

Université
de Liège



Faculté des
Sciences Appliquées

Travail de fin d'études en vue de l'obtention du grade
d'Ingénieur Civil Architecte

Véronique PARMENTIER

Tentative de fixation du CO₂ dans les blocs de béton à base de fibres
végétales et granulats recyclés

PROMOTEUR : Professeur Luc COURARD

Année académique
2011-2012

Tentative de fixation du CO₂ dans les blocs de béton à base de fibres végétales et granulats recyclés

Travail de fin d'études en vue de l'obtention du grade de master en
Ingénieur Civil Architecte réalisé par Véronique Parmentier

Année académique 2011-2012

Promoteur : Luc Courard

Membres du Jury : Benoit Heinrichs
Bernard Mathieu
Sigrid Reiter
Barbara Rossi

Remerciements

« Les hommes se plaisent à penser qu'ils peuvent se débrouiller seuls, mais l'homme, le vrai, sait que rien ne vaut le soutien et les encouragements d'une bonne équipe. »

Tim Allen

Avant tout développement, mes remerciements vont à toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide et leur encouragement et qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Je tiens à remercier mon promoteur Monsieur Luc Courard pour son encadrement, la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce travail ainsi que ses nombreux conseils tout au long de l'année.

J'adresse mes remerciements également à l'ensemble des membres de mon Jury – Benoit Heinrichs, Bernard Mathieu, Sigrid Reiter et Barbara Rossi – qui ont accepté d'examiner ce travail.

Mes remerciements vont ensuite à Astrid Lejeune, Frédéric Michel et Audrey Van Der Wielen pour leur aide et leurs conseils efficaces et indispensables.

Je remercie aussi l'ensemble de l'équipe du Laboratoire des Matériaux de Construction et de Géotechnique. J'exprime ma gratitude envers Fabienne, Monique, René, Véronique et particulièrement Amaury pour sa bienveillance, sa patience et son sens de l'écoute. Je tiens à les remercier très chaleureusement pour l'ambiance de travail durant la réalisation du programme expérimental. Merci à tous pour le temps que vous m'avez consacré.

J'exprime également ma reconnaissance à David Eskenazi du département de chimie appliquée pour son aide et ses nombreuses explications pour le programme expérimental.

Merci aussi à tous mes co-mémorants Achim, Audrey, Charlotte, Emilie, Fanny, Florence, Héroïse, Julie, Marine, Olivier et Sébastien pour toute la compassion dont ils m'ont fait part pendant ces derniers mois.

Merci également à tous mes amis et particulièrement à Angelica pour ses nombreux encouragements.

Je tiens tout particulièrement à remercier mon compagnon pour sa patience et sa contribution dans ce travail.

Je n'oublie pas ma famille, surtout mes parents, mes frères et ma sœur pour le soutien, les encouragements et la relecture de ce travail.

Table des matières

1	INTRODUCTION	1
1.1	INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.2	PLAN DE TRAVAIL	2
2	DES BLOCS DE BÉTON	4
2.1	DÉFINITION	4
2.2	CLASSIFICATION	4
2.3	DIFFÉRENTS TYPES DE GRANULATS	5
2.4	FABRICATION	6
2.5	CATÉGORIES	10
2.6	DOMAINE D'UTILISATION	10
2.7	NORMES	13
2.8	CARACTÉRISTIQUES	13
3	LES GRANULATS RECYCLÉS	15
3.1	PROVENANCE	15
3.2	PRODUCTION	18
3.3	COMPARAISON AVEC LES GRANULATS NATURELS	20
3.4	NORMES	21
3.5	CARACTÉRISTIQUES	21
3.6	UNE AVANCÉE SPÉCIFIQUE : LES GRANULATS RECYCLÉS CARBONATÉS	22
4	LES FIBRES VÉGÉTALES DE TYPE MISCANTHUS	23
4.1	LA PLANTE	23
4.2	CARACTÉRISTIQUES	28
4.3	LE BÉTON DE MISCANTHUS	29
4.4	UNE AVANCÉE SPÉCIFIQUE : LES FIBRES VÉGÉTALES CARBONATÉES	30
5	OBJECTIF CAPTATION DU CO₂ : DÉMARCHE ENVIRONNEMENTALE	31
5.1	IMPACT ENVIRONNEMENTAL	31
5.2	CAPTER ET STOCKER LE CO ₂ POUR LUTTER CONTRE L'EFFET DE SERRE	38
5.3	LE CO ₂ ET LE BÉTON	41
5.4	BILAN ENVIRONNEMENTAL	44
6	CAPTATION DU CO₂ DANS LES BÉTONS : MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE	47
6.1	INTRODUCTION	47
6.2	PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	47
6.3	MATÉRIAUX UTILISÉS	48
6.4	EQUIPEMENTS	52
6.5	COMPOSITION DES ÉCHANTILLONS	57
6.6	CONFECTION ET CURE DES ÉCHANTILLONS	58
6.7	VARIABLES ÉTUDIÉES	61
7	RÉSULTATS ET OBSERVATIONS	75
7.1	EFFET DE LA CARBONATATION SUR LES PROPRIÉTÉS DES GRANULATS	75
7.2	EFFET DE LA CARBONATATION SUR LES BLOCS DE BÉTON À BASE DE GRANULATS NATURELS	79
7.3	EFFET DE LA CARBONATATION SUR LES BLOCS DE BÉTON À BASE DE GRANULATS RECYCLÉS	83
7.4	EFFET DE LA CARBONATATION SUR LES BLOCS DE BÉTON À BASE DE GRANULATS RECYCLÉS CARBONATÉS	102

7.5	EFFET DE LA CARBONATATION SUR LES BLOCS DE BÉTON À BASE DE MISCANTHUS.....	106
7.6	EFFET DE LA CARBONATATION SUR LES BLOCS DE BÉTON À BASE DE MISCANTHUS CARBONATÉS	110
7.7	COMPARAISON DES DEUX MÉTHODES DE QUANTIFICATION DE L'ABSORPTION DE CO ₂	112
7.8	ETUDE PRÉLIMINAIRE DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES BLOCS DE BÉTON.....	114
7.9	CONCLUSION	123
8	CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES.....	125
9	BIBLIOGRAPHIE	127
10	ANNEXES	132
10.1	MARQUAGE CE ET NF	132
10.2	CONVENTION CADRE DES NATIONS UNIES SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE	132
10.3	VARIATION DES MASSES ENREGISTRÉES POUR LES BLOCS DE BÉTON À BASE DE GRANULATS RECYCLÉS	133
10.4	CHARGES ET DÉPLACEMENTS DES BLOCS À BASE DE GRANULATS RECYCLÉS.....	135
10.5	VARIATION DES MASSES ENREGISTRÉES POUR LES BLOCS DE BÉTON À BASE DE FIBRES VÉGÉTALES CARBONATÉES	135
10.6	CHARGES ET DÉPLACEMENTS DES BLOCS À BASE DE FIBRES VÉGÉTALES DE TYPE MISCANTHUS	136

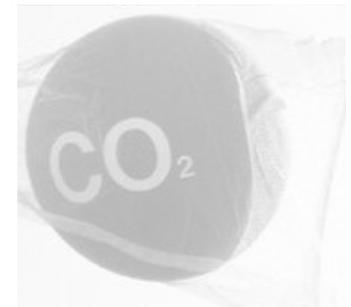
Introduction

Etat de l'art –
Synthèse Bibliographique

Mise au point du plan de l'étude expérimentale

Contributions expérimentales

Conclusion & Perspectives



1 Introduction

1.1 Introduction générale

Tout architecte, dès les premières esquisses d'un nouveau projet, se doit d'intégrer et traiter l'environnement avec égard. Cette volonté d'intégration requiert un effort constant, veillant à apporter des réponses aux préoccupations économiques, écologiques et sociales actuelles, tout en ne compromettant pas les ressources des générations futures.

Le secteur de la construction est l'un des secteurs les plus importants et les plus actifs dans toute l'Europe. Sur le plan environnemental, il représente 30% des émissions de dioxyde de carbone (2009). Dans l'industrie de la construction en général, le choix des matériaux et la gestion des déchets sont des domaines demandant une réflexion à part entière, tant en amont (exploitation, transformation des ressources, chimie des matériaux) qu'en aval (recyclage, gestion des déchets). Ceci est d'autant plus vrai que les nouveaux modes de conception dans l'industrie de la construction (bâtiments passifs ou à énergie positive) nécessitent l'emploi de matériaux dont l'impact énergétique doit être minimisé.

Les produits en béton sont des matériaux de construction durable. Leurs compositions sont à base de matières premières naturelles, abondantes et disponibles localement, en Belgique. Le bloc de béton possède une faible teneur en ciment et l'absence d'utilisation d'énergie durant la phase de durcissement, ne nécessitant aucune cuisson, limite très fortement ses émissions de CO₂.

A l'heure où l'industrie cimentière est majoritairement responsable de la production de CO₂ dans le secteur de la construction, il s'avère utile de compenser cette production par un phénomène inverse : la captation du CO₂. Ce processus d'absorption de CO₂, appelé carbonatation, améliore certaines propriétés du béton lors de la conversion du dioxyde de carbone CO₂ en carbonate de calcium CaCO₃. Les préoccupations environnementales actuelles motivent l'étude de la carbonatation dans le but de maximiser l'absorption du dioxyde de carbone.

Les granulats recyclés, produits à base de déchets de béton concassés mécaniquement, peuvent prendre place dans de nouvelles applications en béton. Ils peuvent remplacer les granulats naturels en tout ou en partie, épargnant ainsi l'extraction des matières premières naturelles.

Les fibres végétales de type miscanthus sont des matières naturelles inépuisables, renouvelables (plus ou moins rapidement suivant les espèces, l'état de la technique ou le coût de la production), non toxiques et facile à gérer en terme de déchets. Leur impact environnemental peut être très proche de zéro. En effet, la biomasse a un impact zéro sur le bilan CO₂. Le CO₂ rejeté lors de la dégradation a été capté lors de la croissance par photosynthèse.

L'objectif de ce mémoire vise donc la fabrication d'éléments pour la construction durable, spécifiquement des blocs de construction en béton, obtenus en séquestrant du CO₂ à teneur élevée. Les différents aspects étudiés permettront de fournir des blocs de béton de haute qualité à l'industrie de la construction tout en s'inscrivant dans le cadre du développement durable.

« L'architecture n'est plus un caprice, un luxe ou une calamité, elle devient, édifiée dans le béton, l'acier ou les réseaux, notre terre. »

Franck Hammoutène

1.2 Plan de travail

Les blocs de construction élaborés sont de quatre types et constituent le fil rouge de ce travail :

- Les blocs de construction à base de granulats recyclés ;
- Les blocs de construction à base de granulats recyclés carbonatés ;
- Les blocs de construction à base de fibres végétales de type miscanthus préminéralisées ;
- Les blocs de construction à base de fibres végétales de type miscanthus préminéralisées carbonatées.

Après un premier chapitre à caractère bibliographique décrivant les différents aspects généraux des blocs de construction, deux autres chapitres seront abordés. Ces derniers permettront de comprendre la différence qu'il existe entre les granulats recyclés et les fibres végétales de type miscanthus, utilisés dans les blocs de construction. Un dernier chapitre théorique expliquera l'intérêt de la captation du CO₂ tant au niveau environnemental que sur les propriétés du béton.

Par la suite, la méthodologie générale de travail sera abordée. Les différents équipements utilisés quant à la réalisation des blocs de construction en béton ainsi que les différentes variables étudiées seront explicités. Ces deux variables sont : la quantification d'absorption de CO₂ et la résistance en compression.

Enfin, les résultats des investigations seront retranscrits et analysés débouchant sur la conclusion générale et ouvrant de nouvelles perspectives.

Introduction



Etat de l'art – Synthèse Bibliographique



Mise au point du plan de l'étude expérimentale



Contributions expérimentales



Conclusion & Perspectives



2 Des blocs de béton

2.1 Définition

Au fil des siècles, le bloc de béton a prouvé sa résistance et reste un des matériaux les plus utilisés dans la construction des nouvelles maisons. Les chiffres le prouvent : plus de 70% des maisons possèdent des murs en bloc de béton. (Helmo, GRAMME, 2012)

« Un bloc en béton est un élément de construction parallélépipédique, apparent ou non, utilisé pour la réalisation de murs maçonnés, assez léger pour être porté et manipulé par un homme ». (Fédération de l'industrie du béton, 2012)

Les blocs de construction en béton offrent différents confort, notamment thermique et acoustique. Ils existent en différents modèles et classes de résistances et sont fabriqués pour se prêter à toutes les utilisations. Grâce à la variété de leurs formes, de leurs dimensions et de la nature du béton qui les constitue, les blocs offrent à l'utilisateur des caractéristiques mécaniques adaptées à chaque besoin et à chaque type de construction. (Fédération de l'industrie du béton, 2012)



Les blocs de béton courants creux



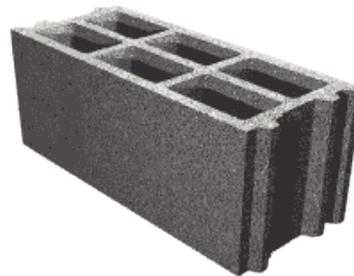
Les blocs de béton pleins



Les blocs de béton d'angle



Les blocs de béton en "U"



Les blocs de béton à emboitements verticaux

Figure 1 : Exemples de blocs (Helmo, GRAMME, 2012)

2.2 Classification

Le béton est un mélange homogène de ciment, de granulats, de sable et d'eau. Les qualités de ce dernier dépendent de celles de ses constituants et de la composition du mélange. Les qualités requises pour un bon béton sont la résistance, l'étanchéité et la compacité. (Nachtergal, 1988)

Le béton utilisé dans le bâtiment comprend plusieurs catégories. D'une manière générale, il peut être classé en quatre groupes, selon sa masse volumique ρ qui est elle-même fonction des exigences de chaque réalisation : (Techno Science, 2012) ; (Nachtergal, 1988) ; (Cerezo, 2005)

- Béton très lourd : $\rho > 2\,500\text{ kg/m}^3$, ayant une utilisation destinée à la protection des rayons radioactifs ;
- Béton lourd : $1\,800 < \rho < 2\,500\text{ kg/m}^3$, armé ou non, utilisé dans le bâtiment, dans les travaux publics ;
- Béton léger : $500 < \rho < 1\,800\text{ kg/m}^3$, visant principalement une meilleure isolation thermique ;
- Béton très léger : $\rho < 500\text{ kg/m}^3$, employé pour les plates-formes offshore ou les ponts.

Le béton lourd – appelé aussi béton courant - est classé en fonction de la nature des liants. On retrouvera notamment le béton de ciment, le béton de silicate, le béton de gypse et le béton d'asphalte. (Techno Science, 2012).

Dans ce mémoire, les blocs de béton fabriqués seront des blocs de béton lourd à base de granulats recyclés et des blocs de béton léger à base de fibres végétales de type miscanthus.

2.3 Différents types de granulats

Le bloc de béton peut varier en fonction de la nature des granulats appelés fillers, gravillons, graves ou sables suivant leurs tailles. Ces derniers peuvent être de deux origines : naturelle ou artificielle. (Techno Science, 2012) ; (Nachtergal, 1988)

2.3.1 Les granulats naturels

Les granulats naturels les plus employés en Belgique sont les grenailles de porphyre et le gravier, mais il est aussi possible de rencontrer des pierrailles calcaires. (Nachtergal, 1988)

Les granulats naturels peuvent être d'origine minéralogique – provenant de roches sédimentaires siliceuses, calcaires, métamorphiques¹ ou éruptives² – ou être des granulats alluvionnaires et de carrières obtenus par érosion ou par abattage et concassage. (Courard, 2011) ; (Techno Science, 2012)

Si le bloc de béton est pourvu de granulats rigides plus résistants que le mortier³, ils constituent les points durs du système. En effet, lors de l'apparition de contraintes dans le matériau, des déformations notables apparaissent dans le liant créant des zones de concentration de contraintes qui fissurent le mortier tandis que les contraintes dans le granulats sont négligeables. Lors de la fissuration du mortier autour des grains, une rupture d'adhérence se produit entre les granulats et le mortier. De ce fait, les grains se décollent de la pâte de ciment. La résistance du béton est donc fonction de la résistance de la zone servant d'interface entre le mortier et le granulats rigide. (Cerezo, 2005)

2.3.2 Les granulats artificiels

Les granulats artificiels peuvent provenir de sous-produits industriels, concassés ou non, être élaborés industriellement pour en faire des granulats à hautes caractéristiques ou être d'origine végétale, minérale et organique – dits granulats légers – entraînant une modification du comportement et des niveaux de performances mécaniques du béton. (Techno Science, 2012) ; (Cerezo, 2005)

Dans le cas du béton léger comprenant des granulats de faible résistance, les contraintes progressent à travers la pâte, contournant les « points faibles » du matériau. Cela a pour effet de provoquer des déformations impor-

¹ Métamorphique : qualifie une roche qui a subi une transformation à la suite d'une élévation de température ou de pression.

² Eruptive : terme relatif aux éruptions volcaniques, qui provient du refroidissement du magma volcanique.

³ Mortier : mélange de ciment, de sable et d'eau qui sert de liant dans les constructions. (Larousse, 2005)

tantes dans la pâte de ciment et les granulats. Une fois écrasés, les granulats ne peuvent plus participer à la résistance du matériau et le mortier finit par céder. La résistance en compression du béton léger est donc fonction de la résistance en traction des granulats. Cela est dû au fait que les granulats légers possèdent une surface poreuse importante qui crée une excellente adhérence entre la pâte et le grain. Dans ce cas-ci, c'est donc le granulats qui cède et non la liaison au niveau de la surface de contact. (Cerezo, 2005)

2.4 Fabrication

2.4.1 Industrielle

La chaîne de fabrication décrite ci-après est capable de produire des blocs manufacturés, en béton, type parpaings⁴ ou hourdis⁵. Elle est constituée de sept parties principales : (Réseau national des ressources en électronique, 2003)

1. Une centrale à béton élabore la matière constitutive des blocs à partir de sables, de graviers, de ciment et d'eau.
2. Une presse moule les blocs puis les dépose, pour le séchage, sur une planche en quantités variables suivant la taille des blocs.

Ces deux premières parties sont composées de cinq sous-opérations, reprises ci-dessous, dont les étapes sont les suivantes : (Réseau national des ressources en électronique, 2003) ; (Helmo, GRAMME, 2012).

- Préparation des constituants : préparation de 65 à 85% en poids de granulats naturels courants ou légers, de 5 à 10% en poids de ciment Portland et une quantité d'eau pour former un mélange en suspension ;
- Mélange : étape consistant à déposer le mélange dans un moule ;
- Moulage : étape de compression du mélange dans le moule pour former la structure du bloc ;
- Démoulage : enlèvement du moule afin de libérer le bloc fini ;
- Durcissement : étape dont le but est d'éliminer l'excès d'humidité présent dans le bloc.



Figure 2 : Procédé de fabrication des blocs (Helmo, GRAMME, 2012)

3. Un ascenseur empile les planches.
4. Un transbordeur, élément pourvu de chariots à mouvements croisés, assure le transfert des planches fraîches vers le magasin temporaire et ressort les planches séchées vers le descenseur.
5. Un magasin temporaire est pourvu des blocs qui séchent durant une période de 48 heures.
6. Un descenseur dépile les planches.
7. Un palettiseur décharge les planches et empile les blocs afin de constituer les lots de commercialisation. Les palettes constituées sont acheminées par chariot élévateur vers une zone de stockage.

⁴ Parpaing : terme désignant souvent, par abus de langage, un bloc de béton. (Larousse, 2005)

⁵ Hourdis : maçonnerie grossière en moellons ou en plâtras (Larousse, 2005)

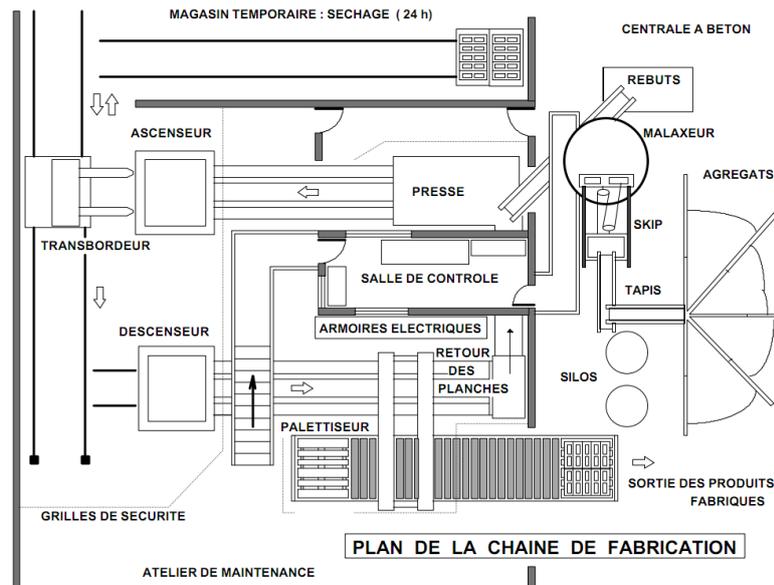


Figure 3 : Plan de la chaîne de fabrication (Réseau national des ressources en électronique, 2003)

Centrale à béton

Les deux premières étapes parmi les cinq sous-opérations vues ci-avant concernent la centrale à béton.



Préparation des constituants

La première étape est donc la préparation des constituants qui se fait à l'aide d'un doseur de matières.



Figure 4 : Doseur de matières (Tower Crane, 2012)

Mélange

La deuxième étape est le mélange à partir des différents constituants. Les agrégats, qui ont été préalablement pesés et transportés, sont élevés au moyen d'un skip. Le ciment est introduit au moyen d'un transporteur à vis d'Archimède. L'eau est ensuite ajoutée ainsi qu'un adjuvant⁶, si cela s'avère nécessaire. Le mélange est introduit dans un malaxeur afin d'obtenir un mélange uniforme. L'emploi d'un malaxeur de matières principales est requis.

⁶ Adjuvant : produit additif destiné à améliorer les qualités d'un autre produit. (Larousse, 2005)

Le mélange est alors transporté par le tapis béton vers la presse de moulage. (Helmo, GRAMME, 2012) ; (Réseau national des ressources en électronique, 2003).

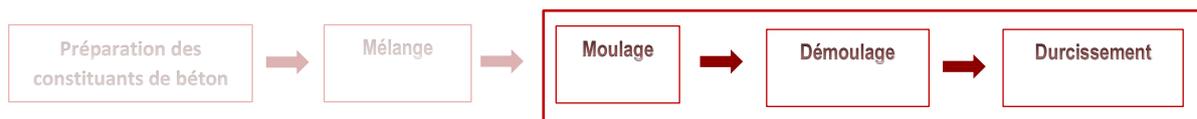


Figure 5 : Malaxeur de matières (Concrete Plant, 2012)

Les quantités nécessaires et le temps de malaxage varient selon la composition des blocs à réaliser et des caractéristiques des constituants. (Réseau national des ressources en électronique, 2003)

Finition du bloc

Les trois sous-opérations suivantes sont destinées à la finition du bloc.



Moulage et vibration modulable

La troisième étape est le moulage. Les blocs de béton sont obtenus soit par pression, soit par vibration du mélange. Des moules métalliques sont employés car ceux-ci présentent une stabilité suffisante, et permettent l'obtention de blocs de béton de dimensions précises. (Agence universitaire de la francophonie, 2012)



Figure 6 : Presse (Helmo, GRAMME, 2012)

Le moulage des blocs est assuré par une presse ayant des vibrations importantes. Le béton arrive par tapis et descend par gravité. Une planche, surmontée d'un moule, est placée sur la table vibrante. La hauteur du moule est supérieure de quelques centimètres à la hauteur finie des blocs manufacturés afin de prévenir l'éventuel tassement du bloc. Ensuite, un panier racleur amène au-dessus du moule, une certaine quantité de béton pour le remplir. Pour être sûr du bon remplissage, la table vibre une première fois pendant quelques secondes. Ensuite, le panier racleur recule et laisse place à un contre moule dont les formes en saillie épousent étroitement celle du moule. Une deuxième phase de vibration peut alors s'exécuter. Durant celle-ci, le contre moule commence par descendre à l'intérieur du moule pour aider au tassement du béton. Après la phase de vibration, le moule re-

monte et le contre moule assure un parfait démoulage des blocs. La planche peut alors être évacuée et un nouveau cycle peut recommencer. A l'exception de la table basse, la presse est presque entièrement hydraulique. (Réseau national des ressources en électronique, 2003)

Les vibrations de la table vibrante sont assurées par quatre moteurs. Sur cette table est posée la planche puis le moule, comme illustré ci-dessous. (Réseau national des ressources en électronique, 2003)

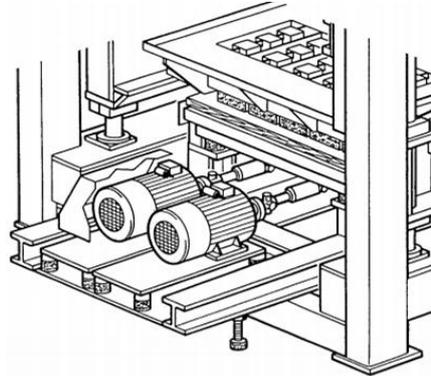


Figure 7 : Moule, planches et table vibrante (Réseau national des ressources en électronique, 2003)

Une autre technique plus artisanale existe. Il s'agit de l'utilisation de pondeuses qui peuvent être utilisées pour la fabrication des blocs. Ce sont également des presses mobiles qui déposent les blocs au sol par rangées de trois à dix selon les dimensions des blocs et la capacité de la machine. Ce type de matériel est souvent utilisé dans des pays en voie de développement, en raison de son coût relativement faible, de son encombrement réduit permettant d'être facilement déplacé sur les lieux de fabrication et, surtout, de la qualité des produits finaux.

Comparativement à une pondeuse manuelle qui permet de produire journalièrement 1000 à 3500 blocs et jusqu'à 3000 à 8000 lorsqu'il s'agit d'une semi-automatique, une presse fixe peut atteindre, par jour, une production oscillant entre 5000 et 10000 mille blocs.



Figure 8 : Pondeuse (Helmo, GRAMME, 2012)

Démoulage

La quatrième étape est le démoulage. Cette étape consiste à retirer le moule métallique afin de laisser le bloc fini à l'état brut pour pouvoir l'emmener, par la suite, dans la phase de durcissement.

Durcissement

La cinquième étape est le stockage. Les blocs de béton sont stockés dans un endroit favorable ayant une humidité relative de $(90 \pm 2 \%)$ où ils peuvent prendre le durcissement pendant une durée d'environ 48h, de manière naturelle, sans aucune adjonction. Ils poursuivent, ensuite, leur maturation sur stock pendant une période qui

varie de 14 à 28 jours et peuvent être livrés sur les chantiers sans aucune nécessité d'emballage. (Société Prefer S.A, 2012) ; (Helmo, GRAMME, 2012)

2.4.2 Manuelle

L'autre méthode utilisée pour la conception de blocs est celle consistant à utiliser des « moules manuels ». Pour obtenir le bloc fini, le béton est déposé sur le sol par retournement du moule. Il est évident que cette méthode manuelle est plus fastidieuse et a donc un rendement beaucoup plus faible. Ajoutons à cela que la qualité des produits est inférieure puisqu'il est plus compliqué d'avoir des blocs réguliers. Cette technique sera celle utilisée en laboratoire. Son principe de fonctionnement sera couplé à celui de la table vibrante. (Cf. 6.4.4 page 55)

2.5 Catégories

Les blocs de béton se classent en trois catégories, selon l'importance de la surface des alvéoles: (Réseau national des ressources en électronique, 2003)

- Blocs pleins sans alvéoles ;
- Blocs perforés (Section nette > 80% section brute) ;
- Blocs creux (Section nette > 60% section brute).

Lorsqu'ils sont employés pour la construction d'une habitation, ils sont généralement enduits (Ex : Crépis) ou protégés extérieurement (Ex : Briques). Ceci a pour but de contribuer à améliorer certaines caractéristiques physiques du mur (thermique, acoustique, résistance au feu). Cela peut également être utile pour rectifier les irrégularités de surface afin d'obtenir une surface plane destinée à recevoir un parement décoratif. (Réseau national des ressources en électronique, 2003)

La texture de la surface d'un bloc peut être lisse, à grains fins ou à gros grains.

Pour garantir la fourniture de matériaux de qualité ainsi que des caractéristiques bien définies et identiques, les blocs les plus couramment utilisés sont cachetés d'une marque NF. Cette marque indique qu'ils répondent correctement aux normes européennes et apporte la preuve que le fabricant est titulaire d'un droit d'usage. (Helmo, GRAMME, 2012) ; (Agence universitaire de la francophonie, 2012)



Figure 10 : Marquage des blocs (Agence universitaire de la francophonie, 2012)

Afin de saisir la différence entre le marquage NF et le marquage CE, le lecteur est invité à se diriger vers les annexes (Cf. Page 132)

Des blocs pleins sans alvéoles seront réalisés par la suite (Cf. Chapitre 6 page 47) car les moules ne permettent pas de réaliser de perforations au sein du bloc.

2.6 Domaine d'utilisation

D'une manière générale, les blocs de béton sont utilisés pour différents types d'ouvrages, surtout pour réaliser les murs et les cloisons de bâtiments.

Quelques exemples de domaines d'utilisations des blocs pour les granulats courants et granulats légers sont illustrés ci-dessous.

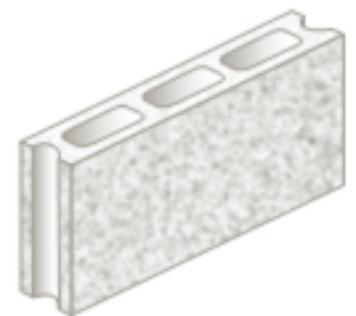


Figure 9 : Catégorie de blocs

Domaine d'utilisation des blocs		Dessin	Dimensions d'appellation	Masse indicative (kg)	Type d'ouvrage					
					Façade	Refend	Soubassement enterré	Cloison	About de plancher	
Blocs en béton de granulats courants (NF P 14-301)	creux		1	5 ^h 20 ^l 50 ^p	7 ^s				✓	✓
			1	7 ^h 20 ^l 50 ^p	10 ^s				✓	✓
			1	10 ^h 20 ^l 50 ^p	11				✓	
			1	12 ^h 20 ^l 50 ^p	12	✓			✓	
			1	15 ^h 20 ^l 50 ^p	13	✓	✓		✓	
			2	15 ^h 20 ^l 50 ^p	16	✓	✓		✓	
			2	17 ^h 20 ^l 50 ^p	17 ^s	✓	✓		✓	
			2	20 ^h 20 ^l 50 ^p	19	✓	✓	✓	✓	
			3	20 ^h 20 ^l 50 ^p	20	✓	✓	✓		
			4	22 ^h 20 ^l 50 ^p	23	✓	✓	✓		
	pleins et perforés		5	27 ^h 20 ^l 50 ^p	29	✓	✓	✓		
			1	5 ^h 20 ^l 40 ^p	7 ^s					
			1	5 ^h 20 ^l 50 ^p	9 ^s				✓	✓
			2	5 ^h 20 ^l 40 ^p	6					
			2	5 ^h 20 ^l 50 ^p	8					
			1	7 ^h 20 ^l 40 ^p	10 ^s					
			1	7 ^h 20 ^l 50 ^p	13				✓	✓
			2	7 ^h 20 ^l 40 ^p	8 ^s					
			2	7 ^h 20 ^l 50 ^p	11					
			1	10 ^h 20 ^l 40 ^p	14					
	1	10 ^h 20 ^l 50 ^p	17 ^s	✓			✓			
	3	10 ^h 20 ^l 40 ^p	11 ^s							
	3	10 ^h 20 ^l 50 ^p	14							
	1	12 ^h 20 ^l 40 ^p	17							
	1	12 ^h 20 ^l 50 ^p	22	✓			✓			
	3	12 ^h 20 ^l 40 ^p	14							
	3	12 ^h 20 ^l 50 ^p	17 ^s							

Figure 11 : Domaine d'utilisation des blocs en béton de granulats courants (Agence universitaire de la francophonie, 2012)

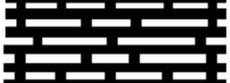
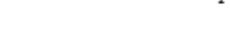
Domaine d'utilisation des blocs		Dessin	Dimensions d'appellation (E×H×L) cm	Masse indicative (kg)	Type d'ouvrage				
					Façade	Refend	Soubassement enterré	Cloison	About de plancher
Blocs en béton de granulats légers (NF P 14-301)	creux		1 5×20×50	3 ^s				✓	✓
			1 7 ^s ×20×50	5				✓	✓
			1 10×20×50	7 ^s	✓			✓	✓
			2 15×20×50	11	✓	✓		✓	✓
			2 17 ^s ×20×40	11 ^s	✓	✓		✓	
			2 17 ^s ×30×40	17 ^s					
			2 20×20×50	13	✓	✓	✓	✓	
			2 20×30×50	18					
			2 22 ^s ×20×50	15	✓	✓	✓		
			2 22 ^s ×30×50	19					
	pleins et perforés		2 25×20×50	17	✓	✓	✓		
			3 27 ^s ×20×50	18 ^s	✓	✓	✓		
			4 27 ^s ×20×50	19	✓	✓	✓		
			3 30×20×50	21	✓	✓	✓		
			1 5×20×50	5				✓	✓
			2 5×20×50	4 ^s					
			1 10×20×50	8	✓			✓	
			1 15×20×50	11	✓	✓		✓	
			1 15×30×50	17					
			1 17 ^s ×20×50	13	✓	✓		✓	
	1 20×20×50	15	✓	✓	✓				
	3 20×30×50	23							

Figure 12 : Domaine d'utilisation des blocs en béton de granulats légers (Agence universitaire de la francophonie, 2012)

Le bloc de béton est énormément répandu dans le domaine de la construction et plus précisément comme composant principal des murs extérieurs dans les constructions d'habitations. Dans ce cas, on placera, devant les blocs, un isolant et un mur de briques pour des raisons esthétiques. Ils sont également répandus pour être utilisés pour la construction de hangars, de murs de clôtures ou de murs anti-bruit. Pour ce dernier, de la terre est placée dans les blocs afin d'augmenter ses capacités d'isolation. (Helmo, GRAMME, 2012)



Figure 13 : Construction d'une habitation (Helmo, GRAMME, 2012)



Figure 14 : Mur antibruit (Helmo, GRAMME, 2012)

Lors de l'édification d'un mur en blocs de béton, on placera entre ces derniers une fine couche de mortier pour fixer les blocs entre eux.

2.7 Normes

Les normes sont le reflet des règles de bonne pratique à respecter pour la fabrication de blocs de maçonnerie en béton de bonne qualité.

La norme européenne NBN EN 771-3 (2005) relative aux spécifications pour éléments de maçonnerie et, plus particulièrement, la partie 3 est consacrée aux éléments de maçonnerie en béton (granulats courants et légers). (CSTC, 2012)

Cette norme spécifie les caractéristiques et les exigences de performances des blocs en béton de granulats fabriqués à partir de granulats courants et légers ou une combinaison des deux, utilisés, exposés ou non, en maçonnerie courante ou de parement, porteuse ou non, de toutes formes, dans des bâtiments ou des ouvrages de génie civil.

Les blocs sont utilisés pour la réalisation de toutes les formes de murs existants. D'une part, la norme définit les caractéristiques relatives à la résistance, la masse volumique et les tolérances dimensionnelles. D'autre part, la norme permet l'évaluation de la conformité du produit et inclut également les exigences de marquage des produits qui y sont traités.

En outre, la norme européenne ne donne pas les indications concernant les formats standard des blocs en béton de granulats, les dimensions de fabrication courantes, ni même les caractéristiques angulaires des blocs en béton de granulats de forme particulière. Elle ne couvre pas non plus les évacuations de fumée, les panneaux à hauteur d'étage ni les blocs servant d'assise anti-humidité.

2.8 Caractéristiques

Les deux grandes particularités du bloc de béton sont ses caractéristiques mécaniques et isolantes, en plus de son faible coût. Il possède également la particularité d'être incombustible. (Helmo, GRAMME, 2012)

2.8.1 Caractéristiques mécaniques

La masse du bloc béton lui permet d'atteindre des résistances mécaniques et, plus précisément, des résistances en compression, ainsi qu'une solidité impressionnantes.

La résistance en compression exprime le rapport entre la charge maximale pouvant s'exercer sur le bloc et la section brute de ce dernier, en MPa (N/mm²).

Observons, ci-dessous, les caractéristiques mécaniques des blocs de construction de la société PREFER s.a.

Caractéristiques mécaniques		Blocs creux			
Granulat courant	Taille [cm]	39*9*19	39*14*19	39*19*19	39*29*19
	R_c (MPa)	10	10	8	8

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques des blocs de construction creux

Caractéristiques mécaniques		Blocs pleins et perforés				
Granulat courant	Taille [cm]	39*9*19	39*14*19	39*19*19	29*9*19	29*9*14
	R_c (MPa)	12	12	12	12	12

Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques des blocs de construction pleins et perforés

2.8.2 Caractéristiques isolantes

Les caractéristiques isolantes d'un bloc sont relativement faibles. La conductivité thermique du bloc béton est de l'ordre de 0,9 W/m.K. Cette résistance thermique est relativement faible. Il convient donc, lors de l'isolation d'habitations, d'ajouter une isolation supplémentaire. (Helmo, GRAMME, 2012)

Notons un cas particulier de bloc appelé « bloc de coffrage à isolation intégrée » assurant une isolation thermique simultanée par l'extérieur et l'intérieur. (Helmo, GRAMME, 2012)

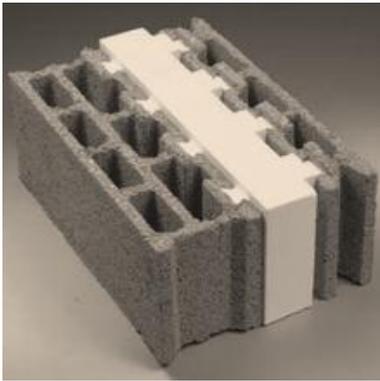


Figure 15 : Bloc de coffrage à isolation intégrée

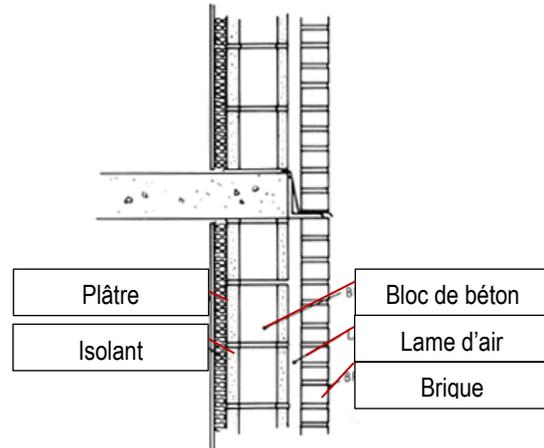


Figure 16 : Coupe dans un mur composé de blocs

3 Les granulats recyclés

Les granulats recyclés sont utilisés pour des raisons environnementales. En effet, afin de contribuer aux différents problèmes de stockage des déchets ainsi qu'à la réduction de la pollution de l'environnement, il importe de valoriser les granulats recyclés. Leur utilisation permet de pallier au manque de granulats naturels et de contribuer au prolongement de la durée d'exploitation des carrières existantes.

3.1 Provenance

3.1.1 Epuisement des ressources

La réutilisation des déchets de démolition a été effectuée la première fois en Allemagne, après la seconde guerre mondiale. Depuis lors, beaucoup de pays essaient de développer l'utilisation des déchets de démolition comme constituants de nouveau béton. Les granulats fabriqués par ces déchets sont appelés granulats recyclés et le béton fabriqué à base de ces granulats est dit béton recyclé. (Douara, et al., 2009)

Les granulats fabriqués à partir des déchets de laboratoire peuvent avoir plusieurs formes (Cf. Figure 17) : (1) un grain de gravier enrobé par la pâte de ciment, (2) une pâte de ciment seule, (3) Un grain de gravier naturel. (Douara, et al., 2009)

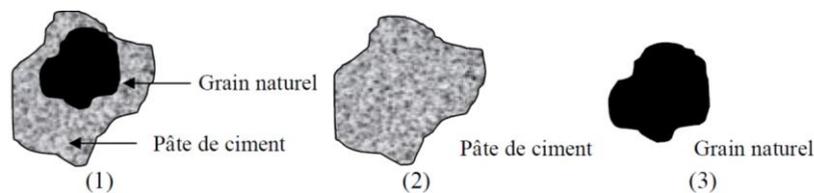


Figure 17 : Formes de granulats recyclés (Douara, et al., 2009)

Les granulats naturels devraient maintenant être considérés comme des produits nobles dont l'utilisation doit être réservée à des usages pour lesquels aucune autre alternative n'existe. Les granulats naturels ne sont pas sans impact sur la faune et la flore et les critères d'exploitation deviennent de plus en plus stricts. Dans ce contexte, l'utilisation de produits recyclés trouve tout son sens. (Architectes et professionnels du secteur de la construction, 2010)

Actuellement :

- Le marché belge produit +/- 43 millions de tonnes/an de granulats naturels auxquels il faut ajouter +/- 6 millions de tonnes/an issus de l'importation. Chaque année, ce sont donc +/- 49 millions de tonnes de granulats naturels qui sont consommées par le marché belge.
- La Belgique produit annuellement +/- 72 millions de tonnes/an de granulats tous types confondus. Les granulats recyclés représentent à eux seuls +/- **20% de la production nationale annuelle**, ce qui place la Belgique à la **tête des pays européens** assurant un recyclage presque total des déchets inertes du secteur de la construction. La répartition des différents types de granulats s'effectue de la manière suivante : granulats naturels +/- 43 millions de tonnes/an (58%), granulats marins +/- 4 millions de tonnes/an (5.5%), les granulats artificiels +/- 2 millions de tonnes/an (2.25%), sables/graves +/- 11 millions de tonnes/an (+/- 14.75%), granulats recyclés 14 millions de tonnes/an (19.5%). Sur les 43 millions de tonnes de granulats produits en Belgique, la fabrication des bétons consomme déjà 15 millions de tonnes.

Figure 18 : Production des granulats en Belgique (Architectes et professionnels du secteur de la construction, 2010)

Sur les 14 millions de tonnes de granulat recyclés, seule une partie, maximum 2 à 3 millions, est utilisable dans le béton prêt à l'emploi, en vertu des nouvelles réglementations. (Cf. chapitre 3.4 page 21) (CBR Heidelberg Cement Group, 2012)

3.1.2 Cycle de vie des matériaux

L'utilisation des granulats recyclés permet de pouvoir utiliser la notion de « *cradle to cradle* »⁷. Les granulats recyclés peuvent être constitués de différents types de matériaux. En ne favorisant pas leur utilisation, on se prive d'un potentiel important de récupération de matières alors que les décharges⁸ arrivent à saturation. (Architectes et professionnels du secteur de la construction, 2010)

Les granulats recyclés sont, actuellement, majoritairement utilisés dans les bétons de route alors qu'ils pourraient être utilisés dans les bétons traditionnels, comme c'est déjà le cas au Danemark, en Hollande et en Grande-Bretagne, ce qui pourrait constituer un énorme avantage d'un point de vue écologique mais également un avantage financier indéniable. (Mathieu, 2012) ; (Delhez, et al., 2009) ; (Architectes et professionnels du secteur de la construction, 2010)

Il existe trois classes de granulats recyclés, issus de bétons recyclés ou de matériaux inertes recyclés : (Debieb, 2007) ; (Architectes et professionnels du secteur de la construction, 2010)

Les **déchets de construction, de rénovation et de démolition des bâtiments** – appelés également **granulats de débris de maçonneries** – sont très hétérogènes. Il est possible d'y retrouver du béton, du verre, du métal et même du papier. Il est donc nécessaire de réaliser un tri préalable ce qui engendre un certain coût. Il n'est donc pas erroné d'affirmer que la principale difficulté du recyclage est due à l'hétérogénéité des déchets de démolition.



Figure 19 : Granulats de débris de maçonneries (Architectes et professionnels du secteur de la construction, 2010)

Les **déchets provenant de la démolition d'ouvrages d'art et d'infrastructures de génie civil** – appelés aussi **granulats de débris de béton** – sont plus adaptés au recyclage. La plupart du temps, il s'agit de béton armé. Ce dernier est réputé pour ne présenter que très peu d'impuretés. La séparation des aciers et du béton se fait plus facilement, souvent dans des installations fixes, même si cela demande des traitements spécifiques.

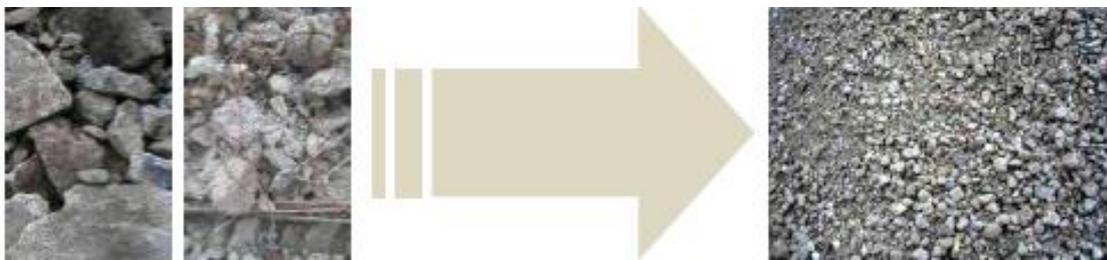


Figure 20 : Granulats de débris de béton (Architectes et professionnels du secteur de la construction, 2010)

⁷ Démarche d'éco conception dont l'objectif est la création de systèmes industriels dans lesquels les flux de matériaux circulent de manière continue.

⁸ Les décharges sont aussi appelées Centre d'Enfouissement Technique (C.E.T)

Les **déchets de la route et de la démolition de parkings** – appelés aussi **granulats de débris hydrocarbonés** – sont les plus adaptés au recyclage. Ils sont constitués, le plus souvent, de bétons non armés ayant très peu d'impuretés. Ces bétons homogènes sont recyclés dans des installations mobiles sur chantier sans traitement spécifique.



Figure 21 : Granulats de débris hydrocarbonés (Architectes et professionnels du secteur de la construction, 2010)

Il peut également arriver que les déchets proviennent de catastrophes telles que les guerres ou tremblements de terre. (Shing Chai NGO, 2004)

Sur la Figure 22 est illustré le cycle de vie d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art. (Debieb, 2007)

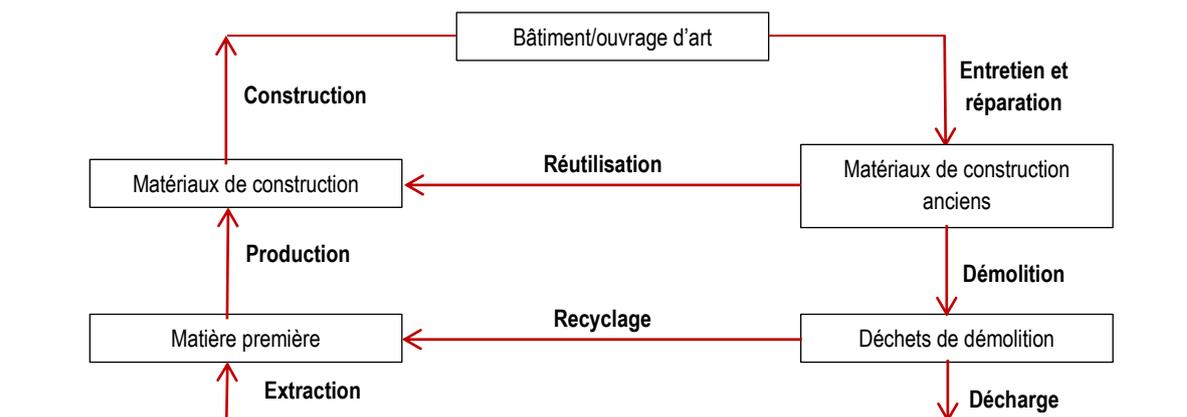


Figure 22 : Modèle du cycle de vie d'un Bâtiment ou d'un Ouvrage d'Art (Debieb, 2007)

Suivant la nature des ouvrages démolis et leur date de construction, la composition des produits de démolition varie. Les constructions actuelles sont principalement composées de béton alors que les constructions datant du 19^{ème} siècle sont plutôt édifiées en pierre, métal et brique. (Debieb, 2007)

Auparavant, la plupart des déchets de démolition provenait de bâtiments industriels. A l'avenir, les déchets proviendront également de bâtiments résidentiels et seront donc composés de substances légères et de matériaux composites qu'il n'y avait pas avant. (Debieb, 2007)

Lors de la démolition d'un édifice, il convient d'agir méthodiquement pour ne pas mélanger les différentes sources de matériaux. De cette manière, le recyclage est optimisé. (Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux [LERM], 2012)

3.1.3 Contexte et état du marché

Plusieurs points de vue existent quand on se place du côté des fabricants de béton : (Architectes et professionnels du secteur de la construction, 2010)

D'un point de vue stratégique, on constate que la demande du marché pour les granulats recyclés est en constante évolution même si elle est conditionnée par l'intérêt économique ainsi que par la qualité des produits issus du recyclage.

Du point de vue sociétal, il y a une volonté de se diriger vers une démarche de développement durable. L'optimisation des processus de fabrication ainsi que la priorité de compléter les granulats naturels par des granulats recyclés favorisent la protection des ressources et la valorisation déchets.

Du point de vue technique, la normalisation et la qualité des granulats recyclés est reconnue.

3.2 Production

Les installations de recyclage en Europe sont nombreuses. Il en existe 220 en Allemagne, 120 au Royaume-Uni, 70 aux Pays-Bas, 50 en France, 43 en Italie, 20 au Danemark et 90 en Belgique. (Debieb, 2007)

La production de granulats recyclés est en général basée sur trois types d'installations : (Debieb, 2007)

L'**installation fixe** composée d'un ou plusieurs concasseurs d'une assez grande capacité ;

L'**installation mobile sur site fixe** qui est transportable avec un ou deux concasseurs d'une assez grande capacité permettant le traitement sélectif des matériaux ;

L'**installation mobile** permettant une réutilisation immédiate des granulats recyclés, grâce à une petite installation transportable pourvue d'un concasseur de faible capacité.

