au service de la transition vers l'économie circulaire et de l'atteinte des objectifs mentionnés au présent I (de la loi). Par son **effet d'entraînement**, elle contribue à faire émerger et à déployer des pratiques vertueuses, notamment en matière d'économie de la fonctionnalité, de réemploi des produits et de préparation à la réutilisation des déchets, et de production de biens et services **incorporant des matières issues du recyclage**. ».

Cette même loi transcrit dans le droit français un des éléments de la directive européenne de 2008 (voir § 1.1.3), à savoir un objectif de 70% de valorisation des

déchets du BTP à l'horizon 2020. Elle fixe également, pour la première fois, un objectif dans les travaux sous commande publique :

- **à partir de 2017, 50 %** des matériaux nécessaires pour les **chantiers routiers** sont **issus du réemploi, de la réutilisation ou du recyclage** des déchets, avec un taux de 20 % pour les couches d'assises et de 10 % pour les couches de roulement ;
- **à partir de 2020**, ces mêmes taux sont fixés respectivement à **60 %, 30 % et 20%** (art 79 de la loi du 17 août 2015).

■ 1.1.3. *Le rôle de l'Union Européenne dans l'évolution environnementale*

Tour à tour moteur et frein pour les transformations, le rôle de l'Union Européenne ne peut pas être éludé :

– **En matière de gestion de déchets :**

- 1975 – Première directive relative aux déchets (**directive 75/442 du 15 juillet 1975**)
- 1997 – Avis du 11 novembre 1997 définissant la nomenclature des déchets modifié par l'Annexe II, Décret du 18 avril 2002 concernant les déchets dangereux : classification des déchets
- 2006 – élargissement de la directive précédente pour favoriser la valorisation des déchets et l'utilisation des matériaux de valorisation comme matières premières afin de préserver les ressources naturelles » (Directive 2006/12/CE).
- 2008 – intégration des orientations générales sur les déchets (directive 2008/98/CE) avec l'obligation de hiérarchiser la gestion des déchets, avec par ordre de priorité, le réemploi, la réutilisation, le recyclage, la valorisation et enfin l'élimination.

– **En matière de construction :**

- 1989 – Directive « produits de construction » (dite aussi « DPC » n° 89/106/CEE) des ouvrages de construction conçus et réalisés de manière à ne pas compromettre la sécurité des personnes, des animaux domestiques et des biens, et à ne pas nuire à l'environnement. Cette directive fixe des objectifs à atteindre, appelés les exigences essentielles, et laisse à la normalisation le soin de définir dans des spécifications techniques, normes ou agréments, les caractéristiques qui permettront aux produits d'y répondre. Les spécifications sont déclinées soit dans les normes harmonisées (hEN) pour les produits « traditionnels » soit dans les agréments techniques pour les produits « nouveaux ». Un immense travail de normalisation est ainsi lancé à partir des années 1990 concernant plus d'un millier de documents. A noter que les Eurocodes (§ 3.2), qui sont des normes de conception des structures de bâtiments et d'ouvrages pris au

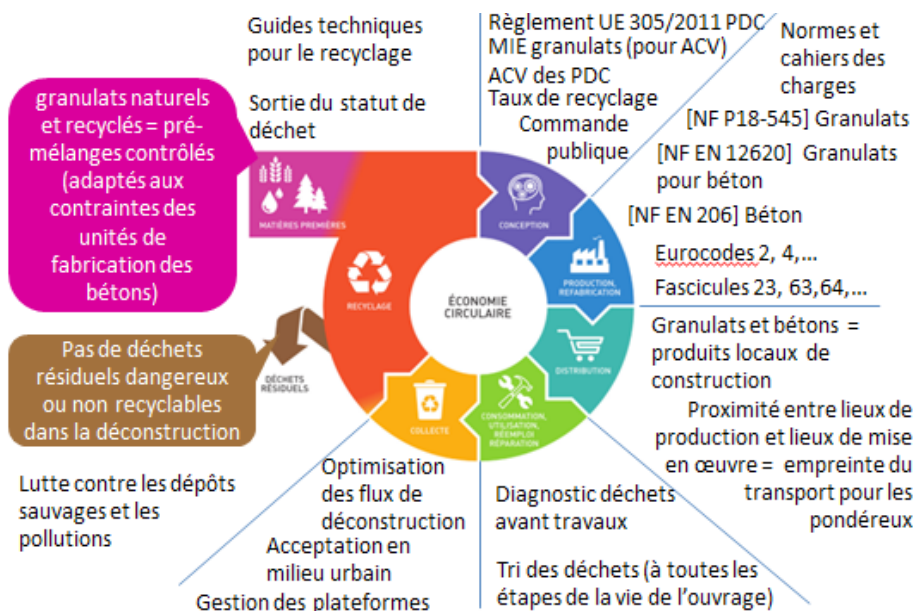
départ en application des directives marchés de travaux publics, ont été intégrés dans ce mouvement d'harmonisation.

- 2011 – Remplacement de la directive DPC par le Règlement (UE) n°305/2011 du 9 mars 2011 (dit aussi « RPC » d'application directe depuis le 1/07/2013, sans mesure de transcription nationale, contrairement à une directive) : les six exigences essentielles initiales sont complétées par une septième concernant l'utilisation durable des ressources naturelles ; de plus, tout fabricant doit désormais marquer son produit CE et mettre à disposition une Déclaration des Performances (DoP).
- 2012 (août) – Norme NF EN 15804 Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Déclaration environnementale sur les produits (DEP)- Règles régissant les catégories de produits de construction (PCR - *Product Category Rule*). Cette norme remplace la norme NFP 01 010. Ce document décrit le tronc commun des règles de catégories de produits pour les déclarations environnementales de tout produit ou service de construction. Il précise une structure permettant de s'assurer que toutes les DEP relatives à la construction sont obtenues, vérifiées et présentées de façon harmonisée.

– **En matière d'économie circulaire**, après plusieurs « paquets » de textes législatifs adoptés en juillet 2014, en décembre 2015, puis en avril 2018, le Parlement européen a refondu le 30 mai 2018 plusieurs directives sur les déchets et en particulier la **directive-cadre 2008/98** pour renforcer la hiérarchie des déchets en favorisant la prévention et le recyclage.

■ 1.1.4. Construction et économie circulaire

Face aux risques et aux enjeux du monde d'aujourd'hui, la législation a donc progressivement structuré l'aménagement du territoire, l'urbanisation et les modes constructifs dans une approche globale des aspects qualité, sécurité et environnement. Les ouvrages, bâtiments et infrastructures, depuis leur conception, préparation, jusqu'à leur exécution et leur fin de vie, ne doivent plus seulement répondre à des normes économiques et sociétales mais également appliquer les règles environnementales qui intègrent une gestion économe des ressources de plus en plus affirmée. On comprend que la **filière béton**, engagée depuis longtemps dans l'innovation, doit mieux montrer comment elle contribue à cette **gestion économe des ressources naturelles** qui assure l'avenir. Ainsi, les principaux facteurs du développement des granulats recyclés dans la construction se répartissent à différents niveaux du schéma de l'économie circulaire (ci-après).



GRANULATS RECYCLÉS dans l'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

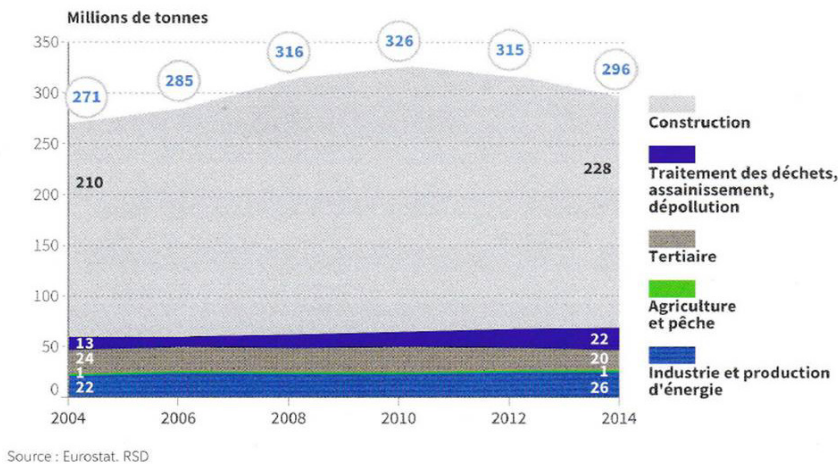
Figure 2 le recyclage du béton dans l'économie circulaire

L'utilisation des granulats recyclés dans les bétons ne repose pas sur un seul domaine, ni sur un seul paramètre. C'est la somme des actions dans les différents compartiments de l'économie circulaire qui permettra le **recyclage complet des bétons**, ajoutant cet atout à toutes les qualités spécifiques qui font de ce matériau un élément essentiel de la construction de demain.

1.2. Le gisement des granulats recyclés

Les déchets font partie des indicateurs de base pour toute organisation. Pour la France des estimations doivent être publiées régulièrement par le Ministère en charge de l'Environnement conformément aux engagements européens ; au fil des années, les méthodes de recoupement progressent et permettent d'affiner les données générales.

La figure ci-dessous présente sur dix ans la part des déchets du BTP (partie en gris clair) par rapport aux autres activités économiques (hors ménages). Les dernières données issues de l'enquête 2014 auprès des établissements y sont reportées avec un total de 228 Mt (CGDD SOeS- Data-Lab – mars 2017) soit 70 % des déchets en France. 94% de ces déchets issus du BTP sont inertes (215 Mt).



Evolution de la production de déchets en France de 2004 à 2014 par activités (hors ménages)

Rapport ADEME : bilan des déchets 2017

Figure 3 *production des déchets en France tous secteurs confondus*

Sur cette base et celle issue des enquêtes départementales réalisées par les Cellules Economiques Régionales de la Construction (CERC) publiées sur 71 départements (en janvier 2018) qui permettent de connaître les proportions de déchets par origine et mode de traitement final, on peut évaluer plus en détail le gisement des matières secondaires pouvant entrer dans la composition des bétons et mettre en perspective les enjeux de la filière.

■ 1.2.1. Les flux dans la construction en France (base 2014)

Les flux sont présentés dans un schéma de cycle de vie où les flèches vertes identifient le réemploi, la réutilisation, le recyclage et la valorisation : on comprend ainsi que les travaux publics, la construction et le génie civil ont utilisé en 2014 328 Mt de granulats issus de sources primaires (carrières + solde importations) et 24 Mt de granulats de sources secondaires (recyclage de la déconstruction et de l'industrie), soit 352 Mt auxquels il faut ajouter les 71 Mt réemployés sur place au moment des chantiers pour un total mis en œuvre de 423 Mt dont 112 Mt dans les bâtiments et ouvrages de génie civil, le reste dans les routes et travaux publics.

Données SOES 2014/2017
CERC hypothèse basse
UNICEM 2014

Les FLUX dans la CONSTRUCTION - 2014

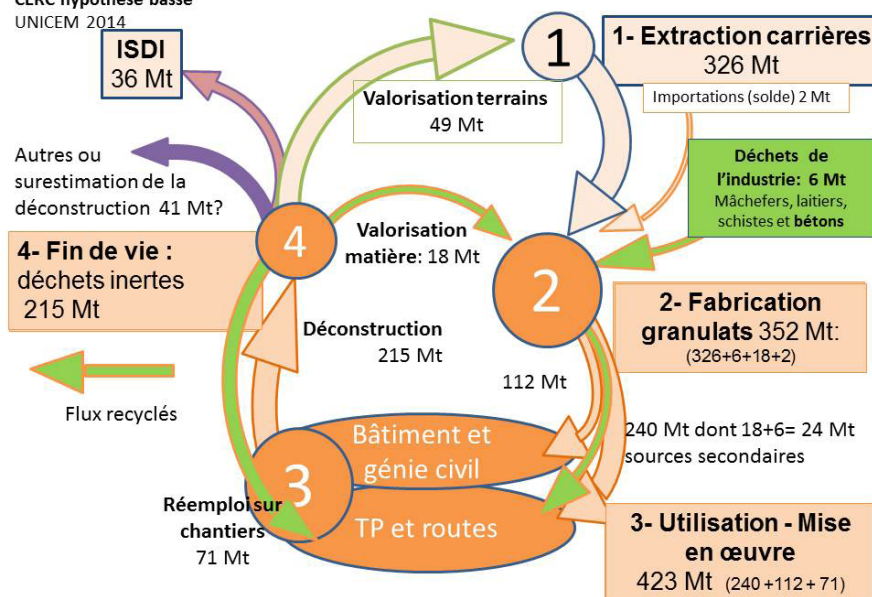


Figure 4 représentation schématique des flux dans la construction en France (base 2014)

La part recyclée et valorisée issue des matières secondaires (déchets du BTP et de l'industrie) représente 144 Mt, soit près de 67% des déchets de la construction et des industries. Dans son bilan 2017, l'ADEME considère que sur l'ensemble des déchets minéraux non dangereux (225Mt), 70 % sont récupérés, recyclés ou valorisés, dès lors qu'y est incluse la remise de matériaux en comblement de carrière. Dans sa publication de janvier 2018, le réseau des CERC comptabilise pour les flux de déchets inertes transitant par les installations un taux de 76 % de valorisation, ce qui corrobore les résultats des études de l'ADEME. L'objectif global de 70 % de déchets valorisés est donc en train d'être atteint globalement en France¹.

On doit cependant noter la difficulté de l'exercice statistique, puisqu'environ 41 millions de tonnes, soit près de 20% des tonnages de déconstruction, échappent à toute traçabilité (flèche violette ci-dessus). Plusieurs causes interviennent : des terres utilisées dans les travaux relevant de l'urbanisme ; des pratiques sauvages encore observées ; enfin, une surestimation des flux des déchets notée depuis l'origine pour cet indicateur.

1. « Le recyclage des déchets produits par l'activité de BTP en 2014 » rapport MTES/SDES – octobre 2018

■ 1.2.2. Quelles matières prendre en compte ?

Ce sont celles citées dans les normes (NF EN 206/CN béton et NF EN 12 620 granulats pour béton, cf. Tableau 1) : béton, produits en béton, mortier, éléments de maçonnerie en béton, granulats non liés, pierres naturelles, granulats traités aux liants hydrauliques, un certain nombre d'indésirables tels que les verres, les enrobés, les briques et des polluants (plâtre, plastiques, bois, etc.). Ces familles de constituants vont se retrouver – plus ou moins mélangées à d'autres matériaux – dans les différents types de déchets minéraux :

- les déchets de **béton** : regroupant généralement les bétons armés et non armés, les produits en béton, les mortiers, et les éléments de maçonnerie en béton;
- les **mélanges de bétons**, briques, céramiques...
- et les **terres et cailloux**.

Au sein des terres et cailloux (environ deux tiers des inertes du BTP), il a été possible de distinguer une part recyclable baptisée **graves et matériaux rocheux**.

■ 1.2.3. Quels gisements potentiels pour des granulats recyclés dans les bétons ?

Les différents flux de déchets identifiés sont aujourd'hui en grande partie déjà captés pour une mise en œuvre dans les applications routières. Le premier d'entre eux est réalisé sur les chantiers-mêmes : 71 Mt d'inertes comprenant majoritairement des terres (45 Mt) et mélanges à base de bétons, graves et matériaux rocheux (22 Mt au total). La proximité rend ces flux naturellement captifs du réemploi en travaux publics. De plus, les objectifs fixés par la loi de transition énergétique pour une croissance durable « 60% des matériaux d'une route devront être d'origine secondaire en 2020 », vont renforcer la nécessité de maintenir tous ces déchets accessibles pour ces travaux. De ce fait, le gisement potentiel pour la filière béton doit être évalué en ôtant la part des matériaux qui sont et resteront captifs pour les travaux routiers.

Il est ainsi possible de dresser le tableau des déchets inertes pouvant être mobilisés dans la fabrication de granulats recyclés pour les bétons, en prenant soin d'apporter un taux de recyclabilité par catégorie de déchets. En effet, une catégorie de déchets ne peut être intégralement recyclable. Les taux retenus sont basés sur les suivis réalisés sur plateformes et sur des dires d'experts du domaine : 60% pour le béton, 30% pour les mélanges et 75% pour les graves et matériaux rocheux.

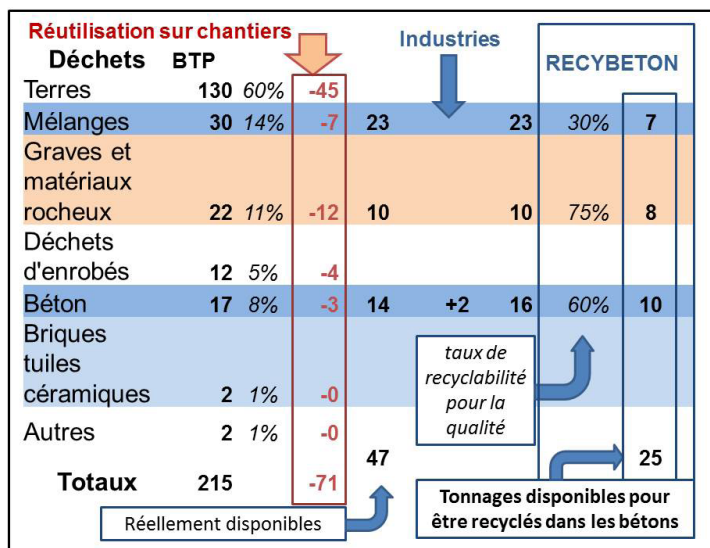


Figure 5 flux potentiels de déchets recyclables pour les bétons – base 2014 (SOeS, CERC, UNICEM) (Etude RECYBETON)

On comprend ainsi que le gisement global disponible pour les bétons est en fait limité à environ 25 Mt par an en France. Dans un modèle idéal où matières premières et déchets seraient répartis de manière uniforme sur l'ensemble du territoire, dans un calendrier des opérations et une configuration de travaux permettant de réutiliser tous les déchets inertes générés, le taux de substitution théorique serait de 22 % (25 Mt / 112 Mt granulats dans le bâtiment et le génie civil).

■ 1.2.4. Diversité locale des gisements de granulats recyclés en France

L'étude a souligné que ces flux de déchets sont très inégalement répartis sur le territoire avec des pratiques différentes : une douzaine de zones urbaines concentre les principales ressources en matériaux de démolition. Elles constituent des zones les plus favorables au recyclage et peuvent doper l'approvisionnement en granulats recyclés dans le secteur du béton. Le bilan des diagnostics réalisés pour les déchets par le réseau des CERC donne, sur l'exemple des déchets de béton sur 32 départements en 2015, un taux de recyclage déjà très élevé de 93 % pour une dispersion de 72 % à 100 % suivant les départements. Plus globalement pour l'ensemble des déchets inertes, en janvier 2018, deux tiers des 71 départements diagnostiqués affichent un taux de recyclage-réemploi-valorisation compris entre 65 % et 90 %. Les simulations spatiales montrent que le réseau actuel - carrières

et plateformes de recyclage - fonctionne et qu'il sera encore plus performant avec l'application du présent guide et l'arrivée des évolutions normatives attendues en facilitant l'incorporation des GR dans le processus industriel.

Répartition spatiale des installations de traitement des matériaux inertes à proximité des principales zones urbaines

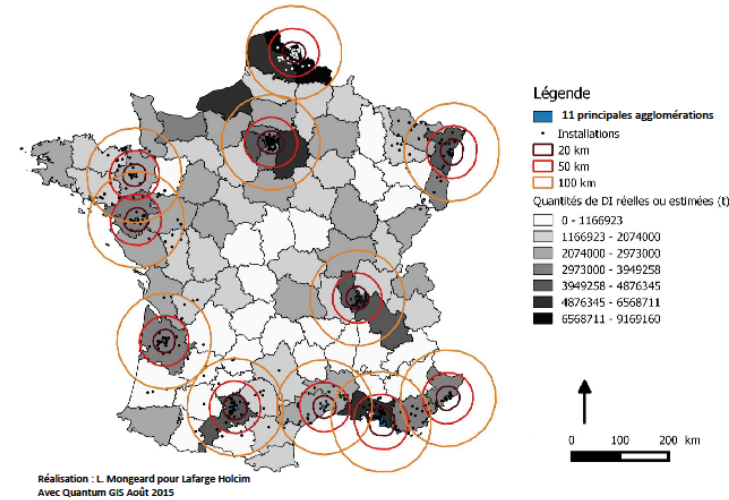


Figure 6 localisation des plate-formes de recyclage sur le territoire national

Au plan qualitatif, les suivis effectués sur treize plateformes volontaires et représentatives ont montré que là où l'activité de démolition est suffisante pour que le recyclage fonctionne, les granulats recyclés répondent déjà globalement aux exigences normatives actuelles de ce nouveau marché des bétons durables. L'optimisation du processus de production des GR pour les bétons nécessite la même organisation et la même rigueur tout au long de la chaîne d'élaboration : diagnostic, démolition, transport, plateforme, réception, tri, concassage, stockage, mise en œuvre. Cette optimisation, liée aux volumes impliqués, contribuera à l'amélioration du taux de recyclage mentionné plus haut.

Au plan quantitatif, un contrôle plus strict des pratiques de gestion des déchets augmenterait les volumes en orientant les flux vers les sites autorisés : actuellement on estime que 10 % de l'ensemble des déchets inertes sont encore mis en décharges sauvages.

Prospective

Les modes constructifs évoluent, tant dans la construction urbaine qu'interurbaine. Ainsi, dans le domaine de l'urbain, la densification de l'habitat peut conduire à reconstruire la ville sur elle-même, ce qui entraînerait une augmentation des

déchets de déconstruction urbains – qui sont majoritairement des déchets mixtes. De même, les changements dans les modes de transport peuvent amener à devoir modifier le réseau routier et à remobiliser les matériaux qui le constituent. Ces évolutions ne sont pas simples à quantifier aujourd’hui.

