



Économie circulaire / *Circular Economy*

UTILISATION DES MATIÈRES PREMIÈRES SECONDAIRES DANS LES BÉTONS

USING ALTERNATIVE RAW MATERIALS IN CONCRETE

MARJORIE PETITPAIN¹, SYLVAIN DEHAUDT², FRANÇOIS JACQUEMOT³, PATRICK ROUGEAU⁴

¹Ingénieur au Pôle Matériaux – CERIB ; ²Responsable Développement et Innovation – CERIB

³Responsable du Pôle Matériaux – CERIB ; ⁴Directeur Matériaux et Technologies du Béton – CERIB
CERIB, 1 rue des Longs Réages, 28233 Epernon

1. INTRODUCTION

Le ministère français du développement durable définit l'économie circulaire comme étant « un concept économique qui s'inscrit dans le cadre du développement durable et dont l'objectif est de produire des biens et des services tout en limitant la consommation et le gaspillage des matières premières, de l'eau et des sources d'énergie ». Ce concept vise à changer le système linéaire de notre économie actuelle, qui consiste à « extraire, fabriquer, consommer, jeter », en un système fermé où le déchet de l'un devient la matière première de l'autre.

Le présent document se situe dans le contexte de l'économie circulaire et porte sur l'utilisation de matières premières secondaires dans les bétons.

Les chapitres 2, 3 et 4 présentent le contexte, les aspects réglementaires et normatifs. Le chapitre 5 comprend des données générales sur les bétons.

Les objectifs du présent document sont de :

- présenter les nombreux exemples d'utilisation expérimentés dans les bétons (chapitre 6) ;
- identifier les principaux éléments du cahier des charges à respecter (chapitre 7) ;
- préciser la méthodologie à mettre en place pour s'assurer de la faisabilité d'incorporation d'une nouvelle matière première secondaire dans les bétons (chapitre 8).

2. ÉCONOMIE CIRCULAIRE : HISTORIQUE ET CONTEXTE

Succédant à la révolution industrielle, le XX^e siècle a vu se développer une société de consommation toujours plus demandeuse et qui a augmenté de façon très importante son prélèvement sur les ressources naturelles. Aujourd'hui, le monde est arrivé à un stade où la raréfaction des matières premières et les impacts environnementaux engendrent une prise de conscience et une réflexion de fond. En effet, le modèle des pays développés, consistant principalement à extraire, produire, consommer et jeter, ne permet plus d'appréhender un futur acceptable pour les générations à venir. Un changement

radical doit donc être effectué à toutes les échelles, soit du simple citoyen aux grosses industries consommatrices de ressources naturelles pouvant être fossiles et émettrices de gaz à effet de serre.

Face à l'idée, née de la révolution industrielle du XIX^e siècle, selon laquelle le progrès technique assurera une croissance sans limite et un progrès linéaire, on a assisté à une progressive prise de conscience, à partir des années 1920, relative aux premiers effets négatifs visibles de l'industrialisation sur les milieux naturels, la faune, la flore et les milieux aquatiques [Bihouix, 2010].

En 1968, les travaux du Club de Rome, avec la publication du rapport « Halte à la croissance », ont été le point de départ d'un très large débat qui a conduit par la suite au « développement durable » prôné par le rapport Brundtland, « Notre avenir à tous », publié en 1987 par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement.

En 1992, un cri d'alarme est lancé lors de la Conférence de Rio sur la dégradation de l'écosystème par la croissance économique, contribuant à une prise de conscience planétaire autour de l'idée de développement durable d'un point de vue économique, social et environnemental.

Par la suite, le développement durable inspire toutes les conférences internationales des Nations-Unies sur de multiples sujets dont celle de 1997 à Kyoto portant sur les changements climatiques durant laquelle 180 pays s'engagèrent à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre entre 2008 et 2012 par rapport aux niveaux de 1990 (signature du Protocole de Kyoto).

Issu des réflexions menées lors du Grenelle de l'Environnement et en articulation avec la transposition de la Directive-cadre européenne 2008/98/CE du 19 novembre 2008 sur les déchets, un plan d'actions « déchets » gouvernemental de trois ans est paru en septembre 2009 et s'est décliné en 5 axes :

- sensibilisation et information des citoyens et des collectivités locales pour la prévention des déchets et la mise en place progressive d'une tarification incitative ;
- étendue des filières de responsabilité élargie du producteur pour le recyclage afin de permettre une meilleure organisation ; répartition du financement de la gestion des déchets entre collectivités et industriels. Ce volet prévoit aussi de





négocier, au niveau communautaire, la qualification des matières recyclées comme produits ;

- valorisation des déchets organiques, qui représentent 25 % des déchets ménagers ;
- encadrement de la quantité des déchets incinérés, adaptation de la fiscalité sur les outils de traitement et proposition de mesures pour améliorer l'information sur les sites de stockage et d'incinération ;
- augmentation du recyclage des déchets du BTP, dont plus d'un tiers n'est pas valorisé aujourd'hui, en développant de nouveaux moyens.

Dans le nouveau Programme national de prévention des déchets 2014-2020 (issu de l'application de la directive-cadre de 2008), la « prévention des déchets » est définie comme étant un moyen de « réduire la quantité ou la nocivité des déchets produits, en intervenant à la fois sur leur mode de production et de consommation ». Les enjeux sont forts, il s'agit réduire les impacts environnementaux et les coûts associés à la gestion des déchets, mais également les impacts environnementaux dus à l'extraction des ressources naturelles, à la production des biens et services, à leur distribution et à leur utilisation. La prévention est aujourd'hui dans les priorités politiques environnementales de gestion en considérant que « le meilleur déchet est celui qu'on ne produit pas ». La production totale de déchets par les ménages peut et doit encore diminuer et il apparaît que les déchets d'activités économiques, et notamment les déchets du BTP, restent en croissance sur les dernières années.

Ce programme vise la mise en œuvre d'une transition vers le modèle d'économie circulaire. La feuille de route comprend plusieurs mesures, notamment l'allongement de la durée de vie des produits, leur réparabilité, l'éco-conception et la mise en place de systèmes de consigne.

Le programme prévoit ainsi pour 2020 une nouvelle diminution de 7 % de la production de Déchets Ménagers et Assimilés (DMA, c'est-à-dire l'ensemble des déchets collectés par les collectivités territoriales) par habitant par rapport au niveau de 2010, et au minimum une stabilisation de la production de déchets issus des activités économiques (DAE) et du BTP. Il aborde l'ensemble des leviers d'action associés à la prévention en utilisant des instruments retenus divers et équilibrés dans l'objectif de garantir une efficacité maximale. La déclinaison concrète des premières actions a commencé dès 2014, avec en particulier la mise en place de chantiers notamment sur les thématiques prioritaires que constituent la durée de vie des produits, la consigne, et l'éco-modulation des barèmes de contributions dans le cadre des filières de gestion des déchets dites à « responsabilité élargie du producteur ».

Fin 2015, la France a accueilli et présidé la Conférence des Parties de la Convention-Cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques (COP 21). Cette conférence a abouti à un nouvel accord international sur le climat, applicable à tous les pays, qui entrera en vigueur en 2020. Le but est que tous les pays, dont les plus grands émetteurs de gaz à effet de serre – pays développés comme pays en développement – soient engagés pour la première fois par un accord universel contraignant sur le climat afin de maintenir le réchauffement mondial en deçà de 2 °C.

Ces différentes contributions ont été le fruit d'une mobilisation mondiale et ont stimulé le débat national autour de l'enjeu climatique, tout cela dans le but d'enclencher de façon pérenne

la transition vers des modèles de développement beaucoup plus faiblement émetteurs de gaz à effet de serre.

Deux points sont principalement mis en avant :

- le développement et l'utilisation « d'économies vertes » entraînant la nécessité d'une gestion durable des forêts, l'utilisation d'énergies renouvelables et la diminution de l'extraction de matières fossiles ;
- la planification pour une meilleure adaptation aux impacts climatiques, le lancement d'actions préventives et le développement de nouvelles filières.

Cette note s'inscrit dans le volet « utilisation d'économies vertes » puisqu'elle démontre la possibilité d'utiliser des co-produits en substitution de matières premières dans le matériau béton.

3. CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

3.1. Introduction

Aujourd'hui, les déchets sont classés selon leur dangerosité liée à leur origine (déchets ménagers, déchets industriels) ou à leur nature :

- les **déchets inertes** sont des déchets stables dans le temps (exemple du verre et du béton) ;
- les **déchets non inertes non dangereux** sont les déchets qui ne sont ni toxiques, ni dangereux, mais qui peuvent se décomposer, brûler, fermenter ou encore rouiller ;
- les **déchets dangereux** sont les déchets contenant des éléments nocifs ou toxiques, susceptibles de générer des risques ou des nuisances particulières en raison de leur caractère dangereux (huiles, colles, acides...).

L'utilisation d'une substance ou d'un objet ayant le statut de déchet est réglementée au cas par cas par les autorités compétentes nationales ou régionales (DRIRE, préfecture) au moyen de circulaires ou d'arrêtés spécifiques.

3.2. La Directive-cadre « déchet » 2008/98/CE

La Directive 2008/98/CE du 19/11/2008 définit comme déchet « toute substance dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire ». Cette Directive est transposée en droit français par l'Ordonnance n° 2010-1579 datant du 17/12/2010.

La Directive distingue les opérations de traitement, de valorisation et de recyclage. On appelle :

- **traitement** : toute opération de valorisation ou d'élimination y compris la préparation qui précède la valorisation ou l'élimination ;
- **valorisation** : toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en remplaçant d'autres matières qui auraient été utilisées à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, dans l'usine ou l'ensemble de l'économie ;
- **recyclage** : toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en produits, matières ou substances aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins.





3.2.1. Notion de « co-produit » et de « sous-produit »

Il est nécessaire de définir ces deux notions afin de bien les distinguer :

- le « **co-produit** » est « une matière, intentionnelle et inévitable, créée au cours du même processus de fabrication et en même temps que le produit principal ». Il peut, dans certaines filières, être considéré comme un produit noble, disposant d'un marché et d'une cotation. Le produit fini principal et le co-produit « doivent tous les deux répondre à des spécifications de caractéristiques, et chacun est apte à être utilisé directement pour un usage particulier » ;
- le « **sous-produit** » est « un produit résidu non intentionnel et non prévisible pouvant être accidentel, qui apparaît durant la fabrication ou la distribution d'un produit fini ». Il peut être utilisé directement ou bien constituer un ingrédient d'un autre processus de production en vue de la fabrication d'un autre produit fini. Selon l'article L. 541-1-1 de l'Ordonnance n° 2010-1579, une substance ou un objet peut être considéré comme un sous-produit et non comme un déchet dès lors qu'il remplit l'ensemble des conditions suivantes :
 - son utilisation ultérieure est certaine,
 - il peut être utilisé directement sans traitement supplémentaire autre que les pratiques industrielles courantes,
 - il est généré en faisant partie intégrante d'un processus de production,
 - son utilisation ultérieure est légale, c'est-à-dire qu'il répond à toutes les prescriptions pertinentes relatives au produit, à l'environnement et à la protection de la santé prévues pour l'utilisation spécifique et n'aura pas d'incidences globales nocives pour l'environnement ou la santé humaine.

À ce stade, un sous-produit peut envisager sa sortie du statut de déchet.

3.2.2. Sortie du statut de déchet

La notion de « fin du statut de déchet » est introduite dans la Directive 2008/98/CE. Elle spécifie que certains déchets peuvent sortir de leur statut lorsqu'ils sont valorisés ou recyclés et qu'ils répondent à des critères spécifiques à définir dans le respect des conditions suivantes :

- la substance ou l'objet est couramment utilisé à des fins spécifiques ;
- il existe un marché ou une demande pour une telle substance ou un tel objet ;
- la substance ou l'objet remplit les exigences techniques aux fins spécifiques et respecte la législation et les normes applicables aux produits ;
- l'utilisation de la substance ou de l'objet n'aura pas d'effets globaux nocifs pour l'environnement ou la santé humaine.

Un dossier type de sortie du statut de déchet est présenté dans le Décret n° 2012-602 et s'adresse aux exploitants d'installations ICPE.

La sortie du statut de déchet entraîne, d'un point de vue réglementaire, plusieurs avantages pour le producteur (diminution des contrôles de la matière, simple service de transport, moins de frais d'élimination ou de stockage de la matière...) mais également pour l'utilisateur (variabilité limitée de la matière, libre utilisation, conformité à la réglementation REACH).

3.3. Réglementation liée aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement

3.3.1. Généralités

Le Code de l'Environnement définit les ICPE comme « les usines, ateliers, dépôts, chantiers et, d'une manière générale, les installations exploitées ou détenues par toute personne physique ou morale, publique ou privée, qui peuvent présenter des dangers ou des inconvénients soit pour la commodité du voisinage, soit pour la santé, la sécurité, la salubrité publiques, soit pour l'agriculture, soit pour la protection de la nature, de l'environnement et des paysages, soit pour l'utilisation rationnelle de l'énergie, soit pour la conservation des sites et des monuments ainsi que des éléments du patrimoine archéologique ».

Profondément réformé par la loi du 19 juillet 1976, le droit des ICPE est actuellement régi par le livre V du Code de l'Environnement. Le législateur a confié au ministre chargé des installations classées le soin de définir par décret la liste des activités classables, appelée « Nomenclature des ICPE », régulièrement mise à jour.

Par définition, les autres types d'installations, où n'est exercée aucune des activités répertoriées dans la nomenclature (ainsi que celles où certaines activités listées sont exercées, mais avec des caractéristiques en deçà des seuils de déclaration), parfois désignées sous l'appellation « installations non classées », sont exclues du champ de cette législation.

3.3.2. Classification

On distingue plusieurs types d'ICPE. L'installation peut être soumise à :

- déclaration (D) ;
- déclaration avec contrôle périodique (DC) ;
- enregistrement (E) ;
- autorisation (A).

3.3.3. Rubrique affiliée aux usines de préfabrication

Aujourd'hui, un grand nombre d'usines de préfabrication sont classées ICPE sous la rubrique 2522 « Installation de fabrication de produits en béton par procédé mécanique ». En fonction de la puissance installée du matériel de malaxage et de vibration, l'installation est soumise soit à déclaration, soit à enregistrement :

- les installations dont la puissance est comprise entre 40 et 400 kW sont soumises à déclaration. Les prescriptions sont présentes dans l'Arrêté du 26/11/2011 ;
- les installations dont la puissance est supérieure à 400 kW sont soumises à enregistrement. Les prescriptions sont présentes dans l'Arrêté du 08/08/2011.

Ces activités peuvent également donner lieu à classement sous la rubrique 2515 (activités de broyage, concassage, criblage, ensachage, pulvérisation, nettoyage, tamisage, mélange de pierres, cailloux, minerais et autres produits minéraux naturels ou artificiels ou de déchets non dangereux inertes).



3.3.4. Les activités de réception de matières (transit, regroupement ou tri, collecte)

Au regard de la Circulaire du 24/12/2010, lorsque les exploitants d'installations industrielles reçoivent des déchets d'autres acteurs économiques, l'activité de réception des déchets doit être classée sous les rubriques 2713 à 2718 en fonction des caractéristiques des déchets pris en charge. En parallèle, d'autres rubriques peuvent être visées pour une future utilisation dans les bétons (rubriques 1532, 2516 et 2517).

Le régime d'assujettissement à ces rubriques est déterminé, de manière générale, en fonction de la quantité de déchets susceptible d'être présente sur le site ou bien de la capacité de stockage.

Le tableau 1 précise, en fonction du type de déchet, le régime d'assujettissement des installations ayant une activité de réception.

3.3.5. Les activités de traitement de déchets (hors opération d'incinération, d'élimination)

Elles peuvent, dans certains cas, être prises en compte par une rubrique spécifique de la nomenclature. Deux cas de figure sont à distinguer.

3.3.5.1. Le déchet peut être utilisé en tant que tel sans traitement complémentaire

En principe, l'incorporation ou l'intégration d'un déchet/matière dans le procédé principal de fabrication d'une installation, qu'elle soit classée ou non, ne nécessite pas un classement au titre d'une activité de traitement de déchets, dans la mesure où elle n'est pas à l'origine d'impact sur l'environnement supplémentaire, en particulier, si :

- le déchet/matière incorporé présente une dangerosité comparable ou moindre à celle de la principale matière première à laquelle il se substitue ;
- le bilan environnemental et énergétique est favorable à la solution de valorisation.

3.3.5.2. Le déchet nécessite un traitement complémentaire préalable (une préparation)

Cette opération peut être effectuée par le site source et/ou le site utilisateur :

- il s'agit pour le site source de préparer le déchet qu'il génère, en vue de son utilisation dans un autre secteur industriel (par exemple un broyage pour atteindre une granulométrie de matière indiquée dans le cahier des

Tableau 1 – Extrait de la nomenclature des ICPE pour le stockage et les activités de transit, regroupement et tri

Rubrique/Déchets visés	Critère de classement	Seuil	Régime
N° 1532/Déchets de biomasse (n° 2910-A)	Volume susceptible d'être stocké	$V > 50\,000\text{ m}^3$	A
		$20\,000\text{ m}^3 < V \leq 50\,000\text{ m}^3$	E
		$1\,000\text{ m}^3 < V \leq 20\,000\text{ m}^3$	D
N° 2516/Déchets minéraux inertes non dangereux pulvérulents non ensachés	Capacité de transit	$C > 25\,000\text{ m}^3$	E
		$5\,000\text{ m}^3 < C \leq 25\,000\text{ m}^3$	D
N° 2517/Déchets minéraux inertes non dangereux (non pulvérulents)	Superficie de l'aire de transit Capacité de stockage	$S > 30\,000\text{ m}^2$	A
		$10\,000\text{ m}^2 < S \leq 30\,000\text{ m}^2$	E
		$5\,000\text{ m}^2 < S \leq 10\,000\text{ m}^2$	D
N° 2713/Installation de transit, regroupement ou tri de métaux ou de déchets de métaux non dangereux, d'alliage de métaux ou de déchets d'alliage de métaux non dangereux, à l'exclusion des activités et installations visées aux rubriques 2710, 2711 et 2712	Superficie de l'aire de transit	$S \geq 1\,000\text{ m}^2$	A
		$100\text{ m}^2 \leq S < 1\,000\text{ m}^2$	D
N° 2714/Déchets de bois, plastiques, papiers... non dangereux (sauf déchets de biomasse n° 1532 et déchets verts n° 2716)	Volume susceptible d'être présent	$V \geq 1\,000\text{ m}^3$	A
		$100\text{ m}^3 \leq V < 1\,000\text{ m}^3$	D
N° 2715/Installation de transit, regroupement ou tri de déchets non dangereux de verre à l'exclusion des installations visées à la rubrique 2710	Volume susceptible d'être présent	$V \geq 250\text{ m}^3$	D
N° 2716/Déchets non dangereux non inertes	Volume susceptible d'être présent	$V \geq 1\,000\text{ m}^3$	A
		$100\text{ m}^3 \leq V < 1\,000\text{ m}^3$	DC
N° 2717/Déchets dangereux	Quantité de substances ou préparations dangereuses dans les déchets	Voir rubrique emploi ou stockage	A
N° 2718/Déchets dangereux	Quantité susceptible d'être présente	$Q \geq 1\text{ t}$	A
		$Q < 1\text{ t}$	DC

charges du site utilisateur). En principe, cette préparation est considérée comme une activité de traitement de déchets à classer en tant que telle. Cependant, la prise en charge de cette activité par le site source le responsabilise, le conduit à donner de la valeur à son déchet dont il connaît bien l'origine et évite dans une certaine mesure son transport dans une installation de traitement spécifique. Fort de cet argumentaire, l'activité concernée pourrait ne pas être considérée comme une véritable activité spécifique de traitement de déchets mais comme le prolongement du procédé de fabrication du site source, dans la mesure où elle peut être considérée comme une pratique industrielle courante. La validation de ce point incombe aux autorités compétentes (DREAL) ;

- en acceptant de réaliser le prétraitement sur son site, le site utilisateur donne de la valeur au déchet qu'il reçoit.
Il peut soit :
 - d'ores et déjà disposer des équipements de préparation nécessaires dans le cas où ces derniers participent au déroulement de son procédé de fabrication. Son activité devrait être considérée comme une pratique industrielle courante dans la mesure où le déchet est comparable aux matières premières entrantes habituellement et où cette pratique ne génère pas d'impact supplémentaire sur l'environnement,
 - devoir s'équiper de manière spécifique. Il convient alors d'envisager l'activité de traitement de déchets et son assujettissement à la nomenclature des ICPE,
 - l'opération est réalisée par un site intermédiaire. Les activités pratiquées sont, la plupart du temps, des activités spécifiques de traitement de déchets à classer en tant que telles au titre de la nomenclature des ICPE. Toutefois, un bilan environnemental et énergétique afférent à l'opération de valorisation, dressé par comparaison avec une situation pour laquelle les déchets ne sont pas valorisés et

les matières premières sont consommées, peut favoriser la mise en œuvre de cette activité intermédiaire.

