

Programme FEDER 2014 - 2020



LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL
ET LA WALLONIE INVESTISSENT DANS VOTRE AVENIR



Programmation FEDER 2014-2020

ECOLISER

ECOLIants pour traitement de Sols, Etanchéité et Routes

Rapport scientifique et technique final Partenaire ULiège-GeMMe

Période du 01/11/2016 au 31/12/2020

Luc COURARD, Julien HUBERT, Piotr PROCHON et Zengfeng ZHAO

Université de Liège-GeMMe

Table des matières

Introduction.....	6
1. Production de déchets et valorisation dans la construction	9
1.1. Contexte général.....	9
1.2. Besoins dans la construction	11
2. Cendres volantes de biomasse et de charbon.....	13
2.1. Contexte général.....	13
2.1.1. Cendres volantes de biomasse	13
2.1.2. Cendres volantes de charbon	15
2.2. Utilisation des cendres avec des liants hydrauliques	20
2.2.1. Caractérisation des cendres volantes et autres matières secondaires.....	20
2.2.2. Méthodes utilisés pour la caractérisation des mortiers	23
2.2.3. Mortiers de maçonneries avec cendres volantes de charbon	24
2.2.4. Mortiers de maçonneries avec cendres volantes de biomasse	26
2.2.5. Mortiers de maçonnerie avec CEM II 32,5 et cendre volante de biomasse.....	30
2.2.6. Mortiers d'enduit	32
2.2.7. Mortiers bâtards	34
2.2.8. Conclusions.....	35
2.3. Utilisation des cendres avec des liants alcali-activés	36
3. Granulats recyclés de bétons (GRB).....	43
3.1. Recyclage et marché.....	43
3.2. Influence de la fraction granulaire et de l'origine des GRB	45
3.2.1. Matériaux et méthodes.....	45
3.2.2. Propriétés des GRB.....	47

3.2.3.	Conclusions.....	55
3.3.	Utilisation de GRB dans le béton.....	56
3.3.1.	Matériaux et méthodes.....	56
3.3.2.	Propriétés des BGR.....	58
3.3.3.	Conclusions.....	61
4.	Granulats recyclés de mâchefers.....	62
4.1.	Contexte général.....	62
4.2.	Matériaux utilisés pour la composition des bétons	64
4.2.1.	Ciment et granulats naturels.....	64
4.2.2.	Mâchefers d’incinérateurs d’ordures ménagères (MIOM)	65
4.2.3.	Composition des bétons	65
4.3.	Méthodes de caractérisation des bétons	66
4.3.1.	Béton à l’état frais	66
4.3.2.	Béton à l’état durci.....	67
4.4.	Résultats et discussion.....	67
4.4.1.	Affaissement	67
4.4.2.	Teneur en air	68
4.4.3.	Masse volumique à l’état frais	68
4.4.4.	Résistance à la compression.....	69
4.4.5.	Absorption d’eau capillaire.....	70
4.4.6.	Absorption d’eau par immersion	71
4.4.7.	Résistance à la carbonatation.....	72
4.5.	Conclusions	75
	Conclusions générales.....	77
	Remerciements.....	81

Publications et communications 81

Introduction

Le projet Ecoliser a pour objectif de développer des formulations d'écoliants à base de sous-produits industriels ou de déchets (cendres volantes de charbon et cendres volantes de biomasse, mâchefers, granulats recyclés de béton...). Les secteurs privilégiés pour l'utilisation de ces écoliants sont le traitement et l'imperméabilisation des sols ainsi que les travaux d'infrastructures routières. Les liants pouzzolaniques, ainsi que les bétons à base de granulats recyclés (de béton, de mâchefer d'incinérateur d'ordures ménagères) sont aussi étudiés dans le secteur de la construction et du génie civil.

Dans le cadre du portefeuille de projets « ECOLISER », l'Université de Liège (ULiège – GeMMe) est impliquée dans le développement de formulations de matériaux liés à base de sous-produits industriels ou de déchets. Ces produits seront développés sous forme de bétons secs compactés au rouleau ou de bétons, utilisés notamment dans la réalisation de structures routières. Les écoliants développés pourront être associés à des éléments inertes contribuant au squelette granulaire, de façon à obtenir un produit à base de 100% de produits recyclés.

Cette partie du projet, à laquelle collaborent 2 partenaires (Centre Terre et Pierre (CTP) et ULiège - GeMMe)) est subdivisée en cinq grandes tâches, dont quatre concernent plus spécifiquement l'*Université de Liège* (ULiège), au travers de son groupe de recherche *GeMMe* (Génie Minéral, Matériaux et Environnement, qui appartient à l'Unité de Recherche *Urban and Environmental Engineering* :

Tâche T0 : Sourcing et caractérisation des matériaux secondaires

L'identification et la caractérisation des matériaux secondaires pouvant entrer dans la composition des écoliants est réalisée en collaboration avec le CTP. Dans un premier temps, une étude visant à établir les flux utilisables de sous-produits pouvant servir à la mise au point des écoliants est réalisée. Sur base d'une analyse bibliographique et sur base de contacts avec les industriels concernés, l'identification des matériaux secondaires pouvant être utilisés en tant qu'écoliants a été menée. Un recensement des producteurs de matériaux secondaires en Wallonie ainsi que des stocks historiques (cendres volantes...) est réalisé. Dans cette tâche, ULiège - GeMMe se consacre également à la caractérisation physico-chimique (granulométrie, densité à l'hélium, DRX, analyses

chimiques, résistances à l'attrition, à l'usure...) des matériaux secondaires identifiés dans le « sourcing ». Plus particulièrement, ULiège - GeMME étudie les caractéristiques des granulats, qui vont être utilisés en tant que charge minérale (squelette granulaire) dans les matériaux destinés aux structures routières.

Tâche T3 : Mise au point des liants seuls

La valorisation des sous-produits identifiés lors du « sourcing » impose l'optimisation de leur incorporation dans la formulation d'écoliants, tout en supprimant leurs effets néfastes connus, sur base notamment de prétraitements. Le but de cette tâche est donc de développer des formulations d'écoliants garantissant les meilleures performances mécaniques et environnementales selon le type d'application visé. Pour cela, différents types de liants sont envisagés tels que des liants pouzzolaniques basés sur l'utilisation de silice active (cendres volantes de charbon ou cendres volantes de biomasse...). Les formulations obtenues lors de cette étape font l'objet d'essais de validation des propriétés mécaniques (résistance en flexion et compression) et physiques (masse volumique, absorption d'eau, etc.), à court comme à long terme (durabilité), ainsi que des propriétés environnementales via des essais de lixiviation. ULiège - GeMME a essentiellement pour rôle de caractériser les liants du point de vue physique afin d'évaluer notamment leur durabilité.

Tâche T5 : Optimisation du squelette granulaire

Dans cette partie, ULiège - GeMME tente de développer une meilleure connaissance de l'impact réel de la forme et de l'empilement des particules sur les propriétés des mélanges. Suite à cette étude, ULiège - GeMME sélectionne les matériaux secondaires susceptibles d'être utilisés en tant que granulats et/ou sable dans le squelette granulaire. Des essais d'empilement de particules de différentes formes, granulométries et propriétés de surface sont réalisés en laboratoire afin d'optimiser le squelette granulaire. Des possibilités de recombinaison sont analysées pour se rapprocher des courbes de référence, pour autant que les granulats restent compatibles sur le plan des propriétés physiques.

Tâche T6 : Intégration des éco-liants au squelette granulaire

Les écoliants développés dans la tâche précédente sont ajoutés aux granulats et/ou sables, pouvant être eux-mêmes issus de matériaux secondaires. La mise au point des compositions de bétons se

fait sur base des propriétés mécaniques (résistance en compression et flexion) et physiques, ainsi que sur base de la durabilité des produits composites dans le temps (vieillissements artificiels). De même, une validation environnementale est également effectuée via la réalisation d'essais de lixiviation toujours selon les tests en application en Wallonie. ULiège - GeMMe intervient essentiellement dans la mise en œuvre des matériaux et également dans l'étude de durabilité des produits (plusieurs possibilités de valorisation sous forme de différents types de bétons).

Dans ce rapport final, nous avons choisi de présenter les résultats en fonction des produits testés (et non des tâches). Les travaux de recherche présentés dans ce rapport sont exposés en trois chapitres :

1. le premier chapitre traite des cendres volantes de charbon et des cendres volantes de biomasse ;
2. le deuxième chapitre décrit les travaux de recherche réalisés sur les granulats recyclés de béton, notamment en combinaison avec des fillers calcaires pour la formulation de bétons ;
3. le troisième chapitre porte sur la caractérisation des granulats recyclés de mâchefers d'incinérateur d'ordures ménagères (MIOM) et sur la formulation de bétons.

1. Production de déchets et valorisation dans la construction

1.1. Contexte général

En 2016, l'UE-28 a généré 2538 millions de tonnes de déchets (Figure 1.1), dans lesquels la construction et la démolition ont contribué pour 36,4% du total des déchets générés, suivis des mines et carrières avec une part de 25,3% (Agence européenne pour l'environnement, 2019). Parmi tous les déchets produits, ces deux activités économiques sont considérées comme sources majeures des déchets minéraux et leur part dans la production de déchets couvre jusqu'à deux tiers du total des déchets générés en 2016 dans l'UE-28.

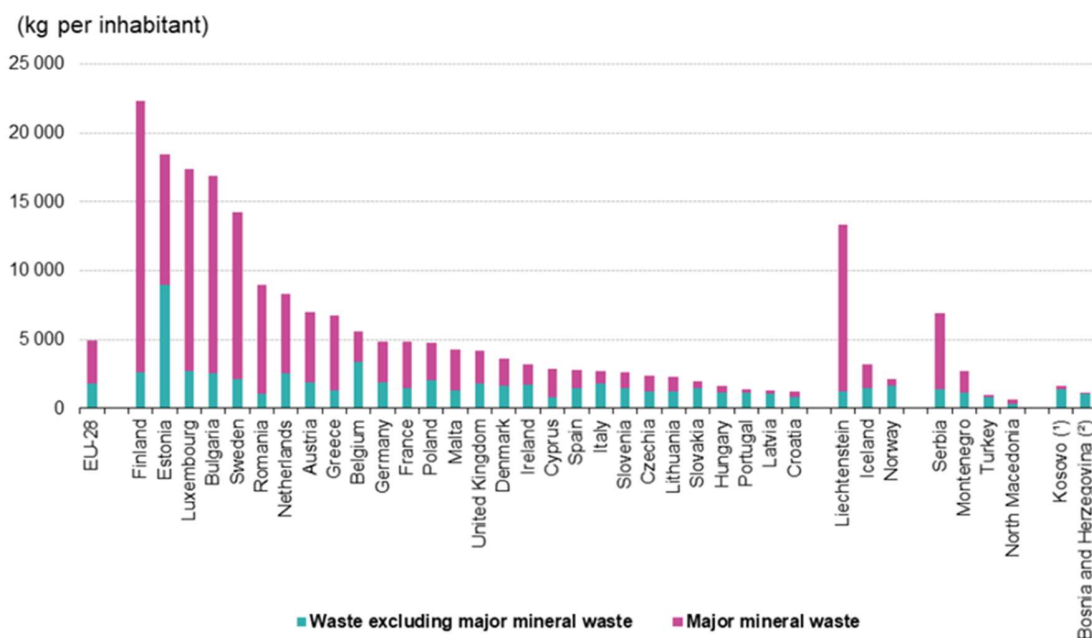


Figure 1.1 Waste generated in 2016 in Kg per inhabitant (Eurostat, 2019a)

En Belgique, les statistiques Eurostat (Eurostat, 2019a) indiquent le pourcentage de déchets générés par les différentes activités économiques (Figure 1.2).