De nouveaux traitements *in situ* des sols ou des mélanges granulaires réduisent le besoin en GR, les rendant disponibles pour une valorisation dans les bétons. C’est ainsi que les progrès accomplis par tous les acteurs du recyclage, quel que soit leur domaine (cf. § 2.2), participeront à l’augmentation de la production de GR pour le béton. En termes de gouvernance, grâce aux outils de gestion territoriale (ex : schémas régionaux des carrières, plans régionaux de gestion des déchets...), les acteurs – collectivités, entreprises, représentants de l’Etat et citoyens – peuvent développer des plans d’action locaux et des stratégies appropriées en matière de recyclage, pour fixer des objectifs adaptés aux situations locales en fonction des ressources, des travaux et des constructions.

On trouve déjà des exemples d’optimisation entre chantiers. Un certain nombre d’ouvrages majoritairement en béton constituent un premier potentiel pour les bétons de GR conduisant à des gains de temps et de transports si les opérations de recyclage et de production du béton se font à proximité des travaux (fondations, ponts, tunnels, réseaux, mobilier urbain, glissières de sécurité...) ; ils ont représenté 39 Mt de granulats utilisés en 2014. Cela suppose une évolution des méthodes de gestion du chantier et des techniques de travaux.

En conclusion, comme pour les granulats naturels, le marché du recyclage est et restera local, dépendant des acteurs présents, des ressources et de leur localisation, des volumes concernés, des stratégies commerciales, des équipements et des capacités techniques. Il s’agit de matériaux pour lesquels l’empreinte environnementale est dominée par les transports. Leur prix restera l’un des paramètres clés pour en développer l’utilisation dans les bétons.

■ 1.3. Contexte normatif et réglementaire actuel

Les référentiels suivants contiennent l’essentiel des exigences spécifiques applicables selon le mode de production des bétons et la nature des ouvrages :

- Normes NF EN 12620+A1 et NF P 18-545 pour ce qui concerne les granulats pour béton ;
- Norme NF EN 206/CN pour ce qui concerne les bétons de structure ;
- Norme NF EN 13369 et les autres normes pour les produits en béton ;
- Fascicule N°65 pour les marchés publics de travaux de génie civil.

Une évolution de certains de ces textes est proposée dans la suite du présent document (cf. § 3.1 et § 3.2)¹.

On rappelle que les normes de produits structuraux en béton s'appuient sur la norme NF EN 13369 qui elle-même renvoie à la norme NF EN 206/CN lorsque cela est nécessaire. Les dates des références normatives indiquées dans les normes de produit doivent être prises en compte pour identifier les versions des normes NF EN 206/CN et NF EN 13369 applicables.

Pour les produits en béton disposant de normes contenant en elles-mêmes toutes les spécifications nécessaires, il convient de se référer à la norme du produit en béton concernée.

■ 1.3.1. Normes NF EN 206/CN et NF EN 13369

Concernant les granulats recyclés et les granulats récupérés, la norme NF EN 13369 s'appuie sur la norme NF EN 206/CN qui distingue :

– les granulats récupérés :

- par lavage du béton frais.
 - o la réutilisation est possible jusqu'à 5 % de la quantité totale de granulats. Au-delà, la réutilisation est possible si un criblage est effectué en séparant les sables et les gravillons et s'il y a conformité à la norme NF EN 12620+A1 ;
- par concassage du béton durci qui n'a pas été précédemment utilisé en construction ;
 - o lorsque la quantité de granulats récupérés par concassage représente plus de 5 % (en masse) de la quantité totale de granulats, les granulats récupérés doivent être traités comme des granulats recyclés ;

– les granulats recyclés résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés dans la construction.

- seule une partie des granulats recyclés conformes aux normes NF EN 12620+A1 et NF P 18-545 sont aptes à l'emploi dans les bétons. Les limitations applicables aux granulats naturels s'appliquent également aux granulats recyclés (voir Tableau 2 ci-après). Le principe consiste d'abord à analyser la composition des granulats selon l'échelle suivante (voir Tableau 2 ci-après).

1. Dans le cadre de l'engagement pour la croissance verte relatif à la valorisation et au recyclage des déchets inertes du BTP, signé entre l'Etat, l'UNICEM, l'UNPG et le SNBPE le 27 avril 2016, l'Etat s'est engagé à « soutenir, après analyse de leur pertinence, les évolutions issues du projet RECYBETON au sein des comités techniques de l'AFNOR ».

Rc : béton, produits en béton, mortier, éléments de maçonnerie en béton contenus dans un granulat recyclé
Ru : granulats non liés, pierre naturelle, granulats traités aux liants hydrauliques contenus dans un granulat recyclé
Rcu : correspond à Rc + Ru
Rg : verres contenus dans un granulat recyclé
Rcug : correspond à Rc + Ru + Rg
Ra : matériau bitumineux contenu dans un granulat recyclé
Rb : éléments en argile cuite (briques et tuiles), éléments en silicate de calcium, béton cellulaire non flottant contenus dans un granulat recyclé

Tableau 1 *dénomination des différentes phases des granulats recyclés (en % massiques)*

Les granulats peuvent présenter au plus deux caractéristiques indicées D sauf pour des bétons de résistance inférieure ou égale à C16/20 où des granulats avec plus de 2 caractéristiques indicées D peuvent être utilisés après accord du prescripteur.
Pour les bétons soumis à des environnements particulièrement agressifs (classes d'exposition XF4 et XA3), les granulats doivent présenter une absorption d'eau déclarée (WA_{24} pour les gravillons et Ab pour les sables) indicée A ($\leq 2,5$ %) et leurs autres caractéristiques doivent être au minimum indicées B.
Pour les bétons de classe de résistance caractéristique en compression C35/45 ou plus, les granulats doivent présenter des caractéristiques indicées A ou B. Des granulats présentant au plus deux caractéristiques indicées C ou D peuvent être admis après études ou références.
Pour les classes XF3 et XF4, les granulats doivent être non gélifs au sens de la norme NF P 18-545.

Tableau 2 *limitations applicables à tous les granulats (extrait de la norme NF EN 206/CN § NA.5.1.3)*

- en complément, une classification doit être opérée sur les granulats recyclés au sens des exigences définies dans la norme NF EN 206/CN. Trois types de gravillons recyclés sont distingués en fonction des caractéristiques mentionnées aux tableaux 3 et 4 ci-après (voir les fréquences d'essais spécifiées dans la norme NF EN 206/CN) :
 - o Type 1 toutes les caractéristiques définies ci-après sont CR_B ;
 - o Type 2 pour lequel toutes les caractéristiques définies ci-après sont CR_B ou CR_C ;
 - o Type 3 pour lequel toutes les caractéristiques définies ci-après sont CR_B ou CR_C ou CR_D .

Code	Constituants principaux (NF EN 12620+A1)	Constituants secondaires (NF EN 12620+A1)			
CR _B	Rcu ₉₅	Rb ₁₀₋	Ra ₁₋	XRg _{0,5-}	FL _{0,2-}
CR _C	Rcu ₉₀	Rb ₁₀₋	Ra ₁₋	XRg ₁₋	FL ₂₋
CR _D	Rcu ₇₀	Rb ₃₀₋	Ra ₁₀₋	XRg ₂₋	FL ₂₋

Tableau 3 seuils de composition des gravillons recyclés (extrait de la norme NF EN 206/CN : 2014 Tableau NA.2)

Caractéristique	Méthode d'essai	Code	Catégorie
Sulfate soluble dans l'eau	NF EN 1744-1 § 10.2	CR _B , CR _C	SS _{0,2} *
		CR _D	SS _D , Vss0,7
Masse volumique	NF EN 1097-6	CR _B , CR _C	≥ 2,0 t/m ³
		CR _D	≥ 1,7 t/m ³
Incidence sur le temps de début de prise	NF EN 1744-6	CR _B	A ₁₀
		CR _C , CR _D	A ₄₀
Coefficient d'aplatissement	NF EN 933-3	CR _B , CR _C , CR _D	Fl ₃₅
Los Angeles	NF EN 1097-2	CR _B , CR _C	LA ₄₀
		CR _D	LA ₅₀

* les présentes recommandations proposent de modifier cette valeur au § 3.1

Tableau 4 extrait des caractéristiques conventionnelles normalisées des gravillons recyclés (extrait de la norme NF EN 206/CN : 2014 Tableau NA.3)

Caractéristique	Méthode d'essai	Catégorie
Sulfate soluble dans l'eau	NF EN 1744-1 § 10.2	SS _D , Vss0,7
Masse volumique	NF EN 1097-6	≥ 1,7 t/m ³
Incidence sur le temps de début de prise	NF EN 1744-6	A ₄₀

Tableau 5 extrait des caractéristiques des sables recyclés (extrait de la norme NF EN 206/CN : 2014 Tableau NA.4)

- les taux maximums de substitution en fonction des classes d'exposition considérées sont donnés au tableau 6 ci-après.

Type de granulat recyclé	Classe d'exposition			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XF2, XF3	Autres
Gravillon de type 1	60	30	20	0 ^a
Gravillon de type 2	40	15 ^a	0	0 ^a
Gravillon de type 3	30	5	0	0
Sable	30	0	0	0

^a Pour les bétons de chaussées, un taux de substitution de 20 % est autorisé pour les gravillons provenant de la déconstruction des couches de base et de roulement des chaussées routières ou aéroportuaires et dont la traçabilité est assurée.

Tableau 6 taux maximum (% massique) de substitution (extrait de la norme NF EN 206/CN : 2014 Tableau NA.5)

Les présentes recommandations préconisent une augmentation des taux maximum de substitution des granulats recyclés (cf. § 3.1, Tableau 10 et Tableau 11). Elles ne fixent plus de niveau maximum de résistance au-dessus duquel on ne pourrait plus utiliser de granulats recyclés.

La norme NF EN 206/CN précise par ailleurs que les granulats recyclés ne peuvent pas être utilisés pour la réalisation de bétons précontraints. Une ouverture est donnée dans les présentes recommandations (cf. 3.2.2). De même, la norme dit que les gravillons recyclés de Type 2 et 3 ainsi que les sables recyclés ne peuvent être utilisés que pour des bétons de résistances inférieures ou égales à C25/30. Là aussi, un allègement de ces limitations est proposé plus loin (§ 3.1 et 3.2).

■ 1.3.2. Fascicule N°65

Le Fascicule N°65 (Exécution des ouvrages de génie civil en béton – Version 1.0 – Décembre 2017) renvoie aux normes NF EN 206/CN et EN 13369 et comporte des spécifications complémentaires sur les granulats recyclés :

- l'utilisation des granulats récupérés par concassage de béton durci qui n'a pas été précédemment utilisé en construction est limitée à 5 % de la quantité totale de granulats et pour des bétons de classe de résistance à la compression inférieure à C35/45 (des dispositions justificatives adaptées doivent être décrites dans le Plan Qualité concernant la production des bétons) ;
- l'utilisation des granulats recyclés est limitée à ceux de type 1 au sens de la norme NF EN 206/CN. Ils doivent être issus de la déconstruction d'ouvrages d'art et la traçabilité doit être assurée. Un taux maximum de substitution de 20 % est autorisé et seulement pour des bétons de classe de résistance à la

compression inférieure à C35/45 en classe d'exposition XC1, XC2, XC3, XC4 ou XF1.

■ 1.4. Recommandations pour effectuer et améliorer le bilan environnemental des bétons contenant des granulats recyclés

Le caractère éco-respectueux des bétons de granulats recyclés issus de la déconstruction est indéniable au regard de l'économie de la ressource minérale et de la limitation de l'empreinte environnementale des bétons : limitation des prélèvements dans les gisements, réduction des installations de stockage, réduction des flux de transport par une optimisation des solutions de recyclage de proximité et lutte contre les pratiques sauvages. Les éléments qui suivent ont pour but de faire des préconisations sur le processus de réalisation de bétons de granulats recyclés au regard des critères des ACV (Analyses du Cycle de Vie) et des résultats obtenus dans le cadre du projet national RECYBETON. Il est à noter que cette méthodologie, telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui, valorise peu le recyclage, car son indicateur lié au prélèvement de ressources non renouvelable effectue un bilan à l'échelle planétaire, alors que les granulats sont des produits locaux que l'on transporte sur de faibles distances. Cependant, l'ACV garde un intérêt méthodologique, et permet notamment de surveiller un certain nombre d'indicateurs comme le bilan CO₂ des solutions envisagées dans les matériaux de construction.

Les présentes recommandations visent à compléter les indicateurs d'impacts décrits dans la norme actuelle NF EN 15804, et à améliorer le bilan environnemental du béton tel qu'illustré dans la figure ci-dessous.



Figure 7 illustration des recommandations pour inciter à l'utilisation de granulats recyclés dans les bétons au regard de l'évaluation environnementale.

■ 1.4.1. Recommandations sur l'application de la méthodologie ACV (selon la norme NF EN 15804)

Constat	Recommandations
<i>La qualité des données d'inventaires conditionne les résultats</i>	Réaliser autant que possible les analyses avec les professionnels de la filière, avec une méthodologie qui s'appuie sur la norme (même méthode de calcul).
<i>La méthode de calcul des indicateurs pour le transport influence les résultats : la prise en compte des infrastructures les modifiant</i>	Structurer la norme pour que l'ACV soit représentative de la chaîne de valeur ou de la filière analysée : par exemple lever l'ambiguïté actuelle pour une prise en compte complète des infrastructures dans le calcul de l'ACV des transports

■ 1.4.2. Recommandations sur le choix des indicateurs d'impact

Constat	Recommandations
<i>L'épuisement des ressources (quantifiée en kg éq. Sb) gravier et sable est évaluée par la norme NF EN 15804 au travers de la ressource silicium qui a un facteur de caractérisation¹ en 10^{-11}. La ressource calcaire est assimilée au calcium avec un facteur de caractérisation égal à 0. Bien qu'utile pour le calcul de l'ACV du béton, l'indicateur épuisement des ressources n'est pas suffisamment sensible aux variations induites par le recyclage.</i>	Compléter l'ACV réalisée selon la norme NF EN 15804 actuellement en vigueur par l'évaluation de nouveaux indicateurs d'impacts : économie en granulats naturels et accroissement de la part recyclée des déchets générés par la déconstruction, flux transportés en t.km. On pourrait aussi rapporter l'économie de granulats naturels à la réserve existante dans la zone susceptible de fournir les matériaux pour l'ouvrage considérée, compte-tenu des moyens de transports (route, rail, voies d'eau). Ces données sont, cependant, rarement publiques.

1. Facteur de caractérisation : coefficient de pondération appliquée

■ 1.4.3. Recommandations sur le circuit d'acheminement des matériaux

Constat	Recommandations
<i>La part du transport dans l'étude d'impact reste faible pour la majorité des indicateurs pour des distances de transport incluses dans les banlieues ou couronnes périurbaines des villes de province (≤ 25 km).</i>	Préalablement à la décision d'utiliser des granulats recyclés dans les bétons, effectuer une étude territoriale qui recense les sites disponibles, leur typologie (carrières, plateformes de recyclage, installation de stockage (ISDI), , centrales à béton, usines de préfabrication...) et la ressource réellement disponible (quantité, type de matière, qualité). Cette étude devra indiquer en fonction de la localisation du chantier ou de la centrale à béton, les sites susceptibles de fournir les granulats de la catégorie, qualité et quantité attendues. Une attention particulière doit être apportée à la prise en compte des contraintes logistiques notamment en zone urbaine dense (Paris, Marseille, Lyon...)
<i>Lorsque le maillage des sites de production de granulats ou de stockage des déchets est bien réparti sur le territoire (aire urbaine autour de la ville), l'influence du choix du site sur le transport (t.km) reste modérée et, de ce fait sans influence sur les résultats ACV.</i>	Dans un tel cas, afin de réduire les impacts environnementaux, la pratique des circuits courts (démolition-recyclage in situ) pour les chantiers situés en zone péri-urbaine (évitement nuisances sonore et poussière) est préconisée lorsque les conditions spatio-temporelles des chantiers le permettent

■ 1.4.4. Recommandations pour la formulation des bétons

Constat	Recommandations
<i>Les analyses d'impacts sont dépendantes de la formulation du béton.</i>	Les indicateurs d'ACV dépendent fortement du type de ciment et de son dosage. Afin de ne pas augmenter de manière importante ce dosage pour l'obtention des résistances attendues, il est nécessaire d'adapter l'adjuvantation. Cependant, les adjuvants utilisés et leur dosage peuvent influencer à leur tour sur certains indicateurs d'ACV.

■ 1.4.5. Synthèse

Le caractère éco-respectueux des bétons de granulats recyclés issus de la déconstruction est peu valorisé par les méthodes actuelles de calcul de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), notamment au regard de l'indicateur lié au prélèvement de ressources renouvelables.

Le projet national RECYBETON recommande :

- de pratiquer l'ACV, selon la norme EN 15804/CN, en utilisant les données de la filière lorsqu'elles sont disponibles et validées, en attendant la publication des règles et exigences décrites dans les PCR (Product Category Rules) à paraître ;
- de compléter l'ACV par l'évaluation de nouveaux indicateurs d'impacts : par exemple, économie en granulats naturels, accroissement de la part recyclée des déchets générés par la déconstruction ou flux transportés en t.km ;
- d'adapter le circuit d'acheminement des matériaux et la formulation des bétons recyclés de manière à minimiser les indicateurs d'impact.

■ 1.5. Mesures incitatives

■ 1.5.1. Contexte

Actuellement, la plupart des granulats utilisés dans les bétons sont des granulats naturels issus de gisements de roches meubles (sablères, gravières) et/ou de roches massives (carrières). Rappelons que depuis plusieurs décennies, l'augmentation des contraintes et l'épuisement de certaines ressources a conduit, par place, à une substitution plus ou moins forte des granulats roulés (roches meubles) par des concassés (granulats de roches massives). Si ces produits offrent l'avantage d'une qualité constante et d'un approvisionnement continu, il s'agit de produits certes disponibles mais issus de ressources non renouvelables dont l'utilisation pourrait, par exemple, être en partie remplacée par des granulats recyclés. Le Projet National RECYBETON l'a techniquement démontré et des modifications des dispositions normatives (§ 3.1) et d'adaptation des règles de dimensionnement de l'Eurocode 2 (§ 3.2) sont proposées.

La nature et les caractéristiques des granulats recyclés varient en fonction de leur origine, du tri sur les chantiers de démolition mais aussi en fonction des procédés de traitement sur plateformes de recyclage (§ 2.1 & 2.2). Ces éléments ont une incidence directe sur les possibilités d'utilisation ultérieure des granulats recyclés (§ 4.3).

Les principaux freins aux évolutions dans le secteur de la construction sont les suivants :

- nature particulièrement fragmentée du tissu d'entreprises du secteur de la construction ;
- difficultés du transfert de la recherche vers la mise sur le marché des innovations associées ;
- multiples réticences socioculturelles : assimilation des matériaux de déconstruction à des déchets (malgré l'élaboration dont ils ont fait l'objet), qualification et formation insuffisantes du personnel.

Les incitations les plus prometteuses pour favoriser le recyclage du béton sont les suivantes :

- promouvoir le recyclage par des incitations publiques adaptées (favoriser le tri sélectif des déchets de déconstruction, sortir les granulats recyclés du statut de déchets, favoriser l'incorporation des granulats recyclés dans les commandes des marchés publics en fonction de l'offre locale en granulats recyclés...) ;
- favoriser l'acceptabilité des matériaux alternatifs par des spécifications techniques adaptées ou par des guides homologués encadrant leur acceptabilité environnementale ;
- prendre davantage en compte le recyclage dans les labels de certifications volontaires.

■ 1.5.2. Incitations publiques

L'enjeu de l'économie vers un modèle plus circulaire du secteur de la construction repose notamment sur :

- la feuille de route « 50 mesures pour une économie 100% circulaire (FREC) » du Premier Ministre présentée en avril 2018 ;
- le contenu des plans d'action « qualité de l'air » proposés par le ministre de la Transition écologique et solidaire déployés également en avril 2018.

Mesures concernant directement la filière de la construction

- augmenter le « bon tri » des matériaux de déconstruction en vue de leur recyclage (FREC, mesure n° 33) ;
- reprendre le « diagnostic déchets avant démolition » (FREC, mesure n° 34) ;
- développer d'ici 2020 des guides techniques permettant la reconnaissance des performances des matériaux réutilisés ou réemployés (FREC, mesure n° 35). Le présent document fait partie de cette catégorie ;
- adapter la réglementation relative aux déchets pour favoriser l'économie circulaire (mesure n° 36) ;
- faciliter la sortie du statut de déchet (FREC, mesure n° 37) ».

D'autres mesures indirectes ont été introduites dans la FREC :

- lutter contre les dépôts sauvages de déchets (FREC, mesure n° 27) ;
- une mobilisation de l'ensemble des acteurs et en particulier à l'échelle locale des territoires (FREC, mesure n° 43) ;
- le rôle exemplaire de la commande publique comme levier pour déployer l'économie circulaire (FREC, mesure n° 44).

Mesures découlant des plans d'action « qualité de l'air »

Trois volets d'actions sont proposés concernant le secteur du BTP :

- un volet chantiers pour lesquels une gestion locale est fortement encouragée : il s'agit de mailler le territoire de zones de dépôts /recyclage des déchets inertes, de favoriser l'organisation d'une synergie inter-chantiers pour que les déchets des uns puissent être les matériaux des autres en imposant des méthodes « chantiers propres » ;
- un volet urbanisme/construction incitant dès la conception à densifier l'habitat pour lutter contre l'étalement urbain avec des techniques et matériaux économes en matière d'émissions directes et indirectes ;
- un volet transport par route qu'il s'agit de limiter en relançant, pour les zones urbaines qui bénéficient de voies fluviales, cette option logistique pour une optimisation des chantiers.

La réponse aux enjeux de l'économie circulaire n'est pas unique et c'est l'ensemble des acteurs qui contribuera à accélérer les mutations du secteur de la construction en matière de recyclage du béton.