Par ailleurs, dans le cas où un changement majeur doit avoir lieu afin de valoriser la matière, il peut être intéressant de faire appel à un professionnel de la gestion des déchets pour faciliter le transport ainsi que le regroupement sur une même plateforme de l'ensemble de la matière de même nature provenant de plusieurs sites source.

Le tableau ci-après précise, pour les principales activités de traitement, les seuils de classement.

3.3.6. Transport des déchets

L'activité de collecte ou de transport de déchets (Article R 541-50 du Code de l'Environnement) est soumise à déclaration préalable auprès du Préfet du département où se trouve le siège social de l'entreprise ou, à défaut, le domicile du déclarant :

- lorsque la quantité collectée ou transportée est supérieure à 0,1 tonne par chargement de déchets dangereux ;
- ou lorsque la quantité collectée ou transportée est supérieure à 0,5 tonne par chargement de déchets non dangereux.

Ne sont pas soumises à cette obligation de déclaration les entreprises qui notamment :

- transportent les déchets qu'elles produisent et sont réglementées au titre de la législation des ICPE ;
- exploitent une ICPE soumise à autorisation, à enregistrement ou à déclaration et relevant de la rubrique 2710 de la nomenclature des installations classées pour la collecte de déchets.

Tableau 2 – Extrait de la nomenclature des ICPE pour les principales activités de traitement

Déchets visés/Activité	Rubrique	Critère de classement	Seuil	Régime
Déchets inertes non dangereux/Broyage, concassage, criblage, ensachage, pulvérisation, nettoyage, tamisage, mélange	2515 1. fonctionnement d'une durée > à 6 mois	Puissance installée	P > 550 kW	A
			200 kW < P ≤ 550 kW	E
			40 kW < P ≤ 200 kW	D
	2515 2. fonctionnement sur période unique ≤ à 6 mois		P > 350 kW	E
			40 kW < P ≤ 350 kW	D
Déchets dangereux/ Traitement thermique	2770	Quantité de substances ou préparations dangereuses dans les déchets	Voir rubrique emploi ou stockage	A
Déchets non dangereux/ Traitement thermique	2771	/	Pas de seuil	A
Déchets dangereux/ Traitement autre que thermique	2790	Quantité de substances ou préparations dangereuses dans les déchets	Voir rubrique emploi ou stockage	A
Déchets non dangereux/ Traitement autre que thermique	2791	Quantité de déchets traités	Q ≥ 10 t/j	A
			Q < 10 t/j	DC



3.3.7. Traçabilité des déchets/matières

De manière à assurer la traçabilité des déchets/matières, il convient *a minima* pour le site source de les céder au site utilisateur par contrat.

Par ailleurs, s'agissant de déchets, un registre chronologique de leur production, de leur expédition, de leur réception et de leur valorisation est à tenir à jour et à conserver pendant au moins trois ans, aussi bien par le site source que par le site utilisateur (cf. Article R. 541-43 du Code de l'Environnement). En parallèle, le site source doit pouvoir justifier auprès des autorités que ses déchets sont réceptionnés par des sites « autorisés » et ce malgré le respect des exigences de la rubrique liée à l'activité de réception des matières.

3.3.8. Circulaire du 17/03/03 relative à la nomenclature des activités liées aux déchets pour les ICPE

L'activité de valorisation de déchets dans un processus de production déjà soumis à déclaration (ou enregistrement ou autorisation) ne relève pas des rubriques spécifiques concernant les activités de traitement de déchets.

Cependant, lorsque cette valorisation est susceptible d'entraîner un changement notable dans les éléments déclarés à la préfecture (modification de façon significative de l'impact de l'activité sur l'environnement ou induction de risques supplémentaires), l'exploitant se doit de la notifier au préfet, qui prendra les mesures en conséquence, avec généralement la rédaction d'un arrêté pour les prescriptions complémentaires. Il est également précisé que, dans certains cas, la valorisation de déchets ne constitue pas de changement notable par rapport à la situation actuelle (exemple de l'utilisation de cendres volantes, papier usagé, etc.).

En tout état de cause, l'utilisateur d'un déchet devra prouver que sa valorisation n'a pas d'effet nocif pour l'environnement et la santé humaine.

4. CONTEXTE NORMATIF POUR LES BÉTONS

4.1. Cadre Général

Les exigences normatives concernant le béton et ses constituants dépendent du type de produit confectionné. Les constituants à introduire dans le béton doivent être conformes aux exigences normatives qui leurs sont associées. Ces exigences peuvent différer suivant les normes considérées. Par ailleurs, sachant que les constituants peuvent influencer sur les propriétés du béton, l'élément en béton devra également satisfaire, en termes de performance, aux exigences qui lui sont relatives.

4.2. Produits préfabriqués structuraux

Pour les produits préfabriqués de structure, les normes de produits renvoient à la norme NF EN 13369 « Règles communes pour les produits préfabriqués en béton » qui elle-même reprend, lorsque nécessaire, des exigences de la norme NF EN 206/CN pour ce qui concerne le matériau béton.

Le nouveau constituant considéré ne peut être utilisé que si son aptitude à l'emploi est établie par une norme européenne, un agrément technique européen, une norme nationale ou des dispositions en vigueur là où le béton est utilisé, faisant spécifiquement référence à l'utilisation du constituant en béton.

En France, les constituants autorisés pour une incorporation dans du béton conforme à la norme NF EN 206/CN sont le ciment, les granulats, les fillers, l'eau de gâchage, les adjuvants, les additions minérales (types I et II) les ajouts et les fibres dont l'aptitude générale à l'emploi est établie.

4.3. Produits en béton relevant d'une norme spécifique

Bon nombre de produits préfabriqués relèvent d'une norme produit dite « autoportante ».

À la différence de la norme NF EN 206/CN, les exigences ne portent pas sur la composition du béton mais sur les caractéristiques du produit fini (exigences de performance) : dimensions, absorption à l'eau, résistance au gel, à l'abrasion, à la glissance, performance au feu...

4.4. Utilisation de matières premières secondaires dans les produits en béton

Qu'il s'agisse de produits, de sous-produits ou de déchets, plusieurs textes en vigueur sont applicables de manière systématique aux produits en béton.

La démarche est synthétisée ci-après (figure 1) :

Le règlement européen n° 305/2011 datant du 9 mars 2011, dit « Règlement Produits de Construction » (RPC) définit les conditions d'apposition du marquage CE, nécessaire à la libre circulation des produits. Une de ces conditions (Exigence Fondamentale 3) impose aux ouvrages le respect de l'environnement, de l'hygiène et de la santé de leurs utilisateurs, notamment par rapport aux émissions de substances dangereuses.

Quels que soient les constituants utilisés pour la fabrication d'un produit de construction, ce dernier devra satisfaire aux exigences concernant ses éventuelles émissions dans les sols et les eaux de surface ou souterraines, ses émissions dans l'air intérieur ainsi que l'exposition des personnes aux radiations. Pour préciser les dispositions d'application du RPC et permettre l'élaboration des normes harmonisées, des travaux sont actuellement en cours au sein de la commission de normalisation européenne CEN/TC 351 et des instances européennes pour définir une méthodologie d'évaluation, des essais pertinents ainsi que d'éventuelles valeurs seuils pour la déclaration des émissions de substances dangereuses.

L'introduction de matériaux alternatifs dans les bétons conformes à la norme NF EN 206/CN impose à ces derniers soit de répondre aux normes constituants traditionnels, soit d'établir leur aptitude à l'emploi par un agrément technique européen ou par des dispositions en vigueur sur le lieu d'utilisation du béton.

Pour les produits en béton à norme autoportante (exemple des produits de voirie), la réalisation d'essais de performance mécanique, sanitaire et autres si nécessaire (comme l'acoustique) permet de démontrer l'aptitude à l'emploi des matériaux alternatifs.

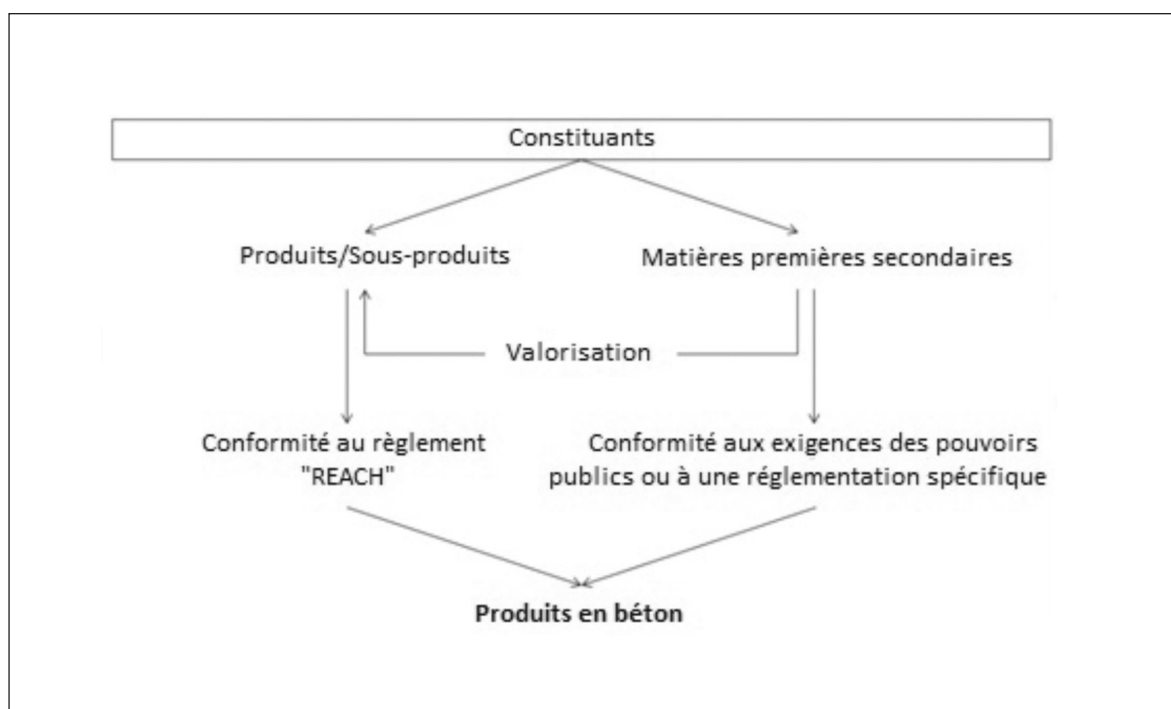


Figure 1 – Démarche générale dans le cadre réglementaire pour l'utilisation de constituants dans un produit en béton

Globalement, la valorisation de matières premières secondaires dans les bétons reste à l'heure actuelle compliquée du fait d'un corpus normatif conçu historiquement pour des matériaux et constituants traditionnels.

5. LE MATÉRIAU BÉTON

5.1. Données générales sur le béton

Le béton, matériau porteur d'innovations, est incontestablement un matériau de construction majeur pour demain. Il n'est pas constitué d'éléments rares, mais essentiellement d'oxydes de calcium, silice, aluminates et fer présents en très grande quantité dans l'écorce terrestre. Réalisable presque partout avec des moyens relativement simples, le béton est un matériau à fortes retombées sociétales.

Le béton est principalement constitué de matières premières minérales :

- le **ciment** : la fabrication du ciment passe par plusieurs étapes. Tout d'abord, le clinker est issu de la calcination d'un mélange de calcaire (80 %) et d'argile (20 %). Cette cuisson est émettrice de CO_2 d'une part par la nécessité de monter à des températures avoisinant 1 450 °C et, d'autre part, par la réaction de décarbonatation des carbonates de calcium CaCO_3 . Le clinker est ensuite broyé et additivé (gypse, additions minérales...) pour donner le ciment ;
- les **granulats** : il s'agit de matières inertes généralement issues de roches naturelles soit meubles (gravières, sablières, ballastières) soit massives (carrières). Ils sont

constitués de grains de taille diverses (gravillons, sables) et sont généralement composés d'un mélange de plusieurs roches de natures et d'espèces différentes ;

- l'**eau** : elle est nécessaire à l'hydratation du ciment et permet de mettre en place le béton ;
- les **additions minérales** : il s'agit de roches micronisées (additions calcaires, additions siliceuses) le cas échéant traitées thermiquement (métakaolins) ou de co-produits industriels normalisés (fumées de silice, laitiers de haut fourneau, cendres volantes de centrale thermique). Elles peuvent être de type I (considérées comme inerte dans le béton, soit les additions calcaires et siliceuses) ou de type II dès lors qu'elles possèdent un comportement hydraulique ou pouzzolanique (cendres volantes de centrale thermique, fumées de silice, laitiers de haut fourneau, métakaolins) ;
- les **adjuvants** : ajoutés en faible quantité, ils permettent de modifier les propriétés du béton à l'état frais et/ou durci.

Les principales normes des constituants sont présentées dans le tableau 3 ci-après.

5.2. Le béton sur le territoire français

En France, les producteurs de béton, regroupant les producteurs de béton prêt à l'emploi (figure 2) et les préfabriquants (figure 3), sont présents sur l'ensemble du territoire.

Ils s'approvisionnent majoritairement à proximité de leurs sites de production (carrières – figure 4 et cimenteries – figure 5) par voies routières ou fluviales afin de limiter les coûts dus au transport. Les sites d'approvisionnement sont également présents sur l'ensemble du territoire français.



5.3. Le béton : un matériau en constante évolution

Afin de répondre au besoin du marché, que ce soit pour le développement de nouvelles solutions techniques ou pour la valorisation de matières premières issues d'autres secteurs industriels, le matériau béton a évolué et continue d'évoluer dans sa conception.

Les principales évolutions du matériau ces trente dernières années sont les suivantes :

- utilisation d'**additifs** permettant de modifier les propriétés à l'état frais ou durci du matériau (NF EN 934-2) ;
- utilisation d'**additions minérales** complémentaires comme les additions calcaires (NF P 18-508) ou siliceuses (NF P 18-509) ;
- utilisation de **fibres métalliques** comme renfort structuré dans les bétons (en remplacement des armatures aciers pour certaines applications), avec en particulier le développement des bétons à ultra hautes performances (NF 14889-1) ;
- utilisation des **fibres polymères** pour l'amélioration du

comportement aux chocs, des phénomènes de retrait et de la résistance au feu (NF EN 14889-2).

Les évolutions concernant le béton portent aujourd'hui à la fois sur le matériau, les process industriels et les systèmes constructifs.

Dans le domaine des matériaux, si les bétons à hautes performances et les bétons auto-plaçants sont toujours très utilisés, on assiste à une utilisation croissante des bétons légers. Ces derniers sont utilisés pour améliorer les performances thermiques des produits et donc des ouvrages. Ils permettent également d'alléger les structures et donc d'optimiser les fondations.

On ne compte plus aujourd'hui les ouvrages en bâtiment ou génie civil dans lesquels les Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUP) sont utilisés pour la structure ou bien l'architecture. Parmi les réalisations particulièrement marquantes, citons le Mucem, le stade Jean Bouin, la fondation Louis Vuitton, le mémorial de Notre Dame de Lorette, le multiplex cinématographique de Rodez, la réparation du tablier des viaducs de Chillon, la réparation du pont d'Illzach...

L'année 2016 marque une étape importante pour les BFUP.

Tableau 3 – Principales normes des constituants utilisés dans les bétons

Constituants	Normes	Domaine
Ciments	NF EN 197-1	Ciments courants
	NF EN 197-4	Ciments de haut fourneau et à faible résistance à court terme
	NF EN 14647	Ciment d'aluminates de calcium
	NF EN 15743	Ciment sursulfaté
	NF P 15-314	Ciment prompt naturel
	NF P 15-302	Ciments à usage tropical
	NF P 15-317	Ciments pour travaux à la mer (PM)
	NF P 15-318	Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint (CP)
	NF P 15-319	Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (ES)
Granulats	NF EN 12620 NF EN 13055-1 NF P 18-545	Granulats pour béton hydraulique Granulats légers Granulats
Additions	NF EN 450-1 NF EN 13263-1 NF EN 15167-1 NF P 18-508 NF P 18-509 NF P 18-513	Cendres volantes Fumées de silice Laitiers vitrifiés moulus de haut-fourneau Additions calcaires Additions siliceuses Métakaolin
Eau	NF EN 1008	Eau de gâchage
Adjuvants	NF EN 934-2	Adjuvants pour béton
Pigments	NF EN 12878	Pigments
Produits de cure	NF P 18-370	Adjuvants

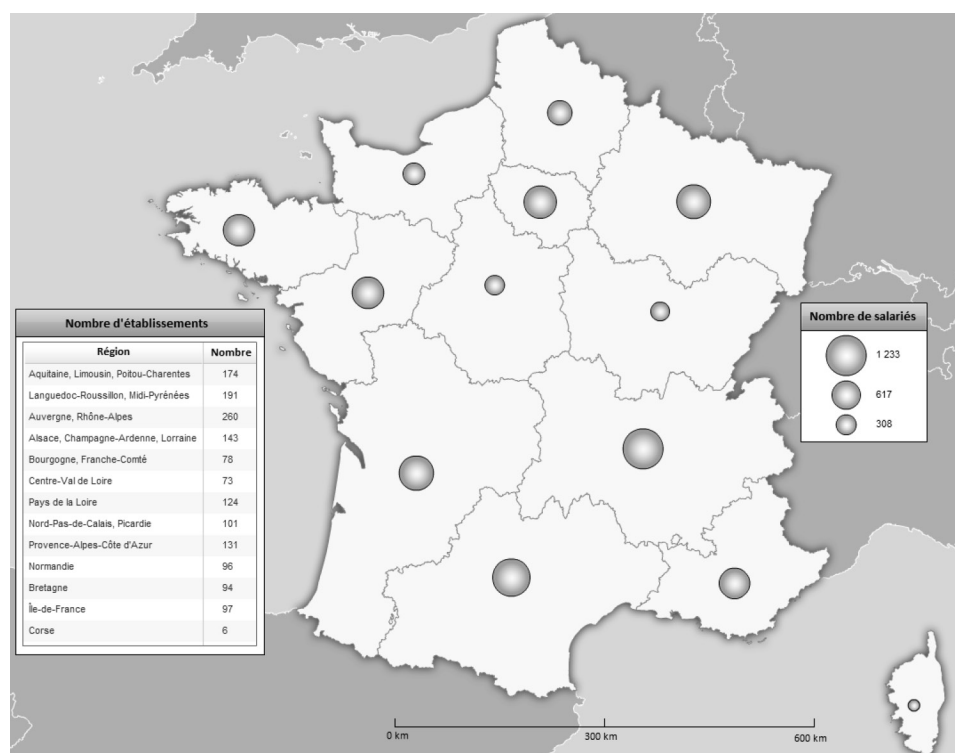


Figure 2 – Répartition des sites de production de béton prêt à l'emploi en France [Indcim]