Le principe de fonctionnement des installations, à savoir les matériels de concassage des déchets de béton, est relativement semblable à celui utilisé pour la production d'agrégats naturels. La seule différence réside dans le fait que l'usure du matériel nécessaire à la production des granulats recyclés est beaucoup plus rapide – jusqu'à deux fois – ce qui provoque un débit de production plus faible. On retrouvera notamment des concasseurs, des dispositifs de retrait d'impuretés et des équipements de transfert. (Debieb, 2007)

Pour fragmenter les déchets, des concasseurs – appelées également broyeurs ou granulateurs – sont utilisés, en une ou plusieurs étapes. Nous pouvons citer, par exemple, les concasseurs à mâchoire, à percussion, à marteaux, giratoires, à soles tournantes et à cylindres. Le concasseur sera choisi suivant la quantité, la qualité et la granulométrie des granulats recyclés. (Debieb, 2007)

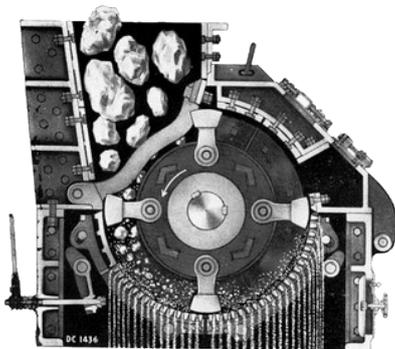


Figure 23 : Concasseur à marteaux

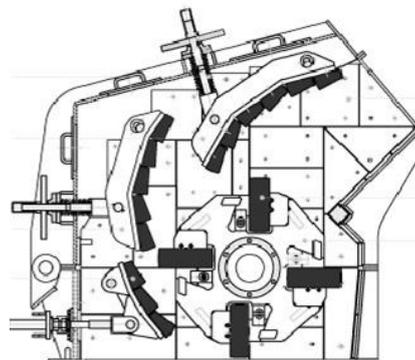


Figure 24 : Concasseur à percussions

Les étapes de traitement sont les suivantes : le prétraitement, l'alimentation, le scalpage ou précriblage, le concassage primaire, la séparation magnétique, le criblage, le concassage secondaire ou broyage et le criblage secondaire. Le concassage et le criblage sont des dispositifs qui procèdent au retrait de certaines impuretés

pendant le processus de production. Ces impuretés sont présentes car les déchets sont constitués d'autres matériaux minéraux tels que le bois, le plâtre, le verre, etc. en plus du béton. (Debieb, 2007) ; (Oikonomou, 2005)

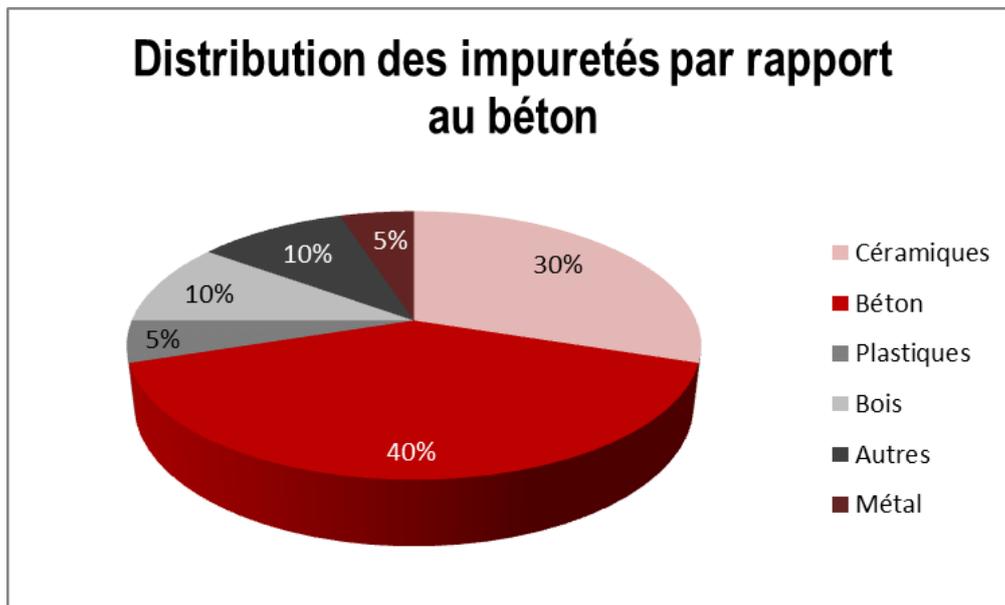


Figure 25 : Distribution des impuretés par rapport au béton (Oikonomou, 2005)

Des dispositifs de retrait des impuretés – manuels ou même magnétiques – sont donc nécessaires pour avoir les granulats recyclés. (Debieb, 2007)

Les éléments constitués en plâtre sont contrôlés par rapport à leur teneur en sulfates, au début ainsi qu'à différents stades de la production. Ces éléments sont relativement friables. Le premier criblage vibrant permet de les réduire, en grande partie, sous forme de fines⁹ qui sont facilement éliminées par criblage. (Debieb, 2007)

Les matériaux légers tels que le bois ou le plastique de faible densité sont séparés du béton par un crible spécial placé entre le concasseur primaire et le premier crible. Ils sont aspirés dans un système placé à l'extrémité du premier crible, alors que les matériaux plus lourds passent au travers. (Debieb, 2007)

Notons que deux grands problèmes se posent actuellement pour les granulats recyclés : (Mathieu, 2012)

Lors de nouvelles constructions, rénovations, etc., il peut arriver que **différents corps de métier de la construction** concassent directement les anciens bétons pour en faire de nouveaux granulats, qu'ils réutilisent sur site dans de nouveaux bétons, alors qu'ils ne sont pas forcément spécialisés en la matière.

En Belgique et en Hollande, ce domaine de recyclage est synonyme de **travail non déclaré**.

Malgré cela, nous constatons l'intérêt qu'il y a dans l'utilisation des granulats recyclés au vu de la demande de la part des producteurs de béton. (CBR Heidelberg Cement Group, 2012)

L'efficacité géographique est également un facteur important. Si les flèches du triangle ci-dessous (Figure 26) représentent la distance entre les différents sites de construction, de recyclage et de démolition, il est important que ces distances soient relativement proches. Si ce n'est pas le cas, le coût logistique augmente et les granulats recyclés deviennent plus chers que les granulats naturels. Ceci n'a donc plus aucun intérêt d'autant que

⁹ Fines : granulats de très petites dimensions. (Larousse, 2005)

l'avantage principal du granulat naturel est son énorme capacité de transport. Les granulats recyclés, eux, ne sont pas forcément transportés en grandes quantités ; cette quantité dépendant de ce qui est disponible sur site. (Mathieu, 2012)

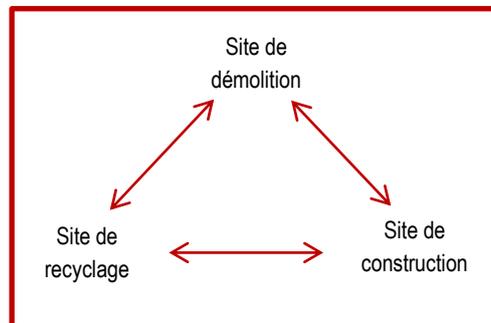


Figure 26 : Efficacité géographique

3.3 Comparaison avec les granulats naturels

Quatre grandes particularités distinguent les granulats recyclés des granulats naturels. (Debieb, 2007)

Premièrement, ils sont caractérisés par la **gangue de mortier qui reste attachée** à eux après concassage du béton-source. Cette gangue de mortier (Substance qui enveloppe un granulat) peut affaiblir les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats recyclés.

Deuxièmement, il y a **des impuretés** au sein des granulats recyclés.

Troisièmement, il s'avère que les granulats recyclés sont **beaucoup moins réguliers** que les granulats naturels. En effet, ils sont pourvus d'une grande partie de particules plates qui peuvent influencer négativement la fluidité et la compacité du futur béton.

Enfin, les granulats recyclés sont **très friables**. Après malaxage, il y a présence de fines qui sont essentiellement constituées d'ancien ciment. Ces fines peuvent influencer les caractéristiques du béton frais ainsi que celles du béton durci.

Les avantages de l'utilisation de granulats recyclés sont énoncés ci-après : (Shing Chai NGO, 2004) ; (Mathieu, 2012)

- Possibilité de mélanger les granulats (naturels / recyclés) ;
- Solution pour l'excès de béton ;
- Solution pour les déchets de la production de produits en béton ;
- Gain environnemental : les déchets de construction et de démolition permettent d'obtenir jusqu'à 40% environ du total des déchets chaque année ;
- Economie d'énergie : le processus de recyclage peut être fait sur site. Cela peut économiser l'énergie du transport des matériaux recyclés pour les usines de recyclage ;
- Gain d'argent : le coût de granulats recyclés est moins élevé que celui des granulats naturels ;
- Opportunités d'emplois : il y a beaucoup de gens impliqués dans cette nouvelle technologie, comme les personnes spécialisées et qualifiées, les travailleurs général, les conducteurs ;
- Durabilité : l'utilisation de granulats recyclés permet de réduire l'exploitation en carrières. Par conséquent, cela prolonge la durée de vie des ressources naturelles et prolonge la vie des centres d'enfouissements techniques. (C.E.T)

- Le marché est large : selon le Conseil de l'environnement de l'Organisation de béton, des granulats de béton recyclé peuvent être utilisés pour les trottoirs, les bordures, les infrastructures de ponts, les superstructures, etc.

Il existe aussi des inconvénients à l'utilisation des granulats recyclés : (Shing Chai NGO, 2004) ; (Mathieu, 2012)

- Le manque d'accès direct à des déchets de démolition ;
- Le manque de spécification et lignes directrices pour les normes opérationnelles et éthiques ;
- Le manque de qualité constante ;
- L'approvisionnement non continu, dépendant des démolitions ;
- La difficulté d'obtenir des permis pour les machines qui doivent fonctionner pendant le processus de recyclage.

3.4 Normes

La norme considère les granulats recyclés de deux façons. S'ils sont considérés d'un point de vue environnemental, ce sont des déchets et ils relèvent alors de la réglementation des déchets. Par contre, s'ils sont considérés d'un point de vue technique, ils relèvent des règles de conformité en vue de leur utilisation. (Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux [LERM], 2012).

Dans ce mémoire, il s'agit de les utiliser d'un point de vue technique. Ils sont donc soumis aux mêmes exigences que les granulats naturels. (Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux [LERM], 2012)

Il existe différentes catégories de graviers recyclés, suivant la RILEM¹⁰. Ces catégories sont fonction des classes d'exposition et des résistances souhaitées pour le béton. Pour chacune des catégories, il existe des exigences concernant les caractéristiques des granulats ainsi que les domaines d'application pour les bétons qui seront élaborés à partir de ces granulats. Les catégories des graviers recyclés sont les suivantes : (Debieb, 2007)

La **catégorie 1** est relative aux granulats provenant des maçonneries. La **catégorie 2** concerne les granulats provenant de béton de démolition tandis que la **catégorie 3** est synonyme de mélange entre les granulats naturels (minimum fixé à 80 % de la masse totale) et les granulats recyclés (Maximum fixé à 10 % par rapport à la masse totale si les granulats sont de type 1).

La version révisée de la norme belge NBN B 15-001 (CSTC, 2012) paraîtra bientôt. Pour la première fois, des dispositions normatives relatives à l'utilisation des granulats recyclés dans le béton y figureront, ce qui concrétisera les dispositions déjà présentes dans la norme européenne EN 12620 (CSTC, 2012), en matière de granulats recyclés. Sur base de cette norme, les règlements de certification sont adaptés pour permettre d'attribuer la marque de qualité Benor au béton avec granulats recyclés. En construction routière, la région Flamande a prévu une disposition relative à l'utilisation de granulats de béton de haute qualité. Dans l'industrie de la préfabrication, le recyclage du béton d'origine interne est une réalité depuis longtemps déjà. Les exigences normalisées applicables à ce granulat sont la composition, la granulométrie, l'absorption d'eau, la variabilité et les constituants chimiques. (CBR Heidelberg Cement Group, 2012)

3.5 Caractéristiques

3.5.1 Masse volumique

La masse volumique des granulats recyclés utilisés dans le cadre de ce travail de fin d'études est de 1164 Kg/m³ et a été établie par Farid Debieb. (Debieb, 2007) (Cf. Section 6.3. page 49)

¹⁰ Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de recherches sur les Matériaux.

3.5.2 Absorption d'eau

Les granulats possèdent une structure poreuse. Cette porosité entraîne une capacité d'absorption d'eau non négligeable dans les blocs de béton. C'est un paramètre très important car la durabilité des blocs de béton peut être fortement menacée par cette porosité, même s'ils ont tendance à raidir plus vite quand ils sont fabriqués à partir de ces granulats. (Debieb, 2007)

3.6 Une avancée spécifique : les granulats recyclés carbonatés

Une application spécifique est envisagée dans ce travail : les granulats recyclés carbonatés. Leurs caractéristiques sont exactement les mêmes que celles des granulats recyclés. La différence résulte dans le fait qu'on leur fait subir un processus de carbonatation accéléré. (Cf. 5.3 page 41)

4 Les fibres végétales de type miscanthus

Il importe de prendre en considération les fibres végétales de type miscanthus, depuis leur production jusqu'à leur arrivée dans le béton. En effet, ces dernières seront incorporées dans le béton et feront office de granulats naturels.

4.1 La plante

Les fibres naturelles deviennent de plus en plus populaires. En effet, les fibres végétales sont une ressource renouvelable et sont disponibles presque partout dans le monde. Par conséquent, promouvoir l'utilisation d'un béton composé de fibres végétales pourrait être un moyen d'améliorer la durabilité du béton ainsi que la construction durable. De plus, l'utilisation de fibres végétales peut réduire la fragilité du matériau et donc augmenter sa ductilité¹¹. Cette propriété peut s'avérer très importante car elle augmente la capacité d'absorption d'énergie et la résistance aux séismes. La culture du miscanthus n'est pas encore développée en Belgique car elle n'a pas encore de créneau commercial, bien qu'il soit relativement aisé de la cultiver et que son prix est assez faible. L'A.S.B.L ProMisc possède cependant quelques parcelles de culture. (Pacheco-Torgal, et al., 2011) ; (Acikel, 2011) ; (Baudoin, 2004)

4.1.1 Origine

Andersson, en 1885, décrit pour la première fois le miscanthus, appelé aussi herbe à éléphant. Cette plante est utilisée à l'origine pour l'ornementation botanique car elle est très appréciée pour la beauté de son feuillage et le volume qu'elle occupe en hauteur. Au départ, elle n'a pas pour première vocation d'être étudiée comme plante à haut potentiel de biomasse¹². (Vandendriesche, 2007) ; (Ornamental grasses and willows catalogue online, 2012).

Le Miscanthus est une plante d'origine tropicale et subtropicale et plus précisément originaire d'Asie et d'Afrique. Les différentes variétés existantes poussent du Sud-est du continent asiatique jusqu'aux îles du Pacifique, dans les montagnes de l'Himalaya, au Japon et au Sud-est du continent Africain. En 1935, A. Olson prélève des rhizomes de Miscanthus x giganteus à Yokohama, au Japon et les repique au Danemark. C'est une partie de ces clones qui sont à l'origine des plants disséminés en Europe aujourd'hui. Certaines espèces de miscanthus grandissent jusqu'à 3000 mètres au-dessus du niveau de la mer et peuvent être cultivées dans les différentes latitudes du continent européen. Depuis quelques années, elle est étudiée en Europe dans le cadre de la fabrication des biocarburants de seconde génération. (VALBIOM, 2012) ; (Vandendriesche, 2007)

4.1.2 Classification

Le genre Miscanthus est composé de 20 espèces, ayant pour origine le même ancêtre commun, classées en 4 sections : Karyasua, Diandra, Triarrhena et Eumiscanthus. Les critères anatomiques de la panicule florale du miscanthus sont utilisés pour les différentes espèces. (Rosolen, 2010) ; (Vandendriesche, 2007)

La variété de plante qui sera essentiellement étudiée dans ce mémoire est la plus répandue : miscanthus x giganteus. Cette plante est la résultante d'un croisement entre deux espèces : miscanthus sinensis et miscanthus sacchariflorus. Ces deux espèces appartiennent respectivement aux sections « Eumiscanthus » et « Triarrhena », répandues pour leurs caractéristiques intéressantes dans le domaine de la recherche pour avoir un bon potentiel de production en biomasse. (Vandendriesche, 2007)

¹¹ Ductilité : propriété des corps pouvant être étirés sans casser. (Larousse, 2005)

¹² Biomasse : Masse des êtres vivants sur une surface de sol ou dans un volume d'eau. (Larousse, 2005)

Figure 27 : *Miscanthus sacchariflorus*Figure 28 : *Miscanthus sinensis*

Le miscanthus x giganteus fournit une excellente base de ressources pour la production de plantes qui peuvent servir à la production de béton léger. (Cf. 4.3 page 24) Il a déjà été démontré que le béton léger à base de génotypes gigantes durcit beaucoup plus vite et se caractérise par une plus forte stabilité de pression que les autres génotypes de *Miscanthus*. (Pude, et al., 2005) ; (Vandendrieesche, 2007)

La taxonomie du *Miscanthus x giganteus*, aussi appelé « *Miscanthus sinensis giganteus* », « *Miscanthus x ogiformis Honda giganteus* » ou, encore plus simplement, « *Miscanthus giganteus* » est la suivante :

Embranchement	Spermatophyte
Classe	Angiosperme
Série	Commelinale
Ordre	Poales
Famille	Poaceae
Sous-famille	Panicpoda
Tribu	Andropogonae
Sous-tribu	Saccharinae
Section	Saccharininae
Genre	<i>Miscanthus</i>
Section	Triarrhena
Espèce	<i>Miscanthus x giganteus</i>

Tableau 3 : Taxonomie du *Miscanthus x giganteus*

La famille des poacées comprend un grand nombre de plantes. On retrouve notamment le bambou, le blé, le sorgho ou le maïs. La tribu des andropogonodae est composée d'un grand nombre d'espèces étudiées en tant que bioénergie et pour la fabrication de biocarburants. Dans la sous-tribu des saccharianes, on retrouve une plante du genre *saccharum*, la canne à sucre, qui a de nombreux caractères anatomiques et morphologiques communs avec le *miscanthus*. (Vandendrieesche, 2007)

4.1.3 Morphologie

La plante *miscanthus* est une graminée rhizomateuse qui, à l'âge adulte, peut dépasser 3 mètres (Figure 29). La tige ressemble à celle du bambou et est constituée d'un tube ligneux à paroi lisse. Sur la tige, lorsqu'il y a présence de nœuds, cela correspond à la jonction des feuilles. La jonction entre la tige et la feuille est constituée d'une languette membraneuse appelée ligule. Le *miscanthus* produit un rhizome sur lequel se développent des bourgeons constitués de feuilles rugueuses en forme d'écaille. (Vandendrieesche, 2007) ; (Rosolen, 2010)

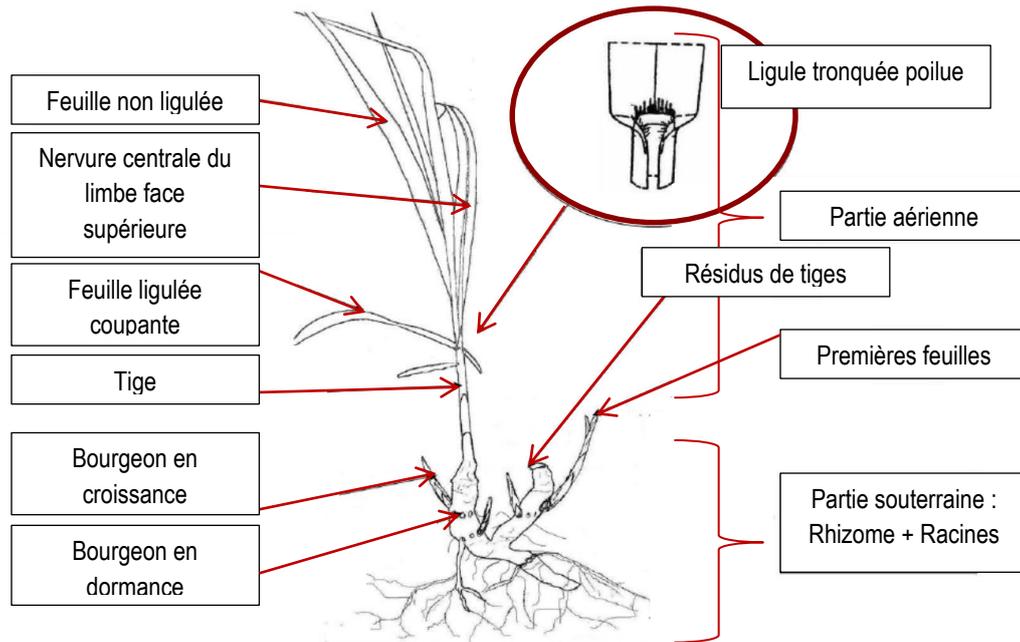


Figure 29 : Anatomie du plant de miscanthus (Rosolen, 2010)

Chaque bourgeon donne une tige dont le nombre peut varier de 30 à 80 selon les pieds. Suivant la lumière reçue par chacune des tiges, il arrive que certaines d'entre elles régressent au point de disparaître au cours du cycle végétatif. Le rhizome, organe de réserve permettant le développement de la plante en début de printemps, constitue la réserve d'énergie pour la croissance de la plante. Le système racinaire se développant à partir de l'âge adulte peut atteindre les 2.5 mètres de profondeur. (Vandendrieesche, 2007)

Au cours du développement de la plante, la feuille peut devenir cassante. Cette dernière est pourvue d'un limbe à nervures parallèles dont le contour est rouge bordeaux. La nervure centrale de la feuille est blanchâtre. Sur la tige, on retrouvera une alternance de feuilles coupantes et étroites. (Vandendrieesche, 2007)

Une section transversale schématique de l'illustre *Miscanthus x giganteus* (Figure 30) nous montre le parenchyme ; ce dernier assure l'isolation thermique et, autour du parenchyme, il y a trois anneaux fermes : l'épiderme, l'épaisseur caractéristique sclérenchyme et la répartition radiale des faisceaux vasculaires avec sa propre texture ferme. (Pude, et al., 2005)

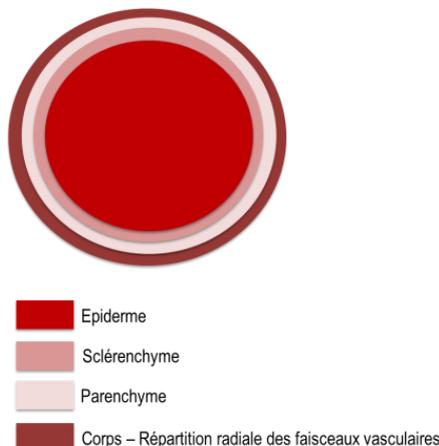


Figure 30 : Section transversale du Miscanthus

4.1.4 Développement et culture

Le miscanthus giganteus est un hybride stérile, ce qui veut dire que sa multiplication s'effectue par division des rhizomes ou par clonage. Ceci constitue un avantage car cette multiplication particulière évite les problèmes de diffusion de la plante. La plante ne peut donc pas envahir les terres voisines. (Rosolen, 2010)

La production de cette plante peut être très importante et avoisiner les 20 - 25 tonnes de biomasse par an dès la troisième année. Un désherbage est nécessaire les deux premières années et, à partir de la troisième année, la culture ne nécessite ni engrais, ni désherbage. Ce dernier a pour but d'assurer la croissance des rhizomes en évitant la concurrence avec les adventices¹³. La plante n'apprécie guère les gelées tardives, ni les sols lourds, trop humides ou trop crayeux (> 80% de craie). Elle apprécie les sols profonds et bien pourvus en eau (500-600 mm de précipitation sur la période avril-novembre). (Baudoin, 2004) ; (VALBIOM, 2012) ; (Rosolen, 2010)

Le miscanthus se récolte à la fin de l'hiver ou au début d'automne avec une préférence pour la récolte en fin d'hiver car le miscanthus est sec. S'il est assez sec (20% d'humidité maximum), le miscanthus se récolte avec une ensileuse ou par fauchage et bottelage. (Baudoin, 2004) ; (Rosolen, 2010)



Figure 31 : Récolte par ensileuse



Figure 32 : Récolte par fauchage et bottelage

Le cycle végétatif du miscanthus est annuel à partir du moment où la plante a atteint sa maturité, c'est-à-dire après 2-3 ans. Au printemps de la première année, vers le mois de mai, le rhizome est planté à une profondeur d'environ 10 cm à l'aide de planteuses à pommes de terre semi-automatique.



Figure 33 : Planteuse à pommes de terre semi-automatique

¹³ Une adventice est, en botanique, une espèce végétale étrangère à la flore indigène d'un territoire dans lequel elle est accidentellement introduite et peut s'installer.

La plante peut alors commencer à grandir et ce, jusqu'à l'automne. A partir de cette saison, elle commence à se dessécher et les feuilles tombent : il s'agit de la période de sénescence. Au printemps de la deuxième année, de nouvelles tiges apparaissent et grandissent jusqu'à l'hiver. Dès l'hiver, les tiges se dessèchent et les feuilles tombent. Dès la troisième année, lorsque les tiges mortes atteignent 15% d'humidité au printemps, la récolte peut avoir lieu. Les nouvelles poussent le jour dès que les températures redeviennent clémentes. La culture du miscanthus est pérenne, ce qui veut dire que ce cycle va se répéter pendant une vingtaine d'années, tout au plus. (Baudoin, 2004) ; (Vandendriessche, 2007) ; (Rosolen, 2010) ; (Groupement belge du béton, 2006) ; (Warnant, 2007)

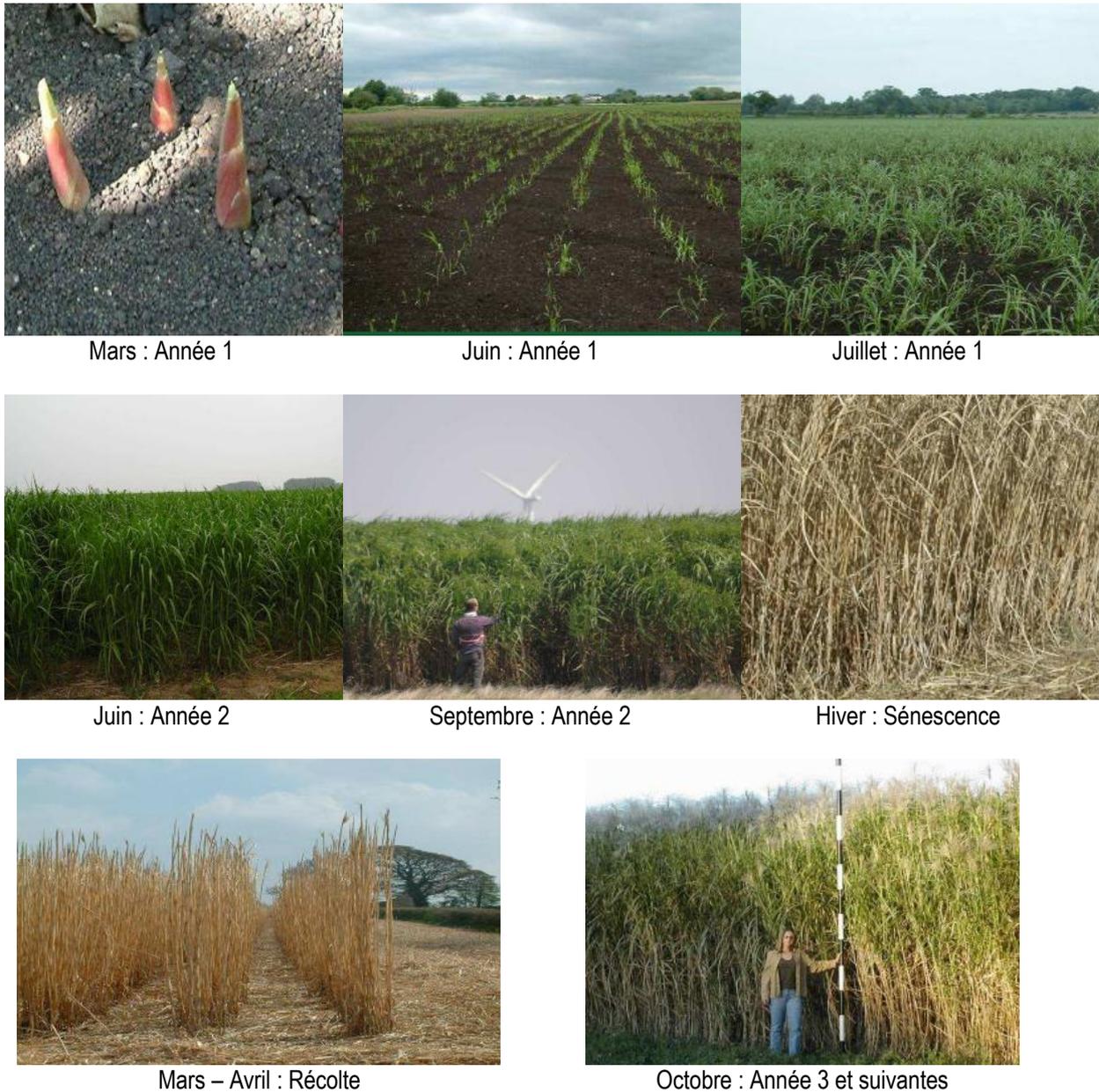


Figure 34 : Cycle végétatif du miscanthus (VALBIOM, 2012)

Le potentiel de rendement de la plante de Miscanthus peut être jusqu'à deux fois plus important en condition irriguée qu'en condition non irriguée. (Vandendriessche, 2007)

4.1.5 Atouts

Les atouts liés à l'utilisation des fibres végétales de type miscanthus sont au nombre de trois. (Rosolen, 2010)

L'**impact environnemental** est diminué par le fait que la plante possède une grande capacité à capter et à stocker une grande quantité de nutriments. De ce fait, une fois mature, peu d'intrants¹⁴ sont nécessaires. Un autre point positif est la réduction de l'appauvrissement du sol quand la plante est récoltée après chute des feuilles. Quand ces dernières se décomposent, elles rendent au sol les nutriments qui permettent une fertilisation naturelle. De plus, le ratio énergie requise/énergie produite donne la capacité à la plante de créer de l'énergie à partir de ses ressources. Comme nous le remarquons sur le Tableau 4, le miscanthus dépasse de loin les autres cultures ce qui traduit un bilan énergétique très favorable. Cela est dû à son pouvoir de stockage de CO₂ la nuit qui lui confère les caractéristiques d'une plante peu consommatrice.

Cultivar	Energie requise [GJ/ha]	Energie produite [GJ/ha]	Ratio [-]
Miscanthus	9223	300000	+32.53
Saule	6003	180000	+29.99
Chanvre	13298	112500	+8.46
Blé	21465	189338	+8.82
Colza	19390	72000	+3.76

Tableau 4 : Bilan énergétique des différentes plantations (Warnant, 2007)

Un **rendement plus important** peut être observé. A maturité, le rendement atteint 15 tonnes de matière sèche par hectare (MS/ha) (Groupement belge du béton, 2006). Le rendement du miscanthus est bien plus élevé que les rendements des cultures traditionnelles. (Cf. Tableau 5)

Cultivar	Bois	Maïs	Blé dur	Colza	Chanvre	Lin	Miscanthus
Rendement [T MS/ha/an]	6	8.9	5.1	3.8	5.3	2	15

Tableau 5: Rendement des cultures traditionnelles françaises en 2009 (Rosolen, 2010)

La **pérennité** du miscanthus présente de nombreux avantages, tant pour l'agriculteur que pour l'industriel. Pour l'un, la phase de plantation est supprimée pour 20 ans et les phases de traitement sont largement diminuées. Pour l'autre, il peut assurer un approvisionnement permanent, pour une vingtaine d'années.

4.1.6 La valorisation

Les fibres végétales de type miscanthus peuvent être valorisées de plusieurs façons. En effet, il est possible de les retrouver comme bio-combustible, biocomposites, litières ou même dans le domaine de la plasturgie pour la composition des bio-plastiques. (Baudoin, 2004) ; (Rosolen, 2010)

4.2 Caractéristiques

4.2.1 Granulométrie

La granulométrie des fibres végétales de type miscanthus est difficile à établir car il est très probable d'identifier plusieurs catégories de particules au sein des granulats de miscanthus. Suivant l'organe dont la particule est composée, une différence de granulométrie peut exister. Il est notamment possible d'observer une nette différence de granulométrie entre les morceaux de la tige et les morceaux de feuilles.

¹⁴ Intrant : élément entrant dans la production d'un bien (Larousse, 2005)

4.2.2 Masse volumique

La masse volumique du Miscanthus est de 100 Kg/m³, ce qui représente 1/10^{ème} de la masse volumique des granulats recyclés.

4.3 Le béton de Miscanthus

Le béton de miscanthus est un béton dont les granulats sont remplacés par des fibres végétales de type miscanthus et où le liant peut être aérien ou hydraulique. Ce type de béton pourrait avoir la particularité d'allier résistance et légèreté.

Les caractéristiques principales de ce béton sont l'isolation thermique et le stockage du CO₂. L'utilisation de végétaux dans la construction a comme caractéristique intéressante de permettre aux murs de respirer, cela évitant la condensation et permettant les régulations de température et d'humidité au sein de l'habitation. De ce fait, la présence de végétaux dans les constructions permet d'élaborer des matériaux ayant des propriétés thermiques intéressantes, en plus de la très haute fermeté de la matière végétale. Ce qu'il manque à ces bétons, c'est la résistance mécanique. C'est dans cette optique d'amélioration de la résistance que l'on désire étudier le béton de Miscanthus. (Rosolen, 2010) (Pude, et al., 2005)

4.3.1 Caractérisation

Le béton de miscanthus est un béton léger ayant une faible masse volumique comparativement à d'autres bétons. D'après l'étude faite par William Rosolen, trois grandes difficultés sont à prendre en compte quant à la réalisation d'un béton de miscanthus : (Rosolen, 2010)

Une certaine **difficulté de mise en œuvre** peut exister car le béton à l'état frais présente une ouvrabilité¹⁵ quasiment nulle. Il peut y avoir diverses causes qui peuvent être attribuées à ce problème comme une inadaptation de la granulométrie, un manque d'eau dû à un pouvoir absorbant trop important des particules, une mauvaise proportion granulats-liant ou une certaine légèreté des particules qui peuvent ne pas faciliter l'homogénéisation du matériau lors du malaxage.

Une lenteur de durcissement peut être néfaste dans le sens où les délais de prise du béton sont trop longs.

Une faible cohésion des particules provoque un détachement des particules des échantillons de béton.

4.3.2 La minéralisation

Si aucun traitement préalable n'est appliqué aux particules végétales, il se peut que les mélanges réalisés à partir de ces dernières aient des difficultés à être stables et reproductibles puisque les fibres végétales sont capables d'absorber 70% d'eau et de se déformer. De plus, en présence d'un milieu alcalin, les fibres végétales ont tendance à se dégrader. (Grimont, 2008) ; (Acikel, 2011) ; (Pacheco-Torgal, et al., 2011)

Pour obtenir une durabilité satisfaisante du béton de miscanthus, faciliter sa mise en œuvre et éliminer les interactions qu'il pourrait y avoir entre le copeau et son environnement, la minéralisation semble être la solution la plus adaptée. Les interactions peuvent se faire entre les particules végétales qui pourraient réagir chimiquement avec l'environnement. Les dimensions de ces dernières pourraient varier en fonction de l'humidité. (Grimont, 2008)

Principes

Le principe de la minéralisation consiste à enrober et imprégner les particules végétales avec des sels minéraux en solution afin de diminuer le pouvoir absorbant des particules et d'augmenter la dureté des granulats. Les

¹⁵ Ouvrabilité : malléabilité d'un béton qui vient d'être gâché. (Larousse, 2005)

agents minéralisants sont, pour la plupart, composés de ciment, de chlorure de calcium et de chaux associés ou non à de la silice. Les particules préminéralisées servent alors de granulats pour le béton. (Rosolen, 2010) ; (Grimont, 2008)

La minéralisation a un certain coût, non seulement au niveau des matériaux à utiliser pour minéraliser les particules végétales, mais également en termes de temps et d'énergie nécessaires à cette minéralisation. De plus, cette étape n'est pas des plus aisées et requiert souvent une manipulation par des experts. Trouver une solution innovante pour la minéralisation permettant un gain de temps et une diminution des coûts pourrait augmenter la compétitivité de ce procédé, dans le secteur de la construction. (Rosolen, 2010)

Avantages

Il existe trois grands avantages à minéraliser : (Rosolen, 2010)

Reproductibilité : comme déjà explicité ci avant, les particules végétales, dont le miscanthus fait partie, sont assez sensibles aux variations de l'environnement. Pour éviter d'adapter certains paramètres en permanence tels que la quantité d'eau ou durée de séchage dû aux agents extérieurs, il est nécessaire d'avoir une constance des caractéristiques physico-chimiques des matières premières, surtout quand on veut reproduire un même objet en grande quantité.

Stabilité : les matériaux naturels sont sensibles aux variations de l'environnement. Il est impensable d'imaginer un matériau se dégradant au fur et à mesure des années alors qu'il est utilisé dans une construction. Pour diminuer la sensibilité de ces matériaux, il importe de prétraiter les granulats, c'est ce qu'on appelle la phase de préminéralisation.

Amélioration des caractéristiques mécaniques : cette phase de préminéralisation des particules a pour but d'améliorer la cohésion du liant aux particules. En effet, grâce à la préminéralisation, les particules végétales de type miscanthus ont tendance à se comporter comme des granulats rocheux plutôt que comme des granulats végétaux.

4.4 Une avancée spécifique : les fibres végétales carbonatées

L'application spécifique dont nous parlons dans le chapitre 3.6 page 22 est aussi envisagée pour les fibres végétales de type miscanthus.

5 Objectif captation du CO₂ : démarche environnementale

Après cette démarche de compréhension permettant d'y voir plus clair concernant les types de granulats utilisés dans les futurs blocs de bétons, il est nécessaire de se pencher plus sérieusement sur la captation du CO₂, l'intérêt de cette dernière sur l'environnement et sur les bétons. Il est important de noter que les ouvrages de John Houghton (Houghton, 2009) et de Fabrice Lecomte (Lecomte, et al., 2010) ont été grandement utilisés pour l'élaboration de cette section. L'explication détaillée des moyens utilisés pour capter le CO₂ sera explicitée dans la suite de ce travail. (Cf. Chapitre 6 page 47)

5.1 Impact environnemental

5.1.1 La problématique du CO₂ : les gaz à effet de serre

Le réchauffement global, dû aux gaz à effet de serre (GES) est synonyme de beaucoup d'incertitude. Mais en quoi ces incertitudes influencent-elles les lignes d'action édictées par les décideurs politiques ? L'une des théories-clé qui sous-tend ces actions est celle du développement durable, théorie qui intéresse de plus en plus les instances internationales. Une définition classique du développement durable, qui a été présentée pour la première fois en 1987 par le rapport Brundtland, est la suivante : « *Un mode de développement qui répond aux besoins actuels sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins* ». (Houghton, 2009) ; (World Commission Environment and Development, 1988)

On s'aperçoit que ce concept de durabilité s'applique à l'environnement, mais il peut également s'appliquer aux communautés humaines. La déclaration de Rio (1992) mentionne une hypothèse suivant laquelle le développement durable comprend les facteurs environnementaux et économiques, mais aussi des facteurs sociaux plus larges. Par facteurs sociaux, nous entendons la promotion de la justice sociale et l'équité. Cette dernière concerne l'équité entre les nations, mais aussi l'équité entre les générations : « *Nous ne devons pas laisser un monde plus pauvre à la génération suivante* ». (Houghton, 2009)

Depuis cette étendue du concept de durabilité, il existe une nouvelle définition du développement durable, publiée par le Ministère Britannique de l'Environnement en 1990 et qui est plus détaillée : « *Le développement durable implique que l'on vive des rentes que nous fournit la Terre plutôt que du revenu obtenu en érodant son capital* » et que « *l'on maintienne la consommation des ressources naturelles et renouvelables en deçà de leur taux de renouvellement* ». Ce texte reconnaît la valeur intrinsèque du monde naturel en expliquant que le développement durable implique que « *l'on transmette aux générations suivantes non seulement les richesses créées de la main de l'homme (comme les bâtiments, les routes et les lignes de chemin de fer) mais également les richesses naturelles, comme les ressources en eau potable, des terres arables en bon état et une profusion d'êtres vivants sauvages et de forêts prospères* ». (Houghton, 2009)

L'augmentation de l'effet de serre, phénomène dû à la fine couche de gaz qui enveloppe la Terre et retient à sa surface une partie du rayonnement solaire, provoque le réchauffement climatique. L'effet de réchauffement généré par les gaz à effet de serre dans l'atmosphère a été identifié au début du XIX^e siècle par Jean-Baptiste Fourier, physicien, qui a mis en évidence les similitudes entre les propriétés radiatives de l'atmosphère terrestre et celles des vitres d'une serre – d'où le nom d' « effet de serre ». (Houghton, 2009) ; (Lecomte, et al., 2010)

Le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2008) a mis en évidence la relation existant entre la température moyenne à la surface de la Terre et la concentration en CO₂ de l'atmosphère. Avant la révolution industrielle (XIX^{ème} siècle), la concentration en CO₂ était de 280 ppm. En 2005, elle était de 379 ppm, soit une augmentation de 35%. Sur la période 1960-2005, le taux de croissance de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère était de 1.4 ppm/an alors qu'il est de 1.9 ppm/an sur la période 1995-2005. Le phénomène s'accélère rapidement. Après 2030, l'évolution des températures varierait entre +1.1°C et +6.4°C à l'horizon 2009-2099 par rapport aux températures moyennes sur la période 1980-1999. Cette augmentation de tempéra-

ture est en accord avec ce qui avait été prédit par Svante Arrhenius, chimiste suédois, qui avait estimé, en 1896, une augmentation de la température moyenne mondiale de 5 à 6 °C. (Lecomte, et al., 2010) ; (Houghton, 2009)

Evolution récente de la température terrestre

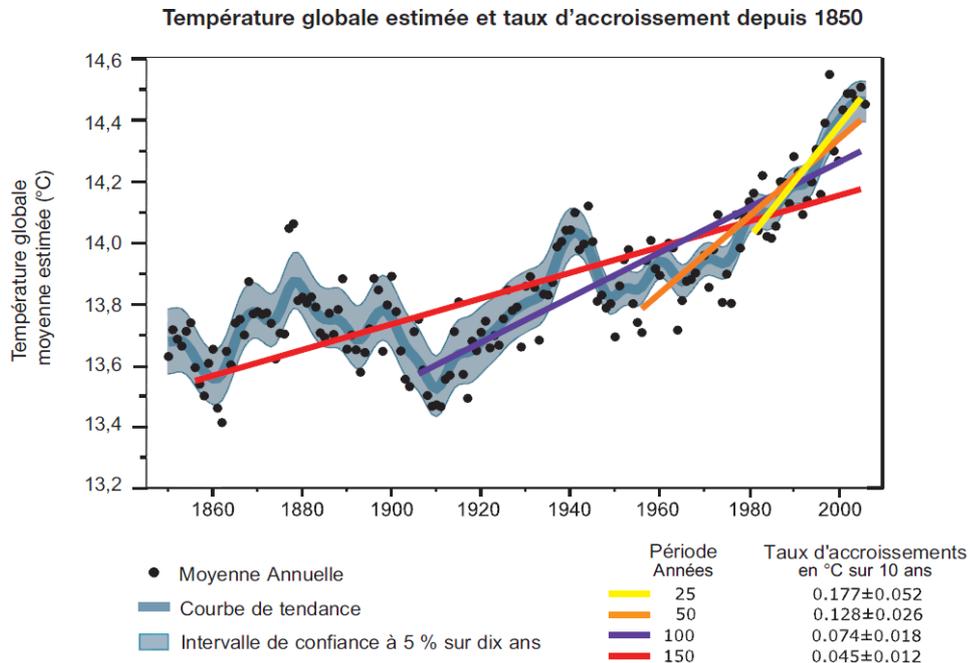


Figure 35 : Evolution récente de la température terrestre (Sous-direction de l'Observation de l'énergie et des matières premières, 2009)

Depuis toutes ces constatations, les inquiétudes relatives au changement climatique sont bien présentes et on a remarqué que l'intérêt croissant pour les questions environnementales a placé la thématique du réchauffement global au centre des discussions. Finalement, une Convention sur le Climat a été signée en 1992. (Cf. Chapitre 5.2 page 36) (Houghton, 2009)

Le mécanisme de l'effet de serre est schématisé sur la Figure 36. Le sol réémet les rayons infrarouges vers l'atmosphère, les gaz à effet de serre les interceptent et les renvoient vers le sol, ce qui provoque une augmentation de la température.

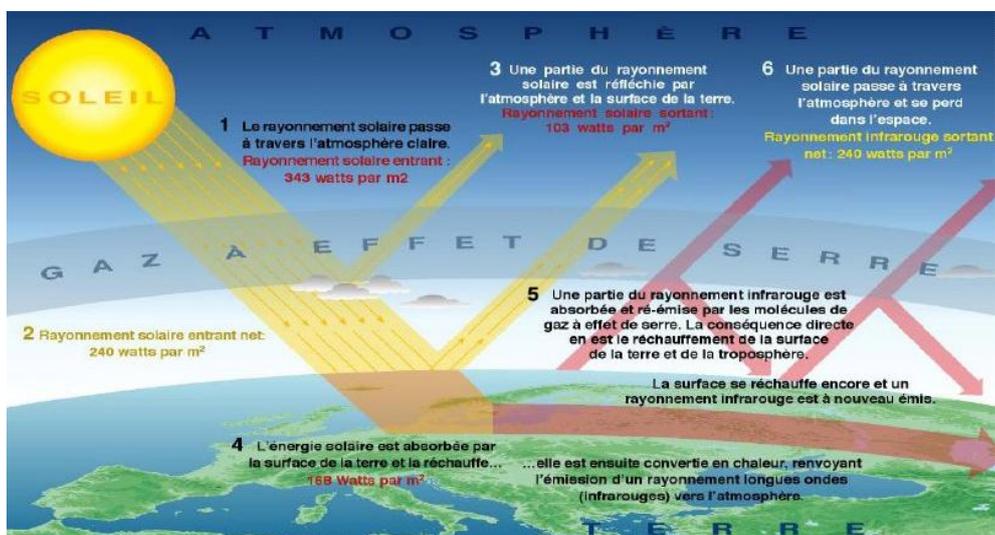


Figure 36 : Schéma de l'effet de serre naturel (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2008)

Les gaz à effet de serre induisent un effet « couvercle » au-dessus de la Terre. D'après les études faites par le GIEC, les principaux gaz à effet de serre sont la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone¹⁶ (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (ou protoxyde d'azote (N₂O)) et les chlorofluorocarbures¹⁷ (CFC). Leur contribution au réchauffement global peut être déterminée par leur abondance, leur durée de vie dans l'atmosphère et leur potentiel de réchauffement global ou PRG – mesure de l'impact que le gaz a sur la balance énergétique de l'atmosphère de la terre – Cf. Tableau 6. La présence des GES est indispensable car, sans eux, la température à la surface de la Terre ne pourrait dépasser les -18°C. Les principaux gaz à effet de serre qui sont directement influencés par les activités humaines sont le dioxyde de carbone – celui ayant les effets les plus importants à cause du volume de ses émissions d'origine humaine et son potentiel de réchauffement global – le méthane, le protoxyde d'azote (ou oxyde nitreux) et les chlorofluorocarbures (CFC). (Wolters, 2010) ; (Houghton, 2009) ; (Responsabilité sociale et environnementale de l'entreprise, 2004) ; (Lecomte, et al., 2010)

Gaz à effet de serre	Origine	Abondance	Durée de vie (an)	PRG
Vapeur d'eau : H ₂ O	Naturel	0.01-3.5 %	0.02	8
Dioxyde de carbone : CO ₂	Nat. et ant.	380 ppm	50 à 200	1
Méthane : CH ₄	Nat. et ant.	1.8 ppm	12	23
Oxyde nitreux : N ₂ O	Nat. et ant.	0.3 ppm	200	296
Perfluorocarbones : CF ₄ , C ₂ F ₆	Anthropique	0.001 ppm	> 50000, 10000	5700, 11900
Hexafluorure de soufre : SF ₆	Anthropique		3200	22200
Hydrofluorocarbones : CHF ₃ , CH ₃ CHF ₂	Anthropique		1.4 - 260	120 à 12000

Tableau 6 : Origine, abondance, durée de vie et PRG des 6 GES (Wolters, 2010) (Houghton, 2009)

En terme de proportion des émissions des gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone est le plus important. Parmi les sept GES émis, en 2004, 76.7 % étaient du CO₂, 14.3% du CH₄, 7.9% du N₂O et 1.1 % des fluocarbone, chlorofluorocarbures et hexafluorure de soufre émis en faibles quantités. (Lecomte, et al., 2010)

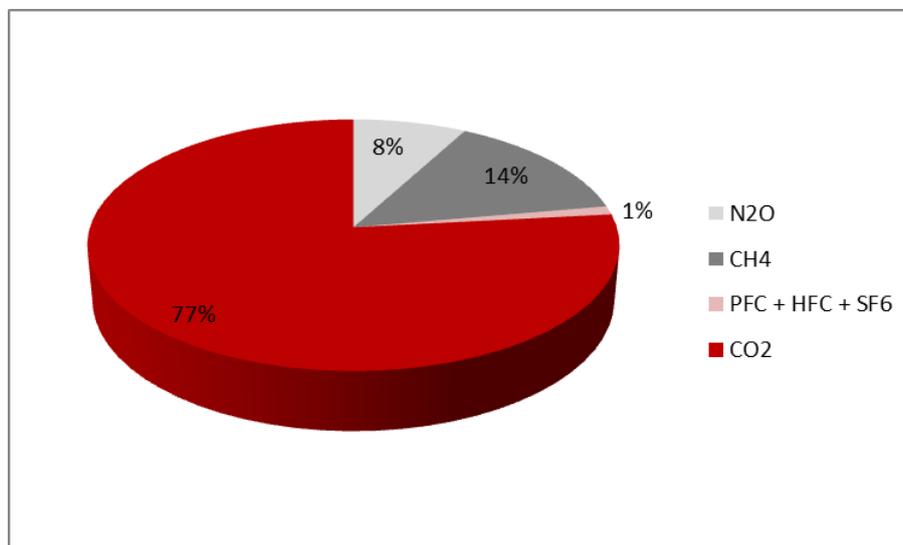


Figure 37 : Parts respectives des 6 GES anthropiques dans les émissions totales de 2004, en équivalent-CO₂ (Lecomte, et al., 2010)

¹⁶ Le dioxyde de carbone est émis par l'homme et provient principalement de la combustion des combustibles fossiles. (Houghton, 2009)

¹⁷ Il s'agit de composés de synthèse qui étaient largement utilisés pour la réfrigération et dans les bombes d'aérosol jusqu'à ce qu'on se rende compte qu'ils détruisent l'ozone qu'ils présentent une très longue durée de vie dans l'atmosphère. (Houghton, 2009)

D'où proviennent ces gaz à effet de serre ? Le gaz carbonique est à l'origine de combustions, déforestation et décomposition de la biomasse. (Cf. Figure 38)

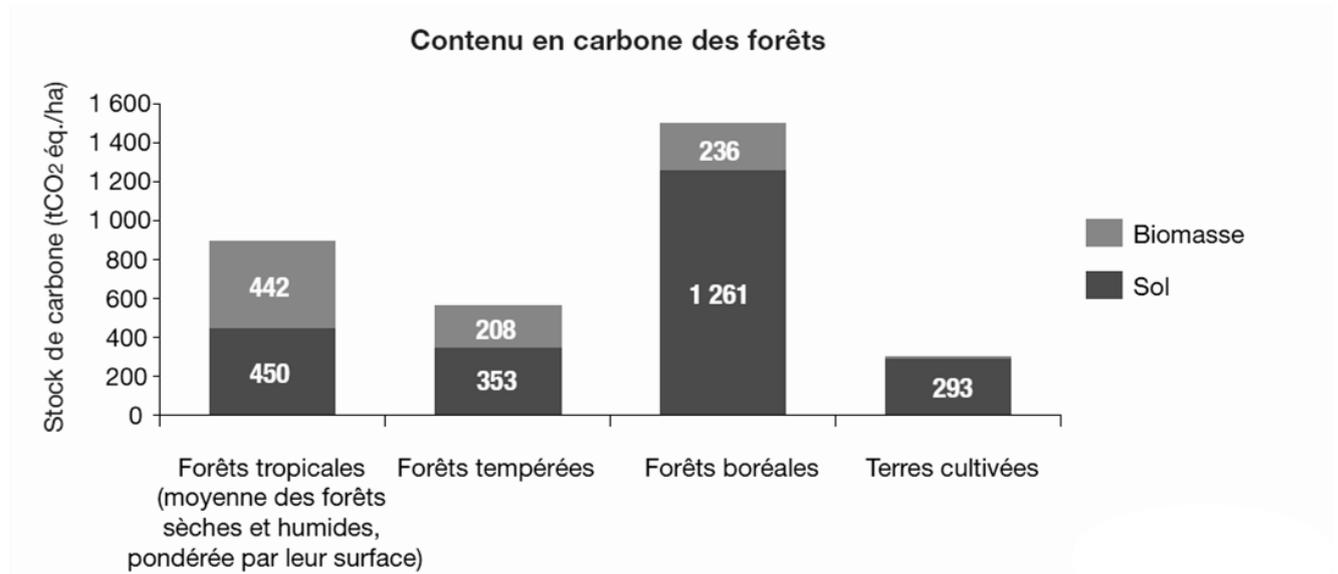


Figure 38 : Importance du carbone forestier (Sous-direction de l'Observation de l'énergie et des matières premières, 2009)

Le méthane provient de certaines cultures et élevages. L'oxyde nitreux est le résultat de certaines combustions et engrais azotés. Les autres gaz sont des gaz de synthèse responsables de l'attaque de la couche d'ozone provenant des circuits de réfrigération, expansion des mousses et bombes à aérosols. (Cf. Figure 39)

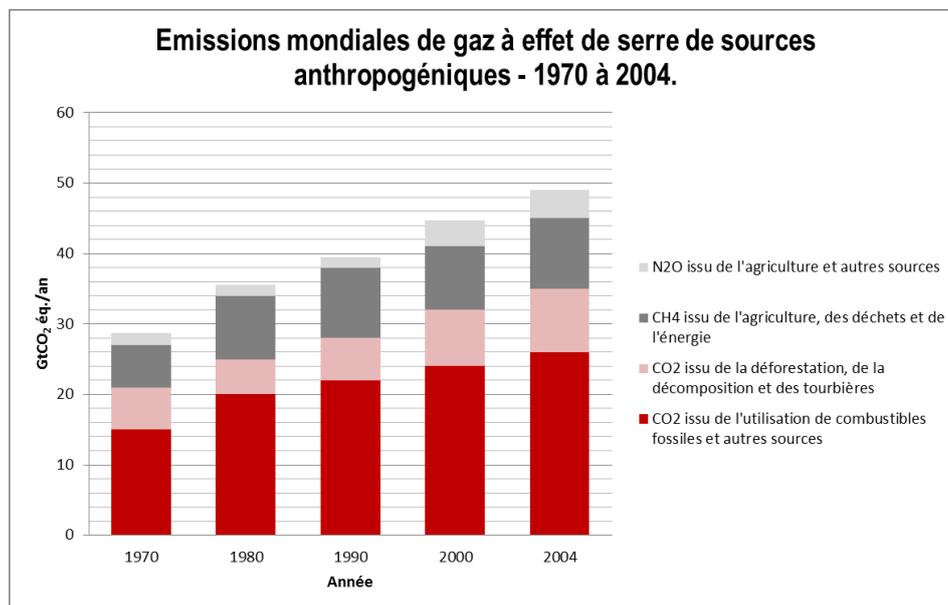


Figure 39 : Emissions mondiales de gaz à effet de serre des sources anthropogéniques - 1970 à 2004 (Lecomte, et al., 2010)

L'évaluation des impacts du réchauffement global n'est pas des plus aisée mais, nous pouvons citer les principaux phénomènes liés au changement climatique que sont l'élévation de la température moyenne à la surface de la terre, la montée du niveau des océans, la diminution de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord, des modifications importantes des phénomènes météorologiques (inondations, cyclones, crues, orages), l'accroissement de la consommation humaine des ressources d'eau douce, l'impact sur l'agriculture et la production alimentaire, l'impact sur les écosystèmes et l'impact sur la santé humaine. Si aucune lutte contre ces dégra-

dations n'est envisagée, elles auront tendance à s'aggraver et ainsi contribuer au réchauffement global. (Lecomte, et al., 2010) ; (Houghton, 2009)

Et le phénomène va continuer de s'accélérer. Depuis qu'on mesure la température terrestre (150 ans), il s'avère qu'au cours de ces onze dernières années, les températures ont été parmi les plus chaudes. Il a été montré que l'hémisphère Nord connaît une augmentation de température plus grande que sur le reste du globe. D'une manière générale, la hausse des températures est un indicateur important du changement climatique en raison de son impact sur les systèmes naturels. (Lecomte, et al., 2010)

La demande croissante d'énergie dans le monde entier est une cause majeure pour le développement non durable de notre planète. Entre 2007 et 2030, la demande d'énergie devrait encore augmenter de 40% et devrait atteindre 16.8 milliards de tonnes d'équivalent pétrole. Les activités humaines, et en particulier la combustion des combustibles fossiles, génèrent des quantités de dioxyde de carbone de plus en plus importantes. En effet, au cours des 200 dernières années, ces quantités n'ont cessé d'augmenter et encore plus ces 50 dernières années. On estime à 80% la quantité d'émissions de CO₂ sur la période 1970-2004, bien plus grande que celles de l'ensemble de tous les gaz à effet de serre. La hausse de la consommation d'énergie est due à deux raisons : l'augmentation de la population mondiale et le fait qu'il y a un nombre croissant de personnes ayant accès à l'électricité. Le

Tableau 7 représente les émissions mondiales de CO₂ par secteur, entre 2000 et 2005. On remarque ainsi que l'électricité, la production de chaleur, l'industrie et le transport représente 80 % des émissions de GES. Chaque année, on enregistre de nouvelles émissions de dioxyde de carbone qui s'ajoutent à celui déjà présent dans l'atmosphère. Ce carbone peut rester dans l'atmosphère pendant une durée d'un siècle ou davantage. (Houghton, 2009) ; (Lecomte, et al., 2010) ; (Pacheco-Torgal, et al., 2011) ; (International Energy Agency, 2008)

Emissions de CO ₂ par secteur	Emissions de CO ₂ (Gt) (2000)	Emissions de CO ₂ (Gt) (2005)	Variation en % (2000 – 2005)
Electricité et production de chaleur	8	9.6	19.6
Industrie	6.3	6.8	7.1
Transport	5	5.2	3.8
Résidentiel	1.9	2.2	18.2
Transformation des combustibles	0.7	0.9	43.1
Commercial	0.7	0.9	33.9
Agriculture	0.6	0.7	7.1
TOTAL	23.2	26.3	13.4

Tableau 7 : Evolution des émissions mondiales de CO₂, par secteur entre 2000 et 2005

La production industrielle, incluant le fer et l'acier, les produits chimiques et pétrochimiques, les minéraux non métalliques et les pâtes et papiers, représente 26% du total des émissions mondiales. Nous constatons que, d'une manière générale, les émissions de CO₂ résultent principalement de sites industriels de production d'électricité et de l'industrie (production de ciment et des raffineries).