■ 1.5.3. *Incitations par l'adaptation des dispositions normatives*

L'utilisation de granulats recyclés dans le béton se heurte actuellement à des freins d'ordre techniques et environnementaux qu'il est possible de rectifier en modifiant les dispositions normatives. Pour les aspects techniques, le PN RECYBETON propose d'augmenter les taux d'incorporation de gravillons et de sables recyclés de la norme NF EN 206/CN en fonction des classes d'environnement des bétons (cf. § 3.1).

Sur le plan environnemental, le bénéfice de l'utilisation des granulats recyclés dans le béton serait effectif si dans le calcul des ACV sont ajoutés les impacts évités tels que les quantités de granulats naturels économisés et les surfaces de stockage préservées. Les propositions du PN RECYBETON concernant la norme EN 15804/CN établissant le cadre du calcul des ACV des produits de construction vont dans ce sens en proposant d'intégrer ces deux paramètres lors de la révision de cette norme (cf. §1.4).

■ 1.5.4. Incitations via les certifications volontaires

Complémentaires des réglementations, les labels et certifications d'application volontaire, créés le plus souvent à l'initiative des organisations professionnelles et des acteurs de la construction, accompagnent chez nos voisins européens comme en France la montée en puissance des bâtiments performants sur le plan environnemental.

Une analyse des principales certifications existantes (HQE, BREEAM et LEED) montre que, s'il existe une volonté forte de prise en compte de l'économie circulaire, sa déclinaison aboutit la majeure partie du temps à une approche performantielle et globale de type ACV bâtiment dans laquelle on ne retrouve pas d'incitations fortes à l'utilisation des granulats recyclés. Seul le label Minergie Eco propose de manière explicite une quantité minimale de granulats recyclés dans le béton. Cependant, la certification HQE concerne une part croissante des projets de bâtiment en France, et pourrait évoluer prochainement dans le sens d'une plus grande incitation à l'utilisation de matériaux recyclés.

■ 1.6. Aspect juridique et assurantiel

On aborde ici les risques juridiques encourus par les professionnels participant à l'acte de recyclage, et les conditions de leur assurabilité.

■ 1.6.1. Des responsabilités différentes en fonction de l'intervenant concerné

L'entreprise de travaux

L'entreprise qui réalise les travaux engage sa responsabilité au regard de sa mission, qui est de livrer un ouvrage exempt de vices. Une mise en cause sur son lot peut se produire à la suite d'erreurs au stade de la réalisation ou de la conception, ou encore du fait d'un béton vicié (mauvaise préparation et/ou mise en œuvre *in situ*, inaptitude du produit à l'usage, fourniture depuis un outil de production défectueux et/ou inadapté...).

L'entreprise a une obligation de résultat donc voit sa responsabilité recherchée en première ligne en présence d'un dommage. Cependant, en présence d'un béton vicié ou inadapté, elle pourra se retourner contre le producteur/fournisseur du béton afin d'être garantie en totalité ou partiellement (en fonction ou non d'une responsabilité propre au regard de sa mission). D'une façon générale, plusieurs fondements de responsabilité peuvent être mobilisés :

- décennal quand l'entreprise se voit rechercher en responsabilité pour des dommages à l'ouvrage après réception entraînant une atteinte à la solidité de l'ouvrage ou le rendant impropre à sa destination ;

- contractuel quand des désordres ne relèvent pas du caractère décennal ;
- délictuel quand les fautes de l'entreprise ont des conséquences sur les travaux des autres intervenants en cours de chantier ou après.

Le producteur

Le producteur de granulats est impliqué dans la chaîne de construction dans la mesure où il doit fournir des granulats de qualité voire du béton de qualité s'il fabrique lui-même le béton qui sera utilisé sur le chantier. Toutefois, étant le dernier maillon de la chaîne, il n'est pas soumis au régime de la responsabilité décennale. De la même façon, il ne peut relever du régime des EPERS (éléments pouvant entraîner la responsabilité solidaire) dans la mesure où les granulats, ne répondent pas, à l'heure actuelle de l'interprétation jurisprudentielle, à la définition de l'article 1792-4 du code civil. Toutefois, selon une jurisprudence récente (arrêt n° 176 du 28 février 2018 - Cour de cassation), un fabricant de béton peut voir sa responsabilité décennale mobilisée au titre de cet article lorsqu'il prend une part active à la construction en donnant des instructions précises sur le chantier. Ceci étant, de nombreux autres fondements restent possibles pour rechercher la responsabilité du producteur de granulats (ou de bétons).

■ 1.6.2. *Les différents fondements de responsabilité reposant sur un producteur de granulats recyclés*

Les exemples choisis ici concerneront les granulats recyclés. Néanmoins, les fabricants de bétons type BPE seront soumis aux mêmes fondements de responsabilité. Le producteur de granulats recyclés est assimilé à un fabricant/vendeur dans le sens où sont proposés à la vente des produits que le producteur aura préparés/traités pour devenir une composante d'un autre produit, l'ensemble constituant un produit fini (béton par exemple). Ainsi, des granulats recyclés défectueux pourraient être à l'origine de dommages sur un ouvrage ou plus simplement sur le produit fini auquel ils sont incorporés. Quels sont alors les fondements de responsabilité possibles ? Ils sont multiples :

Une responsabilité du fait des produits défectueux

Il s'agit d'une responsabilité de plein droit issue de la Directive Européenne du 25 juillet 1985 et transposée dans le droit français aux articles 1245 et suivants du code civil, en présence d'un produit n'offrant pas la sécurité à laquelle on peut légitimement s'attendre, que cela porte atteinte à la personne ou aux biens. Il s'agit d'une responsabilité objective, c'est-à-dire sans que la victime doive rapporter la faute ; seule la preuve d'un défaut de sécurité doit être établie par le réclamant.

Ce régime est applicable au producteur du produit fini mais aussi au producteur d'un composant du produit fini (par exemple le producteur de granulats). En effet, l'article 1245-7 du code civil, rappelle qu'en cas de dommage causé par le défaut d'un produit incorporé dans un autre, le producteur de la partie composante et celui qui a réalisé l'incorporation sont solidairement responsables du paiement des dommages causés à la victime. Ainsi, des dommages corporels (suite à la présence d'agents nocifs par exemple), matériels et immatériels consécutifs pourront être réclamés.

Une responsabilité pour vice caché

La garantie des vices cachés issue de l'article 1641 du code civil se formalise dans les relations acheteur/vendeur. Le vice du produit peut découler dans ce cas de l'inaptitude du produit à l'usage auquel on le destine. Des granulats recyclés ne répondant pas aux critères requis des normes NF EN 12620 et NF P 18545 pourront être inaptes à l'usage attendu à savoir la fabrication d'un béton répondant à la norme NF EN 206/CN. Deux actions peuvent en résulter : l'une sur le fondement associé de l'article 1644 du code civil afin d'obtenir la restitution du prix contre le produit ou une diminution du prix en conservant le produit, l'autre sur le fondement associé de l'article 1645 du code civil pour obtenir des dommages et intérêts.

Une responsabilité avec ou sans faute

En dehors de tout lien contractuel entre le fabricant et la victime, la responsabilité fondée sur les articles 1240 et 1241 du code civil reste une voie ouverte en l'absence de défaut de sécurité alléguée pour tout tiers victime du produit (autre que son cocontractant).

Rappelons qu'il faut, dans ce cadre de responsabilité apporter la preuve du dommage, d'une faute et du lien de causalité entre les deux. En présence d'un lien contractuel entre le fabricant et le réclamant, la responsabilité du fabricant pour défaut de conseil ou non-conformité de la chose livrée peut aussi être recherchée. Le défaut de conseil consiste pour le fabricant consulté en amont, à devoir se renseigner sur la destination de son produit et son adéquation avec l'usage envisagé, voire à donner quelques conseils sur sa mise en œuvre ou son entretien.

La non-conformité de la chose livrée (à distinguer de la chose viciée) est une autre voie pour rechercher la responsabilité du fabricant lorsque l'acheteur constate que le produit livré n'est pas conforme aux spécifications contractuelles.

En présence d'un lien contractuel entre le fabricant et le réclamant, la responsabilité du fabricant pour défaut de conseil ou non-conformité de la chose livrée peut aussi être recherchée.

Le défaut de conseil consiste pour le fabricant consulté en amont, à devoir se renseigner sur la destination de son produit et son adéquation avec l'usage envisagé, voire à donner quelques conseils sur sa mise en œuvre ou son entretien.

La non-conformité de la chose livrée (à distinguer de la chose viciée) est une autre voie pour rechercher la responsabilité du fabricant lorsque l'acheteur constate que le produit livré n'est pas conforme aux spécifications contractuelles.

■ 1.6.3. Quelle approche assurantielle ?

La couverture liée à l'activité

Quel que soit le professionnel concerné, pour être garanti, celui-ci doit déclarer son activité à son assureur. Toutefois, l'acceptation de l'assureur de garantir une activité et le calcul de la tarification ensuite, passent le plus souvent par des exigences de normalisation du risque en question.

Pour le constructeur, outre des critères de qualification (Qualibat, nomenclature FNTF, OPQBI, etc...) ou d'ancienneté, une des conditions de garantie concerne la mise en œuvre de produits relevant de **techniques courantes**. S'agissant d'un terme purement assurantiel, il faut entendre par technique courante :

- des travaux de construction répondant à une norme homologuée (NF DTU ou NF EN...), à **des règles professionnelles acceptées par la Commission Prévention Produits (C2P) de l'Agence Qualité Construction (AQC)** ou à des recommandations professionnelles du programme RAGE 2012 non mises en observation par la C2P ;
- des procédés ou produits faisant l'objet au jour de la passation du marché :
 - d'un Agrément Technique Européen (ATE) en cours de validité ou d'une Evaluation Technique Européenne (ETE) bénéficiant d'un Document Technique d'Application (DTA), ou d'un Avis Technique (ATec), valides et non mis en observation par la C2P,
 - d'une Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEX) avec avis favorable,
 - d'un Pass 'innovation « vert » en cours de validité.

Pour le fabricant/producteur (assimilé à un fabricant/vendeur), l'activité intègre le processus depuis le tri jusqu'à la mise en vente. Alors, la « **normalisation du risque** » se traduit avant tout par la définition exacte du produit fabriqué, pour lequel l'assureur accepte de garantir les conséquences de la responsabilité en cas de dommages causés par celui-ci. Cela implique que le produit doive répondre à des exigences normatives (voir ci-dessus), et que le contrat d'assurance ne couvre l'assuré qu'au regard de ce produit déclaré.

Il se peut néanmoins que des produits non normés (en dehors ou au-delà des normes, et rentrant par conséquent dans les techniques non courantes) puissent être assurés. L'assureur effectuera un examen technique particulier qui pourra conditionner ou non l'accord d'une garantie. Il peut ainsi accepter une éventuelle normalisation du risque en demandant par exemple la réalisation d'une ATEX ou moyennant une surprime à assumer par le sociétaire. En conséquence, la mise

en œuvre de techniques non courantes par le metteur en œuvre doit faire l'objet d'une déclaration obligatoire à l'assureur (article L113-2 du Code des Assurances). La normalisation d'un risque résulte **également des moyens de contrôle et de suivi** qu'un assuré met en œuvre pour garantir au sein de son installation la bonne fabrication de son produit, relativement aux normes NF EN 12620 et NF P 18-545 en vigueur pour la fabrication des granulats, NF EN 206/CN pour celle du béton, et aux présentes recommandations. La conformité à ces normes et recommandations, pour les parties de ces normes auxquelles elles se substituent, est un gage de qualité et de traçabilité pour un assureur. L'aspect qualitatif dépend également de la mise en place de procédures particulières par l'assuré. Par exemple, sans exhaustivité :

- la réalisation d'une fiche de contrôle d'essais hebdomadaire sur les produits ;
- l'indication sur les bordereaux de livraison granulats et bétons des fractions introduites dans un mélange granulaire en termes de nature et pourcentage,
- l'introduction dans les documents qualité granulats et bétons de toutes les indications et mesures pertinentes relatives à l'utilisation, au mode de gestion et traitement particulier de fractions recyclées, (stockage des matériaux non conformes, modalités de mélange naturels/recyclés, turnover des stocks, gestion de l'absorption d'eau des recyclés, maîtrise de la variabilité notamment en constituants secondaires comme les sulfates (plâtre) (NF EN 12620)... mais aussi l'adéquation de la fréquence des contrôles aux particularismes des recyclés...

Certains assureurs valorisent une telle démarche qualité globale dans la mesure où elle constitue un moyen supplémentaire, non forcément obligatoire, de prévenir tout type d'incident.

Deux types de garanties d'assurance proposées :

Des garanties de responsabilité :

- couverture de l'assuré pour les dommages qu'il occasionne du fait de l'exercice de son activité déclarée ; garanties de responsabilité décennale après réception pour une entreprise ou un concepteur, garanties de responsabilité civile professionnelle pour tout dommage (hors décennale) causés à des tiers.
- des distinctions au sein même de ces garanties existent (se rapprocher de son assureur), mais au-delà, il ne faut pas hésiter à privilégier les garanties tous fondements juridiques permettant une plus grande sécurisation de l'activité et de l'entreprise.

Des garanties dommages :

- prise en charge, en dehors de toute recherche de responsabilité, de la réparation du dommage ;
- après réception, on parle de dommages-ouvrage permettant au maître d'ouvrage d'avoir une réparation de son ouvrage atteint de désordres de nature décennale ;

en cours de chantier, on parle de Tous Risques Chantier, permettant de réparer les dommages à l'ouvrage en cours de réalisation, souscrite par le maître d'ouvrage ou l'entreprise générale.

■ 1.6.4. Synthèse

Pour le producteur de granulats recyclés ou de bétons contenant des granulats recyclés, le respect de l'ensemble des présentes recommandations facilite l'assurabilité complète quoique facultative des matériaux recyclés du fait de produits défectueux, vices cachés ou responsabilité avec ou sans faute.

Pour l'entreprise de travaux, l'utilisation de bétons contenant des granulats recyclés entre dans le périmètre de l'assurance décennale obligatoire liée à certains ouvrages. A noter que l'utilisation de bétons contenant des granulats recyclés au-delà des pratiques reconnues comme des techniques courantes nécessite impérativement l'information préalable à l'assureur.

■ 2. PRODUCTION ET CARACTÉRISATION DES GRANULATS RECYCLÉS

■ 2.1. Origine des matériaux et réception des matériaux entrants

La production de granulats recyclés pour fabriquer de nouveaux bétons est réalisée principalement sur des plateformes de recyclage à partir de matériaux inertes issus des chantiers de déconstruction du bâtiment et des travaux publics. Du fait de la diversité et de l'ancienneté des ouvrages déconstruits, la composition de ces matériaux inertes est variée et si certains peuvent être valorisés en tant que granulats recyclés pour bétons, d'autres ne peuvent pas s'inscrire dans ce processus compte tenu de leur impureté, de leur variabilité ou de leur hétérogénéité, engendrant des risques d'apparition de défauts d'aspect, voire de désordres ultérieurs.

Il convient donc de procéder à une déconstruction maîtrisée et un tri sélectif associés à la mise en place d'une traçabilité afin de s'assurer que les matériaux inertes valorisables seront pris en charge et acheminés vers la plateforme de recyclage.

A l'entrée de celle-ci, l'acceptation des chargements est conditionnée à la vérification de l'intégrité de l'ensemble des documents (dont ceux relatifs à la traçabilité) et à un contrôle visuel des bennes. Les chantiers de déconstruction du BTP concernent tout type d'ouvrages, ce qui implique que les constituants des matériaux inertes sont variés. Compte-tenu des exigences des producteurs de

béton (en termes de formules et d'utilisations finales) et des contraintes normatives, tous les matériaux inertes n'ont pas vocation à être recyclés en granulats pour bétons.

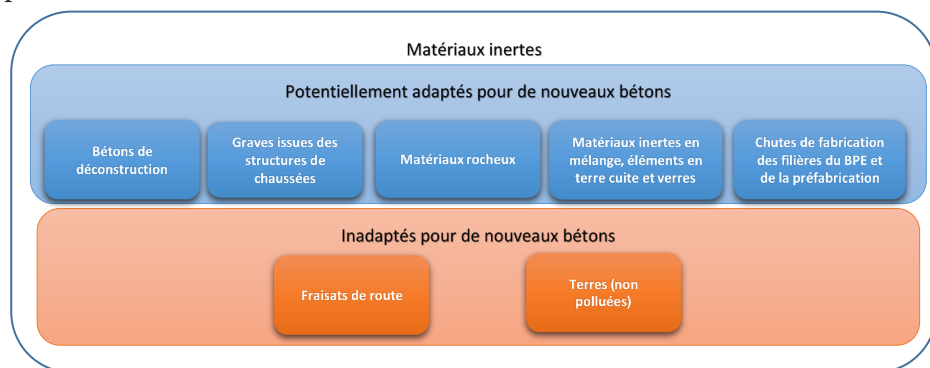


Figure 8 matériaux inertes recyclables ou non en granulats pour béton

Il est donc important, sur le chantier de déconstruction ou sur la plate-forme, de séparer par tri les différents matériaux pour :

- exclure ceux non valorisables pour la production de granulats recyclés ;
- constituer des stocks distincts.

Cette méthodologie s'inscrit pleinement dans une déconstruction maîtrisée qui doit s'accompagner d'une traçabilité couvrant l'ensemble des étapes jusqu'à l'entrée de la plateforme. Cette traçabilité se traduit par des documents indiquant, a minima, l'identification du lieu de la déconstruction (origine du gisement) et la personne morale responsable des opérations effectuées et des matériaux.

L'accès à la plateforme est une étape importante qui consiste en la vérification des documents fournis et un contrôle des chargements. Ce dernier est crucial car il permet de s'assurer de la conformité des matériaux reçus aux critères d'admission fixés par la plateforme (absence de matériaux non souhaités - matériaux liés à du plâtre, par exemple - voire de matériaux interdits). Il est donc essentiel que cette vérification soit instantanée et permanente, et que le ou les opérateurs, chargés de l'acceptation puis du déchargement des camions soit formés à cette vérification visuelle rapide mais rigoureuse des bennes.

En cas de non-conformité du chargement ou même en cas de doute, il appartient à ce personnel de refuser le camion qui doit alors se réorienter vers un autre type de plateforme de stockage, par exemple.

A partir du constat de la conformité des matériaux et des documents, la réception se poursuit par le transfert sur le parc de stockage des chargements, à des lieux de dépôt définis en fonction des types de matériaux et précisés selon un plan.

L'allotissement par chantier d'origine est facultatif et n'est pas indispensable pour assurer l'homogénéité et la régularité dans le temps de la production de granulats, sauf dans le cas de granulats destinés à des bétons soumis à des conditions de gel sévères, pour lesquels la constitution et la caractérisation de lots homogènes est requise (cf. § 2.6.2).

■ 2.2. Techniques d'élaboration

La production de granulats recyclés destinés aux bétons reprend un ensemble de techniques conventionnelles utilisées pour la production de granulats de première génération (concassage, criblage, scalpage, ...) associées à une ou plusieurs étapes de tri sélectif spécifique, indispensable à l'élimination des constituants indésirables (légers, bois, brique, ...).

Ainsi, la qualité finale des GR aptes à être intégrés dans les formules de bétons recyclés et conforme aux exigences normatives (cf. § 1.3), dépend :

- de l'homogénéité / hétérogénéité des matériaux sources : la régularité des caractéristiques des produits finis peut être atteinte de deux manières :
 - utilisation de bétons de démolition issus de chantiers sélectionnés, dans le cadre d'une production de granulats ciblée pour la réalisation d'un ouvrage béton déterminé, au départ d'une installation de chantier ou d'une centrale à béton « de réseau » ;
 - homogénéisation du gisement lors de son introduction dans la chaîne de traitement (issu de différents chantiers de démolition) : méthode la plus adaptée aux plateformes de recyclage « industrielles » qui produisent des granulats recyclés en continu.
- de l'efficacité de mise en application d'une combinaison de moyens de traitement mécaniques de réduction et séparation granulaire, et d'opérations de tri sélectif et/ou de concentration (méthodes optiques, densimétriques, physico-chimiques).

Une revue des techniques d'élaboration et de leurs avantages/faiblesses est proposée ci-après.

■ 2.2.1. Concassage – Broyage

Le choix du type de concasseur/broyeur conditionne la qualité du granulat recyclé (l'utilisation de matériels de test à l'échelle labo/pilote, rend toutefois difficile la généralisation des observations à l'échelle industrielle) :

- percuteurs : plus faible pourcentage de mortier adhérent ; moins d'éléments plats ;
- mâchoires + Percuteurs à marteaux : favorables à la diminution du paramètre « absorption d'eau » des GR ;

- performance percuteurs > mâchoires > giratoires ;
 - broyeur à boulets (non employé dans l'élaboration des granulats à ce jour) : la réduction granulaire par attrition (ex : technologie ADR), combinée à un classificateur à air, est efficace pour séparer les fractions de fines et grossières ;
- L'augmentation du nombre d'étages d'élaboration mis en œuvre (I, II, III, ...) a pour effet :
- plus faible pourcentage de mortier adhérent ;
 - diminution de l'absorption d'eau des GR ;
 - augmentation du taux de fines des GR ;
 - baisse du taux de récupération des gravillons recyclés (balance avec la recherche de la libération maximale du granulat naturel d'origine).

Influence de la maille de libération sur les propriétés des GR :

- si l'on vise des GR aux propriétés proches de celles des granulats d'origine (faible porosité, bons coefficients de forme, bonne résistance à la fragmentation) : les fractions d/Dmm devront avoir une étendue granulaire limitée et leur propreté superficielle pourra être potentiellement plus élevée.
- si l'on accepte des GR avec des propriétés physiques un peu dégradées (toujours en comparaison des granulats d'origine), : les fractions d/Dmm auront une étendue granulaire plus importante avec un passant à 63 μ m plus réduit.

Influence du type de béton recyclé source sur les effets du concassage :

- un béton de faible résistance génère moins de fines et un plus faible pourcentage de mortier adhérent.