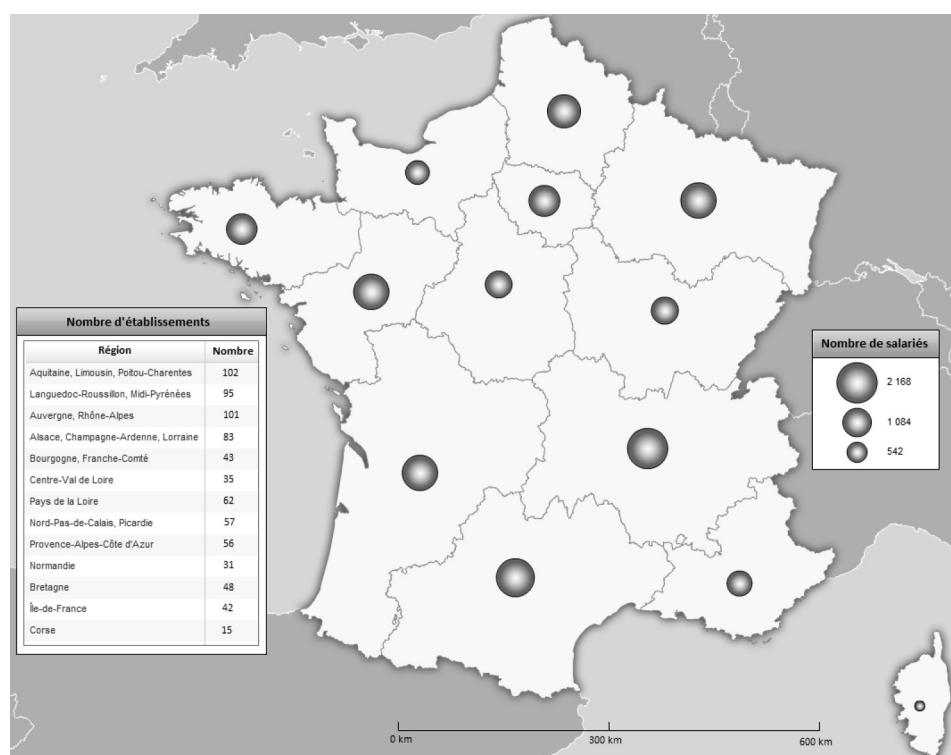


Figure 3 – Répartition des sites de production de produits préfabriqués en béton en France [Indcim]

Avec la parution des trois normes (matériau NF P 18-470, dimensionnement NF P 18-710, exécution [rédaction en cours]), c'est une nouvelle ère qui démarre pour cette famille de bétons aux propriétés tout à fait exceptionnelles. La nouvelle norme française de produit sur les BFUP (NF P 18-470) couvre la gamme 130 à 250 MPa en résistance caractéristique à la compression. Elle définit les caractéristiques et les

performances à atteindre ainsi que les exigences associées à leur production et au contrôle de leur conformité. Outre leur résistance mécanique à la compression particulièrement élevée, les BFUP se distinguent des bétons traditionnels de structure couverts par la norme NF EN 206/CN par leur non fragilité. L'utilisation de fibres et d'une matrice cimentaire très compacte leur confèrent une résistance en traction directe

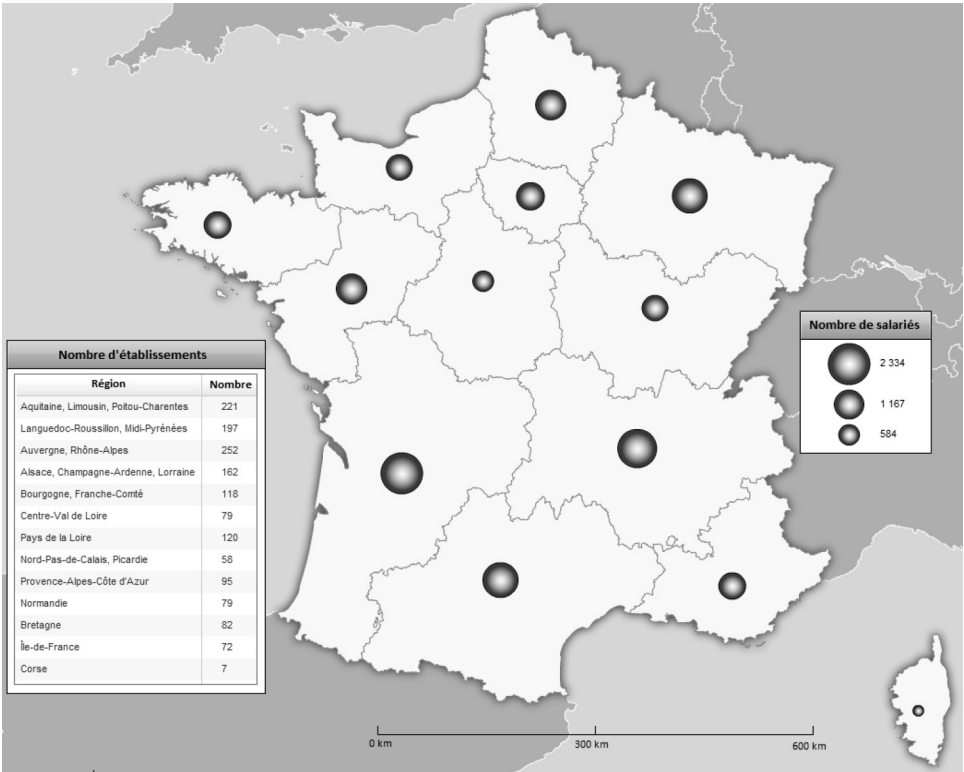


Figure 4 – Répartition des carrières de granulats sur le territoire français [Indcim]

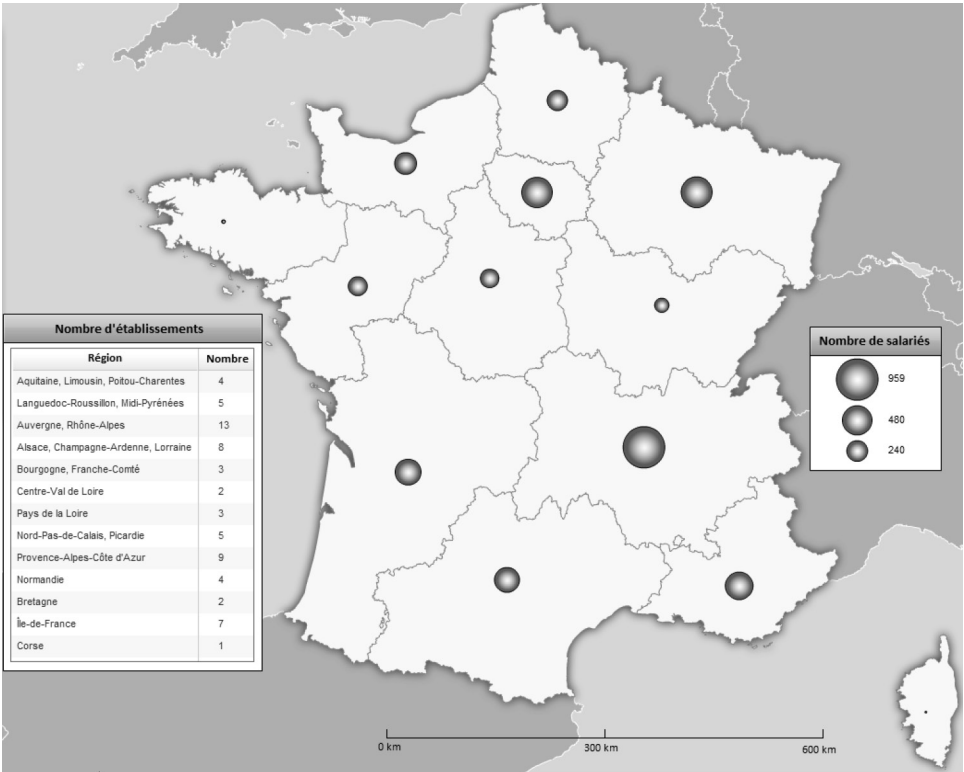


Figure 5 – Répartition des cimenteries sur le territoire français [Indcim]

élevée (plus de 6 MPa en résistance caractéristique) et un caractère écouissant pour les BFUP les plus renforcés. Aujourd’hui, les efforts en termes de R & D sont portés pour développer de nouveaux bétons à plus faible impact environnemental :

- recours aux additions minérales en plus grande quantité et en remplacement du clinker à l’origine des émissions de CO₂ ;
- utilisation de constituants agro-sourcés en tant que granulats ou fibres.

Les process industriels, qui intègrent aujourd’hui pleinement les évolutions liées au matériau et l’interface béton/machine, font l’objet d’encore davantage d’attention. Des progrès sont constatés à toutes les étapes de la fabrication des produits pré-fabriqués : depuis la maîtrise des caractéristiques des constituants pour davantage de régularité au niveau du matériau, le malaxage du béton, son transport, sa mise en place dans les moules, la vibration du béton et d’éventuels traitements thermiques, jusqu’au démoulage, cure et conditionnement pour le transport.

À titre d’exemple, la réflexion menée au CERIB autour des moyens de vibration sans contact a ainsi permis de développer et de breveter un procédé de vibration par onde acoustique particulièrement innovant (Vibritys). L’énergie de vibration classiquement apportée au moule par les chocs solidiens est transmise par l’air.

6. UTILISATION DE MATIÈRES PREMIÈRES SECONDAIRES DANS LES BÉTONS

6.1. Introduction

L’utilisation des matières premières secondaires vient en général en substitution ou en complément d’une des grandes familles de matières premières primaires. On distingue globalement deux types de substitution : celle visant à remplacer tout ou en partie des granulats et celle visant à remplacer une partie du liant (ciment et/ou addition).

Le niveau de maturation de substitution des matières primaires par les co-produits est différent selon les produits concernés. Les indicateurs pouvant être utilisés pour évaluer ce niveau de maturation sont les suivants :

- la disponibilité de la ressource secondaire en France ;
- l’organisation de la filière d’approvisionnement ;
- le contexte normatif et réglementaire ;
- l’utilisation industrielle.

Le tableau 4 ci-après, utilisé par la suite, permet d’évaluer de façon plus qualitative le niveau de maturité par rapport aux différents indicateurs et d’identifier les points bloquant pour la valorisation du constituant secondaire considéré.

6.2. Matières premières secondaires en substitution ou en complément des granulats d’origine minérale

La substitution des granulats d’origine minérale peut être réalisée avec des ressources de provenances très variées. On peut potentiellement les classer de la façon suivante :

- les granulats végétaux ou agro-sourcés ;
- les granulats provenant des produits de déconstruction ;
- les granulats issus d’autres secteurs industriels ;
- les granulats provenant d’autres sources.

6.2.1. Les granulats végétaux ou agro-sourcés

Source CERIB : Étude collective – Brevet AGROLITYS

Le chanvre cultivé, aussi appelé chanvre industriel ou chanvre à fibres, est une plante annuelle de la famille des Cannabinaceae, genre Cannabis et espèce Sativa. Il est cultivé pour toutes ses parties : sa fibre qui présente une grande résistance mécanique, son bois microporeux appelé chènevotte et sa graine oléagineuse appelée chènevis.

Le chanvre est une culture de printemps et une excellente tête de rotation. Par ailleurs, il ne nécessite pas l’utilisation de produits phytosanitaires. Il est semé entre début avril et début mai, et présente une croissance très rapide lui permettant d’atteindre jusqu’à 3 m de hauteur avant la récolte. La récolte se fait à maturité de la plante. La paille seule est récoltée fin août (cultures non battues), mais il est également possible de récolter simultanément la graine et la paille (cultures battues) en septembre. Lorsque la paille est récoltée, elle subit une phase d’andainage (alignement du fourrage) permettant de réduire le temps de rouissage, le séchage et le pressage pour la mise en balle.

Après récolte, deux produits sont valorisables : le chènevis (graine) et la tige (paille).

La tige elle-même permet d’obtenir plusieurs produits après transformation. En effet, cette dernière possède une paroi épaisse en périphérie qui est composée des fibres de chanvre autour du cœur qui constitue la chènevotte (granulats ou bois de chanvre). La chènevotte est la partie qui est valorisée dans le béton.

Afin de séparer les constituants de la tige, la paille doit subir une opération de défibrage, appelée 1^{re} transformation, réalisée classiquement en trois étapes successives : le décortiquage, la séparation et l’affinage. Les balles de paille sont acheminées vers l’unité de transformation où la fibre et la chènevotte sont séparées mécaniquement, puis la fibre est « peignée » afin d’être affinée. Tout au long du processus, on récupère de la poudre de chanvre, co-produit du défibrage. Des déchets, comme des cailloux ou du bois, peuvent également être récupérés à l’issue du processus. Cette opération peut se faire de manière artisanale ou industrielle.

L’Europe fait partie des grands bassins de production de fibres végétales et se distingue pour sa production de chanvre et de lin (textile et oléagineux). Par ailleurs, la France est le premier pays européen producteur de plantes à fibres avec 84 % des surfaces. Elle est suivie ensuite par la Belgique et les Pays-Bas. La quantité de granulats de chanvre disponible en France est de 27 742 t (252 000 m³) pour 7 700 ha (données 2014).

Tableau 4 – Éléments d’analyse pour chaque matière première secondaire considérée

Disponibilité de la ressource secondaire			Organisation de la filière d’approvisionnement		Contextes normatif et réglementaire			Utilisation industrielle	
Faible	Forte	Localisée	Faible	Bonne	Inexistant	Existant	En cours	Oui	Non



Figure 6 – Culture de chanvre



Figure 7 – Chènevotte



Figure 8 – Fleur de lin (gauche) ; anas de lin (droite)

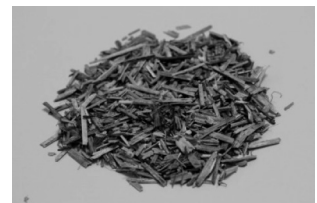


Figure 9 – Miscanthus

Les travaux menés au CERIB ont permis de valider l'intérêt de l'utilisation des granulats de chanvre dans la fabrication des blocs de construction.

En Belgique, ce type de bloc est déjà commercialisé pour des applications structurelles.

D'autres co-produits agro-sourcés (le lin et le miscanthus notamment) pourraient également être utilisés comme matière première secondaire dans le béton (en cours de caractérisation au CERIB).

Tableau 5 – Éléments d'analyse pour les granulats agro-sourcés

Disponibilité de la ressource secondaire			Organisation de la filière d'approvisionnement		Contextes normatif et réglementaire			Utilisation industrielle	
Faible	Forte	Localisée	Faible	Bonne	Inexistant	Existant	En cours	Oui	Non
X		X		X			X	X	

Tableau 6 – Éléments d'analyse pour le lin et le miscanthus

Disponibilité de la ressource secondaire			Organisation de la filière d'approvisionnement		Contextes normatif et réglementaire			Utilisation industrielle	
Faible	Forte	Localisée	Faible	Bonne	Inexistant	Existant	En cours	Oui	Non
X (lin)	X (miscanthus)	X		X	X				X

6.2.2. Les granulats provenant du recyclage des produits de déconstruction

6.2.2.1. Granulats de béton cellulaire

Source : Brevet CERIB – NEOVITYS

Les granulats de béton cellulaire peuvent venir en substitution des granulats légers de type pouzzolane, argile et schiste expansés, bille de polystyrène, pierre ponce..., pour la confection de béton léger (masse volumique inférieure à 2 000 kg/m³).

Le gisement de granulats de béton cellulaire peut provenir de deux sources :

- les rebuts de production (produits défectueux ou chutes de découpe) ;
- la récupération des blocs de béton cellulaire sur chantier pendant la déconstruction.

Pour le premier cas, il existe quatre sites de production en France basées à Valenciennes (59), à Saint-Savin (38), Montereau-Fault-Yonne (77) et Mios (33).

6.2.2.2. Granulats de béton de déconstruction

Source CERIB : Étude collective (Projet National RECYBETON : <http://www.pnrecybeton.fr/>) – Prestations de service

À l'heure actuelle, la France produit et consomme environ 349 millions de tonnes de granulats chaque année (statistiques de l'UNICEM, 42014), dont plus de la moitié est utilisée pour la chaussée et les remblais. Le reste est employé pour le bâtiment et les ouvrages en béton.

Selon les enquêtes statistiques menées par l'UNICEM (Union Nationale des Industries de Carrières Et Matériaux de construction), les granulats recyclés sont issus aux deux tiers des matériaux de démolition et le restant de la production artificielle des granulats, tels que les laitiers de sidérurgie, les schistes houillers ou encore les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères.

De nombreuses installations spécialisées dans le traitement des déchets de démolition proposent des granulats recyclés utilisables dans les bétons. Il faut cependant noter que les coûts de transport et d'élaboration limitent considérablement les possibilités d'emploi économique de ces granulats (sauf dans le cas où les distances de transport sont très réduites).

Ces granulats présentent en général des caractéristiques physico-chimiques (teneur en certains éléments tels que les sulfates et les sulfures provenant du plâtre), une teneur en matières organiques, ainsi qu'une porosité et une absorption d'eau plus élevées que celles des granulats naturels. Cela limite les possibilités d'emploi actuelles à une substitution très partielle. Il est impératif de s'assurer que l'approvisionnement est régulier et peu variable. Un contrat de fourniture

basé sur une Fiche Technique Produit (FTP) entre l'industriel et l'entreprise de recyclage est nécessaire.

Au niveau européen, la norme NF EN 12620 définit les règles d'utilisation des granulats pour béton. Un amendement à cette norme a été publié en 2008 et introduit l'utilisation des granulats recyclés ainsi que les fréquences d'essais dans le cadre du marquage CE. La plupart des normes d'essais applicables aux granulats naturels le sont pour les granulats recyclés mais certaines ont été développées spécifiquement. Les caractéristiques complémentaires à mesurer pour les recyclés sont :

- la teneur en **sulfates solubles dans l'eau** (essai selon la norme NF EN 1744-1 article 10.2) permettant de déterminer la présence de plâtre dans les granulats recyclés ;
- la teneur en **chlorures solubles dans l'acide** (essai selon la norme NF EN 1744-5) permettant de prendre en compte les chlorures présents en surface du granulat recyclé et ceux présents dans la phase mortier du granulat recyclé ;
- l'influence des constituants sur le **temps de prise** (essai selon la norme NF EN 1744-6) permettant de mettre en évidence la présence de certains constituants qui seraient susceptibles de modifier le temps de prise du béton ;
- la **classification** des constituants des granulats recyclés (essai selon la norme NF EN 933-11) permettant de classer les principaux constituants (béton, granulats non liés, briques, matériaux bitumeux...) et les polluants (verres, plastiques, bois...) en fonction de leur pourcentage en masse.

Les bétons de type Béton Prêt à l'Emploi sont encadrés par la norme béton NF EN 206/CN. Cette norme prévoit des taux de substitution en fonction de la qualité des granulats. Leur utilisation est donc contrainte par des caractéristiques physiques et chimiques assez restrictives. Cependant, cette possibilité n'existe que depuis fin 2012 et est amenée à évoluer avec les travaux du projet National RecyBéton, dont les résultats seront prochainement publiés.