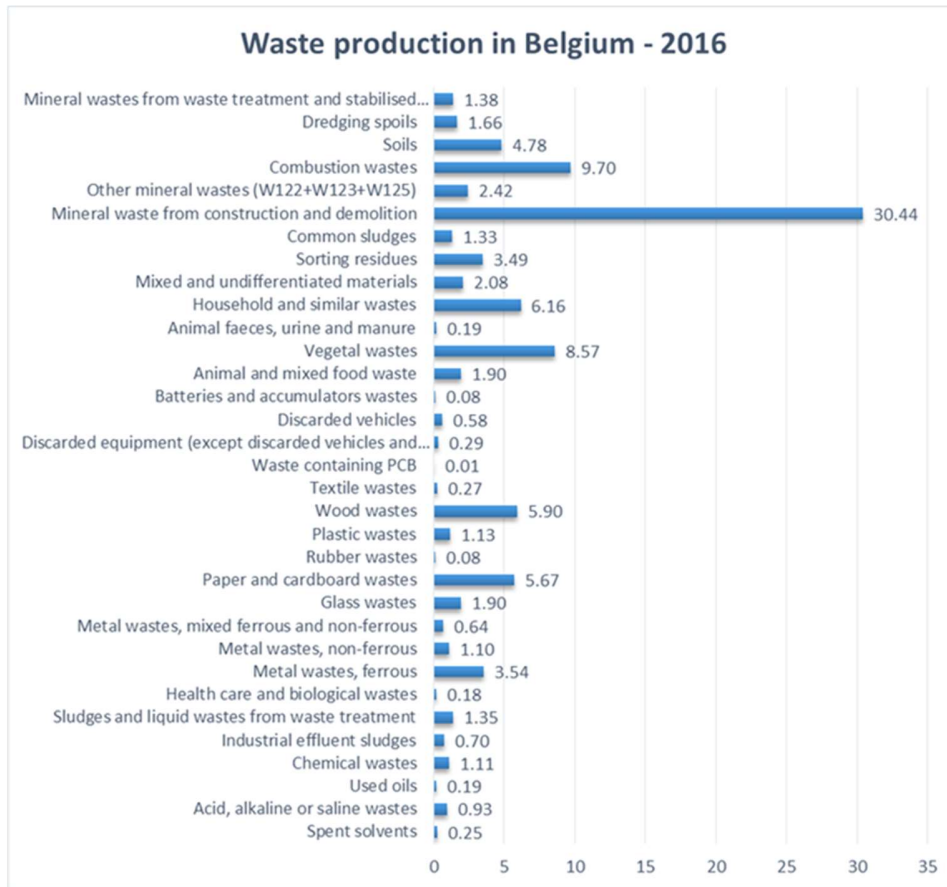


Figure 1.2 Pourcentage de déchets produits en fonction de l'activité économique en Belgique

Le top 5 des déchets produits en Belgique est:

1. Déchets minéraux provenant du génie civil et du bâtiment (construction et démolition),
2. Déchets de combustion,
3. Déchets végétaux,
4. Déchets ménagers (et assimilés)
5. Déchets de bois

Alors que la production annuelle de déchets devrait augmenter de 70% d'ici 2050, une meilleure adéquation entre l'offre et la demande, dans le cadre d'une économie circulaire, devrait contribuer à l'écoulement de ces ressources secondaires la mise à l'échelle de l'économie circulaire devrait apporter une contribution significative à l'objectif de la neutralité climatique en découplant les ressources nécessaires et la croissance économique. Pour que cela soit réalisable, l'économie

circulaire devra fournir aux citoyens des produits fonctionnels, sûrs, abordables et de haute qualité, conçus pour être réutilisés et permettant un reconditionnement et un recyclage de haute qualité (Commission européenne, 2020). Par conséquent, la mise à disposition de matières premières secondaires compétitives et de bonne qualité contribuera à éviter un décalage entre la matière première et la matière première secondaire.

1.2. Besoins dans la construction

La rencontre avec l'industrie routière et le génie civil s'est faite progressivement depuis une cinquantaine d'années et a connu une accélération importante depuis 25 ans, de par la demande et l'exigence accrues de matériaux, tant en quantité qu'en qualité : si, au départ, les déchets étaient utilisés principalement comme remblais ou agrégats, ce sont plus tard des liants, des additifs,... qui se sont développés.

Les besoins du génie civil en termes de matière sont de quatre ordres principalement, à savoir :

- **matériaux**, sur lesquels pèsent de faibles exigences et consommés en grande masse, consommés en grandes masses dans les remblais mais transportables sur de faibles distances en raison des coûts;
- **granulats**, qui doivent répondre à des spécifications diverses selon la place qu'ils occuperont dans les structures et les techniques de traitement utilisées. Les exigences de qualité peuvent à ce niveau devenir élevées, voire sévères pour les couches de surface, pour conduire à des produits finis de qualité identiques à celle des matériaux traditionnels;
- **liants**, qui doivent répondre à des spécifications bien précises et dont les propriétés doivent rester constantes dans le temps. Employés en petite quantité et concurrentiels de produits coûteux (ciments, bitumes), ils peuvent connaître des conditionnements préalables à l'emploi et supporter des coûts de transport plus élevés;
- **activants**, qui seront utilisés en petites quantités, ce qui peut poser des problèmes de collecte, stockage, distribution et régularité.

Si l'intérêt technico-économico-écologique apparaît clairement dans le rapport qui existe entre l'offre en sous-produits et les besoins du génie civil, il est aussi clair que l'utilisation de tels produits pose un certain nombre de difficultés :

- aptitude technique à entrer dans la composition de matériaux (normes);
- aptitude à l'emploi de matériaux utilisant ces déchets;
- optimisation économique des emplois possibles;
- incidence sociale sur l'emploi dans les entreprises fournissant des produits nobles;
- effet sur l'environnement.

Par conséquent, au-delà de toute question technique sur l'utilisation de tel ou tel déchet, diverses questions doivent être posées :

- comment les déchets peuvent-ils trouver leur place dans une industrie et, d'une manière générale, dans une société fortement normalisée ?
- quelle régularité demander et quels contrôles doit-on mettre en place pour que les déchets employés restent toujours dans les fourchettes où ils ont démontré leur capacité d'emploi ?
- comment observer et assurer la durabilité à long terme des matériaux employés ?
- quelle est l'influence sur l'environnement ?
- quels problèmes socio-économiques peuvent surgir dans les activités industrielles classiques ?

2. Cendres volantes de biomasse et de charbon

2.1. Contexte général

2.1.1. Cendres volantes de biomasse

Les cendres volantes de biomasse sont des résidus, principalement basiques, de la combustion, de l'incinération ou de la pyrolyse de diverses matières organiques et minérales végétales, naturelles et non-fossiles (bois, végétaux) : en 2016, 2% de la production mondiale d'électricité est obtenue à partir des bioénergies renouvelables. La biomasse est la première source d'énergie renouvelable en Wallonie. En 2018, la biomasse permet de produire près de 40% de l'électricité renouvelable (Figure 2.1).

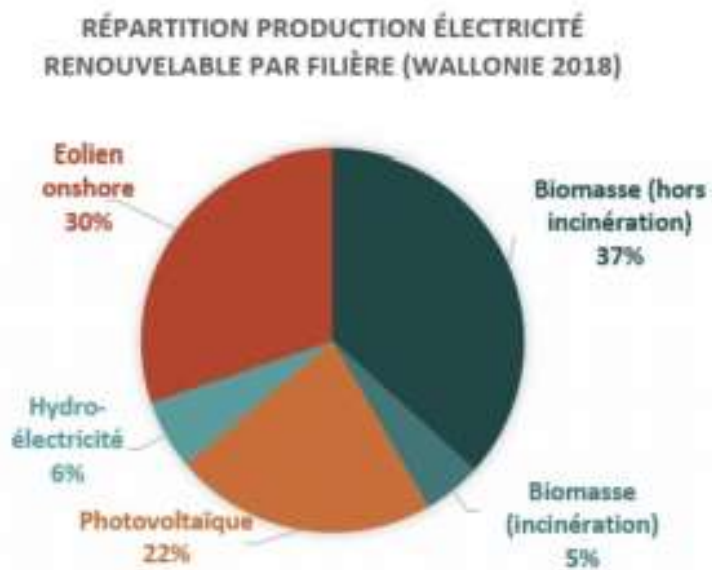


Figure 2.1 Part de la biomasse par rapport aux autres sources d'énergie renouvelable en Wallonie.

La biomasse provient généralement des déchets de bois des forêts, des déchets des exploitations agricoles ou encore des déchets de l'industrie agro-alimentaire. Les cendres volantes sont obtenues par récupération des particules dans les cheminées. La proportion de cendres de foyer et de cendres volantes est différente selon les équipements. Les principaux équipements de combustion de la

biomasse sont : les fours à grilles, les fours à lit fluidisé et les spreader stockers. Ces dernières années, les flux de cendres de biomasse sont évalués à 200 kt en France, et 1500 à 4000 kt en Europe. Selon le rapport établi par ValBiom (Cadastre des unités de productions de cendres de biomasse), la Wallonie compte actuellement 15 installations de cogénération alimentée par de la biomasse (Figure 2.2). Sur ces 15 installations, quatre valorisent actuellement du bois de type B comme combustible. Les autres utilisent du pellet, des plaquettes, du bois de type A, des connexes de la filière bois (sciure, copeaux, écorce, chutes diverses), des rémanents forestiers, des refus de compostage ou du son de céréale. Une enquête a été menée auprès de ces installations pour connaître leur tonnage en cendres.