5.1.2 Comment limiter le CO₂? De la convention sur le climat au protocole de Kyoto

Suite à la prise de conscience des différentes problématiques évoquées ci-avant, il s'est avéré nécessaire et urgent de mettre en œuvre des actions sur le plan international. La communauté internationale s'est donc mise d'accord sur la nécessité de fixer un objectif permettant de stabiliser les concentrations de GES dans l'atmosphère et donc, le climat. (Houghton, 2009)

La **Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique** a été signée par plus de 160 pays lors de la conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement, en 1992, à Rio de Janeiro. Cette convention a été créée dans le but de ralentir et stabiliser le changement climatique. Les signataires de la Convention se sont rendus compte du réchauffement global qui touche notre planète et ils se sont mis d'accord sur le fait qu'il faut agir rapidement et efficacement pour atténuer les effets du changement climatique. La déclaration des objectifs est reportée dans les annexes, chapitre 10.2 page 132. (Houghton, 2009)

Les **différentes projections énergétiques** envisagent pour le futur trois scénarios de maîtrise des consommations d'énergie. Le premier, le plus communément admis, prévoit que les émissions de dioxyde de carbone liées à la production ainsi qu'à la consommation d'énergie ne cesseront d'augmenter et que les contraintes environnementales demeureront minimales durant cette période. En 2050, les émissions seraient dès lors supérieures à 2, 3 fois leur niveau de 2005. En pareille situation, le réchauffement global et le changement climatique ne feraient que se poursuivre. Le deuxième scénario, baptisé ACT Map, viserait alors à ramener les émissions de 2050 au niveau de celles de 2005. Enfin, le scénario BLUE Map contribuerait à ramener ces émissions à leur niveau de 2005 dès 2025 et pourrait même être divisées par un facteur 2 d'ici 2050. (Houghton, 2009) ; (International Energy Agency, 2008)

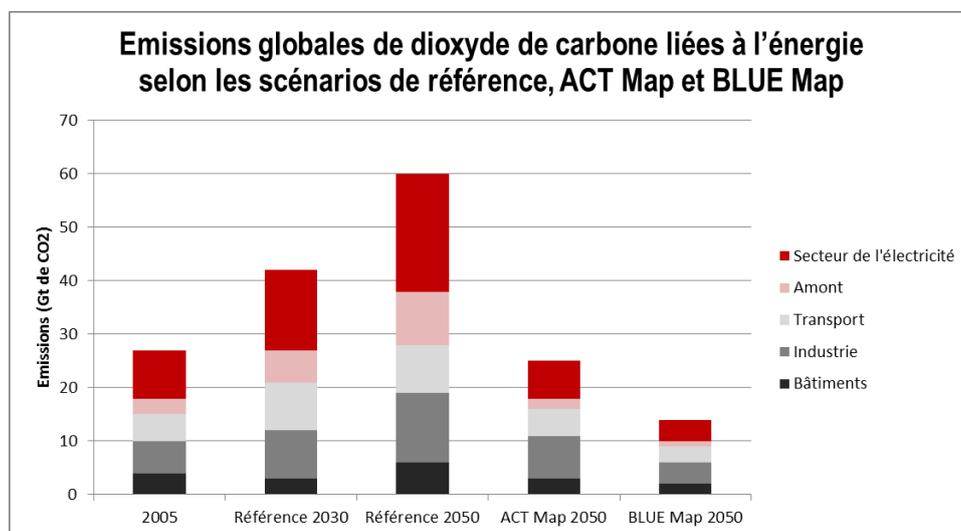


Figure 40 : Emissions globales de dioxyde de carbone liées à l'énergie selon les scénarios de référence, ACT Map et BLUE Map de l'IEA¹⁸.

La principale différence entre le scénario BLUE Map et ACT Map en terme de réduction d'émissions de CO₂ est la croissance dans l'utilisation de CCS¹⁹. Pour comprendre ce que sont ces CCS, il faut se reporter à la section 5.2 page 38. Dans le scénario ACT Map et le scénario BLUE Map, le CCS est utilisé en relation avec le proces-

¹⁸ I.E.A = A.I.E : Agence Internationale de l'Energie ; une institution qui fournit des conseils en matière d'énergie. Elle s'intéresse plus particulièrement à 3 composantes de la politique énergétique, à savoir la sécurité de l'approvisionnement en énergie, le développement économique et la protection de l'environnement. (Houghton, 2009)

¹⁹ Capture Carbon and Storage : la captation et le stockage du CO₂

sus de fabrication du fer, le four à ciment, la production d'ammoniac, avec une grande unité de cogénération. (Comme montré dans la Figure 41 et la Figure 42). Dans le scénario ACT Map, le secteur du ciment représente plus de la moitié du total de CO₂ capturé. Dans le scénario BLUE Map, le ciment, le fer et l'acier se partagent la même proportion et représentent ensemble 75 % du total de CO₂ capturé. (International Energy Agency, 2008)

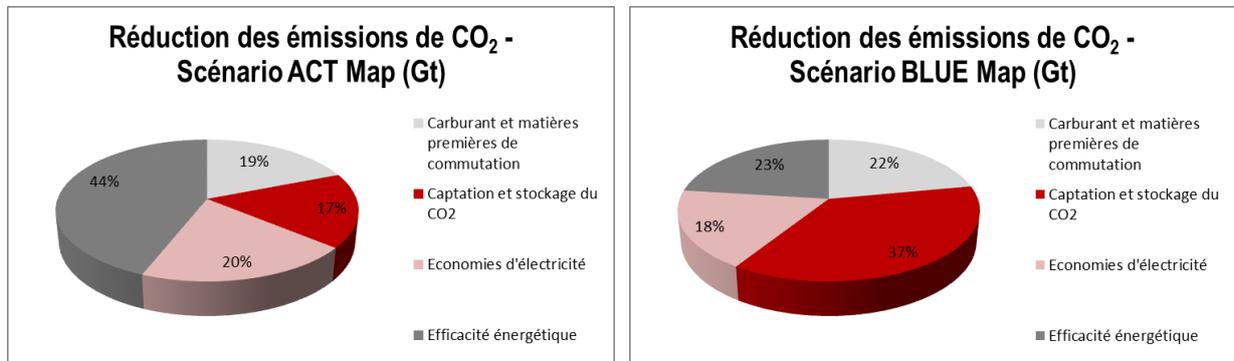


Figure 41 : Réductions des émissions de CO₂ dans le scénario ACP Map et BLUE Map en 2050, par rapport au scénario de référence (International Energy Agency, 2008)

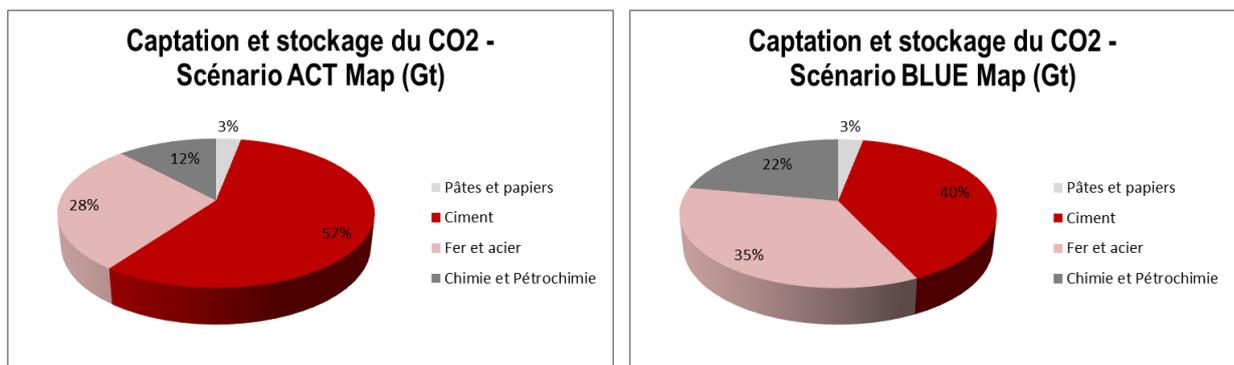


Figure 42 : Répartition des réductions d'émissions de CO₂ par secteur dans le scénario ACT Map et BLUE Map, à l'horizon 2050.

Le **protocole de Kyoto**, établi en 1997, a été signé par 188 pays. L'objectif ultime de l'existence de ce protocole est de limiter la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre. Au sein des 188 pays, 38 pays industrialisés se sont engagés à réduire globalement leurs émissions de CO₂ de 5.2% durant la période d'engagement de 2008 à 2012 par rapport à leurs niveaux d'émissions de CO₂ de 1990. Le protocole est entré en vigueur en Belgique le 16 février 2005 et cette dernière s'est engagée à diminuer ses émissions de GES de 7,5% sous le niveau de 1990, ce qui veut dire une diminution de ses émissions jusqu'à 135 874 millions de tonne équivalent CO₂ par an. L'Union Européenne, quant à elle, s'est engagée à une réduction globale de 8% de ses émissions. Pour parvenir à la réduction globale de ses émissions, chaque pays a la possibilité, en plus des efforts réalisés sur son sol, de mettre en place diverses politiques énergétiques et employer les trois mécanismes dits « de flexibilité » envisagés par le Protocole de Kyoto. (Lecomte, et al., 2010) ; (Gouvernement Fédéral, Gouvernement Flamand, Gouvernement Wallon et Gouvernement Bruxelles, 2006) ; (Wolters, 2010)

Les trois mécanismes sont les suivants : « Le Mécanisme de Mise en Œuvre Conjointe (MOC) permet à un pays de la Convention-Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC) d'acquiescer des crédits d'émission en réalisant des investissements permettant une réduction des émissions de gaz à effet de serre dans un autre, le Mécanisme de Développement Propre (MDP) repose sur le même principe que celui de la MOC mais, dans ce cas, les investissements doivent être réalisés dans un pays en développement et le troisième mécanisme permet l'échange de permis d'émissions entre pays. » (Houghton, 2009)

5.2 Capturer et stocker le CO₂ pour lutter contre l'effet de serre

Capter et stocker le CO₂ pour lutter contre l'effet de serre est une nécessité absolue pour lutter contre le réchauffement climatique. Il existe plusieurs façons de réduire ces émissions et nous pouvons dresser, ci-dessous, la liste de quelques résultats-clés qui pourraient rendre le monde plus durable. (Houghton, 2009) ; (Lecomte, et al., 2010) ; (Grimes, et al., 2009)

1. **Conserver l'énergie et l'efficacité énergétique dans les bâtiments.** On parle d'efficacité thermodynamique, d'efficacité des appareils, d'isolation des bâtiments et également des grands principes du bioclimatisme que sont : capter la chaleur, la stocker, la conserver et la distribuer en hiver ; se protéger des apports de chaleurs, minimiser les apports internes, dissiper la chaleur en excès et refroidir naturellement en été. (Reiter, 2010)
2. **Favoriser les énergies renouvelables.** Par énergies renouvelables, on parle de l'énergie hydraulique, éolienne, solaire, photovoltaïque, la biomasse et les biocarburants. Il existe de nombreux travaux récents qui se sont intéressés aux biocarburants et à leurs productions. Ces biocarburants, dit de « seconde génération », sont, la plupart du temps, des déchets de bois ou d'herbes comme le miscanthus. Le but est qu'ils soient plantés sur des terres marginales où ils n'entrent pas en compétition avec les cultures vivrières. (Houghton, 2009)
3. **Economiser l'énergie et le dioxyde de carbone dans les transports.** Economiser cette énergie dans les transports peut se faire par une réduction des distances parcourues et par le choix de moyens de transports moins énergivores.
4. **Economiser, maîtriser l'énergie et le dioxyde de carbone dans l'industrie,** c'est-à-dire produire de l'électricité décarbonée et renforcer des puits naturels de CO₂. (Houghton, 2009) ; (Lecomte, et al., 2010)

L'industrie cimentière constitue un problème écologique important car ces industries chauffent du calcaire et d'autres matériaux à des températures très élevées, ce qui produit une quantité considérable de CO₂. Pour une tonne de ciment fabriqué, une tonne de dioxyde de carbone est libérée dans les airs. Chaque année, dans le monde, 2.5 milliards de tonnes de béton est fabriqué ce qui représente une quantité de dioxyde de carbone représentant 5% des émissions totales (naturelles et humaines). Certaines entreprises essayent déjà de réduire leur impact environnemental. Elles réduisent notamment le dosage en clinker²⁰ des ciments. Elles tentent également de diminuer leur impact par des petits gestes simples tels que l'arrêt de l'oxydateur thermique, l'éclairage à dessein du site, la présence de minuteur sur circuit de chauffage et sur l'air-conditionné et la coupure des machines au laboratoire qui, auparavant, restaient sous tension et la programmation d'automates. (Baudoin, 2012) ; (Voice Of America News, 2010)

Le secteur du bâtiment et de l'industrie sont de grands émetteurs de GES associées à la consommation d'énergie des combustibles fossiles. Les centrales électriques et de production de chaleur ainsi que les activités de transformation du combustible représentent presque 40% du total des émissions mondiales de CO₂, comme vu dans le Tableau 7 page 35. Ces différents secteurs sont donc de bons candidats pour la capture du CO₂ étant donné l'ampleur des sources d'émission qu'ils génèrent. (International Energy Agency, 2008) ; (Baudoin, 2012) ; (Lecomte, et al., 2010) ; (INERIS, 2010)

A l'avenir, pour satisfaire l'objectif mondial de division par deux à l'horizon 2050 des émissions de CO₂ (Protocole de Kyoto : Chapitre 5.2 en page 38), les différents sites industriels devront recourir aux technologies de captage et stockage du CO₂ dénommés CCS (Capture and Storage Carbon). Il faut donc saisir l'opportunité d'investir

²⁰ Clinker : produit de la cuisson dans le processus de fabrication du ciment, avant réduction en poudre.

dans les différents secteurs afin qu'ils deviennent CCS. L'Union Européenne (U.E) a financé un certain nombre de programmes au cours de ces dernières années ouvrant tous les domaines technologiques de la filière CCS allant du captage, au transport en passant par le stockage du CO₂. Cependant, les différents sites industriels ont besoin d'être redessinés pour accueillir CCS et l'installation de ce dernier est susceptible de prendre des décennies en plus du surcoût qu'il génère. Actuellement, il existe une dizaine de sites de stockage de CO₂ en fonctionnement dans le monde, dont les plus importants sont situés en Norvège (Sleipner et Snovit), au Canada (Weyburn et Zama), aux Pays-Bas (K12b), en Allemagne (Ketzin), en Algérie (In Salah) et aux Etats-Unis (Blue Lake). (International Energy Agency, 2008) ; (Lecomte, et al., 2010) ; (INERIS, 2010)

Le captage et le stockage du CO₂ est un principe, théoriquement, simple : le CO₂, au niveau des installations industrielles de grande taille, est stocké dans le sous-sol. Ainsi, il ne peut plus contribuer au réchauffement climatique. (Lecomte, et al., 2010)

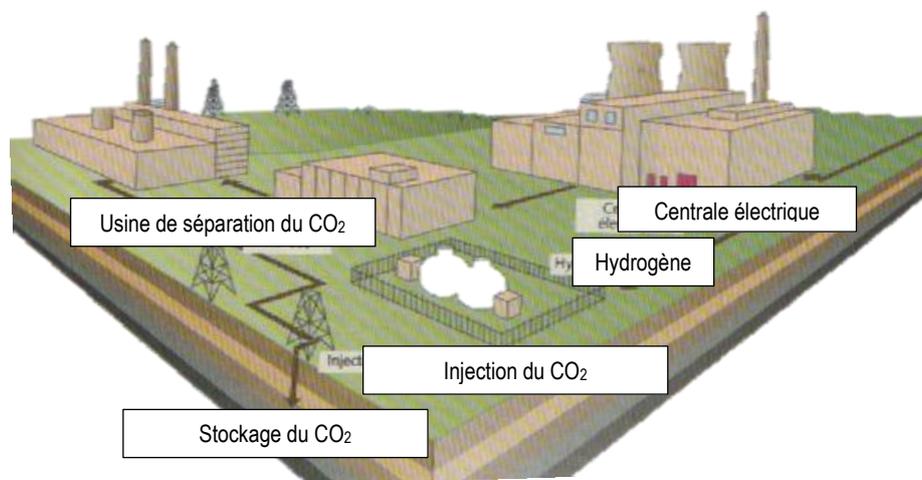


Figure 43 : Schéma d'une infrastructure de captage, de transport et de stockage du dioxyde de carbone (Houghton, 2009)

Il est maintenant établi que la séquestration géologique du dioxyde de carbone (CO₂) et du sulfure d'hydrogène (H₂S) est reconnue comme étant une des voies primordiales à mettre en œuvre et peut se faire efficacement dans le sous-sol, via des puits, dans des réservoirs géologiques profonds. Cette solution est actuellement largement étudiée sur le plan international car elle permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Il faut tout de même faire attention que les puits sont constitués par des tubes d'acier entourés d'une gaine de ciment et que cette dernière peut être dégradée. Elle constituerait alors un chemin de fuite des gaz vers la surface qui aurait des conséquences désastreuses sur l'humain et l'environnement. (Jacquemet, 2006) (Lecomte, et al., 2010) ; (INERIS, 2010) ; (Cailly, et al., 2005)

Les types de formations géologiques dans lesquelles peut être emprisonné le CO₂, sont au nombre de trois. On peut retrouver les aquifères profonds, les gisements de pétrole ou de gaz épuisés ou en phase de déclin et le stockage dans les veines de charbon inexploitées. (Lecomte, et al., 2010)

Le CCS est de préférence applicable à de grandes sources fixes d'émissions de CO₂ pour des raisons essentiellement économiques. La filière CCS peut être décomposée en quatre principaux éléments : le captage, le transport, l'injection et enfin le stockage du CO₂. (INERIS, 2010) ; (Lecomte, et al., 2010) ; (Barlet-Gouédard, et al., 2009)

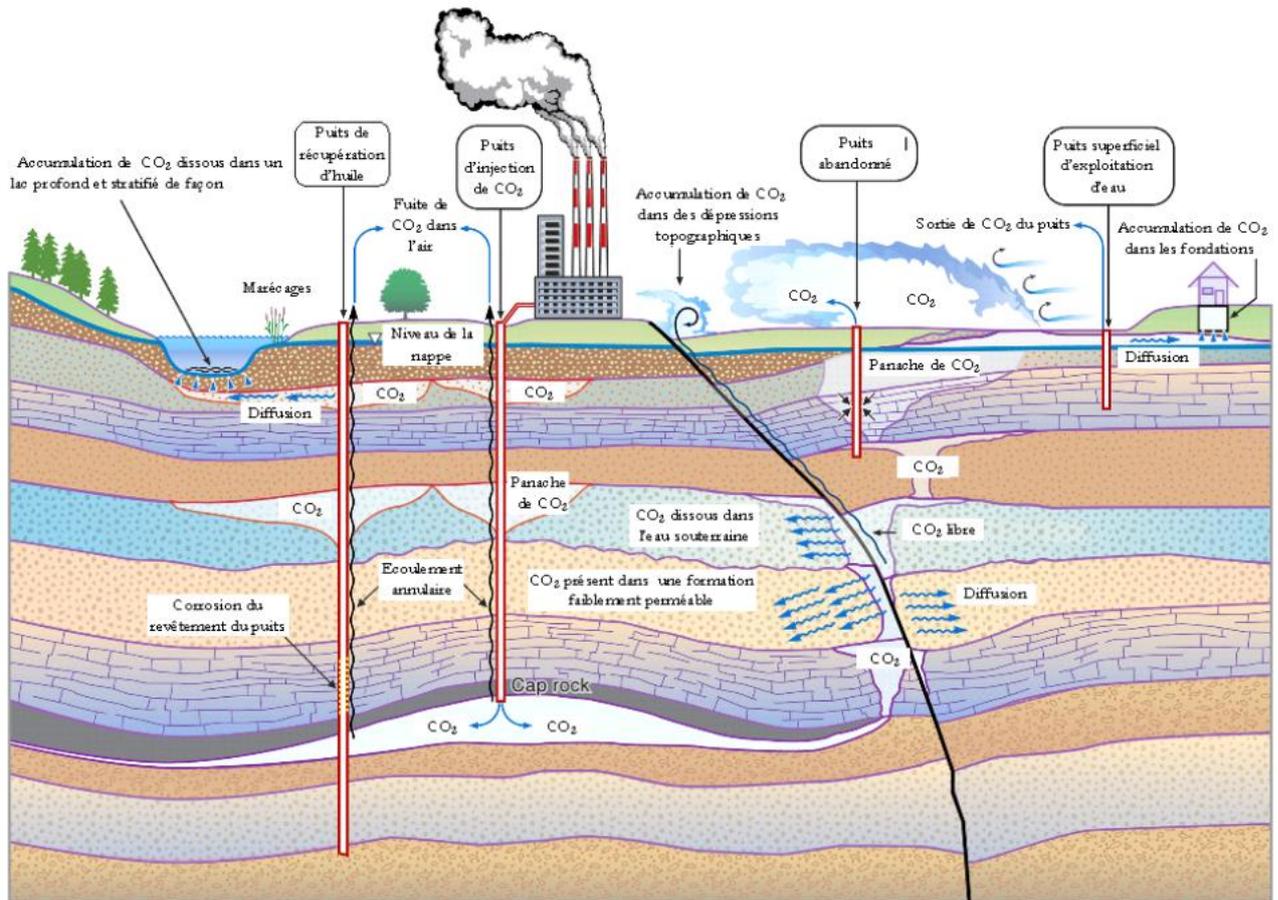


Figure 44 : Représentation des aléas relatifs à la filière CSC (INERIS, 2010)

La première étape de la filière CCS est le **captage du CO₂**. Ce processus de captation se fait depuis les centrales électriques, les centrales thermiques à combustibles fossiles, les cimenteries, les raffineries, etc. Trois grandes méthodes de séparation sont envisagées pour le captage en CCS : le captage en postcombustion, le captage par oxycombustion et le captage précombustion. (Lecomte, et al., 2010) ; (INERIS, 2010)

Les fumées industrielles contiennent du CO₂ qui sera extrait par voie de captage lors de la postcombustion. A condition de disposer de l'espace nécessaire, cette solution présente un avantage résidant dans le fait que des solutions techniques peuvent être intégrées aux installations existantes. En effet, puisque l'air est, en moyenne, composé de 21% d'oxygène, de 79% d'azote et que les fumées d'une combustion à l'air sont principalement constituées d'azote, le CO₂ y est fortement dilué. Ainsi, les volumes de gaz à traiter pour y capter le CO₂ sont importants et nécessitent donc des équipements de tailles conséquentes.

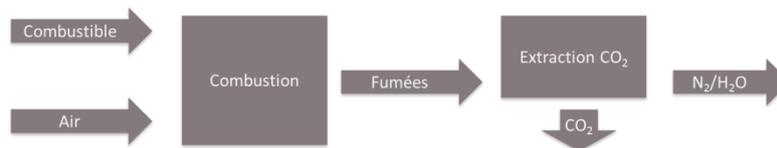


Figure 45 : Captage postcombustion (IFP Energies nouvelles, 2012)

La captation du CO₂ en oxy-combustion palie cet inconvénient puisqu'elle permet d'obtenir une concentration élevée de CO₂ dans les fumées. Cette voie, reposant sur la disponibilité d'un flux d'oxygène pur, entrevoit la création de procédés plus efficaces et moins énergivores que ceux employés en postcombustion.



Figure 46 : Captage par oxycombustion (IFP Energies nouvelles, 2012)

La réalisation de la captation du CO₂ en précombustion requiert un prétraitement du combustible initial (gaz naturel, charbon, pétrole ou biomasse) afin d'extraire le carbone et le capter puis produire de l'hydrogène qui rejettera de la vapeur d'eau lors de la combustion. Cette dernière voie fait l'objet d'études pour la génération d'électricité. (Lecomte, et al., 2010) ; (International Energy Agency, 2008) ; (INERIS, 2010)

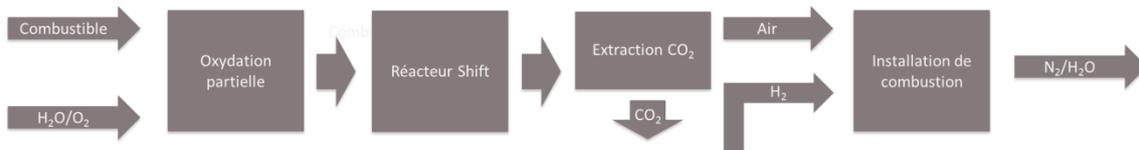


Figure 47 : Captage précombustion (IFP Energies nouvelles, 2012)

La deuxième étape est le **transport du dioxyde de carbone**. Le transport du CO₂ ne pose aucun problème technique et peut s'effectuer par canalisation terrestre, par canalisation sous-marine ou par bateau. Chaque année, près de 50 millions de tonnes de CO₂ est transporté sur les 3000 km de canalisations existant. Lorsqu'il est transporté, pour le moment, le CO₂ est à l'état supercritique, à une pression supérieure à 74 bars. Il pourrait devenir intéressant de transporter le CO₂ à l'état liquide, dans des conditions de température et de pression adéquates, par exemple 10 bar et - 40 °C. Ce CO₂ doit être comprimé puis transporté sur plusieurs dizaines voire centaines de kilomètres car les installations industrielles émettrices de CO₂ ne se trouvent pas forcément près d'un site géologique. (INERIS, 2010) (Lecomte, et al., 2010)

Le **système d'injection**, troisième étape importante, joue un rôle important au cours de toutes les périodes de vie de la filière, contrairement aux systèmes de captage et de transport. Sa principale fonction est d'injecter le CO₂ en période d'exploitation puis, une fois fermé et comblé, il demeure présent à long terme. (INERIS, 2010)

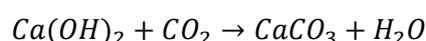
Le dernier maillon de la filière CCS, qui est aussi celui qui est conçu pour durer le plus longtemps, est le **stockage du CO₂**. (INERIS, 2010)

5.3 Le CO₂ et le béton

La carbonatation est une réaction lente entre le dioxyde de carbone gazeux (CO₂) et certains composés du béton pour former des carbonates de calcium (CaCO₃). Les mécanismes prépondérants sont ceux de la carbonatation de la portlandite Ca(OH)₂ et des silicates de calcium hydratés (C-S-H). (Monkman, et al., 2010) (Jerga, J., 2004) (Thiery, M., 2005)

5.3.1 Mécanismes de carbonatation

Tous les bétons sont concernés par la carbonatation qui est un phénomène de vieillissement naturel. Lors de la carbonatation, on assiste à une transformation progressive d'un des composés du béton durci, la portlandite (Ca(OH)₂) en calcite (CaCO₃), au contact du dioxyde de carbone (CO₂) contenu dans l'air et en présence d'humidité.



Le phénomène de carbonatation commence à la surface du béton située en contact avec le CO₂ et se développe sur une certaine épaisseur dite profondeur de carbonatation. Le dioxyde de carbone présent dans l'air avec une

teneur de 0.03% réagit avec les différents hydrates du ciment et principalement avec la portlandite pour donner du carbonate de calcium (CaCO_3). (Debieb, 2007) ; (INERIS, 2010) ; (Monkman, et al., 2010)

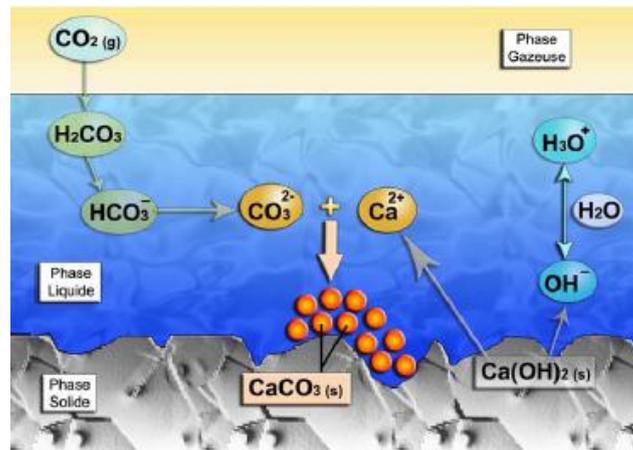
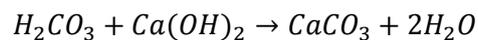
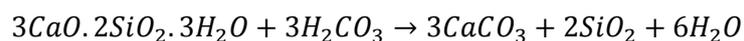


Figure 48 : Mécanisme de carbonatation de Ca(OH)_2 (Thiery, M., 2005)

Lors du phénomène de carbonatation, les principales réactions chimiques observées sont celles des silicates de calcium hydratés (C-S-H), de la portlandite et de l'étringite²¹. (Debieb, 2007) ; (Benge, 2009)



Les C-S-H (silicates de calcium hydratés) proviennent de l'hydratation des deux phases silicatées du clinker : C_3S et C_2S . La carbonatation des C-S-H donne naissance à des carbonates de calcium, à un matériau hydraté (qualifié de gel de silice) et éventuellement à de l'eau libre. (Thiery, M., Septembre 2005, France)

Le dioxyde de carbone pénètre dans les pores de la matrice cimentaire par diffusion puis réagit sur certains composés du béton pour former les carbonates de calcium. (Debieb, 2007, Belgique) (Thiery, M., 2005)

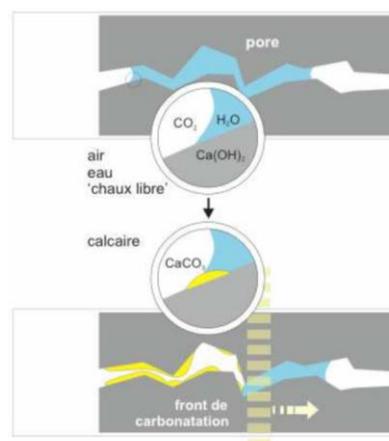


Figure 49 : Pénétration du dioxyde de carbone par diffusion (Febelcem, 2012)

²¹ L'étringite est nocive car elle provoque un gonflement du béton et, à terme, une désagrégation du matériau durci.

La carbonatation est accompagnée de modifications chimiques et physiques. Une des conséquences principales de la carbonatation est l'apparition d'épaufrures laissant apparaître des armatures oxydées. Ces dernières apparaissent car les armatures, dans le cas de béton armé, se corrodent lorsque le front de carbonatation les atteint. La profondeur de carbonatation dépend fortement de la composition chimique du béton. Pourquoi les armatures se corrodent-elles ? Le béton sain a un pH d'environ 13, ce qui constitue un milieu protecteur pour les armatures en acier et permet la formation d'une couche d'oxydes passifs. Le pH d'un béton carbonaté descend jusqu'à 9. A ces valeurs de pH, le film passif est détruit et la corrosion peut se développer. (Debieb, 2007)

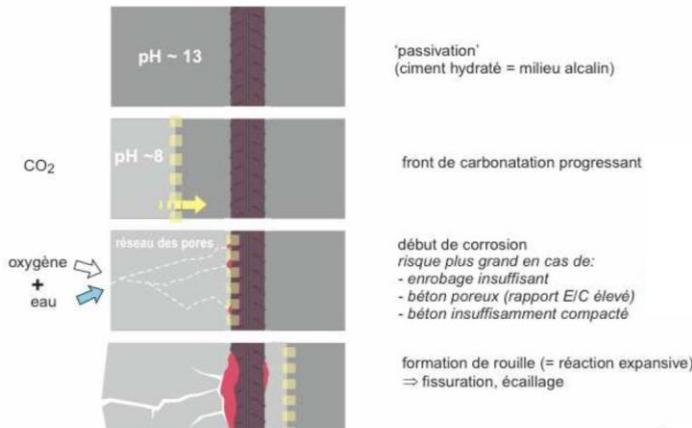


Figure 50 : Front de carbonatation et diminution du pH (Febelcem, 2012)

Figure 51 : Exemple de fissure par carbonatation (Courard, 2011)

La vitesse du front de carbonatation dépend de la porosité du béton. En effet, plus le béton est poreux, plus le CO_2 pénètre dans les pores. La teneur en humidité du béton est également importante et l'humidité relative joue un rôle primordial de sorte qu'une teneur de 50% de CO_2 est favorable aux réactions. (Cf. Figure 52) Le coefficient de diffusion du CO_2 dans l'air est 10000 fois plus élevé que dans l'eau. En d'autres termes, cela signifie que lorsque les pores du béton sont saturés d'eau, la pénétration est extrêmement faible et la carbonatation est pratiquement inexistante. De même si le béton se trouve dans un milieu très sec, la quantité d'eau est insuffisante pour dissoudre le CO_2 et les échantillons desséchés ne se carbonatent que modérément. (Debieb, 2007) ; (Degeimbre, 2001-2002)

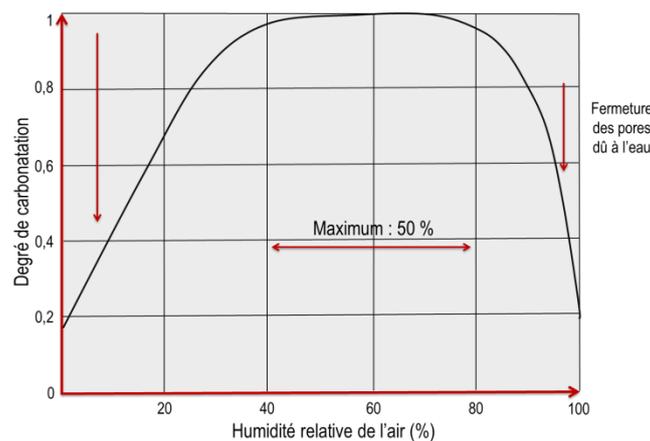


Figure 52 : Carbonatation et humidité relative (Courard, 2011)

La série complète d'étapes se produisant au cours de la carbonatation et donc du durcissement du matériau cimentaire sont résumées comme suit : (Monkman, 2008)

1. Diffusion du CO_2 dans l'air ;
2. Perméation du CO_2 à travers le béton ;
3. Dissolution du CO_2 (g) en CO_2 (aq) ;
4. Hydratation du CO_2 (aq) en H_2CO_3 . Ceci peut être un processus lent, étape déterminante de la vitesse de carbonatation ;
5. Ionisation de H_2CO_3 en H^+ , HCO_3^- et CO_3^{2-} . Ceci provoque l'abaissement du pH ;
6. Cyclique et rapide, la dissolution des phases cimentaires C_3S et C_2S est exothermique et extensive. Les grains de silicate de calcium sont couverts par une couche en vrac de gel CSH qui est rapidement dissous, libérant des ions Ca^{2+} et SiO_4^{4-} ;
7. Nucléation de CaCO_3 et de CSH. La nucléation est favorisée par une augmentation de la température et par la présence de fines particules qui agissent comme noyaux hétérogène ;
8. Les phases solides précipitent ;
9. Carbonatation secondaire. Le gel de CSH se forme à un stade précoce et peut réagir avec le CO_2 . Le gel est progressivement décalcifié conduisant à la formation de CaCO_3 entremêlés avec un gel d'hydrate de silicate.

Le processus de carbonatation décrit ci-avant s'applique aux bétons dits « naturels ». Cependant, dans la littérature, il a été constaté que celui-ci s'applique également aux bétons recyclés. De plus, d'après Hadjieva, il semble que les bétons recyclés ont la capacité de se carbonater plus rapidement. (Hadjieva - Zaharieva, 1998)

5.3.2 Intérêt de la captation de CO_2

Le CO_2 devient un produit disponible et bon marché grâce aux différentes mesures et techniques mises en œuvre afin de le récolter d'où l'intérêt de l'utiliser. Le but de ce travail de fin d'études est d'utiliser ce dioxyde de carbone et donc de développer le concept de carbonatation de blocs de béton, en développant une technologie innovante de minimisation de la consommation d'énergie et de maximisation de la quantité de CO_2 fixé.

La capacité de séquestration du CO_2 peut devenir très importante. En effet, le marché des blocs de construction en béton est énorme car ils sont largement utilisés dans la construction individuelle au niveau des fondations, des murs porteurs ou des cloisons, d'où l'intérêt de capter ce CO_2 dans ces produits de construction, tant économiquement qu'écologiquement.

Le principe de la séquestration du carbone dans les bétons est basé sur les composés calcaires présents dans le ciment. La réaction entre les hydroxydes de calcium et le dioxyde de carbone pour former des carbonates, accélère le développement de la résistance et les performances physico-chimiques des composés à matrice cimentaire car la porosité du béton diminue.

5.4 Bilan environnemental

Un bilan environnemental consiste à analyser l'énergie nécessaire à l'extraction et la transformation des matières premières pour la production des matériaux, au transport des matières premières vers le site de production, à la fabrication, à la distribution et au recyclage des produits.

Lors de l'évaluation de l'impact environnemental d'un bloc de construction, tout ce qui est consommé ou rejeté, surtout en termes de CO_2 , est mesuré. En pratique, c'est la norme AFNOR NF P 01-010 qui permet d'évaluer cet impact environnemental. Cette norme est la seule qui mesure l'ensemble du cycle de vie sur les produits de construction. (Actu-Environnement, 2012)

Un bilan matière et énergie des entrants et sortants doit être réalisé pour chaque étape du cycle de vie. Les entrants sont les énergies et les matières premières (vierges ou secondaires) consommées à chacune des étapes. Les sortants sont les émissions dans l'eau, l'air et le sol et les déchets produits à chacune des étapes du cycle de vie du produit.

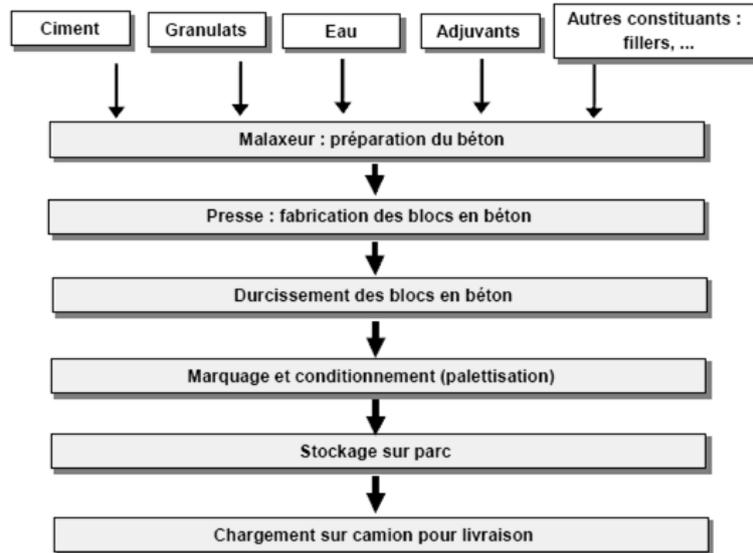


Figure 53 : Etapes à prendre en compte lors de la fabrication d'un bloc de béton

Pour établir ce bilan environnemental, les Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires (FDES) sont utilisées. Ces fiches sont nées à la demande des pouvoirs publics, sous contrôle de l'AFNOR et sont, actuellement, les seuls outils pertinents d'information sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction, permettant une comparaison objective de leurs impacts environnementaux. Il est possible de retrouver ces différentes fiches sur la base de données publiques française de référence : l'INIES.

Les principaux indicateurs environnementaux utilisés par les fiches sont la consommation de ressources, la production de déchets, la pollution de l'air et de l'eau alors que les principaux indicateurs sanitaires utilisés sont les émissions de composés organiques volatiles (C.O.V), la teneur en radon et en radioactivité gamma, l'aspect fongique (micro-organismes) et les émissions de poussières de silice cristalline.

Cet étiquetage obligatoire permettra, à l'avenir, de comparer les écobilans réels des différents matériaux et donc, de faire le bon choix et choisir ainsi les produits les moins impactants pour la planète et pour la santé.

Par ailleurs, cette norme française FDES certifie que chaque usine qui produit un bloc de béton le garantit conforme aux caractéristiques environnementales et sanitaires définies dans sa fiche de déclaration. De plus, l'énorme avantage généré par cette certification est la parfaite cohérence avec la démarche HQE (Haute Qualité Environnementale) des ouvrages du bâtiment. L'utilisateur qui emploiera ses produits aura donc l'assurance que le fabricant maîtrise les impacts environnementaux et sanitaires des produits.

Une étude préliminaire de l'impact environnemental des blocs de construction sera réalisée dans la partie expérimentale de ce travail de fin d'études. (Cf. Chapitre 7.8 page 114)

Introduction



Etat de l'art –
Synthèse Bibliographique



Mise au point du plan de l'étude
expérimentale



Contributions expérimentales



Conclusion & Perspectives



6 Captation du CO₂ dans les bétons : méthodologie expérimentale

6.1 Introduction

Le travail expérimental a pour but de fabriquer des éléments de construction durables, spécifiquement des blocs de construction en béton, obtenus en séquestrant du CO₂ et dont l'impact environnemental est diminué tout en espérant constater d'autres caractéristiques plus intéressantes qu'à l'accoutumé.

Ce chapitre décrit en détail comment la carbonatation des blocs de béton a été simulée et réalisée en pratique. Une explication quant aux variables étudiées au cours de cette expérimentation est également donnée.

Il importe de souligner que les différents blocs réalisés dans cette partie expérimentale sont composés des différents granulats dont les caractéristiques ont été évoquées auparavant. (Cf. Chapitre 3, page 15, et 4, page 23)

6.2 Programme expérimental

Le programme de travail pour la partie expérimentale est résumé ci-dessous. Deux types de granulats seront utilisés dans les blocs de béton que nous allons fabriquer : les granulats recyclés et les fibres végétales de type miscanthus préminéralisées.

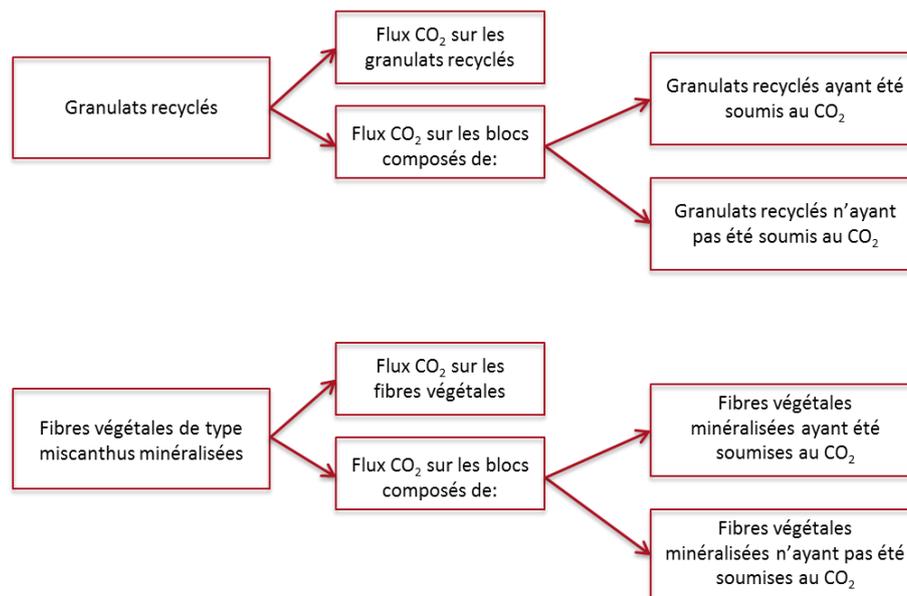


Figure 54 : Résumé expérimental

Les granulats recyclés sont des granulats qui ont été obtenus par concassage d'un ancien béton. Ici, ils sont réintroduits dans des blocs de béton, ceci dans un but environnemental. Deux types de tests sont envisagés.

- Le **granulat recyclé** est soumis au flux CO₂ afin de voir l'impact provoqué sur le granulat.
- Le **bloc de béton** est composé de granulats recyclés (soumis préalablement au flux CO₂ – et donc carbonatés – ou non) et l'ensemble du bloc de béton est soumis au flux CO₂. Le but est donc de voir quels sont les effets de cette cure de carbonatation forcée.

Deux types de tests sont envisagés, sur la fibre végétale de type miscanthus elle-même ainsi que sur le bloc composés de fibres végétales de type miscanthus.

- La **fibre végétale de miscanthus**, après avoir été minéralisée, est soumise au flux CO₂ et nous voulons savoir l'éventuel impact que ce flux CO₂ provoque sur la fibre elle-même.

- Le **bloc de béton** est composé de fibres végétales de miscanthus préminéralisées - soumises au flux CO_2 préalablement ou non - et nous soumettons l'ensemble du bloc de béton à un flux CO_2 . Le but est de prendre connaissance de l'effet qu'une cure de carbonatation forcée, durant la phase de production, provoque sur le bloc de béton composé de fibres végétales de type miscanthus, soumises éventuellement à un flux CO_2 préalable.

Afin de comparer les résultats des investigations avec des résultats réels, des conditions de cure habituelles – en chambre humide – sont prévues, en parallèle des conditions de cure de carbonatation accélérée. De plus, des mélanges à base de granulats naturels seront aussi fabriqués pour tester la méthode expérimentale.

Les blocs de béton seront produits sur base d'un mélange fabriqué en laboratoire dont les modalités pratiques sont décrites ci-après.