Il n'existe pas de stratégie de concassage/broyage permettant d'obtenir à la fois des GR avec une étendue granulaire limitée et des propriétés physico-mécaniques optimales.

■ 2.2.2. Criblage / Scalpage – Définage

Le criblage des fractions de GR pourrait entraîner une fragmentation (effet par attrition) plus marquée que pour les granulats naturels de première génération. L'élimination des fines (influence positive sur l'absorption d'eau des GR et sur le rendement des concasseurs/broyeurs) peut être réalisée selon différents procédés industriels :

Traitement à sec :

- criblage à sec : plus difficile car la taille de coupure est plus haute pour les granulats naturels ; le risque d'agglomération des fines est plus élevé en cas d'humidité élevée ; la capacité de traitement est limitée ;
- classificateurs à air : faible rendement ; forte sensibilité à l'humidité ;
- aspiration ou soufflage (sur crible, scalpeur, sortie de convoyeur) : pour éliminer les éléments indésirables légers (plastiques,...)

Traitement sous eau :

- criblage sous eau : efficace pour garantir la qualité des granulats pour béton mais nécessite l'organisation d'un circuit fermé des eaux (cuves, bassins, décantation des fines,...) et une source d'eau d'appoint puisque granulats et fines vont absorber une part de l'eau.
- cyclones : coupure précise réservée à la production des sables
- essoreur : efficace pour la qualité des granulats et important pour améliorer le recyclage des eaux de procédé
- séparateur à contre-courant : efficace pour éliminer les indésirables légers (bois, plastiques,...) dans les fractions gravillons
- clarificateur : équipement nécessaire pour accélérer la décantation des fines par floculation les eaux de procédés.

Autres systèmes (élutriation) :

- lit fluidisé : effet positif sur la désagglomération des particules ; bonne efficacité proche du jig¹ à eau ;
- jig à air ;
- table vibrante à air.

Quelques-unes des techniques citées ci-dessus sont employées pour le recyclage des granulats : les opérations de scalpage avant concassage, de criblage le plus souvent à sec avec, pour certaines unités fixes une étape de lavage dans un séparateur, voire un criblage/essorage sous eau pour garantir un haut niveau de qualité par l'élimination des éléments fins indésirables.

■ 2.2.3. Technologies de tri sélectif des granulats recyclés

L'amélioration de la qualité des GR, et donc l'amélioration de l'élimination des éléments indésirables (FL ...X) ou non issus de béton (brique, tuile, verre, céramiques, agrégats d'enrobés, plâtre) peuvent être obtenues en recourant à des techniques complémentaires.

En pratique, ces techniques ont fait l'objet de tests probants en laboratoire ou en phase industrielle, mais sont rarement utilisées par les producteurs de granulats recyclés du fait des coûts engendrés. On peut noter :

- les méthodes de séparation par taille : traité ci-dessus (ex : fraction fine)
- les méthodes densimétriques (bonne efficacité si les constituants ont des densités très différenciées) :
 - table vibrante : séparation par différences de masses volumiques des constituants (procédé de l'industrie minière)
 - système de jig :
 - **le jig à eau est efficace pour des gravillons** ; idem pour la séparation de particules plus fines (2mm – 5mm) de type gypse/béton/

1. Le jig est un procédé de séparation qui consiste en une succession d'expansions et de contractions d'un lit de particule dans un milieu support (eau ou air). Le résultat est la stratification verticale des matériaux.

briques.

o le jig à air (tri aéraulique) est efficace pour la séparation de bois, papier, gypse, briques, ...

- système de flux (contre-courant)
- méthodes physico-chimiques : elles sont nombreuses, certaines d'entre elles déjà couramment utilisées dans ce domaine du recyclage des GR.
 - séparation magnétique : élimination des aciers par over-band ;
 - tri manuel : faibles débits mais bonne différenciation et évaluation de la propreté des GR ;
 - tri automatisé : ce mode regroupe les technologies de **tri optique par capteurs**, permettant de séparer les fractions inertes propres (béton recyclé) et les autres fractions (plâtre, briques, verre, asphalte, béton cellulaire) en fonction de leur forme et de leur couleur. Le taux de récupération visé est proche de 80 %. Ces technologies restent cependant chères et d'une efficacité relative (proportion de GR de qualité, propres et non dégradés de l'ordre de 25 %). Il conviendra de développer des systèmes intégrés (en continu ...) plus spécifiques et adaptés à la production de GR.
 - o technologie proche Infra-Rouge : grande vitesse de mesure ; l'humidification du matériau permet une augmentation du contraste ; bonne efficacité de séparation entre GR et briques, gypse, plastiques, bois, ...
 - o autres technologies : Rayons-X, spectroscopie Raman, ...
 - flottation (mines et enrichissements métallurgiques) : plutôt réservée aux fractions très fines avec la complexité de traitements chimiques) ; technologie peu transposable au domaine des granulats.

■ 2.2.4. Autres traitements de matériaux recyclés

La libération optimisée des granulats naturels de première génération (action à l'interface mortier/granat) est possible à travers un ensemble de techniques expérimentales, couplées ou non, de type :

- mécaniques : abrasion, sablage, jet hydraulique sous pression ...
- thermiques : cycles gel-dégel, traitements à hautes températures ;
- attaque chimique (acides) ;
- ultra-sonique ;
- électrique ;
- micro-ondes.

D'un point de vue de l'efficacité et de l'environnement, les traitements thermomécaniques (à chaud) apparaissent les mieux adaptés à l'échelle industrielle. Toutefois, le risque est de dégrader les propriétés des granulats obtenus, par effet de fragilisation mécanique.

Une étape de prétraitement par saturation en eau des matériaux initiaux est de plus souhaitable.

Une combinaison de méthode thermique à chaud et d'attrition mécanique (comme dans un essai Micro-Deval) en seconde phase serait aussi une piste intéressante à des fins d'industrialisation.

D'autre part, un taux de récupération élevé de fraction fine après traitement n'est pas un indicateur de la propreté finale du GR.

Au-delà de la performance des techniques de séparation mises en œuvre, il convient de prendre aussi en compte les critères suivants : énergie consommée, risques sanitaires, bruit généré, production de coproduits non valorisables, coûts de production, applicabilité à une échelle industrielle, ...

■ 2.3. Bonnes pratiques de gestion de plateforme

Les granulats recyclés destinés à la production de nouveaux bétons sont produits principalement sur des plateformes de recyclage de matériaux inertes de démolition du BTP. Plus ponctuellement, les matériaux peuvent être produits dans le cadre d'une opération de déconstruction ponctuelle unique (les matériaux sont issus d'un seul et même maître d'ouvrage), ou sur des sites annexes à des unités de préfabrication ou de production de béton prêt à l'emploi.

Le présent paragraphe n'a pas vocation à se substituer aux obligations réglementaires (droit de l'urbanisme, droit de l'environnement), contractuelles ou normatives. L'objet est d'attirer l'attention sur les spécificités des sites de recyclage, et plus particulièrement de ceux qui se destinent à produire des granulats destinés aux marchés du BPE.

■ 2.3.1. Plateformes de recyclage industrielles

La caractéristique principale de ces sites est la diversité des provenances des matériaux de démolition qu'ils traitent : terrassements, déconstruction urbaine, travaux routiers, réseaux, centrales à béton, etc. Afin d'assurer une qualité acceptable des produits recyclés dans le temps, la procédure d'admission documentée et rigoureuse prévue par la réglementation est indispensable. Celle-ci comprend notamment les critères d'acceptation précis (matériaux admis, matériaux refusés, matériaux acceptés sous conditions de vérifications et de traitements complémentaires) qui sont corolaires d'une assurance qualité optimale.

Un bon niveau de communication des règles d'admission des déchets au recyclage en amont de la contractualisation (réalisation des chantiers de démolition, évacuation d'une industrie, etc.) est de nature à améliorer la qualité des produits finis. Il est donc recommandé de compléter cette communication par la visite

des sites afin d'ajuster les exigences de tri et de préparation sur chantier et de se donner les moyens de contrôler la qualité des matériaux.

Sur la plateforme elle-même, l'accent doit être porté sur la surveillance des matériaux entrants : clôture du site, présence permanente de personnel, fermeture du site en dehors des heures de fonctionnement. La formation et la sensibilisation régulière du personnel du site aux critères d'admission et de refus, ainsi que la mise au point d'un document ou de panneaux de signalisations illustrés par des pictogrammes ou des photos compléteront utilement le dispositif.

L'existence d'un suivi documentaire permettant d'associer chaque chargement entrant à un chantier d'origine permettra, en cas de dérive de la qualité de la production, de prendre des mesures correctives rapides et efficaces vis-à-vis de l'origine (suspension des apports, amélioration du tri sur chantier ou de l'unité de production des déchets, ...).

Si la plateforme admet plusieurs types de matériaux, elle devra disposer d'autant de zones de déchargement identifiées de manière à éviter toute confusion, ainsi que d'une zone destinée aux produits non conformes. La planéité et la stabilité de l'aire de déchargement sont à surveiller particulièrement.

Selon la complexité de l'installation, celle-ci peut être amenée à fabriquer plusieurs qualités de granulats recyclés. La constitution des stocks de matériaux et la méthode de reprise au stock se font selon les règles de l'art que pour assurer la qualité des granulats naturels (voir guide <http://dtrf.setra.fr/pdf/pj/Dtrf/0000/Dtrf-0000724/DT724.pdf>) : drainage de la plateforme, absence de chevauchement des stocks en pied, limitation de la ségrégation des matériaux, reprise des matériaux perpendiculaire.



Figure 9 plateforme de recyclage industrielle (crédit photo : UNPG)

Le transport des produits finis vers le site de production de béton (centrale à béton, préfabricant) est généralement fait par camion. Outre la suppression des

envols de poussières au cours du transport grâce à un dispositif de bâchage simple à mettre en place, la propreté des bennes de transport doit faire l'objet d'une surveillance permanente.

Plus généralement, comme sur toute installation industrielle, la conception du site et sa gestion doivent prendre en compte les problématiques de qualité, de santé-sécurité et d'environnement : envol des poussières, de gestion des eaux pluviales – voire des eaux de procédés, et de séparation des flux (engins, camions, et piétons). La fréquence minimale de réalisation des analyses géotechniques et environnementales de matériaux produits sont fixés par les normes et réglementations. Selon la place disponible et l'importance du site, il est possible d'opter soit pour la caractérisation de stocks constitués en lots périodiques de production, soit pour un contrôle de production en continu.

À ce stade, et comme pour les granulats naturels, il n'existe pas encore sur le marché d'appareils d'analyse en continu permettant d'analyser en cours de production les paramètres clés de la qualité des granulats recyclés (teneur en fines, en sulfates, constituants et indésirables). Notons toutefois que des systèmes de mesure de la granulométrie en continu sont disponibles, mais encore peu répandus.

■ 2.3.2. Opérations de recyclage in-situ

Ces opérations qui peuvent être réalisées sur chantier de démolition ou sur un site de production de BPE ou de préfabrication se différencient du recyclage sur plateforme par une plus grande homogénéité en principe des matériaux d'apport. La maîtrise du gisement de matière première secondaire est facilitée et il est souvent possible de déterminer le type ou la provenance des constituants d'origine du béton.

La production des granulats recyclés y est alors le plus généralement faite par campagne ponctuelle (dans le cas d'un chantier), périodique (dans le cas d'une unité de production de béton), au moyen d'installations mobiles ; il devient alors nécessaire d'allotir la production et de la caractériser par lot, afin d'ajuster les formulations du béton à chaque opération de recyclage.

■ 2.4. Utilisation des produits

L'utilisation de granulats recyclés pour la réalisation de bétons de structure peut se faire selon deux modalités différentes :

- **l'incorporation de granulats recyclés purs** dans la formulation des bétons selon une proportion choisie dans la formule,
- l'incorporation d'un **prémélange** qui se définit par le mélange de granulats naturels et de granulats recyclés réalisé sur plateforme de recyclage ou sur une carrière selon une proportion fixée par le producteur.

	Intérêts	Points d'attention
Recyclés purs	<ul style="list-style-type: none"> – Possibilité de formuler tous les bétons quelle que soit la classe d'exposition – Possibilité d'utiliser les bons de pesée pour assurer la traçabilité – Possibilité de contrôler les pourcentages d'incorporation pour les utilisateurs finaux – Mise à disposition des résultats d'essais sur les granulats recyclés 	<ul style="list-style-type: none"> – Immobilisation d'au moins deux cases/silos de l'unité de production de béton ou de l'usine de préfabrication pour le sable et le gravillon recyclé – Risque de difficulté d'écoulement des matériaux en cas de faible utilisation – Impact de la variabilité sur les bétons les plus dosés en recyclés – S'assurer de la maîtrise de l'eau (absorption, teneur en eau des granulats, ...) – S'assurer que la distance de transport des recyclés n'impacte pas l'ACV
Prémélanges	<ul style="list-style-type: none"> – Incorporer de faibles proportions de granulats recyclés dans une majorité de bétons – Possibilité de disposer d'installations de lavage (élimination des fines et du plâtre) – Possibilité d'utiliser les frets retour de granulats pour assurer le transport des matériaux de démolition ou des granulats recyclés – Possibilité de disposer de plus de place pour le stockage des matériaux si le prémélange est réalisé sur carrière – Possibilité d'économiser le gisement sur carrière 	<ul style="list-style-type: none"> – S'assurer que la distance de transport des prémélanges et de ses constituants n'impacte pas défavorablement l'ACV – Assurer la traçabilité du pourcentage d'incorporation des recyclés dans les prémélanges et indiquer ces taux sur les bons de livraison aux producteurs de béton – Difficulté de contrôler le pourcentage d'incorporation de recyclé dans le sable a posteriori (nécessite de connaître les caractéristiques du sable recyclé et en particulier la teneur en sulfates solubles dans l'eau qui est le paramètre le plus fiable pour suivre le pourcentage de recyclés) – En cas de différence de densité trop importante entre le granulat recyclé et le granulat naturel et de coupure granulaire étendue, veiller à éviter les manipulations trop nombreuses lors du chargement-transport-déchargement afin de limiter la ségrégation. – Aucune expérience industrielle du procédé n'a été menée dans le cadre du projet RECYBETON

NOTE : Qu'il s'agisse de granulats recyclés purs ou de prémélanges, les granulats incorporés dans un béton doivent être marqués CE et à ce titre remplir toutes les exigences relatives au marquage CE des granulats (cf. § 2.6).

■ 2.5. Caractérisation et caractéristiques des granulats recyclés

Les granulats recyclés issus de la déconstruction de béton sont composés de granulats naturels et d'une gangue de pâte cimentaire adhérente.

Un grand nombre des méthodes actuelles d'essais applicables aux granulats naturels sont soit applicables en l'état aux granulats recyclés (car rédigés spécifiquement ou prenant en compte ces matériaux), soit avec des adaptations à introduire lors de futures révisions ; certaines ne sont pas à utiliser en raison de leur inadéquation.

La gangue cimentaire affecte les caractéristiques des granulats recyclés par rapport à celles du granulats naturel parent, notamment la masse volumique et l'absorption d'eau.

De ce fait, il convient de déterminer et suivre finement ces performances pour la production de nouveaux bétons.

■ 2.5.1. Caractérisation

Un granulats recyclé issu de béton déconstruit est caractérisé par la présence d'une pâte cimentaire (mortier) adhérente au granulats naturel initialement utilisé. Pour les fractions les plus petites (sables), la proportion de pâte résiduelle est plus importante que pour les gravillons.

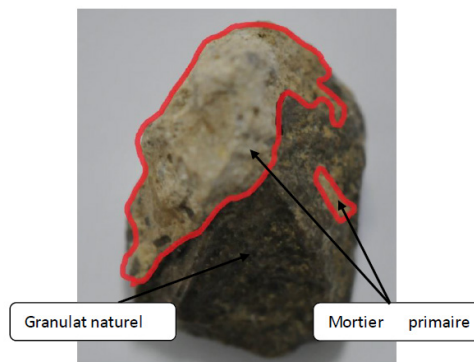


Figure 10 constitution d'un granulats recyclé¹

1. Deodonne K., « Etudes des caractéristiques physico-chimiques de bétons de granulates recyclés et de leur impact environnemental », Thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg, 2015

Le granulat recyclé doit être caractérisé dans son ensemble via cette matrice cimentaire et le granulat naturel lors des essais de type et d'autocontrôle.

Si parmi les normes d'essai actuelles, certaines n'ont pas été spécifiquement rédigées pour les granulats recyclés, elles peuvent, toutefois, explicitement ou non, leur être appliquées sans adaptation (NF EN 933-1, NF EN 933-3...).

D'autres normes d'essais sont applicables exclusivement aux granulats recyclés car rédigées dans ce but (NF EN 933-11). C'est cette même norme NF EN 933-11 qui sera appliquée pour déterminer la proportion de gravillon recyclé dans un prémélange de gravillon recyclé.

Enfin, un dernier groupe de textes nécessiteront, au fil de leur révision, une adaptation pour être pleinement applicables aux granulats recyclés (essais cribles pour l'alcali-réaction...).

Norme d'essai	Applicable aux GR	Applicable aux GR mais norme à réviser/adapter	Non applicable aux GR
NF EN 1097-1: Résistance à l'attrition (micro-Deval).	X		
NF EN 1097-2: Résistance à la fragmentation (Los Angeles)	X		
NF EN 1367-1 : Résistance au gel	X		
NF EN 1097-6 : Détermination de la masse volumique et de l'absorption d'eau	X		
NF EN 1744-1 : Analyse chimique (Chlorures et sulfates solubles dans l'eau)	X		
NF EN 1744-5 : Détermination des sels chlorures solubles dans l'acide			X Norme inadaptée, bien que rédigée spécifiquement pour les granulats recyclés. Privilégier la mesure des chlorures dans l'eau (NF EN 1744-1)

Norme d'essai	Applicable aux GR	Applicable aux GR mais norme à réviser/adapter	Non applicable aux GR
NF EN 1744-6 : Détermination de l'influence d'un extrait de granulat recyclé dans le temps de prise du ciment	X		
NF EN 933-1 : analyse granulométrique par tamisage	X		
NF EN 933-11 : Essai de classification des gravillons recyclés selon leur composition	X		
NF EN 933-3 : Coefficient d'aplatissement	X		
NF EN 933-9 : Essai de valeur au bleu	X		
XP P 18-543 : Analyse pétrographique	X		
XP P 18-544 : Dosage des alcalins solubles	X		
NF P 18-594 – alcali-réaction Essais cribles (microbar, autoclave)		X Application difficile liée à la forte absorption d'eau	
Essai long terme	X		

Tableau 7 application normes d'essais granulats aux GR

■ 2.5.2. Caractéristiques

De par sa composition, les performances d'un granulat recyclé sont la combinaison de celles du granulat naturel d'origine et de la matrice cimentaire adhérente. En fonction de sa proportion et de ses propriétés, cette dernière module les résultats des essais réalisés sur les granulats recyclés.

La caractéristique d'absorption d'eau est fortement influencée par la quantité de pâte cimentaire présente et ce sont donc les sables recyclés, pour lesquels la

proportion de cette pâte est la plus élevée, qui voient leurs absorptions d'eau fortement augmentées par rapport à un sable naturel.

Des indications sur les caractéristiques mesurées dans le cadre du projet RECYBETON sont données au paragraphe 5.2.

■ 2.6. Contrôles de fabrication - Marquage CE, étiquetage

Les producteurs de granulats recyclés devront faire apparaître dans leurs documents qualité les dispositions particulières qu'ils mettent en œuvre pour ces matériaux.

■ 2.6.1. Les spécifications réglementaires des granulats recyclés

Conformément au Règlement Produits de Construction (Art. 4 et 8 du RPC), comme pour tous types de granulats, la mise sur le marché des granulats recyclés pour béton est soumise à l'obligation réglementaire du marquage CE.

Depuis le 1er juillet 2013, les fabricants déclarent les caractéristiques de leurs produits :

- dans une déclaration des Performances (DdP) en appliquant les exigences harmonisées de la norme européenne NF EN 12620+A1 "granulats pour béton" de 2008 (voir Annexe 6.2) ;
- dans une fiche d'information du marquage CE (étiquette CE).

La conformité des granulats recyclés pour le béton aux performances déclarées par le fabricant dans la DdP doit être démontrée par la détermination du produit-type (essai de type) et par la maîtrise de la production des granulats (MPG). Dans son manuel de MPG, le producteur indique le système d'Evaluation et de Vérification de la Constance des Performances (EVCP) qu'il applique dans le cadre du marquage CE. Deux systèmes d'EVCP sont possibles :

- Système 4 : le producteur établit une déclaration des performances déclarant qu'il maîtrise la production et les caractéristiques de ses granulats ;
- Système 2+ : cette déclaration des performances s'appuie sur le certificat de conformité de la maîtrise de la production des granulats délivré par un organisme notifié.

La traçabilité entre déclaration des performances, bordereau d'enlèvement et fiche d'informations de marquage CE doit être assurée, par exemple à l'aide d'un code. Ces informations doivent être disponibles pour l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement en aval. Certaines informations doivent figurer impérativement sur le bordereau d'enlèvement : lieu de production, lieu de vente s'il est différent du lieu de production, nom du producteur, nom du fournisseur initial (en cas de négoce), type de granulat (exemple : granulat recyclé Rcug 90), classe granulaire,

code assurant la traçabilité avec la fiche d'informations de marquage CE, N° de la norme NF EN 12620, date d'expédition, n° du bordereau d'enlèvement.

Les informations concernant les organismes notifiés européens peuvent être consultées sur le site :

http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/nando/index.cfm?fuseaction=directive.notifiedbody&dir_id=33

■ 2.6.2. Les spécifications contractuelles des granulats recyclés

La norme NF P 18-545 comporte plusieurs clauses spécifiques aux granulats recyclés pour le béton dans son article 10, sur la base notamment des catégories européennes de la norme NF EN 12620 :

- classification des constituants selon NF EN 933-11 ;
- sulfates solubles dans l'eau selon NF EN 1744-1 ;
- chlorures solubles dans l'acide selon NF EN 1744-5 ;
- influence sur le temps de prise des ciments selon NF EN 1744-6.