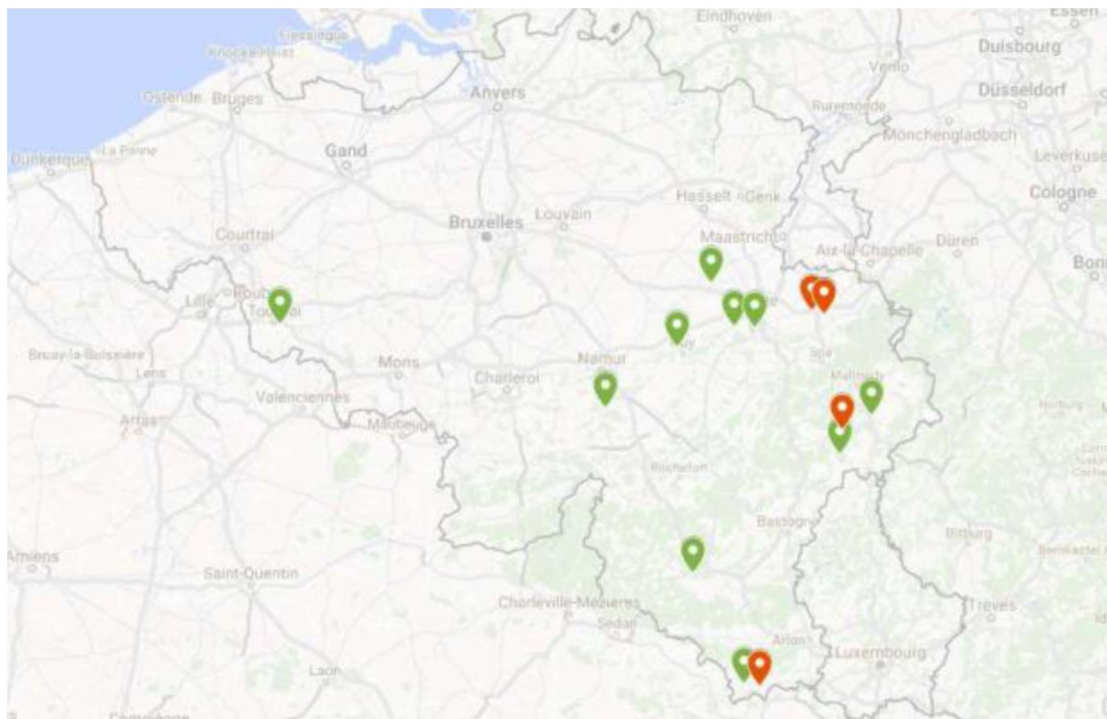


Figure 2.2 Localisation des installations wallonnes de cogénération alimentées par la biomasse (en vert : combustion hors bois B - en rouge : combustion de bois B)

Suite aux données reçues directement auprès de ces sociétés, la quantité totale de cendres mixtes (cendres de fond + cendres volantes) générées par an par l'ensemble de ces installations (incluant les installations de combustion de bois de type B) est estimée à 104.000 T de cendres (dont 70.000 T de cendres de fond, qui sont valorisables en agriculture). Nous nous intéressons spécifiquement aux cendres volantes issues de bois de type A, soit 34 000 tonnes produites par an en Wallonie.

La production de cendres volantes de biomasse a augmenté d'année en année en Europe, pour atteindre 5.5 millions de tonnes pour l'année 2020.

La combustion ou la co-combustion de la biomasse avec le charbon peut réduire la consommation de charbon et minimiser les émissions mondiales de CO₂. La biomasse représente plus de 4% de la consommation totale d'énergie dans l'Union Européenne et augmentera à l'avenir. Cependant, le stockage des cendres volantes (CV) de biomasse occupe des surfaces importantes et augmente le risque de contamination des eaux souterraines. D'autre part, le béton est le matériau le plus largement utilisé pour le développement des infrastructures. La production de ciment libère environ 5-7% des émissions de CO₂ de toutes les activités humaines. Le remplacement d'une partie du clinker ou du ciment par des matériaux de substitution (Supplementary Cementitious Materials - SCM) devient une nécessité tout autant qu'une obligation pour des raisons écologiques ou environnementales. Actuellement, les cendres volantes issues de la biomasse sont couramment utilisées comme complément dans les sols pour améliorer l'alcalinité dans le cas d'applications agricoles (Jala et Goyal 2006). Les cendres volantes de biomasse sont également utilisées comme matériau de remplissage dans la construction de chaussées. Des résultats de recherche récents confirment la pertinence de l'utilisation des cendres volantes de biomasse comme remplacement partiel du ciment dans les bétons structuraux pour bâtiments (Berra et al. 2015; Ramos et al. 2013; Tosti et al. 2018). Naik et al. (2003) ont montré que la composition chimique totale de silice, d'alumine et de composés ferriques pouvait aller de 18,6% à 59,3% pour les échantillons de cendres de bois examinés. Wang et al. (2008) ont rapporté que les cendres volantes de déchets de bois étaient constituées de particules de forme très irrégulière avec une surface poreuse plus élevée que les CV provenant de la combustion du charbon.

Les mécanismes d'interaction avec le ciment, l'effet des indésirables, en particulier les alcalins et le phosphore, restent à explorer.

2.1.2. Cendres volantes de charbon

Les cendres volantes de charbon sont un sous-produit provenant de la combustion du charbon dans les centrales électriques. Suite à cette combustion du charbon pulvérisé, de fines particules sont extraites. Les cendres volantes obtenues de cette manière (uniquement) peuvent être utilisées en tant que constituant du ciment. En Europe, plusieurs organismes se chargent d'étudier les précautions à prendre pour valoriser ce type de déchets, comme l'ECOBA (Association

Européenne des producteurs de cendre de charbon). Une centrale électrique à charbon est équipée d'un système d'épuration qui extrait le dioxyde de soufre (SO₂) et l'oxyde d'azote (NO_x) des gaz des fumées avant leur sortie de la cheminée. Les cendres volantes sont quant à elles récupérées dans des trémies grâce à un électrofiltre, situé au point 10 dans la Figure 2..

La production mondiale de charbon en 2011 était de 7,7 milliards de tonnes, dont presque la moitié extraite en Chine, soit 3,5 milliards de tonnes. Les cendres de charbon sont produites suite à la combustion du charbon dans les centrales électriques. Au niveau mondial, les résultats montrent que la production de cendres volantes est proportionnelle à la production de charbon : environ 200-250 kg tonne de cendres volantes sont générées après la combustion du 1000 kg de charbon, selon le type de charbon utilisé. En Europe, la production des cendres volantes de charbon est environ 26 millions de tonnes en 2016 selon les statistiques de l'ECOBA.

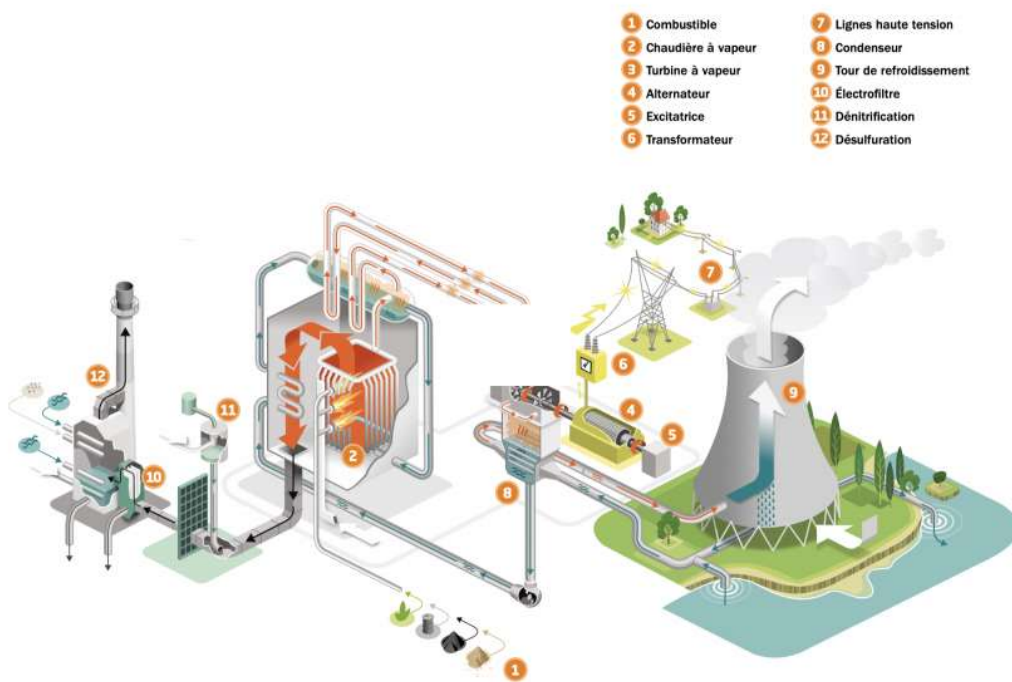


Figure 2.3 Procédé de production: centrale électrique à Charbon

Les cendres volantes de charbon peuvent être réutilisées dans différents domaines, comme addition dans le ciment ou le béton, ou elles peuvent être stockées dans des terrils. En Belgique, de nombreux terrils se trouvent dans les bassins de la Meuse et de la Sambre. Par exemple, le terril de la Héna à Flémalle est composé de 2,3 millions de tonnes de cendres volantes de charbon

provenant de la centrale électrique des Awirs, à environ 2 km au Sud-Est du terril. Le terril de la Héna est actuellement sous surveillance car de nombreuses études ont estimé que les risques de liquéfaction des cendres volantes étaient trop importants et qu'il fallait l'évacuer. L'objectif est d'excaver les cendres volantes et de les valoriser dans leur intégralité dans les cimenteries dans la filière des clinkers. Les cendres volantes sont très intéressantes pour les cimentiers car elles contiennent des oxydes de silice et d'aluminium. En ajoutant environ 20% de cendres volantes dans le clinker, cela permet de remplacer la bauxite qui est habituellement utilisée comme constituant de base. L'utilisation des cendres volantes pour la fabrication des mortiers de maçonnerie et d'enduit en remplacement partiel du ciment Portland ou du ciment mélangé est très recherchée. Des cendres volantes de taille assez grossière sont utilisées pour réaliser des mortiers de maçonnerie adaptés à la réalisation de joints pour maçonneries et enduits. Les chercheurs ont constaté qu'il était possible de produire du mortier où 20 à 40% du ciment était remplacé par des cendres volantes avec une résistance suffisante.

Les cendres volantes de charbon sont largement utilisées dans le monde et comportent de nombreux avantages :

- **Techniques**

L'utilisation des cendres volantes de charbon dans les mortiers/bétons peut améliorer la résistance mécanique, la résistance aux vieillissements physiques et chimiques ainsi que les propriétés d'écoulement à l'état frais. Le remplacement à taux élevé du ciment par des cendres volantes est également une alternative viable pour la fabrication de mortier/béton respectueux de l'environnement car elles permettent une meilleure ouvrabilité et des propriétés de résistances acceptables. L'hydratation du ciment de maçonnerie dans lequel des cendres volantes de charbon sont incorporées libère toujours du Ca(OH)_2 qui réagit avec ces cendres pour former des constituants tels le silicate de calcium hydraté qui contribue à l'augmentation des résistances mécaniques.

- **Économiques**

L'utilisation des cendres volantes de charbon pour la fabrication des mortiers/bétons est une solution économiquement viable lorsque les cendres volantes de charbon peuvent être mises à disposition à un prix raisonnable.

- **Environnementaux**

L'utilisation des cendres volantes de charbon permet de minimiser les impacts environnementaux liés à leurs stockages ou à leurs éliminations. L'emploi des cendres volantes de charbon permet de plus de diminuer le CO₂, qui provient de la production de clinker et de réduire la consommation de matières premières naturelles telles que le calcaire. Elles permettent enfin de valoriser un résidu généré par les centrales thermiques fonctionnant au charbon.