6.3 Matériaux utilisés

6.3.1 Constituants des bétons

1) Ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland industriel de type CEM I 52.5 N provenant de la société Holcim, en Belgique. Le constituant principal de ce ciment est le clinker.

Le CEM I est souvent utilisé dans des réalisations en milieu non agressif, pour des bétons de classes de résistance moyenne ou élevée et le bétonnage en période hivernale. (Debieb, 2007). Le choix de ce type de ciment n'est pas anodin. En effet, la capacité des matériaux cimentaires à lier le carbone est fonction de leur composition chimique et s'exprime en gain de masse estimé par la formule de Steinour. Celle-ci permet de quantifier la capacité à lier le carbone. (Monkman, et al., 2010)

Formule de Steinour : (Monkman, et al., 2010)

$$CO_2(\%) = 0.785(CaO - 0.7 SO_3) + 1.091 MgO + 1.420 Na_2O + 0.935 K_2O$$

Composants	Pourcentage (%)	Proportions sur 100 g
Chaux (CaO)	62.9	62.9 g
Silice (SiO ₂)	18.2	18.2 g
Alumine (Al ₂ O ₃)	5.7	5.7 g
Sesquioxyde de fer (Fe ₂ O ₃)	4.1	4.1 g
Magnésie (MgO)	0.9	0.9 g
K ₂ O + Na ₂ O	4.8	4.8 g
Anhydride sulfurique (SO ₃)	3.4	3.4 g

Tableau 8 : Composition chimique du Ciment Portland CEM I 52.5 N (Holcim (Belgique) S. A., 2012)

En appliquant la formule ci-dessus, nous constatons que le ciment étudié a une capacité à lier le carbone de 54.14%. Pour toutes les raisons évoquées, le ciment portland sera choisi comme composé principal des blocs de construction.

D'autres paramètres peuvent influencer la capacité de fixation de la matrice cimentaire : (Thiery, et al., 2011)

- La composition des bétons
- L'humidité relative et la température
- La concentration en CO_2

Ces différents paramètres seront évoqués dans la suite de ce travail.

Le même ciment a été utilisé pour la fabrication de l'ensemble des bétons et tous les sacs utilisés proviennent de la même livraison, de façon à limiter les variations de composition au niveau de la fabrication.

2) Granulats

Granulats de miscanthus

Les caractéristiques et explications concernant les granulats de miscanthus ont été évoquées dans le chapitre 4 page 23.

Les granulats utilisés proviennent de Belgique. Il s'agit de granulats produits par l'a.s.b.l Pro-Misc tenue par Renaud Fabri. Il s'agit de granulats sortis brut en ensileuse et conservés dans un local de stockage pendant une année à Bomal (Jodoigne).

Granulats recyclés

Les différentes caractéristiques des granulats recyclés ont déjà été explicitées préalablement (Cf. Chapitre 3 page 15).

Les granulats recyclés proviennent de dalles de béton. Elles ont été fabriquées au Laboratoire des Matériaux de Construction à Liège, en 2007, par Farid Debieb (Debieb, 2007), à partir d'un béton de référence composé de granulats naturels. Elles ont été ensuite stockées et vieilles, pendant une année, dans de l'eau de mer, dans une solution de chlorures ou dans une solution de sulfates. Elles ont été, ensuite, concassées et criblées pour récupérer des granulats recyclés contaminés. D'autres dalles de béton ont été stockées dans un milieu non contaminé afin d'obtenir des granulats vierges. Nous utilisons les granulats recyclés vierges, dans un premier temps, afin de confectionner des blocs de béton à base de granulats carbonatés. Nous utiliserons également les granulats recyclés vieillis dans les chlorures pour les essais sur les blocs de béton à base de granulats non carbonatés. Qu'ils aient été vieillis ou non, les granulats possèdent les mêmes propriétés mécaniques.

Les granulats recyclés proviennent d'un béton de référence – ayant un affaissement au cône d'Abrams d'environ 60 à 70 mm ainsi qu'une résistance en compression de 25 à 35 MPa – dont la composition granulaire a été développée par la méthode de Dreux-Gorisse pour les calibres donnés au tableau ci-après. Ces calibres sont utilisés au Laboratoire des Matériaux de Construction de l'Université de Liège dans le cadre de travaux de recherches et de travaux d'étudiants. (Debieb, 2007)

Matériaux	Proportions volumiques absolues du mélange granulaire inerte	Quantité (Kg/m ³)
Ciment	-	300
Sable roulé (SR) 0/4	0.40	786
Granulat roulé (GR) 4/14	0.43	840
Granulat roulé (GR) 14/20	0.17	329
Eau	-	194
E/C (Eau/ciment)	-	0.65

Tableau 9 : Composition du béton de référence (Debieb, 2007)

La procédure de malaxage du béton de référence est résumée ci-après et prend environ 6 minutes.

Temps	T0-5'	T0-3'	T0-2'	T0-1'	T0	T0+1'	T0+2'	T0+3'	T0+5'	T0+6'
Ajouts	GR + SR		ciment		½ Eau		½ Eau			
Malaxage	Malaxage	Repos								

Tableau 10 : Procédure de malaxage du béton de référence (Debieb, 2007)

Une granulométrie a été établie sur les granulats recyclés. Comme ces derniers ont été fabriqués au Laboratoire des Matériaux de Construction, aucun fournisseur n'aurait pu fournir cette donnée.

La granulométrie a été établie sur base de la règle du quartage. Il s'agit de prendre une partie de l'échantillon représentant l'ensemble. On place l'entièreté des grains sur une bêche. Le tout est mélangé soigneusement pour répartir de manière uniforme les différentes tailles de particule suivant la méthode spécifiée dans la norme EN 932-2 (1999) (CSTC, 2012). Une fois l'échantillon soigneusement aplatit, nous obtenons une galette d'épaisseur uniforme. Cette dernière est divisée en 4 parties égales. On en prend la moitié (les 2/4 opposés) et on recommence l'étape autant de fois qu'il faut pour avoir la masse nécessaire (600g) à passer dans les tamis. On choisit ensuite les tamis caractéristiques (0, 2, 4, 8, 16 mm) et on passe la masse de l'échantillon dans la tamiseuse pendant 5 minutes à 30 vibrations. La préparation de l'échantillon est ainsi conforme à la norme. Les granulats passent à travers les tamis composés d'un treillis métallique à mailles carrées dont on pèse le refus, pour chaque tamis. Les résultats moyens obtenus sur l'ensemble des quatre échantillons de 600 g testés sont repris au Tableau 11 et permettent la connaissance du pourcentage de passants qu'on ne possédait pas auparavant

Tamis (mm)	% de passants
0	0
2	2
4	3.3
8	39.7
16	100

Tableau 11 : Pourcentage de passants dans les tamis

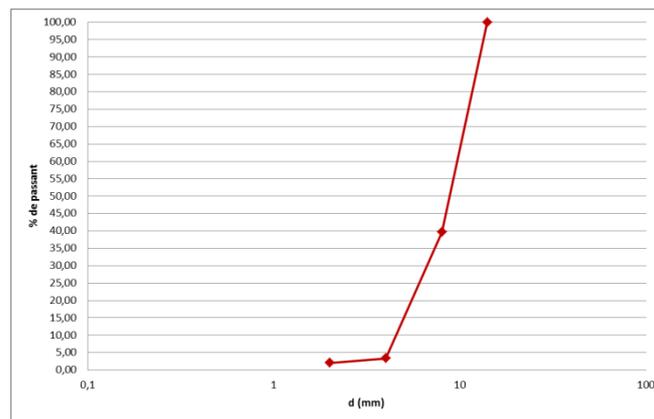


Figure 55 : Courbe granulométrique des granulats recyclés

Granulats naturels

Les granulats naturels utilisés sont les granulats de type G22 du Laboratoire des Matériaux de Construction, également utilisés pour les travaux d'étudiants. La granulométrie est donnée ci-dessous.

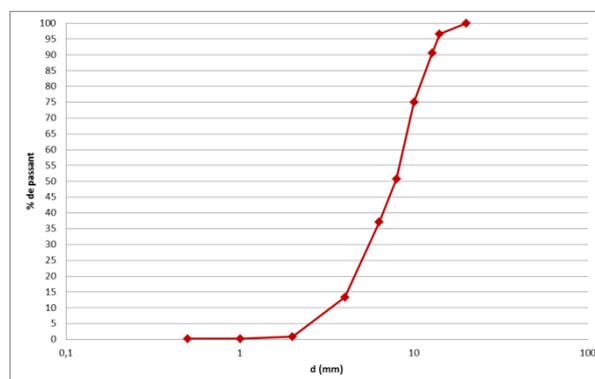


Figure 56 : Courbe granulométrique des granulats naturels

Ces deux courbes granulométriques nous indiquent qu'on peut, sur base d'une composition de base, utiliser les granulats naturels ou les granulats recyclés dans les mêmes proportions puisque leurs courbes granulométriques sont très semblables.

3) Eaux

L'eau utilisée pour la réalisation des blocs de béton est l'eau potable de distribution.

Il a déjà été mentionné, par C. Nachtergal (Nachtergal, 1988), que l'eau doit être aussi pure que possible. Elle doit être exempte de quantités excessives de vase, matières organiques, acides, alcalis, sels, matières sucrées et autres matières nuisibles. Les eaux sucrières, acides, celles contenant plus de 5 à 6% de sel marin ou de 3% de sel de magnésium ou de gypse, celles trop riches en acide carbonique et celles renfermant des matières inorganiques sont à proscrire. C'est, bien évidemment, le cas en Belgique.

Bétons à base de granulats recyclés et naturels

L'eau utilisée dans ce type de mélange est introduite en une fois, conformément à ce qui a été établi par P. Delhez. (Delhez, et al., 2009)

Bétons à base de fibres végétales

L'eau introduite dans les bétons à base de fibres végétales est divisée en deux parties : l'eau de mouillage et l'eau de gâchage. La première humidifie les copeaux de manière à neutraliser leur pouvoir absorbant tandis que la seconde sert à l'hydratation du ciment.

Il s'agit de la même eau que celle utilisée pour les mélanges à base de fibres végétales.

4) Sable

Le sable utilisé le type S08 du Laboratoire des Matériaux de Construction, également utilisé pour les travaux d'étudiants, dont la granulométrie est donnée ci-dessous.

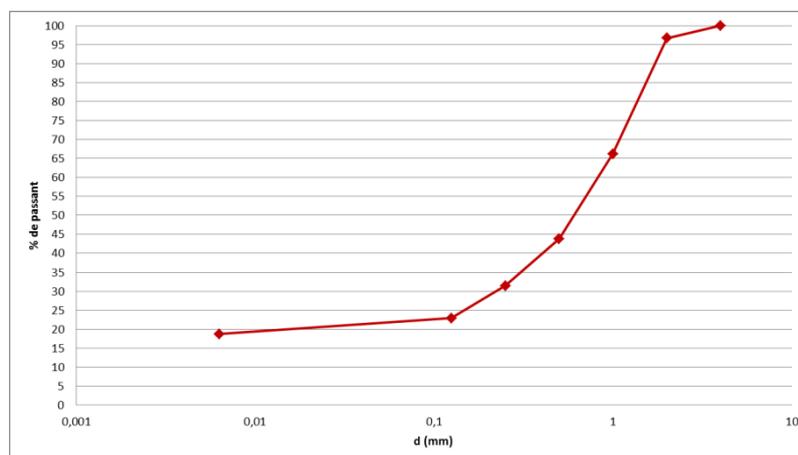


Figure 57 : Courbe granulométrie du sable

Cette courbe granulométrique complète bien la courbe granulométrie des deux types de granulats vus ci-avant.

6.3.2 Constituants de la minéralisation

Les différents composants nécessaires à la minéralisation sont fournis par la société Prefer S.A. Il s'agit de la fumée de silice fournie sous forme de poudre, de superplastifiant et de CaCl₂ fournis sous formes liquides.

Le lecteur est invité à contacter la société Prefer s.a afin de connaître les caractéristiques des différents matériaux. Les quantités nécessaires à la minéralisation sont mentionnées dans le chapitre 6.5.2 page 57.

6.4 Equipements

6.4.1 Moules

Les moules utilisés sont des moules métalliques démontables pourvu de quatre cloisons qui permettent d'y mettre trois blocs de 16x16x16 cm³. Cette configuration permet un démoulage aisé.



Photo 1 : Moule métallique



Photo 2 : Vis démontables du moule métallique



Photo 3 : Parois démontables du moule métallique

6.4.2 Accessoires

Poids

Un poids est utilisé pour simuler le double effet compaction et vibration existant en industrie. (Cf. 2.4.1 page 6) Celui-ci fait 8 kilos et il s'agit d'un bloc de béton classique déjà confectionné qui sera placé dans le moule de la façon suivante. Ce bloc est emballé d'un plastique dure afin d'éviter une perte d'eau par absorption capillaire. Notons que les poids ont 6 faces exploitables et que, par gâchée, une seule face sera exploitée afin de ne pas remplacer le plastique en permanence.



Photo 4 : Bloc emballé



Photo 5 : Masse d'un bloc



Photo 6 : Utilité du bloc pour la vibration

Il est utile de constater qu'une rehausse aurait pu être bénéfique sur les moules, comme c'est le cas en industrie, afin d'avoir un bloc totalement cubique. Les aléas et les difficultés techniques de l'expérimentation ne nous permettent pas de créer cette rehausse. Sans cette dernière, les blocs auront toujours une hauteur avoisinant 14 cm plutôt que 16 cm dû à la compaction du béton au cours de la vibration. Ceci ne constitue pas un problème en soi car les expériences seront toujours réalisées de la même façon de sorte que tous les blocs auront un déficit de taille.

Feuille Mylar

Une feuille de type Mylar (Polytéréphtalate d'éthylène) est utilisée pour pouvoir démouler plus facilement après vibration. En effet, grâce à cette feuille, il est plus aisé de tirer le bloc hors du moule. On incorpore donc cette feuille Mylar, avant de couler le béton, de la façon suivante.



Photo 7 : Placement du Mylar entre les parois



Photo 8 : Dépassement du Mylar pour pouvoir saisir le bloc

Plateaux et rideaux

L'utilisation simultanée des plateaux appartenant à l'incubateur et de voiles permet de placer les différents granulats sur les plateaux. Cette astuce rend possible la carbonatation des granulats recyclés et des granulats de miscanthus afin que la diffusion du CO₂ s'effectue par tous les côtés. De plus, l'utilisation de ces voiles a été validée pour que les granulats ne puissent pas passer à travers les trous existant dans les grilles de l'incubateur.



Photo 9 : Mise en place des voiles sur la plaque



Photo 10 : Mise en place des granulats sur les plaques



Photo 11 : Granulats posés sur la plaque



Photo 12 : Granulats recyclés dans l'incubateur



Photo 13 : Granulats de miscanthus dans l'incubateur



Photo 14 : Mise en place des granulats sur les plaques

Huile

Une huile de décoffrage spéciale est utilisée. Cette huile est placée dans le moule avant d'y placer le béton et est adaptée aux moules métalliques. Grâce à son utilisation, le démoulage est beaucoup plus aisé.



Figure 58 : Huile de décoffrage

Seaux

Les différents seaux du Laboratoire des Matériaux de Construction sont utilisés afin de préparer les différents mélanges. Ces seaux ont une capacité de 20 litres.



Photo 15 : Préparation des composants

6.4.3 Malaxeur

Le malaxeur utilisé est à axe rotatif de type Hobart de capacité 100 litres.



Photo 16 : Malaxeur



Photo 17 : Contenant du malaxeur



Photo 18 : Pales rotatives

6.4.4 Table de vibration

La table de vibration est utilisée simultanément avec le poids (Cf. page 52) afin de simuler le double effet compaction et vibration. Le principe de fonctionnement est illustré ci-dessous.

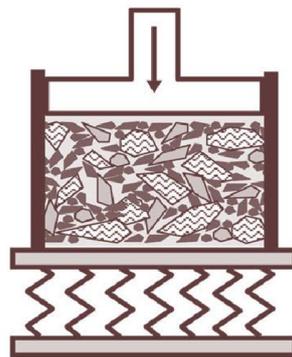


Figure 59 : Principe de vibration et Poids (Delhez, et al., 2009)



Photo 19 : Table de vibration



Photo 20 : Table de vibration et moules



Photo 21 : Vibration et compaction

6.4.5 Technique d'injection de CO₂ : l'incubateur

L'objectif poursuivi par la mise en place de cette technique d'injection de CO₂ est la mise au point d'un système de carbonatation forcée. Une chambre climatisée appelée incubateur, régulée en humidité et en température, sera utilisée. Cet incubateur permet également d'injecter du CO₂ automatiquement. Les trois paramètres suivants peuvent être pris en compte par ce dernier : la température, l'humidité relative et le pourcentage de CO₂ injecté.

La température est régulée à l'aide d'un bain thermostaté, l'humidité relative est assurée grâce à une solution saline de type $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$.

D'après M. Thiery (Thiery, M., 2005), les essais de carbonatation accélérée suggèrent qu'il est assez peu judicieux d'effectuer des essais avec une teneur en CO_2 faible (inférieure à 5%), car à ce niveau la vitesse de carbonatation est très sensible à de petites évolutions de la teneur en CO_2 . Pour la raison qu'il évoque, le taux de CO_2 retenu dans cette étude est de 50%. Les études faites par Monkman et Shao (Monkman, et al., 2010) suggèrent la même teneur en CO_2 en insistant sur le fait que, dans l'air, la concentration de CO_2 est comprise entre 0.03% et 0.05%. Cette deuxième étude suggère l'utilisation d'un incubateur dont l'humidité relative est d'environ 60%, cette dernière étant celle à laquelle on travaille la plupart du temps.

Il s'avère que les incubateurs du Laboratoire des Matériaux de Construction ont des teneurs en CO_2 limitées à 20% ; les différentes cures de carbonatation s'effectueront donc à cette teneur. Notons tout de même que c'est du CO_2 commercial, en bombonne, qui sera utilisé pour l'expérimentation.

Le principe de fonctionnement de l'incubateur est schématisé ci-dessous.

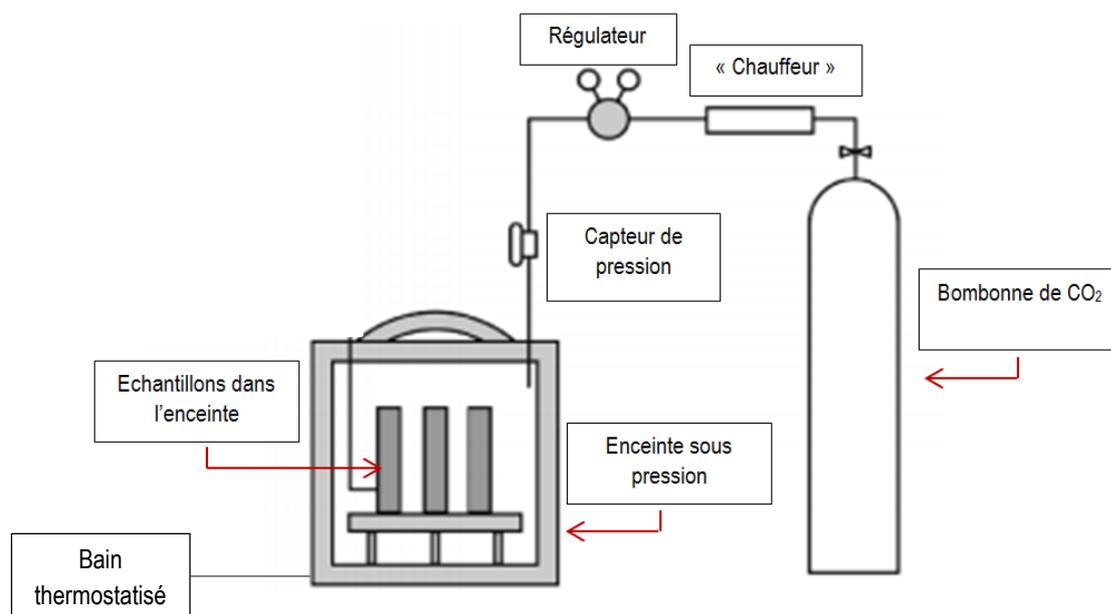


Figure 60 : Schéma de l'incubateur (Delhez, et al., 2009)

Le principe de fonctionnement de l'incubateur est le suivant : le récipient à pression dont le volume est de 0.04 m³ et la pression disponible de 5 MPa servent de source de CO_2 . Le mélange de dioxyde de carbone avec de l'air est effectué dans un autre récipient accumulateur de pression en acier avec un volume de 0.3 m³ et une pression allant jusqu'à 1 MPa. Le mélange de gaz est transporté par des tuyaux à travers le plafond des chambres hermétiques et le gaz se répand à travers des trous dans le plafond et le plancher. Cette opération est activée par un système de vannes. La surpression constante dans la plage comprise entre 150 et 200 Pa est maintenue dans la chambre hermétique au gaz par l'équipement de régulation automatique. Les ventilateurs sont placés à l'intérieur de la cuve et dans les chambres, pour garantir une concentration constante de dioxyde de carbone, qui est plus lourd que l'air. La concentration de CO_2 est enregistrée par les tubes de détection avec une précision de 0.5%. (Jerga, J., 2004)



Photo 22 : Incubateur fermé

6.4.6 La chambre humide

La chambre humide est une pièce à part entière où l'humidité relative est maintenue à $(95 \pm 2 \%)$, la température est de $21 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. C'est là que les blocs de béton seront exposés quand ils ne sont pas placés en incubateur.

6.5 Composition des échantillons

6.5.1 Bétons de granulats recyclés et naturels

La composition utilisée pour les différents mélanges a été donnée par la société Prefer s.a située à Flémalle qui est une société spécialisée dans le domaine de fabrication des blocs de construction. Cette composition est identique pour les blocs de béton à base de granulats naturels ou à base de granulats recyclés.

Les quantités pour un bloc sont calculées sur base de la connaissance du volume d'un moule (0.004096 m^3).

Composants	Quantités (%)	Quantités (Kg/m^3)	Quantités en laboratoire pour un bloc (Kg)	Quantités en laboratoire pour six blocs (Kg)
Eau	5.2	105.0	0.43	2.58
Ciment CEM I 52.5 N	6.6	132.6	0.54	3.24
Sable de porphyre 0/2	88.2	814.8	3.34	20.04
Granulats recyclés (2/14)		966.4	3.96	23.75

Tableau 12 : Composition de blocs de béton à base de granulats recyclés et naturels

6.5.2 Bétons de miscanthus

Composition de la minéralisation

La minéralisation est nécessaire, comme déjà explicité dans le chapitre 4.3.2 page 29. Raphaël Grimont (Grimont, 2008) fournit la composition suivante qui sera utilisée pour la minéralisation des fibres végétales de type miscanthus.

Composants	Quantités (en labo)	Quantités (en%)
Miscanthus	10 l (1000g)	31.12
Eau	900 g	28.01
Ciment Portland (CEM I 52.5 N)	1050 g	32.68
Superplastifiant	3 g	0.093
Fumée de Silice	250 g	7.78
CaCl_2	10 g	0.31

Tableau 13 : Composition de la minéralisation

Composition du bloc de béton

Après diverses expérimentations, William Rosolen (Rosolen, 2010) indique déjà que les rapports $C/M^{22} = 0.6$ et $E/C^{23} = 1.4$ sont les plus adaptés en terme de proportions pour les mélanges de béton à base de fibres végétales de type miscanthus. Ces rapports favorisent la cohésion du matériau, l'enrobage des particules et évitent un accrochage de la pâte trop important. C'est pour cette raison que les proportions utilisées par W. Rosolen sont reprises dans ce travail.

Composants	Quantités (%)	Quantités proposées par W. Rosolen (g)	Quantités en laboratoire pour six blocs (Kg)
Miscanthus minéralisés	40.54	150	8.00
Eau (mouillage et gâchage)	35.14	130	6.92
Ciment (CEM I 52.5 N)	24.32	90	4.82

Tableau 14 : Composition du bloc de béton à base de fibres végétales de type miscanthus

6.6 Confection et cure des échantillons

6.6.1 Confection des échantillons

Les échantillons sont fabriqués dans les moules métalliques et au nombre de 6, dans un premier temps.

1) Echantillons de bétons de granulats recyclés et naturels

La procédure de mélange de l'échantillon est décrite ci-après et s'inspire de la procédure de malaxage réalisée par Pascal Delhez. (Delhez, et al., 2009) Cette procédure sera toujours la même afin d'assurer la reproductibilité des résultats.

1. Introduction des agrégats et du sable dans le malaxeur et malaxage pendant 120 secondes ;
2. Attendre 60 secondes ;
3. Ajouter le ciment et malaxer pendant 2 minutes;
4. Ajouter l'eau et malaxer pendant 2 minutes ;
5. Prêt pour la vibration.

Les étapes de vibration sous pression sont les suivantes :

1. Placer le moule sur la table vibrante (50 Hz) ;
2. Placer, dans le moule métallique cubique, la moitié du béton frais;
3. Placer un poids (± 8 Kilos) dans le moule, sur le béton frais ;
4. Mettre la table vibrante en marche pendant une durée de 30 secondes ;
5. Retirer le poids ;
6. Placer l'autre moitié du béton frais dans le moule métallique ;
7. Placer le poids de 8 kilos dans le moule, sur le béton frais ;
8. Mettre la table vibrante en marche pendant 30 secondes ;

²² C/M : Ciment/Miscanthus

²³ E/C : Eau/Ciment



Photo 23 : Moule métallique avec béton

9. Démoulage des blocs ;
10. Mise en place des blocs dans les différentes cures.

2) Echantillons de bétons de miscanthus

Confection de la minéralisation des fibres végétales de type miscanthus

Il existe plusieurs procédés de minéralisation établis par Raphaël Grimont (Grimont, 2008). Le procédé qui a été retenu se base sur une minéralisation de granulats enrobé de ciment et de fumée de silice.

La composition retenue est la suivante :

1. Dans un malaxeur sont introduits 80 litres de copeaux de miscanthus auxquels est ajoutée la fumée de silice ;
2. Après 30 secondes de brassage, la moitié de l'eau est versée, eau dans laquelle le CaCl_2 a été préalablement dissous ;
3. Le brassage dure encore 30 secondes, puis sont ajoutés le ciment et le reste de l'eau, dans laquelle le superplastifiant a été dilué ;
4. Après 2 minutes de malaxage, les copeaux sont étalés sur une hauteur de 5 cm pour le séchage ;
5. Obtention des copeaux minéralisés ayant une couleur plus foncée.

Une fois les copeaux minéralisés, certains sont placés en environnement ambiant (20°C, 60% H.R), les autres sont étalés sur les grilles de l'incubateur, grâce à la technique des rideaux (Cf. 6.4.2) et donc placés dans un environnement similaire à l'environnement ambiant (20°C, 60% H.R) sauf qu'il y a une injection de CO_2 supplémentaire. Une attente de 48 heures est nécessaire avant de les introduire dans le béton.

Confection des blocs de béton de miscanthus

La composition des blocs de béton à base de fibres végétales de type miscanthus est celle utilisée par William Rosolen. (Rosolen, 2010).

La confection est la suivante :

1. Introduction des copeaux de miscanthus minéralisés dans un malaxeur horizontal 48 heures après minéralisation ;
2. Ajout de l'eau de mouillage et malaxage pendant 60 secondes ;
3. Ajout du ciment et malaxage pendant 60 secondes ;
4. Ajout de l'eau de gâchage et malaxage durant 60 secondes ;
5. Prêt.

Les étapes de vibration sous pression sont les mêmes que celles des échantillons à base de granulats recyclés et naturels.

6.6.2 Cure des échantillons

Les échantillons sont confectionnés en nombre pair. Lorsqu'ils sont démoulés, la moitié est soumise à une cure en incubateur et l'autre moitié à une cure en chambre humide. Il s'agit de la même gâchée afin de pouvoir comparer les résultats. Lors de la préparation de six blocs de béton dans deux triplets de moules, deux blocs du premier triplet de moules sont déposés en incubateur, le troisième en chambre humide et vice-versa pour le second triplet de moules afin de prévenir des inégalités entre les blocs générés par les deux moules.

Cure en incubateur

Les échantillons restent, dans un premier temps, une journée complète dans l'incubateur (± 7 heures) à ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) et 60% H.R, puis subissent un essai de compression (Cf. page 64). Par la suite, d'autres blocs seront réalisés et ils effectueront une cure de carbonatation pouvant aller jusqu'à 48 heures dans l'incubateur, dans des conditions identiques aux premiers échantillons réalisés. Cette durée a été choisie puisque, dans la réalité, la moitié des autres blocs restent à maturation pendant une durée de 48 heures en chambre humide ; cela permettra une comparaison des résultats avec la réalité.

Le principe de fonctionnement de l'incubateur a déjà été décrit en 6.4.5 page 57.

Cure en chambre humide

La chambre humide est dans des conditions de température de ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) et d'humidité relative supérieure à 90%. Il s'agit des conditions de fabrication industrielle traditionnelle de cure de blocs de béton.



Photo 24 : Blocs de béton dans la chambre humide

6.6.3 Démarche de travail

La démarche de travail est la suivante, sur base des investigations prévues dans le chapitre 6.2 page 47.

1. Préparation des quatre types de granulats, à savoir les granulats recyclés (carbonatés ou non) et les fibres végétales de type miscanthus (carbonatées ou non). En effet, ceux-ci seront utilisés pour la confection des futurs blocs de béton d'où la nécessité de les préparer antérieurement. En même temps, nous testerons leur résistance à l'usure. (Cf. 6.7.1 en page 61). Voici la description d'une journée type :
 - 7h30 : confection de la minéralisation ayant trait aux fibres végétales de type miscanthus. Les granulats recyclés sont directement mis à l'incubateur sans passer par l'étape de préminéralisation ;
 - 8h30 : placement des granulats à l'incubateur, grâce au système de rideaux ;
 - 9h00 : nettoyage du laboratoire de préparation des bétons ;
 - 9h30 : première pesée des granulats ;
 - 11h30 : deuxième pesée ;
 - 15h30 : troisième et dernière pesée (procédure réalisée en 7 heures) puis essais de résistance à l'abrasion.

2. Préparation des quatre types de blocs de béton à partir des quatre types de granulats, durant une journée type, se déroulant de la façon suivante :
- 7h30 : confection des échantillons et démoulage ;
 - 8h30 : placement des échantillons à l'incubateur ;
 - 9h00 : nettoyage du laboratoire de préparations des bétons ;
 - 9h30 : première pesée des échantillons préparés ;
 - 11h30 : deuxième pesée ;
 - 11h45 : préparation des différents composants pour la journée du lendemain, excepté le ciment qui pourrait réagir avec les composants de l'air ;
 - 15h30 : troisième et dernière pesée (procédure de 7 heures) et essais de résistance en compression ainsi que récupération d'une ou plusieurs portions de l'échantillon ;
 - 16h30 : mise à l'étuve des portions d'échantillons. Celles-ci seront ensuite récupérées pour être acheminées vers le département de chimie appliquée qui réalisera l'analyse en thermogravimétrie. (Cf. Chapitre 6.7.3 page 64)
 - Mesure des variables étudiées.

En fonction des résultats obtenus pour les variables étudiées, nous adaptons le choix du paramètre à modifier (Exemple : modification de la teneur en CO₂). Il s'en suit alors la même démarche que celle décrite ci-avant.

6.7 Variables étudiées

Les échantillons fabriqués, ainsi que les différents granulats utilisés, subiront différents essais explicités ci-dessous.

D'une part, les effets positifs engendrés par la carbonatation accélérée sur les granulats seront évalués à l'aide de l'essai Micro-Deval.

D'autre part, l'efficacité du processus de carbonatation accélérée sur les blocs de béton sera évaluée au travers de la quantification d'absorption de CO₂ et de la résistance, par comparaison avec un bloc de béton subissant une cure traditionnelle, en chambre humide.

6.7.1 Essai Micro-Deval

Granulats recyclés

Les granulats recyclés seront caractérisés par l'essai Micro-Deval dont les caractéristiques sont décrites ci-dessous conformément à la norme NF P 18-572 (2003). (CSTC, 2012)

Cet essai s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés dans le domaine du bâtiment ou des travaux publics et permet de mesurer la résistance à l'usure des roches.

Définition de l'essai

L'essai consiste à mesurer l'usure produite dans un cylindre en rotation dans des conditions bien définies, par frottements entre les granulats et une charge abrasive.

La granularité du matériau à l'essai est choisie parmi les trois classes granulaires 4 – 6.3 mm, 6.3 – 10 mm et 10 – 14 mm de la granularité du matériau tel qu'il sera mis en œuvre et la masse de la charge abrasive varie suivant la classe granulaire définie ci-avant.

Appareillage

Il comporte un cylindre d'essai, ayant un diamètre inférieur de (200 ± 1) mm et une longueur de (154 ± 1) mm. Le cylindre d'essai est en acier inox de (3 ± 0.2) mm d'épaisseur. Il est posé sur deux arbres horizontaux métal-

liques protégés par un recouvrement anti-usure. Le cylindre est entraîné en rotation par l'intermédiaire des deux arbres horizontaux.

La charge abrasive est constituée par des billes sphériques de (10 ± 5) mm de diamètre en acier inox et un moteur (environ 1 kW) assure aux cylindres une vitesse de rotation régulière de (100 ± 5) tr/min. Après deux heures d'essai ou 12 000 rotations, le moteur est arrêté.



Photo 25 : Billes d'acier – Charge abrasive

Préparation de l'échantillon pour l'essai.

L'essai doit être effectué sur un lot de granulats ayant une granularité conforme à l'une des trois classes granulaires types et représente une masse de (500 ± 2) g.

Pour effectuer l'essai :

- Laver l'échantillon et le sécher à l'étuve à $(105 \pm 2^\circ\text{C})$ jusqu'à obtention de la masse constante.
- Tamiser à sec sur les tamis de la classe granulaire choisie.

Exécution de l'essai

1. Dans le cylindre d'essai, introduction de la charge abrasive puis les 500 g de matériau préparé suivant les dispositions citées ci-avant. La charge est fixée conformément aux indications du tableau ci-après ;

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)
4 – 6.3	2000 ± 5
6.3 – 10	4000 ± 5
10 – 14	5000 ± 5

Tableau 15 : Charge abrasive fonction de la classe granulaire type



Photo 26 : Mise en place de la charge abrasive



Photo 27 : Mise en place des granulats



Photo 28 : Fermeture du cylindre



Photo 29 : Mise en place du cylindre sur les deux arbres horizontaux



Photo 30 : Reste de l'essai

2. Mettre les cylindres en rotation à une vitesse de (100 ± 5) tr/min pendant 2 heures ou 12 000 tours ;
3. Après essai, recueillir les granulats et la charge abrasive en prenant soin d'éviter les pertes de granulats ;
4. Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6 mm ; la charge abrasive sera retenue sur un tamis de 8 mm ;
5. Laver l'ensemble sous un jet d'eau et retirer la charge abrasive ;
6. Sécher le refus à 1.6 mm à l'étuve à $(105 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C})$ jusqu'à masse constante ;
7. Peser ce refus au gramme près, soit m le résultat de la pesée.



Photo 31 : Tamis à 1.6 mm



Photo 32 : Enlèvement de la charge abrasive

Expression des résultats

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à l'usure s'exprime par la quantité suivante, sans dimension, à 0.1 unités près, appelée coefficient Micro-Deval :

$$100 \frac{m}{M}$$

Les gravillons les plus résistants ont, en toute généralité, un coefficient Micro-Deval de 5-10, la limite inférieure se situe à 40-45. Plus la valeur du coefficient Micro-Deval est petite, plus l'essai est résistant à l'usure.

Fibres végétales de type miscanthus

L'essai d'usure Micro – Deval est particulier pour les fibres végétales car l'application brutale de la procédure décrite ci-avant détruit littéralement les fibres minéralisées. Pour remédier à cela, l'essai est adapté depuis la procédure adoptée par Raphaël Grimont que nous décrivons ci-dessous. (Grimont, 2008)

La démarche suivante est donc adoptée sur plusieurs échantillons minéralisés :

1. Prélèvement de 250 g de fibres végétales de type miscanthus ;
2. Mise en place dans le cylindre avec 50 billes d'acier inoxydable ;
3. Application d'une rotation au tambour pendant 10 minutes à la vitesse de 100 tours/min ;
4. Retrait des particules pour passage au-dessus d'un tamis de 1.6 mm ;
5. Pesage du refus à ce tamis.

6.7.2 Résistance à la compression

L'essai s'effectue sur deux types de machine. La première machine utilisée est une machine de compression de type Instron, d'une capacité de 200 kN, avec une mise en charge électromécanique dont la vitesse de traverse a été fixée à 0.05 N/mm²/s, conformément à la norme EN 772-1 (2000). La résistance en compression est déduite de la formule suivante :

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Où F est la charge maximale atteinte (en N) ;

A_c est la surface soumise à la charge (en mm²) qui correspond à la surface brute des éléments pleins.

La deuxième machine est une presse hydraulique à pilotage manuel type Mohr et Federhaff, d'une capacité de 5000 kN et avec mise en charge électromécanique à vitesse variable. Cette machine sera utilisée pour les éprouvettes âgées de plus de 7 heures, étant donné que les valeurs de la résistance seront certainement plus grandes. Les dimensions des plateaux de la presse sont de 16 X 30 cm. L'enregistrement de la force appliquée permet de déduire la résistance à la compression des éprouvettes depuis la formule ci-dessus.



Photo 33 : Instron



Photo 34 : Bloc avant compression



Photo 35 : Bloc après compression

6.7.3 Quantification de l'absorption de CO₂

Quantification de l'absorption de CO₂ par variation de la masse de l'échantillon

On peut quantifier l'absorption de CO₂ par la variation de la masse de l'échantillon suivant la formule ci-dessous : (Monkman, et al., 2010)

$$\text{Gain en masse (\%)} = \frac{\text{masse}_{\text{finale}} + \text{masse}_{\text{eau perdue}} - \text{masse}_{\text{initiale}}}{\text{masse}_{\text{liant sec}}} = \frac{\Delta_{\text{masse CO}_2}}{\text{masse}_{\text{liant sec}}}$$

La masse d'eau est prise en compte car le test s'effectue en système fermé et qu'un dispositif (Cf. ci-après) est mis en place pour capter l'eau perdue par les blocs de béton.

Nous supposons que les granulats sont inertes vis-à-vis de la captation de CO₂.

La masse de l'échantillon sera mesurée après 1 heure, 3 heures, 7 heures pour les premiers tests afin de ne pas ouvrir l'incubateur trop souvent. La mesure sera effectuée après 16 heures, 24 heures, 32 heures, 48 heures pour les tests suivants. A cet effet, une balance devra être utilisée pour peser les échantillons afin de se rendre compte de la prise de masse. En plus de cette mesure de masse, nous enregistrons l'humidité et la température.

Lors de l'introduction des blocs de béton dans l'incubateur, ces derniers vont rejeter l'eau dont ils sont pourvus afin de rentrer dans leur phase de séchage. Cette eau rejetée, il faut la quantifier en vertu de la formule énoncée ci-avant. Cependant, aucun dispositif inclus dans l'incubateur ne permet de quantifier cette évaporation d'eau et nous devons nous assurer que la variation de masse est due à l'absorption de CO₂ par les blocs de béton et non à la perte d'humidité de ceux-ci.

L'idée est donc la suivante : placer du gel de silice – dont la propriété principale est de capter l'eau dans un environnement humide – dans l'incubateur. Certes, ce gel de silice va pouvoir capter l'eau des blocs de béton mais nous devons également nous rendre compte, préalablement à l'introduction de ces blocs de béton, de l'effet qu'à ce gel de silice sur la solution saline présente dans l'incubateur, ainsi que des effets sur l'humidité relative et la température.

Ce gel de silice sera donc laissé un jour à l'incubateur, sans blocs de béton, dans les conditions futures de cure de carbonatation accélérée – à savoir 60% d'humidité relative et 20% de CO₂ injecté - afin de se rendre compte de l'effet provoqué par la présence de ce gel de silice sans échantillons.

Le gel de silice est prélevé à l'étuve²⁴ afin d'être sûr qu'il est complètement sec qu'il n'aura donc aucune influence sur les résultats.

Au départ, on a pris deux échantillons de 200 g de gel de silice. L'un d'eux est placé sur le haut de l'incubateur, l'autre sur le bas de l'incubateur afin de voir ce qu'il se passe dans l'ensemble du caisson.

Nous pèserons donc les échantillons de gel de silice après 1 heure, 3 heures, 7 heures conformément à ce qui a été établi pour les pesées relatives aux futurs blocs de béton.

1ère expérience

Heure	T° (°C)	H.R (%)	Gel de silice (Haut) (g)	Gel de silice (Bas) (g)	Solution saline (g)
Départ	21.4	43.1	200.00	200.00	2243.23
1 heure	21.4	30.8	200.19	201.26	2242.02
3 heures	21.7	34.9	200.99	202.03	2240.13
7 heures	21.8	36	202.19	203.22	2237.80
Total	/	/	5.41		- 5.43

Tableau 16 : Influence du gel de silice sur l'ensemble de l'incubateur – Expérience 1

²⁴ Appareil grâce auquel on peut sécher un échantillon

Nous constatons que la différence de masse entre la quantité d'eau perdue par la solution saline et celle captée par le gel de silice est égale à 0.02 g.

Conclusion : l'influence de l'ouverture de la porte est faible. Il sera donc aisé de connaître la masse d'eau perdue par les blocs de béton dans ce système fermé.



Photo 36 : Gel de silice placé à l'incubateur

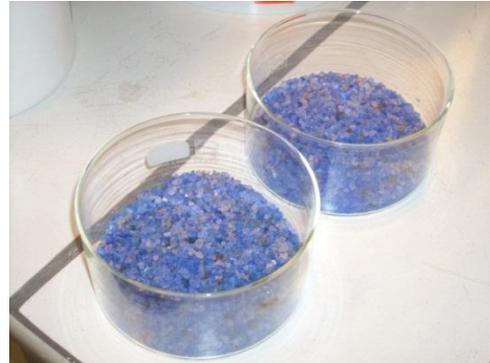


Photo 37 : Gel de silice après 7 heures de cure

Les résultats obtenus ci-avant nous montrent également une diminution sensible de l'humidité relative alors que la température ne varie presque pas.

L'opération a été recommencée une seconde fois, avec une nouvelle solution saline de même composition que la précédente, afin de vérifier les résultats obtenus lors de la première expérience.

2ème expérience

Heure	T° (°C)	H.R (%)	Gel de silice (Haut) (g)	Gel de silice (Bas) (g)	Solution saline (g)
Départ	21.4	45.7	200.01	200.01	2253.22
1 heure	21.2	30.8	201.47	201.30	2252.08
3 heures	21.3	34.9	202.06	202.00	2249.97
7 heures	21.4	34.1	203.50	203.13	2246.58
Total	/	/	6.61		- 6.64

Tableau 17 : Influence du gel de silice sur l'ensemble de l'incubateur – Expérience 2

Nous constatons que les résultats obtenus par la deuxième expérience sont tout à fait semblables à la première expérience, ce qui assure l'exactitude des affirmations énoncées ci-avant. **Le système est donc en équilibre.**

Quantification de l'absorption de CO₂ par analyse thermogravimétrique

Description de la thermogravimétrie

L'analyse thermogravimétrique effectuée (TG-DSC) est le résultat de l'application simultanée de la Thermogravimétrie (TG) et de la Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC) dont la principale qualité est d'apporter plus d'informations que l'application séparée des deux machines. L'analyse thermogravimétrique est un essai primordial permettant de quantifier la carbonatation. (Thiery, M., 2005)

Les conditions de test sont identiques pour les signaux TG et DSC. (Même atmosphère, débit de gaz, pression de vapeur sur l'échantillon, vitesse de chauffe, contact thermique entre le creuset échantillon et le capteur, etc.)



Photo 38 : TG-DSC-MS 111



Photo 39 : TG-DSC-MS 111 : Zoom

Le prélèvement de l'échantillon se fait de manière classique c'est-à-dire qu'il faut saisir une partie de la poudre obtenue grâce à un broyage explicite ci-après et la placer dans un creuset d'au plus $150 \mu\text{l}$ en plastique. La masse de l'échantillon est évaluée grâce à une balance très précise.



Figure 61 : Creusets dans lequel est déposé l'échantillon de base



Photo 40 : Creuset dans cristalliseur



Photo 41 : Mise en place de la poudre broyée dans le creuset



Photo 42 : Balance

Comment cela fonctionne-t-il ? La présence d'une microbalance symétrique compare l'échantillon de base – déposé dans le creuset – avec un échantillon de référence dont le creuset est vide. Les deux échantillons sont suspendus verticalement, sur des faisceaux de longueur identique. Ensuite, les deux échantillons sont chauffés à l'intérieur du même bloc calorimétrique (four symétrique) et sont comparables l'un par rapport à l'autre, le premier pourvu de poudre, le second vide. L'échantillon analysé ainsi que celui de référence sont entourés de 120 thermocouples (composant l'ensemble du senseur 3D) montés dans un cylindre qui entoure totalement la zone de mesure. (NETZSCH, 2012)

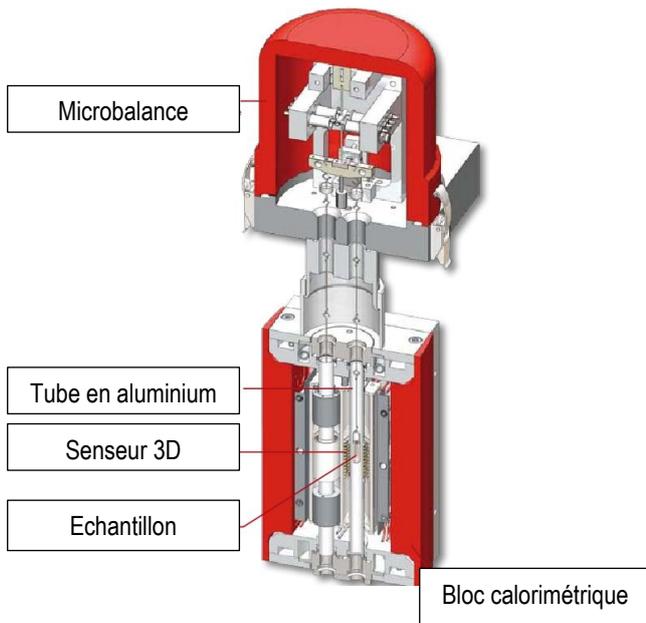


Figure 62 : Coupe dans la TGDSC-MS



Photo 43 : Creuset de référence et creuset pourvu de poudre

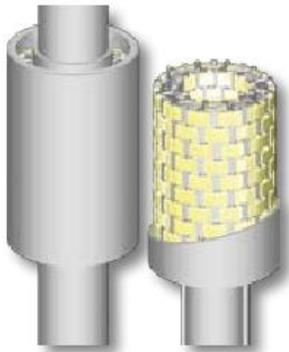


Figure 63 : Senseur 3D pourvu de 120 thermocouples

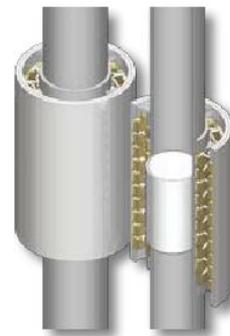


Figure 64 : Coupe dans un senseur 3D entourant le creuset

Dans ce cylindre, des capteurs sont montés dans un bloc calorimétrique pourvu d'eau refroidie servant à éliminer les variations environnementales. En pratique, la machine utilisée spécifiquement au laboratoire est la TGD SC MS 111.

L'analyse thermogravimétrique consiste à **enregistrer en continu les variations de masse d'un échantillon soumis à une loi de chauffe dans une ambiance gazeuse donnée**. Ils permettent de mesurer des variations réelles de l'ordre du microgramme. Dans ce cas-ci, l'échantillon est chauffé sous une atmosphère inerte – sous Hélium – jusqu'à une température de 710°C à du 2°C/minute puis cette température est maintenue pendant 5 heures. (Thiery, M., 2005)

Quels sont les éléments qu'on peut constater par une analyse thermogravimétrique ?

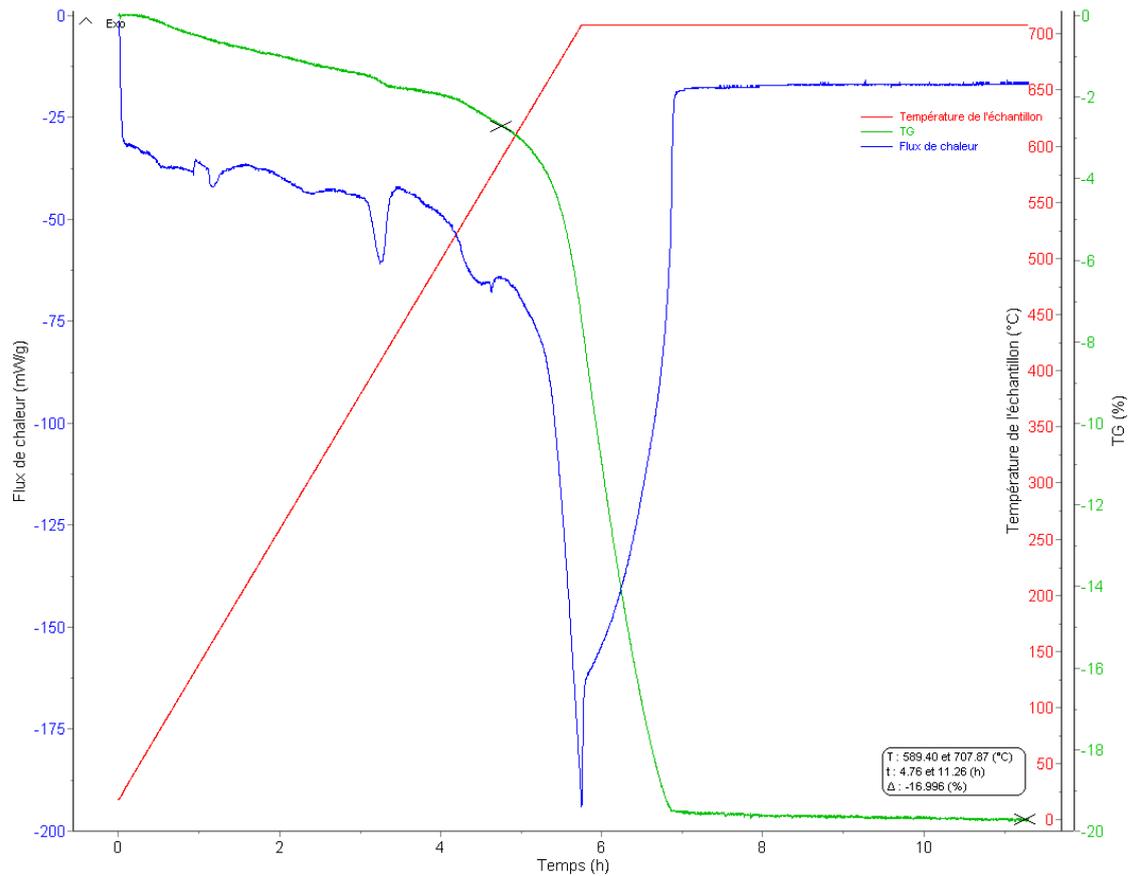


Figure 65 : Quantification d'absorption de CO₂ par thermogravimétrie

La courbe rouge de la Figure 65 représente l'augmentation de la température. Cette courbe est utile car elle permet de se rendre compte des éventuelles modifications qu'il se produit au sein de l'échantillon, même après arrêt de l'augmentation de température. La courbe bleue représente le flux de chaleur. Celui-ci représente les effets endothermiques et exothermiques de l'échantillon. Par convention, les effets endothermiques seront toujours représentés par une courbe concave alors que les effets exothermiques seront représentés par une courbe convexe. La courbe verte, quant à elle, représente l'ensemble des pertes de masses qu'il se produit au sein de l'échantillon analysé.