Au regard de l'ensemble des normes européennes et françaises des granulats et des différents essais à réaliser pour la caractérisation des granulats recyclés, le code B est la plus haute qualité à laquelle peut prétendre un granulat recyclé.

Dans le cas des produits en béton préfabriqués, il est également possible d'introduire des granulats recyclés dans la limite d'équivalence de performance mécanique et dimensionnelle spécifiée dans les normes produits associées. À titre de démonstration, une étude a été réalisée en 2006 au CERIB, avec pour objectif de recycler un ouvrage en blocs (bâtiment commercial) dans la fabrication de nouveaux blocs. Un broyage adapté de cette ressource de seconde main a permis de les transformer en granulats recyclables dans une production de blocs.

Tableau 7 – Éléments d'analyse pour les granulats de béton cellulaire

Disponibilité de la ressource secondaire			Organisation de la filière d'approvisionnement		Contextes normatif et réglementaire			Utilisation industrielle	
Faible	Forte	Localisée	Faible	Bonne	Inexistant	Existant	En cours	Oui	Non
	X	X	X		X				X

La caractérisation des granulats obtenus, puis celle des blocs fabriqués à partir d'un mélange incluant 7,3 % de ces granulats, a démontré la parfaite recyclabilité des blocs en béton avec toutes les garanties d'usage (conformément aux spécifications des normes granulats et blocs en béton).

Un travail sur une meilleure qualité de granulats issus du recyclage (travail sur le process) permettrait d'augmenter l'utilisation de ces matières premières secondaires.

6.2.2.3. Autres granulats de matériaux de déconstruction

D'autres matériaux de déconstruction ont également fait l'objet de travaux de valorisation en tant que constituants secondaires du béton. On peut citer par exemple :

- la terre cuite, concassée puis criblée ;
- les palettes de bois, broyées sous formes de copeaux destinés à la fabrication de béton pour des murs anti-bruits.

6.2.3. Les granulats issus d'autres secteurs industriels

De nombreux secteurs industriels cherchent aujourd'hui à valoriser leurs « déchets » dans des domaines autres que le leur. Le béton, de par ses capacités d'inertage, est un candidat souvent sélectionné.

Les secteurs pourvoyeurs de constituants secondaires sont :

- l'industrie automobile et navale ;
- la sidérurgie et les secteurs connexes ;
- l'industrie textile ;
- ...

Quelques exemples ci-après illustrent cette diversité.

6.2.3.1. Granulats de laitiers

Les laitiers regroupent un certain nombre de co-produits industriels issus de la fabrication de l'acier et de la fonte. Ces co-produits ont des process de génération différents qui leur confèrent des caractéristiques physico-chimiques différentes, permettant leur utilisation dans des applications variées dans le domaine la construction. On peut citer par exemple leur utilisation en tant que granulats pour enrobés bitumineux ou comme couche de forme dans les routes, ou encore comme liant dans les applications bétons.

6.2.3.2. Sables de fonderie

Source CERIB : Étude collective avec le CTIF – Projet Valorisation Croisée Des Déchets

Liés avec des argiles (procédé de sables à vert) ou des résines (procédé de sables à prise chimique), les sables de fonderie sont utilisés pour confectionner respectivement des moules et des noyaux dans lesquels sont coulés les métaux en fusion. Après l'opération de démoulage des pièces métalliques, une grande partie des sables est réutilisée sur place par régénération, tandis que les sables usés de fonderie résiduels (nommés également « sables rejetés », « vieux sables » ou « sables brûlés ») doivent être éliminés (l'industrie de la fonderie estime qu'en moyenne, pour une tonne de pièces de fonderie produite, on utilise dix tonnes de sable de fonderie dont environ une tonne doit être éliminée). À ce stade, le « sable usé » est considéré comme un déchet de fonderie et peut éventuellement suivre une autre voie de recyclage. Ces sables usés sont classés en fonction de leur teneur en phénols.

On distingue donc :

- les sables imbrûlés contenant des liants organiques de synthèse ;
- les sables contenant des liants organiques de synthèse brûlés au cours de leur utilisation ;
- les sables ne contenant que des liants organiques naturels ou des liants minéraux.

La quantité de sables usés, disponibles pour une utilisation en génie civil, est de l'ordre de 100 000 t/an.

Étant donné que ces co-produits sont des résidus de calcination d'un mélange quasi-inerte thermiquement, ils présentent des caractéristiques minéralogiques et pétrographiques semblables à celles des sables de moulage d'origine, caractéristiques néanmoins quelque peu différentes selon le procédé de moulage utilisé :

- les sables usés issus du procédé de sable à vert sont essentiellement composés de quartz (SiO_2) accompagné d'une faible proportion d'argile (1 à 5 %), sous forme de bentonite (mélange de montmorillonite, micacés et kaolinite), et accessoirement de chromites $[(\text{Mg}, \text{Fe}) \text{Cr}_2\text{O}_4]$. Dans certains cas, on peut détecter des traces d'adjuvant de démoulage tels que le noir de carbone ou des produits

Tableau 8 – Éléments d'analyse pour les granulats issus de la déconstruction

Disponibilité de la ressource secondaire			Organisation de la filière d'approvisionnement		Contextes normatif et réglementaire			Utilisation industrielle	
Faible	Forte	Localisée	Faible	Bonne	Inexistant	Existant	En cours	Oui	Non
	X		X			X		X	

Tableau 9 – Éléments d'analyse pour les sables de fonderie

Disponibilité de la ressource secondaire			Organisation de la filière d'approvisionnement		Contextes normatif et réglementaire			Utilisation industrielle	
Faible	Forte	Localisée	Faible	Bonne	Inexistant	Existant	En cours	Oui	Non
X		X	X		X				X

organiques de toutes natures (paraffines, graisses aux silicones-esters, sulfonates...) ;

- les sables usés issus du procédé de sable à prise chimique sont constitués de quartz et de résidus de liant organique type phénolique ou furanique.

6.2.3.3. Granulats de caoutchouc

Les granulats proviennent d'un broyage très fin de la gomme des pneus usagés, après extraction des fibres textiles et des fils métalliques également contenus dans les pneus. La taille des granulats varie de 0,8 à 20 mm. Des particules de caoutchouc de types poudrettes sont également obtenues lors de l'opération de broyage et de granulation des pneumatiques. Leur taille varie entre 10 microns et 0,8 mm. La société ALIAPUR (www.aliapur.fr) est en charge la valorisation de ces granulats.

6.2.3.4. Granulats de textiles usagés

Source CERIB : Prestation de service

Aujourd'hui, environ 100 000 tonnes de textiles usagés sont collectées en France, soit environ 15 % de la totalité disponible. Les voies de valorisation actuelles sont le réemploi pour la production de nouveaux vêtements (50 %), dans les chiffons industriels (14 %), dans l'effilochage (26 %), et en tant que charge énergétique pour l'incinération (10 %).

L'objectif, à moyen terme, est de collecter 50 % des textiles usagés. Des travaux réalisés au CERIB montrent qu'il est possible de les utiliser comme matériau alternatif aux copeaux de bois pour des applications de béton à propriétés acoustiques.

6.2.4. Les granulats provenant d'autres sources

6.2.4.1. Granulats issus de terres agricoles

Source CERIB : Étude collective

La valorisation de granulats issus de terres agricoles est une option intéressante tant au niveau économique qu'au niveau écologique.

Le ramassage de ces pierres offre, pour les agriculteurs, plusieurs avantages :

- la diminution de l'usure et de la casse du matériel ;
- la diminution de l'utilisation de produits anti-limaces ;
- l'augmentation du pourcentage de levée des cultures.

D'autre part, la généralisation des « techniques culturales simplifiées », également appelées « techniques de conservation des sols », requiert l'abandon des labours, action dont les inconvénients sont nombreux :

- destruction de l'humus ;
- création de complexes argilo-humiques favorisant le lessivage des sols et pouvant rendre les terres stériles.

Ces méthodes de travail limitent le travail du sol et induisent la remontée périodique des granulats, ce qui complexifie la tâche des exploitants.

Le ramassage des pierres dans les terres agricoles est une action déjà entreprise par certains exploitants. Toutefois, le traitement industriel et la valorisation ne sont pas encore pratiqués, les agriculteurs utilisant les pierres, uniquement extraites dans les pièces les plus encombrées, que pour des remblais ou la création et l'entretien de chemins.

Les pierres que l'on peut récolter dans les terres agricoles du nord du Loiret sont, par exemple, uniquement des silex alluvionnaires (pas d'autres types de granulats en mélange), dont la granulométrie varie entre 40 et 120 mm, avec une moyenne de l'ordre de 60 à 80 mm.

La récolte des pierres est une activité saisonnière, pouvant se pratiquer avant les semis, c'est-à-dire en avril, et après les récoltes de fin juillet à mi-août. La récolte se réalise à l'aide d'une extractrice de pierres, dont le fonctionnement est proche de celui d'une machine à ramasser les pommes de terre. Le transit de pierres sur le tapis de la machine réalise un premier criblage de la terre et des débris végétaux.

Les pierres sont ensuite transportées sur une plateforme pour un broyage, puis un criblage pour obtenir la granulométrie souhaitée. Les granulométries obtenues correspondent aux standards utilisés dans les bétons techniques ou cyclopéens.

6.2.4.2. Granulats de mâchefers

Source CERIB : Prestation de service

Les Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères (MIOM) sont les résidus solides issus de la combustion dans des fours d'usine d'incinération (fours à grilles, à rouleaux ou oscillants) de la fraction non triée des ordures ménagères, collectée par le service public, et généralement plus ou moins mélangée à des déchets d'entreprises (artisans, commerçants) et d'administrations.

Une usine d'incinération d'ordures ménagères se compose :

- d'une fosse de réception des déchets ;
- d'un groupe four-chaudière (récupération de vapeur pour la valorisation énergétique des déchets sous forme de chaleur et/ou d'électricité) ;
- d'une unité de traitement des fumées ;
- d'une unité d'entreposage des REFIOM (déchets dangereux) avant évacuation ;
- d'une unité d'entreposage des MIOM (déchets non dangereux) avant évacuation.

Les opérations visant à améliorer l'homogénéité et la qualité des MIOM en vue de leur utilisation sont :

- le criblage, éventuellement complété par un concassage, en vue de faire rentrer le matériau dans un fuseau granulométrique ;

Tableau 10 – Éléments d'analyse pour les pierres issues des terrains agricoles

Disponibilité de la ressource secondaire			Organisation de la filière d'approvisionnement		Contextes normatif et réglementaire			Utilisation industrielle	
Faible	Forte	Localisée	Faible	Bonne	Inexistant	Existant	En cours	Oui	Non
X			X			X			X

- le retrait des métaux ferreux par over-band ;
- le retrait des métaux non-ferreux par machine à courant de Foucault ;
- le retrait des imbrûlés résiduels par soufflage (papiers, cartons et plastiques).

Ces opérations peuvent être réalisées une ou plusieurs fois pour améliorer le résultat final et être conduites sur différentes fractions granulométriques des MIOM. Les matériaux extraits rejoignent des filières de valorisation matière.

La composition élémentaire des MIOM bruts dépend de la composition des ordures incinérées, de la volatilité des éléments, du processus d'incinération (type de four, conduite du four). Elle peut donc varier dans le temps pour un site de production donné, et dans l'espace, d'un site de production à un autre. La composition d'un lot de MIOM évoluera aussi en fonction de l'efficacité des opérations de retrait des métaux et des imbrûlés. Un même MIOM, selon qu'il sera brut ou qu'il aura été plus ou moins élaboré, aura donc une composition élémentaire et des caractéristiques physico-chimiques différentes.

En l'état actuel des connaissances, la description des MIOM se fait sur la base des critères habituels d'identification de nature (granularité, propreté ou argilosité), d'état (teneur en eau) et de résistance mécanique (à la fragmentation et à l'usure).

Le tableau ci-dessous présente un exemple des principales caractéristiques géotechniques mesurées sur les MIOM de catégorie V en France.

6.2.4.3. Granulats de sédiments marins et fluviaux

Source CERIB : Étude collective

Les canaux et les zones portuaires s'envasent naturellement. Il faut constamment les draguer pour maintenir les tirants d'eau nécessaires à la circulation maritime et fluviale et pour lutter contre les risques de crue. En France, ces opérations produisent 50 millions de tonnes de sédiments qui acquièrent le

statut de déchets quand ils sont pollués (présence éventuelle de métaux lourds, hydrocarbures, pesticides...).

Un procédé de traitement des sédiments a été mis au point par la société SOLVAY. Ce traitement chimique et thermique permet d'inertiser les sédiments. Le sédiment traité se présente comme une fine minérale composée en moyenne de 80 % siliceuse et 20 % calcaire, dans laquelle les métaux lourds sont immobilisés et la pollution organique éliminée.

Le projet a consisté à étudier la faisabilité d'utilisation des sédiments inertes dans la fabrication des bétons à démolage immédiat (pavés).

La fabrication des pavés de façon semi-industrielle avec incorporation des sédiments (0/2 mm) a mis en évidence qu'il fallait légèrement augmenter le temps de malaxage afin de permettre aux sédiments d'absorber une partie de l'eau d'ajout. L'obtention d'un pavé possédant des caractéristiques au démolage satisfaisantes (tenue du produit sur la planche, collage au pilon) conduit à une légère augmentation de la teneur en eau du béton.

Les essais en laboratoire et en usine ont également mis en évidence que le taux d'incorporation des sédiments dans les pavés est limité par les performances de la composition des pavés de référence par rapport aux critères d'acceptation de la norme NF EN 1338. En effet, plus les performances de la composition témoin seront proches des critères d'acceptation de la norme, plus la quantité de sédiments incorporables sera faible.

Le bilan technico-économique et environnemental pour l'utilisation des sédiments dans les pavés (ou produits à démolage immédiat par extension) reste délicat à faire. En effet, d'un point de vue économique, le coût des sédiments pour l'utilisateur reste pour le moment une inconnue qui ne permet pas de positionner le matériau par rapport aux autres constituants. Sur le plan technique, l'incorporation des sédiments dans les bétons à démolage immédiat risque de ne pouvoir se faire qu'avec des taux relativement faibles.

Tableau 11 – Exemple de caractéristiques physiques sur le MIOM

Granularité		0/20 mm ; 0/31,5 mm
Teneur en fines (passant à 0,08 mm)		4 à 12 %
Passant à 2 mm		20 à 50 %
Propreté	Équivalent de sable (ES)	30 à 55
	Valeur au bleu de méthylène (VBS)	0,01 à 0,04 g/kg
Résistance mécanique	Coefficient Los Angeles (LA)	35 à 50
	Coefficient micro-Deval (MDE)	15 à 45
Masse volumique apparente sèche		1 à 1,2 t/m ³

Tableau 12 – Éléments d'analyse pour les granulats de mâchefers

Disponibilité de la ressource secondaire			Organisation de la filière d'approvisionnement		Contextes normatif et réglementaire			Utilisation industrielle	
Faible	Forte	Localisée	Faible	Bonne	Inexistant	Existant	En cours	Oui	Non
	X		X		X				X

Tableau 13 – Éléments d'analyse pour les sédiments marins et fluviaux

Disponibilité de la ressource secondaire			Organisation de la filière d'approvisionnement		Contextes normatif et réglementaire			Utilisation industrielle	
Faible	Forte	Localisée	Faible	Bonne	Inexistant	Existant	En cours	Oui	Non
	X	X	X		X				X

Les données issues du pilote industriel montrent que le procédé a un réel impact environnemental en termes de consommation d'énergie et de changement climatique notamment.

6.3. Matières premières secondaires en substitution ou en complément du liant

De nombreuses études ont été menées sur le rôle des additions minérales dans les bétons. Les performances des différentes solutions au niveau du liant sont aujourd'hui appréhendées en considérant l'ouvrabilité, la résistance mécanique (à court et moyen terme), la durabilité, le coût et l'impact sur l'environnement dont les émissions de CO₂ mais pas seulement (figure 10). La consommation des ressources naturelles, l'énergie primaire utilisée, l'eutrophisation sont également des paramètres clés à considérer.

6.3.1. Les cendres volantes de charbon

Source CERIB : Étude collective

Les cendres volantes de charbon sont les résidus les plus fins de la combustion du charbon en centrale thermique. Leur nature minéralogique, chimique et leur finesse dépendent notamment du combustible d'origine (houille ou lignite), du procédé de combustion et des paramètres d'exploitation associés. Les centrales les plus répandues actuellement sont les

centrales thermiques classiques (également appelées centrales thermiques à flamme). On trouve également des centrales à Lit Fluidisé Circulant (LFC).

Dans les centrales à flamme à charbon, le combustible est transformé en fines particules dans des broyeurs. Il est mélangé à de l'air chaud et injecté sous pression dans la chambre de combustion par des brûleurs. La température de combustion est comprise entre 1 200 °C et 1 400 °C. Les fumées de combustion passent par des dépoussiéreurs électrostatiques qui retiennent la quasi-totalité des cendres volantes (cendres silico-alumineuses). Elles se présentent sous la forme d'une poudre dont les particules sont sphériques, pleines ou creuses. Les éléments principaux sont la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et les oxydes de fer (Fe₂O₃ et Fe₃O₄) ; ils représentent généralement plus de 70 % de la masse. Les particules contiennent également de la chaux (CaO).

Dans les centrales à Lit Fluidisé Circulant, le combustible, mélangé à du calcaire, est fluidisé à une vitesse comprise entre 5 et 6 m/s, et brûlé à une température de 850 °C, sous pression atmosphérique. Les fumées passent ensuite dans des dépoussiéreurs qui extraient les cendres volantes. Les cendres produites dans les installations de LFC se présentent comme une poudre très fine dont les particules sont sous forme de plaquettes et de fragments alvéolaires.