De nombreux procédés existent afin de piéger les déchets toxiques issus de matériaux industriels. Une de ces méthodes employées est la stabilisation. Elle consiste à mélanger le matériau avec de l'eau, des cendres volantes de charbon et un agent (chaux, chaux+gypse ou encore ciment) qui va activer le durcissement du mélange. Une fois que le durcissement a lieu, un matériau pierreux dont le relargage en lixiviation est grandement réduit est obtenu. Les mécanismes de piégeage des composés inorganiques consistent généralement en:

- la capture dans le gel de la structure ;
- la diminution de la solubilité des métaux lourds due à la haute alcalinité dominante et la formation de silicates insolubles ;
- les faibles perméabilité et diffusivité à l'eau et aux ions du matériau solidifié ;

L'adsorption physique et les liaisons physico-chimiques, dues aux produits de réactions entre l'eau et les cendres activées qui ont des surfaces spécifiques élevées, favorisent ce type de liaisons.

Les cendres volantes de charbon présentent néanmoins certains inconvénients :

- **Techniques**

Lorsqu'une partie du ciment est substitué par des cendres volantes de charbon, il est parfois difficile d'obtenir les propriétés souhaitées sans renoncer à certaines propriétés à l'état frais ou durci. Certaines études ont effectivement constaté que l'utilisation de cendres volantes de charbon réduisait la résistance du mortier ou du béton fabriqué. De plus, lorsque les cendres volantes de charbon sont incorporées en grande quantité dans le mortier/béton, le ciment dans le mortier/béton est en quelque sorte dilué, ce qui peut avoir un effet sur la vitesse de développements des performances mécaniques.

- **Disponibilité**

Dans certains pays, des cendres volantes de charbon de bonne qualité ne sont pas toujours disponibles et sont parfois moins réactives par rapport aux cendres volantes étrangères. Il faut notamment faire la différence entre les cendres volantes obtenues à partir la combustion de charbon (type anthracite) et de lignite. Les premières sont essentiellement siliceuses et conviennent généralement bien pour le remplacement du clinker. Les secondes sont qualifiées de « sulfo-calciques » et peuvent donner lieu à des réactions secondaires non désirées.

On notera que, en Belgique, il n'existe plus de centrale thermique fonctionnant au charbon : les cendres volantes actuelles proviennent de sites historiques, qui, à terme seront épuisés.

Les spécifications et critères de conformité des cendres volantes de charbon sont régis par la norme EN 450-1. La fabrication de ciments composés avec des cendres volantes et/ou d'autres constituants est encadrée par la norme EN 197-1. Aujourd'hui, plusieurs normes concernent les cendres volantes de charbon provenant des centrales thermiques.

La norme EN 450 définit les exigences et le contrôle qualité des cendres volantes pour béton. Les cendres volantes utilisées dans les mortiers et bétons doivent répondre à de nombreuses exigences physiques et chimiques comme :

- Perte au feu (EN 196-2) : elle ne doit pas excéder 5% en masse afin de limiter la quantité de carbone imbrûlé dans les cendres volantes ;
- Teneur en chlorure Cl⁻ (EN 196-21) : elle ne doit pas excéder 0,1% en masse ;
- Teneur en anhydride sulfurique SO₃ (EN 196-2) : elle ne doit pas excéder 3% en masse ;
- Teneur en oxyde de calcium libre (EN 451-1) : elle ne doit pas excéder 1% en masse ;
- Finesse (EN 451-2) : la valeur maximale de la finesse ne doit pas excéder 40% ;
- Indice d'activité (EN 196-1) : l'indice d'activité à 28 jours et 90 jours doit être supérieur à 75% et 85%, respectivement.

Les cendres volantes de biomasse ne sont pas encore considérées dans les normes comme matériaux de substitution du ciment contenu dans le mortier et le béton. Dans ce travail de recherche, les limites de substitution des cendres volantes de biomasse sont déterminées sur base

des résistances mécaniques, des propriétés à l'état frais et des propriétés à l'état durci obtenues sur des mortiers de maçonnerie et d'enduit.

2.2. Utilisation des cendres avec des liants hydrauliques

2.2.1. Caractérisation des cendres volantes et autres matières secondaires

Plusieurs matériaux différents (cendres volantes et ciments) ont été collectés afin d'étudier les possibilités d'utilisation dans des mortiers. Deux cendres volantes de charbon ont été collectées, l'une par le Centre Terre et Pierre (noté CVC1) et par ENGIE Electrabel (venant du Terril de la Hêna, noté CVC2). Deux cendres volantes de biomasse ont été fournies par, respectivement, une entreprise belge de production de bioéthanol (CVB1) et ENGIE Electrabel (venant de la combustion de 100% de pellet de bois de la centrale des Awirs, notée CVB2). Un type de filler calcaire commercial a été utilisé afin de servir de référence (noté FC). Trois types de ciment ont été sélectionnés afin d'étudier la possibilité de substitution de ciment par les matières secondaires (notés CEM II/B-M (S-V) 32,5 N, CEM III 42,5, CEM I 52,5 respectivement).

Granulométrie

La granulométrie des cendres volantes et des ciments a été mesurée au granulomètre laser (Mastersizer 2000). Le Tableau 2.1 présente les résultats obtenus. Les ciments semblent en général légèrement plus fins que les cendres de biomasse. L'analyse du ciment CEM I 52,5 et des cendres volantes de la biomasse montre notamment que le D_{50} des cendres volantes de biomasse CVB2 est de 33,39 μm tandis que le D_{50} du ciment vaut 11,14 μm . Le D_{50} des cendres volantes de charbon CVC2 est de 29,04 μm , ce qui est similaire aux cendres volantes de la biomasse CVB2.

Tableau 2.1

Diamètre moyen et surface spécifique des matériaux (granulométrie laser)

	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)	Surface spécifique déterminée au laser (m^2/g)
CVC1	3,27	18,94	68,73	0,92
CVC2	4,63	29,04	88,65	0,68
CVB1	3,05	21,53	73,11	0,83
CVB2	5,01	33,39	114,31	0,63
FC	1,74	18,27	121,67	1,22
CEM I 52,5	2,53	11,14	26,00	1,32

CEM II 32,5	2,25	20,06	68,80	1,01
CEM III 42,5	2,63	14,35	36,99	1,08

Densité et surface spécifique

La densité réelle des matériaux est déterminée par le pycnomètre à Hélium (AccuPyc II 1345) en utilisant des mesures de volume de haute précision. Le Tableau 2.2 présente les résultats obtenus. Les densités des cendres volantes (CVC2 et CBV2) sont inférieures à celles des ciments. Les surfaces spécifiques déterminées par la méthode de Blaine (selon la norme EN 196-6) et par la méthode BET au N₂ sont également présentées dans ce tableau : la surface spécifique des matériaux mesurée selon la méthode BET est 2 à 5 fois plus grande que celle mesurée selon la méthode de Blaine. Les surfaces spécifiques des ciments sont généralement inférieures à celles des cendres volantes, ce qui est probablement dû à leur plus grande porosité et au fait qu'un certain nombre de cendres sont des billes creuses.

Tableau 2.2

Propriétés physiques des matériaux

	Densité (g/cm ³)	Surface spécifique BET (m ² /g)	Surface spécifique Blaine (m ² /g)
CVC1	2,319	0,7338	0,3227
CVC2	2,256	2,179	0,5582
CVB1	2,244	3,8718	0,7585
CVB2	2,726	2,6119	0,4984
FC	2,726	1,0726	0,369
CEM I 52,5	3,125	1,2916	0,4171
CEM II 32,5	2,837	1,0386	0,2937
CEM III 42,5	2,953	1,1245	0,4266

Composition chimique

La composition chimique des matériaux est déterminée par fluorescence X (Tableau 2.3). Les cendres volantes de charbon ont des teneurs en SiO₂ plus grandes (54,5%, 49,3% pour les cendres volantes CVC1 et CVC2 respectivement) alors que les cendres volantes de biomasse ont des teneurs en CaO plus élevées (31% et 25,8% pour les cendres volantes de biomasse CVB1 et CVB2). La CVB1 présente des teneurs en K₂O (16,2%), P₂O₅ (27,7%) largement plus grandes que les autres cendres volantes. Ainsi, les cendres volantes de biomasse ont une teneur en (SiO₂ + Al₂O₃

+ Fe₂O₃) inférieure à celle des cendres volantes de charbon (84,9% pour les cendres volantes de charbon CVC2 et 33,2% pour les cendres volantes de biomasse CVB2): ceci devrait avoir pour conséquence une plus faible réactivité pouzzolanique par rapport à la cendre volante de charbon. Les cendres volantes de biomasse ont eu une perte au feu plus élevée que celle des cendres de charbon et du ciment, ce qui peut être dû à une combustion incomplète du carbone due à la cinétique et au transfert de masse dans la centrale de biomasse, quand les pellets de bois sont à une température comprise entre 750°C et 1000°C. En effet, certains d'entre eux peuvent ne pas être consommés correctement.

Tableau 2.3

Composition chimique des matériaux (fluorescence X)

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
CVC1	54,5	1,3	25,2	6,4	0	1,4	5,1	0,4	1,5	1,4	1,9	99,1
CVC2	49,3	1	27,7	7,9	0,1	1,6	1,4	0,8	4	0,3	6,6	100,4
CVB1	0,4	0	0,1	0,2	0	1,2	31	1,2	16,2	27,7	18	96
CVB2	24,7	0,4	5,3	3,2	1	9,3	25,8	2,3	7,9	4,9	9,7	94,3
FC	3,4	0	0,6	0,2	0	0,6	56,2	0,1	0	0	38,5	99,8
CEM I 52,5	20,2	0,5	4,8	3,3	0,1	1,8	64,2	0,3	0,5	0,4	1,1	100
CEM II 32,5	27,2	0,7	8,6	3,8	0,1	2,5	49,7	0,5	0,7	0,4	2,5	96,7
CEM III 42,5	27,1	0,6	7,2	2,1	0,2	4,1	53,9	0,3	0,5	0,2	0,8	100

Indice d'activité

L'indice d'activité des matériaux est déterminé selon la norme EN 450-1. Les 4 types de cendre (deux cendres volantes de charbon, deux cendres volantes de biomasse) et le filler calcaire ont été testés en réalisant des mélanges de 75% de ciment CEM I 52,5 et 25% du produit testé. La préparation des éprouvettes du mortier de référence (100% de ciment CEM I 52,5) et la détermination de la résistance à la compression sont menées selon la méthode décrite dans l'EN 196-1. L'indice d'activité des deux cendres volantes de charbon (CVC1 et CVC2) est 75,5% et 75% après 28 jours, ce qui rencontre les exigences de la norme EN 450-1 (Tableau 2.4). Les valeurs obtenues pour deux cendres volantes de biomasse (CVB1 et CVB2) sont très faibles, soit 45 et 58 %, respectivement. La cendre volante de biomasse CVB2 est donc choisie pour l'intégration dans l'étape suivante.