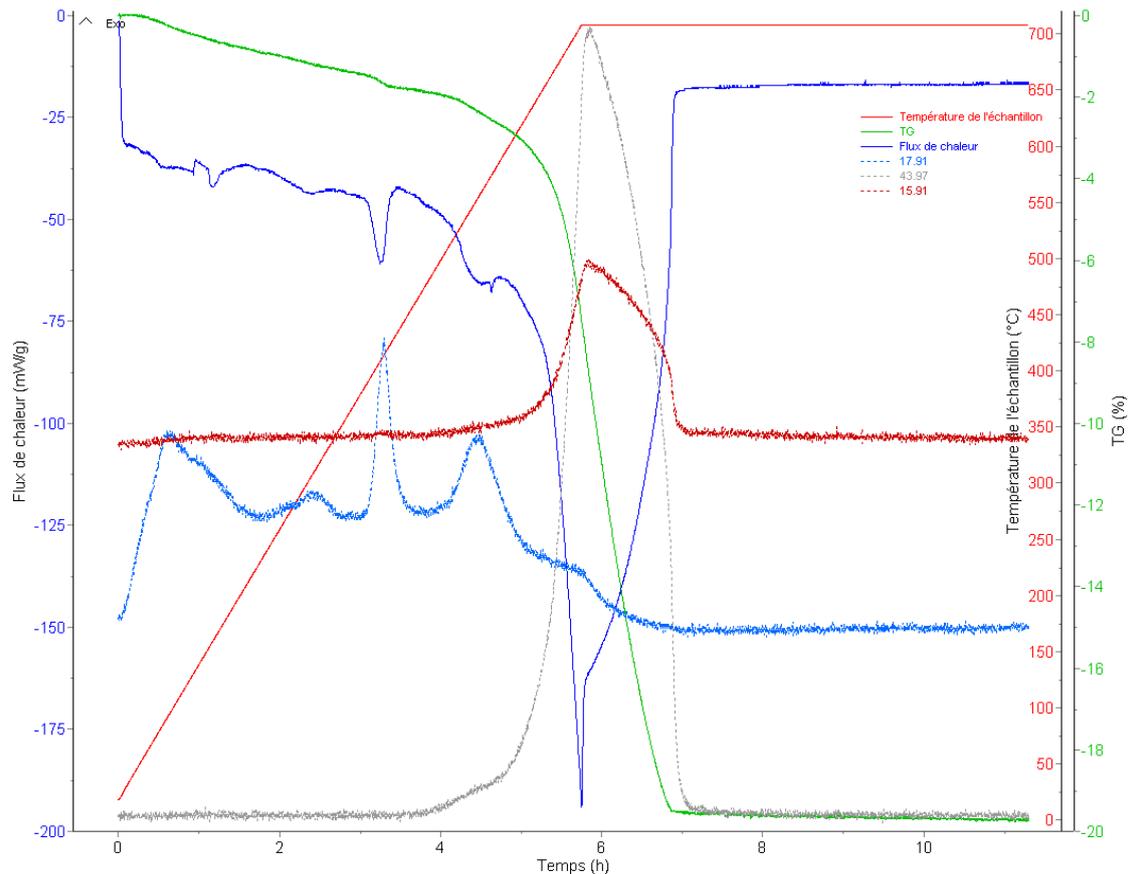


Figure 66 : TGDC - MS

La Figure 66 est une analyse plus précise de la Figure 65. Il s'agit de l'analyse par thermogravimétrie qui est couplée avec une analyse MS - Spectrométrie de Masse – dont l'objectif essentiel est la mesure de la masse et la caractérisation de la structure chimique des molécules. Cette analyse a la particularité d'offrir une quantification très précise.

Le graphique de la Figure 66 est donc le même que celui de la Figure 65 mais, en plus, il y a présence des différentes masses présentes au sein de l'échantillon.

La masse 17.91 représentée en bleu clair est la masse de l'eau. Les deux autres masses (43.97 et 15.91) représentées en gris et bordeaux sont les masses correspondant au CO_2 .

Que constate-t-on sur la Figure 66 ?

Tout d'abord, le signal thermique est quelque peu perturbé au tout début de l'échantillon. Il s'agit d'une défaillance due à la machine et il ne faut pas la considérer. On voit d'ailleurs une vaguelette en forme de S, il s'agit d'un artefact²⁵.

Globalement, pendant un peu plus de deux heures, jusqu'à 250°C, il y a présence de pertes de masses en général (Courbe verte), correspondant surtout à des pertes d'eau (masse 17.91). Vers 3 heures et 400°C, on observe un phénomène endothermique (Courbe bleue foncée). C'est grâce aux masses des différents composés pré-

²⁵ Artefact : phénomène d'origine artificielle ou accidentelle, rencontré au cours d'une observation ou d'une expérience (Larousse, 2005)

sents sur le graphique que l'on peut se rendre compte qu'il s'agit d'une grande perte d'eau (masse 17.91). Tout au long de ce processus, les pertes d'eau vont se cumuler.

Un peu avant 6 heures, vers 710°C, on observe une énorme perte de masse (courbe verte) couplée d'un phénomène endothermique (courbe bleue foncée) très marqué. On observe également une variation de la masse du CO₂, autant sous la masse 43.97 que sous la masse 15.91. De plus, une légère variation de la masse d'eau est présente. Cette variation de masse est la conséquence de la décarbonatation du CaCO₃ du mélange analysé :



Ce que nous pouvons également remarquer et qui renforce ce phénomène de décarbonatation, c'est que, même lorsqu'on ne chauffe plus, à partir de 710 °C, la perte de masse est constante. La décarbonatation débute vers 710°C et se poursuit durant la période isotherme jusqu'à être complète.

A partir de résultats de ce type-là, nous pouvons estimer le gain en CO₂ dû à la décarbonatation puisque nous savons la masse de départ (représentée sur l'axe des abscisses à droite par 0) ainsi que la perte de masse en%. Sur l'exemple ci-dessous, l'analyse thermogravimétrique nous fournit le gain de masse dû à la carbonatation qui est de 16.99%.

Une fois soumis aux tests de résistance en compression, nous prélevons des échantillons des blocs de béton. Ces échantillons sont placés à l'étuve et séchés jusqu'à masse constante puis placés en dessiccateur afin d'être refroidis. Ils sont ensuite broyés et, enfin, envoyés au laboratoire de Chimie Appliquée pour l'analyse en Thermogravimétrie.

Les opérations d'échantillonnage et de broyage sont décrites ci-après.

Prélèvement de l'échantillon

Comme nous l'avons vu ci-avant, la thermogravimétrie analyse un échantillon très petit, de l'ordre de quelques milligrammes. De ce fait, l'échantillonnage n'est pas simple puisque les blocs sont énormes comparés à l'échantillon analysé. Pour remédier à cette difficulté, nous prélèverons toujours le centre du bloc restant après l'essai de résistance en compression afin d'avoir une comparaison des plus justes possibles entre les différents échantillons analysés. Par la suite, un prélèvement plus soigné sera effectué. En effet, trois parties du bloc de béton seront choisies et envoyées pour l'analyse en thermogravimétrie de la façon suivante.



Photo 44 : Prélèvement du centre du bloc

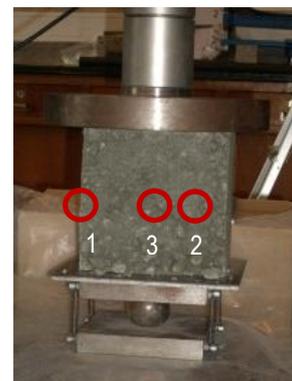


Photo 45 : Prélèvement de trois parties du bloc

La partie 1 correspond à l'extrémité du bloc, partie ayant fixé le plus de CO₂, théoriquement. La partie 3 correspond au centre du bloc, équivalente au prélèvement préalable du centre du cône tandis que la partie 2 est une partie intermédiaire.



Photo 46 : Dessiccateur

Broyage de l'échantillon

Deux types de broyeurs sont nécessaires pour obtenir la fine poudre analysée par la thermogravimétrie.

- Le broyeur à disques permet de pré-broyer l'échantillon séché avant de prendre place dans le broyeur à mâchoires. L'échantillon est déposé dans la partie supérieure du broyeur et ressort, en partie inférieure, dans un tiroir, plus fin.

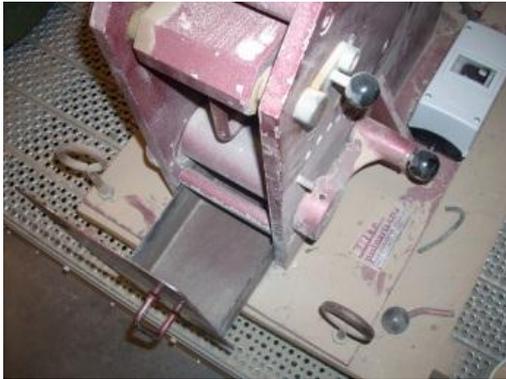


Photo 47 : Broyeur à disques



Photo 48 : Broyeur à disques

- Le broyeur à mâchoires permet de réduire en poudre l'échantillon pré-broyé par le broyeur à disques. Il suffit de placer l'échantillon affiné dans un récipient fermé puis de mettre en marche le broyeur à mâchoires pendant une durée de 30 secondes. Il en ressort une poudre très fine, analysée en thermogravimétrie.



Photo 49 : Récipient



Photo 50 : Fermeture du récipient



Photo 51 : Broyeur à mâchoires ouvert



Photo 52 : Broyeur à mâchoires fermé



Photo 53 : Poudre restante

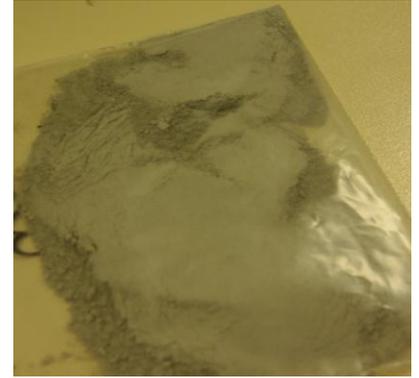


Photo 54 : Poudre restante

Introduction



Etat de l'art –
Synthèse Bibliographique



Mise au point du plan de l'étude expérimentale



Contributions expérimentales



Conclusion & Perspectives



7 Résultats et observations

Les différents résultats obtenus sur base de la méthodologie explicitée au chapitre 6 page 47 sont retranscrits dans cette section. Il importe de toujours garder un avis critique sur l'ensemble des résultats obtenus car les différents matériaux utilisés ont tous des caractéristiques bien particulières qui impliquent que les comparaisons faites dans la suite de ce travail sont reproductibles avec la réutilisation de ces mêmes matériaux.

7.1 Effet de la carbonatation sur les propriétés des granulats

Les différents types de granulats utilisés dans les expériences sont caractérisés par l'essai Micro-Deval. Comme il a déjà été mentionné dans le chapitre 6.7.1 page 61, les gravillons les plus résistants ont, en toute généralité, un coefficient Micro-Deval de 5-10, la limite inférieure se situe à 40-45. Plus la valeur du coefficient Micro-Deval est petite, plus le matériau est résistant à l'usure. Cette caractérisation a été faite sur les granulats recyclés soumis ou non à l'injection de CO₂ ainsi que sur les fibres végétales de type miscanthus soumises ou non à l'injection de CO₂. L'essai est effectué sur les échantillons et une moyenne des résultats est effectuée.

7.1.1 Granulats recyclés non carbonatés

Essai Micro-Deval

Le calibre choisi lors de cet essai est le calibre 6.3-10 correspondant à une charge abrasive de (4000 ± 5) g.

Essais	Granulats (g)	Charge abrasive (g)	Refus à 1.6 mm (g)	Micro-Deval (-)
1	500.22	4001.00	475.41	4.96
2	501.14	4001.00	476.78	4.86
3	499.87	4001.00	474.28	5.12
Moyenne				4.98

Tableau 18 : Coefficient Micro-Deval des granulats recyclés non carbonatés

Les granulats recyclés non carbonatés utilisés lors des expériences sont des granulats ayant une bonne résistance à l'usure puisque, en généralité, le coefficient est de 5-10 pour des gravillons résistants. Au vu de ce résultat satisfaisant, nous pouvons espérer une suite concluante pour les blocs de béton fabriqués à partir des granulats recyclés non carbonatés.

7.1.2 Granulats recyclés carbonatés

Les granulats recyclés ont été placés dans l'incubateur pendant une durée de 7 heures afin de les carbonater. Pour les placer dans l'incubateur, la technique des rideaux et plateaux (explicitée en 6.4.2) a été utilisée.

Quantification de l'absorption de CO₂

Pour quantifier l'absorption de CO₂ par les granulats recyclés, nous pourrions utiliser la formule établie à la page 64 mais nous ne pouvons pas connaître exactement la masse du liant sec de ces granulats et, de ce fait, la quantification de CO₂ est relativement difficile à faire. C'est pour cette raison que nous ne l'établirons pas.

Essai Micro-Deval

Le calibre choisi pour cet essai est le calibre 6.3-10, le même que celui pour les granulats recyclés non carbonatés afin de pouvoir comparer les résultats.

Essais	Granulats (g)	Charge abrasive (g)	Refus à 1.6 mm (g)	Micro-Deval (-)
1	498.92	4001.00	472.83	5.23
2	500.27	4001.00	469.70	6.11
3	499.95	4001.00	472.65	5.46
Moyenne				5.60

Tableau 19 : Coefficient Micro-Deval des granulats recyclés carbonatés

Nous constatons une légère différence avec les résultats obtenus précédemment. Les granulats recyclés non carbonatés ont une meilleure résistance à l'usure que les granulats recyclés carbonatés, ce qui est assez surprenant. On aurait pu imaginer que la gangue de mortier restante, attachée aux granulats recyclés, puisse se carbonater et fournir une meilleure résistance à l'usure grâce à l'injection de CO₂. Deux options sont possibles pour expliciter le phénomène qu'il s'est produit :

- La gangue de mortier restante était déjà complètement carbonatée avant d'être placée dans l'incubateur et donc, les échantillons prélevés parmi les granulats carbonatés sont justes un peu moins résistants à l'usure que ceux des granulats recyclés non carbonatés ;
- L'échantillon n'est pas resté suffisamment longtemps dans l'incubateur pour que la gangue de mortier soit modifiée significativement et apporte une meilleure résistance à l'usure.

Enfin, les granulats recyclés ne sont pas aussi friables que l'image qu'ils pourraient renvoyer.

7.1.3 Granulats de miscanthus minéralisés non carbonatés

Le coefficient Micro-Deval calculé pour les granulats de miscanthus possède une méthode expérimentale un peu différente de celle des granulats recyclés, comme déjà énoncé en 6.7.1 page 61. Il importe d'insister sur le fait que, comme la méthode est différente au vu des granulats qui sont aussi très différents, la comparaison des coefficients Micro-Deval obtenus entre les granulats recyclés et les fibres végétales ne peut être effectuée.

Essai Micro-Deval

Nous établissons ici, de la même manière que précédemment, la valeur du coefficient Micro-Deval tout en précisant que les 50 billes utilisées sont les mêmes, à chaque fois.

Essais	Granulats (g)	Charge abrasive	Refus à 1.6 mm (g)	Micro-Deval (-)
1	249.11	50 billes	219.12	12.04
2	250.10	50 billes	217.99	12.84
3	250.34	50 billes	217.32	13.19
Moyenne				12.69

Tableau 20 : Coefficient Micro-Deval des granulats de miscanthus minéralisés non carbonatés

La valeur du coefficient Micro-Deval obtenue est relativement élevée si on sait qu'on obtient, habituellement, un coefficient Micro-Deval de l'ordre de 5-10 pour les granulats ayant une bonne résistance à l'usure. Ces granulats n'ont pas subi du tout la même charge abrasive que les granulats recyclés ni même passés autant de temps dans le cylindre et ils ont déjà des **résistances à l'usure peu convaincantes**. Il est fort probable que les granulats de miscanthus **ne participent pas beaucoup à la résistance d'un futur bloc de béton**.

7.1.4 Granulats de miscanthus minéralisés carbonatés

Quantification de l'absorption de CO₂

Les granulats de miscanthus ont été placés dans l'incubateur pendant une durée de 7 heures de la même façon que les granulats recyclés.

Temps	H.R (%)	T° (°C)	Masse (g)				
			Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3	Gel de silice	Solution saline
Départ	56.0	21.0	363.52	422.34	325.37	200.00	2425.40
1 heure	92.0	29.8	363.85	422.68	325.71	202.60	2426.60
3 heures	97.2	26.3	363.66	422.41	325.48	204.80	2430.80
7 heures	97.4	22.0	363.20	421.95	325.06	208.20	2436.60

Tableau 21 : Variation des masses enregistrées pour les fibres végétales de type miscanthus – Incubateur (20%) – 7 heures

La carbonatation de ces granulats est caractérisée par une grande évaporation d'eau ainsi que par une élévation de température relativement marquée durant les premières heures.



Photo 55 : granulat de miscanthus dans l'incubateur



Photo 56 : granulat étalés sur une hauteur de 5 cm.

Pour quantifier effectivement l'absorption de CO₂, nous utilisons la formule énoncée en 6.7.3 page 64 :

$$\text{Gain en masse (\%)} = \frac{\text{masse}_{\text{finale}} + \text{masse}_{\text{eau perdue}} - \text{masse}_{\text{initiale}}}{\text{masse}_{\text{liant sec}}} = \frac{\Delta_{\text{masse CO}_2}}{\text{masse}_{\text{liant sec}}}$$

Variables	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3	Total
Masse initiale (g)	363.52	422.34	325.37	1111.23
Masse finale (g)	363.20	421.95	325.06	1110.21
Masse d'eau perdue (g)	6.34	7.37	5.68	19.40
Masse du liant sec (g)	118.80	138.02	106.33	363.15
Gain en masse (%)	5.07	5.06	5.05	5.06

Tableau 22 : Quantification de l'absorption de CO₂ par les granulats de miscanthus

Les masses initiales et finales sont données par la prise de masse effectuée toutes les x heures.

La masse d'eau perdue est obtenue, pour l'ensemble des échantillons, en additionnant les prises de masses du gel de silice et de la solution saline (tous deux absorbeurs d'eau) lors de l'essai. Ainsi, nous pouvons obtenir la masse d'eau perdue dans les échantillons équivalents à celle captée par le gel de silice et la solution saline, simultanément. Le calcul est donc le suivant :

$$\text{Masse finale}_{\text{Gel de silice}} + \text{Masse finale}_{\text{Solution saline}} - (\text{Masse initiale}_{\text{Gel de silice}} + \text{Masse initiale}_{\text{Solution saline}}) = \text{Masse}_{\text{eau perdue}}$$

Ainsi, la masse d'eau perdue par l'ensemble des échantillons est de :

$$208.2 + 2436.6 - (200 + 2425.4) = 19.4$$

L'hypothèse selon laquelle l'échantillon perd de l'eau proportionnellement à sa masse sera faite. En effet, échantillons sont au nombre de 3 dans l'incubateur et il ne semble pas correct de dire que chaque échantillon perd 1/3 de l'eau totale. En effet, puisque l'échantillon 1 représente 32.71% de l'ensemble des échantillons placés dans l'incubateur, nous considérons que la masse d'eau perdue par cet échantillon vaut 32.71% de la masse d'eau perdue par l'ensemble des échantillons.

Ainsi, la masse d'eau perdue par l'échantillon 1 est calculée comme ceci :

$$32.71/100 \times 19.4 = 6.34$$

Pour ce qui est de la masse du liant sec (ciment), nous connaissons la fraction (en %) de ciment utilisée sur la totalité des composants lors de la minéralisation (Cf. 6.5.2 page 57). Etant donné que nous pesons l'échantillon et ce, dès le départ, nous pouvons connaître la masse de liant sec de la façon suivante :

$$\text{Pourcentage}_{\text{théorique}} \times \text{Masse}_{\text{initiale}} = \text{Masse}_{\text{liant sec}}$$

Ainsi, pour l'échantillon 1, l'application de la formule est la suivante :

$$\frac{32.68}{100} \times 363.52 = 118.80$$

Nous constatons donc, finalement, **un gain en masse de l'ordre de 5%**, par l'utilisation de la formule établie par Monkman et Shao. (Monkman, et al., 2010). Nous constatons également la proximité des résultats entre les différents échantillons.

La démarche décrite ci-dessus sera utilisée chaque fois qu'une quantification de l'absorption de CO₂ par variation de masse d'un échantillon sera nécessaire.

Nous constatons que **l'absorption de CO₂ au sein de ces granulats est tout de même importante** après seulement 7 heures de cure de carbonatation.

Nous pouvons établir l'évolution temporelle du gain en masse dû à la captation de CO₂, pour les 3 échantillons. Pour cela, les différentes étapes explicitées ci-dessus sont reprises et effectuées pour les différentes heures et nous obtenons les résultats suivants. (Tableau 23)

Temps	Gain en masse (%)		
	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Départ	0	0	0
1 heure	1.32	1.29	1.36
3 heures	2.92	2.86	2.91
7 heures	5.06	5.06	5.05

Tableau 23 : Gain en masse (%) en fonction du temps

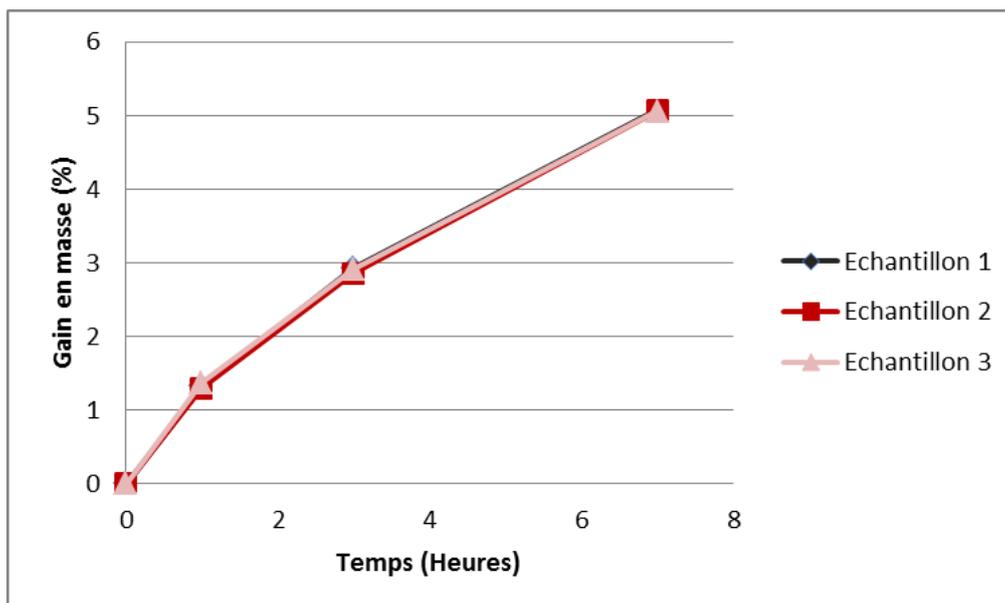


Figure 67 : Evolution du pourcentage de CO₂ cumulé capté en fonction du temps

Nous remarquons la reproductibilité des résultats et nous constatons que **l'absorption de CO₂ est en constante augmentation**. Cette augmentation peut-elle durer éternellement ? Il serait peut-être judicieux de voir à quel point cette augmentation peut avoir un effet bénéfique pour l'environnement ainsi que pour la résistance à l'abrasion des granulats. Cet essai ne sera pas effectué dans ce travail car, ce qui nous importe, c'est bel et bien les blocs de béton composés de ces fibres végétales.

Essai Micro-Deval

Le coefficient Micro-Deval est calculé de la même façon que pour les granulats de miscanthus non carbonatés. Les 50 billes utilisées pour les différents essais sont les mêmes que celles utilisées pour les essais sur les granulats de miscanthus non carbonatés.

Essais	Granulats (g)	Charge abrasive	Refus à 1.6 mm (g)	Micro-Deval (-)
1	250.12	50 billes	230.16	7.98
2	248.98	50 billes	232.30	6.70
3	249.47	50 billes	231.98	7.01
Moyenne				7.23

Tableau 24 : Coefficient Micro-Deval des granulats de miscanthus minéralisés carbonatés

Nous remarquons que les granulats de miscanthus carbonatés sont plus résistants à l'usure que ceux qui n'ont pas été carbonatés. En effet, les fibres carbonatées possèdent un coefficient de l'ordre de 7.23 (Cf. Tableau 24), alors que celles qui n'ont pas été carbonatées obtiennent un coefficient avoisinant 12.69 (Cf. Tableau 20 page 76). Nous pouvons affirmer que l'effet de la captation du CO₂ sur les fibres végétales de type miscanthus, en dehors des avantages que cette captation peut générer en terme de préservation de l'environnement, est positif vis-à-vis de la résistance à l'usure des fibres. Il n'y a plus qu'à espérer que cette différence relativement significative soit présente sur les blocs de béton qui vont être conçus à partir de ces mêmes fibres.

7.2 Effet de la carbonatation sur les blocs de béton à base de granulats naturels

Les blocs de béton à base de granulats naturels ont été réalisés en premier. La démarche expérimentale explicitée dans le chapitre 6 page 47 étant relativement nouvelle et pas forcément évidente à mettre en œuvre pour une novice, il a été préférable de commencer avec des granulats que le laboratoire possédait en très grande quantité, ce qui n'est pas le cas pour les granulats recyclés. Le premier essai s'est relativement bien passé et permet même d'avoir des premiers résultats.



Photo 57 : Exemple de bloc de béton réalisé à base de granulats naturels

Notons que cette expérimentation n'était pas prévue au départ du programme expérimental mais nous l'avons tout de même réalisée pour les raisons décrites ci-avant. Elle nous permet de valider la méthode expérimentale.

Les variations de masses enregistrées pour l'essai sont écrites au Tableau 25.

Temps	H.R (%)	T° (°C)	Masse (g)				
			Cube 1	Cube 2	Cube 3	Gel de silice	Solution saline
Départ	53.7	21.7	7307.00	7442.40	7945.20	199.98	2055.42
1 heure	88.9	21.7	7308.80	7445.20	7946.40	202.29	2057.74
3 heures	93.2	21.7	7307.60	7443.80	7945.00	203.99	2060.54
7 heures	94.1	21.7	7302.80	7438.80	7939.80	207.05	2066.86

Tableau 25 : Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de granulats naturels – Incubateur (20%)

Nous constatons une augmentation d'humidité relative et pas de variation de température. Cette augmentation d'humidité relative est certainement provoquée par l'évaporation de l'eau qui était présente dans les blocs de béton. Le gel de silice ne capte peut-être pas toute l'eau qui s'évapore du bloc de béton mais nous considérons, pour la suite de ce travail, que c'est le cas car il est difficile de vérifier cette hypothèse, surtout que l'expérience effectuée en 6.7.3 page 64 nous prouvait que le système est en équilibre.

7.2.1 Cure en chambre humide

Lors des premiers essais, les échantillons en chambre humide n'ont pas été pesés, **par manque de méthode pour un premier essai**, mais nous verrons, par la suite, que leurs pesées est nécessaire uniquement pour vérifier la reproductibilité des résultats entre les types d'essais effectués.

Résistance en compression

Nous caractériserons toujours la résistance en compression des échantillons en chambre humide depuis la méthode explicitée en 6.7.2 page 64. Nous la comparons avec celle des échantillons en incubateur.

Les premiers résultats sont intéressants puisque la reproductibilité est très présente. En effet, les valeurs des résistances en compression sont extrêmement proches, comme l'indique le Tableau 26. L'allure générale des courbes est très similaire, comme le montre la Figure 68. Espérons que cette reproductibilité soit présente pour les autres types de blocs confectionnés dans la suite de ce travail afin de pouvoir comparer ces résultats.

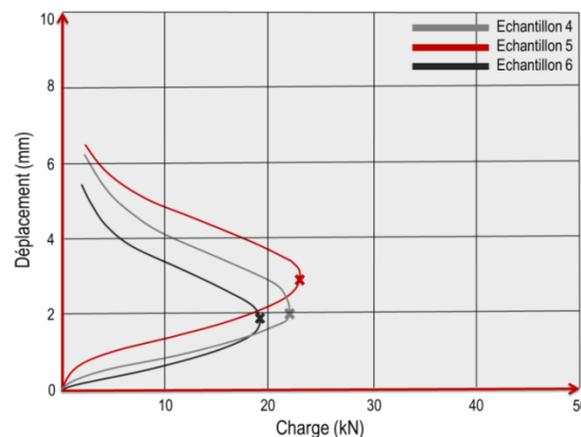


Figure 68 : Charges et déplacements des blocs à base de granulats naturels – Chambre humide – 7 heures

Echantillon	Contrainte maximum (N/mm^2)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
4	1.06	22.15	130	160	160
5	1.11	23.15	130	160	160
6	0.92	19.14	130	160	160
Moyenne	1.04				
Ecart-type	0.04				

Tableau 26 : Résistance en compression des blocs à base de granulats naturels – Chambre humide

7.2.2 Cure en incubateur à 20% de CO₂

Quantification de l'absorption de CO₂ par variation de masse

Pour quantifier l'absorption de CO₂ dans les blocs – et ce sera le cas autant pour les blocs à base de granulats naturels que ceux à base de fibres végétales de type miscanthus ou ceux à base de granulats recyclés – nous utiliserons la même démarche que celle explicitée en 7.1.4 page 76 pour les granulats de miscanthus. Suivant les compositions des différents bétons, le pourcentage de ciment (liant sec) ne sera pas le même et donc, il faut se référer à la section 6.4.6 page 57 pour connaître les différents pourcentages. Il semble plus judicieux de fonctionner en termes de pourcentage. En effet, 6 blocs sont réalisés à la fois. Il n'est donc peut-être pas très judicieux de dire qu'un bloc possède 1/6 de la quantité de ciment introduite au départ parce que, d'une part, il y a des pertes dues à la confection et, d'autre part, les blocs n'ont pas tous exactement la même taille. Nous considérons donc qu'il s'agit d'une bonne hypothèse de fonctionner en termes de pourcentages afin de savoir la quantité de ciment qu'il y a effectivement dans chaque bloc. Dans ce cas-ci, le pourcentage de ciment est de 6.6% et nous obtenons les valeurs ci-dessous (Tableau 27) sur base des mesures faites au Tableau 26.

Variables	Cube 1	Cube 2	Cube 3	Total
Masse initiale (g)	7307.00	7442.40	7945.20	22694.60
Masse finale (g)	7302.80	7438.80	7939.80	22681.40
Masse d'eau perdue (g)	5.96	6.07	6.48	18.51
Masse du liant sec (g)	482.26	491.20	524.38	1497.84
Gain en masse (%)	0.36	0.50	0.20	0.35

Tableau 27 : Quantification de l'absorption de CO₂ pour les blocs de béton à base de granulats naturels

Nous établissons également l'évolution de la masse de l'échantillon en fonction du temps de la même façon que précédemment et cela permet de se rendre que, à la lecture de la Figure 69, la reproductibilité des résultats est bien présente.

Temps	Gain en masse (%)		
	Echantillon 1 (g)	Echantillon 2 (g)	Echantillon 3 (g)
Départ	0	0	0
1 heure	0.68	0.87	0.54
3 heures	0.73	0.89	0.57
7 heures	0.36	0.50	0.21

Tableau 28 : Gain en masse (%) en fonction du temps pour les bétons à base de granulats naturels

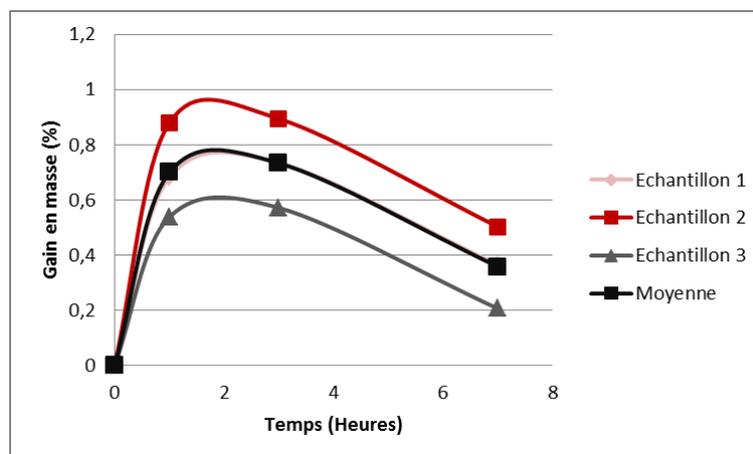


Figure 69 : Evolution du pourcentage de CO₂ cumulé capté en fonction du temps pour les bétons à base de granulats naturels

Les trois échantillons suivent la même allure et nous remarquons assez facilement que l'absorption de CO₂, suivant les calculs établis par la formule de Monkman et Shao, atteint un palier maximum entre 1 heure et 3

heures, puis décroît. Ce relargage est dû à la perte d'eau qui est plus importante que l'absorption de CO₂. **Nous constatons donc que l'absorption de CO₂ est très peu présente au sein de ces blocs de béton.** Espérons, par la suite, obtenir une absorption de CO₂ plus convaincante avec les blocs à base de granulats recyclés.

Résistance en compression

Les échantillons 1, 2 et 3 correspondent à ceux soumis à l'incubateur alors que les échantillons 4, 5 et 6, déjà vus auparavant, sont ceux qui ont été placés en chambre humide.

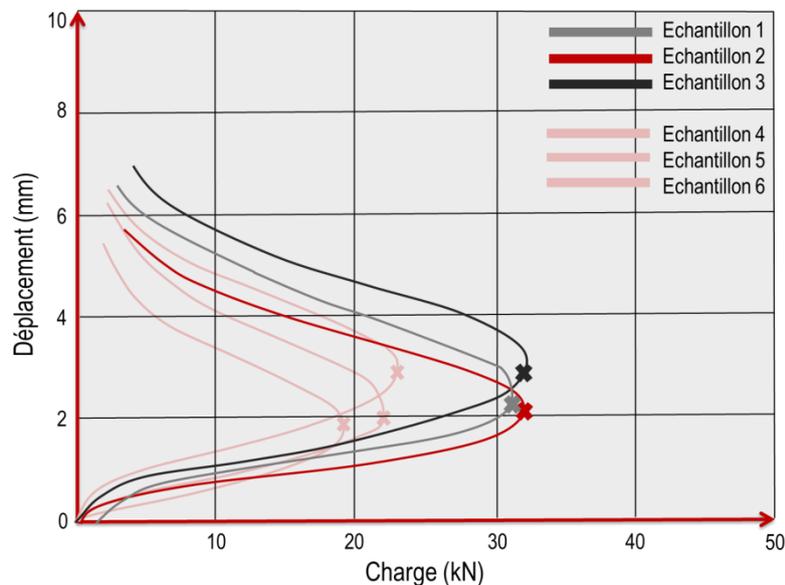


Figure 70 : Comparaison des charges et déplacements des blocs à base de granulats naturels – Incubateur (20% CO₂) et chambre humide – 7 h.

La Figure 70 nous montre la différence qu'il existe entre les échantillons 1 à 3 et les échantillons 4 à 6. Cette différence est validée par les calculs des résistances en compression effectués dans le Tableau 29.

Echantillon	Contrainte maximum (N/mm ²)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
1	1.55	31.20	130	160	160
2	1.44	32.17	140	160	160
3	1.41	32.69	145	160	160
Moyenne	1.47				
Ecart-type	0.03				

Tableau 29 : Résistance en compression des blocs à base de granulats naturels – Incubateur (20% de CO₂)

Nous constatons une nette différence entre les échantillons placés à l'incubateur pour lesquels la résistance en compression moyenne est de l'ordre de 1.46 MPa alors que ceux placés en chambre humide atteignent une résistance de l'ordre de 1.04 Mpa (Cf. Tableau 32 page 84), **ce qui correspond à une augmentation de 40.38% pour les échantillons placés en incubateur.**

Les résultats obtenus dans cette section sont relativement **intéressants en termes de résistance en compression** mais **peu appréciables en termes d'absorption de CO₂**. Voyons si les blocs de béton à base de granulats recyclés peuvent être capables d'absorber du CO₂ tout en gardant ce gain de résistance.

7.3 Effet de la carbonatation sur les blocs de béton à base de granulats recyclés

Plusieurs blocs de béton à base de granulats recyclés ont été conçus tout au long de cette partie du travail. Les détails concernant leurs élaborations ont déjà été évoqués dans le chapitre 6 page 47.

Les résultats obtenus pour les six premiers cubes, soumis à l'incubateur et placés en chambre humide sont référencés ci-dessous.

Temps	H.R (%)	T° (°C)	Masse (g)				
			Cube 1	Cube 2	Cube 3	Gel de silice	Solution saline
Départ	53.7	21.4	5834.60	6180.60	5771.00	199.98	2071.40
1 heure	92.0	21.4	5837.60	6185.20	5775.40	201.78	2073.77
3 heures	92.1	21.4	5839.00	6186.40	5776.80	203.15	2076.55
7 heures	93.2	21.4	5839.40	6188.00	5777.60	206.20	2082.84

Tableau 30 : Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de granulats recyclés – Incubateur (20%)

Temps	Masse (g)		
	Cube 4	Cube 5	Cube 6
Départ	6676.00	6659.60	6441.20
1 heure	6678.00	6661.40	6444.00
3 heures	6677.60	6660.80	6443.20
7 heures	6676.00	6659.00	6441.60

Tableau 31 : Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de granulats recyclés – Chambre humide

7.3.1 Cure en chambre humide

Comme on peut le constater ci-dessus, les blocs en chambre humide n'évoluent pas tout à fait de la même façon que les blocs en incubateur. Ceci est confirmé par la Figure 71 qui indique clairement que **les trois cubes placés en incubateur (Cube 1, 2 et 3) prennent constamment de la masse au fur et à mesure des heures** alors que ceux placés en chambre humide (Cube 4, 5 et 6) prennent de la masse juste la première heure pour après en perdre.

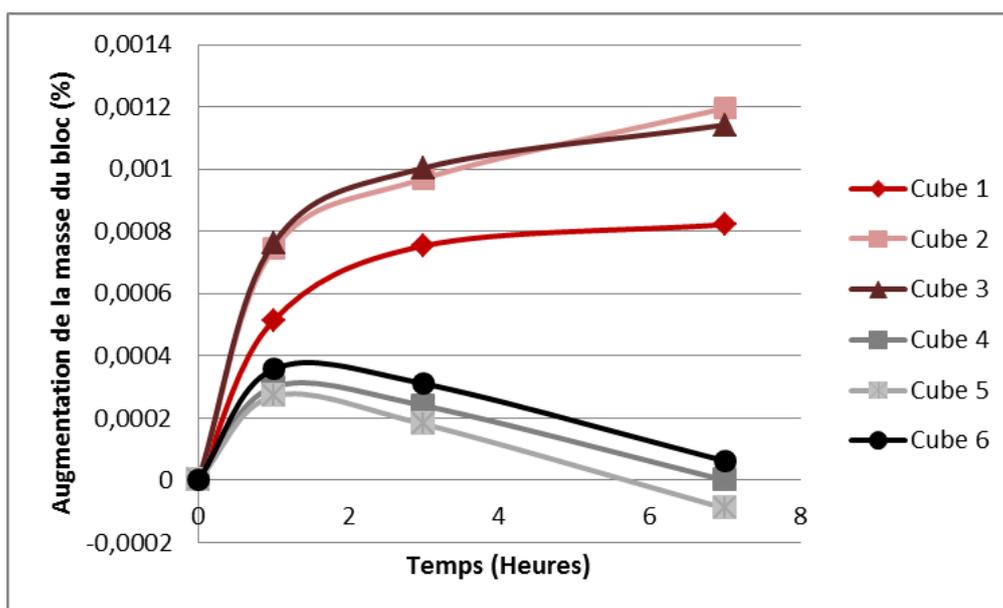


Figure 71 : Evolution de la masse du bloc en fonction du temps pour les blocs à base de granulats recyclés – Chambre humide et Incubateur (20%)

Résistance en compression

La résistance moyenne en compression des blocs à base de granulats recyclés est de l'ordre de 1.06 MPa (Cf. Tableau 32) alors qu'elle était aux alentours de 1.04 MPa pour les blocs à base de granulats naturels. Nous concluons donc que **l'utilisation de granulats recyclés est tout aussi intéressante que l'utilisation des granulats naturels en termes de résistance en compression.**

Echantillon	Contrainte maximum (N/mm^2)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
4	1.12	21.42	120	160	160
5	1.07	22.15	130	160	160
6	1.02	20.15	125	160	160
Moyenne	1.06				
Ecart-type	0.02				

Tableau 32 : Résistance en compression des blocs à base de granulats recyclés – Chambre humide

De plus, la Figure 72 nous confirme la reproductibilité que nous évoquons déjà auparavant. Nous insistons donc sur le fait que trois échantillons pour les essais de compression suffisent afin d'avoir une bonne approximation des résultats.

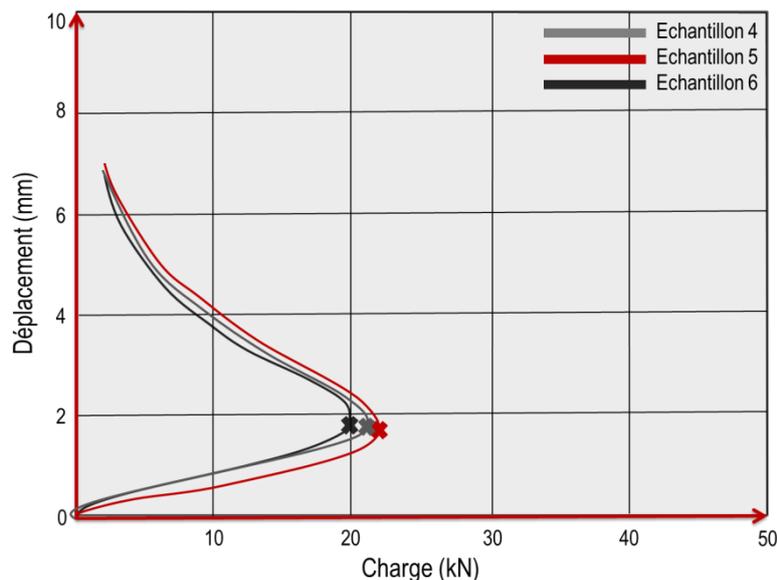


Figure 72 : Charges et déplacements des blocs à base de granulats recyclés – Chambre humide – 7 heures

7.3.2 Cure en incubateur à 20% de CO₂

Quantification de l'absorption de CO₂ par variation de masse

Pour quantifier l'absorption de CO₂, nous nous référons aux formules utilisées par Monkman et Shao (Monkman, et al., 2010) et nous en déduisons, suivant la description déjà établie en page 64, les résultats suivants :

Variables	Cube 1	Cube 2	Cube 3	Total
Masse initiale (g)	5834.60	6180.60	5771,00	17786.20
Masse finale (g)	5839.40	6188.00	5777.60	17805.00
Masse d'eau perdue (g)	5.79	6.14	5.73	17.66
Masse du liant sec (g)	385.08	407.92	380.88	1173.89
Gain en masse (%)	2.75	3.32	3.23	3.11

Tableau 33 : Quantification de l'absorption de CO₂ pour les blocs de béton à base de granulats recyclés

Nous constatons **une nette amélioration du gain en masse (%)** par rapport aux blocs de bétons à base de granulats naturels qui avaient un pourcentage de l'ordre de 0.35. Ici, pour le même temps passé dans l'incubateur, les valeurs trouvées par calculs sont nettement plus favorables car **elles avoisinent 3.11%**.

Le graphique de la Figure 73 nous indique que la **masse ne fait qu'augmenter au fur et à mesure du temps**, ce qui n'était pas le cas pour les blocs de béton à base de granulats naturels. (Cf. Figure 69 page 81)

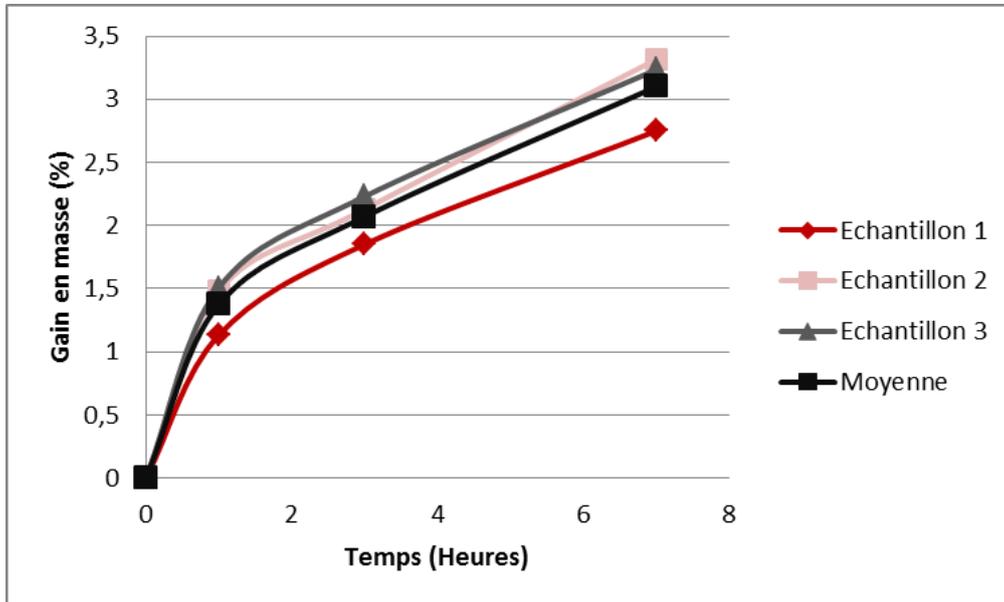


Figure 73 : Evolution du pourcentage de CO₂ cumulé capté en fonction du temps pour les bétons à base de granulats recyclés

Voyons dans quelle mesure cette absorption de CO₂ évolue en fonction de la racine carrée du temps, afin d'en déduire éventuellement un coefficient.

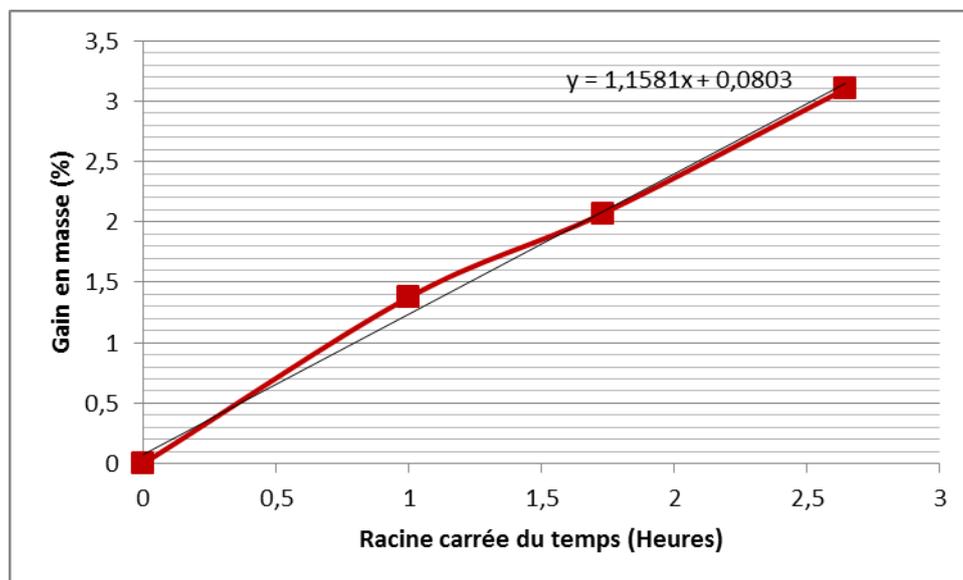


Figure 74 : Evolution du pourcentage de CO₂ cumulé capté en fonction du temps pour les bétons à base de granulats recyclés

Nous observons que l'absorption de CO₂ évolue linéairement. En regard de ce résultat, nous pouvons espérer que l'évolution continue dans cette direction, pour une durée plus longue dans l'incubateur. C'est ce qu'il sera expérimenté par la suite. (Page 94)

Quantification de l'absorption de CO₂ par thermogravimétrie

La quantification d'absorption de CO₂, évoquée ci-avant, par variation de la masse est comparée, pour la première fois, avec une analyse en thermogravimétrie, sur les mêmes échantillons que ceux ci-avant. Par la suite, une analyse plus poussée sur l'échantillonnage (Cf. Chapitre 7.7 page 112) sera établie. Pour rappel, l'échantillon est chauffé à 2°C/minute, jusque 710 °C puis la température est maintenue pendant 5 heures.

Sur le graphique de la Figure 75, nous avons replacé les différentes courbes des pertes thermiques correspondant aux différents échantillons analysés.

L'échantillon de couleur verte, sur la Figure 75, correspond à l'échantillon de départ. Ce que nous entendons par échantillon de départ, c'est le fait que, avant de placer les blocs de bétons dans l'incubateur ou la chambre humide, nous avons gardé un échantillon de béton. Celui-ci sera comparé à l'échantillon qui aura subi une cure de carbonatation. Ce que nous constatons sur cet échantillon de départ, c'est la présence de CO₂ déjà marquée (15.856%). Cette présence est certainement due au fait que les granulats utilisés sont des granulats recyclés qui ont déjà absorbé une certaine quantité de CO₂ durant leur première vie.

L'échantillon représenté en bleu est l'échantillon qui a été prélevé, après essai de compression, sur les cubes qui ont subi une cure en incubateur.

Nous savons que l'échantillon de départ a déjà 15.865% de CO₂, avant cure. Nous savons également que l'échantillon final est pourvu de 17.018%, après cure en incubateur. De ce fait, nous pouvons quantifier le gain en CO₂ entre l'échantillon de départ et l'échantillon qui a été placé en incubateur : $17.018 - 15.865 = 1.153\%$

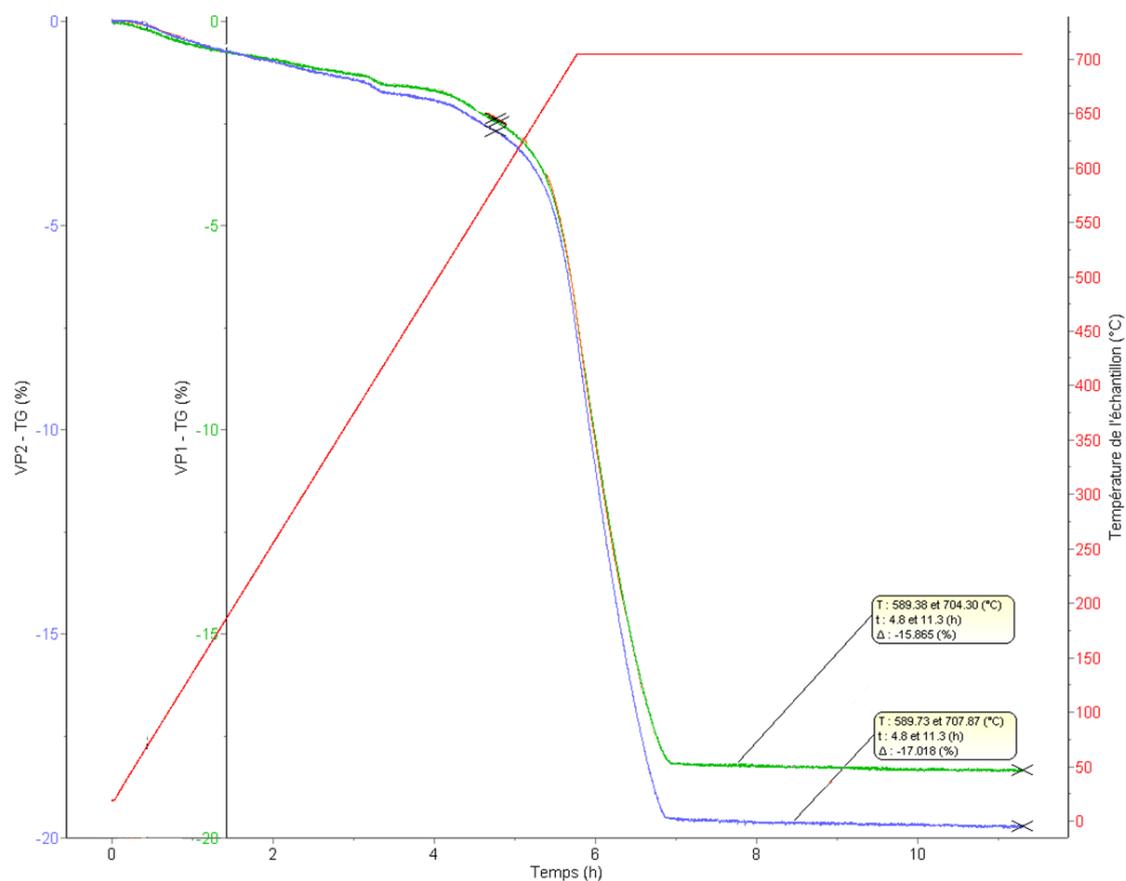


Figure 75 : Quantification de l'absorption de CO₂ par thermogravimétrie

Les valeurs calculées par variation de la masse de l'échantillon étaient aux alentours de 3.11%. L'analyse en thermogravimétrie **est donc moins concluante d'un point de vue absorption de CO₂** que la méthode de la variation de la masse mais il importe de se rappeler que c'est le centre du cube qui a été analysé et non l'ensemble du cube. Le fait que ce pourcentage soit moindre semble relativement logique. Nous tenterons de confirmer ces dires dans la section 7.7 page 112.