Ces caractéristiques doivent être déterminées en plus des caractéristiques usuelles des granulats (voir NF P 18-545, art.10).

La norme NF P 18-545 (2011) propose une sélection et un regroupement sous forme de "code" des caractéristiques et catégories des granulats adaptées au marché français. Les prescriptions contractuelles doivent donc en principe porter sur les caractéristiques des granulats recyclés et sur les codes de cette norme.

Cette norme impose des critères de régularité, de conformité et d'acceptation des produits et présente un modèle de Fiche Technique Produit (FTP) (voir Annexe 6.3) qui synthétise les engagements du producteur et les résultats obtenus. **Dans le cas de prémélanges de sable ou de gravillon, le taux de mélange doit être indiqué sur la FTP.**

Une certification volontaire des granulats recyclés, comme la marque NF (ou équivalent), constitue un gage de qualité supplémentaire par rapport à la déclaration du producteur dans sa FTP des caractéristiques des granulats recyclés pour béton. Elle est à prendre en compte comme élément de modulation du contrôle extérieur.

La marque NF devrait évoluer dans un avenir proche, afin de s'appliquer également aux prémélanges de granulats naturels et de granulats recyclés et garantir ainsi le taux de granulats recyclés dans le prémélange. Des informations supplémentaires sur la marque NF-Granulats sont disponibles sur le lien <https://certification.afnor.org/qualite/nf-granulats>.

Les caractéristiques des granulats recyclés pour béton (purs ou en prémélange) et les fréquences minimales des essais de contrôle associées que le producteur de granulats est tenu de réaliser contractuellement sont proposées dans le tableau ci-dessous.

Caractéristique	Méthode d'essai	Code	Catégorie	Types de fréquence d'essai ^a	
				Temporelle	Quantitative (en tonne)
Sulfates solubles dans l'eau	NF EN 1744-1, article 10.2	CR _B , CR _C	SS _{0,3} ^b	1/semaine	1/1000
		CR _D	NF P 18-545, code SS _D V _{SS} 0,7		
Masse volumique	NF EN 1097-6	CR _B , CR _C	≥ 2,0 t/m ³	1/semaine	1/1000
		CR _D	≥ 1,7 t/m ³		
Influence sur le temps de début de prise	NF EN 1744-6	CR _B	A ₂₀ ^d	2/mois	1/2000
		CR _C , CR _D	A ₄₀		
Coefficient d'aplatissement	NF EN 933-3	CR _B , CR _C , CR _D	Fl ₃₅	1/mois	1/4000
Los Angeles	NF EN 1097-2	CR _B , CR _C	LA ₄₀	1/2 mois	1/8000
		CR _D	LA ₅₀		
Chlorures solubles dans l'eau ^c	NF EN 1744-1	CR _B , CR _C , CR _D	A déclarer	2/mois	1/2000
Absorption d'eau mesurée à 24h (WA ₂₄)	NF EN 1097-6	CR _B , CR _C , CR _D	A déclarer	1/semaine	1/1000
Alcalins libérables	XP P 18544	CR _B , CR _C , CR _D	A déclarer	2/mois	1/2000

^a Tout lot de granulat recyclé et dont la production est inférieure aux fréquences d'essais du Tableau NA.3 doit faire l'objet d'un contrôle minimum pour chacune des caractéristiques. La notion de lot est définie par la norme NF P 18-545.

^b Il est proposé dans les présentes recommandations d'adopter le seuil de 0,3 % pour les sulfates au lieu de la valeur de 0.2% utilisée dans la norme actuelle (cf. 3.1).

^c Il est proposé dans les présentes recommandations de privilégier la mesure des chlorures dans l'eau.

^d Il est proposé dans les présentes recommandations d'adopter une catégorie A₂₀ pour CR_B au lieu de A₁₀; ceci compte-tenu de l'incertitude de mesure de la norme d'essai (15 min).

Tableau 8 caractéristiques des gravillons recyclés et fréquences d'essai proposées par le PN RECYBETON

Lorsque le béton est destiné à des environnements de type XF3 ou XF4, la gélivité des granulats recyclés doit être vérifiée selon la norme NF EN 1367-1, pour chaque lot de granulat recyclé utilisé.

Caractéristique	Méthode d'essai	Catégorie	Types de fréquence d'essai ^a	
			Temporelle	Quantitative (en tonne)
Sulfate soluble dans l'eau	NF EN 1744-1, article 10.2	NF P 18-545, code SSD $V_{ss} 0,7$	1/semaine	1/1000
Masse volumique	NF EN 1097-6	$\geq 1,7 \text{ t/m}^3$	1/semaine	1/1000
Influence sur le temps de début de prise	NF EN 1744-6	A_{40}	2/mois	1/2000
Chlorures solubles dans l'eau ^b	NF EN 1744-1	A déclarer	2/mois	1/2000

^a Tout lot de granulat recyclé et dont la production est inférieure aux fréquences d'essais du Tableau NA.4 doit faire l'objet d'un contrôle minimum pour chacune des caractéristiques. La notion de lot est définie par la norme NF P 18-545.

^b Il est proposé dans les présentes recommandations de privilégier la mesure des chlorures dans l'eau.

Tableau 9 caractéristiques des sables recyclés et fréquences d'essai proposées par le PN RECYBETON

■ 2.7. Recommandations pour la caractérisation et le contrôle des granulats recyclés

Concernant la caractérisation et le contrôle des granulats recyclés, le projet national RECYBETON recommande de respecter les exigences propres aux granulats recyclés pour béton des normes NF EN 12620 et NF P 18-545, avec les ajustements suivants :

- lorsque le béton est soumis à un environnement XF3 ou XF4, chaque lot de gravillons recyclés utilisé doit faire l'objet d'un essai de gélivité ;
- pour la prévention de l'alcali-réaction, l'utilisation des essais crible (essai microbar et essai à l'autoclave) est à éviter ; il faut privilégier le bilan des alcalins et/ou l'essai à long terme ;
- les chlorures solubles doivent être déterminés dans l'eau et non dans l'acide.

Dans le cas de prémélanges de sable ou de gravillon, le taux de mélange doit être indiqué sur la fiche technique du produit.

■ 3. SPÉCIFICATIONS LIÉES À L'UTILISATION DES GRANULATS RECYCLÉS

Dans cette partie, on donne des préconisations pour garantir la durabilité du béton et pour prendre en compte les caractéristiques mécaniques dans les calculs de dimensionnement. Un exemple de CCTP-type adapté au bâtiment est proposé en annexe (§ 6.4) à l'attention des prescripteurs, à adapter selon le contexte.

■ 3.1. Taux de substitution des granulats recyclés et durabilité du béton

Les études réalisées dans le cadre du Projet National RECYBETON et de l'ANR ECOREB confirment les recherches précédentes : des bétons peuvent être fabriqués avec des GR, même à des taux de substitution importants. Les caractéristiques physico-chimiques intrinsèques des GR et leur taux de substitution sont des facteurs déterminants vis-à-vis des propriétés de durabilité du nouveau béton. Il existe de nombreuses études dans la littérature, avec des résultats parfois contradictoires qui proviennent de la diversité des GR utilisés, des différentes méthodologies déployées pour maintenir constants les paramètres de composition, et de la diversité des modes opératoires.

Les études menées dans le cadre du Projet National RECYBETON sur les propriétés de durabilité conduisent aux conclusions suivantes :

- en raison de l'hétérogénéité et de la variabilité des sources de GR, il faut accorder plus d'attention au contrôle de la régularité des caractéristiques des GR. La

- variabilité « naturelle » des GR doit être prise en compte pour la détermination des fréquences de mesure de contrôle, ainsi que pour les valeurs seuils ;
- les GR affectent de façon prévisible les performances du béton en matière de propriétés de transfert, selon une intensité qui dépend des caractéristiques intrinsèques des GR (porosité), du taux de substitution et de la compacité de la matrice cimentaire du nouveau béton.
 - la résistance au gel des GR dépend des caractéristiques du béton d'origine. Les bétons de GR sont résistants aux cycles de gel/dégel avec ou sans sels de déverglaçage, du moment que la résistance au gel des gravillons GR est vérifiée, et que les règles de formulation des bétons résistant au gel sont respectées (teneur en liant, rapport E_{eff}/L_{equi} , teneur en air entraîné...) ;
 - les risques de réaction alcali-silice sont à étudier en utilisant les mêmes méthodologies que pour les bétons de granulats naturels. Il est important de caractériser des lots homogènes. Les GR peuvent libérer des quantités importantes d'alcalins solubles dans l'eau, en particulier les sables de GR qui contiennent une part importante de pâte de ciment adhérente. Les GR peuvent également contenir des phases de silice instables contenues dans certains granulats naturels spécifiques, et d'éventuels polluants. Parmi les essais préconisés par le fascicule FD P18-542, les essais accélérés de type « microbar » et « autoclave » devront être adaptés pour tenir compte de la forte absorption d'eau des granulats recyclés. L'essai à long terme est à privilégier ;
 - pour le risque de formation d'ettringite ou de thaumasite lié aux réactions sulfatiques, compte tenu des résultats des études effectuées et des recherches antérieures¹, les recommandations proposées sont les suivantes :
 - teneur maximale en sulfates solubles dans l'eau pour les GR : 0,3 % (la norme en vigueur fixant actuellement cette valeur à 0,2 %, cf. § 1.3) ;
 - teneur maximale en sulfates solubles dans l'eau pour un mélange GR+GN : 0,2%.

Par ailleurs, en ce qui concerne les propriétés du béton frais, les études ont permis de montrer que, l'incorporation de gravillons recyclés, quel qu'en soit le taux a relativement peu d'influence sur la maniabilité et le comportement rhéologique. En ce qui concerne l'incorporation de sable recyclé, des différences significatives sur le comportement à l'état frais apparaissent même pour des taux faibles.

L'ensemble des travaux menés au sein du PN RECYBETON conduisent à proposer de nouveaux taux d'incorporation pour les gravillons recyclés de type 1 et 2, ainsi que pour les sables recyclés, présentés dans le Tableau 10 et le Tableau 11. Pour rappel, les dispositions normatives actuelles sont indiquées dans

1. Orsetti S., « Influence des sulfates sur l'apparition et le développement de pathologies dans les matériaux de génie civil traités ou non aux liants hydrauliques. Cas du plâtre dans les granulats issus de produits de démolition », Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Février, 1997

le paragraphe 1.3. Par ailleurs, des taux plus importants sont envisageables, mais devront être justifiés, par exemple en empruntant une approche performantielle de la durabilité.

D'autre part, les résultats acquis par le projet RECYBETON ne justifient pas le maintien d'une valeur limite de classe de résistance en compression au-delà de laquelle le recyclage serait à déconseiller.

	X0		XC1, XC2		XC3, XC4, XF1		XD1, XS1		XF2, XD2, XD3		XS2, XS3		XF3, XF4*		XA
Gravillon recyclé type 1	60	40	60		30	50	30	50	20	40	10	30	10	30	5***
Sable recyclé**	30	10	20		10	20	10	20	10	15	10	15	5***	15	5***
Règles de formulation complémentaires		/	E_{eff}/L_{eq} max abaissé de 0,05		/	E_{eff}/L_{eq} max abaissé de 0,05	/	E_{eff}/L_{eq} max abaissé de 0,05	/	E_{eff}/L_{eq} max abaissé de 0,05	/	E_{eff}/L_{eq} max abaissé de 0,05	/	E_{eff}/L_{eq} max abaissé de 0,05	
* granulats non gélifs															
** sable recyclé présentant une absorption d'eau inférieure à 10 %															
***uniquement pour les granulats recyclés issus de bétons de retour(cf. NF EN 206/CN : 2014)															

Tableau 10 *taux maximum (% massique) de substitution pour les gravillons recyclés de type 1 et le sable recyclé*

	X0		XC1, XC2		XC3, XC4, XF1		XD1, XS1		XF2, XD2, XD3		XS2, XS3		XF3, XF4*		XA
Gravillon recyclé type 2	40	20	30		15	25	15	25	10	20	5	15	5	15	0
Sable recyclé**	15	5	10		5	10	5	10	5	5	5***	5	5***	5	5***
Règles de formulation complémentaires		/	E_{eff}/L_{eq} max abaissé de 0,05		/	E_{eff}/L_{eq} max abaissé de 0,05	/	E_{eff}/L_{eq} max abaissé de 0,05	/	E_{eff}/L_{eq} max abaissé de 0,05	/	E_{eff}/L_{eq} max abaissé de 0,05	/	E_{eff}/L_{eq} max abaissé de 0,05	
* granulats non gélifs															
** sable recyclé présentant une absorption d'eau inférieure à 10%															
***uniquement pour les granulats recyclés issus de bétons de retour (cf. NF EN 206/CN : 2014)															

Tableau 11 *taux maximum (% massique) de substitution pour les gravillons recyclés de type 2 et le sable recyclé*

Pour les gravillons de type 3, REYCBETON recommande de conserver les valeurs de la norme NF EN 206/CN : 2014.

De même, les dispositions relatives aux bétons de chaussées restent inchangées.

Dans le cas de l'utilisation de prémélanges (cf. § 2.4) de gravillons, les taux maxima du Tableau 10 et du Tableau 11 s'entendent comme le rapport entre la masse des gravillons recyclés et la masse totale des gravillons.

La même règle s'applique pour les prémélanges de sable. Dans ce cas, les utilisateurs doivent veiller à disposer des moyens de vérifier la quantité et sable recyclé dans le prémélange (cf. Tableau 13 nota c).

Synthèse des recommandations pour l'obtention de la durabilité du béton

Le projet national RECYBETON recommande, au vu des études réalisées et dans le respect des exigences de durabilité du béton :

- de prendre en compte un nouveau taux de sulfates plafond pour le granulat recyclé, en limitant plus sévèrement le taux de sulfates pour l'ensemble des granulats de la formule ;
- d'utiliser le bilan des alcalins ou l'essai à long terme pour évaluer le risque de développement de l'alcali-réaction d'une formule de béton recyclé ;
- d'utiliser des valeurs limites de taux d'incorporation des granulats recyclés supérieures aux valeurs indiquées dans la norme NF EN 206/CN:2014, pour les gravillons recyclés de type 1 ou 2, et pour les sables recyclés présentant une absorption d'eau limitée. Ces valeurs dépendent, pour chaque type de granulat recyclé considéré, de la classe d'exposition du béton et du rapport E_{eff}/L_{equi} . Ces valeurs limites sont valables quelle que soit la résistance à la compression du béton.

■ 3.2. Dimensionnement des ouvrages

■ 3.2.1. Généralités

Les règlements de calcul classent généralement les bétons par leur résistance caractéristique en compression, grandeur avec laquelle on corrèle les autres propriétés mécaniques utiles à l'ingénieur de structure. Lorsqu'on substitue une partie des granulats naturels par des granulats recyclés, on doit généralement adapter la formule pour maintenir l'ouvrabilité et la résistance en compression (cf. 4.2). Suivant le taux de recyclage adopté, on constate une certaine altération des propriétés mécaniques secondaires, liée au surcroît de porosité apportée par la gangue d'ancienne pâte de ciment contenue dans les granulats recyclés. C'est ce phénomène qu'on cherche à quantifier dans les pages qui suivent. Par contre, l'observation des règles de formulation du Tableau 10 et du Tableau 11 garantissent la non dégradation des propriétés de transport des bétons de granulats

recyclés par rapport à des bétons de granulats naturels de même résistance en compression spécifiée. **Par conséquent, les valeurs d'enrobage préconisées par l'Eurocode 2 restent inchangées.**

Les recommandations énoncées résultent de l'exploitation du plus grand nombre possible de résultats d'essais (nombre très variable selon la propriété envisagée). Par ailleurs, on a essayé de tirer parti d'une certaine analogie existant entre les BGR et les bétons légers.

Pour des taux de GR assez faibles, on admet que la variation de certaines propriétés pourra être en pratique négligée. Pour les taux élevés, une vérification expérimentale des propriétés mécaniques des bétons est recommandée.

Les problèmes structuraux de béton armé les plus sensibles aux propriétés différentes des BGR sont l'ELU de flambement des poteaux (en raison du module plus faible et du fluage plus grand), l'ELU de résistance à l'effort tranchant des dalles et des poutres sans armatures transversales (en raison de la résistance en traction plus faible), l'ELS de limitation des flèches (en raison du module et du fluage). Se posait aussi la question de l'utilisation des BGR dans les structures ou éléments précontraints, pour lesquels des taux limites de recyclés plus faibles qu'en béton armé sont recommandés.

■ 3.2.2. *Divers domaines du taux de GR à considérer pour le dimensionnement des structures en béton armé ou précontraint*

Alors que l'utilisation des granulats recyclés dans le béton armé est déjà couverte par la norme, les présentes recommandations proposent d'étendre cette pratique au béton précontraint. Pour chaque mode constructif, on distingue un premier domaine dans lequel les modèles de l'Eurocode 2 peuvent être utilisés tels quels (c'est-à-dire sans prise en compte de la présence de GR) et un second domaine dans lequel certains des modèles doivent être amendés de façon forfaitaire. Pour des dosages encore plus élevés, il sera nécessaire d'identifier et de circonscrire un lot de granulats recyclés et de l'homogénéiser si nécessaire afin de limiter la variabilité des propriétés du béton recyclé. Enfin, à partir d'un certain seuil, des tests seront nécessaires afin de fournir au projeteur des valeurs expérimentales pour les propriétés mécaniques critiques du matériau.

% de granulats* recyclés	0	15	25	40	100
Béton armé	EC ₂ sans modification	EC ₂ avec modifications**			Identification de lot de GR et mesure des propriétés des bétons
Béton précontraint	EC ₂ avec modifications**	Identification de lot de GR et EC ₂ avec modifications**	Identification de lot de GR et mesure des propriétés des bétons		
* soit le rapport (masse de sable et de gravillons recyclés)/(masse totale de granulats)*100					
** les modifications sont listées dans le paragraphe suivant.					

Tableau 12 *taux de recyclages et approches correspondantes du calcul des structures en béton recyclé*

■ 3.2.3. Modifications forfaitaires à apporter aux règles de l'EC2

Il s'agit principalement de l'EN 1992-1-1, mais est aussi concernée l'EN 1991. Seules les modifications principales sont indiquées, *sans balayage exhaustif de l'EC2*.

Notation. Le taux massique de substitution des recyclés (masse de sable et de gravillon recyclés)/(masse totale de granulats) est noté τ_{rm} , compris entre 0 et 1.

EN 1991 - Densité (en particulier pour le calcul du poids propre)

La clause de l'EN 1991 qui concerne la densité est modifiée comme suit. La densité du béton armé est :

$$\rho = 2,5 - 0,22\tau_{rm}$$

Elle ne s'applique pas si l'on est dans le domaine où les règles de l'EC2 ne sont pas modifiées.

EN 1992-1-1 (Eurocode 2)

(les numérotations qui suivent renvoient aux paragraphes correspondants de l'Eurocode 2)

EC2/3.1.2 Résistance en traction

Les formules du tableau 3.1 qui donnent la résistance moyenne f_{ctm} doivent être modifiées en leur appliquant le facteur réducteur η_t ci-dessous :

$$\eta_t = 1 - 0,11\tau_{rm}$$

EC2/3.1.3 Module d'élasticité

La formule du tableau 3.1 qui donne le module moyen E_{cm} doit être modifiée de la façon suivante :

$$E_{cm} = 22\alpha_E \left[1 - \left(1 - \frac{0,73}{\alpha_E} \right) \tau_{rm} \right] \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$$

Dans cette formule, le coefficient α_E est lié au type de granulat selon l'article 3.1.2 (2) :

Type de granulat	Grès	Calcaire	Quartzite	Basalte
α_E	0,7	0,9	1	1,2

A défaut de connaître précisément le type de granulats, $\alpha_E = 1$.

Dans la révision actuelle de l'EC2, le modèle suivant est proposé :

$$E_{cm} = [k_E - (k_E - 7,3) \tau_{rm}] (f_{cm})^{1/3}$$

où $k_E = 10$ pour des granulats siliceux (ou quartzite), et pouvant varier de 5 à 13 pour d'autres natures de granulats naturels.

EC2/3.1.4 Fluage et retrait

Les valeurs issues des modèles proposés dans l'EC2 sont à modifier par l'application des facteurs majorants qui suivent.

Le coefficient de fluage φ déterminé selon 3.1.4 (2) (3) et l'annexe B1 est multiplié par le facteur :

$$\eta_\varphi = 1 + 0,90 \tau_{rm}$$

La déformation de retrait totale (endogène + dessiccation) calculée selon 3.1.4 (6) et l'annexe B2 est multipliée par :

$$1 + 0,82 \tau_{rm}$$

EC2/3.1.5 Relation (σ ; ϵ) en compression pour l'analyse non-linéaire

La loi de comportement reste

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta}$$

avec

$$k = 1,05 \frac{E_{cm} \varepsilon_{c1}}{f_{cm}} \quad (E_{cm} \text{ donné dans le §3.1.3 précédent})$$

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}}$$

La déformation de pic est donnée par l'expression suivante :

$$\varepsilon_{c1} = \left[1 + \frac{0,15k_0}{f_{cm}^2 + 800} \right] \left(\frac{f_{cm}^{0,7}}{k_0} \right)$$

$$k_0 = 1,05 \frac{E_{cm}}{f_{cm}^{0,3}}$$

(f_{cm} et E_{cm} en MPa)

Si on utilise l'expression de E_{cm} de la révision actuelle de l'EC2, la déformation de pic est donnée par la formule suivante :

$$\varepsilon_{c1} = \left[1 + \frac{0,16k_0}{f_{cm}^2 + 800} \right] \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{k_0} \right)$$

$$k_0 = 1,05 \frac{E_{cm}}{f_{cm}^{1/3}}$$

EC2/5.8 Analyse des effets du second ordre

Les critères d'élancement de 5.8.3.1(1), 5.8.4(4) et 5.9(3) ne s'appliquent pas aux BGR. Les rigidités nominales (5.8.7.2) et courbures nominales (5.8.3.3) ne s'appliquent pas aux BGR.