Les valeurs à 90 jours sont systématiquement plus élevées, sauf pour le filler calcaire et la CVB1. Il est connu que le filler calcaire peut agir comme site de nucléation et ainsi accélérer à court terme la cristallisation des CSH (silicates de calcium hydratés) tandis que les cendres volantes peuvent réagir plus tard, lorsque les hydroxydes de calcium sont formés. Il faut noter ici que ce n'est pas le cas pour les cendres volantes de biomasse, dont l'indice d'activité varie très faiblement entre 28 et 90 jours.

Tableau 2.4

Indice d'activité déterminé selon EN 450-1

	Étalement (mm)	28 jours	90 jours
Reference	177,7	-	-
CVC1	190,3	75,5%	86,2%
CVC2	168,7	74,9%	85,7%
CVB1	141,7	44,7%	42,3%
CVB2	118,6	58,1%	61,2%
FC	171,6	83,0%	82,2%

2.2.2. Méthodes utilisés pour la caractérisation des mortiers

Les échantillons de mortier ont tous été réalisés en laboratoire dans les mêmes conditions - conservation sous eau (20 ± 2 °C) - selon la norme EN 196-1.

Étalement au mini-cône

L'ouvrabilité du mortier est évaluée à l'aide de la mesure de l'étalement au mini-cône selon la norme EN 1015-3 avec le moule de forme tronconique (Hauteur : 60mm ; Diamètre à la base : 100mm ; Diamètre au sommet : 70mm).

La masse volumique du mortier à l'état frais est déterminée selon la norme EN 1015-6. Les résistances en compression et en flexion des échantillons du mortier durci sont déterminées à l'aide de la machine INSTRON 5585 (cellule de 250 KN) après 7, 28, 90 jours selon la norme EN 196-1. La porosité et d'absorption d'eau par immersion ont été mesurées suivant la norme NBN B15-215.

2.2.3. Mortiers de maçonneries avec cendres volantes de charbon

Cinq mortiers normalisés ont été fabriqués afin d'étudier la possibilité de valorisation des cendres volantes de charbon en substitution d'une partie de ciment dans le mortier. Cinq mortiers ont été fabriqués à partir du ciment CEM I 52,5 et la cendre volante de charbon CVC2. Ces derniers ont été notés M0, MC10, MC20, MC30 et MC50 ce qui correspond à un taux de substitution du ciment de 0%, 10%, 20%, 30% et 50% par la même masse de cendre volante, respectivement. Ces mortiers ont été réalisés avec le sable siliceux normalisé selon la norme EN 196-1. Le Tableau 2.5 présente la composition des mortiers étudiés et les propriétés des mortiers à l'état frais. On peut remarquer que les valeurs d'étalement diminuent légèrement lorsque le taux de substitution du ciment par des cendres volantes de charbon augmente. De plus, les résultats indiquent que l'inclusion de CVC2 dans le mortier n'affecte pratiquement pas l'ouvrabilité des mélanges. Les valeurs de la densité du mortier à l'état frais diminuent légèrement quand le taux de substitution du ciment par des cendres volantes de charbon augmente, ce qui est dû à la plus faible densité de la cendre volante de charbon.

Tableau 2.5

Composition des mortiers avec cendres volantes de charbon

	M0	MC10	MC20	MC30	MC50
Sable (g)	1350	1350	1350	1350	1350
Ciment (g)	450	405	360	315	225
CVC2 (g)	0	45	90	135	225
Eau efficace (g)	225	225	225	225	225
E_{eff}/C	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Etalement (mm)	176	169	167	165	161
Densité à l'état frais (g/cm^3)	2,35	2,34	2,34	2,32	2,31

La Figure 2. et la Figure 2.5 présentent les résistances mécaniques du mortier en fonction de la teneur en CVC. Les résistances à la compression et à la flexion des mortiers diminuent quand le pourcentage de substitution du ciment par la cendre volante de charbon augmente. Ce comportement change avec le temps de durcissement. A l'âge de 28 jours, on constate que la résistance en compression mortier contenant 20% de cendre volantes est de 49,5 MPa (environ 84,5% du mortier de référence). Cependant, à 90 jours de durcissement, les mortiers contenant 10 et 20% de cendres volantes ont acquis presque la même résistance à la compression que le mortier de référence. Cela indique que le développement de la résistance à la compression du mortier avec

des cendres volantes est plus long par rapport au mortier de référence, ce qui est généralement expliqué par le comportement pouzzolanique des cendres volantes.

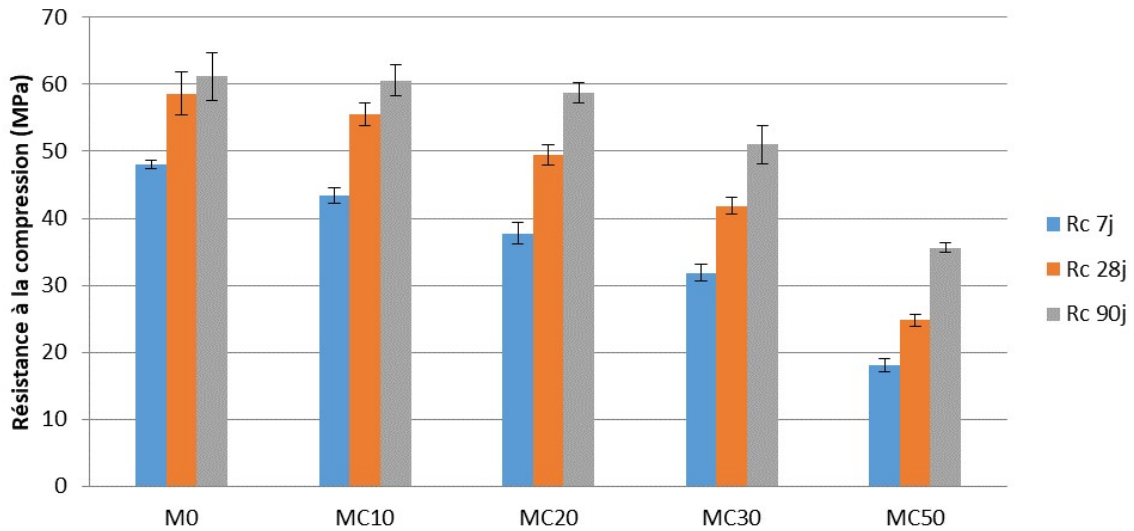


Figure 2.4 Résistance à la compression des mortiers avec cendres volantes de charbon

Le même genre de comportement est observé pour l'évolution de la résistance en flexion, qui reste néanmoins assez élevée à 90 jours, même pour des teneurs élevées en CVC.

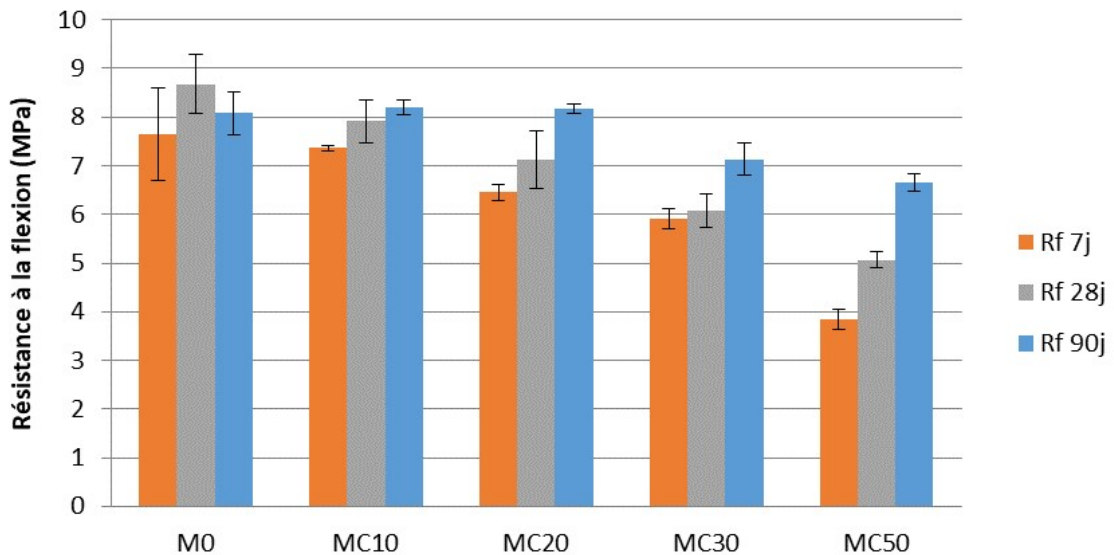


Figure 2.5 Résistance à la flexion des mortiers avec cendres volantes de charbon

2.2.4. Mortiers de maçonneries avec cendres volantes de biomasse

Sept mortiers ont été fabriqués afin d'étudier la possibilité de valorisation des cendres volantes de biomasse en substitution d'une partie de ciment dans le mortier. Cinq mortiers ont été fabriqués avec du ciment CEM I 52,5 et la cendre volante de biomasse CVB2. Ces derniers ont été notés M0, MB10, MB20, MB30 et MB50 ce qui correspond à un taux de substitution du ciment de 0%, 10%, 20%, 30% et 50% par la même masse de cendre volante de biomasse respectivement. Deux mortiers de référence ont été fabriqués avec le ciment CEM III 42.5 LA (noté M0_42,5) et le ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N (noté M0_32,5). Ces mortiers ont été réalisés avec le sable siliceux normalisé selon la norme EN 196-1. Le Tableau 2.6 présente la composition des mortiers étudiés.

Tableau 2.6

Composition des mortiers avec cendres volantes de biomasse

	M0	MB10	MB20	MB30	MB50	M0_42,5	M0_32,5
Sable (g)	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Ciment (g)	450	405	360	315	225	450	450
CVB2 (g)	0	45	90	135	225	0	0
Eau efficace (g)	225	225	225	225	225	225	225
E_{eff}/C	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

La Figure 2. présente l'étalement des mortiers en fonction de la teneur en CVB2. On peut remarquer que les valeurs d'étalement diminuent lorsque le taux de substitution du ciment par des cendres volantes de biomasse augmente. Les résultats indiquent que la substitution du ciment par cette cendre volante de biomasse dans le mortier affecte négativement les performances d'ouvrabilité, surtout pour les taux au-delà de 20%. Cette tendance pourrait être due à la surface spécifique plus élevée des cendres volantes de la biomasse par rapport au ciment. Ainsi, une partie de l'eau du mélange peut être adsorbée par les cendres volantes de biomasse, ce qui diminue la quantité d'eau libre, entraînant une perte significative de l'ouvrabilité. Une autre hypothèse est que la teneur plus élevée en résidus de carbone peut aussi contribuer à l'adsorption de l'eau.