Certaines ont des propriétés hydrauliques (cendres cal-ciques), et d'autres des propriétés pouzzolaniques (cendres silico-alumineuses) :

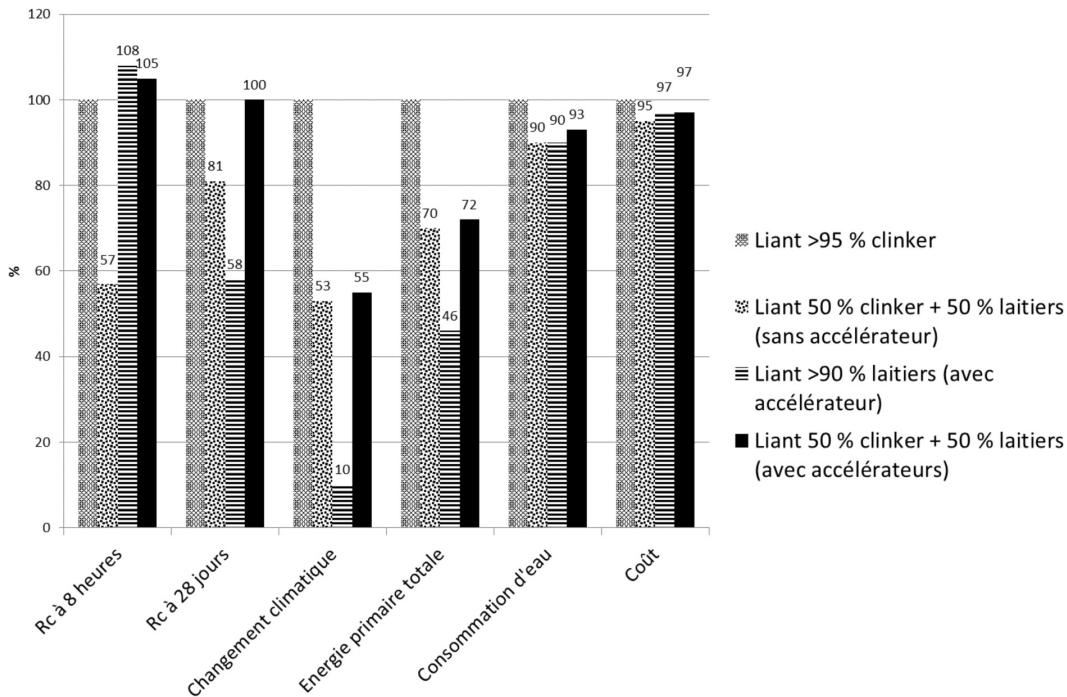


Figure 10 – Analyse comparative pour différents liants (thèse François Jacquemot, 2014)

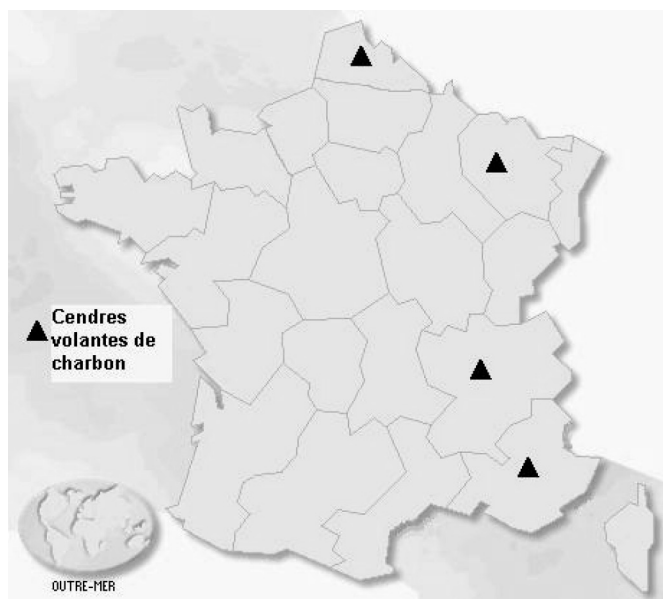


Figure 11 – Gisement des cendres volantes de charbon en France

- les cendres silico-alumineuses de LFC présentent des phases minéralogiques semblables aux cendres silico-alumineuses classiques (quartz et anhydrite en phase majeure, hématite et magnétite en phase mineure), mais également d'autres phases comme des illites, du mica, du périclase (MgO) ainsi que de la chaux vive et des traces de calcite. Leur composition chimique se caractérise par une teneur en chaux inférieure à 10 % ;
- pour les cendres volantes calciques de LFC, l'anhydrite et la chaux vive sont présentes de façon plus importante que dans le cas des cendres siliceuses de LFC. On y trouve également du quartz en proportion non négligeable. Du fait de leur minéralogie, de leur chimie et de leur teneur en chaux libre importante, ces cendres présentent un caractère plutôt hydraulique.

Pour une utilisation dans les bétons, les cendres doivent être conformes à la norme NF EN 450-1 où sont particulièrement limitées la perte au feu, la teneur en chlorure, les teneurs en

anhydride sulfurique (SO_3) et en oxyde de calcium libre (ou chaux libre).

Les cendres volantes de charbon sont pour la plupart produites par deux grands groupes : Électricité de France (EDF) et SNET (Société Nationale d'Électricité et de Thermique, filiale électrique de Charbonnages de France (CDF)) ; elles sont commercialisées respectivement par EDF et Surschiste. Les sites de production et de stocks existants les plus importants sont situés dans les régions qui ont connu l'exploitation de la houille. Ils se trouvent près des ports qui permettent aujourd'hui l'approvisionnement de charbon importé.

6.3.2. Les fumées de silice

Les fumées de silice sont des fines qui se forment lors de la fabrication du silicium ou de silico-alliage. Les alliages de silicium et de ferrosilicium sont fabriqués à partir d'un mélange de quartz (SiO_2), de charbon (ou coke de pétrole) et de copeaux de bois. Pour la fabrication du ferrosilicium, des tournures d'acier sont ajoutées au mélange. Celui-ci est acheminé dans un four à arc électrique, dont la puissance peut monter jusqu'à environ 30 MW, et dans lequel s'effectue la réduction du quartz. Le métal en fusion est ensuite affiné par injection d'air pour oxyder l'aluminium et le calcium. Différents alliages sont alors produits et le métal est coulé dans des moules de refroidissement. Les réactions intermédiaires conduisant à la réduction du silicium produisent aussi une très fine poussière de silice amorphe qui est entraînée par les gaz chauds (essentiellement air et dioxyde de carbone) émis par le four ; ces gaz sont filtrés pour recueillir la poussière de silice amorphe. Pour une tonne de silicium fabriquée, 250 kg de fumées de silice sont produites.

Les fumées silice sont aujourd'hui couramment utilisées dans la composition des bétons à hautes, très hautes et ultra hautes performances. Elles font l'objet de la norme NF EN 13263-1.

6.3.3. Les laitiers de haut fourneau

Source CERIB : Étude collective – Prestations de service

La première étape dans la production de l'acier est l'obtention de la fonte : le minerai de fer, est introduit avec du coke

Tableau 14 – Éléments d'analyse pour les cendres volantes de charbon

Disponibilité de la ressource secondaire			Organisation de la filière d'approvisionnement		Contextes normatif et réglementaire			Utilisation industrielle	
Faible	Forte	Localisée	Faible	Bonne	Inexistant	Existant	En cours	Oui	Non
X		X		X		X		X	

Tableau 15 – Éléments d'analyse pour les fumées de silice

Disponibilité de la ressource secondaire			Organisation de la filière d'approvisionnement		Contextes normatif et réglementaire			Utilisation industrielle	
Faible	Forte	Localisée	Faible	Bonne	Inexistant	Existant	En cours	Oui	Non
Suffisante		X		X		X		X	

(combustible) et de la chaux (fondant) dans un haut fourneau (four vertical, dans lequel des larges volumes d'air chaud sont soufflés dans la partie basse par des tuyères). Il s'agit d'un processus continu dans lequel la colonne de matières brutes descend au fur et à mesure que le fer (sous forme de fonte) est extrait du minerai. La fonte s'accumule au fond du haut fourneau et est recouvert par le laitier liquide en fusion dont la densité est plus faible. Le laitier et la fonte en fusion (à environ 1 500 °C) sont extraits périodiquement du haut fourneau. Une tonne de fonte génère environ 250 à 300 kg de laitier. Lors du soutirage, après séparation de la fonte, le laitier peut être cristallisé ou vitrifié :

- l'opération de cristallisation consiste à laisser refroidir le matériau en fusion dans des fosses jusqu'au début de la solidification, puis à l'arroser pour abaisser sa température afin de pouvoir le concasser et le cribler ;
- l'opération de vitrification peut se faire par deux méthodes :
 - soit par un dispositif dans lequel le laitier subit une trempe (arrosage abondant d'eau sous haute pression) pour former instantanément, par explosion, du laitier vitrifié, appelé laitier granulé,
 - soit être pulvérisé à l'air, pour former du laitier bouleté.

Les caractéristiques et les utilisations des laitiers vitrifiés et cristallisés sont présentées dans le tableau ci-après.

L'utilisation des laitiers de haut fourneau en tant qu'addition dans les bétons est encadrée par la norme NF EN 15167-1.

Les travaux de thèse de François Jacquemot (2014) montrent que les laitiers peuvent être utilisés en quantité très importante dans le liant tout en respectant les cahiers des charges propres aux applications industrielles (aptitude aux process industriels, résistance à court terme élevée, durabilité...). L'activation par voie thermique et chimique des laitiers seuls ou en présence de ciment Portland a été l'objet des travaux expérimentaux menés. Les solutions développées constituent des pistes intéressantes à approfondir du point de vue des impacts environnementaux et économiques (cf. figure 10).

6.3.4. Les laitiers d'aciérie

Source CERIB : Prestation de service

Les laitiers d'aciérie sont des co-produits de l'élaboration de l'acier. Selon la filière d'élaboration, on distingue :

Tableau 16 – Caractéristiques des deux types de laitiers

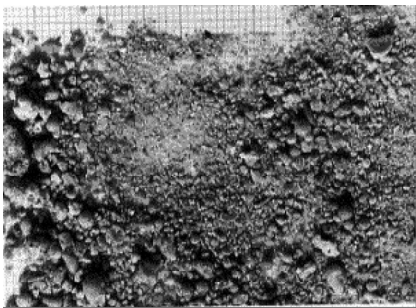
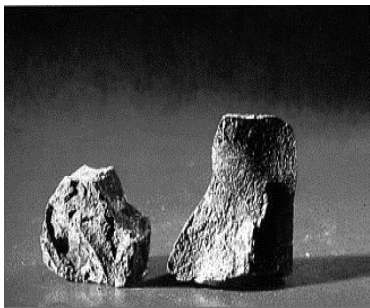
Caractéristiques	Laitier vitrifié	Laitier cristallisé
Couleur	Jaune/Beige	Gris
Masse volumique	2,7 à 3 t/m ³	1,2 à 3 t/m ³
Los Angeles	-	16 à 45
Granulométrie	0/8 mm	Tout venant 0/300 mm ou concassé selon la demande, d/D
Aspect visuel		
Composition chimique	CaO : 40 à 48 % SiO ₂ : 32 à 41 % Al ₂ O ₃ : 9 à 18 % MgO : 1 à 9 %	
Utilisations	Après broyage, comme liant hydraulique pour les bétons. Dans le verre, comme source de silice et d'alumine	Granulat pour bétons, enrobés, graves traitées

Tableau 17 – Éléments d'analyse pour les laitiers de haut fourneau

Disponibilité de la ressource secondaire			Organisation de la filière d'approvisionnement		Contextes normatif et réglementaire			Utilisation industrielle	
Faible	Forte	Localisée	Faible	Bonne	Inexistant	Existant	En cours	Oui	Non
X		X		X		X		X	

- les laitiers issus de convertisseur à oxygène transformant la fonte en acier ;
- les laitiers d'aciérie électrique, obtenus lors de la fabrication de l'acier, essentiellement à partir de ferrailles.

Ces laitiers font encore l'objet de travaux de valorisation au CERIB.

6.3.5. Les laitiers de cubilot

Source CERIB : Étude collective avec le CTIF – Projet Valorisation Croisée Des Déchets

Le cubilot est un four vertical de fusion de métaux, généralement des ferrailles. Dans ce four, le métal à fondre est en contact direct avec le combustible (le coke). Ce contact à haute température entraîne une carburation importante (à des niveaux de 2 à 3 % de carbone) et réserve pour cela le cubilot à la production de fonte. Comme il s'agit d'une deuxième fusion, la fonte produite est moins pure que de la fonte de première fusion.

Ce processus de fabrication génère également des co-produits tels que du laitier de cubilot ou des fumées chargées en poussières. En raison de sa densité inférieure, le laitier flotte sur le métal fondu, permettant son évacuation avant le prélèvement de la fonte.

Après trempe, le laitier se vitrifie. Il est constitué de silice (45 à 55 %), de chaux (25 à 40 %), d'alumine (8 à 20 %) et d'oxyde de fer (1 à 6 %) et présentent des teneurs très faibles en matières organiques.

Les gisements sont représentés sur la carte suivante :

Avant de pouvoir l'utiliser, une étape de broyage est toutefois nécessaire (à l'origine, le laitier est sous forme de blocs).

Les résultats en laboratoire font ressortir que la finesse (100 % passant au tamis de 63 μm) améliore les indices d'activité principalement au bout de 7 jours et 28 jours. Cette tendance est également observée à 24 heures lorsque le taux de substitution de ciment est de 25 %.

Une fois broyés en ultrafines (< 63 μm), les laitiers de cubilot semblent donc posséder des propriétés similaires à celles obtenues avec du laitier de haut fourneau.

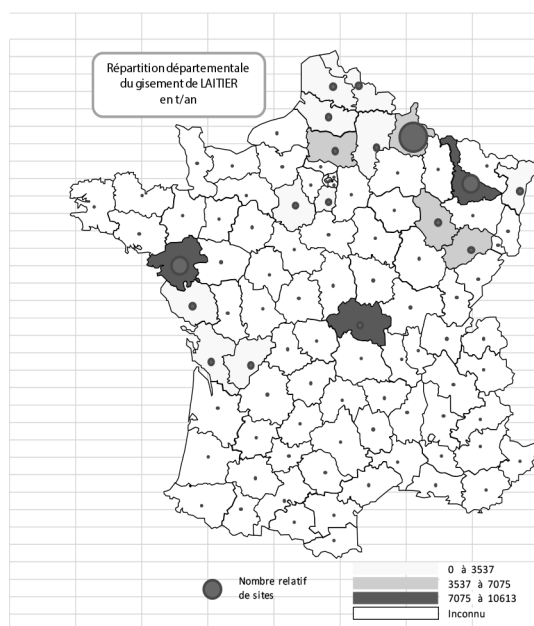


Figure 12 – Gisement du laitier de cubilot en France [CTIF]

L'étape de broyage reste à ce jour le frein principal (frein économique).

6.3.6. Les boues de papeterie

On désigne par « boues de papeterie » l'ensemble des éléments polluants et leurs produits de transformation rassemblés dans des suspensions plus ou moins concentrées issus des traitements des effluents liquides des différentes étapes de la fabrication du papier. La composition des boues dépend essentiellement des opérations de traitement des effluents liquides.

Il existe trois types de boues de papeterie :

- les boues primaires ;
- les boues secondaires ou biologiques ;
- les boues de désencrage.

6.3.6.1. Boues primaires

Les procédés de fabrication de pâte et de fabrication du papier (à partir de pâte vierge et de Produits à base de Papiers et Cartons Récupérés (PPCR)) génèrent des effluents chargés en matière organique (fibres cellulosiques) et en charges minérales. L'épuration de ces effluents par traitement physique (sans ajout de réactif) ou physico-chimique génère des boues dites primaires.

Le traitement primaire permet d'éliminer environ 95 % de la partie décantable des MES (Matière solides En Suspension). Il s'effectue de diverses façons : par gravité dans des décanteurs, par flottation en cellule ou encore par filtration.

6.3.6.2. Boues secondaires

Le traitement secondaire (biologique), à la base des boues papetières, est fondé sur des processus biologiques de digestion des matières organiques par des micro-organismes ; c'est pourquoi il est appelé « traitement biologique ». Il existe plusieurs types de systèmes de traitement biologique : les lagunes d'aération, les boues activées à l'air ou à l'oxygène, les disques biologiques, les lits bactériens et les systèmes anaérobies.

6.3.6.3. Boues de désencrage

Les boues de désencrage, uniquement retrouvées dans les usines de recyclage de papier, sont issues du traitement des mousses récupérées en surface des cellules de flottation utilisées pour séparer l'encre des fibres de PPCR. Les bulles d'air générées à la base de la cellule entraînent les particules d'encre en surface et forment une mousse constituée de savon, particules d'encre, fibres, fines et charges.

Les boues contiennent donc des encres, des charges minérales issues des PPCR et des résidus de fibres cellulosiques entraînés lors du désencrage.

Les boues de désencrage ne sont produites que par les papetiers (producteurs de papier journal, d'ouate de cellulose, de papier impression écriture ou encore de carton multicouche avec recto blanc) qui utilisent comme matières premières des papiers récupérés.

La valorisation des boues de papeterie peut se faire au travers de différentes filières :

- utilisation en couverture de décharge ;
- utilisation en épandage agricole ;
- incinération pour la production de vapeur et d'énergie ;

Tableau 18 – Éléments d'analyse pour les laitiers de cubilot

Disponibilité de la ressource secondaire			Organisation de la filière d'approvisionnement		Contextes normatif et réglementaire			Utilisation industrielle	
Faible	Forte	Localisée	Faible	Bonne	Inexistant	Existant	En cours	Oui	Non
X		X	X		X				X

- utilisation dans la fabrication du carton ;
- transformation en pouzzolanes artificielles par traitement thermique pour utilisation dans le BTP.

La transformation des boues de papeterie en pouzzolanes en vue d'une utilisation dans les bétons consiste en la production de métakaolins par un traitement thermique approprié. Ce traitement thermique doit être soigneusement contrôlé de façon à obtenir la destruction totale de la matière organique contenue dans les boues et à minimiser la décarbonatation de la calcite. Pendant ce traitement thermique, la kaolinite est transformée en métakaolinite tandis que la calcite et le talc sont préservés, le tout permettant la production de pouzzolanes. Des études ont démontré qu'il était possible d'accroître les performances des boues de papeterie en appliquant un traitement thermique optimisé ; 650-700 °C apparaît comme une plage de température optimale (conversion des kaolins en métakaolins, faible décarbonatation de la calcite...). La matière ainsi générée et passée au tamis de 100 μm est une pouzzolane génératrice de performances assez proches de celles obtenues avec du métakaolin.

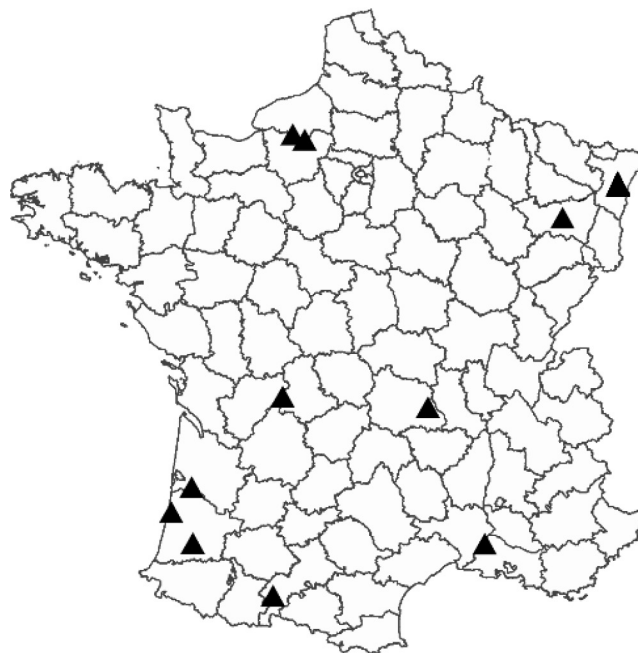


Figure 13 – Répartition des papeteries produisant des cendres issues de chaudières [CTP]

6.3.7. Les cendres issues des chaudières papetières

Source CERIB : Étude collective avec le CTP – Projet Valorisation Croisée Des Déchets

Suite aux appels d'offre CRE et aux appels à projet BCIAT, le nombre de chaudières à biomasse en activité s'accroît rapidement, en particulier chez les papetiers. Il en résulte et résultera des volumes croissants de résidus de combustion, pour lesquels il faut trouver des voies de valorisation pérennes, à forte valeur ajoutée et de préférence locales.

Aujourd'hui, une dizaine de papetiers français exploite une chaudière à biomasse générant environ 200 000 tonnes par an de cendres papetière. Ces cendres sont encore pour partie épanchées voire enfouies.

Les cendres sont récupérées, d'une part, sous foyer et, d'autre part, par aspiration, ce qui leur confère une granulométrie comprise entre 0 et 1 mm. Les proportions dans le mélange dépendent du filtre utilisé dans l'installation.