Résistance en compression

Nous comparons les résistances obtenues en incubateur (Echantillon 4 à 6) avec celles obtenues en chambre humide (Echantillon 1 à 3). Nous constatons, sur la Figure 76, le grand intérêt de cette cure en incubateur.

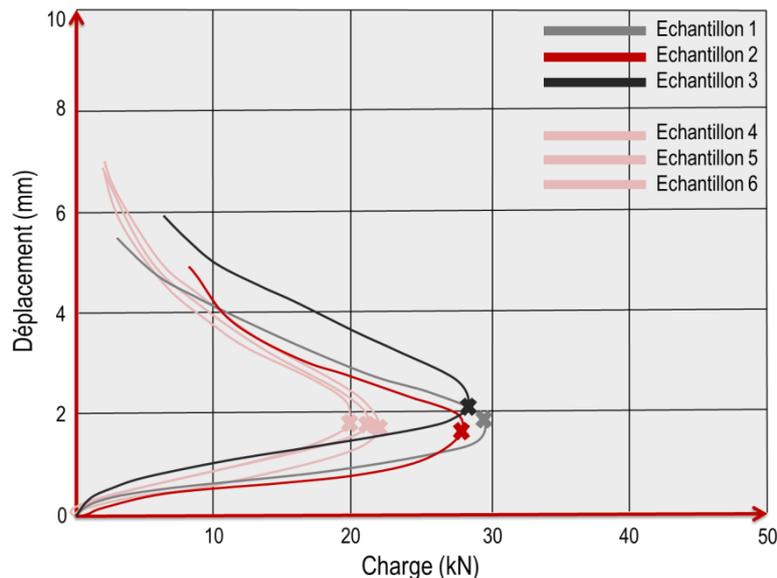


Figure 76 : Comparaison des charges et déplacements des blocs à base de granulats recyclés – Incubateur (20% CO₂) et chambre humide – 7 h.

La résistance moyenne en compression obtenue pour les blocs de béton placés en chambre humide était de 1.06 MPa alors qu'elle est de l'ordre de 1.52 MPa pour les blocs placés en incubateur (Tableau 34), **soit une augmentation de résistance de 43.39%**.

Echantillon	Contrainte maximum (N/mm^2)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
1	1.62	29.75	115	160	160
2	1.47	28.16	120	160	160
3	1.49	28.66	120	160	160
Moyenne	1.53				
Ecart-type	0.03				

Tableau 34 : Résistance en compression des blocs à base de granulats recyclés – Incubateur (20% de CO₂)

La résistance en compression pour les blocs à base de granulats naturels était, quant à elle, de l'ordre de 1.46 MPa en incubateur. Nous pouvons donc affirmer que, autant pour les blocs placés en chambre humide que pour les blocs placés à l'incubateur, les résistances moyennes en compression des blocs à base de granulats recyclés sont légèrement meilleures que celles des blocs à base de granulats naturels. **Il s'avère intéressant, ne fut-ce que pour la résistance en compression obtenue, d'utiliser des granulats recyclés.**

Il s'agit maintenant de prouver que cette augmentation de résistance est belle et bien due à la cure de carbonatation accélérée et non à l'ambiance différente (60% H.R et 21°C) que l'incubateur possède.

Neuf nouveaux cubes seront donc réalisés et trois d'entre eux seront placés dans un autre incubateur ayant 0% de teneur en CO₂ mais possédant la même ambiance que l'incubateur à 20% de teneur en CO₂, soit 60% H.R et 21°C.

7.3.3 Cure en incubateur à 0% de CO₂

Afin de s'assurer qu'il y a bien carbonatation, même si l'analyse thermogravimétrique ainsi que l'analyse par variation de masse de l'échantillon nous l'indiquent, un autre incubateur a été utilisé afin de n'y mettre aucun CO₂. Les autres blocs confectionnés en même temps ont pris place, soit dans l'incubateur avec 20% de CO₂, soit en chambre humide afin d'avoir une comparaison possible entre les trois types de cure.

Comme nous l'avons déjà vu dans la section 6.4.1 page 52, les moules utilisés ont la particularité de pouvoir contenir trois blocs à la fois. Nous allons donc, à chaque fois, prendre un bloc et le placer en chambre humide, prendre le deuxième et le placer à l'incubateur avec 0% de CO₂ et placer, ensuite, le troisième à l'incubateur dont la teneur est de 20% de CO₂ pour prévenir des inégalités liées à la confection.

Les tableaux de variations des masses obtenus pour l'ensemble des 9 cubes subissant les trois cures différentes sont placés dans l'annexe page 133. A partir de ces tableaux, nous établissons la Figure 77 qui nous confirme que les échantillons placés dans un incubateur avec 20% de teneur en CO₂ prennent constamment de la masse (Cube 4, 5 et 6). Cette figure nous indique également que les échantillons placés en chambre humide (Cube 7, 8 et 9) prennent un petit peu de masse avant d'en perdre. Ces deux constatations étaient déjà observées sur la Figure 71 page 83. Par contre, ce que nous ne savions pas, **c'est que les échantillons placés dans un incubateur avec une teneur en CO₂ de 0% perdent constamment de la masse**, dès le moment où ils sont placés à l'intérieur de cet incubateur.

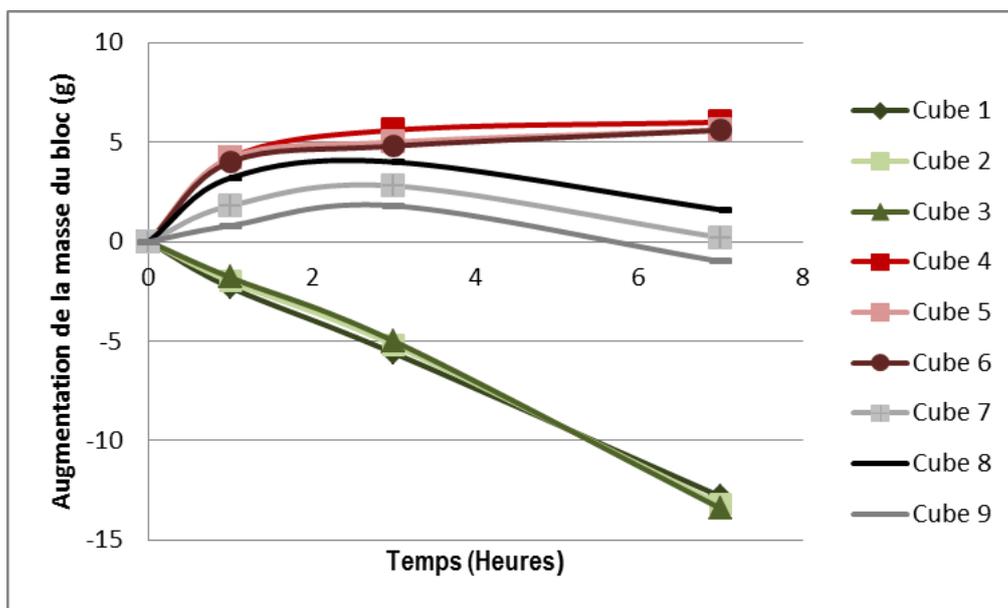


Figure 77 : Evolution de la masse des blocs en fonction du temps pour les blocs à base de granulats recyclés - Chambre humide, incubateur (20%) et incubateur (0%)

Quantification de l'absorption de CO₂ par variation de masse

Observons le Tableau 35 page suivante et constatons, assez logiquement, que les échantillons placés dans un incubateur avec une teneur en CO₂ de 0% ne captent aucun CO₂. Si on effectue les calculs par la méthode de Monkman et Shao, nous nous rendons bien compte qu'il n'y a pas de gain en masse, ce qui confirme le fait qu'il n'y a pas de carbonatation dans ces échantillons au terme de 7 heures.

Variables	Cube 1	Cube 2	Cube 3	Total
Masse initiale (g)	6711.00	6588.80	6905.00	20204.80
Masse finale (g)	6698.20	6575.60	6891.60	20165.40
Masse d'eau perdue (g)	4.78	4.69	4.92	14.40
Masse du liant sec (g)	442.93	434.86	455.73	1333.52
Gain en masse (%)	-1.81	-1.96	-1.86	-1.88

Tableau 35 : Quantification de l'absorption de CO₂ pour les blocs de béton à base de granulats recyclés – Incubateur 0%

De plus, nous constatons, sur la Figure 78, que l'évolution du gain en masse est négative et ce, pendant tout le processus d'une durée de 7 heures, ce qui veut dire que le bloc perd constamment de l'eau sans rien gagner d'autre. Notons que l'eau perdue est, en partie, captée par le gel de silice. L'autre partie contribue à augmenter l'humidité relative au sein de l'incubateur mais nous ne pouvons la quantifier, comme déjà dit auparavant.

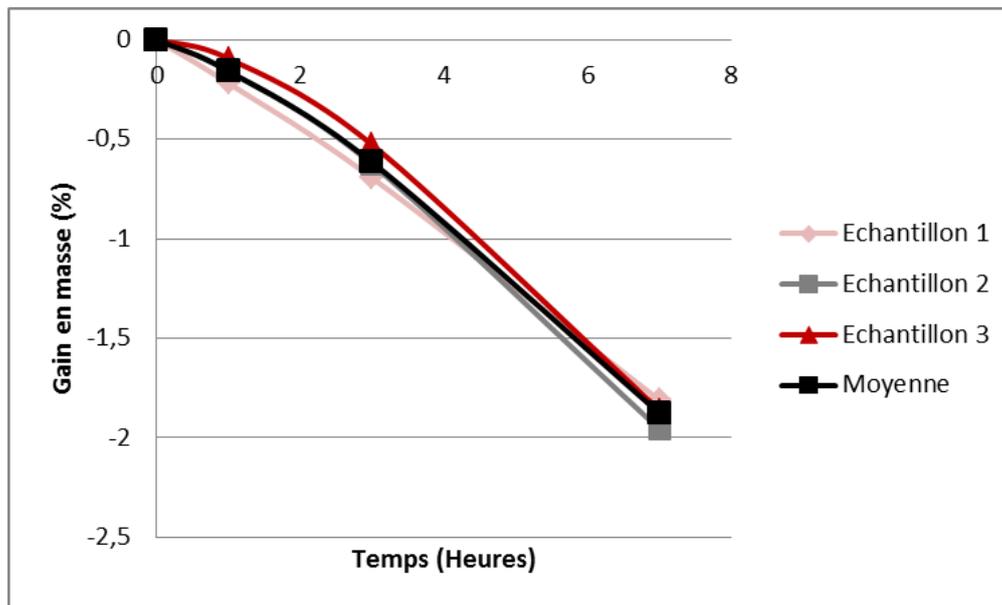


Figure 78 : Evolution du pourcentage de CO₂ cumulé capté en fonction du temps pour les bétons à base de granulats recyclés - Incubateur 0%

Les constatations énoncées ci-avant confirment que, lors de l'introduction de blocs de béton dans un incubateur avec une teneur en CO₂ de 20%, il y a bel et bien un processus de carbonatation accéléré qui s'opère.

Les résultats pour les cubes 4, 5 et 6, placés dans un incubateur avec une teneur en CO₂ de l'ordre de 20% sont les mêmes que pour l'essai précédent. En effet, si nous comparons le Tableau 36 et le Tableau 33 page 84, nous constatons que la quantification d'absorption de CO₂ est de l'ordre de 3,11% pour l'un et 3,00% pour l'autre, ce qui est vraisemblablement très proche. **Les résultats sont donc reproductibles.**

Variables	Cube 4	Cube 5	Cube 6	Total
Masse initiale (g)	6641.80	6645.20	6802.20	20089.20
Masse finale (g)	6647.80	6650.80	6807.80	20106.40
Masse d'eau perdue (g)	7.47	7.48	7.65	22.6
Masse du liant sec (g)	438.36	438.58	448.95	1325.89
Gain en masse (%)	3.07	2.98	2.95	3.00

Tableau 36 : Quantification de l'absorption de CO₂ pour les blocs de béton à base de granulats recyclés – Incubateur 20%

Par ailleurs, si nous comparons la Figure 79 et la Figure 73 page 85, nous constatons, de nouveau, une reproductibilité très intéressante.

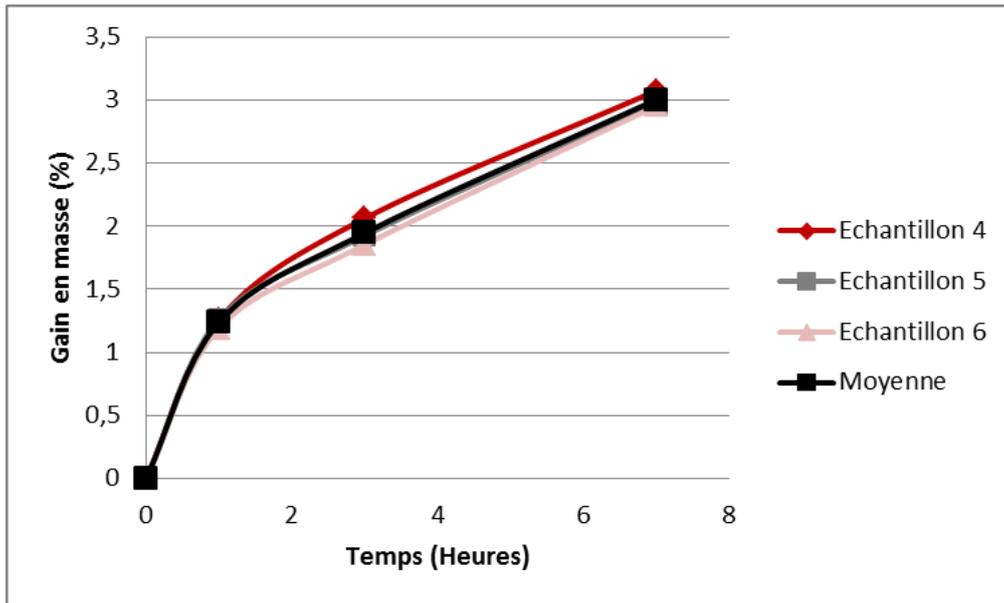


Figure 79 : Evolution du pourcentage de CO₂ cumulé capté en fonction du temps pour les bétons à base de granulats recyclés - Incubateur 20%

Résistance en compression

Les essais de résistance en compression des blocs créés spécialement pour ce test à 0% de CO₂ en incubateur nous donnent d'autres informations susceptibles de renforcer ce qui a déjà été énoncé auparavant, pour les premiers essais.

Premièrement, comme nous pouvons le constater sur la Figure 80, la reproductibilité au sein des échantillons ayant subi une même cure est présente. Il s'agit, pour ce cas-ci, de ceux ayant été déposés en chambre humide. Ces échantillons (7, 8 et 9) nous rassurent sur la reproductibilité que nous observions déjà préalablement.

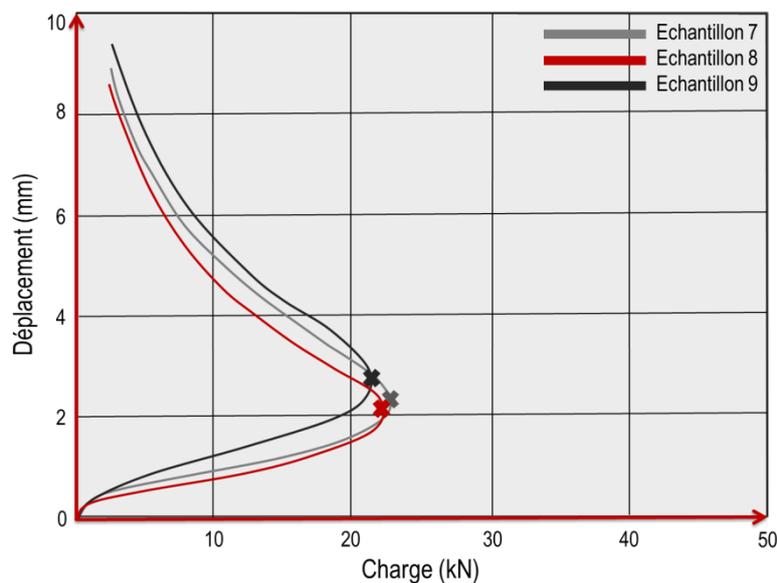


Figure 80 : Charges et déplacements des blocs à base de granulats recyclés - Chambre humide - 7 heures

De plus, la résistance moyenne en compression (Cf. Tableau 37) est de l'ordre de 1,09 MPa ce qui est en correspondance avec les résultats obtenus antérieurement puisque, pour des blocs ayant été confectionnés un autre jour, nous obtenions une résistance moyenne en compression de l'ordre de 1,06 MPa (Cf. Tableau 32 page 84).

Echantillon	Contrainte maximum (N/mm^2)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
7	1.10	23.100	130	160	160
8	1.16	22.276	120	160	160
9	1.02	21.180	130	160	160
Moyenne	1.09				
Ecart-type	0.03				

Tableau 37 : Résistance en compression des blocs à base de granulats recyclés – Chambre humide

Deuxièmement, les blocs placés à l'incubateur avec une teneur de 20% en CO_2 obtiennent une résistance moyenne en compression de l'ordre de 1,53 MPa. (Cf. Tableau 38). Cette résistance est vraiment très similaire avec l'essai effectué précédemment puisque la résistance moyenne en compression avoisinait 1,52 Mpa. (Cf. Tableau 34 page 87).

Echantillon	Contrainte maximum (N/mm^2)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
4	1.39	30.079	135	160	160
5	1.56	32.471	130	160	160
6	1.65	34.211	130	160	160
Moyenne	1.53				
Ecart-type	0.05				

Tableau 38 : Résistance en compression des blocs à base de granulats recyclés – Incubateur (20%)

Enfin, nous constatons, sur la Figure 81, que les blocs placés dans l'incubateur avec 20% de CO_2 possèdent, de nouveau, une reproductibilité très intéressante. Il s'agit des échantillons 4, 5 et 6.

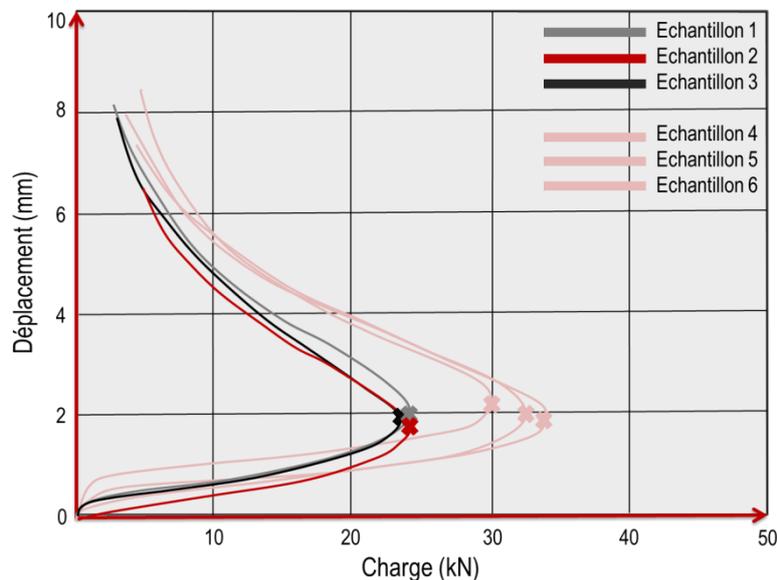


Figure 81 : Charges et déplacements des blocs à base de granulats recyclés – Incubateur (20%) et Incubateur (0%) – 7 heures

Nous nous apercevons que les échantillons 1, 2 et 3 (Cure avec 0% de CO_2) ne sont pas capables de subir la même charge que les échantillons 4, 5 et 6 (Cure avec 20% de CO_2). Pour cause, la résistance moyenne en compression des échantillons ayant subi une cure dans un environnement avec 0% de CO_2 est de 1,17 Mpa (Tableau 39), ce qui est inférieur à la résistance moyenne en compression des échantillons placés dans un environnement avec 20% de CO_2 , qui est de l'ordre de 1,5 Mpa. (Tableau 38).

Echantillon	Incubateur (0%)				
	Contrainte maximum (N/mm^2)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
1	1.22	24.387	125	160	160
2	1.20	24.054	125	160	160
3	1.09	23.459	135	160	160
Moyenne	1.17				
Ecart-type	0.03				

Tableau 39 : Résistance en compression des blocs à base de granulats recyclés – Incubateur (0%)

La résistance moyenne en compression obtenue dans le Tableau 39 est plus proche de celle obtenue en chambre humide (Tableau 37 page 91) que celle obtenue dans l'incubateur avec 20% de CO₂. Cela est d'autant plus vrai qu'en analysant les charges et déplacements de la Figure 82, nous constatons une similitude assez frappante entre les différents échantillons provenant de la chambre humide (7, 8 et 9) et les échantillons ayant subi une cure à 0% de CO₂ (1, 2 et 3). Ce que nous remarquons également sur cette figure, c'est la reproductibilité des échantillons placés dans l'incubateur avec 0% de CO₂.

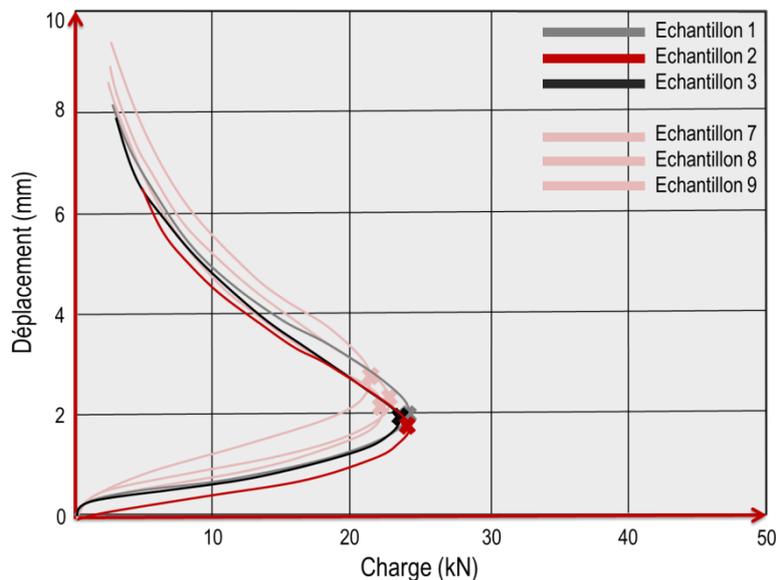


Figure 82 : Charges et déplacements des blocs à base de granulats recyclés – Incubateur (0%) et chambre humide – 7 heures

Les essais effectués ci-avant nous ont permis **de confirmer que la carbonatation est belle et bien présente** et que, en plus, cette dernière **est synonyme d'augmentation de résistance, et ce, à court terme.**

Maintenant que nous avons prouvé que les blocs captent du CO₂ à court terme, il nous paraît intéressant de déterminer dans quelle mesure cette carbonatation peut contribuer à l'augmentation de résistance et ce, à plus ou moins long terme.

Nous aimerions voir, dans un premier temps, quels sont les effets d'une cure de carbonatation accélérée d'une durée de 48 heures et, dans un second temps, ce que cette cure de carbonatation à plus long terme provoquerait, en terme de résistance, sur des blocs de béton à base de granulats recyclés. Les blocs de béton, ayant subi 48 heures de carbonatation accélérée, seront alors séchés, pendant une durée de 14 jours, comme cela se fait dans la pratique. Nous nous intéresserons aux résistances obtenues.

Cependant, deux problèmes techniques se posent quant à la réalisation d'autres essais. En effet, si nous voulons faire des essais sur une durée de 48 heures et voir l'évolution de l'absorption de CO₂ sur cette période, nous

testérons, tout d'abord, des blocs ayant subi une cure de carbonatation à l'incubateur après 7 heures, 24 heures et 48 heures. Etant donné que nous comparons toujours des blocs de béton ayant subi deux cures différentes, à savoir l'incubateur et la chambre humide, il faudrait confectionner 18 blocs en une fois. Les 6 premiers seraient testés après 7 heures pour les deux types de cure, les 6 suivants après 24 heures pour les deux types de cure et les 6 derniers, après 48 heures, également pour les deux types de cure. Premièrement, le volume de l'incubateur est limité et il s'avère que seuls 8 blocs peuvent y prendre place en même temps, sachant qu'il faudrait optimiser l'emplacement des blocs. Deuxièmement, nous ne possédons que 3 moules métalliques ayant la capacité de faire 3 blocs en même temps et donc 9 blocs maximum en une fois.

Pour les raisons qui viennent d'être évoquées, et parce que nous avons insisté sur la reproductibilité toujours bien présente des échantillons confectionnés auparavant, nous décidons d'utiliser les statistiques afin de pouvoir continuer nos investigations. Effectivement, suite à cette analyse statistique, nous concluons qu'un seul bloc est suffisamment représentatif d'un ensemble de 3 blocs et nous aurons donc assez de moules et de place pour poursuivre nos recherches.

Pour cela, nous utilisons un intervalle de confiance. Plutôt que d'estimer ponctuellement la vraie valeur inconnue du paramètre, on recherche un intervalle recouvrant « très vraisemblablement » cette vraie valeur. Dans notre cas, le paramètre n'est autre que la résistance en compression. L'intervalle de confiance est constitué d'un intervalle dans lequel le paramètre à estimer a une forte probabilité de se trouver. Cette probabilité, souvent exprimée à l'aide d'un pourcentage, est le degré de confiance de l'intervalle considéré. Ainsi, l'intervalle de confiance (IC) à 95% est un intervalle de valeurs qui a 95% de chance de contenir la vraie valeur du paramètre estimé. (Statistique Canada, 2012) (Legendre, 2007) (Magain, 2005)

L'intervalle $[\bar{x} - 2S ; \bar{x} + 2S]$ est un intervalle de confiance à environ 95%, ce qui veut dire que 95% des données se situent à l'intérieur de cet intervalle et donc qu'il y a 95% de certitudes que les résistances en compression des blocs fabriqués soient comprises entre les deux valeurs extrêmes.

Le paramètre \bar{x} est la moyenne de l'ensemble des résistances en compression.

Le paramètre S est l'écart type. L'écart type d'une variable discrète composée de n observations est la racine carrée positive des variances et se définit comme suit :

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n}}$$

A partir de ces formules, nous utilisons les résistances en compressions obtenues auparavant dans les précédents essais et nous en déduisons le Tableau 40. Ces résistances en compressions correspondent aux cures en incubateur avec une teneur en CO₂ de 20%.

Cube	Résistance en compression (MPa)	$x - \bar{x}$	$(x - \bar{x})^2$
1	1.3925	- 0.1366	0.01866
2	1.5611	0.0320	0.00102
3	1.6448	0.1157	0.01338
4	1.6168	0.0877	0.0077
5	1.4667	- 0.0624	0.00389
6	1.4927	- 0.0364	0.00132
n = 6	$\bar{x} = 1.5291$		$\sum(x - \bar{x})^2 = 0.04597$

Tableau 40 : Moyenne et écart-type des blocs de béton à base de granulats recyclés – Incubateur (20%)

L'écart type a donc une valeur de 0.0875 et la résistance moyenne en compression des 6 blocs est donc de 1.53 MPa. Si nous supposons que ces échantillons sont représentatifs de l'ensemble des blocs confectionnés au laboratoire dans les mêmes conditions, nous pouvons donc calculer la résistance moyenne en compression des blocs, avec sa marge d'erreur.

$$\bar{x} - 2S < x < \bar{x} + 2S \equiv 1.3541 < x < 1.7041$$

L'intervalle de confiance est relativement petit et on peut s'aventurer à dire que, si les blocs réalisés par la suite rentrent dans cet intervalle de confiance, après 7 heures de cure, alors ils sont représentatifs de ce qui a déjà été réalisés auparavant et les essais à plus longs termes sont donc probants.

Nous vérifierons donc toujours que les valeurs des résistances en compression obtenues après 7 heures rentrent dans cet intervalle de confiance. Si c'est le cas, alors les deux autres blocs créés en même temps et non testés sont représentatifs de ce qui a déjà été effectués auparavant. Ces deux blocs ne sont pas testés immédiatement car ils restent plus longtemps en incubateur. De ce fait, il y a 95% de chance que ces deux blocs, si nous les avons soumis à la compression après 7 heures, aient une résistance se situant à l'intérieur de l'intervalle de confiance.

Les mêmes calculs ont été effectués pour les blocs de béton à base de granulats recyclés subissant une cure en chambre humide. (Cf. Tableau 41)

Cube	Résistance en compression (Mpa)	$x - \bar{x}$	$(x - \bar{x})^2$
1	1.1106	0.0311	0.00097
2	1.1602	0.0807	0.00651
3	1.0182	- 0.0613	0.00376
4	1.1156	0.0361	0.00130
5	1.0649	- 0.0146	0.00021
6	1.0075	- 0.0720	0.00518
n = 6	$\bar{x} = 1.0795$		$\sum(x - \bar{x})^2 = 0.01793$

Tableau 41 : Moyenne et écart-type des blocs de béton à base de granulats recyclés – Chambre humide

$$S = 0.0546$$

$$\bar{x} - 2S < x < \bar{x} + 2S \equiv 0.9703 < x < 1.1887$$

Nous nous attèlerons donc à vérifier que les essais à 7 heures se situent à l'intérieur de ces intervalles de confiance qui nous permettront de valider les résultats des investigations futures.

7.3.4 Cure à 48 heures et essai à 24 heures

Nous allons d'abord nous concentrer sur la variation de la quantification d'absorption de CO₂ et la variation de la résistance sur une période de 48h. Bien sûre, nous nous assurons toujours que l'évolution des différents blocs en termes de variations des masses est toujours la même afin de renforcer la validation des résultats.

Les tableaux des variations des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de granulats recyclés sont placés en annexes (Cf.10.3.2 page 133).

Quantification de l'absorption de CO₂ par variation de masse

La quantification d'absorption de CO₂ par variation de la masse est calculée de la même façon que préalablement sauf qu'il y a quelques petites astuces ici en termes de quantification de la perte d'eau. Au bout de 7 heures, quand nous testons le premier bloc, celui-ci a perdu de l'eau qui a été captée par le gel de silice et la solution saline. Cependant, les deux blocs restant jusqu'à 24 heures perdent également de l'eau qui est égale-

ment captée par le gel de silice et la solution saline. Le gel de silice et la solution saline emmagasinent donc le total d'eau perdue par l'ensemble des blocs, y compris l'eau qui a été perdue par le bloc qui n'est plus présent. Nous retirons donc cette fraction d'eau perdue par le bloc qui n'est plus présent de la fraction d'eau totale.

Nous obtenons donc le tableau suivant, où quelques détails de calculs permettant la compréhension ont été introduits.

Variables	Cube 1 (g)	Cube 2 (g)	Cube 3 (g)	Total (g)
Masse initiale (g)	6740.20	6622.60	6712.22	20075.02
Masse finale (g) : 7 h	6744.60	6627.20	6718.62	20090.42
Masse d'eau perdue (g) : 7h	5.51	5.41	5.49	16.42
Masse du liant sec (g)	444.85	437.09	443.01	1324.95
Gain en masse (%) : 7 h	2.22	2.29	2.68	2.40
Masse finale (g) : 24 h	/	6617.8	6714.42	13332.22
Masse d'eau perdue (g) : 24 h	/	18.27 + 5.41 = 23.68	18.53 + 5.49 = 24.02	53.23 – 16.42 = 36.81
Gain en masse (%) : 24 h	/	4.32	5.92	5.13
Masse finale (g) : 32 h	/	/	6714.22	6714.22
Masse d'eau perdue (g) : 32h	/	/	32.92 + 24.02 = 56.94	69.73 – 36.81 = 32.92
Gain en masse (%) : 32 h	/	/	13.30	13.30
Masse finale (g) : 48 h	/	/	6710.22	6710.22
Masse d'eau perdue (g) : 48h	/	/	65.67 + 56.94 = 122.61	98.59 – 32.92 = 65.67
Gain en masse (%) : 48 h	/	/	27.22	27.22

Tableau 42 : Quantification de l'absorption de CO₂ pour les blocs de béton à base de granulats recyclés

Deux grands points importants sont à souligner depuis cette évolution :

- La perte d'eau est significative et il importe de la quantifier convenablement sous peine de variations importantes.
- **L'absorption de CO₂ est importante puisqu'elle est de l'ordre de 30%.** On remarque également que les résultats obtenus à 7 heures en termes d'absorption de CO₂ sont similaires à ce qu'on avait déjà pu voir avant.

Résistance en compression

Les résultats des tests de compression en fonction du temps, pour un cure en chambre humide, sont retranscrits ci-dessous. (Tableau 43)

Heures	Contrainte maximum (N/mm ²)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
7	1.06	21.172	125	160	160
24	3.61	75.126	130	160	160
48	8.25	171.554	130	160	160

Tableau 43 : Résistance en compression des blocs à base de granulats recyclés – Chambre humide

Nous remarquons tout de suite que la résistance en compression obtenue à 7 heures est conforme à celle obtenue auparavant. De plus, elle est située à l'intérieur de l'intervalle de confiance ce qui prouve la reproductibilité de ce test et donc la validité des résultats ultérieurs.

Les diagrammes de charges et déplacements correspondant à la chambre humide sont représentés à la Figure 84. Nous remarquons et cela se confirme par l'analyse du Tableau 43, que la résistance en compression entre 24 heures et 48 heures est doublée.

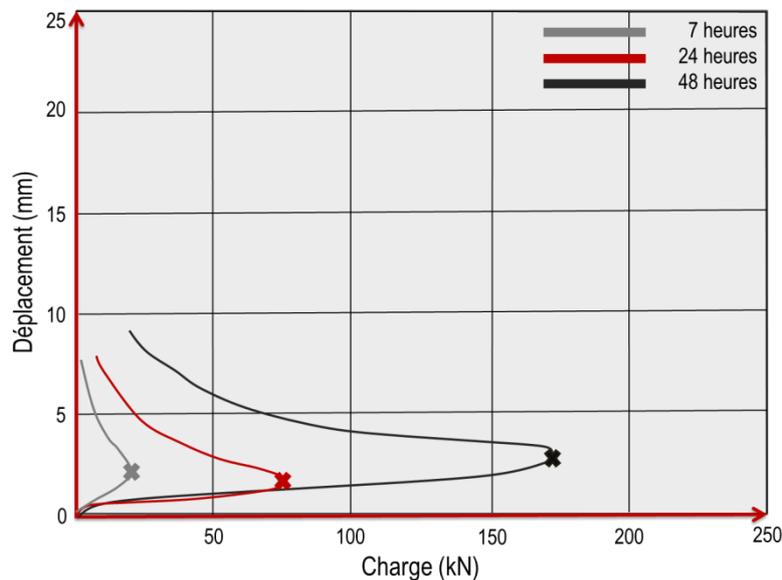


Figure 83 : Charges et déplacements des blocs à base de granulats recyclés – Chambre humide

En comparant ces résultats avec les échantillons ayant subi une cure de carbonatation accélérée en incubateur à 20% (Tableau 44 et Figure 84), nous constatons **que les premières 24 heures sont intéressantes** et préconisent l'utilisation d'un incubateur avec une teneur en CO₂ de 20% en termes de résistance. **A 48 heures, la résistance en compression en chambre humide est beaucoup plus élevée.** Elle est de l'ordre de 8 MPa contre 6 MPa en incubateur.

Heures	Contrainte maximum (N/mm^2)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
7	1.59	35.614	140	160	160
24	4.56	94.866	130	160	160
48	6.05	125.845	130	160	160

Tableau 44 : Résistance en compression des blocs à base de granulats recyclés – Incubateur (20%)

Sur la Figure 84, les échantillons placés en chambre humide sont représentés en rose et nous constatons que la tendance s'inverse à un certain moment.

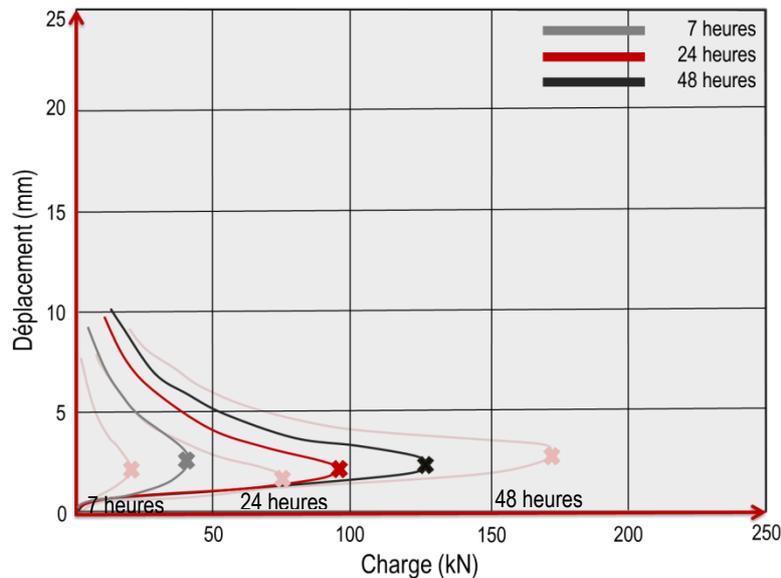


Figure 84 : Charges et déplacements des blocs à base de granulats recyclés – Incubateur (20%)

Etant donné que la tendance s'inverse et que nous ne savons pas à quel moment, nous allons refaire une deuxième fois l'essai. Ce dernier permettra, d'une part, d'avoir les résultats à 32 heures (plutôt qu'à 24 heures) permettant d'obtenir une courbe plus précise et de pouvoir mieux déceler à partir de quel moment la tendance s'inverse. D'autre part, ce test supplémentaire va nous permettre de nous assurer que les résultats obtenus ci-avant sont corrects. En effet, on va pouvoir vérifier que les résultats obtenus à 7 heures et 48 heures sont identiques à ceux-ci avant, ce qui renforcera encore les résultats de nos investigations. Par ailleurs, nous surveillons toujours bien que la variation des masses évolue de la même façon.

Nous profitons de cet essai supplémentaire pour refaire neuf blocs. Parmi eux, trois blocs prendront place dans un incubateur avec 0% de teneur en CO₂, trois autres iront dans un incubateur avec 20% de CO₂ et les trois derniers iront en chambre humide.

7.3.5 Cure à 48 heures et essai à 32 heures

Le tableau des variations des masses pour les blocs de béton à base de granulats recyclés se trouve en annexes. (Cf.10.3.3 page 134). Ces différents tableaux confirment que les blocs soumis à 0% de CO₂ en incubateur perdent de la masse constamment, comme c'était déjà le cas lors des précédents essais.

Les calculs effectués dans le Tableau 45 ont été effectués de la même manière qu'au Tableau 42 page 95.

Variables	Cube 1	Cube 2	Cube 3	Total
Masse initiale (g)	7212.40	6661.00	6720.80	20594.20
Masse finale (g) : 7 h	7217.80	6667.20	6725.80	20610.80
Masse d'eau perdue (g) : 7h	4.82	4.45	4.49	13.75
Masse du liant sec (g)	476.02	439.63	443.57	1359.22
Gain en masse (%) : 7 h	2.15	2.42	2.14	2.23
Masse finale (g) : 24 h	/	6671.00	6725.30	13396.30
Masse d'eau perdue (g) : 24 h	/	23.79	23.98	38.83
Gain en masse (%) : 24 h	/	7.68	6.42	7.05
Masse finale (g) : 32 h	/	6672.00	6723.40	13395.40
Masse d'eau perdue (g) : 32h	/	40.48	40.79	33.52
Gain en masse (%) : 32 h	/	11.71	9.78	10.75
Masse finale (g) : 48 h	/	6667.40	/	6667.40
Masse d'eau perdue (g) : 48h	/	112.72	/	72.24
Gain en masse (%) : 48 h	/	27.10	/	27.10

Tableau 45 : Quantification de l'absorption de CO₂ pour les blocs de béton à base de granulats recyclés

Nous constatons que les blocs captent donc presque 30% de CO₂ par rapport à la masse du liant sec, comme c'était déjà le cas dans le Tableau 42. Ce pourcentage est très intéressant et nous pouvons donc maintenant établir le graphique de l'évolution, en fonction du temps, de la quantification de l'absorption de CO₂.

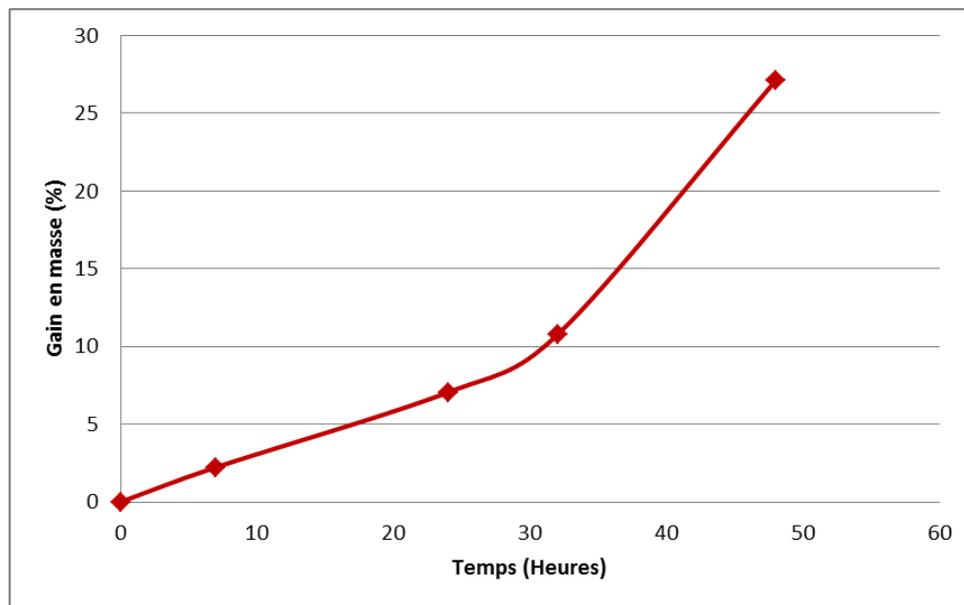


Figure 85 : Evolution de l'absorption de CO₂ en fonction du temps

Nous remarquons que l'absorption de CO₂ est linéaire dans les premières 24 heures, puis que cette dernière revêt une pente plus marquée qui prouve que **l'absorption de CO₂ continue de plus belle et qu'elle est non négligeable**. Notons que, d'après Monkman et Shao, après 2 heures de carbonatation accélérée à 50% de teneur en CO₂, il y a 10% d'absorption de CO₂ par le béton. Après 24 heures, nous sommes à 30% d'absorption de CO₂ avec une teneur de 20%. La quantification d'absorption de CO₂ observée ne nous paraît pas démesurée.

Les diagrammes charges et déplacements sont placés en annexes, section 10.4. page 135

Ces deux diagrammes nous montrent que, en incubateur à 20% de teneur en CO₂, entre 32 heures et 48 heures, il n'y a presque plus de variations en termes de charges. Les valeurs des résistances en compression obtenues dans le Tableau 46 sont **plus faibles, à 48 heures, que celles en chambre humide** (Cf. Tableau 47), mais elles sont **quand même probantes pour des blocs de béton**.

Heures	Contrainte maximum (N/mm^2)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
7	1.57	33.812	135	160	160
32	5.71	114.372	125	160	160
48	6.06	126.043	130	160	160

Tableau 46 : Résistance en compression des blocs à base de granulats recyclés – Incubateur (20%)

Heures	Contrainte maximum (N/mm^2)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
7	1.10	24.637	140	160	160
32	5.36	111.511	130	160	160
48	8.06	167.554	130	160	160

Tableau 47 : Résistance en compression des blocs à base de granulats recyclés – Chambre humide

Remarquons que les résistances en compression à 7 heures sont conformes à celles obtenues auparavant, qu'elles sont situées à l'intérieur de l'intervalle de confiance et que les résistances en compression obtenues à 48 heures sont de l'ordre de celles obtenues dans le Tableau 43 page 95 et le Tableau 44 page 96.

Heures	Contrainte maximum (N/mm^2)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
7	1.11	22.180	125	160	160
32	4.99	95.837	120	160	160
48	5.69	118.427	130	160	160

Tableau 48 : Résistance en compression des blocs à base de granulats recyclés – Incubateur (0%)

Remarquons encore une fois la proximité des résultats entre la cure en incubateur avec une teneur en CO_2 de 0% et la chambre humide. Cette proximité, par ailleurs, ne dure qu'un certain temps comme nous le constatons, sur la Figure 86. L'évolution de la résistance est très différente suivant le type de cure.

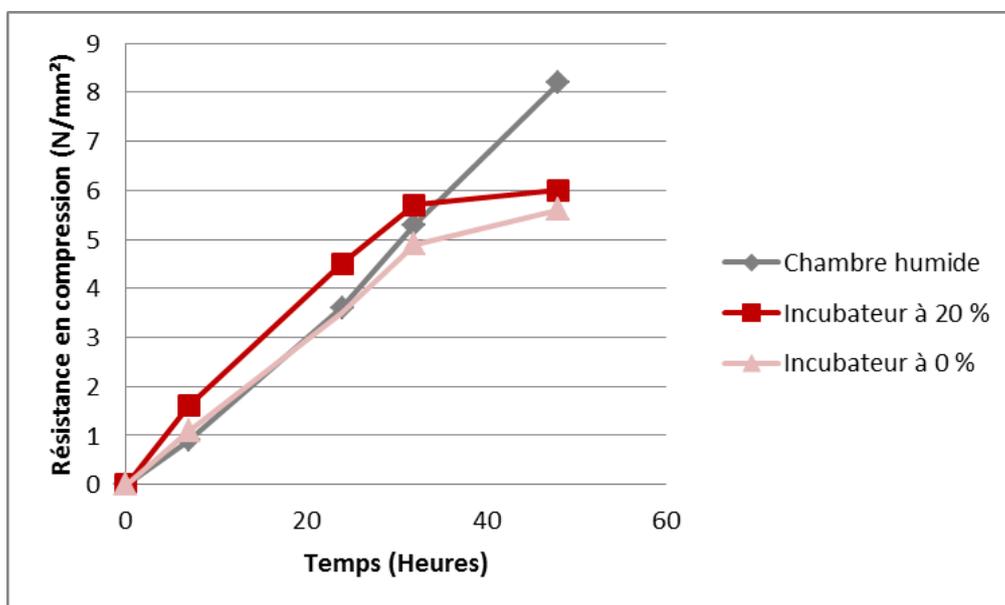


Figure 86 : Evolution de la résistance en compression en fonction du temps – Période de 48 heures

Finalement, **les échantillons placés dans un incubateur captent beaucoup de CO_2** et, pour les échantillons placés en chambre humide, nous supposons que le phénomène d'hydratation se produit plus idéalement. Ce phénomène se développe car l'humidité relative est de l'ordre de $95 \pm 2\%$, ce qui n'est pas le cas en incubateur. De ce fait, **les échantillons placés en chambre humide sont plus résistants à 48 heures de cure**. Par ailleurs, la captation de CO_2 joue tout de même un rôle en termes de résistance puisque les échantillons placés dans un incubateur avec 0% de teneur en CO_2 ont des résistances plus faibles à 48 heures.

Une suggestion est de voir ce qu'il se passe si on place des blocs de béton dans un incubateur avec une teneur en CO_2 plus grande que 20%. Ainsi, on pourrait peut-être observer un gain de résistance entre ceux qui ont été placés à l'incubateur et ceux qui ont été placés en chambre humide. Malheureusement, l'équipement du laboratoire ne nous permet pas de faire ce test.

7.3.6 Comparaison avec un bloc de béton traditionnel

Intéressons-nous, dans cette section, aux caractéristiques des blocs de béton dits traditionnels, c'est-à-dire à base de granulats naturels et comparons les aux blocs de béton à base de granulats recyclés.

En termes de quantification de l'absorption de CO₂, nous avons déjà constaté que le bloc de béton pourvu de granulats naturels ne peut absorber autant de CO₂ que le bloc de béton à base de granulats recyclés. En effet, la prise de masse due à la présence de CO₂, pour les blocs de béton à base de granulats naturels, ne dure qu'un certain temps dans l'incubateur. Ce phénomène est certainement dû au fait que les granulats recyclés peuvent encore absorber du CO₂. **Le CO₂ a donc l'air de n'avoir aucun intérêt sur les blocs de béton à base de granulats naturels** si ce n'est un certain gain de résistance pour la cure en incubateur dans les premières heures.

Pour les blocs à base de granulats recyclés, le CO₂ est bel et bien capté et provoque un intérêt en terme de résistance et ce, dans les premières heures. Après un certain temps, ce gain de résistance s'atténue.

Placer des blocs de béton à base de granulats naturels dans l'incubateur n'a donc aucun intérêt puisque, écologiquement parlant, **la captation de CO₂ n'est pas intéressante** et, économiquement parlant, **le processus est plus lourd** car il requiert la mise en place d'un dispositif particulier.

Depuis le Tableau 2 page 13, nous savons que, en règle générale, les blocs de béton pleins à base de granulats naturels atteignent des résistances en compression de l'ordre de 12 MPa et, ce après 14 jours de séchage, ce qui correspond à une classe de résistance en compression C12/15. (Tableau 49) Nous avons voulu vérifier que les blocs de béton à base de granulats recyclés réalisés au Laboratoire des Matériaux de Construction sont capables d'atteindre ces résistances dans des conditions similaires de cure.

Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique minimale sur cylindre (N/mm ²)	Résistance caractéristique minimale sur cubes (N/mm ²)
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20

Tableau 49 : Classe de résistance à la compression

Nous avons donc décidé de refaire des blocs avec la même composition que celle des bétons à base de granulats recyclés. Nous en avons fabriqués 8 et placés 4 en chambre humide et 4 en incubateur avec une teneur en CO₂ de 20%. Nous les avons laissés 48 heures dans leurs environnements respectifs et avons surveillé la variation des masses afin de s'assurer qu'elle était conforme à celle déjà observée. Nous en avons également testé deux à la compression au bout de 48 heures pour vérifier que les résistances en compression étaient similaires avec celles observées dans la section 7.3.4 page 94.