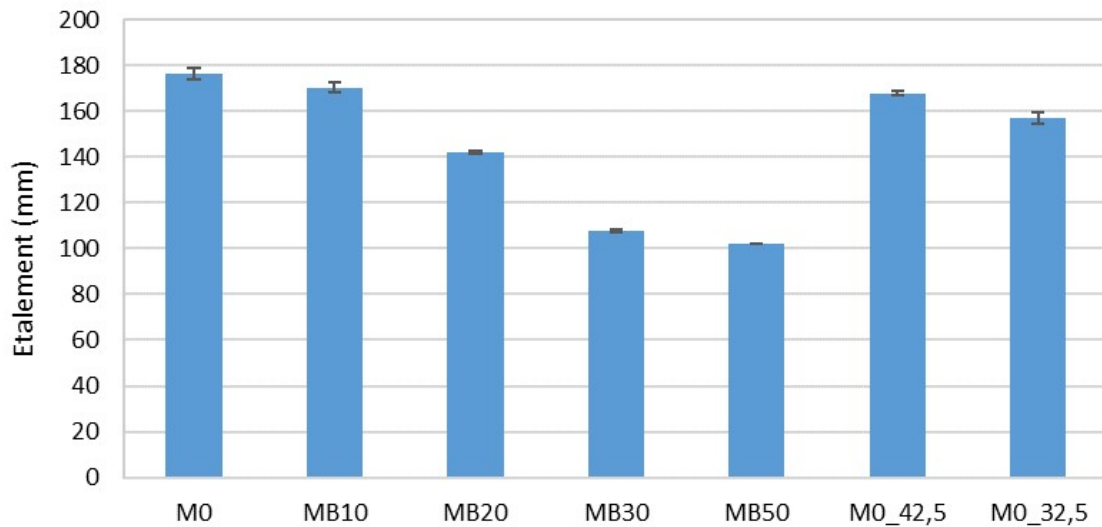


Figure 2.6 Etalement de mortiers avec cendres volantes de biomasse (CVB2)

La Figure 2. présente la densité des mortiers à l'état frais. Les valeurs de densité diminuent très légèrement quand le taux de substitution du ciment par des cendres volantes de biomasse augmente, ce qui est dû à la plus faible densité de cendre volante de biomasse conduisant à une plus faible densité de la pâte dans le mortier.

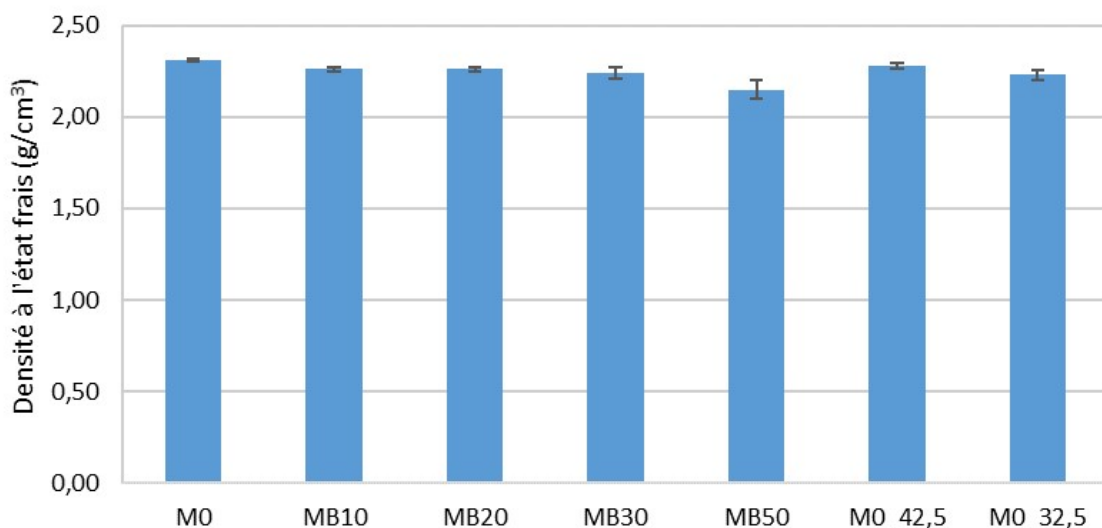


Figure 2.7 Densité à l'état frais des mortiers avec cendres volantes de biomasse (CVB2)

Les résistances mécaniques sont présentées à la Figure 2.8 et la Figure 2.9. Les résistances à la flexion et à la compression des mortiers diminuent quand le taux de substitution du ciment par des cendres volantes de biomasse augmente. Ceci est la conséquence normale du remplacement du ciment par des constituants peu ou pas réactifs chimiquement. La résistance à la compression des mortiers (MB10, MB20, MB30, MB50) après 28 jours est de 87,7%, 76,8%, 58,4%, 26,8% par rapport au mortier de référence (M0). La résistance à la flexion des mortiers (MB10, MB20, MB30, MB50) après 28 jours est de 83,5%, 83,0%, 76,6%, 38,2% par rapport au mortier de référence (M0). La tendance observée est très probablement due au mécanisme selon lequel les particules de cendres volantes de biomasse agissent plus comme des matériaux de remplissage dans la matrice de pâte de ciment que comme un liant, notamment en raison de la composition chimique des cendres volantes de biomasse conduisant à une faible réactivité pouzzolanique. Néanmoins, une amélioration de la résistance à la compression par rapport au mortier de référence est observée après 90 jours. Ainsi, l'augmentation des cendres volantes de la biomasse a entraîné une augmentation de la surface des matériaux de remplissage à coller en diminuant la quantité de ciment, ce qui entraîne une diminution de la résistance. Les mortiers avec des taux de substitution en cendres volantes de biomasse inférieurs à 20% restent néanmoins toujours acceptables en ce qui concerne la résistance à la flexion et à la compression.

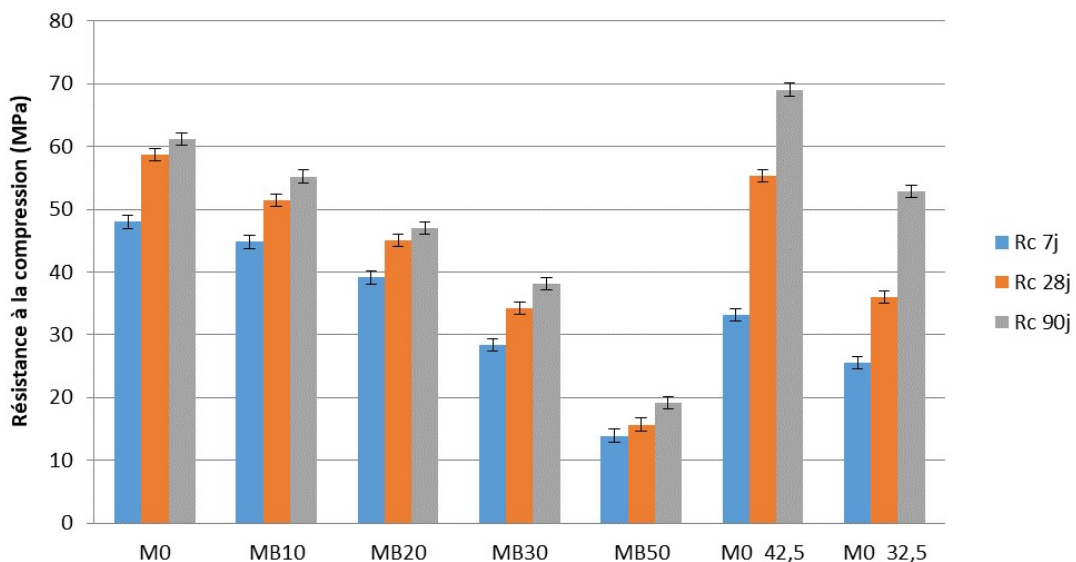


Figure 2.8 Résistance à la compression des mortiers avec cendres volantes de biomasse (CVB2)

Les mortiers réalisés avec des ciments de type CEM II et CEM III, moins rapide, montrent une évolution plus importante des résistances après 90 jours, ce qui est la manifestation du développement progressif des hydrates construits sur les cendres volantes et le laitier contenus dans ces ciments, ainsi que la finesse moins importante (par rapport au CEM I 52.5).

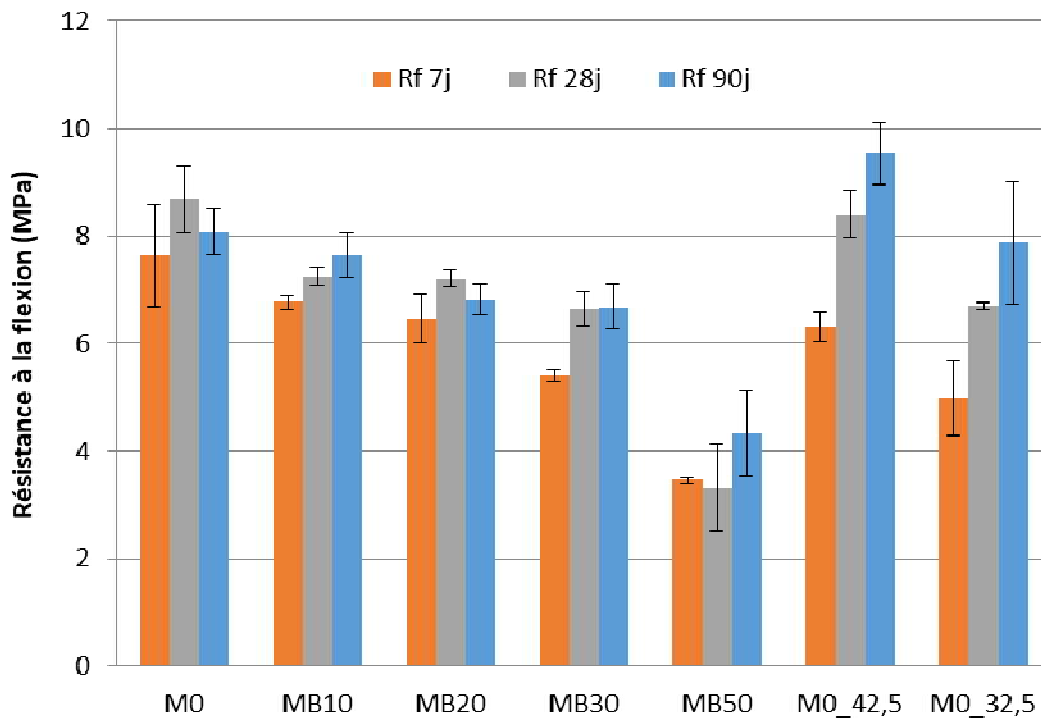


Figure 2.9 Résistance à la compression des mortiers avec cendres volantes de biomasse (CVB2)

La Figure 2. reprend les résistances à la compression relatives de tous les mortiers étudiés. Comme on peut le voir, les propriétés mécaniques des mortiers à base de cendres volantes de charbon sont toujours supérieures à celles des mortiers à base de cendres volantes de biomasse ; on observe aussi un effet positif du temps sur le développement des résistances. L'activité pouzzolanique plus élevée des cendres volantes de charbon par rapport aux cendres volantes de biomasse est certainement induite par la teneur plus élevée en structures amorphes dans cendres volantes de charbon ($[SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3] = 84,9\%$ pour les cendres volantes de charbon contre $33,2\%$ pour les cendres volantes de biomasse).