Il est conseillé d'appliquer la méthode générale (5.8.6) dans tous les cas.

EC2/6.2.2 ELU - Eléments sans armatures d'effort tranchant

Dans la formule (6.2.a) de $V_{Rd,c}$, le premier terme doit être multiplié par $(\eta_t)^2$.

Dans la formule (6.2.b), le premier terme v_{min} doit être multiplié par η_t .

Le coefficient v donné par la formule (6.6N) doit être multiplié par η_t .

EC2/6.2.3 ELU - Eléments avec armatures d'effort tranchant.

Dans les formules (6.10.aN) et (6.10.bN) le coefficient v_1 de réduction de la résistance du béton des bielles doit être multiplié par η_t .

Des modifications analogues sont à envisager pour la torsion, pour le poinçonnement et pour le calcul en bielles-tirants.

EC2/7.3.4 ELS – Calcul de l'ouverture des fissures

Dans la formule (7.9), la valeur du coefficient k_t pour un chargement de longue durée doit être modifiée en fonction du facteur η_ϕ du § EC2/3.1.4 ci-dessus selon l'expression suivante :

$$k_t = 0,6 - 0,2 \eta_\phi$$

EC2/7.4 ELS – Limitation des flèches

Les cas de dispense de calcul prévus en 7.4.2 ne sont pas applicables aux BGR. Pour la vérification des flèches par le calcul de 7.4.3, le coefficient β de la formule (7.19) dans le cas d'un chargement prolongé ou d'un grand nombre de cycles doit être modifié selon l'expression ci-dessous :

$$\beta = 1 - 0,5 \sqrt{n_\phi}$$

EC2/3.2.4 Calcul avec les valeurs mesurées

On introduit dans les calculs les propriétés moyennes mesurées. Selon les cas, les valeurs moyennes du module élastique, de la résistance en traction par fendage, du retrait ou du fluage seront mesurées sur des bétons d'étude incorporant des recyclés issus d'un lot identifié et homogénéisé.

Pour le cas particulier de la résistance en traction, la valeur moyenne mesurée $f_{ctm,m}$ doit être comparée à la valeur f_{ctm} qui résulterait des formules de l'EC2. Pour ce faire, il est nécessaire de rendre cohérentes les deux expressions proposées dans le tableau 3.1 de l'EC2 (la première en f_{ck} , la seconde en f_{cm}). On admet :

$$f_{ctm} = 0,3 f_{cm}^{2/3} \text{ pour } f_{cm} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 2,27 \ln \left(1 + \frac{f_{cm}}{10} \right) \text{ pour } f_{cm} > 50 \text{ MPa}$$

On note le rapport des valeurs mesurée et calculée :

$$\eta'_t = \frac{f_{ctm,m}}{f_{ctm}} \leq 1$$

Dans les modifications forfaitaires du § 3.2.3 ci-dessus, on remplace η_t par η'_t .

■ 3.2.4. *Recommandations pour le dimensionnement des ouvrages*

L'usage des granulats recyclés peut s'envisager non seulement pour le béton armé, mais aussi pour le béton précontraint dans des conditions cependant plus restrictives. Pour le dimensionnement des ouvrages en béton contenant des granulats recyclés, le projet national RECYBETON recommande :

- d'utiliser les règles actuelles de calcul définies dans l'Eurocode 2 lorsque le taux d'incorporation des granulats recyclés est faible, hors usage dans le béton précontraint ;
- de modifier forfaitairement certains modèles de calcul de l'Eurocode 2 pour des taux intermédiaires. Sont concernés par ces modifications : la densité, la résistance en traction, le module d'élasticité, le fluage et le retrait, la relation ($\sigma - \epsilon$) en compression pour l'analyse non-linéaire, l'analyse des effets du second ordre et certains paramètres d'état limite de service (ELS) et d'état limite ultime (ELU) ;
- pour les dosages les plus élevés, en complément des modifications forfaitaires précédentes, de mettre en place des procédures afin de limiter la variabilité des propriétés du béton recyclé, et de contrôler expérimentalement les propriétés mécaniques critiques du matériau.

Le tableau présenté en Annexe (cf. § 6.5) récapitule les modifications de propriétés de calcul préconisées, en prenant pour exemple un béton de résistance caractéristique en compression égale à 25 MPa destiné à une partie d'ouvrage en béton armé.

■ 4. PRODUCTION DES BÉTONS CONTENANT DES GRANULATS RECYCLÉS

■ 4.1. Contrôle des constituants à réception - Stockage des granulats recyclés

Le contrôle de production, qu'il découle d'une démarche volontaire ou bien d'exigences réglementaires, normatives ou contractuelles, inclut notamment les deux aspects suivants :

- le contrôle des constituants à réception ;
- la maîtrise du stockage des constituants.

Les recommandations suivantes sont destinées aux producteurs de bétons et de produits en béton utilisant des granulats recyclés (sables et/ou gravillons). Elles considèrent que les exigences adressées au fournisseur de granulats recyclés spécifient :

- la conformité des caractéristiques aux normes NF EN 12620, NF P 18-545, NF EN 206/CN, **et notamment aux tableaux NA.3 et NA.4 de cette dernière norme (cf. § 4.6.2).**
- la spécification de caractéristiques codifiées selon l'usage prévu (A, B, C ou D mais aussi CR_B , CR_C , ou CR_D selon la caractéristique ou Type 1, Type 2 ou Type 3) ;
- l'existence d'un marquage CE (pour le cas d'un granulats recyclé mis sur le marché) ;

– la mise à disposition avant la livraison d’une Fiche Technique Produit.

L’expérience montre que les principaux paramètres à vérifier pour les granulats recyclés sont la teneur en sulfates, le coefficient d’absorption et la régularité granulométrique.

Paramètre	Modalités de contrôle	Critère d’acceptation	Fréquence
Origine	Contrôle documentaire (marquage CE, FTP) avant acceptation du bon de livraison	Conformité avec les exigences adressées au fournisseur et avec la FTP	A chaque livraison
	Contrôle visuel de la granularité, de la proportion de constituants secondaires ^a et des impuretés ^b , avant acceptation du bon de livraison		
Granularité	Essai selon la norme NF EN 933-1	Conformité avec les exigences adressées au fournisseur et avec la FTP	A la première livraison et à chaque modification de la classe granulaire et à chaque modification significative du fuseau granulaire, puis en cas de doute suite au contrôle visuel
Teneur en béton recyclé dans un pré-mélange de gravillons ^c	NF EN 933-11	Conformité à la commande	En cas de doute suite au contrôle visuel

Paramètre	Modalités de contrôle	Critère d'acceptation	Fréquence
Teneur en sulfates ^d	Examen des essais d'autocontrôle du fournisseur de granulats (essai selon la norme NF EN 1744-1 § 10.2 – Sulfates solubles dans l'eau)	Conformité avec les exigences adressées au fournisseur et avec la FTP (Vss maximale limitée à 0,3)	A réception des résultats des essais d'autocontrôle
	Essai selon la norme NF EN 1744-1 § 10.2 – Sulfates solubles dans l'eau		En cas de doute suite au contrôle visuel
Teneur en chlorures (cas de bétons comportant des armatures)	Examen des essais d'autocontrôle du fournisseur de granulats (essai selon la norme NF EN 1744-1 - Chlorures solubles dans l'eau)	Conformité avec les exigences adressées au fournisseur et avec la FTP (existence d'une valeur déclarée)	A réception des résultats des essais d'autocontrôle
	Essai selon la norme NF EN 1744-1 - Chlorures solubles dans l'eau		Si valeur déclarée supérieure à 0,01 %
Absorption d'eau à 24 heures (WA ₂₄) ^e	Examen des essais d'autocontrôle du fournisseur de granulats (essai selon NF EN 1097-6 - Avec les fines dans le cas des sables)	Conformité avec les exigences adressées au fournisseur et avec la FTP (existence d'une valeur déclarée maximale limitée à 10 %)	A réception des résultats des essais d'autocontrôle
	Essai selon NF EN 1097-6 - Avec les fines dans le cas des sables		En cas de différence significative observée lors de la réalisation d'une granularité ou en cas de doute suite au contrôle visuel

^a Les constituants secondaires peuvent être de la brique, du verre, du plastique, des argiles, etc.

^b Les impuretés peuvent être des débris végétaux : brindilles, racines, algues, etc., du charbon ou des résidus divers : plastique, mâchefer, scories, etc. Les impuretés présentes dans des granulats recyclés peuvent amener dans les bétons des désordres visuels de type : remontées en surface de morceaux plastiques, caoutchoucs, scories, etc.

Paramètre	Modalités de contrôle	Critère d'acceptation	Fréquence
^c La vérification de la teneur en béton recyclé dans un prémélange de sable peut se faire par un contrôle de la teneur en sulfate, sous réserve de disposer de la teneur en sulfates solubles du sable naturel et du sable recyclé composant le prémélange. A défaut, le recours à une attestation par une certification volontaire est envisageable.			
^d Les sulfates, issus du plâtre par exemple, ont une action préjudiciable sur la durabilité des bétons (expansions)			
^e La valeur d'absorption d'eau est très importante car elle conditionne la quantité d'eau efficace pour gâcher le béton et elle affecte la rhéologie			

Tableau 13 contrôle à réception des granulats recyclés

Principe	Modalités
Stockage séparé pour éviter les mélanges avec les indésirables	Ne pas stocker les granulats recyclés et des granulats conventionnels dans les mêmes cases/silos/tas séparés Identifier le stockage
Gestion de la teneur en eau et de l'absorption d'eau	En cas de saturation des granulats recyclés pour mieux maîtriser la rhéologie du béton frais, prendre des dispositions pour gérer la teneur en eau et la quantité d'eau de gâchage

Tableau 14 modalités de stockage des granulats recyclés

■ 4.2. Formulation des bétons recyclés

■ 4.2.1. Conséquences des spécificités des granulats recyclés sur la formulation

Les granulats recyclés sont obtenus par concassage/criblage et sont composés des granulats naturels et de mortier résiduel du béton d'origine. Ceci leur confère une texture rugueuse et frottante, comme c'est le cas pour la plupart des granulats naturels concassés. C'est pourquoi, l'incorporation de granulats recyclés (sables, ou gravillons à fort taux) peut conduire à augmenter la teneur en eau efficace E_{eff} pour maintenir le niveau d'affaissement visé, avec des effets négatifs sur les performances mécaniques et la durabilité. Pour éviter d'augmenter la teneur en eau efficace, on utilise des adjuvants réducteurs d'eau (plastifiants ou superplastifiants), au prix d'une certaine augmentation de la viscosité (à valeur d'affaissement constante). Il est à noter que l'incorporation d'un sable recyclé dans une formule existante peut conduire à adapter l'adjuvantation, en termes de dosage, voire de choix des adjuvants.

Selon la qualité du béton d'origine et l'objectif de résistance du nouveau béton, la substitution volumique à eau efficace constante peut affecter ou non la résistance. En cas d'effet négatif, il faut alors diminuer le rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{equi}}$. Ceci peut conduire à augmenter la teneur en ciment ou en liant équivalent, ce que l'on constate principalement sur les chantiers où on a pratiqué le recyclage à fort taux. Enfin, les granulats recyclés héritent du béton d'origine d'une absorption plus importante (typiquement entre 5 à 10%) que celle des granulats naturels (plutôt entre 0 et 3%). Il est donc nécessaire de porter une attention encore plus importante que pour les granulats naturels à la prise en compte de l'eau absorbée dans le calcul de l'eau à ajouter réellement au mélange pour garantir l'eau efficace visée. Les granulats recyclés ont une masse volumique plus faible (de l'ordre de 2200 kg/m³) que celle des granulats naturels. Il est important de prendre ceci en compte lors de la remise au mètre cube d'une formule de béton.

■ 4.2.2. Aide à la formulation

Les mêmes méthodes de formulation que pour les bétons à base de granulats naturels s'appliquent aux bétons incorporant des recyclés, à condition de prendre en compte certaines spécificités. Elles se déclinent suivant les quatre étapes principales suivantes auxquelles il faut rajouter une étape de vérification des propriétés en laboratoire.

Performances visées par le formulateur

Comme pour les bétons de granulats naturels, il est nécessaire de fixer *a minima* un affaissement et une résistance à la compression caractéristique.

Par nature, les granulats recyclés ont des propriétés plus variables que celles des granulats naturels, aspect qui doit être pris en compte lorsqu'on travaille avec des recyclés d'origines multiples. Ainsi, en l'absence d'expérience sur la dispersion sur de grands chantiers, il paraît raisonnable de prendre une marge de sécurité plus importante sur la résistance moyenne à viser par rapport à des granulats naturels. L'augmentation suggérée de marge est de 50% pour un taux de recyclage de 100 % et on peut supposer qu'elle évolue proportionnellement pour des taux de recyclage inférieurs.

Lorsque l'on adopte de très forts taux de recyclage (comme indiqué au § 3.1), il est nécessaire de démontrer la durabilité du béton par des essais performantiels adaptés. A noter que pour une même résistance à la compression, la résistance à la traction d'un béton avec 100% de recyclés est en général plus faible (de l'ordre de 11% en moyenne), ainsi que le module élastique (de l'ordre de 27%) alors que le retrait et le fluage peuvent pratiquement doubler. Ces propriétés devront être vérifiées lorsqu'elles sont critiques pour le projet, au moins au stade de l'étude de formulation, et en accord avec les préconisations du § 3.2.2.

Par ailleurs, le recyclage implique généralement une densité plus faible du béton frais. Lorsque ce point est pris en compte dans la conception structurale (selon le modèle préconisé au § 3.2.3), il devra être vérifié au niveau de la formulation et du contrôle du béton.

Evaluation du E_{eff}/L_{equi}

Le rapport E_{eff}/L_{equi} peut être estimé à partir de la résistance à la compression visée à l'aide d'une formule de type Féret comme ci-dessous, où k_g traduit la qualité des granulats et Rc_{28} est la résistance moyenne du ciment suivant la norme NF EN 197-1. Pour des questions de durabilité, il doit également respecter les spécifications de la norme NF EN 206/CN :2014.

$$f_{cm} = k_g Rc_{28} \left(\frac{1}{1 + 3,1 \frac{E_{eff}}{L_{equi}}} \right)^2$$

Cette formule peut s'appliquer à des bétons avec granulats recyclés en écrivant :

$$k_g = V_{sn} k_{g,sn} + V_{gn} k_{g,gn} + V_{sr} k_{g,sr} + V_{gr} k_{g,gr}$$

où les termes V représentent la proportion volumique (par rapport au volume total de granulats) du sable naturel (sn), du gravillon (gn) naturel, du sable recyclé (sr) et du gravillon recyclé (gr).

On calibre classiquement les termes $k_{g,sn}$ et $k_{g,gn}$ sur des mortiers et bétons dont on connaît la composition et ne contenant que des granulats naturels. Par simplification, on considère souvent que $k_{g,sn} = k_{g,gn}$. Les termes $k_{g,sr}$ et $k_{g,gr}$ peuvent être calibrés de la même façon sur des mortiers et bétons ne contenant que des recyclés. En l'absence de données expérimentales, on peut les estimer, en première approche, par les formules suivantes :

$$k_{g,sr} = 4,42$$

$$k_{g,gr} = -0,0952 MDE + 8,3927 \text{ avec } MDE \text{ est le coefficient Micro-Deval décrit dans la norme NF EN 1097-1.}$$

Seul le résultat de l'essai de résistance à la compression garantit la bonne valeur du rapport E_{eff}/L_{equi} choisi.

Optimisation du rapport G/S

Cette optimisation peut se faire facilement en utilisant par exemple le modèle d'empilement compressible, puisque la spécificité des granulats recyclés est implicitement prise en compte dans la mesure de leur compacité.

On peut également, pour une estimation plus rapide (mais moins précise), utiliser une méthode courante comme celle de Dreux-Gorisse. Dans ce cas, on évalue de façon classique la valeur Y_{Bn} de la méthode (passant à $D_{max}/2$) pour le béton de base avec des granulats naturels. On détermine de la même façon Y_{Br} pour un béton à 100% de recyclés en considérant que les granulats recyclés se comportent comme des granulats concassés. Enfin, pour des taux de recyclages intermédiaires, on propose les variations suivantes :

- pas de variation de Y avec Γ_{gr} , la fraction massique de gravillon recyclé par rapport à la masse totale de gravillon;
- $Y = Y_{Bn} (1 - \Gamma_{sr}) + Y_{Br}$ où Γ_{sr} est la fraction massique (entre 0 et 1) de sable recyclé par rapport à la masse totale de sable.

Ajustement de la teneur en eau

Il est d'autant plus nécessaire d'augmenter l'eau efficace lorsque l'on introduit des granulats recyclés que les granulats recyclés ont une compacité dégradée par rapport à celle des granulats naturels qu'ils remplacent. Ainsi, lorsqu'un granulats concassé est remplacé par un granulats recyclé, la variation d'eau est moindre que lorsque c'est un granulats roulé qui est remplacé. De même, l'effet du sable recyclé est plus marqué que celle du gravillon recyclé.

C'est ainsi que sur la base des données du PN RECYBETON, on propose les corrections d'eau suivantes par rapport à une formule en granulats naturels (où ΔE_{eff} est exprimé en l/m³) :

$\Delta E_{eff} = 8 \Gamma_{gr} + 10 \Gamma_{sr}^2$, quand le sable et le gravillon naturels sont roulés ;

$\Delta E_{eff} = 10 \Gamma_{sr}^2$, quand le sable naturel est roulé et le gravillon naturel est concassé ;

$\Delta E_{eff} = 8 \Gamma_{gr}$, quand le sable naturel est concassé et le gravillon naturel est roulé.

Cependant, ces corrections ne tiennent pas compte d'une modification de l'adjuvantation, souvent nécessaire, comme déjà dit.

■ 4.2.3. *Recommandations pour la mise au point des formulations des bétons*

Pour la formulation des bétons contenant des granulats recyclés, le projet national RECYBETON recommande d'appliquer la démarche générale de formulation des bétons (à base de granulats naturels), sous réserve de prendre en compte certaines spécificités, en veillant notamment à :

- prendre une marge de sécurité plus importante sur la résistance à la compression moyenne visée ;
- vérifier certaines propriétés secondaires (par exemple le module élastique, la résistance en traction, le retrait ou le fluage) lorsqu'elles sont critiques pour le projet de construction ;
- évaluer le rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{equi}}$ en prenant en compte la proportion volumique des granulats recyclés ;
- ajuster l'eau efficace en fonction de la proportion des granulats recyclés et de la nature des granulats naturels ;
- prendre en compte l'absorption d'eau importante des granulats recyclés dans le calcul de l'eau totale du mélange.

■ 4.3. **Propriétés des bétons recyclés**

Le béton recyclé, en termes de microstructure, se distingue des bétons de granulats naturels par la présence de deux générations de pâte de ciment : celle, adhérente aux GR, qui provient de l'ancien béton dont le concassage a produit les granulats recyclés, et celle qui provient de l'hydratation du nouveau ciment ajouté aux GR pour constituer le béton de seconde génération. La figure ci-dessous montre la co-existence de ces deux pâtes, et leur bonne liaison mécanique.