Après validation des variations des masses et des résistances en compression, nous les avons laissés séchés 14 jours à l'air et puis soumis au test de compression. Les essais de compression sont réalisés sur une autre machine, une presse hydraulique à pilotage manuel type Mohr et Federhaff (Cf. 6.7.2 page 64) car nous supposons que la machine Instron n'est pas capable de comprimer les blocs au vu des charges déjà atteintes après 48 heures.

Les résultats obtenus sont retranscrits dans le Tableau 50 et le Tableau 51.

Echantillon	Contrainte maximum (N/mm ²)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
1	12,59	278,000	138	160	160
2	12,75	255,000	125	160	160
3	12,45	267,000	134	160	160
Moyenne	12,60				
Ecart-type	0.06				

Tableau 50 : Résistance en compression des blocs à base de granulats naturels – Chambre humide

Echantillon	Contrainte maximum (N/mm^2)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
4	8,77	181,000	129	160	160
5	8,89	185,000	130	160	160
6	9,19	200,000	136	160	160
Moyenne	8,95				
Ecart-type	0.11				

Tableau 51 : Résistance en compression des blocs à base de granulats naturels – Incubateur (20% de CO₂)

Nous voyons que la reproductibilité des résultats, autant pour les blocs en chambre humide que pour les blocs en incubateur, est présente, même après un séchage de 14 jours, ce qui renforce encore notre démarche de travail.

Nous constatons également que les résistances en compression obtenues sont bien plus importantes pour les blocs de béton ayant subi une cure en chambre humide que ceux ayant subi une cure en incubateur, ce qui suit les résultats obtenus à 48 heures. De plus, les résistances obtenues pour les blocs en chambre humide sont tout à fait comparables avec celles obtenues en entreprise, comme l'indiquait le Tableau 2 page 13 puisque nous sommes aux alentours de 12 MPa. Par ailleurs, **nous ne pouvons pas dire que les blocs de béton ayant été placés à l'incubateur ont des mauvaises résistances**. Ils sont même plutôt bons puisque certains blocs creux fabriqués en entreprise (Cf. Tableau 1 page 13) obtiennent des résistances comparables à celles-là.

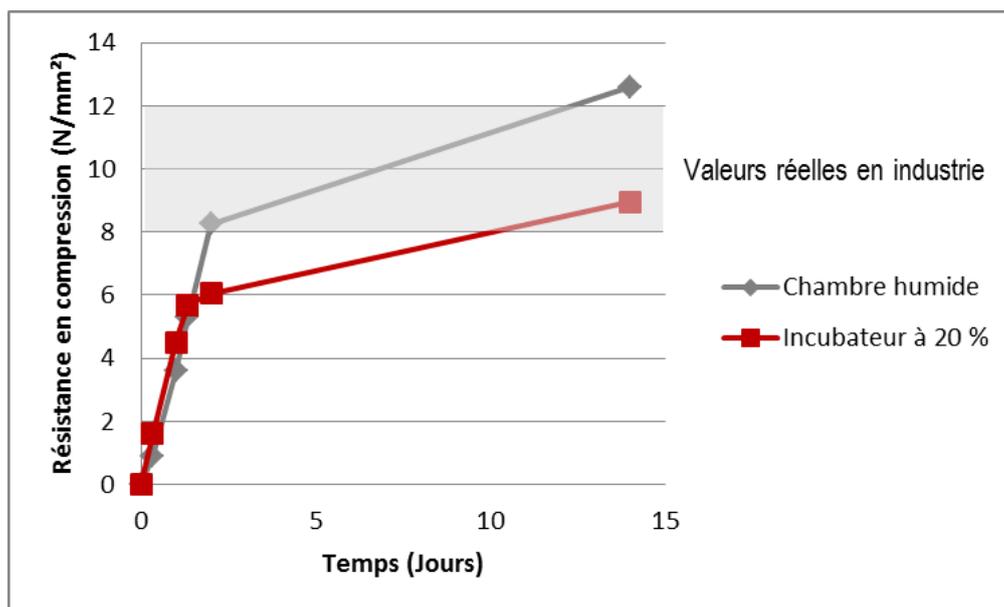


Figure 87 : Evolution de la résistance en compression en fonction du temps – Période de 14 jours

Observons, sur la Figure 87, l'évolution de la résistance en compression en fonction du temps, sur la période de 14 jours. Nous constatons donc que le gain de résistance entre 48 heures et 14 jours suit une droite linéaire dont la pente, autant pour les blocs ayant subi une cure en chambre humide que pour les blocs ayant subi une cure en incubateur à 20%, est similaire. C'est donc bel et bien l'effet d'inversion de la tendance entre 24 heures et 48 heures dont nous parlions précédemment qui est à l'origine de cette différence de résistance sur le long terme.

7.4 Effet de la carbonatation sur les blocs de béton à base de granulats recyclés carbonatés

L'essai de carbonatation accéléré a été testé, en second lieu, sur les blocs bétons à base de granulats recyclés carbonatés. Ces granulats ont été placés, préalablement, pendant 7 heures, dans un incubateur avec 20% de CO₂. Les résultats de résistances à l'abrasion les concernant sont évoqués dans la section 7.1.2 page 75.

Les variations des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de granulats recyclés carbonatés sont au Tableau 52 et au Tableau 53.

Temps	H.R (%)	T° (°C)	Masse (g)				
			Cube 1	Cube 2	Cube 3	Gel de silice	Solution saline
Départ	72.7	21.3	6298.60	6126.80	6620.20	200.00	2095.02
1 heure	92.9	21.6	6305.00	6132.20	6626.20	201.85	2096.15
3 heures	93.8	21.6	6306.20	6133.60	6626.60	203.96	2099.07
7 heures	94.2	21.5	6305.20	6132.60	6624.00	206.76	2105.32

Tableau 52 : Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de granulats recyclés carbonatés – Incubateur (20%)

Temps	Masse (g)		
	Cube 4	Cube 5	Cube 6
Départ	6204.60	6257.60	6777.20
1 heure	6207.00	6259.00	6780.00
3 heures	6205.80	6257.80	6779.20
7 heures	6204.40	6255.80	6777.20

Tableau 53 : Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de granulats recyclés carbonatés – Chambre humide

Nous constatons déjà que l'évolution des masses des blocs à base de granulats recyclés carbonatés est similaire à celle des blocs à base de granulats recyclés non carbonatés.

7.4.1 Cure en chambre humide

Résistance en compression

Même si l'évolution des masses enregistrées est très similaire à celles des blocs de béton à base de granulats recyclés, les résistances en compression ne le sont pas. Effectivement, même si la Figure 88 nous montre que la reproductibilité est toujours présente dans ce type de bloc, le Tableau 54 nous indique une résistance moyenne en compression de l'ordre de 0.53 MPa.

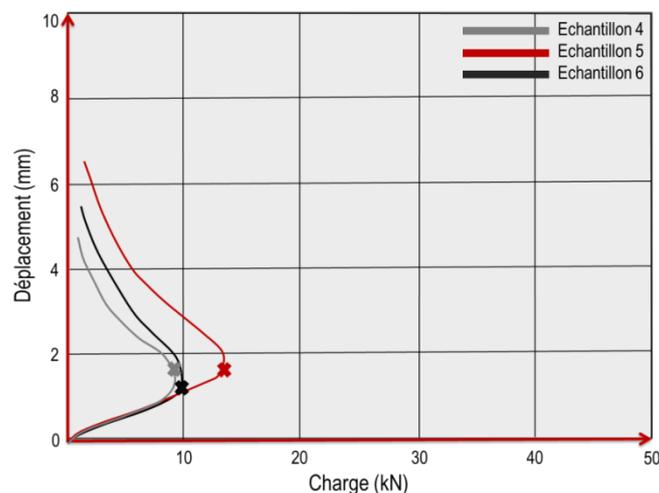


Figure 88 : Charges et déplacements des blocs à base de granulats recyclés carbonatés – Chambre humide – 7 heures

Cette valeur moyenne de résistance en compression était beaucoup plus élevée pour les blocs de béton à base de granulats recyclés non carbonatés. (Cf. Tableau 37 page 91)

Echantillon	Contrainte maximum (N/mm^2)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
4	0.46	9.14	125	160	160
5	0.68	13.12	120	160	160
6	0.46	9.62	130	160	160
Moyenne	0.53				
Ecart-type	0.05				

Tableau 54 : Résistance en compression des blocs à base de granulats recyclés carbonatés – Chambre humide

Nous constatons donc que, d'une résistance de l'ordre de 1 MPa, nous passons à une résistance de 0.5 MPa alors que le seul changement existant dans ce type de blocs de béton, c'est la carbonatation des granulats.

Ce qui est très surprenant, c'est que les essais au Micro-Deval ne présageaient pas qu'il existe une différence aussi importante entre ces deux types de blocs de béton.

Nous pouvons donc conclure que **carbonater des granulats recyclés n'est pas idéal en termes de résistance en compression**. De plus, la mise en place d'un processus préalable à la fabrication des blocs de béton est souvent à proscrire car, économiquement et écologiquement parlant, ça n'est jamais très avantageux.

Il serait intéressant de s'attarder sur les causes de cette diminution brutale de résistance avec l'utilisation de granulats recyclés carbonatés mais, malheureusement, nous n'avons pu explorer cette piste puisqu'il n'y avait plus de granulats en suffisance.

7.4.2 Cure en incubateur à 20% de CO₂

Quantification de l'absorption de CO₂ par variation de masse

Nous quantifions l'absorption de CO₂ de la même manière que précédemment et nous obtenons les résultats suivants :

Variables	Cube 1	Cube 2	Cube 3	Total
Masse initiale (g)	6298.60	6126.80	6620.20	19045.60
Masse finale (g)	6305.20	6132.60	6624.00	19058.80
Masse d'eau perdue (g)	5.64	5.48	5.93	17.06
Masse du liant sec (g)	415.70	404.37	436.93	1257.00
Gain en masse (%)	2.94	2.79	2.23	2.65

Tableau 55 : Quantification de l'absorption de CO₂ pour les blocs de béton à base de granulats recyclés carbonatés

La quantification d'absorption de CO₂ est satisfaisante. Ce résultat est probant car il nous permet d'affirmer que la carbonatation a bien lieu, avec des granulats recyclés carbonatés ou non.

Quantification de l'absorption de CO₂ par thermogravimétrie

Quantifications, pour la seconde fois, l'absorption de CO₂ par thermogravimétrie afin de renforcer les résultats obtenus en 7.3.2 page 84.

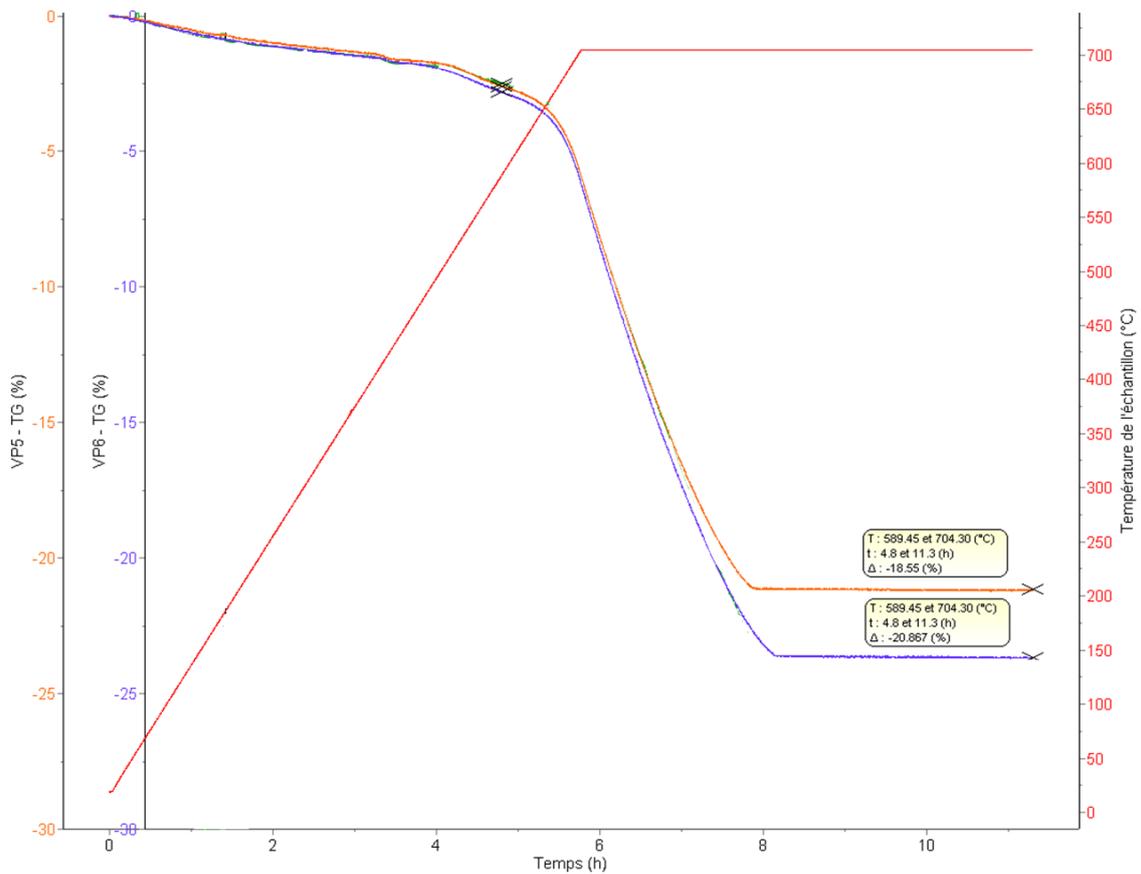


Figure 89 : Quantification d'absorption de CO₂ par thermogravimétrie

L'échantillon en orange est le béton de départ qui n'a pas subi 7 heures de cure de carbonatation accélérée. L'échantillon en bleu est un morceau du bloc de béton qui a subi 7 heures de carbonatation accélérée dans l'incubateur avec 20% de CO₂.

La différence entre les deux nous donne la quantification d'absorption de CO₂ qui est donc la suivante :

$$20.867\% - 18.55\% = 2.32\%$$

Nous constatons donc que **la quantification d'absorption de CO₂ par thermogravimétrie est très proche de la quantification d'absorption de CO₂ par variation de la masse** puisque nous obtenons, d'une part, 2.32% et, d'autre part, 2.65%.

Nous remarquons, finalement, que l'échantillonnage dont nous parlons déjà auparavant, est très important.

Résistance en compression

La reproductibilité des échantillons est toujours bien présente, comme nous l'indique la Figure 90 mais **les résultats de résistance en compression** (Cf. Tableau 56) **sont peu intéressants.**

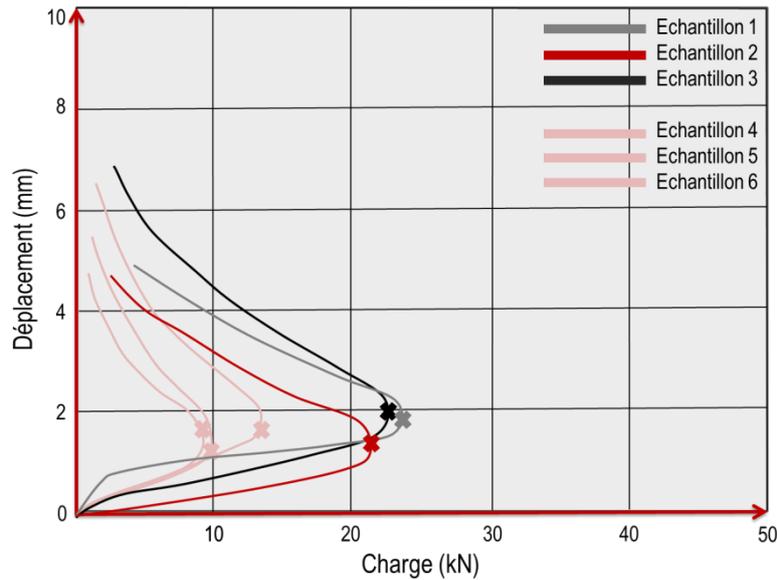


Figure 90 : Charges et déplacements des blocs à base de granulats recyclés carbonatés – Incubateur (20%) – 7 heures

Echantillon	Contrainte maximum (N/mm^2)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
1	1.14	23.65	130	160	160
2	0.80	16.13	125	160	160
3	1.09	22.64	130	160	160
Moyenne	1.01				
Ecart-type	0.08				

Tableau 56 : Résistance en compression des blocs à base de granulats recyclés carbonatés – Incubateur (20%)

Nous constatons que, même si les blocs de béton placés à l'incubateur donnent de meilleures résistances en compression que ceux placés en chambre humide, les résultats ne sont pas ceux que l'on aurait pu espérer. Les résistances obtenues dans cette section sont de l'ordre de 1MPa alors que, pour des blocs de béton à base de granulats recyclés carbonatés, nous obtenions des résistances de l'ordre de 1.5 MPa, soit une augmentation de 50%.

Nous supposons que les granulats recyclés ont été carbonatés en tout ou en partie par leurs passages dans l'incubateur et que cette cure provoque un effet négatif sur eux, effet qu'on ne peut détecter par l'essai Micro-Deval, mais qui permet tout de même l'absorption de CO_2 . Cet effet crée une diminution de résistance par rapport aux blocs de béton à base de granulats recyclés non carbonatés. Si les granulats ont été totalement carbonatés, nous pouvons dire que la perte de résistance est en lien avec le fait que seule la pâte de ciment au sein du bloc de béton peut absorber du CO_2 . Il y a donc moins d'endroits possibles d'absorption du CO_2 lorsque la pâte absorbe seule que quand les granulats peuvent absorber aussi. Une analyse de la microstructure du granulats recyclés carbonatés serait intéressante à comparer avec une analyse de la microstructure du granulats recyclés non carbonatés. S'il s'avère que le granulats recyclés peuvent encore capter du CO_2 lorsqu'il est inséré dans le bloc de béton et que cet effet engendre des différences de résistance en compression sur le bloc fini, **alors il n'est pas probant d'utiliser des granulats recyclés ayant subi une cure de carbonatation préalable d'une durée de 7 heures.**

7.5 Effet de la carbonatation sur les blocs de béton à base de miscanthus

Après avoir fabriqués des blocs à base de granulats recyclés, nous avons fabriqués des blocs à base de fibres végétales de type miscanthus. Ces fibres ont été préminéralisées puis insérées dans le béton.

Les blocs élaborés à partir de ces granulats de miscanthus ont été analysés de la même façon que les blocs précédents. Voici donc les résultats obtenus en termes de variation de masses, pour les deux types de cure (Cf. Tableau 57 et Tableau 58).

Temps	Masse (g)	
	Cube 1	Cube 2
Départ	1760.40	1913.80
1 heure	1766.60	1915.60
3 heures	1766.60	1915.20
7 heures	1767.20	1916.20

Tableau 57 : Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de fibres végétales non carbonatées – Chambre humide

Temps	Masse (g)						
	H.R (%)	T° (°C)	Cube 3	Cube 4	Cube 5	Gel de silice	Solution saline
Départ	53.3	21.7	1893.20	1801.20	1691.80	200.00	2386.40
1 heure	83.4	21.4	1897.20	1804.00	1694.80	202.00	2387.60
3 heures	90.6	21.4	1897.60	1803.80	1695.40	203.20	2389.80
7 heures	90.7	21.4	1896.80	1802.80	1694.80	205.80	2394.00

Tableau 58 : Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de fibres végétales non carbonatées – Incubateur (20%)

Observons que les blocs de béton à base de **fibres miscanthus minéralisées suivent la même tendance, en termes de variation des masses, que les blocs de béton à base de granulats recyclés.**

Notons également qu'il n'y a que 5 cubes. En fait, un problème s'est posé pendant la fabrication de ces blocs de sorte qu'il n'y avait plus assez de matériaux quand nous l'avons résolu.

Il serait important d'optimiser la composition des blocs de béton à base de fibres végétales de type miscanthus. Au départ, c'est la composition établie par William Rosolen que nous développons en 6.5.2 page 57 qui a été utilisée. Seulement, au vu de l'aspect beaucoup trop liquide, comme le montre les photos ci-dessous, nous avons décidé de partir sur une autre composition, semblable à la première mais pour laquelle on a beaucoup moins d'eau.



Photo 58 : Mélange trop liquide



Photo 59 : Mélange trop liquide



Photo 60 : Après 1^{re} vibration



Photo 61 : Après 2^{ème} vibration



Photo 62 : Après démoulage

Nous constatons que la composition n'est pas adaptée. Toute l'eau introduite dans le mélange s'échappe lors de la vibration et, une fois le démoulage effectué, les blocs s'effondrent.

Sur base de la Figure 91, nous décidons de mettre 1kg de ciment pour 0.75 l d'eau, une alternative entre la « superglu » et la « colle à tapisser ». Nous décidons donc de diviser la quantité d'eau par deux, comme indiqué dans le Tableau 59.

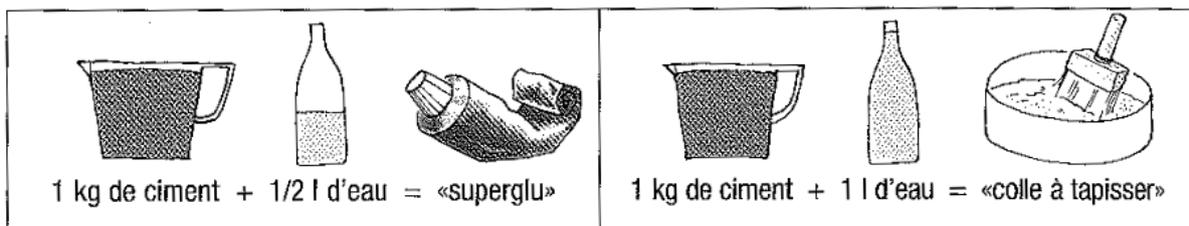


Figure 91 : Relation entre eau et ciment (Courard, 2011)

Composants	Quantités (%)	Quantités proposées par W. Rosolen (g)	Quantités en laboratoire pour six blocs (Kg)
Miscanthus minéralisés	49.18	150	8
Eau (mouillage et gâchage)	21.31	65	1.73
Ciment Portland (CEM I 52.5 N)	29.51	90	4.82

Tableau 59 : Nouvelle composition des blocs de béton à base de fibres végétales de type miscanthus

Le choix de cette modification de composition est adapté car nous obtenons des blocs qui sont démoulables.



Photo 63 : enlèvement d'une paroi du moule



Photo 64 : enlèvement de toutes les parois



Photo 65 : bloc de béton

7.5.1 Cure en chambre humide

Résistance en compression

Après l'essai de compression, les blocs restent, d'apparence, entiers. Nous constatons que les résistances en compression obtenues sont très faibles.

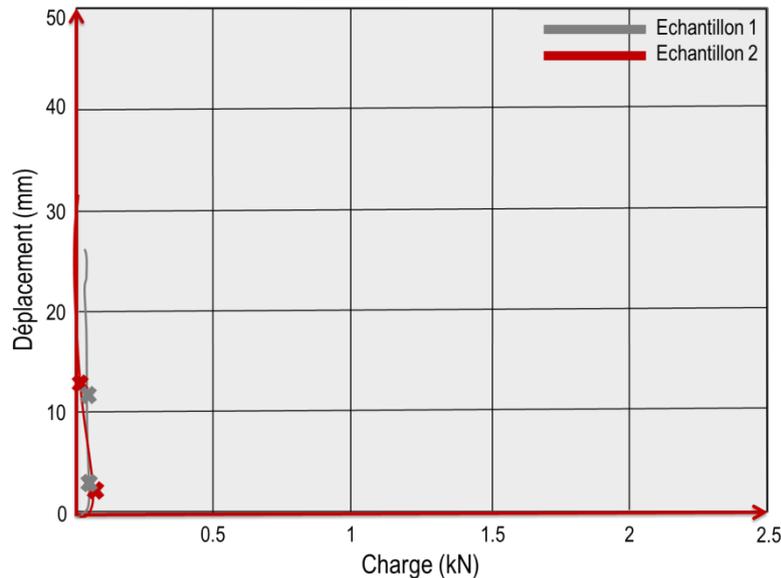


Figure 92 : Charges et déplacements des blocs à base de fibres végétales de type miscanthus – Chambre humide – 7 heures

Heureusement, pour les essais exécutés dans cette section, la reproductibilité est très présente et cela est confirmé par le Tableau 60 qui indique que les deux seuls blocs que nous avons conçus donnent exactement la même résistance en compression.

Echantillon	Contrainte maximum (N/mm^2)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
1	0.0091	0,145	100	160	160
2	0.0091	0,138	95	160	160
Moyenne	0.0091				
Ecart-type	0.0000				

Tableau 60 : Résistance en compression des blocs à base de fibres végétales de type miscanthus - Chambre humide – 7 heures

7.5.2 Cure en incubateur à 20% de CO₂

Quantification de l'absorption de CO₂ par variation de masse

Nous quantifions l'absorption de CO₂ de la même façon que précédemment. Il importe de noter que la masse du liant sec prise en compte est celle introduite dans le bloc de béton de départ même si, théoriquement, il y a aussi du ciment dans les fibres végétales puisqu'elles ont été préminéralisées.

Variables	Cube 3	Cube 4	Cube 5	Total
Masse initiale (g)	1893.20	1801.20	1692.20	5386.60
Masse finale (g)	1896.80	1802.80	1694.80	5394.40
Masse d'eau perdue (g)	4.71	4.48	4.21	13.40
Masse du liant sec (g)	558.68	531.53	499.37	1589.58
Gain en masse (%)	1.49	1.14	1.36	1.33

Tableau 61 : Quantification de l'absorption de CO₂ pour les blocs de béton à base de fibres végétales minéralisées non carbonatées

Nous remarquons que l'absorption de CO₂ dans les blocs de béton à base de fibres miscanthus **n'est pas aussi importante que l'absorption de CO₂ que nous calculions dans les blocs de béton à base de granulats recyclés**. En effet, cette absorption de CO₂ est doublée dans le cas de blocs de béton à base de granulats recyclés.

Résistance en compression

Nous constatons, sur la Figure 93, que les échantillons 1 et 2 correspondant aux charges et déplacements des échantillons en chambre humide sont beaucoup plus faibles que les échantillons 3, 4 et 5 placés en incubateur.

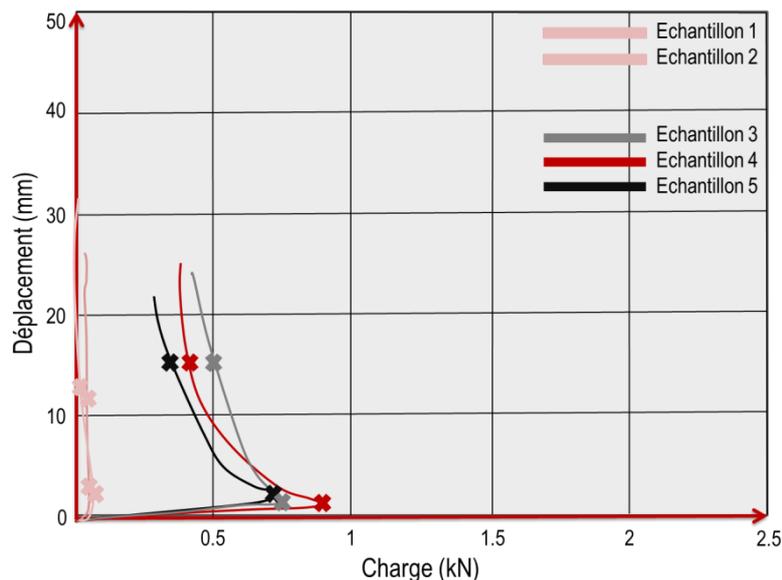


Figure 93 : Charges et déplacements des blocs à base de fibres végétales de type miscanthus – Incubateur (20%) – 7 heures

La résistance moyenne en compression des blocs de béton à base de fibres végétales placés en incubateur avec une teneur en CO₂ de 20% est **5 fois plus importante que celle des blocs de béton placés en chambre humide**. Ceci est confirmé par le Tableau 62 qui indique une résistance moyenne en compression de 0.05 MPa.

Echantillon	Contrainte maximum (N/mm^2)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
3	0.0522	0.836	100	160	160
4	0.0689	0.992	90	160	160
5	0.0546	0.787	90	160	160
Moyenne	0.0586				
Ecart-type	0.0042				

Tableau 62 : Résistance en compression des blocs à base de fibres végétales de type miscanthus – Incubateur (20%)

Notons tout de même que **l'ensemble des résistances obtenues pour ces blocs de bétons à base de fibres végétales sont peu intéressantes**. Elles sont vraiment très faibles par rapport aux blocs de béton à base de granulats recyclés même si nous sommes conscients qu'il ne s'agit pas de la même composition et que l'utilisation d'un bloc de granulats recyclés plutôt qu'un bloc à base de fibres végétales ne trouvera pas la même utilisation dans le domaine de la construction.

L'amélioration significative de résistance par rapport à la chambre humide est intéressante en soi dans la mesure où ces blocs pourraient être utilisés comme blocs isolants dans les bâtiments et donc il pourrait être intéressant d'approfondir la recherche de ce côté.

7.6 Effet de la carbonatation sur les blocs de béton à base de miscanthus carbonatés

Inquiétons-nous de l'effet que pourrait avoir une cure de carbonatation accélérée sur les blocs de béton à base de fibres végétales minéralisées et carbonatées. Les tableaux des variations des masses sont placés en annexes. (Cf. chapitre 10.5 page 135) Ces tableaux nous montrent l'évolution tout à fait comparable avec l'évolution enregistrée pour les blocs de béton à base de miscanthus minéralisés non carbonatés.

7.6.1 Cure en chambre humide

Résistance en compression

La résistance moyenne en compression obtenue en chambre humide **est plus intéressante** que celle obtenue pour les blocs de béton à base de fibres non carbonatées en chambre humide. Nous obtenons une résistance moyenne en compression de l'ordre de 0.0091 (Cf. Tableau 60 page 108) et nous obtenons une résistance moyenne en compression de 0.029 (Tableau 63), plus du triple.

Echantillon	Contrainte maximum (N/mm^2)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
4	0.0275	0.594	135	160	160
5	0.0285	0.593	130	160	160
6	0.0314	0.628	125	160	160
Moyenne	0.0290				
Ecart-type	0.0009				

Tableau 63 : Résistance en compression des blocs à base de fibres végétales de type miscanthus – Chambre humide

La reproductibilité est assurée, comme nous le constatons, en annexes, au chapitre 10.6 page 136.

7.6.2 Cure en incubateur à 20% de CO₂

Quantification de l'absorption de CO₂ par variation de masse

Nous quantifions l'absorption de CO₂ de la même façon que pour les blocs à base de fibres végétales de type miscanthus préminéralisées non carbonatées.

Variables	Cube 3	Cube 4	Cube 5	Total
Masse initiale (g)	2594.60	2692.60	2533.40	7820.60
Masse finale (g)	2599.80	2696.40	2538.00	7834.20
Masse d'eau perdue (g)	5.77	5.99	5.63	17.40
Masse du liant sec (g)	765.67	794.59	747.61	2307.87
Gain en masse (%)	1.43	1.23	1.37	1.34

Tableau 64 : Quantification de l'absorption de CO₂ pour les blocs de béton à base de fibres végétales minéralisées carbonatées

L'absorption de CO₂ par ces blocs de béton **est très comparable avec les blocs qui ont été fabriqués à base de fibres miscanthus minéralisées non carbonatées**. La valeur moyenne est de 1.34% alors qu'elle était proche de 1.33% auparavant. (Cf. Tableau 61 page 108)

Résistance en compression

La résistance moyenne en compression de ces blocs (Tableau 65) est presque **7 fois plus importante que les blocs placés en chambre humide**. (Tableau 63) Elle est également **4 fois plus importante** que celle des blocs de béton à base de fibres végétales minéralisées non carbonatées **placés en incubateur**. (Tableau 62)

Echantillon	Contrainte maximum (N/mm^2)	Charge maximum (kN)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)
1	0.202	4.517	140	160	160
2	0.209	4.672	140	160	160
3	0.205	4.272	130	160	160
Moyenne	0.205				
Ecart-type	0.002				

Tableau 65 : Résistance en compression des blocs à base de fibres végétales de type miscanthus – Incubateur (20%)

Le diagramme charges et déplacements de la Figure 94 est très particulier. Nous constatons la reproductibilité des échantillons 1, 2 et 3 placés en incubateur et nous remarquons la nette différence avec les échantillons placés en chambre humide (4, 5, 6). Nous remarquons aussi une allure de courbe typique. Dans le cas de béton léger comprenant des granulats de faible résistance, les contraintes progressent à travers la pâte, contournant les « points faibles » du matériau. Cela a pour effet de provoquer des déformations importantes dans la pâte de ciment et les granulats. Une fois écrasés, les granulats ne peuvent plus participer à la résistance du matériau et le mortier finit par céder. Dans ces blocs de béton à base de fibres végétales, c'est donc le granulat qui cède et non la liaison au niveau de la surface de contact qui est détruite. Dans ce cas-ci, nous supposons donc que les granulats cèdent en premier puis que la pâte de ciment peut reprendre les charges supplémentaires. Ce qui est surprenant, c'est que nous n'observons pas ce type d'allure pour les blocs de béton à base de granulats non carbonatés. Nous supposons qu'une **liaison importante se fait entre la pâte de ciment et le granulat de miscanthus carbonaté, liaison qui permet d'obtenir des résistances en compression plus importantes**.

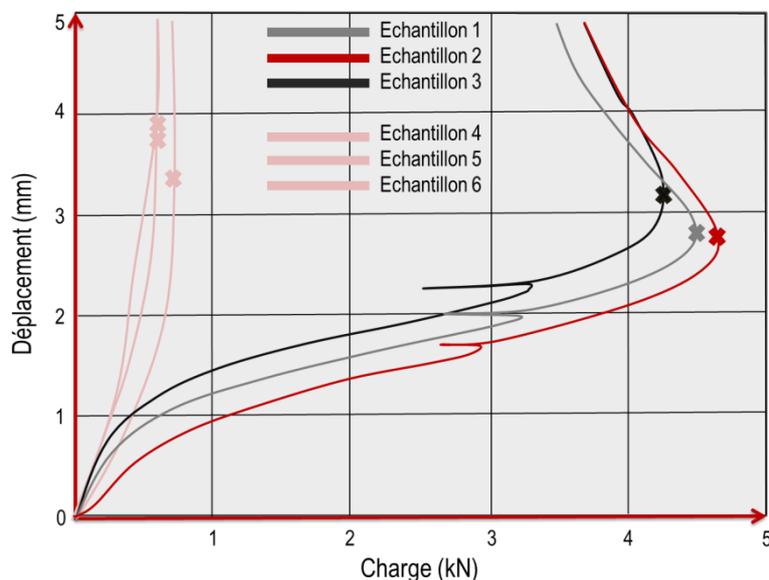


Figure 94 : Charges et déplacements des blocs à base de fibres végétales de type miscanthus – Incubateur (20%) – 7 heures

Au final, la différence que nous évoquions dans les résultats de l'essai Micro-Deval au niveau des différents granulats est bien présente au sein des blocs de béton composés de ces granulats. Nous supposons que les granulats sont donc beaux et bien à l'origine de cette différence. Il ne serait pas inintéressant d'approfondir cette trouvaille.

La différence qu'il existe dans les résultats trouvés dans cette section par rapport à ceux trouvés pour les blocs de béton à base de granulats recyclés réside essentiellement dans l'avantage de carbonater les fibres végétales. Les tendances évoquées pour les granulats recyclés carbonatés ou non entre la chambre humide et l'incubateur sont toujours d'application, après 7 heures de cure. Bien sûr, les blocs de béton à base de fibres végétales de type miscanthus n'offrent pas la même résistance.

7.7 Comparaison des deux méthodes de quantification de l'absorption de CO₂

Afin de comparer les deux méthodes de quantification de l'absorption de CO₂, les trois prélèvements explicités dans le chapitre 6.7.3 page 64 ont été effectués et permettent de voir l'efficacité de la méthode calculatoire donnée par Monkman et Shao (Monkman, et al., 2010). Nous comparons donc les résultats obtenus par variation de la masse avec ceux obtenus par thermogravimétrie.

7.7.1 Quantification de l'absorption de CO₂ par variation de la masse de l'échantillon

Les échantillons analysés donnent les résultats suivants.

Variables	Cube 4	Cube 5	Cube 6	Total
Masse initiale (g)	6641.80	6645.20	6802.20	20089.20
Masse finale (g)	6647.80	6650.80	6807.80	20106.40
Masse d'eau perdue (g)	7.47	7.48	7.65	22.6
Masse du liant sec (g)	438.36	438.58	448.95	1325.89
Gain en masse (%)	3.07	2.98	2.95	3.00

Tableau 66 : Quantification de l'absorption de CO₂ pour les blocs de béton à base de granulats recyclés

7.7.2 Quantification de l'absorption de CO₂ par analyse thermogravimétrique

Les résultats de l'analyse thermogravimétrique sont illustrés sur la Figure 95.

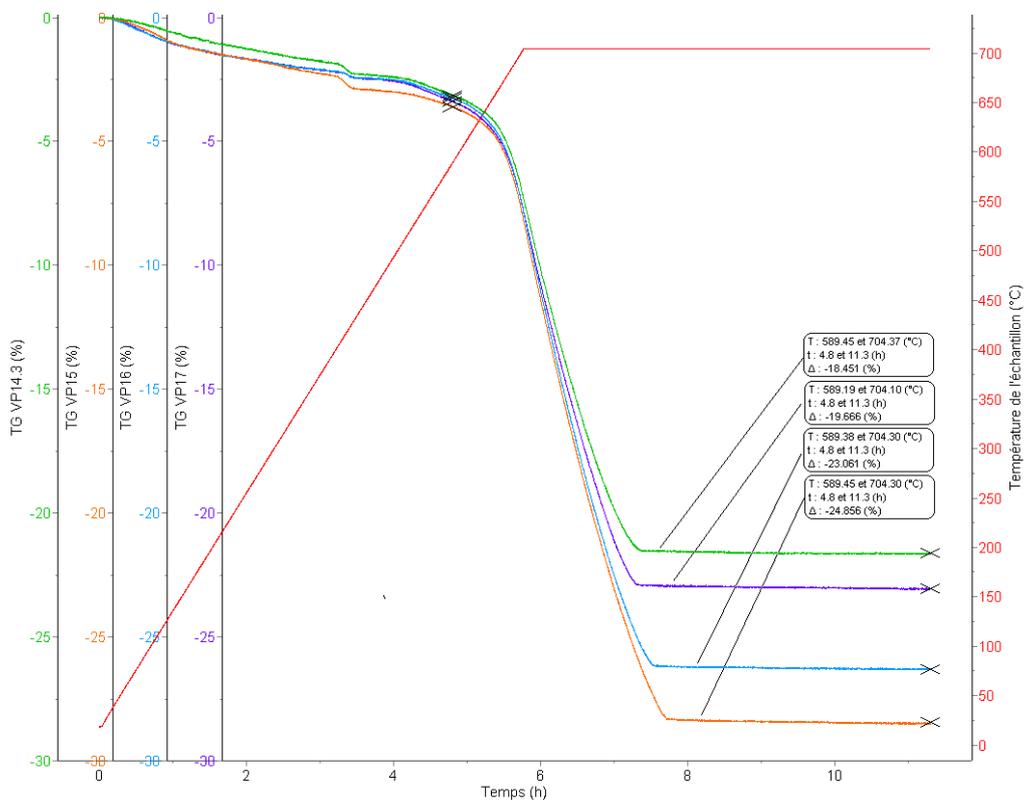


Figure 95 : Quantification d'absorption de CO₂ par thermogravimétrie

Nous quantifions l'absorption de CO₂ par analyse thermogravimétrique en effectuant la différence entre le pourcentage de CO₂ présent dans l'échantillon de départ et le pourcentage de CO₂ présent dans l'échantillon final.

Courbe concernée	Situation	Profondeur du bloc (cm)	Gain en masse (%)
Verte	Départ	/	0.00
Mauve	8h en incubateur : Centre du bloc	8	1.21
Bleue	8h en incubateur : Milieu du bloc	4	4.61
Orange	8h en incubateur : Extrémité du bloc	0	6.40

Tableau 67 : Quantification de l'absorption de CO₂ par analyse thermogravimétrique

Les résultats obtenus ci-avant nous paraissent cohérents dans la mesure où l'absorption de CO₂ évolue en fonction de la profondeur du bloc, comme le montre la Figure 96.

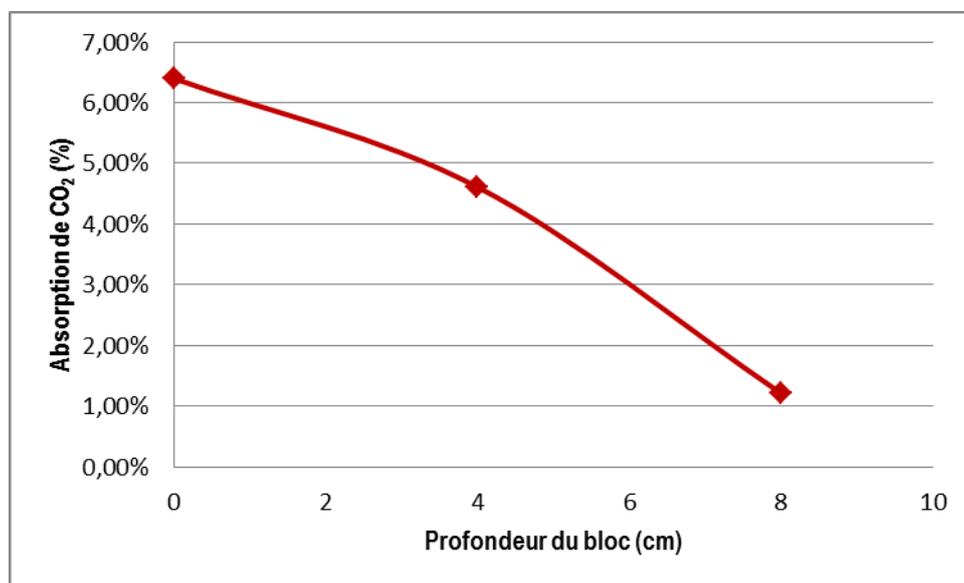


Figure 96 : Evolution de l'absorption de CO₂ en fonction de la profondeur du bloc

Les résultats obtenus par variation de masse nous indiquaient un pourcentage de CO₂ de l'ordre de 3%, ce qui correspond à ce qui est obtenu par thermogravimétrie entre l'échantillon du centre du bloc et celui étant compris entre le centre du bloc et son extrémité.

D'après l'investigation réalisée ci-avant, les résultats obtenus par variation de la masse correspondraient à un échantillon prélevé à 6 cm de l'extrémité du bloc.

Les mesures par variation de la masse ne nous semblent pas démesurées comparées à celles effectuées par thermogravimétrie. Certes, nous n'obtenons pas tout à fait les mêmes pourcentages et il est logique qu'on soit relativement éloigné du pourcentage trouvé à l'extrémité du bloc tant la carbonatation n'est pas uniformisée au sein du bloc et que celle-ci tend à diminuer lorsqu'on se rapproche du centre du bloc. A l'avenir, il serait peut-être judicieux de combiner une mesure simultanée de la variation de la masse et une mesure de l'évolution de la profondeur de carbonatation. Ceci permettrait d'établir un rapport entre les valeurs obtenues par les mesures de variations de masses et la profondeur de carbonatation.

Nous concluons donc que la **mesure par variation de la masse**, beaucoup moins onéreuse en termes de temps et d'argent que l'analyse par thermogravimétrie, **constitue une belle approche de quantification d'absorption de CO₂ et valide les résultats des investigations établies auparavant.**

7.8 Etude préliminaire de l'impact environnemental des blocs de béton

Le bilan environnemental est réalisé pour les blocs de béton à base de granulats recyclés non carbonatés ; ceux-ci étant les plus intéressants parmi les différents tests entrepris dans les sections précédentes.

7.8.1 Caractérisation des données principales

Frontière de l'étude

Les étapes du cycle de vie sont illustrées sur la Figure 97.



Figure 97 : Etapes du cycle de vie

Nous établissons une analyse de cycle de vie de type « Cradle to gate »²⁶ car nous considérons que les étapes après celle de la production sont exactement les mêmes, que ce soit pour un bloc de béton à base de granulats recyclés ayant subi une cure de carbonatation accélérée en incubateur ou un bloc de béton ayant subi une cure en chambre humide.

Le procédé de production en usine inclut les étapes mentionnées à la page 45, Figure 53.

Unité fonctionnelle

Nous comparons 1m³ de blocs de béton à base de granulats recyclés subissant une cure de carbonatation accélérée avec 1m³ de blocs de béton à base de granulats recyclés subissant une cure en chambre humide ; les deux cures durant toutes les deux 48 heures.

Variables	Unité	Bloc de béton à base de granulats recyclés	
		Cure en chambre humide	Cure en incubateur 20% de CO ₂
Energie renouvelable	MJ	?	?
Energie non renouvelable	MJ	?	?
Potentiel de réchauffement global	Kg éq. CO ₂	?	?
Sables	Kg	814.8	814.8
Agrégats	Kg	966.4	966.4
Eau	Kg	105.0	105.0
Ciment	Kg	132.6	132.6

} Unité fonctionnelle cohérente

Tableau 68 : Définition de l'unité fonctionnelle

Références

Références ICV (Inventaire du Cycle de Vie)

L'évaluation des impacts environnementaux est fonction de la qualité des données disponibles. Nous utiliserons les valeurs de la base de données de (Stripple, 2001) comme référence de base. Ces données correspondent à l'évaluation de l'impact pour 1m³ de béton à base de granulats concassés.

²⁶ Il s'agit de prendre en compte la fabrication du bloc, du berceau à la porte de l'usine.

	Par m ³ de béton produit		Par kg		
	Energie	Diesel et entretien des véhicules	Extraction granulats concassés	Extraction gravier/sable	Production de ciment
Energie renouvelable (MJ)	7.860	/	0.01	0.001127143	0.18325
Energie non renouvelable (MJ)	0.669	55.3	0.00085	9.571E-05	3.875
Emissions dans l'air (g)					
CO	0.03510	4.14	0.001491667	7.35714E-05	0.00082
NO _x	0.15400	34.6	0.01225	0.000597143	2.0025
SO _x	0.11200	1.85	0.0007875	4.67143E-05	1.0025
CH ₄	0.00234	0.00243	3.81667E-06	3.75714E-07	0.0000545
CO ₂	63.5000	3850	1.425	0.072714286	807.5
N ₂ O	0.00702	0.0779	3.60833E-05	0.0000023	0.00016375

Tableau 69 : Evaluation de l'impact environnemental d'un m³ de béton à base de granulats concassés (Stripple, 2001)

L'inventaire du cycle de vie de granulats concassés comprend la roche dynamitée, abattue puis transportée par un véhicule d'entretien à moteur diesel ainsi que le broyage et le tamisage de la roche abattue pour devenir le produit final. (Stripple, 2001)

L'inventaire du cycle de vie du gravier et du sable naturel prend en compte l'extraction en utilisant un chargeur sur roues puis le transport sur des camions chargeurs ainsi que la consommation d'électricité sur le site. (Stripple, 2001)

L'analyse des données d'inventaire pour le ciment comprend des données provenant de l'exploitation du produit jusqu'aux portes de l'usine. (Stripple, 2001)

Nous vérifierons la pertinence de cette base de données en la comparant avec celle de (Buzzi Unicem, 2007) et celle de l'INIES (INIES, 2009) afin de se rendre compte des valeurs minimales et maximales des impacts environnementaux.

Nous comparerons également les valeurs obtenues avec celles des granulats recyclés.

Gaz	Traitement des granulats recyclés, par kg
Emissions dans l'air (g)	
CO	0.004274
NO _x	0.019163
SO _x	0.006700
CH ₄	0.001594
CO ₂	1.694905
N ₂ O	0.000067

Tableau 70 : Evaluation de l'impact environnemental d'un m³ de béton à base de granulats recyclés (GEMIS data)

Références des facteurs de caractérisation

Dans cette première approche, les catégories d'impacts étudiés dans ce travail sont la consommation d'énergie renouvelable et non renouvelable et le potentiel de réchauffement global (PRG).

La consommation d'énergie est exprimée en $MJ/m^3 \text{ béton}$

Le potentiel de réchauffement global mesure l'impact qu'un certain gaz a sur la balance énergétique de l'atmosphère de la terre. Ce processus est estimé en calculant le produit de la quantité de gaz à effet de serre émis par unité fonctionnelle du matériau et le facteur de caractérisation du potentiel de l'effet de serre (en g équivalent CO_2), par g, pour chaque gaz. La contribution au réchauffement global potentiel de chaque gaz est la suivante : (Marinkovic, et al., 2010)

$$PRG (gCO_2 - \text{éq.}) = \sum_i PRG_i \times m_i$$

Différentes références seront aussi utilisées pour les valeurs des facteurs de caractérisation. Nous utiliserons d'abord les facteurs de caractérisation donnés par la source (CML, 2002) puis ceux de (Houghton, 2009), plus récents, et enfin ceux de (Marinkovic, et al., 2010) fournissant des facteurs de caractérisation à plus longs termes.

Substance	Formule	PRG (CML 2002)	PRG (Houghton)	PRG, 100 ans	PRG, 500 ans
Emissions dans l'air					
Dioxyde de carbone	CO ₂	1	1	1	1
Méthane	CH ₄	23	23	25	7.5
Dioxyde d'azote	NO ₂	310	296	320	180

Tableau 71 : Contribution de chaque gaz au réchauffement global

7.8.2 Contribution du produit aux impacts environnementaux

Les tableaux des impacts environnementaux sont établis ci-dessous.

Dans un premier temps, nous calculons, avec les masses des différents constituants établies dans le Tableau 68 page 114, les différents impacts environnementaux. Dans la base de données établie pour ces impacts, nous introduisons la composition des blocs de béton de Stripple pour laquelle on obtient des impacts environnementaux que nous comparons avec la référence fournie par Buzzi Unicem en termes de fabrication de blocs de béton à base de granulats concassés.

Impact environnemental	Unité	Blocs à base de granulats concassés Cure en chambre humide		
		Réf. Stripple. (Composition Tableau 68)	Réf. Stripple (Composition Stripple)	Réf. Buzzi Unicem
Energie renouvelable	MJ	42.74	58.35	78.16
Energie non renouvelable	MJ	570.69	1079.15	1562.51
Potentiel de réchauffement global	kg éq.CO ₂	112.47	217.27	213.51

Tableau 72 : Impacts environnementaux – Comparaison entre des blocs de béton à base de granulats concassés subissant la même cure

Comme nous pouvons le constater, les deux références utilisées donnent des résultats très comparables pour le potentiel de réchauffement global, ce qui valide les résultats obtenus pour la composition de départ à base du Tableau 68. Pour les énergies, les résultats sont relativement différents, surtout pour les énergies non renouvelables. Nous comparons donc les résultats avec une troisième base de données : celle de l'INIES.

Impact environnemental	Unité	Blocs à base de granulats concassés Cure en chambre humide		
		Réf. Stripple (Composition Stripple)	Réf. Buzzi Unicem	Réf. INIES
Energie renouvelable	MJ	58.35	78.16	/
Energie non renouvelable	MJ	1079.15	1562.51	1435.39
Potentiel de réchauffement global	kg éq.CO ₂	217.27	213.51	242.62

Tableau 73 : Impacts environnementaux – Comparaison entre des blocs de béton à base de granulats concassés subissant la même cure

En comparant ces résultats, nous nous rendons compte que les valeurs des énergies non renouvelables avoisinent des valeurs plus proches de la référence Buzzi Unicem que de la référence Stripple. Par contre, le potentiel de réchauffement global est plus éloigné pour la référence INIES que celui de la référence Buzzi Unicem. Nous décidons de garder les résultats de la référence Stripple car le potentiel de réchauffement global est très proche de la référence Buzzi Unicem et, c'est cet impact environnemental qui nous intéresse le plus car la captation de CO₂, établie dans les chapitres précédents, aura probablement une influence sur le potentiel de réchauffement global.