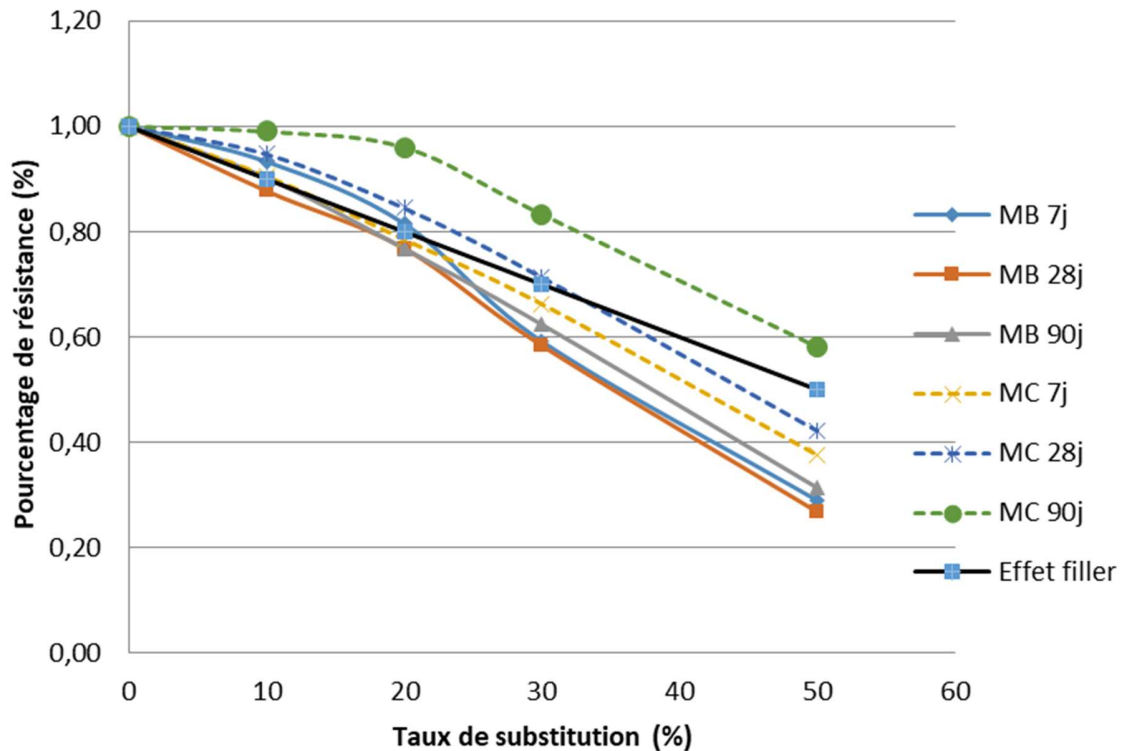


Figure 2.10 Pourcentage de résistance à la compression relative de tous les mortiers étudiés par rapport au mortier de référence (MB signifie le mortier à base de cendre volante de biomasse ; MC signifie le mortier à base de cendre volante de charbon)

2.2.5. Mortiers de maçonnerie avec CEM II 32,5 et cendre volante de biomasse

Les compositions de ces mortiers de maçonnerie sont données dans le Tableau 2.7. Le rapport E/L a été déterminé pour obtenir un étalement au mini-cône de 175 ± 10 mm. Le sable jaune naturel absorbe (et adsorbe) une partie de l'eau (0,7% en masse totale du sable jaune). Le rapport Liant/Sable est fixé à 1/4. Trois mortiers (notés MM0, MM10 et MM20) ont été fabriqués avec le ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N et la cendre volante de biomasse (CVB2). La composition nommée MM10 correspond au mélange où 10% du volume du ciment a été substitué par des cendres volantes de biomasse. Pour obtenir un étalement constant de 175 ± 10 mm, le rapport E/L est plus important pour les mortiers avec la cendre volante de biomasse, ce qui est dû à la demande en eau plus élevée des cendres volantes de biomasse.

Tableau 2.7

Composition des mortiers de maçonnerie avec CEM II 32,5 et cendres volantes de biomasse

	MM0	MM10	MM20
Sable naturel jaune (g)	1350	1350	1350
Ciment CEM II/B-M 32,5 N (g)	369	332	295
Cendre volante de biomasse CVB2 (g)	0	35	70
Eau efficace (g)	240	257	256
Eau absorbée (g)	9	9	9
E/L (L: Ciment + CVB2)	0,65	0,70	0,70

La Figure 2.2 présente les résistances mécaniques après 28 et 90 jours. Les propriétés mécaniques des mortiers avec cendres volantes de biomasse sont toujours légèrement inférieures à celles des mortiers de référence. Ceci est la conséquence normale du remplacement du ciment par des constituants peu ou pas réactifs chimiquement. La résistance à la compression des mortiers (MM10 et MM20) après 28 jours est de 88,7%, 82,9% par rapport au mortier de référence (MM0). La résistance à la compression des mortiers (MM10 et MM20) après 90 jours est de 87,2%, 75,2% par rapport au mortier de référence (MM0). Selon la norme EN 998-2, les mortiers MM10 et MM20 sont classés dans la catégorie de mortier «M15». Les résistances obtenues permettent de considérer l'utilisation de ce type de mortier dans un certain nombre de maçonneries car les valeurs restent suffisamment élevées.

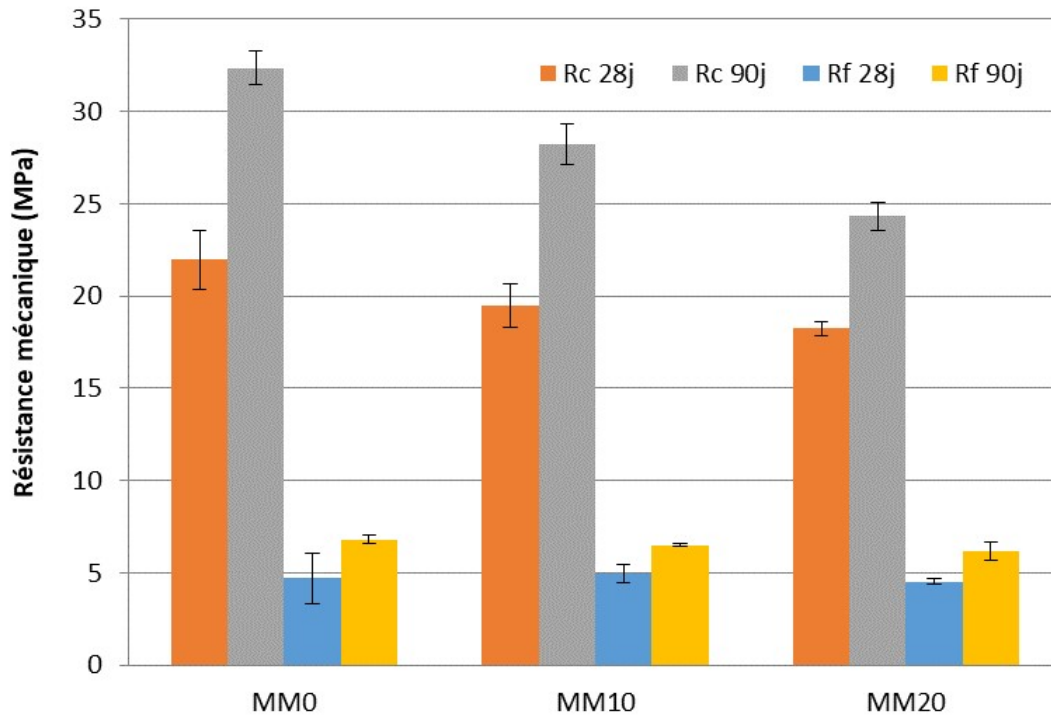


Figure 2.2 Résistance mécanique des mortiers de maçonnerie avec CEM II 32,5 et cendres volantes de biomasse

2.2.6. Mortiers d'enduit

La composition des mortiers d'enduit est légèrement différente (Tableau 2.8). Le rapport E/L a été déterminé pour obtenir un étalement au mini-cône de 175 ± 10 mm. Le rapport Liant/Sable est fixé dans ce cas à 1/6. Trois mortiers (notés ME0, ME10 et ME20) ont été fabriqués avec le ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N et la cendre volante de biomasse (CVB2). La composition nommée ME10 correspond au mélange dans lequel 10% du volume du ciment a été substitué par des cendres volantes de biomasse.

Tableau 2.8

Composition des mortiers d'enduit avec CEM II 32,5 et cendres volantes de biomasse

	ME0	ME10	ME20
Sable naturel jaune (g)	1350	1350	1350
Ciment CEM II/B-M 32,5 N (g)	246	222	197
Cendre volante de biomasse CVB2 (g)	0	23	47

Eau efficace (g)	251	250	249
Eau absorbée (g)	9	9	9
E/L (L: Ciment + CVB2)	1,02	1,02	1,02

La Figure 2.3 présente les résistances mécaniques après 28 et 90 jours pour un mortier d'enduit. Les résistances à la flexion et à la compression des mortiers diminuent quand le taux de substitution de ciment par la cendre volante de biomasse augmente. Ceci est la conséquence normale du remplacement du ciment par des constituants peu ou pas réactifs chimiquement. La résistance à la compression des mortiers (ME10 et ME20) après 28 jours est de 76,5%, 76,7% par rapport au mortier de référence (ME0). La résistance à la compression des mortiers (ME10 et ME20) après 90 jours est de 79,6%, 72,3% par rapport au mortier de référence (ME0). Selon la norme EN 998-2, les mortiers ME10 et ME20 sont classés dans la catégorie de mortier «M5», ce qui reste néanmoins intéressant du point de vue applicatif.

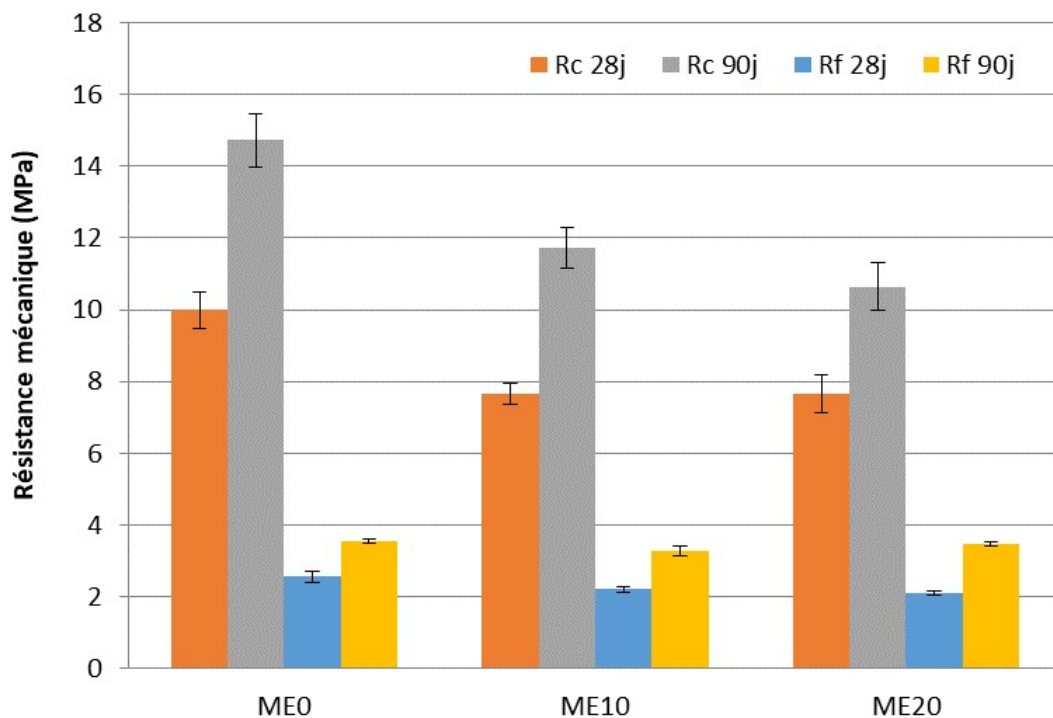


Figure 2.3 Résistance mécanique des mortiers d'enduit avec CEM II 32,5 et cendres volantes de biomasse

2.2.7. Mortiers bâtards

Des mortiers bâtards, contenant de la chaux, ont également été confectionnés (Tableau 2.9). Le rapport E/L a été déterminé pour obtenir un étalement au mini-cône de 175 ± 10 mm. Le rapport Ciment/Chaux hydratée/Sable est fixé à 1/1/6 en volume. Trois mortiers (notés MD0, MD10 et MD20) ont été fabriqués avec le ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N et la cendre volante de biomasse (CVB2). La composition nommée MD10 correspond au mélange dans lequel 10% du volume du ciment est substitué par des cendres volantes de biomasse.