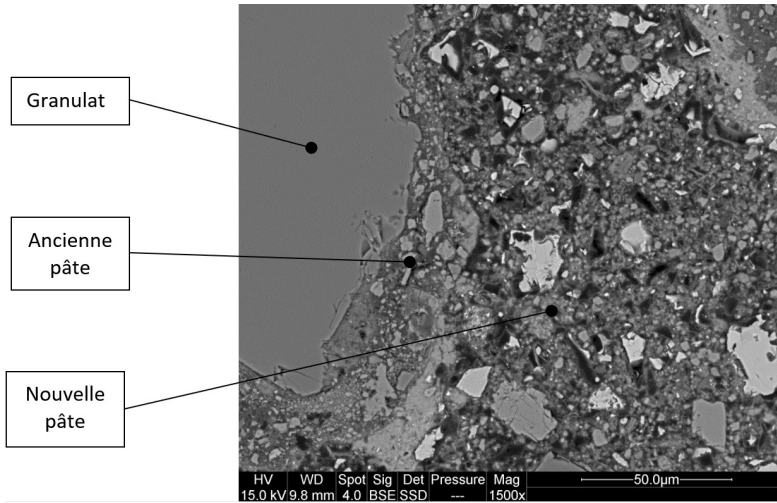


Figure 11 *microstructure du béton recyclé (vue au microscope électronique à balayage) – Crédit photo Ifsttar*

Pour une maniabilité initiale et une résistance à la compression à 28 jours données, le béton de GR diffère du béton traditionnel par un certain nombre d'aspects. Pour de faibles taux de recyclage (jusqu'à 10/15%), les effets de l'introduction de GR sur les autres propriétés des bétons sont mineurs. Avec l'augmentation graduelle du taux de substitution des gravillons, et en remplaçant partiellement ou totalement le sable, on note les tendances suivantes :

- la masse volumique du béton recyclé à l'état frais diminue, car le GR est moins dense que le granulat naturel, et le volume d'eau efficace finit par croître pour des taux de substitution importants ;
- le dosage en ciment reste tout d'abord constant (à faible taux de substitution) puis augmente sensiblement. Cette croissance entraîne inévitablement une augmentation de la chaleur d'hydratation. Lorsque l'augmentation est substantielle, le bilan carbone du béton de GR est affecté, mais il peut être atténué si les distances de transport des granulats recyclés sont courtes ;
- le maintien de l'affaissement dans le temps est un paramètre à surveiller, et il faut parfois utiliser un retardateur ou un surdosage en superplastifiant pour éviter un raidissement trop rapide. Ces modifications apparaissent généralement si un sable de GR est utilisé, même si tous les GR sont entièrement saturés au préalable ;
- le recours à des doses plus importantes de superplastifiant peut impliquer une augmentation de la viscosité plastique du béton frais, pour une même valeur d'affaissement au cône ;

- un autre effet de l’adjuvantation croissante peut être une augmentation du temps de prise ;
- après mise en œuvre, les surfaces horizontales nécessiteront une cure soignée, car la tendance au retrait plastique semble favorisée par de forts dosages de GR ;
- l’évolution de la résistance en compression en fonction du temps n’est pas significativement différente de celle qu’on obtiendrait avec un squelette de granulats naturels purs ;
- le retrait endogène est réduit par rapport à celui des bétons de granulats naturels, du fait de la porosité des granulats recyclés qui joue un rôle de cure interne ;
- suivant la nature du granulat du béton d’origine, la résistance en traction à 28 jours peut se trouver légèrement réduite (de 0 à 20 %, pour un recyclage total) ;
- le module d’élasticité au même âge diminue de façon significative (jusqu’à 30 %, selon les rigidités relatives du granulat naturel et de celui contenu dans le recyclé) à mesure que le retrait de dessiccation augmente (jusqu’à 100 %). Les coefficients de fluage peuvent alors doubler, effet qui se cumule à la diminution du module pour produire une déformation de fluage élevée. Toutefois, le risque de fissuration par retrait empêché ne semble pas augmenter, sauf pour les taux de substitution très élevés ;
- la résistance à la fatigue en flexion est légèrement dégradée ;
- le matériau durci est plus poreux, car plus riche en pâte de ciment. Par conséquent, les transferts, liquides ou gazeux, sont facilités. Le processus de carbonatation est moins affecté, ce qui est heureux car il s’agit du risque le plus critique dans la majorité des applications, selon les classes d’exposition ;
- par contre, la diffusivité des ions chlorures est facilitée. C’est ainsi que pour de forts taux de recyclage, le maintien de la durabilité de la structure, à enrobage de l’acier constant, nécessitera une amélioration de la pâte de ciment ;
- la résistance au gel-dégel peut être obtenue pour les bétons recyclés, à condition que les GR ne soient pas gélifs ;
- alors que la conductivité thermique tend à se réduire, le comportement au feu ne diffère guère de celui des bétons classiques ;
- enfin, lorsqu’un béton architectonique est requis, l’aspect de surface du béton peut révéler sa composition interne, dont notamment la présence de polluants. Cependant, ces « défauts » peuvent être appréciés par les architectes qui souhaitent mettre en valeur la vie antérieure de leurs matériaux de construction.

Par ailleurs, les résultats de lixiviation sur éprouvettes de béton recyclé permettent de montrer qu’il n’y a pas de modification significative du relargage de composés dans les éluats, par rapport à ce qu’on observe avec les bétons de granulats naturels.

■ 4.4. Procédé de fabrication

■ 4.4.1. Stockage

L'utilisation, sur la centrale, d'une (ou deux) coupure(s) supplémentaire(s) de granulats recyclés va conduire à une gestion plus tendue des cases aux sols et/ou des trémies de stockage des granulats. En cas d'utilisation fréquente ou permanente, la question de l'augmentation du nombre de ces cases et/ou trémies risque de rapidement se poser. L'utilisation de prémélanges (voir § 2.4) peut être utile dans cette situation.

■ 4.4.2. Absorption

L'absorption d'un granulats recyclés est, en général, plus forte que pour un naturel, d'où un risque potentiellement accru de raidissement du béton pendant le transport. Néanmoins, l'expérience acquise lors des chantiers expérimentaux de RECYBETON a montré qu'un temps de malaxage classique (par exemple 55 secondes) suffit à un granulats recyclés non saturé pour absorber la majeure partie de l'eau nécessaire à sa saturation. Cela ne nécessite donc pas de modification du process (en particulier, il n'est pas obligatoire de pré-saturer les granulats pour éviter le raidissement prématuré du béton frais).

■ 4.4.3. Humidité

Du fait de leur absorption plus forte, et en fonction de la configuration du stockage, l'humidité des granulats recyclés en production peut se situer à un niveau supérieur à celui des granulats naturels. Pour un sable, l'utilisation de sondes hygrométriques permet de contrôler cette humidité avec une précision adéquate. Pour un gravillon, il n'existe pas de système de sonde. De ce fait, soit il sera pris des dispositions pour imposer l'humidité des granulats (arrosage), soit la fréquence des mesures de teneur en eau sur des échantillons prélevés sur le stock devra être accrue pour assurer une teneur en eau totale constante dans le béton produit.

■ 4.4.4. Attrition et fragmentation

Les essais de laboratoire montrent qu'un temps de malaxage prolongé (de plusieurs minutes) peut engendrer une attrition, et donc un enrichissement en fines de la granularité effective des matériaux. Cependant, on peut penser qu'aucune dégradation significative des granulats ne se manifeste pendant un temps de malaxage industriel classique (typiquement de l'ordre de moins d'une minute).

■ 4.4.5. Cas de l'utilisation de prémélanges

Une solution, pour réduire significativement – voire supprimer – toute difficulté liée à l'utilisation de granulat recyclé dans le procédé de fabrication du béton, est d'utiliser un prémélange : le granulat recyclé est mélangé, en proportion maîtrisée et limitée, à un granulat naturel, en amont de la livraison à la centrale à béton, typiquement en carrière.

Recommandations pour la production du béton contenant des granulats recyclés

L'utilisation de granulats recyclés dans le béton nécessite quelques adaptations dans son procédé de fabrication. Les recommandations RECYBETON portent sur :

- le stockage de coupures supplémentaires ou l'utilisation de prémélanges ;
- l'impact des moindres performances du granulat recyclé : absorption plus forte, humidité potentiellement plus forte, résistance à l'attrition et à la fragmentation plus faible.

■ 4.5. Contrôle de fabrication, bon de livraison, marquage CE, étiquetage et dispositions contractuelles

De façon générale, l'utilisation des granulats recyclés dans le béton ne modifie pas les exigences des textes normatifs. Les principales exigences sont rappelées de la manière suivante :

■ 4.5.1. Marquage CE et marque NF (ou équivalent)

D'un point de vu général et dans le cadre de la Directive Européenne Produits de Construction, le Marquage CE est obligatoire pour les produits de construction concernés. En effet, pour être mis sur le marché, tout produit de construction pour lequel la Commission Européenne a donné mandat au Comité Européen de Normalisation d'établir une norme harmonisée, doit être marqué CE.

Pour le béton prêt à l'emploi, il n'y a pas de Marquage CE car la norme NF EN 206/CN n'a pas fait l'objet d'un mandat de la Commission et ne possède pas de partie réglementaire harmonisée. En revanche le produit doit répondre aux exigences de la norme NF EN 206/CN de décembre 2014. Il peut être certifié NF (ou marque équivalente) par une démarche volontaire dont le référentiel NF 033 impose un niveau d'exigence supérieur à la norme.

Pour les produits préfabriqués en béton, le marquage CE est obligatoire. Le fabricant doit établir une Déclaration des Performances selon les exigences du

Règlement Produits de Construction et des normes européennes harmonisées applicables.

Le fabricant doit alors réaliser ou faire réaliser les contrôles et essais qui lui permettent de définir les performances des caractéristiques essentielles des produits et de garantir leur constance en fabrication.

Le cas échéant, ces contrôles sont effectués ou inspectés par un organisme notifié par l'État.

L'utilisation de granulats recyclés ne modifie pas l'application de ces exigences.

Selon les produits concernés, les normes européennes harmonisées applicables :

- contiennent en elles-mêmes tous les éléments nécessaires relatifs au contrôle de production et au marquage des produits ;
- peuvent renvoyer aux dispositions de la norme EN 206 via la norme EN 13369 « Règles communes pour les produits préfabriqués en béton », ce qui est généralement le cas pour les produits de structure en béton.

■ 4.5.2. *Bon de livraison*

Pour le béton prêt à l'emploi, le producteur doit remettre à l'utilisateur, un bon de livraison mentionnant au moins les informations indiquées dans la norme NF EN 2016/CN.

Le projet national RECYBETON recommande :

- lorsque le taux de granulat recyclé dépasse 15%, que le producteur indique la valeur de ce taux sur le bon de livraison ;
- lorsque les taux de gravillon ou de sable recyclé sortent des limites du tableau NA.5 de la norme NF EN 206/CN:2014, tout en restant inférieurs aux valeurs indiquées au § 3.1 des présentes recommandations, qu'une mention de conformité aux recommandations RECYBETON apparaisse.

■ 4.5.3. *Contrôle de production des bétons recyclés*

Tous les bétons doivent être soumis au contrôle de la production sous la responsabilité du producteur. Le contrôle de la production comprend toutes les mesures nécessaires pour maintenir la conformité des propriétés du béton aux exigences spécifiées.

Il comprend : la sélection des matériaux, la composition du béton, la production du béton, les inspections et les essais, l'utilisation des résultats des essais sur les constituants, sur le béton frais et durci, l'étalonnage de l'équipement, le cas échéant, l'inspection de l'équipement de transport du béton frais, le contrôle de la conformité.

Pour des constructions en béton armé, et dans le cas où le taux de granulats recyclés est supérieur à 15%, il est nécessaire de vérifier la densité du béton frais, dont la moindre valeur (par rapport à un béton de granulats naturels) aura été prise en compte dans les calculs. On vérifiera que la densité du béton est inférieure à la densité de référence du béton de granulats naturels de même classe, diminuée d'une valeur de $0,22\tau_{rm}$ (τ_{rm} est le taux massique de substitution). Par défaut, la valeur de densité de référence sera prise égale à 2,4.

Lorsque le taux de recyclage est supérieur à 40 % (pour du béton armé) ou à 25% (cas du béton précontraint), on doit s'assurer que les propriétés secondaires critiques pour les projets, telles que prises en compte dans la conception de l'ouvrage sur la base d'essais d'étude, sont obtenues en production. Ces propriétés peuvent être la résistance en traction par fendage, le module élastique, le retrait ou le fluage. La nature et la fréquence de ces vérifications sera déterminée par le maître d'œuvre.

■ 4.5.4. *Recommandations pour le contrôle du béton contenant des granulats recyclés*

Lorsque la présence de granulats recyclés dans le béton est prise en compte dans la conception de l'ouvrage, la densité du béton devra être contrôlée en même temps que la résistance en compression. De plus, pour les forts taux de recyclage, les propriétés mécaniques critiques pour le projet devront être également surveillées par un programme de contrôle approprié. Par ailleurs, le bon de livraison du béton prêt à l'emploi doit être adapté selon les taux de substitution adoptés.

■ 5. MISE EN ŒUVRE - EXEMPLES DE RÉALISATIONS

■ 5.1. Précautions

La mise en œuvre des bétons de granulats recyclés se fait avec les mêmes méthodes que celles utilisées pour les granulats naturels. Cependant, l'absorption d'eau importante des GR incite à certaines précautions :

- lors de la fabrication, la teneur en eau des gravillons doit faire l'objet d'une surveillance particulière. En effet, une mauvaise appréciation de ce paramètre peut entraîner des erreurs importantes sur le dosage en eau totale du béton ;
- pour des taux de recyclage significatifs, et en particulier lorsque du sable recyclé sera employé, le contrôle de la rhéologie initiale impliquera le plus souvent une utilisation plus importante d'adjuvants réducteurs d'eau, ce qui peut entraîner une viscosité notable du béton frais à affaissement donné. Il peut en résulter des niveaux de pression plus importants lors des opérations de transport et mise en œuvre par pompage, par rapport à des bétons de granulats naturels ;
- enfin, on a observé (au moins sur le premier chantier expérimental, à Chaponost) que le retrait plastique entre 0 et 24 heures augmentait avec le taux de recyclage. Ceci renforce la nécessité d'une cure soignée, notamment pour les surfaces horizontales.

■ 5.2. Exemples

Cinq exemples de réalisations menées dans le cadre du projet national RECYBETON sont décrits dans les fiches suivantes :

- Réalisation d'un dallage de parking industriel à Chaponost (69)
- Parties d'ouvrage d'art sur le Contournement Nîmes Montpellier
- Bâtiment d'archives pour la classothèque Mitry-Mory (77)
- Plancher haut d'un bâtiment de bureaux à Villeneuve-la-Garenne (93)
- Réalisation de murets et trottoirs à Gennevilliers (92)

Les caractéristiques majeures des granulats utilisés dans le cadre des études de laboratoire et des chantiers du PN se situent dans les codes et catégories des normes NF P18-545 §10 et NF EN 12620+A1 figurant dans le tableau ci-dessous.

	Code norme NF P18-545 §10	Catégories normes NF EN 12620
Granularité des gravillons	A	
Propreté (valeur au bleu)	A	
Résistance à la fragmentation	A - B	$LA_{30} (\leq 30) - LA_{40} (\leq 40)$
Coefficient d'aplatissement	A	$FI_{20} (\leq 20)$
Teneur en fines des sables	A	f_{10}
Teneur en sulfates solubles	B à D	$SS_{0.2} - SS_{0.7}$
Absorption d'eau & masse volumique	A à D	Vss2.5 à Vss déclarée et e4
Influence sur le temps de prise du ciment	B à D	$A_{10} - A_{40}$
Résistance au gel/dégel	Gélifs dans certains cas selon NF EN 18-545	$F_{Déclaré}$
Alcali-réaction	Potentiellement réactifs (PR)	

Tableau 15 caractéristiques majeures des granulats utilisés dans le cadre des études de laboratoire et des chantiers du PN RECYBETON selon l'article 10 de la norme NF P18-545 et la norme NF EN 12620+A1

CHAPONOST : REALISATION D'UN DALLAGE DE PARKING INDUSTRIEL 2013

Descriptif du chantier : dallage de parking industriel 2100 m²



Coulage du béton recyclé



Vue générale du chantier



Zone 100S/100G

Figure 12 *vues du chantier de Chaponost, premier chantier expérimental de RECYBETON*

Date : décembre 2013

Maître d'Ouvrage : Entreprise Lyonnaise de Travaux Spéciaux (ELTS)

Entreprise : ELTS

Fournisseur de granulats recyclés : FILLOT EUROVIA (groupe VINCI)

Fournisseur de bétons (BPE) : Lafarge bétons Rhône-Alpes centrale de Sérezin

Partenaires : SIGMA BETON (caractérisation des bétons), CEREMA DirCE

Laboratoire de Lyon (contrôle extérieur), Lafarge LCR (étude de formulation des bétons), ENS Cachan LMT (modélisation des risques de fissuration), Lafarge Granulats Laboratoire de Vitry (essais de caractérisation des granulats recyclés)

6 zones d'environ 350 m², découpées en plots de 5X5, épaisseur de 18 cm représentant au total 380 m³

Granulats utilisés : granulats recyclés 0/4, 4/20 de type 3 CRD et granulats alluvionnaires semi-concassés 0/4, 4/11 et 11/22

Béton utilisé : XF2/XC4 Cl 0,4 C25/30 CEMII/A LL 42,5 Lafarge S4 D20 ($E_{\text{eff}}/E_{\text{eq}} = 0,53$)

Nombre de formules de béton étudiées : 6 avec substitution en granulats recyclés variant de 0 à 100 %

Conditions de mise en œuvre : talochage à « l'hélicoptère » sans vibration ni cure
Principales caractéristiques étudiées : résistance mécanique, rhéologie, retrait/fissuration, module instantané

Résultats : dosage proches de 300 kg/m³ sauf pour les formules à 100%, retardateur de prise en dose croissante en fonction du % de recyclés, tendance à excès de

teneur en air pour les fortes teneurs en recyclés, augmentation retrait en fonction du % de recyclés, diminution du module en fonction du taux % de recyclés
Raison(s) d'utilisation de bétons de granulats recyclés : Conditions de fabrication en centrale BPE, condition de mise en œuvre et évaluation de la durabilité des bétons recyclés (fissuration et comportement sous trafic)

Retour d'expérience : absence de fissuration in situ, aucune évolution à 3 ans

CONTOURNEMENT NÎMES MONTPELLIER : PARTIES D'OUVRAGE D'ART

Descriptif du chantier : réalisation de la traverse supérieure et d'un mur en retour sur un pont cadre



Gravillon Recyclé 6/20 type 1
CRB



Vue générale à 2 ans et demi



Mur et extension en béton
recyclé

Figure 13 vues du chantier du contournement de Nîmes-Montpellier

Date : juillet 2014

Maître d'Ouvrage/Maître d'œuvre : Oc'Via /SETEC

Entreprise : BOUYGUES TP

Fournisseur de granulats recyclés : Languedoc Roussillon Matériaux (LRM)

Fournisseur de bétons (BPE) : UNIBETON

Partenaires : LERM (étude et essais en laboratoire sur gravillons recyclés et béton, suivi dans le temps)

Traverse supérieure et mur en retour et extension soit 42 m³ de béton de granulats recyclés

Granulats utilisés : gravillons 6/20 de type 1 CRB

Béton utilisé : XF1/XA1 C35/45 CEMI 52,5N SR3 CE PM + L S4 D22 ($E_{eff}/L_{eq} = 0,45$) conforme à NF EN 206/CN avec 20% de GR

Nombre de formules de béton étudiées : 2 avec substitution de 20 et 40% de GR dans une formule de base

Conditions de mise en œuvre : pompage, vibration, cure

Principales caractéristiques étudiées : résistance mécanique, rhéologie, retrait (dessiccation et endogène), indicateurs de durabilité (porosité à l'eau, perméabilité au gaz, diffusion des ions chlorures, carbonatation accélérée) et test d'alcali réaction

Suivi sur carottes extraites de l'ouvrage de la profondeur de carbonatation, de la perméabilité au gaz et de la porosité accessible à l'eau et visite de l'ouvrage

Résultats : adaptation facile de la formule en substituant 20% de GR aux gravillons naturels avec peu d'influence sur les indicateurs de durabilité et sur le retrait
Raison(s) d'utilisation de bétons de granulats recyclés : vérification de l'application des dispositions prévues dans la NF EN 206/CN.

Retour d'expérience : absence de fissuration et aucune évolution dans le temps à 2 ans

CLASSOTHÈQUE MITRY-MORY : bâtiment d'archives

Descriptif du chantier : réalisation d'un bâtiment de stockage des archives administratives



Coulage du béton recyclé



Vue générale intérieur



Vue générale extérieur

Figure 14 vues du chantier de Mitry-Mory

Date : octobre à décembre 2015

Maître d'Ouvrage/Maître d'œuvre : Conseil Départemental 77 DABC

Entreprise : La Plurielle du bâtiment

Fournisseur de granulats recyclés : CEMEX Bouafle (78)

Fournisseur de bétons (BPE) : CEMEX centrale de Goussainville

Partenaires : CEMEX Laboratoire (études de béton), Cerema IdF (contrôle extérieur, essais de durabilité et inspection), Cerema ITM (contrôle de la note de calculs), QUALICONSULT (bureau de contrôle mandaté par le maître d'ouvrage), Alfa Omnium Technic (BET)

Bâtiment de 40 m² au sol et environ 40 m³ de béton 30S/50G (planchers bas et haut et murs)

Granulats utilisés : granulats recyclés type 1 CRB produits par CEMEX sur le site de Bouafle (78) à partir d'un concassage secondaire de 200 t de 40/100 soit une production d'environ 50 t de sable recyclé et de 150 t de gravillon recyclé.

Béton utilisé : XF1/XC4 Cl 0,4 C25/30 CEMII A-L 42,4R CP2 +CV S3 D20 ($E_{\text{eff}}/L_{\text{éq}} = 0,53$)

Nombre de formules de béton étudiées : une formule à 30S50G à partir d'une formule existante avec un léger surdosage en ciment et une diminution du rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{éq}}$

Conditions de mise en œuvre : pompage, vibration, absence de cure

Principales caractéristiques étudiées : résistance mécanique, rhéologie, retrait, indicateurs de durabilité (porosité à l'eau, perméabilité au gaz, carbonatation accélérée)

Résultats : impact de la diminution du module différé sur le dimensionnement du plancher bas (surcharge de 750 kg/m^2 avec augmentation du taux d'armature ($\times 2$) pour maîtriser la flèche,

Raison(s) d'utilisation de bétons de granulats recyclés : expérimentation de la faisabilité de mise en œuvre dans le domaine du bâtiment afin de réduire l'impact des stocks de déchets dans le département 77.

Retour d'expérience : absence de fissuration in situ et de défaut lié à l'utilisation de GR

BÂTIMENT DE BUREAUX : PLANCHER HAUT (TERRASSE)

Descriptif du chantier : réalisation du plancher haut d'un bâtiment de bureaux



Bétonnage de la dalle terrasse



Bétonnage à la pompe



Vue du bâtiment terminé

Figure 15 vues du chantier de Villeneuve-la-garenne

Date : mai 2016

Maître d'Ouvrage/Maître d'œuvre : NACARAT/ PRECONCEPT ARCHITECTES

Entreprise : ARTIS CONSTRUCTION/SOFIALEX

Fournisseur de granulats recyclés : LAFARGE GRANULATS France

Fournisseur de bétons (BPE) : LAFARGE BÉTONS France

Partenaires :

PLANCHER HAUT SOIT 80 m³ de béton de granulats recyclés

Granulats utilisés : gravillons 6/20 AGGNEO de type 1 CRB produits par Lafarge Granulats Genevilliers

Béton utilisé : XC4 XF1 C25/30 CEMI 52,5N +Cv S3 D20 ($E_{\text{eff}}/L_{\text{eq}} = 0,54$) conforme à NF EN 206/CN avec 20% de GR

Nombre de formules de béton étudiées : 1 avec substitution de 20% de GR dans une formule de base

Conditions de mise en œuvre : pompage,

Principales caractéristiques étudiées : résistance mécanique, rhéologie,

Résultats : adaptation facile de la formule en substituant 20% de GR aux gravillons naturels avec peu d'influence sur les indicateurs de durabilité et sur le retrait

Raison(s) d'utilisation de bétons de granulats recyclés : vérification de l'application des dispositions prévues dans la NF EN 206/CN

Retour d'expérience : pas de difficulté de mise en œuvre mais quelques fissurations à la finition

EQIOM/CLAMENS : REALISATION DE MURETS ET TROTTOIRS A GENEVILLIERS (92) - 2015

Descriptif du chantier : Fabrication du béton à Roissy et coulage de murets et de trottoirs à Gennevilliers.