En fonction des installations, les combustibles varient :

- la plupart des papetiers français alimentent leurs chaudières avec différents éléments de biomasse (écorces de bois provenant de l'écorçage des rondins et gros bois, copeaux déclassés et déchets issus du traitement mécanique interne du bois, refus de classement de la pâte, produits fibreux issus du traitement effectué sur les effluents primaires envoyés en traitement en lagune ou des rémanents de la sylviculture) engendrant, à la sortie, des cendres essentiellement composées de résidus de combustibles. Ces cendres se prénomment « cendres de biomasse » et représentent environ 40 % de la production totale de cendres de papeterie ;
- en France, seulement deux papeteries incorporent, en partie, les trois types de boues (présentées dans le paragraphe 6.3.6 issues du nettoyage du papier recyclé dans leurs chaudières papetières en substitution de biomasse avec un pourcentage variable (pouvant atteindre 40 %), ce qui génère des cendres en sortie de chaudière princi-

Tableau 19 – Éléments d'analyse pour les matériaux issus des boues de papeterie

Disponibilité de la ressource secondaire			Organisation de la filière d'approvisionnement		Contextes normatif et réglementaire			Utilisation industrielle	
Faible	Forte	Localisée	Faible	Bonne	Inexistant	Existant	En cours	Oui	Non
X		X		X		X		X	



Tableau 20 – Éléments d'analyse pour les cendres issues des chaudières papeterières

Disponibilité de la ressource secondaire			Organisation de la filière d'approvisionnement		Contextes normatif et réglementaire			Utilisation industrielle	
Faible	Forte	Localisée	Faible	Bonne	Inexistant	Existant	En cours	Oui	Non
X		X	X		X				X

palement composées de silice, d'alumine, de calcite et de chaux. Ces cendres sont appelées « cendres de boues de papeterie » et représentent environ 60 % de la production totale de cendres de papeteries.

Les points qui ressortent des différentes études réalisées sur les cendres de boues de papeterie sont les suivants :

- les cendres de boues de papeterie peuvent conduire à un gonflement du béton si aucune précaution n'est prise ; ce phénomène est lié à la présence de chaux libre qui s'hydrate après la fin de prise, lorsque la matrice cimentaire commence à durcir ;
- les taux de substitution dépendent de leurs caractéristiques initiales (composition minéralogique, présence de composés organiques, mais aussi la taille des particules et la surface spécifique développée), du traitement appliqué (mécanique, chimique, thermique, hydrique), des autres constituants du béton (ciment, additions...) ; les taux de substitution optimaux varient selon les études de 5 à 25 %, 10 % étant le taux le plus souvent cité ;
- les mécanismes physico-chimiques impliqués sont complexes : demande en eau des constituants, compétition dans les réactions d'hydratation, ciment et additions, effet pouzzolanique plus ou moins marqué, contribution au squelette granulaire... ;
- les cendres de boues de papeterie peuvent être avantageusement utilisées en association avec des additions telles que les cendres volantes ou les laitiers de haut fourneau ; il s'agit alors de mélanges ternaires (ciment + addition + cendres de boues de papeterie).

Compte tenu des points précédents, une étude au cas par cas est nécessaire comme c'est le cas d'ailleurs pour la plupart des co-produits industriels. A partir d'une caractérisation précise des cendres de boues de papeterie (compositions chimiques, minéralogiques, morphologiques), il s'agit d'optimiser les traitements (physiques, chimiques, hydriques, thermiques) et les caractéristiques du liant (ciment, addition, cendres de boues de papeterie) pour éviter les risques de gonflement, obtenir les meilleures résistances mécaniques et garantir la durabilité du matériau.

6.3.8. Les fines de plaques de fibro-ciment

Source CERIB : *Projet VALCRIB (déposé à l'ADEME et non financé)*

La fabrication des bétons de fibro-ciment génère 9 000 t/an de déchets répartis sur quatre sites de production en France : Rennes/St-Grégoire (35), Valenciennes/Haulchin (59), Albi/Terssac (81) et Paray Le Monial/Vitry (71).

Le béton de fibro-ciment est constitué de :

- sable ;
- ciment et addition minérale ;
- fibre cellulose ;
- fibre de polyvinyle alcool (ayant substitué la fibre d'amiante).

Afin d'éviter la mise en décharge, la société CR-Industries (ex Eternit) cherche à améliorer la revalorisation de ses déchets en sous-produits pour la fabrication de matériaux à base cimentaire (béton préfabriqué). L'objectif de cette valorisation est de broyer les résidus de production afin de produire des matières premières secondaires qui présentent un intérêt technique dans les produits en béton :

- renfort lié à la présence de fibres ;
- charges inertes bon marché ;
- activité hydraulique potentielle due à la présence de ciment non hydraté (seule une faible partie du ciment a réagi lors de la fabrication du produit initial, laissant une partie du ciment potentiellement hydratée).

En tant que charge inerte, la matière première secondaire pourrait se positionner dans la fabrication du béton comme filler (en substitution partielle du sable), et en tant qu'addition (en substitution d'une partie du ciment) lorsqu'elle possède des propriétés hydrauliques.

Une deuxième source de cette matière première secondaire sera également disponible dans les années à venir. Elle proviendra de la déconstruction des bâtiments, soit pour des raisons de non qualité (remplacement dans le cadre de l'après-vente), soit dans le cadre de la fin de vie des produits. Il est donc prévu qu'à terme les quantités à recycler soient

Tableau 21 – Éléments d'analyse pour les fines de plaques de fibro-ciment

Disponibilité de la ressource secondaire			Organisation de la filière d'approvisionnement		Contextes normatif et réglementaire			Utilisation industrielle	
Faible	Forte	Localisée	Faible	Bonne	Inexistant	Existant	En cours	Oui	Non
X		X	X		X				X



équivalentes à celles vendues annuellement depuis 15 ans, c'est-à-dire 300 000 tonnes par an.

6.3.9. Les fines de fonderie

Source CERIB : Étude collective avec le CTIF – Projet Valorisation Croisée Des Déchets

Aujourd'hui, les émissions atmosphériques, essentiellement liées aux polluants de l'air et provenant de la poussière, constituent la principale préoccupation vis-à-vis de l'environnement. La poussière est générée à toutes les étapes du procédé (fabrication du moule en sable, coulée et parachèvement) et possède une composition variable d'une étape à l'autre, ce qui constitue de ce fait un problème majeur. Toute poussière générée est susceptible de contenir du métal et des oxydes métalliques.

Les systèmes d'aspiration permettent aujourd'hui d'aspirer la grande majorité des fines générées, réduisant ainsi les rejets diffus. Ces dernières sont ensuite filtrées à l'aide de dépoussiéreurs à manches dans la majorité des cas.

L'opération de fonderie détermine la nature des fines produites :

- fines de sablerie issues des opérations de manipulation de sable (régénération, moulage, décochage notamment) ;
- fines de dessablage ou grenaillage issues des opérations de parachèvement et finition.

Du fait de sa forte disponibilité et de son coût relativement faible, le sable siliceux est le plus couramment utilisé. Il est composé de silice minérale (SiO_2) plus ou moins pure et propre, en fonction de son origine. Les fines de fonderie en contiennent en très grande majorité (> 50 % voire 70 %), le reste étant relié au procédé utilisé (matières minérales ou organiques).

En fonction du poste de génération et du procédé de moulage, la nature minéralogique des fines varie.

6.3.9.1. Postes de régénération, moulage et noyautage

La fabrication de moules se fait à partir de sable/fines recyclés du moule précédent.

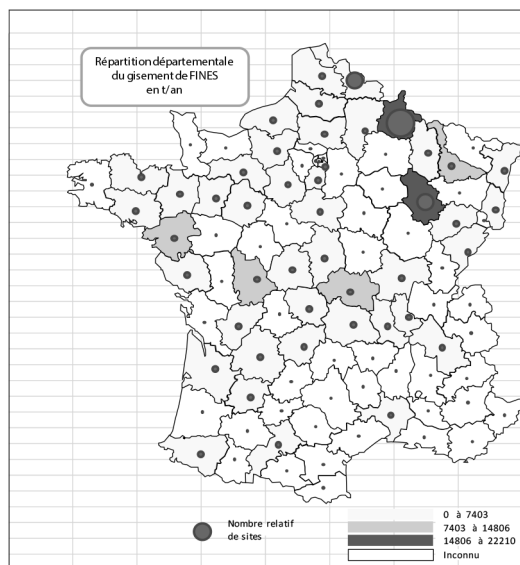


Figure 14 – Répartition du gisement de fines de sables [CTIF]

Cependant, afin de maintenir une qualité de sable satisfaisante, une quantité de sable neuf est réintroduite régulièrement dans le circuit de moulage-noyautage et une quantité de sables/fines usés (purge) en est extrait. Les fines en question sont alors composées de silice/bentonite/noir minéral (procédé de sable à vert) ou de silice/composé organique (procédé de sable à prise chimique).

6.3.9.2. Poste de décochage

Quel que soit le procédé utilisé, une étape de décochage a lieu et génère des fines.

Après la coulée du métal liquide, la pièce brute est séparée du sable (à chaud ou après une période de refroidissement). Cette opération, parfois manuelle, est le plus souvent effectuée à l'aide de grilles vibrantes. Les fines récupérées (calcinées) sont celles qui étaient directement en contact avec la pièce métallique :

- Les fines de sable à vert engendrées sont composées de silice et de chamotte. En effet, lors de la coulée du métal liquide dans le moule, l'argile du sable est calcinée et voit sa structure se modifier ;
- Elle se déshydrate et se transforme en chamotte (argile morte), connue pour posséder un très faible coefficient d'expansion thermique. La chamotte n'a plus d'eau de constitution et adhère fortement au grain de sable en couches concentriques ;
- Les fines de sable à prise chimique issues du poste de décochage sont composées de silice et de résidus de composé organique.

6.3.9.3. Postes de parachèvement et de finition

Tout comme le poste de décochage, les postes de parachèvement et de finition sont présents et nécessaires quel que soit le type de procédé.

L'étape du dessablage, également appelée grenaillage, correspond à une étape de nettoyage de la pièce métallique. On y envoie de la grenaille pour détacher les résidus de sables restés accrochés à la pièce finale. Les fines engendrées sont alors composées de silice/résidus de chamotte/résidus métalliques (fines de sable à vert) ou de silice/résidus de composé organique/résidus métalliques (fines de sable à prise chimique).

L'étude réalisée au CERIB avec le CTIF a montré qu'en fonction du co-produit, les résultats varient et leur potentielle utilisation dans le béton peut s'avérer très différente. D'une fonderie à l'autre, les propriétés des co-produits portant le même nom peuvent différer, nécessitant la réalisation d'un minimum d'essais.

La présence de bentonite dans les fines de sablerie de sable à vert semble diminuer la fluidité du béton frais et entraîner une mauvaise évolution de l'indice d'activité.

Les fines de sablerie de sable à prise chimique sont plus chargées en composés organiques (provenant du liant) que les fines de dessablage. Ces derniers ne semblent pas nuire aux performances du béton pour des taux d'incorporation inférieurs à 10 %.

Les fines de dessablage peuvent être utilisées en substitution de granulats de coupure granulométrique similaire. La couleur noire de ces co-produits peut également être un paramètre intéressant pour une utilisation dans les bétons.



6.4. Matières premières secondaires en substitution de pigments

Aujourd'hui, les bétons colorés sont de plus en plus demandés. À l'heure actuelle, les travaux du CERIB ont permis de montrer que certains co-produits industriels peuvent être introduits dans le but de substituer partiellement ou entièrement les pigments. Les fines de fonderie chargées en noir minéral (carbone) (voir paragraphe 6.3.9) ont donné des résultats très satisfaisants en tant que matière de substitution du pigment noir dans des pavés de voirie.

6.5. Matières premières secondaires en substitution des fibres

6.5.1. Les fibres métalliques

Les fils métalliques sont récupérés lors de la transformation des broyats de pneus usagés en granulats. Après plusieurs étapes successives de broyage, les phases métalliques et textiles se séparent de la phase élastomérique (la gomme). Les fils métalliques sont ainsi extraits par séparation magnétique. La société ALIAPUR (www.aliapur.fr) a en charge leur valorisation.

6.5.2. Les fibres polymères

6.5.2.1. Fibres de verre ou de carbone issues de l'industrie automobile ou navale

Les industries automobile et navale (bateau de plaisance) sont consommatrices de matériau composite dans lesquels des renforts structurels sont utilisés. Ces renforts peuvent être des fibres de carbone, de verre, de kevlar...

Ces renforts présentent également un intérêt pour les bétons à très hautes et ultra hautes performances pour l'amélioration du comportement à la flexion des produits de faible épaisseur. Le coût élevé de ces matières premières initiales est cependant peu compatible avec celui du matériau béton. La réutilisation des renforts provenant du recyclage pourrait vraisemblablement permettre un développement de leur utilisation.

Cependant, les différents travaux menés à ce jour se heurtent aux difficultés techniques de la séparation des fibres avec la matrice liante (résine) et au coût engendré par ces potentiels traitements.

6.5.2.2. Fibres de cellulose

Source CERIB : Prestation de service

La fabrication des couches culottes est réalisée à partir de ouate de cellulose et dont le process génère des résidus. Une entreprise basée aux États-Unis a mis au point un procédé permettant de conditionner ces déchets en petites plaquettes de fibres délitables dans l'eau. Le CERIB a travaillé sur la valorisation de ces fibres en tant que substitution des fibres de polypropylène utilisées dans les bétons pour l'amélioration du comportement au feu et des phénomènes de fissuration à jeune âge. Ces fibres de cellulose sont aujourd'hui commercialisées en France. (http://fr.chryso.com/upload/t_documents/Fichier_L1/48705/promoFibreUF500FR.pdf)

7. CAHIER DES CHARGES

Le retour d'expériences basé sur plusieurs dizaines d'études réalisées par le CERIB permet aujourd'hui d'identifier les principales voies permettant l'utilisation de co-produits industriels dans les bétons. Par ordre de cas rencontrés, on trouve une utilisation en tant que granulats, additions et plus rarement comme adjuvants, pigments ou renforcement.

Pour déceler en première approche si un co-produit industriel a des chances de pouvoir trouver un débouché dans les bétons, il convient d'apprécier les critères énoncés ci-dessous.

* Caractéristiques physiques et mécaniques :

- la **masse volumique** constitue rarement un frein pour une utilisation dans le béton ; la grande majorité des bétons a une masse volumique comprise entre 2 200 et 2 400 kg/m³, mais on utilise aussi des bétons légers ($MVA \leq 1\,800\text{ kg/m}^3$) et des bétons lourds ($MVA \geq 2\,500\text{ kg/m}^3$) ;
- la **granulométrie** : en général, les produits les plus fins conduisent à une plus grande valeur ajoutée. Dans certains cas, le broyage peut s'avérer pertinent du point de vue technico-économique. L'utilisation peut se faire comme :
 - **fines** (particules inertes chimiquement) ou **additions** (réactions physico-chimiques densifiant la matrice cimentaire) : 0/0,080 mm,
 - **filler** : 0/2 mm,
 - **sable** : 0/5 mm,
 - **gravillons** : 4/31,5 mm ;
- l'**absorption d'eau** lorsqu'elle est importante ($\geq 5\%$), nécessite des précautions d'usage particulières pour ne pas pénaliser l'ouvrabilité et les propriétés du béton ;
- la résistance à la fragmentation, **friabilité** : il est préférable que les co-produits conservent leur intégrité physique lors du malaxage (friction avec les autres constituants). Toutefois, une évolution de la granularité lors du malaxage peut ne pas être rédhibitoire dès lors qu'elle est anticipée et maîtrisée.

* Composition chimique et minéralogique :

- composition chimique** : une quantité importante d'oxydes tels que CaO, SiO₂, Al₂O₃ est en général un point positif ;
- composition minéralogique** : la réactivité pouzzolanique (production d'hydrates en présence d'eau et de chaux) donne de la valeur ajoutée au co-produit qui peut alors être envisagé comme un liant ;
- les co-produits doivent être stables en milieu alcalin (pH du béton supérieur à 13).
- Quantité** : La quantité minimale nécessaire dépend du constituant qu'il est possible d'envisager de substituer, des possibilités d'utilisation à proximité immédiate du gisement source et des conditions financières. Pour une utilisation en tant qu'addition par exemple, 500 tonnes par an constituent généralement une quantité minimale (utilisation par un site).
- Paramètres limitants (voire interdisant) une utilisation dans le béton lorsqu'ils sont présents en trop grande quantité** :
 - composés argileux** ; si tel est le cas, un traitement thermique peut être envisagé ;
 - composés organiques** ayant par exemple un effet sur les adjuvants et donc un impact sur les propriétés à l'état frais du béton et à l'état durci au jeune âge (prise et durcissement) ;

- **sulfates et chaux vive** : risque de gonflement interne ;
- **chlorures** : leur teneur dans les bétons est limitée pour maîtriser les risques de corrosion des armatures ;
- **substances indésirables** (radioéléments, métaux lourds, composés organiques volatils), du point de vue du risque sanitaire, en quantité telle que la matrice cimentaire ne sera pas en mesure de les inertier.

La variabilité dans le temps des caractéristiques des co-produits est aussi un facteur déterminant. Lorsque la robustesse n'est pas au rendez-vous, l'utilisateur va devoir effectuer des réajustements réguliers de la composition du béton, ce qui induit un surcoût. Pour une utilisation régulière, il est essentiel de définir une fiche technique, un cahier des charges et un contrôle régulier des principales caractéristiques des co-produits industriels.

8. MÉTHODOLOGIE OPÉRATIONNELLE POUR VALORISER LES MATIÈRES PREMIÈRES SECONDAIRES OU CO-PRODUITS INDUSTRIELS DANS LES BÉTONS

8.1. Origine de cette méthodologie

Des membres de la Commission Développement Durable du réseau des Centres Techniques Industriels français ont initié le projet « Valorisation Croisée », en collaboration avec l'ADEME, afin de déterminer quelles pourraient être les meilleures associations industrielles possibles pour les déchets qui aujourd'hui ne sont pas ou insuffisamment valorisés. En associant les domaines de la fonderie, de la papeterie, des matières grasses, des matériaux naturels de construction, des produits préfabriqués en béton et du bois, un large panel de déchets et de solutions de valorisation a pu être étudié. Ces industries sont chacune représentées par un Centre Technique Industriel (structure de recherche sous la tutelle de l'Etat qui intervient en support d'une filière industrielle). Ces centres sont le Centre Technique Industriel Fonderie, Matériaux et Produits Métalliques (CTIF), le Centre Technique du Papier (CTP), l'Institut des Corps Gras (ITERG), le Centre Technique des Matériaux Naturels de Construction (CTMNC), le Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton (CERIB) et l'Institut technologique de la Forêt, de la Cellulose, du Bois-construction et de l'Ameublement (FCBA).

L'objectif de l'association de ces organismes a été :

- de trouver de nouvelles voies de réintégration de certains déchets industriels dans des filières externes au procédé qui les a générés, permettant ainsi de multiplier les solutions de valorisation ;
- d'apporter des réponses locales à la gestion des déchets pour augmenter le taux global de valorisation de ces derniers tout en diminuant l'utilisation des ressources naturelles ;

- de définir une méthodologie pour une valorisation optimisée des co-produits industriels.

8.2. Démarche générale de la méthodologie de valorisation

Pour mettre en œuvre une solution nouvelle de valorisation d'un déchet dans un secteur industriel différent de celui qui l'a généré, il est nécessaire de disposer d'un ensemble d'informations, aussi bien pour le secteur source que pour le secteur utilisateur.

L'initiateur de la démarche peut être soit le producteur du déchet, exploitant du site source et responsable de la gestion de son déchet, soit un industriel souhaitant faire évoluer sa production en utilisant des matériaux alternatifs aux constituants traditionnels (intérêts technico-économiques et environnementaux).