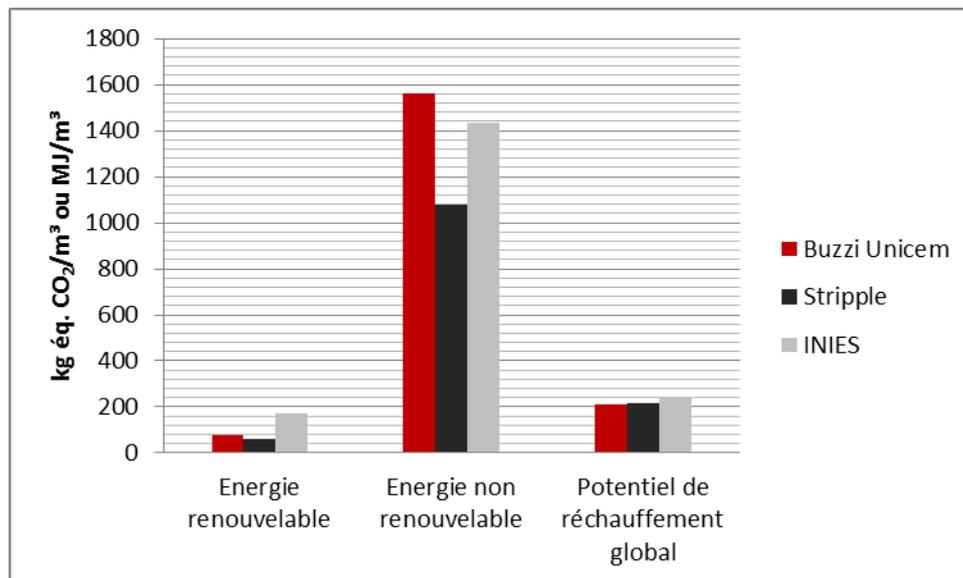


Figure 98 : Comparaison des blocs de béton à base de granulats concassés subissant la même cure

Nous modifions maintenant les valeurs des différentes émissions dans l'air correspondant au traitement des granulats recyclés et nous obtenons les résultats suivants.

Impact environnemental	Unité	Blocs à base de granulats	
		Concassés	Recyclés
Cure en chambre humide			
Energie renouvelable	MJ	42.74	42.74
Energie non renouvelable	MJ	570.69	570.69
Potentiel de réchauffement global	kg éq.CO ₂	112.47	112.77

Tableau 74 : Impacts environnementaux – Comparaison entre deux blocs de béton à base de granulats différents subissant la même cure

Ces résultats sont cohérents car ils sont très proches mais, justement, par leur proximité, ils mettent en doute l'utilisation des granulats recyclés. Leur utilisation n'est pas avantageuse par rapport à l'utilisation de granulats concassés en termes d'énergies et de potentiel de réchauffement global.

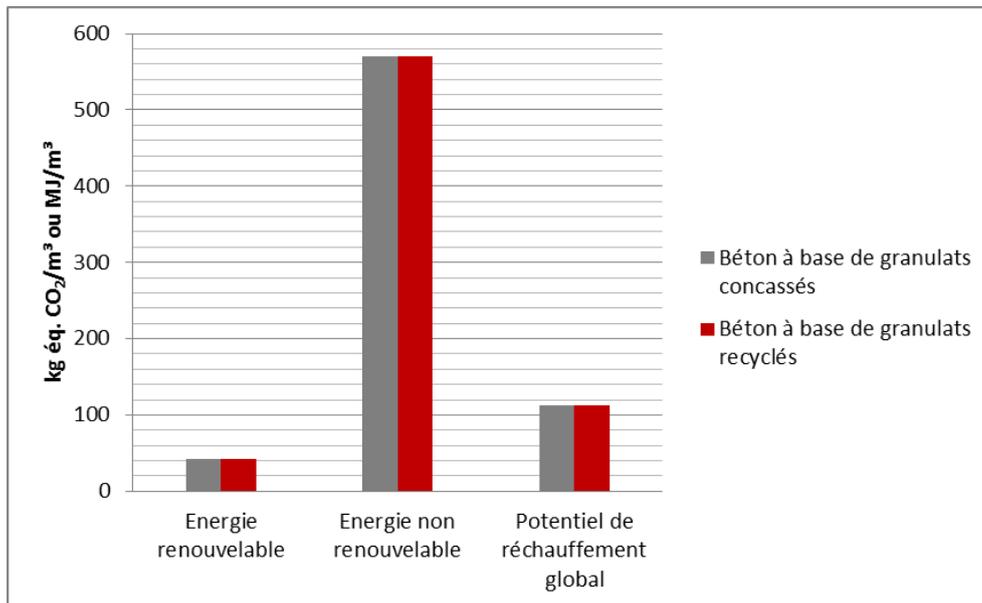


Figure 99 : Comparaison des blocs de béton à base de granulats différents subissant la même cure

Analysons le potentiel de réchauffement global de chaque constituant du bloc de béton. Nous remarquons, sur la Figure 100, que le **ciment est le plus grand consommateur de CO₂** pour la production d'un m³ de béton, ce qui confirme ce que nous disions auparavant : **l'utilisation de granulats recyclés n'est pas spécialement avantageuse** en comparaison avec les granulats concassés puisque c'est **le ciment qui a la plus grande incidence** sur les résultats.

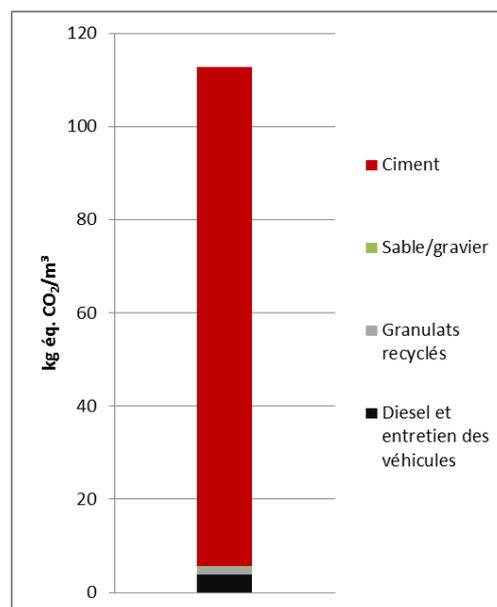


Figure 100 : Potentiel de réchauffement global en fonction des différents constituants

Regardons l'influence des différents facteurs de caractérisations sur les différents impacts environnementaux.

Impact environnemental	Unité	Blocs à base de granulats recyclés Cure en chambre humide			
		PRG CML 2002	PRG Houghton	PRG, 100 ans	PRG, 500 ans
Energie renouvelable	MJ	42.74	42.74	42.74	42.74
Energie non renouvelable	MJ	570.69	570.69	570.69	570.69
Potentiel de réchauffement global	kg éq.CO ₂	112.77	112.77	112.77	112.73

Tableau 75 : Impacts environnementaux – Comparaison entre deux blocs de béton à base de granulats recyclés subissant la même cure – Facteur de caractérisation différents

Nous concluons que **les facteurs de caractérisation utilisés sont cohérents** et que les valeurs des impacts environnementaux le sont donc tout autant.

Intéressons-nous aux blocs de béton à base de granulats recyclés subissant une cure de carbonatation accélérée. Ceux-ci sont absorbeurs de CO₂ pendant leur phase de production, ce qui devrait contribuer à la diminution du potentiel de réchauffement global. Par ailleurs, pour pouvoir absorber du CO₂, un incubateur fonctionnant à l'électricité a été utilisé. La captation de CO₂ influence d'autres impacts liés au processus de carbonatation. Nous allons prendre en compte ces deux variables supplémentaires en nuanciant nos propos.

Au terme de 48 heures de carbonatation accélérée, le bloc de béton absorbe $\pm 27\%$ de CO₂ par rapport à la masse du liant sec. Nous pouvons donc calculer combien de grammes de CO₂ est effectivement capté par un m³ de béton contenant 132.6 kg de ciment.

$$27/100 \times 132.6[kg] = 35.802 kg$$

Nous soustrayons cette valeur du potentiel de réchauffement global puisqu'il s'agit d'une absorption et non d'un rejet de CO₂. Nous insistons sur le fait que 27% après 48 heures de cure n'est pas démesuré en comparaison avec certaines expérimentations faites par Monkman et Shao qui indiquaient un gain de CO₂ de 10% après seulement 2 heures de carbonatation.

Les impacts de la production d'électricité sont différents d'un pays à l'autre. Les impacts utilisés ici ont été trouvés dans l'article de (Rossi, et al.) et proviennent du logiciel Equer. Il est important de souligner que nous procédons à cette analyse d'impact via une source électrique car c'est effectivement comme cela que nous avons procédé au laboratoire. Dans la réalité, nous sommes bien conscients que la source pourrait être d'une autre origine.

Impact de la production d'électricité	EQUER Belgique
Potentiel de réchauffement global CO ₂ (g/kWh)	330.6
Energie non renouvelable (MJ/kWh)	19.5

Tableau 76: impact de la production d'électricité

L'incubateur utilisé au Laboratoire des Matériaux de Construction consomme 570 W en fonctionnement et ce, pendant 48 heures. Nous pouvons donc calculer la valeur en kWh correspondante et ainsi trouver l'impact de la production d'électricité sur le potentiel de réchauffement global et sur l'énergie non renouvelable.

Nous obtenons les résultats suivants.

Impact environnemental	Unité	Blocs à base de granulats recyclés	
		Cure en incubateur (20% de CO2)	Cure en chambre humide
Energie renouvelable	MJ	42.74	42.74
Energie non renouvelable	MJ	1104.21	570.69
Potentiel de réchauffement global	kg éq.CO ₂	86.02	112.77

Tableau 77 : Impacts environnementaux – Comparaison entre deux blocs de béton à base de granulats recyclés subissant des cures différentes

Nous constatons une différence marquée entre la cure en incubateur et la cure en chambre humide, tant sur le potentiel de réchauffement global que sur l'énergie non renouvelable.

Le potentiel de réchauffement global de chaque constituant est établi ci-dessous. Nous constatons que le CO₂ capté pendant la phase de production d'un m³ de béton subissant une cure en incubateur contribue à diminuer le potentiel de réchauffement global, mais il tend aussi à l'augmenter par sa production d'électricité. Nous constatons également que l'absorption de CO₂ est plus importante que le rejet de CO₂ généré par l'alimentation électrique.

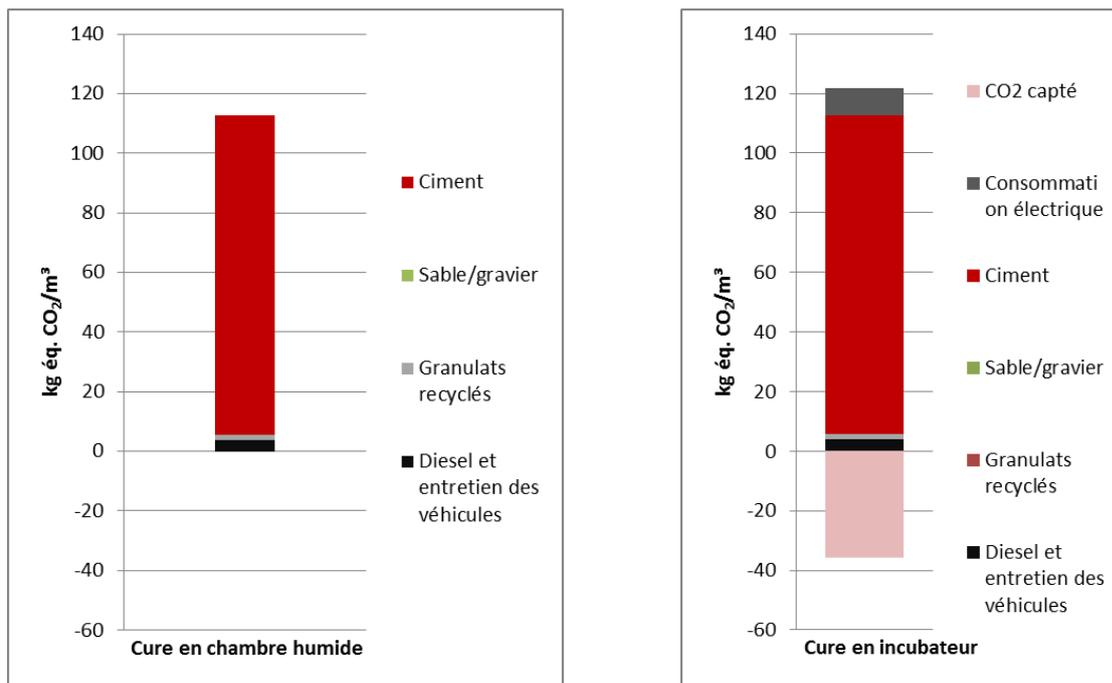


Figure 101 : Potentiel de réchauffement global - Comparaison entre deux blocs de béton à base de granulats recyclés - cures différentes

Comparons le potentiel de réchauffement global total des blocs de béton à base de granulats recyclés et constatons une différence de 31.09% entre la cure en incubateur (20% de teneur en CO₂) et la cure en chambre humide.

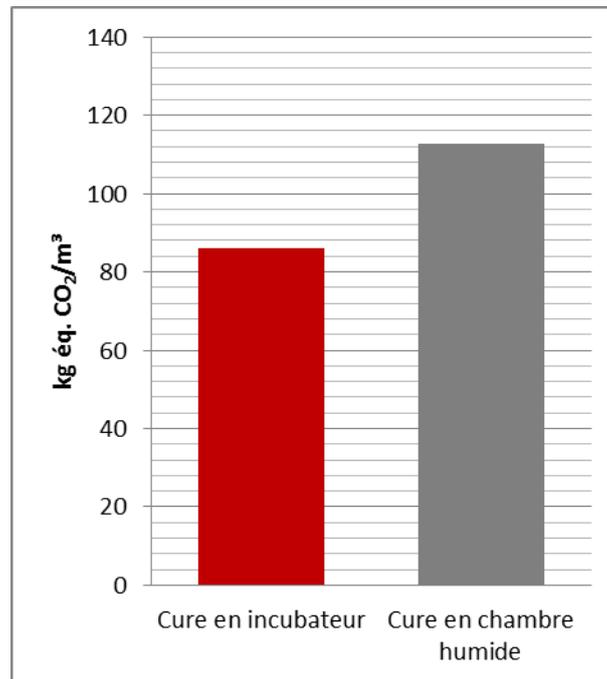


Figure 102 : Potentiel de réchauffement global – Comparaison entre deux blocs de béton à base de granulats recyclés - cures différentes

Finalement, le CO₂ capté est intéressant à exploiter si on ne s'intéresse qu'à l'impact lié au potentiel de réchauffement global, mais le système en amont qu'il faudrait installer pour permettre des cures en incubateur rejette aussi du CO₂ et consomme de l'énergie, en plus de celle consommée par la production électrique.

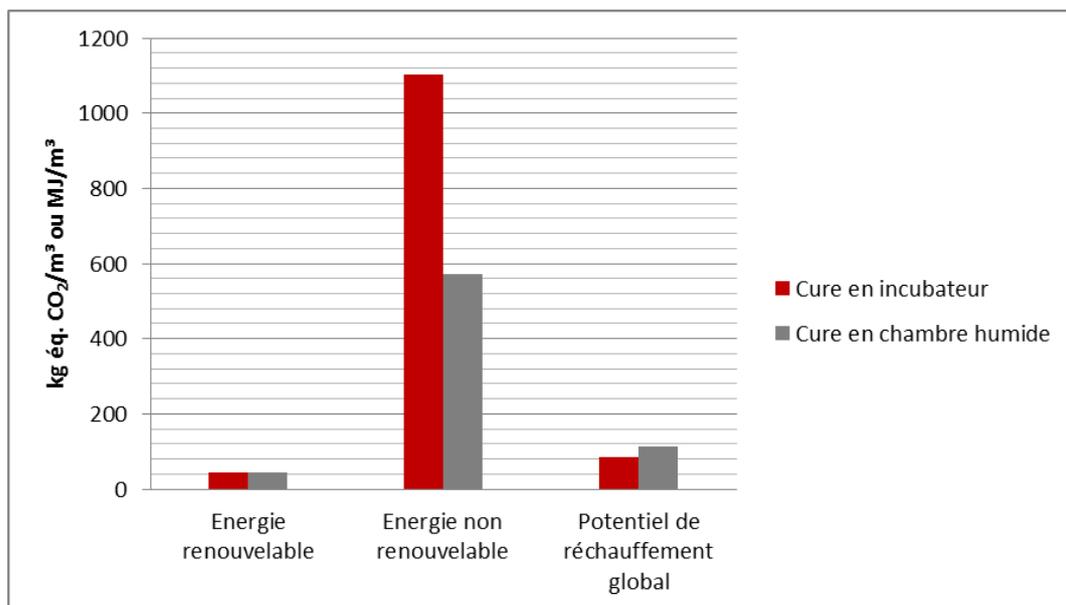


Figure 103 : Potentiel de réchauffement global et énergie – Comparaison de deux blocs de béton à base de granulats recyclés - cures différentes

Il y a donc lieu de faire une balance d'intérêts entre davantage de CO₂ capté au détriment d'énergie gaspillée.

Insistons, une fois de plus, sur la captation du CO₂ à une teneur plus élevée que 20%. Si cette opération s'avérait encore plus positive en termes d'absorption de CO₂, il se pourrait que les autres opérations (Production d'électricité, installation du système, etc.) deviennent négligeables en termes de potentiel de réchauffement global. Notons que les deux impacts environnementaux évalués ne sont pas isolés. Il existe d'autres impacts comme l'impact économique qui pourrait être accentué, s'il s'avère que des résultats avec une teneur en CO₂ de 50% se révèlent être très bénéfiques. Il ne serait pas inutile d'approfondir les résultats en prenant en compte d'autres impacts environnementaux.

Cette dernière analyse montre **la complexité d'évaluer un changement au niveau de la production d'un matériau**, tant écologiquement qu'économiquement, en plus des variations de bases de données.

7.9 Conclusion

Les résultats des investigations principales réalisées au cours de ce mémoire sont résumés ci-dessous.

Cures étudiées	Durée de cure (Heures)	Paramètres étudiés	Blocs de béton à base de :			
			Granulats recyclés		Fibres végétales de type miscanthus minéralisées	
			Non carbonatés	Carbonatés	Carbonatées	Non carbonatées
Cure en incubateur : 20% de CO ₂	7	Absorption de CO ₂ (%)	3,11	2,65	1,34	1,33
		Résistance à l'usure (-)	4,98	5,60	7,23	12,69
	24	R _c (MPa)	1,53	1,01	0,205	0,0586
		Absorption de CO ₂ (%)	7,05			
	32	R _c (MPa)	4,56			
		Absorption de CO ₂ (%)	10,75			
	48	R _c (MPa)	5,71			
		Absorption de CO ₂ (%)	27,10			
	14 jours	R _c (MPa)	6,05			
		R _c (MPa)	8,95			
Cure en chambre humide	7	Absorption de CO ₂ (%)	1,07	0,53	0,0290	0,0091
		R _c (MPa)	3,61			
	24	R _c (MPa)	5,36			
		R _c (MPa)	8,25			
	14 jours	R _c (MPa)	12,60			
		R _c (MPa)	1,17			
	24	R _c (MPa)	3,52			
		R _c (MPa)	4,99			
	48	R _c (MPa)	5,69			
		R _c (MPa)				

Tableau 78 : Résumé des résultats des investigations

Introduction



Etat de l'art –
Synthèse Bibliographique



Mise au point du plan de l'étude expérimentale



Contributions expérimentales



Conclusion & Perspectives



8 Conclusions générales et perspectives

Les émissions de CO₂ influent de manière conséquente sur les changements climatiques. Les blocs de béton ont une faible teneur en ciment et l'absence d'utilisation d'énergie durant leurs phases de durcissement, ne nécessitant aucune cuisson, limite très fortement leurs émissions de CO₂. Un troisième avantage lié au bloc de béton peut être bénéfique : fixer du CO₂ lors de son processus de fabrication.

L'utilisation de granulats recyclés permet de pallier au manque de granulats naturels et de contribuer au prolongement de la durée d'exploitation des carrières existantes. Leur utilisation contribue aux différents problèmes de stockage des déchets ainsi qu'à la réduction de la pollution de l'environnement.

Les fibres végétales de type miscanthus sont une ressource renouvelable et sont disponibles presque partout dans le monde. Promouvoir l'utilisation d'un béton composé de fibres végétales serait un moyen d'améliorer la durabilité du béton ainsi que la construction durable.

Une méthodologie expérimentale efficace est toujours de mise car, sans cette dernière, la reproductibilité observée au sein des échantillons ne peut être présente, ce qui pourrait être préjudiciable. Deux types de blocs de béton sont expérimentés. Ces derniers sont composés de granulats recyclés, carbonatés ou non, ou de fibres végétales minéralisées de type miscanthus, carbonatées ou non. Deux grandes questions se posent devant le fil rouge de ce travail : la quantification d'absorption de CO₂ et la modification de la résistance dudit bloc en fonction de cette absorption.

Capter du CO₂ dans des blocs de béton se révèle être une bonne alternative pour l'environnement et, plus précisément, dans la lutte contre le réchauffement climatique via la limitation des gaz à effet de serre. De plus, les résistances des blocs de béton ayant subi une cure de carbonatation accélérée sont intéressantes. Ces différentes constatations ne sont, par ailleurs, pas valables pour tous les types de blocs fabriqués.

Fixer du CO₂ dans des blocs de béton à base de granulats recyclés non carbonatés est probant. La quantification de l'absorption de CO₂, autant par variation de la masse de l'échantillon que par analyse en thermogravimétrie est importante. En effet, pour des échantillons subissant une cure de carbonatation accélérée pendant une durée de huit heures, cette quantification est de l'ordre de quelques pourcents tandis qu'elle avoisine la trentaine de pourcents pour les échantillons subissant une cure de carbonatation de quarante-huit heures.

En outre, après huit heures de carbonatation accélérée dans un environnement avec une teneur en CO₂ de 20%, les blocs de béton à base de granulats recyclés non carbonatés obtiennent des résistances en compression plus élevées que celles des mêmes blocs placés en chambre humide. Cet effet est malheureusement de courte durée puisque, au terme de quarante-huit heures de cure de carbonatation accélérée, les blocs de béton placés en chambre humide possèdent des résistances plus importantes que les blocs placés en incubateur avec une teneur en CO₂ de 20%.

Cependant, même si la tendance s'inverse, la résistance du bloc de béton à base de granulats recyclés non carbonatés n'est pas mauvaise puisqu'elle est, à 14 jours, de l'ordre des résistances obtenues traditionnellement pour des blocs de béton fabriqués en industrie.

Il faut souligner que les blocs de béton placés dans un incubateur avec une teneur en CO₂ de 0% sont inertes vis-à-vis de la captation du CO₂ mais possèdent des résistances acceptables, à court terme.

Le bilan environnemental des blocs de béton placés en incubateur est positif vis-à-vis des blocs de béton placés en chambre humide. Il convient donc de faire une balance d'intérêts, toute considération économique mise à part, entre davantage de résistance et la préservation de l'environnement.

Les blocs de béton à base de granulats recyclés carbonatés donnent des résultats également convaincants en termes d'absorption de CO₂ mais les résistances en compression obtenues sont peu appréciables. De plus, aucun grand intérêt particulier n'a été observé depuis le fait de carbonater ces granulats recyclés avant leur introduction dans le béton.

Les blocs de béton à base de granulats naturels sont porteurs de peu de résultats concluants. Les résistances en compression obtenues sont convaincantes mais la quantification d'absorption de CO₂ l'est beaucoup moins.

Les blocs de béton à base de fibres végétales de type miscanthus minéralisées carbonatées donnent également, à court terme, en comparaison avec les blocs de béton à base de fibres végétales de type miscanthus minéralisées non carbonatées, des résultats probants qu'il serait judicieux d'exploiter. Néanmoins, la mise au point d'une composition de base avec ces fibres peut encore être optimisée.

La quantification d'absorption de CO₂ par variation de la masse des échantillons est acceptable. Cette quantification, beaucoup moins onéreuse que l'analyse en thermogravimétrie, suggère des résultats similaires.

Pour que cette modeste contribution, qui n'est qu'une pièce du puzzle, survive à cette présentation, il faudrait envisager plusieurs améliorations. Afin de compléter cette étude, il serait intéressant d'analyser la vitesse d'avancement du front de carbonatation, le pH dans les bétons ainsi que la modification de la microstructure interne des pâtes avec la carbonatation tout en quantifiant l'absorption de CO₂. Une teneur en CO₂ plus élevée dans l'incubateur serait peut être également intéressante à exploiter.



9 Bibliographie

Acikel, H.

"The use of miscanthus (Giganteus) as a plant fiber in concrete production", *Scientific Research and Essays, Academic Journals*, Vol. 6, 2011.

Actu-Environnement.

http://www.actu-environnement.com/ae/pdt/Blocalians_Bloc_Beton_faible_impact_environnement_67.php4. [En ligne - Consultation : 15 Février 2012.]

Agence universitaire de la francophonie.

http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_sept_deux.html. [En ligne - Consultation : 10 Février 2012.]

Architectes et professionnels du secteur de la construction.

"L'utilisation de granulats issus du recyclage", Bruxelles, 2010.

Barlet-Gouédard, V.; Rimmelé, G.; Porcherie, G.; Quisel, N.; Desroches, J.

"A solution against well cement degradation under CO₂ geological storage environment", *International Journal of Greenhouse gas control*, Schlumberger Riboud Product Center (SRPC), Vol. 3, pages 206-216, 2009.

Baudoin, J-G.

"Les fibres végétales en Région Wallonne : les potentialités du chanvre et ses utilisations", 2004.

Baudoin, S.

Conférence : "Le développement durable dans le secteur de la construction", Liège, 2012.

Benge, Glend.

"Improving well bore seal integrity in CO₂ injection wells", 2009.

Buzzi Unicem.

"Ready mix concrete environmental declaration (EPD)", 2007.

Cailly, B.; Le Thiez, P.; Egermann, P.; Audibert, A.; Vidal-Gilbert, S.; Longaygue, X.

"Geological Storage of CO₂ : A state-of-the-Art of injection Processes and Technologies", *Oil and gas Science and Technology*, Vol. 60, n° 3, 2005.

CBR Heidelberg Cement Group.

Answers : "La confiance va grandir", *CBR et ENCI*, n°18, 2012.

Cerezo, V.

Thèse : "Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : Approche expérimentale et modélisation théorique", Lyon, France, 2005.

Concrete Plant.

<http://www.concreteplant.fr/1-2-3-concrete-mixer.html>. [En ligne - Consultation : 10 Février 2012.]

Courard, L.

Cours : "Optimisation des matériaux de construction", Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 2011.

CSTC

<http://www.cstc.be/> [En ligne - Consultation : 20 Février 2012.]

Debieb, F.

Thèse en vue de l'obtention du grade de docteur en génie civil : "Performances et durabilité du béton à base de granulats recyclés contaminés", Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 2007.

Degeimbre, R.

"Technologie des bétons", Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 2002.

Delhez, P., Courard, L. et Michel, F.

"Use of concrete road recycled aggregates for Roller Compacted Concrete", Liège, 2009.

Douara, T.H., Benhoua, M. et Nezergui, B.

"Caractéristiques physiques et chimiques des granulats recyclés et granulats naturels", 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, Algérie, 2009.

Febelcem.

<http://www.febelcem.be/index.php?id=abc>. [En ligne - Consultation : 15 Février 2012.]

Fédération de l'industrie du béton.

http://www.febe.be/fr_BE/page/show/id/75. [En ligne - Consultation : 8 Février 2012.]

Gouvernement Fédéral, Gouvernement Flamand, Gouvernement Wallon et Gouvernement Bruxelles.

"DRAFT Belgian National Allocation Plan for CO₂-emission allowances 2008-2012", 2006.

Grimes, Patrick, Lackner, Klaus et Ziock, Hans-J.

"Capturing Carbon Dioxide from air", 2009.

Grimont, R.

Travail de fin d'étude : "Etude de la minéralisation et des mécanismes d'adhérence dans les bétons de bois", Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 2008.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Rapport de synthèse : "Bilan 2007 des changements climatiques", Genève, 2008.

Groupement belge du béton.

"Technologie du béton", Bruxelles, 2006.

Hadjieva - Zaharieva, R.

Thèse de doctorat : "Durabilité des bétons à base de granulats recyclés", Université d'Artois, France, 1998.

Helmo, GRAMME.

<http://www.gramme.be/unite9/pmwiki/pmwiki.php?n=PrGC0910.B%E9tonClassique#toc2>. [En ligne - Consultation : 25 Mars 2012.]

Holcim (Belgique) S. A.

<http://www.holcim.be/fr/produits-et-services/ciments/catalogue-produits/ciments-haute-performance-cem-i.html>. [En ligne] 2012.

Houghton, J.

"Le réchauffement climatique : Un état des lieux complet", The United States of America by Cambridge University Press, *De boeck University*, 2009.

INIES

<http://www.inies.fr/>, [En ligne - Consultation : 18 Mai 2012.]

IFP Energies nouvelles.

<http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/>. [En ligne] 2012.

INERIS.

“Etat des connaissances sur les risques liés au stockage géologique du CO₂”, 2010.

Institute of Environmental Sciences (CML).

Handbook on LCA. Leiden University, 2002.

International Energy Agency

“CO₂ Capture and storage : A key carbon abatement option”, *Corlet*, France, 2008.

Jacquemet, N.

Thèse : “Durabilité des matériaux de puits pétroliers dans le cadre d'une séquestration géologique de dioxyde de carbone et d'hydrogène sulfuré”, Nancy, 2006.

Jerga, J.

“Physico-mechanical properties of carbonated concrete”, *Institute of Construction and Architecture of the Slovak Academy of Sciences*, 2004.

Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux [LERM].

http://www.lerm.fr/lerm/Newsletter/Newsletter8/lerm_Newsletter8_granulatrecycle1.shtml. [En ligne - Consultation : 16 Mars 2012.]

Larousse

Le petit Larousse Grand Format, 100^{ème} édition, 2005.

Lecomte, F., Broutin, P. et Lebas, E.

“Le captage du CO₂ : Des technologies pour réduire les émissions de gaz à effet de serre”, *TECHNIP*, France, 2010.

Legendre, P.

“Intervalles de confiance”, Université de Montréal, 2007.

Magain, P.

“Introduction aux méthodes quantitatives et éléments de statistique”, Université de Liège, 2005.

Marque NF.

<http://www.marque-nf.com/>. [En ligne] 2012.

Marinkovic, M., Radonjanin, V., Malesev, M. et Lukic, I.

“Life-cycle environmental impact assessment of concrete”, 2010.

Mathieu, B. Interview, Mars 2012.

Monkman, S. et Shao, Y.

“Carbonation Curing of slag-cement Concrete for Binding CO₂ and Improving Performance”, *Journal of materials in civil engineering, ASCE*, April 2010.

Monkman, Sean.

“Maximizing carbon uptake and performance gain in slag-containing concretes through early carbonation”, Montreal, 2008.

Nachtergal, C.

“Agenda du bâtiment. 23^{ème} édition”, *De boeck*, 1988.

NETZSCH.

<http://www.netzsch-thermal-analysis.com/fr/produits/sta/>. [En ligne] 2012.

Oikonomou, Nik. D.

“Recycled Concrete aggregates”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, p. 315-318, 2005.

Ornamental grasses and willows catalogue online. 2012.**Pacheco-Torgal, F. et Jalali, S.**

“Earth construction : Lessons from the past for future eco-efficient construction”, *Construction and Building Materials*, 2011.

—. Vegetable fibre reinforced concrete composites : a review. 2011.

Pude, R.; Treseler, C.-H.; Trettin, R.; Noga, G.

“Suitability of Miscanthus Genotypes for Lightweight Concrete”, 2005.

Reiter, S.

Cours de Techniques de constructions des bâtiments; Partie performance de l'enveloppe, Université de Liège, Belgique, 2010.

Réseau national des ressources en électronique.

http://www.iufmrese.cict.fr/concours/2003/PLP_EXT_2003/2_dossier-tech.pdf. [En ligne] 2003.

Responsabilité sociale et environnementale de l'entreprise.

http://www.rseneews.com/public/dossier_envi/effetdeserre-kyoto.php?rub=3. [En ligne] 2004.

Rosolen, W.

Travail de fin d'étude : “Contribution à l'étude des bétons à granulats bio-sourcés et application au béton de miscanthus”, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, Belgique, 2010.

Rossi, B.; Marique, A.- F.; Glaumann, M.; Reiter, S.

“Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tools”

Shing Chai NGO, Nelson.

“High-Strength Structural Concrete Recycled Aggregates” University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying, 2004.

Société Prefer s.a. 2012.**Sous-direction de l'Observation de l'énergie et des matières premières.**

“CO₂ et énergie - France et monde”, 2009.

Statistique Canada.

<http://www.statcan.gc.ca/edu/power-pouvoir/ch12/5214891-fra.htm#a1>. [En ligne] 2012.

Stripple, H.

“Life cycle assessment of road - A pilot study for inventory analysis.”, Environmental Research Institute (IVL), Gothenburg, 2001.

Techno Science.

<http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=4545>. [En ligne] 2012.

Thiery, M; Roussel, N; Habert, G; Belin, P

“Cinétique de carbonatation d'une lit de granulats concassés de matériaux cimentaires”, Marseille, 2011.

Thiery, M.

Thèse : “Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires : Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques”, Ecole nationale des ponts et chaussées, France, 2005.

Tower Crane.

<http://www.towercranecn.fr/7-concrete-batching-machine.html>. [En ligne] 2012.

VALBIOM, a.s.b.l.

<http://www.valbiom.be>. [En ligne] 2012.

Vandendriesche, V.

Thèse : “Etude des facteurs de rendement d'une espèce dédiée aux bioénergies : Découverte des déterminants agronomiques de miscanthus x giganteus. Etude des essais de grignon et lusignan”, Institut supérieur d'Agriculture de Lille, France, 2007.

Voice Of America News.

<http://www.voanews.com/english/news/environment/Green-Cement-Captures-CO2-80919747.html>. [En ligne] 2010

Warnant, G.

“4^{èmes} rencontres de la biomasse : Quelles ressources pour les biocombustibles de demain?”, 2007.

Wolters, T.

Travail de fin d'étude : “Interactions avec l'environnement de géopolymères à base de laitier”, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, Belgique, 2010.

World Commission Environment and Development.

“Notre avenir à tous” Traduction en français du rapport Bruntland. *Fleuve*, Montréal, 1988.

10 Annexes

10.1 Marquage CE et NF

Le marquage 	La marque 
Le marquage CE est un marquage européen obligatoire pour tous les produits soumis à une ou plusieurs Directives Européennes.	La marque NF est une marque de certification de qualité volontaire ayant un objectif de différenciation.
Le marquage CE indique que les produits respectent les exigences essentielles des Directives « nouvelle approche » traitant notamment des questions de sécurité, de santé publique et de protection des consommateurs.	La marque NF garantit que les exigences de qualité, sécurité, fiabilité, aptitude à l'usage décrites dans des normes et référentiels de certification ont été contrôlées et sont respectées.
CE est un marquage permettant aux produits de circuler librement dans tout l'Espace Economique Européen.	La marque NF vise à répondre à l'attente globale de qualité des prescripteurs et utilisateurs (aptitude à l'emploi, durabilité, performances, ...).
Chaque directive décrit le mode de preuve du respect des exigences essentielles. Selon la nature des risques inhérents aux produits, le marquage CE peut donc être apposé : - Sous la seule responsabilité du fabricant. - Après un contrôle par tierce partie et des preuves de conformité (essais et examens initiaux, contrôle de la fabrication, mise sous assurance qualité).	La marque NF implique systématiquement l'intervention d'AFNOR Certification - organisme certificateur indépendant et impartial - qui vérifie la conformité du produit à certifier et effectue à périodicité définie des contrôles sur le produit et sur l'efficacité de l'organisation qualité de l'entreprise.

Source : (Marque NF, 2012)

10.2 Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique

Voici plusieurs paragraphes décrivant les motivations des parties à la Convention : (Houghton, 2009)

PREOCCUPEES par le fait que l'activité humaine a augmenté sensiblement les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, que cette augmentation renforce l'effet de serre naturel et qu'il en résultera en moyenne un réchauffement supplémentaire de la surface terrestre et de l'atmosphère, ce dont risquent de souffrir les écosystèmes naturels et l'humanité,

NOTANT que la majeure partie des gaz à effet de serre émis dans le monde par le passé et à l'heure actuelle ont leur origine dans les pays développés, que les émissions par habitant dans les pays en développement ira en augmentant pour leur permettre de satisfaire leurs besoins sociaux et leurs besoins en développement,

SACHANT que diverses mesures prises pour faire face aux changements climatiques peuvent trouver en elles-mêmes leur justification économique et peuvent aussi contribuer à résoudre d'autres problèmes d'environnement,

SACHANT en outre que les pays de faible altitude et autres petits pays insulaires, les pays ayant des zones côtières de faible altitude, des zones arides ou semi-arides ou des zones sujettes aux inondations, à la sécheresse et à la désertification, ainsi que les pays en développement ayant des écosystèmes montagneux fragiles sont particulièrement vulnérables aux effets néfastes des changements climatiques,

AFFIRMANT que les mesures prises pour parer aux changements climatiques doivent être étroitement coordonnées avec le développement social et économique afin d'éviter toute incidence néfaste sur ce dernier, compte pleinement tenu des besoins prioritaires légitimes des pays en développement, à savoir une croissance économique durable et l'éradication de la pauvreté,

RESOLUES à préserver le système climatique pour les générations présentes et futures.

10.3 Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de granulats recyclés

10.3.1 Essai avec 0% de teneur en CO₂

Temps	H.R (%)	T° (°C)	Masse (g)				
			Cube 1	Cube 2	Cube 3	Gel de silice	Solution saline
Départ	55.7	20.8	6711.00	6588.80	6905.00	200.00	1790.00
1 heure	87.7	20.5	6708.70	6586.80	6903.20	202.40	1791.60
3 heures	91.4	20.5	6705.40	6583.60	6900.00	204.40	1793.20
7 heures	93.0	20.4	6698.20	6575.60	6891.60	207.40	1797.00

Tableau 79 : Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de granulats recyclés – Incubateur (0%)

Temps	H.R (%)	T° (°C)	Masse (g)				
			Cube 4	Cube 5	Cube 6	Gel de silice	Solution saline
Départ	49.9	21.4	6641.80	6645.20	6802.20	200.00	2407.40
1 heure	86.7	22.0	6646.00	6649.40	6806.20	203.00	2408.40
3 heures	90.3	21.3	6647.40	6650.20	6807.00	207.20	2410.60
7 heures	89.7	21.4	6647.80	6650.80	6807.80	212.40	2417.60

Tableau 80 : Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de granulats recyclés – Incubateur (20%)

Temps	Masse (g)		
	Cube 7	Cube 8	Cube 9
Départ	6855.40	6286.60	6887.60
1 heure	6857.20	6289.80	6888.40
3 heures	6858.20	6290.60	6889.40
7 heures	6855.60	6288.20	6886.60

Tableau 81 : Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de granulats recyclés – Chambre humide

10.3.2 Essai à 24 heures

Temps	H.R (%)	T° (°C)	Masse (g)				
			Cube 1	Cube 2	Cube 3	Gel de silice	Solution saline
Départ	50.4	21.4	6740.20	6622.60	6712.22	200.00	2449.58
1 heure	91.4	20.6	6743.40	6626.40	6717.22	202.34	2450.20
3 heures	92.4	20.9	6744.00	6626.60	6718.02	204.59	2453.51
7 heures	92.2	20.8	6744.60	6627.20	6718.62	207.89	2458.11
24 heures	88.7	21.1	/	6617.80	6714.42	227.24	2475.57
32 heures	85.3	21.3	/	/	6714.22	235.13	2484.18
48 heures	77.9	21.4	/	/	6710.22	252.63	2495.54

Tableau 82 : Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de granulats recyclés – Incubateur (20%)

Temps	Masse (g)		
	Cube 4	Cube 5	Cube 6
Départ	6558.40	6480.60	6775.30
1 heure	6561.40	6483.20	6778.90
3 heures	6561.00	6482.80	6778.50
7 heures	6559.40	6481.40	6777.50
24 heures	6553.60	/	6774.90
32 heures	/	/	6774.50
48 heures	/	/	6774.20

Tableau 83 : Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de granulats recyclés – Chambre humide

10.3.3 Essai à 32 heures

Temps	H.R (%)	T° (°C)	Masse (g)				
			Cube 1	Cube 2	Cube 3	Gel de silice	Solution saline
Départ	58.3	21.3	7212.40	6661.00	6720.80	200.00	2363.69
1 heure	93.7	20.8	7216.80	6666.20	6725.00	202.62	2365.15
3 heures	94.8	20.6	7217.40	6667.00	6725.60	203.63	2366.42
7 heures	95.1	20.6	7217.80	6667.20	6725.80	206.83	2370.61
24 heures	91.5	20.8	/	6671.00	6725.30	228.43	2387.84
32 heures	90.1	20.8	/	6672.00	6723.40	240.43	2395.61
48 heures	80.2	21.1	/	6667.40	/	259.83	2409.62

Tableau 84 : Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de granulats recyclés – Incubateur (20%)

Temps	Masse (g)		
	Cube 4	Cube 5	Cube 6
Départ	7299.60	6821.60	6775.30
1 heure	7302.40	6824.20	6778.90
3 heures	7301.60	6823.20	6778.50
7 heures	7300.20	6822.00	6777.50
24 heures	/	6818.40	6774.90
32 heures	/	6818.10	6774.50
48 heures	/	/	6774.20

Tableau 85 : Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de granulats recyclés (Chambre humide)

Temps	H.R (%)	T° (°C)	Masse (g)				
			Cube 7	Cube 8	Cube 9	Gel de silice	Solution saline
Départ	55.6	21.1	7323.20	6523.40	6805.60	200.00	1783.19
1 heure	87.8	20.8	7319.80	6520.60	6803.60	203.40	1784.09
3 heures	91.8	20.0	7316.00	6517.20	6800.20	205.77	1784.60
7 heures	93.2	20.0	7311.20	6511.20	6795.40	211.57	1788.60
24 heures	90.6	20.8	/	6482.20	6773.00	231.37	1804.60
32 heures	85.7	21.0	/	6475.40	6767.60	237.70	1809.20
48 heures	80.4	21.2	/	/	6751.40	257.30	1818.40

Tableau 86 : Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de granulats recyclés – Incubateur (0%)

10.4 Charges et déplacements des blocs à base de granulats recyclés

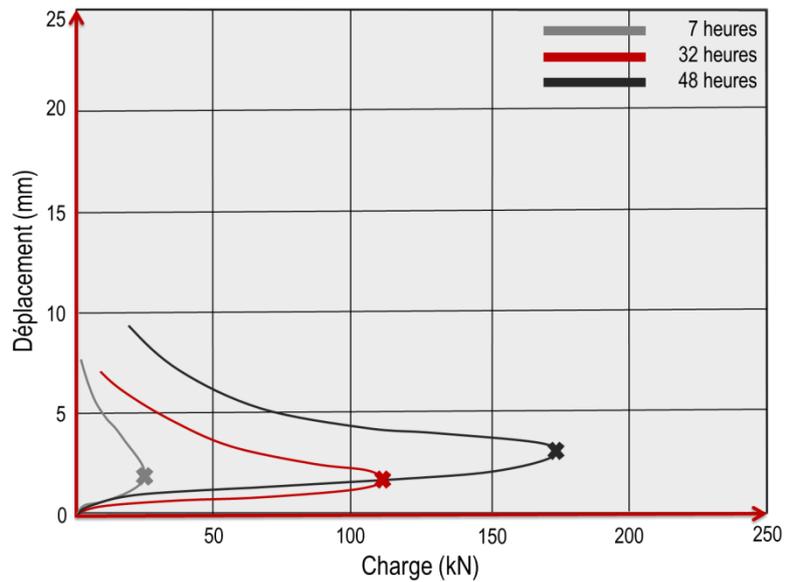


Figure 104 : Charges et déplacements des blocs à base de granulats recyclés – Chambre humide

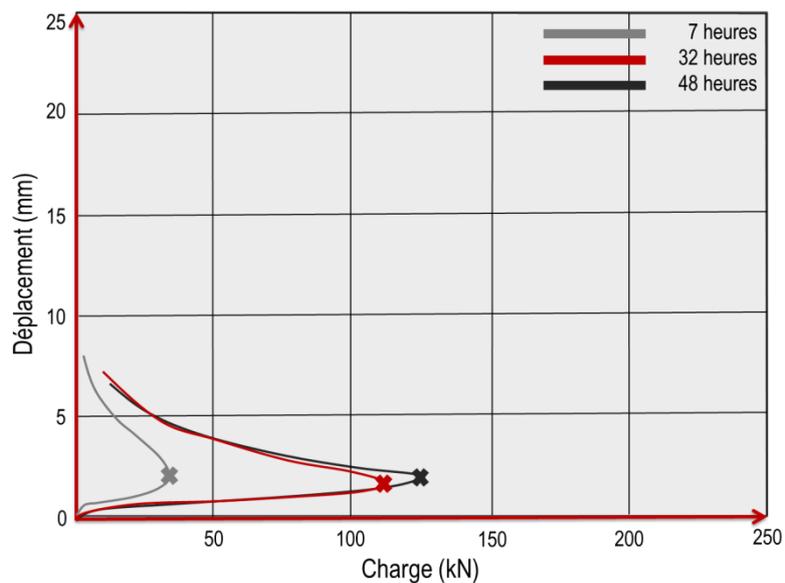


Figure 105 : Charges et déplacements des blocs à base de granulats recyclés – Incubateur (20%)

10.5 Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de fibres végétales carbonatées

Temps	H.R (%)	T° (°C)	Masse (g)				
			Cube 1	Cube 2	Cube 3	Gel de silice	Solution saline
Départ	50.5	21.7	2594.60	2692.60	2533.40	200.00	2394.20
1 heure	92.1	22.1	2061.60	2698.20	2539.40	202.00	2395.80
3 heures	90.2	21.3	2602.20	2698.80	2540.00	204.40	2398.40
7 heures	91.5	21.2	2599.80	2696.40	2538.00	208.20	2403.40

Tableau 87 : Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de fibres végétales carbonatées – Incubateur (20%)

Temps	Masse (g)		
	Cube 4	Cube 5	Cube 6
Départ	2490.60	2529.40	2592.20
1 heure	2491.20	2530.00	2592.60
3 heures	2491.00	2531.00	2592.00
7 heures	2488.80	2528.60	2590.00

Tableau 88 : Variation des masses enregistrées pour les blocs de béton à base de fibres végétales carbonatées – Chambre humide

10.6 Charges et déplacements des blocs à base de fibres végétales de type miscanthus

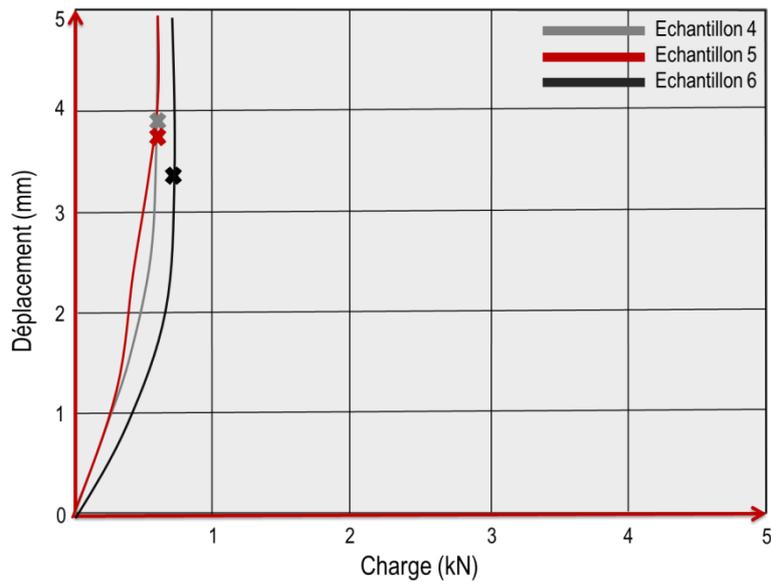


Figure 106 : Charges et déplacements des blocs à base de fibres végétales de type miscanthus – Chambre humide – 7 heures

Résumé

Titre du travail : Tentative de fixation du CO₂ dans les blocs de béton à base de fibres végétales et granulats recyclés.

Les émissions de CO₂ influent de manière conséquente sur les changements climatiques. A ce jour, les principaux efforts de réduction des effets du dioxyde de carbone se focalisent, via des sources ponctuelles de production, sur sa captation, sa récupération et son élimination. Concrétiser ses efforts au travers d'applications concrètes et bénéfiques représente un grand défi dans la réduction des gaz à effet de serre. Cette contribution scientifique envisage donc la possible utilisation bénéfique de ce CO₂ tant au niveau de la production de blocs de béton que de la performance à court et long terme de ceux-ci.

La séquestration du carbone dans les bétons repose sur les composants calcaires présents dans le ciment. Ainsi, les carbonates sont obtenus par la réaction entre les hydroxydes de calcium (Ca(OH)₂) et le CO₂ formant un composé plus stable du point de vue thermodynamique. Ce principe de fixation du CO₂ requiert la mise en place, au jeune âge du béton, d'un processus de cure accélérée réalisé en chambre de cure avec des injections de dioxyde de carbone. Ce dernier s'introduit dans la microstructure afin d'assurer une carbonatation complète de la pâte de ciment. L'objet de cette recherche vise donc à étudier les effets de la carbonatation comme moyen de liaison et les incidences d'un tel procédé sur les performances du béton, tout en gardant à l'esprit l'impact positif que revêt la captation du CO₂ dans la lutte contre le réchauffement climatique.

Dans le cadre de ce travail de fin d'études, au regard des caractéristiques environnementales intéressantes qu'ils représentent, seuls les blocs de béton pleins à base de granulats recyclés et de fibres végétales de type miscanthus seront étudiés. La fabrication de tels blocs renforce d'avantage le caractère « vert » du matériau et ce, dès son stade de conception.

Abstract

Title: Attempt to CO₂ storage in concrete blocks made of plant fibers and recycled aggregates.

CO₂ emissions impact consistently on climate changes. Nowadays, major efforts to reduce the effects of carbon dioxide focus on capture, recovered-operation and disposal via point sources of production. To realize its efforts through practical and advantageous applications is a major challenge for the reduction greenhouse gas emissions. Therefore, his scientific contribution considers the possible beneficial use of this CO₂ in the production of concrete blocks in both short and long term performances.

Carbon sequestration in concrete is based on the components presents in the cement. Thus, the carbonates are obtained by the reaction between calcium hydroxide (Ca(OH)₂) and the CO₂ and form a more thermodynamically stable compound. This principle of CO₂ fixation requires the establishment, at the young age of concrete, of a curing process accelerated that is realized in a special room. Carbon dioxide is injected in that room by entering a microstructure to ensure complete carbonation of the cement paste. This research aims for the study of the carbonation effects and the implications of such a process on the concrete performances while keeping in mind that CO₂ capture allows fighting against global warming.

In this graduate level thesis, only solid concrete blocks made of recycled aggregates and vegetables fibers like miscanthus will be studied because of their interesting environmental features. The manufacture of such blocks further increases the "green" character of the material, right from the design stage.