Coulage du béton recyclé



Vue générale du chantier



Murets en béton recyclé

Figure 16 vues du chantier de Gennevilliers

Date : fin 2014/début 2015

Maître d'Ouvrage : Egiom

Entreprise : Gameiro

Fournisseur de granulats recyclés : Clamens (Plateforme de Villeparisis 77)

Fournisseur de bétons (BPE) : Egiom Bétons, centrale BPE de Roissy (77)

Murets : 8 m³ - Trottoirs en béton désactivé coloré : 4 m³

Granulats utilisés : Fournitures par Clamens de 300 t. de granulats 0/4, 4/10 et 10/20 de type 1 CRB

Béton utilisé : C25/30 CEM II/B-S 42,5 CP1 NF S3 D20 CL 0,6 avec substitution de 30 % de sables et 30 % de gravillons

Nombre de formules de béton étudiées : 8 avec substitution en granulats recyclés variant de 0 à 100 %

Principales caractéristiques étudiées : résistance mécanique, rhéologie, retrait, indicateurs de durabilité (porosité, perméabilité, diffusion des ions chlorures)

Raison(s) d'utilisation de bétons de granulats recyclés : Conditions de fabrication en centrale BPE et évaluation de la durabilité des bétons recyclés

■ 6. ANNEXES

■ 6.1. Liste des partenaires du projet national RECYBETON

ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs
ATILH	Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques
Bernard FOURE Consultant	
Bouygues TP	
Cemex France	
Cerema	Centre d'études et d'expertises sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CERIB	Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton
CETU	Centre d'Etude des Tunnels
Clamens	
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DEEP	Laboratoire Déchets Eaux Environnement Pollutions (Plateforme PROVADEMSE)
Département de Seine-et-Marne	
ECCF	Etex Competence Center France
ECN	Ecole Centrale Nantes

Ecole des Mines d'Alès	
Ecole des Ponts ParisTech	
EDF DPI	
EFB	Ecole Française du Béton
ELTS	Entreprise Lyonnaise de Travaux Spéciaux
ENS Cachan	Ecole Normale Supérieure de Cachan
EQIOM	
ESTP	Ecole Spéciale des Travaux Publics
EVS	UMR 5600 « Environnement Ville Société »
FFB	Fédération Française du Bâtiment
FNTF	Fédération Nationale des Travaux Publics
HeidelbergCement	
ICube	Le laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (Université de Strasbourg)
IFSTTAR	Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
IJL	Institut Jean Lamour (Université de Lorraine)
IRCER	Institut de recherche sur les céramiques
Kerneos	
L2MGC	Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (Université de Cergy-Pontoise)
Lafarge France	
Lafarge LCR	LAFARGE Laboratoire Central de Recherche
LASIE	Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (Université de La Rochelle)
LERM	Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux
LGCgE	Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (Université de Lille)
LMDC	Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (INSA Lyon)
LNE	Laboratoire National de Métrologie et d'Essais
NEO ECO	
SGB	Société Guadeloupéenne de Béton
Sigma Béton	
SNBPE	Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi
Socabat GIE	
SYNAD	Syndicat National des Adjuvants pour Bétons et Mortiers

UNPG	Union Nationale des Producteurs de Granulats
Vinci Construction France	

■ 6.2. Exemples de déclarations de performances (DdP) dans le cadre du marquage CE des granulats

[illegible]

■ 6.3. Exemple de Fiche technique Produit (FTP)

Fiche Technique Produit

Période de validité de l'engagement
 Du : _____
 Au : _____

Fournisseur :
Site d'élaboration :

Granulats : 6.3/20 Recyclé
Péetrographie : Matériaux de démolition recyclés
Elaboration : Concassé secondaire
Usage : Béton hydraulique

Partie contractuelle
 Valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

Classe granulaire

6.3
20

Norme

Norme NF P 18-545 Article 10 - EN 12620 et EN 13139

Catégorie

C sauf Ab code D Vss 8 et G en D Vss 12

Partie informative
Résultats de production

	0.075	0.15	0.3	0.6	1.2	2.5	5	10	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000	25000	31500	40000	50000	63000	80000	100000	125000	160000	200000	250000	315000	400000	500000	630000	800000	1000000	1250000	1600000	2000000	2500000	3150000	4000000	5000000	6300000	8000000	10000000	12500000	16000000	20000000	25000000	31500000	40000000	50000000	63000000	80000000	100000000	125000000	160000000	200000000	250000000	315000000	400000000	500000000	630000000	800000000	1000000000	1250000000	1600000000	2000000000	2500000000	3150000000	4000000000	5000000000	6300000000	8000000000	10000000000	12500000000	16000000000	20000000000	25000000000	31500000000	40000000000	50000000000	63000000000	80000000000	100000000000	125000000000	160000000000	200000000000	250000000000	315000000000	400000000000	500000000000	630000000000	800000000000	1000000000000	1250000000000	1600000000000	2000000000000	2500000000000	3150000000000	4000000000000	5000000000000	6300000000000	8000000000000	10000000000000	12500000000000	16000000000000	20000000000000	25000000000000	31500000000000	40000000000000	50000000000000	63000000000000	80000000000000	100000000000000	125000000000000	160000000000000	200000000000000	250000000000000	315000000000000	400000000000000	500000000000000	630000000000000	800000000000000	1000000000000000	1250000000000000	1600000000000000	2000000000000000	2500000000000000	3150000000000000	4000000000000000	5000000000000000	6300000000000000	8000000000000000	10000000000000000	12500000000000000	16000000000000000	20000000000000000	25000000000000000	31500000000000000	40000000000000000	50000000000000000	63000000000000000	80000000000000000	100000000000000000	125000000000000000	160000000000000000	200000000000000000	250000000000000000	315000000000000000	400000000000000000	500000000000000000	630000000000000000	800000000000000000	1000000000000000000	1250000000000000000	1600000000000000000	2000000000000000000	2500000000000000000	3150000000000000000	4000000000000000000	5000000000000000000	6300000000000000000	8000000000000000000	10000000000000000000	12500000000000000000	16000000000000000000	20000000000000000000	25000000000000000000	31500000000000000000	40000000000000000000	50000000000000000000	63000000000000000000	80000000000000000000	100000000000000000000	125000000000000000000	160000000000000000000	200000000000000000000	250000000000000000000	315000000000000000000	4000000000000000
--	-------	------	-----	-----	-----	-----	---	----	----	----	----	------	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	------------------

■ 6.4. Exemple de CCTP type pour utilisation de bétons à base de granulats recyclés dans une opération de construction de bâtiment

Le texte est transposable dans le CCTP du lot gros œuvre pour toute opération utilisant des bétons avec des granulats issus de matériaux recyclés. Certains paramètres seront à renseigner en fonction des spécificités de l'opération.

Certains ouvrages ou parties d'ouvrage à réaliser au titre du présent lot seront réalisés à base de bétons formulés avec des granulats et/ou des sables recyclés. La localisation des ouvrages et des parties d'ouvrages concernés est repérée sur le plan joint au dossier.

1. Caractéristiques des bétons

La formulation de ces bétons répondra aux spécifications définies dans les Recommandations du projet national RECYBETON.

Les choix et données pour la prévention de certains risques (gel et sels de déverglaçage, alcali-réaction, réaction sulfatique interne, attaques chimiques) qui relèvent du maître d'ouvrage doivent être définis dans le marché. En particulier, pour la prévention de la réaction sulfatique interne, le maître d'ouvrage définit la catégorie de l'ouvrage et les classes d'exposition XH de ses différentes parties.

Pour les fondations, les classes d'exposition sont définies à partir des résultats de l'étude d'agressivité des sols et de l'eau établie par le maître d'ouvrage auprès d'un laboratoire spécialisé ou à défaut, d'hypothèses prises par le concepteur.

Pour les autres parties d'ouvrage, les classes d'exposition sont définies en fonction de la localisation de l'ouvrage et des parties d'ouvrage et des risques d'agression du béton et de corrosion des aciers. Pour le choix des classes d'exposition, on pourra se référer, en complément des indications fournies dans la norme NF EN 206/CN, aux guides préparés par l'École Française du Béton.

Le béton mis en œuvre répondra aux caractéristiques suivantes :

Classes d'exposition : à renseigner

Classe de résistance : à renseigner

Gravillons de type : à renseigner

Diamètre maximum des granulats : à renseigner

Part de gravillons recyclés dans la formulation : à renseigner (voir § 3.1)

Part de sables recyclés dans la formulation : à renseigner (voir § 3.1)

Les caractéristiques mécaniques sont assimilées à un béton de type (à compléter) défini dans les chapitres « généralités » du présent lot.

Un tableau des spécifications des bétons sera établi pour l'opération selon le modèle suivant :(voir ci-après).

Partie d'ouvrage	Classe d'exposition	Classe de résistance	Taux de substitution en granulats recyclés (sable et gravillon)	Caractéristiques complémentaires
Partie d'ouvrage 1				
Partie d'ouvrage 2				
Partie d'ouvrage x				

2. Engagement sur la disponibilité et la qualité des matériaux recyclés et des installations de fabrication

Le titulaire du présent lot indiquera dans son offre le prestataire qu'il retient pour la fourniture des matériaux recyclés. Il s'engagera sur la fourniture des matériaux recyclés entrant dans la composition du béton conformes aux spécifications du marché et précisera les plages de dates où les cases ou silos seront disponibles en usine de production en nombre suffisant pour effectuer le stockage des matériaux, la définition de la formulation et le processus de fabrication du béton. Ces dates seront compatibles avec le planning général de l'opération.

Le plan qualité du producteur de béton sera complété par les spécificités liées à l'utilisation de granulats recyclés.

3. Origine des matériaux recyclés

Les granulats recyclés proviendront de stocks de déchets de béton de structure triés en amont avant concassage. La distance de transport entre le lieu de production et de consommation des granulats recyclés ne dépassera pas 30 km (dans le cas d'un transport routier). Préciser le niveau de qualité visé au sens des normes NF EN 12620+A1 et NF EN 18-545 (type 1, type 2 ou type 3).

Le titulaire du présent lot effectuera les essais de caractérisation des matériaux prévus par la norme NF EN 206/CN dans un laboratoire accrédité COFRAC selon les fréquences prévues au paragraphe NA 5.1.3.

4. Définition de la formulation, convenance et élément témoin

Le titulaire définira la formulation du béton sur la base d'une étude en laboratoire et indiquera les caractéristiques mécaniques et physiques qui en découlent, pour validation par la maîtrise d'œuvre et par le bureau de contrôle. Il pourra notamment se référer aux Recommandations du projet national RECYBETON.

Les caractéristiques devront être adaptées à la destination de la construction et ne pas nécessiter plus de sujétions de mise en œuvre et de séchage qu'un béton classique.

Nota : Le marché peut prescrire en fonction des particularités de l'opération de construction (volume de béton, qualité des parements...) une qualification de la

formule basée sur des épreuves de convenance permettant de vérifier la pertinence et l'adéquation des conditions de mise en œuvre proposées par l'entreprise. À cette occasion un ou des éléments témoin peuvent être bétonnés pour vérifier notamment le respect des prescriptions concernant les parements et la faisabilité de la mise en œuvre sur les parties d'ouvrage critiques (densité des armatures, géométrie du coffrage...)

5. Contrôle :

Suivant l'importance de l'opération de construction, le marché spécifiera la catégorie du chantier, et donc les niveaux de contrôle, en référence aux dispositions du DTU21 et aux particularités de l'opération de construction.

Le titulaire réalisera les épreuves de contrôle sur les bétons. Elles concerneront notamment la réalisation des essais suivants :

Température de départ centrale,

Masse volumique du béton frais,

Consistance et teneur en air occlus le cas échéant (1 essai par bétonnage),

Résistance à la compression à 28 jours ($R_{c_{28j}}$) (3 éprouvettes sur centrale et 3 éprouvettes sur chantier par bétonnage).

Selon le cas (au sens du Tableau 12 des présentes recommandations) :

$R_{c_{28j}}$ (résistance à la traction par fendage) (3 éprouvettes sur chantier par bétonnage),

retrait total (NFP 18-427) (3 essais par formule)

module instantané

fluage en compression pour un chargement à 28 jours

porosité accessible à l'eau, perméabilité au gaz, carbonatation accélérée (1 essais par formule)

teneur en alcalins actifs (selon norme FD P18-464).

Le titulaire réalisera les essais en centrale et sur chantier. Les rapports de contrôle seront transmis à la maîtrise d'œuvre et au bureau de contrôle pour visa.

6. Dimensionnement des ouvrages

Les notes de calculs seront réalisées selon les modalités définies dans les Recommandations du projet national RECYBETON.

7. Traçabilité de l'origine des bétons

Le titulaire du présent lot précisera, sur les ouvrages concernés par le béton à base de matériaux recyclés, les quantités mises en œuvre, les références des bons de livraison, l'origine du béton, la désignation de la formule, les résultats des essais, et éventuellement le site de production des granulats recyclés.

Tout ouvrage ou partie d'ouvrage qui ne sera pas réalisé avec la formulation de béton validée, ou réalisé avec du béton traditionnel à la place du béton comportant des matériaux recyclés, ou réalisé avec un béton n'ayant pas les caractéristiques attendues sera démoli aux frais et risques du titulaire.

■ 6.5. Exemple de calcul des propriétés mécaniques d'un béton C25/30 en fonction du taux de recyclage

Bétons recyclés - Comparaison avec un béton normal de même résistance caractéristique

	données	
f _{sk}	25 MPa	
granulat a _i	1	grès 0,7 calcaire 0,9 quartzite 1 basalte 1,2
v _{Rd,c}	0,495	résistance au cisaillement Eq. 5.2 de l'EC2
φ _b	2	coefficient de fluage selon Eq. B.2 de l'EC2
Q	18 kN	charges permanentes
G	6 kN	charges variables
ψ _b	0,3	coefficient de combinaison quasi-permanente
γ _c	1,35	coefficient sur charges permanentes
γ _q	1,5	coefficient sur charges variables
ε _{sRl}	0,0003	retrait EC2 : Eq (3.8)
k	0,595	= (G+Y ₀ O)/(V _G -G+v ₀ .O)

	EC2 base		EC2 recyclé						
	0%	5%	10%	15%	20%	25%	50%	100%	
taux recyclage	τ_m								
résist. caract. compression	25	25	25	25	25	25	25	25	
résist. moyenne compression	f_{ck}	33	33	33	33	33	33	33	
résist. moyenne traction	f_{ctm}	2,56	2,55	2,54	2,52	2,51	2,49	2,42	
" $f_{ctm,0.05}$	1,80	1,79	1,78	1,77	1,76	1,75	1,70	1,60	
Young	E_{cm}	31,5	31,1	30,6	30,2	29,8	29,4	27,2	
coefficient de fluage	φ_0'	2,00	2,09	2,18	2,27	2,36	2,45	2,90	
1 + k φ_0'	2,10	2,14	2,19	2,24	2,29	2,34	2,59	3,08	
retrait	ε_{cs}	3,00	3,12	3,25	3,37	3,49	3,62	4,23	
recyclé/normal	η_1	1,000	0,995	0,989	0,984	0,978	0,973	0,945	
cisaillement dalle non armée	$\nu_{rel,c}$	0,50	0,49	0,48	0,48	0,47	0,47	0,44	
"	ν_{min}	1,13	1,13	1,12	1,11	1,11	1,10	1,07	
cisaillement poutre ou dalle armée	ν	0,540	0,537	0,534	0,531	0,528	0,525	0,510	
cisaillement poutre ou dalle armée	ν_1	0,600	0,597	0,593	0,590	0,587	0,584	0,567	
ouverture fissures (7.3.4 (2))	k_t	0,40	0,39	0,38	0,37	0,36	0,36	0,31	
flèche (Expr. 7.19)	β	0,50	0,49	0,48	0,47	0,46	0,45	0,40	

$$\begin{aligned} &= f_{\text{ck}} + 8 \\ &= 0.3 f_{\text{ck}} \cdot (1 - 0.11 \tau_{\text{cm}}) \\ &= 0.7 f_{\text{cm}} \\ &= 22 (f_{\text{cm}} 10)^{0.53} \cdot [a_1 \cdot (a_1 - 0.73) \tau_{\text{cm}}] \\ &= \varphi_{\text{p}} (1 + 0.9 f_{\text{cm}}) \\ &= \varepsilon_{\text{sk}} (1 + 0.82 \tau_{\text{cm}}) \text{ en supposant } \varepsilon_{\text{sk}} = 3 \times 10^{-4} \\ &= f_{\text{ck}} \cdot 0.09 f_{\text{ck}}^{0.058} = (1 - 0.11 \tau_{\text{cm}}) \cdot (0.70/0.75 \tau_{\text{cm}})^{0.7} \\ &= C_{\text{Rd},\text{ck}} k_1 (100 p_{\text{t},\text{ck}})^{0.5} \times \eta_1^2 \\ &= 0.34 f_{\text{ck}}^{0.5} / c_{\text{Rd}} \\ &= 0.6 (1 - f_{\text{ck}}/250) \cdot \eta_1 \quad (\text{Expr. 6.6N}) \\ &= 0.6 \eta_1 \text{ ou } (0.9 - f_{\text{ck}}/250) \cdot \eta_1 \quad (\text{Expr. 6.10N}) \\ &= (0.6 - 0.5 (1 + 0.9 \tau_{\text{cm}})) \cdot \eta_1 \\ &= (1 - 0.5 \sqrt{1 + 0.9 \tau_{\text{cm}}}) \cdot \eta_1 \end{aligned}$$

7. GLOSSAIRE

Sigle	Signification
ACV	Analyse du cycle de vie
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AQC	Agence qualité construction
ATE	Agrément technique européen
ATEc	Avis technique
ATEx	Appréciation technique expérimentale
BGN	Béton de granulats naturels
BGR	Béton contenant des granulats recyclés
BTP	Bâtiments et travaux publics
C2P	Commission prévention produits (AQC)
CE	Conformité européenne
CERC	Cellule économique régionale de la construction
CGDD	Commissariat général au développement durable
DdP	Déclaration de performances
DoP	<i>Declaration of performance</i> (Déclaration de performance)
DPC	Directive produits de la construction (directive européenne 89/106/CEE)
EC2	Eurocode 2
E _{eff}	Eau efficace
ELS	Etat limite de service
ELU	Etat limite ultime
ETE	Evaluation technique européenne
FREC	Feuille de route Economie circulaire
FTP	Fiche technique produit
GN	Granulat naturel
GR	Granulat recyclé
hEN	<i>Harmonised European standard</i> (Norme européenne harmonisée)
HQE	Haute qualité environnementale
ISDI	Installation de stockage de déchets inertes
L _{equi}	Liant équivalent

Sigle	Signification
MPG	Maîtrise de la production des granulats
Mt	Million de tonnes
MTES	Ministère de la transition écologique et solidaire
PN	Projet national
REP	Responsabilité élargie du producteur
RPC	Règlement produits de la construction (Règlement UE 305/2011)
SOeS	Service de l'observation et des statistiques (MTES)
UNICEM	Union nationale des industries de carrières et des matériaux de construction

PRÉSENTATION DU PROJET

Le Projet National RECYBETON (Le recyclage complet du béton) a regroupé 47 partenaires qui ont conjugué



leurs efforts, durant six années (2012-2018), dans un projet de recherche collaborative impliquant des maîtres d'ouvrage, des entreprises de construction, des producteurs de matériaux, des ingénieries, des assureurs et, bien sûr, des organismes de recherche. Le projet a bénéficié du soutien du Ministère de la transition écologique et solidaire et de l'Agence nationale

de la recherche dans le cadre du projet ECOREB (Eco-construction par le recyclage du béton).

RECYBETON a montré comment et à quelles conditions il est possible d'utiliser les granulats obtenus par concassage de bétons de déconstruction et des rebuts de production pour fabriquer du béton, avec des performances techniques, économiques et environnementales satisfaisantes.

Trois thématiques principales ont été considérées : les procédés et technologies, le comportement des matériaux et des structures, et l'impact environnemental. Les études menées ont comporté des travaux de laboratoire et de modélisation mais aussi la réalisation de cinq chantiers expérimentaux, étapes essentielles pour démontrer la crédibilité de la démarche.

PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

Les recommandations du projet national RECYBETON « Comment recycler le béton dans le béton » identifient



les possibilités ouvertes à l'usage des granulats recyclés dans les bétons et dressent une liste des bonnes pratiques aux différentes étapes de leur utilisation.

Le projet RECYBETON fait également, à travers ces recommandations, des propositions d'évolution des normes rendues possibles par l'expérience acquise dans le cadre des travaux réalisés. Enfin, des pistes sur des mécanismes incitatifs propres à aider au développement de ces pratiques de recyclage sont données.

Le document s'organise en cinq chapitres principaux,

dont chacun a été rédigé avec l'objectif de s'adresser en particulier à un groupe d'acteurs identifiés. Le premier chapitre, intitulé « Pourquoi utiliser des granulats recyclés dans le béton ? » s'adresse en priorité aux maîtres d'ouvrages ; le deuxième chapitre, sur la « Production des granulats recyclés » concerne en premier lieu les producteurs de granulats ; le troisième chapitre traite de la « Production des bétons contenant des granulats recyclés » et s'adresse en priorité aux producteurs de béton ; le quatrième chapitre, sur « Spécifications liées à l'utilisation des granulats recyclés » est à destination des projeteurs et des ingénieries ; enfin, le cinquième chapitre « Mise en œuvre – Exemples de réalisation » intéressera principalement les entreprises de travaux.