La démarche générale est présentée sur le logigramme suivant (figure 15) :

En fonction du type d'action à mener, l'acteur peut être soit le secteur source (phases 1 et 5), soit le secteur utilisateur (phases 3, 3', 6), soit l'association des deux (phases 2, 4, 7, 8, 9, 10).

Pour chaque étape sont précisés :

- qui (acteur(s) de l'action) ;
- objectif/description ;
- outil(s) disponible(s) (mis au point pendant le projet) ;
- quelques références réglementaires.

8.3. Détail de la méthodologie pour une utilisation dans le béton

8.3.1. Phase 1 : État des lieux

8.3.1.1. Identification des déchets non valorisés ou insuffisamment valorisés

La plupart des secteurs industriels cherche à valoriser leurs déchets afin d'éviter la mise en décharge ou l'élimination, opérations de plus en plus coûteuses à la vue des importantes quantités concernées et de l'augmentation du coût de mise en décharge. Cela entraîne la nécessité de rechercher de nouvelles solutions de valorisation.

Actuellement, certaines voies de valorisation existent comme la technique routière, l'épandage... mais ne sont pas des filières totalement pérennes du fait des nouvelles exigences réglementaires.

8.3.1.2. Freins identifiés à la valorisation

Quatre types de freins ont été recensés et sont d'ordre :

- **technique**, associé à la qualité des co-produits, au gisement, à la gestion d'un stock ou encore du fait de la mise en œuvre d'un prétraitement ;
- **sociologique** : par exemples, la couleur différente du produit fini ou la connaissance de la présence du déchet dans un produit commercialisé peuvent être mal perçues ;
- **réglementaire** : en particulier l'hygiène et la sécurité du personnel intervenant (matière susceptible d'être inhalée par le personnel si elle est pulvérulente...) et l'impact sur

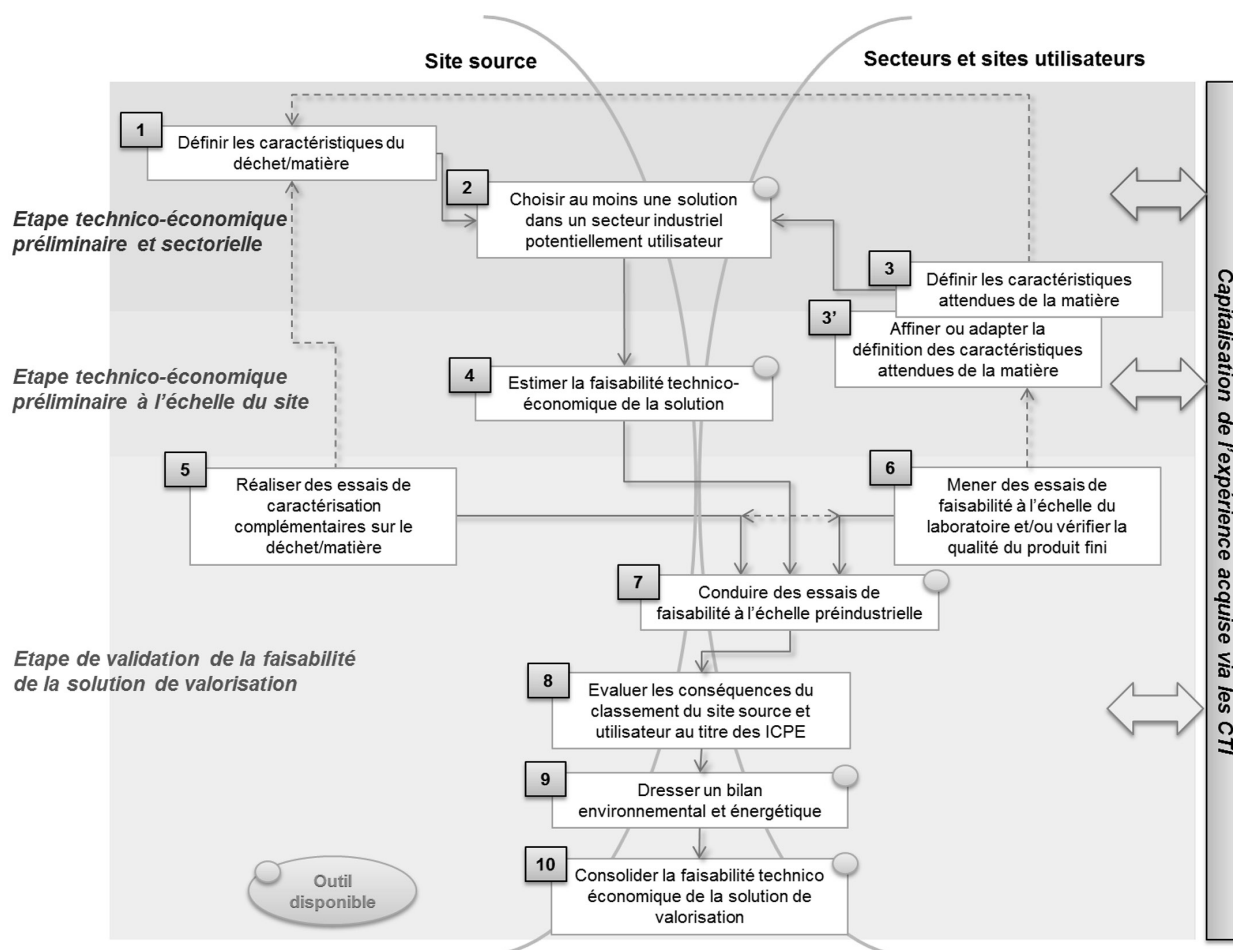


Figure 15 – Méthode générique

l'environnement (émission potentielle de polluants dans l'atmosphère, réglementation spécifique limitant les quantités utilisées et les périodes d'utilisation...). Des freins administratifs y sont associés (obligation de déclaration ou d'autorisation pour pratiquer certaines activités...);

- économique (transport, investissement éventuels...).

Une caractéristique du déchet peut revêtir plusieurs freins. Par exemple, la nature physico-chimique du déchet ou de la matière définissant sa qualité peut se traduire en termes de frein technique vis-à-vis du produit fabriqué (présence de microfissures ou de tâches indésirables) et de frein réglementaire du fait des émissions atmosphériques susceptibles d'être générées lors de l'incorporation de ce déchet dans le procédé.

8.3.2. Phase 2 : Étude préliminaire

8.3.2.1. Caractéristiques des déchets

La caractérisation des co-produits doit être reliée aux exigences des normes « constituants » et en particulier vis-à-vis des critères pouvant avoir un impact sur les performances techniques du béton (exemple des composés argileux, indésirables pour la stabilité dimensionnelle des bétons).

L'étude de la variabilité des caractéristiques d'un lot à l'autre du gisement est à prendre en compte et en particulier celles susceptibles d'impacter les performances techniques et

sanitaires de la structure en béton. L'élaboration d'un cahier des charges et d'une fiche technique pour chaque co-produit est nécessaire pour contrôler la variabilité et responsabiliser les producteurs et utilisateurs (voir paragraphe 7 « Cahier des charges »).

Globalement, les co-produits doivent influencer de manière positive ou neutre plusieurs caractéristiques du béton à l'état frais et à l'état durci :

- l'aptitude à être utilisé en usine ou sur chantier (mise en place, risque de fissuration, résistance au démoulage...);
- les résistances mécaniques;
- les propriétés de durabilité;
- l'esthétique;
- les propriétés sanitaires;
- les impacts environnementaux;
- le coût...

Une possible réactivité hydraulique/pouzzolanique est un avantage supplémentaire pour la matière à utiliser car elle participe aux réactions d'hydratation du béton. Il devient possible d'envisager une diminution de la quantité de liant traditionnel. Lorsque l'utilisation du co-produit entraîne une diminution d'une ou plusieurs performances, celle-ci doit être compensée dans des conditions économiquement viables. Par exemple, une diminution de la résistance à la compression peut être compensée par une augmentation du dosage en liant ou une diminution du rapport Eau/Liant en optimisant l'adjuvantation.





En parallèle, les matières de substitution doivent être conditionnées de telle sorte à éviter une pollution de l'environnement des sites industriels.

8.3.2.2. Analyse des co-produits selon la réglementation

D'un point de vue réglementaire, les co-produits industriels sont initialement des déchets. D'après la liste des déchets établie dans l'Annexe II de l'Article R541-8 du Code de l'Environnement, chaque déchet possède un code qui lui est propre. En parallèle, ils sont caractérisés selon des arrêtés spécifiques liés à leur mise en décharge, leur élimination ou leur valorisation (exemple du Guide du SETRA pour la valorisation en technique routière). Un des plus couramment utilisés est l'Arrêté datant du 28 octobre 2010 relatif à la mise en décharge des déchets inertes. Ce dernier impose plusieurs analyses à réaliser associées à des valeurs d'acceptation.

Les analyses, réalisées sur brut et lixiviât, concernent les paramètres suivants :

- **composés sur brut** : BTEX, HAP, hydrocarbures totaux C10-C40, PCB et COT ;
- **éléments sur éluat** : métaux lourds (As, Ba, Cd, Cr total, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn), chlorures, fluorures, sulfates, indice phénol, COT, fraction soluble.

La conformité aux critères d'acceptation de l'Arrêté du 28 octobre 2010 sur la mise en décharge des déchets industriels inertes peut être un argument pour justifier l'innocuité du co-produit à valoriser auprès des différents acteurs de la filière de valorisation ainsi que de l'administration. Si ce n'est pas le cas, le comportement du produit fini en lixiviation devra être contrôlé.

Les analyses réalisées sur ces lots donnent une idée des caractéristiques du déchet mais ne peuvent pas être considérées avec certitude comme représentatives du gisement national du fait de la forte variabilité probable des co-produits d'un site à l'autre et même au sein d'un seul et même site.

8.3.2.3. Cartographie des déchets

Le but de ce travail de cartographie est de pouvoir localiser des potentiels sites utilisateurs à proximité des sites sources (favoriser la valorisation locale) et ainsi permettre de préciser la connaissance des caractéristiques des déchets en fonction de la potentielle utilisation.

8.3.2.4. Première approche technico-économique

Cette première approche technico-économique a pour objectif de préciser si la démarche peut avoir un avenir dans le domaine utilisateur choisi en comparant la situation actuelle et la situation future potentielle.

Les données à prendre en compte sont principalement :

- les coûts liés à la prise en charge du déchet chez le secteur source (élimination, mise en décharge, transport...) qui fluctuent en fonction des quantités produites, du statut de dangerosité du déchet, de la réglementation... ;
- les coûts associés à l'achat des matières premières chez le secteur utilisateur.

L'hypothèse prise ici pour le prix du ciment (de type CEM I) est un coût moyen de 120 €/T et un coût transport de 10 €/T pour 100 km.

Les autres matières premières susceptibles d'être substituées sont les granulats (ordre de grandeur 10 €/T), les fillers (ordre de grandeur 30 €/T) ou le pigment (ordre de grandeur 1 200 €/T).

L'incorporation de co-produits peut engendrer en contrepartie de potentiels investissements pouvant être liés notamment au stockage (silo de 50 tonnes estimé à 45 000 €) ou au process (vis sans fin, trémie peseuse...).

8.3.3. Phase 3 : Faisabilité technique à l'échelle du laboratoire

8.3.3.1. Caractérisation physico-chimique des matières à valoriser

La partie relative à la caractérisation physico-chimique des co-produits est réalisée afin d'obtenir une première évaluation par rapport aux constituants traditionnels. Elle est effectuée en complément de la phase 8.3.2. Les essais réalisés peuvent être la quantification des éléments traces métalliques (ETM), l'analyse granulométrique, la masse volumique absolue, la finesse Blaine...

8.3.3.2. Essais en laboratoire

Cette phase vise à étudier l'introduction des déchets dans des mortiers en substitution d'une partie des constituants initiaux (ciment, sable). Les essais réalisés (normalisés) sont effectués sur mortiers frais (mesure de l'étalement, air occlus, masse volumique...) et durcis (essai de résistances mécaniques en flexion et compression à différentes échéances, essais de variations dimensionnelles...).

8.3.3.3. Intérêts des différents essais

Afin de pouvoir évaluer l'influence de la présence du co-produit, des mortiers témoins fabriqués à base de constituants normalisés (ciment, sable normalisé, eau voire additions minérales) sont également fabriqués et permettent une comparaison des différents résultats.

En fonction du co-produit et des résultats obtenus, d'autres essais peuvent compléter la caractérisation en laboratoire (exemple : Le Chatelier, temps de prise...).

Les résultats obtenus permettent de préciser la future utilisation du co-produit dans le béton et de sélectionner le type d'application dans laquelle ce dernier pourrait être incorporé. À ce stade, le secteur source possède suffisamment d'éléments pour se rapprocher d'un site utilisateur.

8.3.4. Phase 4 : Faisabilité technique à l'échelle pré-industrielle

8.3.4.1. Essais techniques

Les essais techniques ont pour objectif d'évaluer la pertinence de l'incorporation du co-produit, en substitution d'un ou plusieurs constituants traditionnels, dans la formulation industrielle du produit en béton sélectionné ou de l'application sur chantier. Cette évaluation passe par la réalisation de



fabrications représentatives de celles faites habituellement. En parallèle des fabrications tests, des compositions témoins sont également réalisées afin de pouvoir comparer les futurs produits en béton dans les mêmes conditions de production.

En fonction du co-produit, un ajustement de certains paramètres de composition (eau d'ajout, adjuvant...) et/ou du processus de fabrication (puissance, temps de vibration...) peut être nécessaire.

Une fois la composition optimisée, la variabilité du co-produit doit être évaluée sur les performances du produit fini en béton. Afin d'assurer un contrôle de la qualité et de la variabilité des co-produits étudiés, il est souhaitable que la fiche technique soit accompagnée d'un protocole qualité engageant le site source à assurer une certaine qualité de son produit.

8.3.4.2. Étude sanitaire

Des essais sanitaires (analyses d'émission de substances dans l'eau par des tests de lixiviation, émissions de COV dans l'air intérieur) doivent être réalisés sur produit ou sur béton incorporant des co-produits afin d'évaluer le potentiel polluant et l'éventuel risque pour les futurs utilisateurs et pour l'environnement. Un essai sur béton concassé permettra également de simuler un scénario de déconstruction et d'évaluer la recyclabilité du béton.

En parallèle, les impacts de l'utilisation sur l'hygiène et la sécurité au travail doivent également être étudiés.

Lors de la manipulation de co-produits, les précautions à prendre doivent être adaptées.

Le port des Équipements de Protection Individuelle, et en particulier le masque, les gants et les lunettes, est alors souvent obligatoire.

La rédaction d'une fiche semblable à une Fiche Donnée Sécurité peut en parallèle permettre d'informer et de responsabiliser les utilisateurs directs du co-produit.

9. CONCLUSION

Les travaux menés dans le cadre du Projet National Recybeton ont permis de montrer que le béton est un matériau parfaitement recyclable et réutilisable pour faire de nouveaux bétons.

D'un point de vue technico-économique, la valorisation de matières premières secondaires ou co-produits industriels devient une nécessité pour le secteur source. En effet, la mise en décharge ou l'élimination n'est pas une solution pérenne pour les producteurs des déchets et tend à devenir très onéreuse.

Coté utilisateur, les études menées sur les co-produits industriels, notamment par le CERIB, confirment souvent que le béton constitue un excellent matériau pour intégrer des quantités optimisées de co-produits, sans diminution de ses performances et en favorisant une gestion durable des ressources naturelles. Un des points déterminants, outre les résistances mécaniques et la durabilité, correspond au maintien des excellentes performances sanitaires et environnementales du béton.

L'incorporation d'un co-produit dans un béton implique donc la réalisation d'une étude spécifique au préalable.

Ce qui limite aujourd'hui l'utilisation des matières premières secondaires dans les bétons n'est pas que d'ordre technique :

- la variabilité des caractéristiques techniques des matières premières secondaires ou co-produits industriels peut constituer un frein à leur utilisation dans les bétons. Elle peut être réduite par des opérations de prétraitement et encadrée par l'élaboration d'un cahier des charges spécifique ;
- les matières premières secondaires se trouvent en compétition avec les constituants traditionnels du béton ce qui impose un bilan global incluant les aspects économiques ;
- les filières amont (industrie émettrice du co-produit) et aval (industrie réceptrice) ne sont généralement pas suffisamment structurées pour avancer ensemble ; les opérations résultent encore aujourd'hui le plus souvent d'initiatives individuelles ; des plateformes se constituent pour homogénéiser certains co-produits, effectuer le cas échéant des « prétraitements » (mélanges, stabilisation...) afin de répondre aux cahiers des charges techniques, et faciliter la coordination de l'offre et de la demande ;
- le corpus des textes normatifs actuels est conçu par essence pour des matériaux traditionnels réalisés à partir de constituants eux-mêmes normalisés, ce qui est légitime et fondé mais ne facilite pas l'accès à de nouveaux constituants ; cela devrait évoluer dans le futur, tout en conservant bien entendu l'obligation de faire des bétons d'excellente qualité pour des ouvrages stables et durables ;
- la réglementation actuelle résulte d'un long processus d'élaboration ayant comme postulat implicite, et sans doute comme seul horizon, la vision qu'un déchet est destiné avant tout à la mise en décharge. Les acteurs impliqués dans l'économie circulaire s'organisent pour dépasser ce périmètre, qui ne correspond plus aux besoins sociétaux, et pour remettre en question ces postulats afin de progresser vers les objectifs du développement durable.

Enfin, il est essentiel de rappeler que les bétons de demain resteront majoritairement composés de constituants traditionnels, ces derniers ayant fait leurs preuves quant à l'obtention de bétons durables et sûrs. Les matières premières secondaires dont les co-produits industriels en particulier viennent plutôt en complément, leurs caractéristiques étant d'une grande diversité.

Aujourd'hui, la prise de conscience sur la nécessité de réduire fortement nos impacts sur l'environnement est partagée. Les innovations sur les matériaux, les produits et les systèmes constructifs sont autant de réponses prometteuses dès lors qu'elles intègrent réellement l'ensemble des effets sur l'environnement auxquels il convient d'ajouter les impacts sociétaux. Le béton, matériau porteur d'innovations, est incontestablement un matériau de construction majeur pour demain.

10. ANNEXE

Exemples d'utilisation dans les bétons de co-produits industriels ou matériaux issus de la déconstruction des bâtiments

Bordures avec incorporation dans le béton de verre-miroir – SOTUBEMA

L'ID Scintibéton est une bordure scintillante en béton blanc normalisée pour îlots urbains ID1 et ID2. Sa particularité réside aussi dans la fonction vertueuse d'utiliser des matériaux issus du recyclage, par l'incorporation dans le béton de matériaux recyclés qui sont des particules de verre-miroir de fraction 6 à 10 mm.

La bordure est constituée d'un béton de masse classique à base de ciment gris et d'un béton de parement lavé à base de ciment blanc dans lequel on a remplacé les gravillons 4/8 alluvionnaire et 6,3/10 calcaire par du Miroir concassé Calcin 6/10 en provenance de Crouy.

Le traitement du parement se fait par un lavage immédiat qui élimine la laitance et fait ressortir le verre miroir. La fonction de cette bordure est aussi d'améliorer la sécurité routière sur les giratoires, surtout non éclairés. L'éclairage dynamique des véhicules crée des scintillements qui stimulent la vigilance des automobilistes.

Les écailles de verre-miroir réfléchissent la lumière naturelle et surtout artificielle (phares des véhicules). Les scintillements valorisent aussi l'ouvrage et l'aspect en béton blanc lisse avec écailles de verre-miroir visibles des bordures apporte aussi une fonction esthétique.



Écrans acoustiques en béton à base de déchets de caoutchouc – CAPREMIB

Le béton de caoutchouc est un béton de nouvelle génération qui s'inscrit dans la politique de recyclage des déchets et donc de l'économie circulaire. Pour 1 m² d'écran il faut 8 pneus de véhicules légers usagés.

Les qualités d'absorption acoustique du béton de caoutchouc sont identiques à celles du béton de bois. Insensible aux intempéries (humidité, chaleur, UV, gel...) le béton de caoutchouc demeure parfaitement stable et ne réclame pas d'entretien particulier.

Sa pérennité s'en trouve accrue (+ de 30 ans). Pour assurer l'isolation acoustique souhaitée, l'épaisseur totale des panneaux monobloc (béton de bois + âme béton + béton de caoutchouc) n'est que de 27 cm.





Clôtures écologiques fabriquées à partir de copeaux de bois recyclés – NICOLAS

À base de granulats de bois et de produits naturels, CLOTURECO est la première gamme de clôture en béton écologique. Elle utilise les granulats de bois provenant tout naturellement des industries de bois françaises et contribue ainsi à la revalorisation des sous-produits.

La clôture est recyclable en fin de vie et elle est également 20 % plus légère qu'une clôture traditionnelle avec les mêmes résistances pour un prix et une finition équivalents. Plus écologique, elle permet l'utilisation de matières premières entièrement recyclables pour une fin de vie facilitée et plus légère pour un impact environnemental réduit pendant le transport.



Pavé éco-urbain en béton de coquillages recyclés – ESTIC Caen / projet VECOP*

Ce projet vise à développer un nouveau matériau pour le secteur des travaux publics : **un éco-pavé drainant urbain à base de co-produits coquilliers issus de la pêche et de la conchyliculture.**

Le projet de recherche appliquée entend ainsi apporter une solution durable pour la valorisation de ces co-produits marins et contribuer à une meilleure gestion intégrée des eaux pluviales. Véolia Propreté participe à ce projet original de recherche et développement pour la valorisation des coquilles de coquillages en éco-granat pour les trottoirs et parkings.

***VECOP** : projet européen pour la valorisation de co-produits coquillés marins en éco-pavés drainants porté par l'Ecole supérieure d'ingénieurs des travaux de la construction de Caen (ESITC). Cofinancement FEDER Région Basse-Normandie. Partenaires : ESITC Caen, Univ. Caen-ABTE, Point P, SLP, Granvillmer, Veolia.



Recyclage des poteaux électriques en béton

Avec l'enfouissement progressif des lignes aériennes électriques, ERDF a lancé plusieurs campagnes de recyclage des poteaux électriques en béton, en collaboration avec les Conseils Généraux de certains départements et des entreprises ou plateformes de recyclage.

Le Conseil Général de la Sarthe et ERDF ont notamment mené une démarche commune de recyclage des poteaux en béton déposés. Chaque année en Sarthe, 3 500 poteaux sont ainsi transformés en gravats servant à de futurs chantiers. Le site de recyclage de poteaux béton supports de lignes électriques permet de séparer l'acier et le béton du poteau en vue d'une revalorisation complète des poteaux électriques en béton.

Ce matériau recyclé est ensuite utilisé en remblaiement de tranchées, aménagement de plateformes industrielles, sous-couches de voiries. Au final, ce qui constituait un déchet, se transforme en matières premières pour de nouvelles applications, sans déperdition. Dans le Tarn-et-Garonne, c'est l'entreprise Gravalloire installée dans le Maine-et-Loire qui collecte et transforme les poteaux bétons. Ainsi après chaque opération de dépose des supports, soit suite à l'enfouissement du réseau, soit dans le cadre de remplacement de ces supports, les poteaux devenus inutiles sont acheminés vers trois aires de stockage prévues à cet effet dans le département.

Ainsi en fonction de la situation géographique des travaux en cours dans le département, les supports à recycler sont acheminés vers des lieux de stockage prévus à cet effet. En 2014, sur l'ensemble du département, ce sont plus de 100 supports pour un volume total





de plus de 100 tonnes qui ont été recyclés. Dans un premier temps, les poteaux sont traités afin de séparer l'acier et le béton ; l'acier est valorisé en fonderie pour un nouvel usage alors que le béton est réduit en gravas par un traitement de finition. Les matériaux sont transformés en matières premières pour de nouvelles applications, notamment dans les travaux publics (remblaiement, sous-couches de voirie...).



La société CMEG (Normandie) utilise des granulats issus du recyclage des bétons des poteaux électriques pour réaliser des murs à coffrage intégré.

Les objectifs de l'industriel sont de :

- réduire l'empreinte environnementale des éléments en béton ;
- anticiper les futures réglementations ;
- être force de proposition auprès des Maîtres d'Ouvrages.

Les granulats recyclés ont une distribution granulaire correspondant à 4/14 mm. Ils sont utilisés à hauteur de 20 % du total des granulats. Chaque année, CMEG recycle environ 400 tonnes de granulats recyclés.



Produit préfabriqué à base de granulats recyclés - CMEG





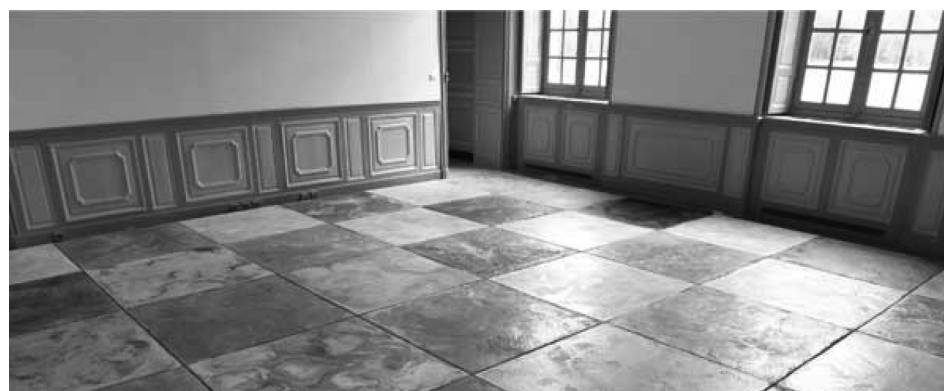
Ouvrage réalisé à partir de produit préfabriqués incorporant des granulats recyclés - CMEG

Le « Marbre d'ici » ou comment associer création artistique et recyclage des déchets du BTP – Stefan Shankland

Le Marbre d'ici est une création de Stefan Shankland, artiste plasticien qui conçoit et réalise depuis plus de dix ans des projets artistiques intégrés aux processus de transformation à l'œuvre dans des contextes urbains, industriels et naturels, en France et à l'étranger. Il dirige actuellement le projet TRANS305 : un programme d'accompagnement artistique et culturel des mutations urbaines du quartier de la ZAC du Plateau à Ivry-sur-Seine. Son projet Marbre d'ici, prix COAL art et environnement 2011, est développé dans le cadre de la démarche HQAC (Haute Qualité Artistique et Culturelle) avec Raum architectes.

Le Marbre d'ici est à la fois une matière et un concept en perpétuelle évolution et renouvellement au fil des réalisations. Il s'agit d'une matière produite localement à partir de gravats inertes issus des démolitions d'immeubles. Concassés, mélangés à du ciment et de l'eau, puis coulés en strates, les déchets du BTP sont recyclés et deviennent un matériau noble à intégrer aux projets architecturaux et urbains, une nouvelle ressource pour la création contemporaine, le design, la construction et l'aménagement d'espaces publics. Par un travail plastique, social et symbolique, le Marbre d'ici transforme les décombres de la ville en objets et créations à haute valeur ajoutée.

Le Marbre d'ici a été utilisé pour réaliser une œuvre architecturale dans le cadre d'une résidence de recherche artistique portée par le centre d'art contemporain du domaine de Chamarande (Essonne). Le Marbre d'ici réalisé à Chamarande est une dalle de 50 m² composée de 36 carrés, chacun correspondant à un mélange de plusieurs compositions de béton réalisés à partir de différents déchets (béton, briques, moellons calcaire, débris de bois carbonisé...) préalablement réduit sous forme de poudres. Pour ce projet, Stefan Shankland et son équipe se sont rapprochés du CERIB (Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton) dans le cadre d'un partenariat consistant en un appui technique pour la mise au point des bétons et leur mise en œuvre sur site. Le projet réunit à la fois les aspects créatifs, esthétiques, sociétaux tout en constituant un réel challenge technique. Le Marbre d'ici illustre bien les qualités esthétiques du béton et ses multiples applications.



**Dalle réalisée à partir du Marbre d'Ici
Centre d'art contemporain du domaine de Chamarande**





D'un point de vue technique, la difficulté a été de définir des compositions permettant d'atteindre des performances parfois contradictoires les unes par rapport aux autres : fort taux d'incorporation de granulats et fines issus de la déconstruction, fluidité, stabilité statique et durabilité. Les déchets de construction participent ainsi au squelette granulaire des bétons tout en colorant le matériau. Le travail collaboratif entre l'artiste plasticien et les techniciens du béton ont conduit au développement d'une structure composite permettant de répondre à toutes les attentes. Elle est composée de deux bétons posés l'un sur l'autre et d'un treillis constitué de fibre de verre. Un béton de masse se déformant peu est utilisé en sous-couche. Le treillis est ensuite posé sur le béton frais. Vient ensuite le béton de finition dont la fluidité est beaucoup plus élevée ce qui permet d'obtenir des lignes et des courbes fluides et harmonieuses à la surface du Marbre d'Ici.



Marbre d'Ici - Stephan Shankland

Recyclage du béton dans des blocs en béton de grandes dimensions – INERTA

Depuis 1999, la société Inerta assure la prise en charge, le traitement, la commercialisation de matériaux et minéraux inertes. Inerta dispose de cinq sites de production implantés dans 4 départements en Bretagne. Elle valorise chaque année plus de 20 000 tonnes de matériaux, dont du béton issu de la démolition des bâtiments et infrastructures.

Les plateformes d'Inerta sont équipées de concasseurs, cribleurs, pelles et chargeuses. Elles produisent des granulats utilisés en sous-couche routière ou dans de nouveaux bétons. Les matériaux ferreux sont eux valorisés dans les fonderies.

Inerta produit en particulier des blocs en béton de grandes dimensions (1,60 x 0,80 x 0,80 m) d'un poids d'environ 2,4 tonnes. Ces blocs non armés sont équipés de dispositif de levage. Ils s'emboîtent les uns dans les autres pour former des murs. Ils sont utilisés par les clients d'Inerta pour délimiter des zones de stockage ou pour constituer des murs de soutènement.

Ces blocs sont réalisés à partir de constituants traditionnels (ciment, granulats) et incorporent en quantité variable selon les applications des granulats de bétons recyclés provenant de la démolition ou bien des retours des toupies de béton prêt à l'emploi. Les blocs peuvent aussi incorporer des co-produits industriels inertes provenant de fonderie par exemple.

Ils sont produits dans l'usine de Saint Avé (56890) ou bien directement sur site à l'aide d'une installation mobile. La centrale à béton mobile Blend permet de réaliser des blocs de bétons là où se situent les gisements de co-produits industriels ou de béton recyclé. Les transports sont ainsi limités au maximum.





***Déchets inertes provenant de la déconstruction de bâtiments
et retours des camions toupies de bétons prêt à l'emploi - INERTA***



Granulats obtenus après concassage - INERTA



Réalisation de blocs à partir de granulats recyclés - INERTA



Coulage des blocs sur site - INERTA



Utilisation des blocs pour le stockage - INERTA





Granulats constitués de béton recyclé – GRANUDEM

Dans le cadre d'une collaboration avec le CERIB, GRANUDEM implanté en Eure et Loir (28), met à disposition des utilisateurs des granulats constitués de béton recyclé issu de la démolition des bâtiments. Le béton collecté est broyé, criblé puis lavé pour être ensuite transformé en sable et gravillons recyclés de différents calibres.



Installation de concassage et criblage - GRANUDEM



Granulats de béton recyclé – Coupures granulaires 0/4, 4/10, 10/20 et 20/40 mm - GRANUDEM

Réutilisation des rebuts de fabrication dans les produits préfabriqués – MARLUX

La société MARLUX, usine de Cantin (59) réalise des dalles en béton (dalles de jardin, dalles d'étanchéité destinées aux toits terrasse...). Les rebuts de fabrication sont stockés à l'abri des intempéries. Une ou deux fois par an, lorsque la quantité est suffisante (environ 1000 tonnes) une campagne de concassage est réalisée. Un concasseur du type de ceux utilisés pour les routes est acheminé sur le site de production. L'opération de concassage dure trois jours. La granulométrie des granulats réalisés est ajustable, de 0/6 mm à des fractions plus grossières. Les nouveaux granulats sont utilisés pour réaliser les bétons de masse des produits de dallage.



Rebuts de fabrication destinés à être broyés puis recyclés - MARLUX

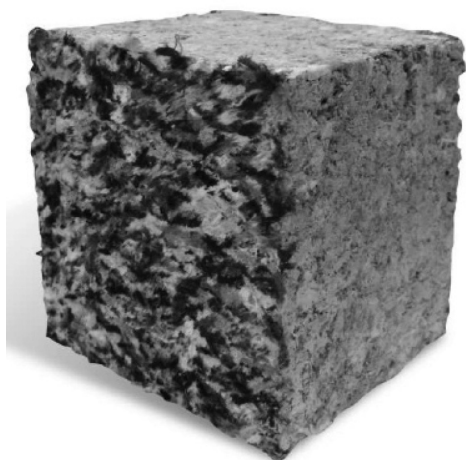


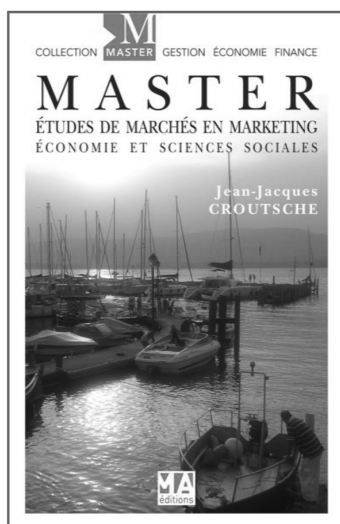


Écrans acoustiques en béton de chiquettes textiles – FRAMIMEX

La société FRAMIMEX recycle des textiles usagés collectés par des associations caritatives. En collaboration avec le CERIB, FRAMIMEX a développé une gamme de béton léger à base de morceaux de textiles (chiquettes) pour les écrans acoustiques. La durabilité de ce béton a été testée par le biais d'essais de résistance au gel, d'essais de vieillissement aux UV et à la pluie et d'essais de résistance au nettoyage au jet d'eau haute pression.

Ces travaux ont permis de valider la faisabilité d'un écran acoustique absorbant en béton de chiquettes textiles. Le dimensionnement de ce type d'écran est identique à celui d'un écran en béton de bois. Les propriétés d'absorption acoustique permettent la production d'écran de classe A3, voire A4, ce qui correspond respectivement à des absorptions acoustiques comprises dans les intervalles [8 - 11] et [12 - 15].





MA Éditions - ESKA

MASTER **ÉTUDES DE MARCHÉS EN MARKETING** **ÉCONOMIE ET SCIENCES SOCIALES**

Jean-Jacques Croutsche

Une réflexion plus approfondie permettra aux étudiants de dépasser le stade élémentaire de l'étude des données. Dépassant le cadre étroit des outils, ils devraient pouvoir au travers des différentes méthodes optimiser leurs choix et commencer à appréhender un autre aspect de la statistique : la sensibilité et la finesse dans la compréhension des résultats et leur mise en application. Les modes opératoires de calcul tendent à une certaine exhaustivité laquelle confère à l'ouvrage une certaine ouverture.

Cet ouvrage est destiné à tous les étudiants désireux de découvrir les techniques d'études et d'analyse des marchés et de la concurrence. Ces derniers y trouveront les outils techniques utiles et nécessaires à la compréhension des marchés. Les techniques statistiques et informatiques sont

présentées dans cet ouvrage avec clarté et les approches appliquées permettront d'aider à la compréhension de l'ensemble des techniques utilisées par la plupart des cabinets d'études. Les techniques des plus simples aux plus sophistiquées permettront aux étudiants qui pratiquent la recherche de mieux comprendre les outils utilisés en matière de recherche.

Les étudiants de premier cycle (IUT, L1, L2, BTS...) apprendront à utiliser de façon optimale les différents concepts et les approches statistiques grâce aux applications faisant l'objet des développements traités dans l'ouvrage notamment en matière d'échantillonnage - **Les étudiants de second cycle (L3, Master 1...)** trouveront les approfondissements aux outils et connaissances acquises dans le cours de leurs études antérieures - **Les étudiants de troisième cycle (Master 2, travaux de recherche)** trouveront dans cet ouvrage les bases nécessaires aux développements plus complexes des analyses multivariées. Les méthodes de recherches, les développements sur les mesures, les indicateurs de validité de ces mesures, leur donneront les éléments de base utiles et nécessaires à la réalisation de travaux de recherche - **Les praticiens** apprécieront les méthodes pratiques proposées, ainsi que les utilisations immédiatement possibles à partir d'EXCEL et de SPHINX. De façon plus élargie, ils verront dans cet ouvrage les modèles et les applications informatiques qu'il est possible de mettre en place dans leurs entreprises.

Jean-Jacques Croutsche, Docteur en Economie et Administration des Entreprises, mène une triple activité de Professeur, Directeur de Recherche et Consultant. Professeur dans différentes écoles de commerce et de management, Professeur invité dans différentes universités étrangères, il a enseigné également à l'Université de Paris Dauphine et de Paris 13 Université dans laquelle il a été vice doyen de la faculté de sciences économiques et de gestion, directeur du pôle de gestion et directeur d'un Master de Gestion des Entreprises et des Organisations. Directeur de recherche, il encadre des thèses et différents travaux de recherche en France et à l'étranger et plus spécifiquement en Marketing, en Analyse des données, en Management du Tourisme et en Management durable. Il est l'auteur de plus de 100 publications nationales et internationales dans les différents domaines du management. Il est également l'auteur de 14 ouvrages.

BON DE COMMANDE

☐ Je désire recevoir exemplaire(s) de l'ouvrage : « **MASTER – Etudes de marchés en Marketing, Économie et Sciences sociales** » par **Jean-Jacques Croutsche** - Code EAN 978-2-8224-0490-7

Prix : 40,00 € + 1,00 € de frais de port, soit € x exemplaire(s) = €

Je souhaite commander : ☐ 100 ex ☐ 200 ex ☐ 300 ex ☐ 400 ex ☐ 500 ex
remise de 5 % à partir de 100 exemplaires

Je joins mon règlement à l'ordre des Editions ESKA : ☐ chèque bancaire

☐ Carte Bleue Visa n° ☐ Date d'expiration :
☐ Signature obligatoire :

☐ par Virement bancaire au compte des Editions ESKA

Etablissement BNP PARIBAS – n° de compte : 30004 00804 00010139858 36

IBAN : FR76 3000 4008 0400 0101 3985 836 BIC BNPAFRPPCE

☐ Je souhaite recevoir une Convention de formation

Société / Nom, prénom :

Adresse :

Code postal : **Ville :** **Pays :**

Tél. : **Fax :** **E-mail :**

Veuillez retourner votre bon de commande accompagné de votre règlement à l'adresse suivante :

MA Editions - ESKA – Contact : adv@eska.fr

12, rue du Quatre Septembre – 75002 Paris - France - Tél. : 01 42 86 55 75 - Fax : 01 42 60 45 35