Tableau 2.9

Composition des mortiers bâtards avec CEM II 32,5 et cendres volantes de biomasse

	MD0	MD10	MD20
Sable naturel jaune (g)	1350	1350	1350
Ciment CEM II/B-M 32,5 N (g)	369	332	295
Cendre volante de biomasse CVB2 (g)	0	35	70
Chaux hydratée (g)	192	173	154
Eau efficace (g)	319	303	292
Eau absorbée (g)	9	9	9
E/L (L: Ciment + CVB2)	0,70	0,70	0,71

La Figure 2.3 présente les résistances mécaniques après 28 et 90 jours pour un mortier bâtard. On observe que les résistances à la flexion et à la compression à 28 jours des mortiers augmentent légèrement quand le taux de substitution du ciment par des cendres volantes de biomasse augmente. L'apport de chaux semble activer la faible réactivité des cendres volantes de biomasse. La résistance à la compression des mortiers (MD10 et MD20) après 90 jours est de 91,7%, 92,1% par rapport au mortier de référence (MD0). Selon la norme EN 998-2, les mortiers MD10 et MD20 sont classés dans la catégorie de mortier «M5». L'utilisation de cendres de biomasse ne semble donc pas affecter le comportement des mortiers bâtards, pour le type de cendres et les teneurs étudiées.

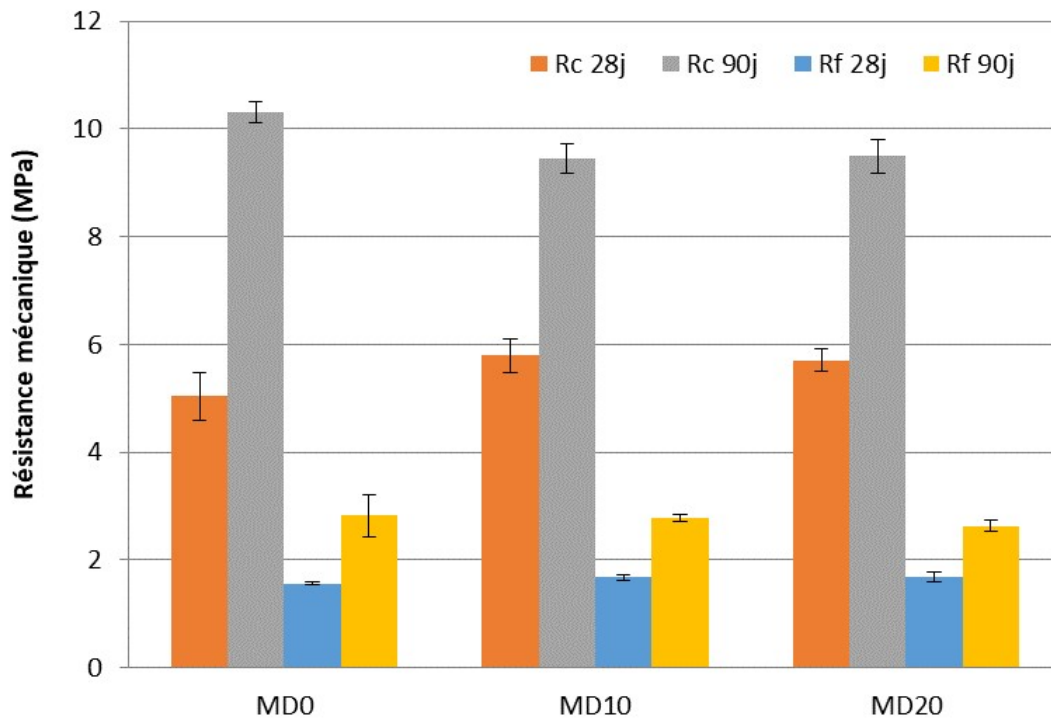


Figure 2.4 Résistance mécanique des mortiers bâtards avec CEM II 32,5 et cendres volantes de biomasse

2.2.8. Conclusions

Les propriétés mécaniques des mortiers avec des cendres volantes de charbon sont toujours plus élevées que celles des mortiers fabriqués avec des cendres de biomasse. Ainsi, contrairement aux cendres volantes de charbon, la composition chimique des cendres volantes de biomasse n'est pas appropriée pour induire une activité pouzzolanique. Par conséquent, les cendres volantes de biomasse étudiées provenant de la combustion de 100 % de pellet de bois ne répondaient pas aux exigences minimales définies dans la norme EN 450-1 pour leur utilisation en tant qu'additions minérales.

Cela n'exclut toutefois pas la réutilisation possible, dans les mortiers, de ce type de cendres volantes de biomasse pour de faible taux de substitution (5 à 20%) si celles-ci sont générées par un processus de combustion bien défini.

Les mortiers testés dans le cadre de ce projet ont été réalisés afin d'obtenir un étalement constant de 175 ± 10 mm en variant le rapport E/L. Le rapport E/L obtenu pour le mortier d'enduit est un peu plus grand que pour le mortier de maçonnerie et pour le mortier bâtard. Le rapport E/L reste relativement constant pour tous les types de mortier et quel que soit le taux de substitution (10% et 20%). La résistance en compression des mortiers à base de CVB est légèrement inférieure à celle des mortiers de référence quand le taux de substitution de CVB est de 10% et 20%. La résistance en compression du mortier de maçonnerie est supérieure à celle du mortier d'enduit et du mortier bâtard. Pour rappel, le mortier de maçonnerie a un rapport L/S de $\frac{1}{4}$ alors que le mortier d'enduit a un rapport L/S de $\frac{1}{6}$: le mortier de maçonnerie contient donc plus de ciment que le mortier d'enduit et le mortier bâtard, ce qui permet de créer plus de liaisons lors de l'hydratation de la matrice cimentaire, conduisant à une plus grande résistance mécanique des mortiers.

Néanmoins, d'autres expériences consacrées à la durabilité devraient être réalisées avant de donner une recommandation finale.

2.3. Utilisation des cendres avec des liants alcali-activés

Une autre étude a été menée en parallèle avec P. Prochon, doctorant en co-tutelle avec l'Université Polytechnique de Varsovie (Pologne). L'entièreté des résultats est disponible sur <http://hdl.handle.net/2268/251571>.

Cette recherche est apparue nécessaire pour étudier l'utilisation des cendres volantes de biomasse dans le développement de nouveaux produits finis: les matériaux alcali-activés (AAM), qui ont été préparés avec des cendres de biomasse (BFA) et des cendres volantes de co-combustion (CFA).

Deux problèmes principaux devaient être résolus:

- Question 1: est-il possible d'utiliser des BFA ou CFA comme liant dans les géopolymères et les matériaux activés par les alcalis (AAM) après durcissement dans les conditions ambiantes?
- Question 2: quel est le rôle des BFA et CFA dans le processus de liaison (précurseur, activateur)?

Pour répondre à ces questions, la recherche a été menée sur des mortiers à base de cendres volantes issues de la combustion du charbon (RFA), de la co-combustion du charbon et de la biomasse

(CFA) et de la combustion de la biomasse (BFA). La recherche s'est concentrée sur la fabrication de liant activé par les alcalis avec un profil d'empreinte carbone plus faible par rapport à un liant de type ciment traditionnel (OPC): cet objectif a été atteint en utilisant des cendres volantes généralement reconnues comme des sous-produits industriels à empreinte carbone négligeable, comme précurseurs de la production d'AAM, au travers d'une méthode d'activation alcaline non standard. De plus, les conditions de durcissement ambiantes ont été préférées à tout procédé de chauffage.

Un programme de recherche en deux étapes a été élaboré. Dans la recherche préliminaire, les AAM ont été activés avec un seul activateur (chaux vive ou hydroxyde de sodium) et avec des activateurs combinés (hydroxyde de sodium avec chaux vive, hydroxyde de sodium avec silicate de sodium et chaux vive avec silicate de sodium): l'objectif était de pouvoir sélectionner l'activateur et le précurseur de la réaction appropriés pour d'autres tests. Après analyse des résultats préliminaires, un deuxième programme expérimental a été réalisé sur des mortiers RFA où le CFA était utilisé comme précurseur et le BFA comme l'un des activateurs. Les mortiers ont été activés avec de l'hydroxyde de sodium et différents niveaux d'additif calcique (chaux vive ou BFA). Les tests réalisés ont permis de tirer des conclusions répondant aux questions ci-dessus:

1. BFA ne peut pas être utilisé de manière viable comme liant après activation alcaline en conditions ambiantes pour obtenir des géopolymères ou des AAM: de mauvaises performances mécaniques ont été obtenues avec des matériaux activés alcalins à base de BFA après durcissement ambiant. En raison de la composition chimique du BFA, la matrice du liant a été construite par des structures chimiques instables et solubles basées sur l'hydratation du CaO. Une teneur trop faible en alumine et silice dans le BFA ne permet pas d'obtenir des mortiers à base de BFA avec les performances minimales requises.

2. CFA après activation alcaline peut être utilisé de manière viable comme liant dans les AAM avec durcissement dans les conditions ambiantes. L'activation alcaline du CFA avec des activateurs combinés permet d'obtenir des mortiers avec des propriétés mécaniques supérieures à celles requises pour les mortiers M5 et avec un temps de prise final inférieur à celui des mortiers OPC comparables. Cependant, les mortiers étaient incapables de supporter une exposition environnementale sévère comme les cycles de gel-dégel.

3. BFA peut être utilisé comme activateur à haute teneur en calcium, lorsqu'il est ajouté aux mortiers à base de RFA. De plus, il a été montré que le BFA peut fonctionner comme un retardateur efficace dans tous les mélanges activés par des alcalis (Figure 2.14).

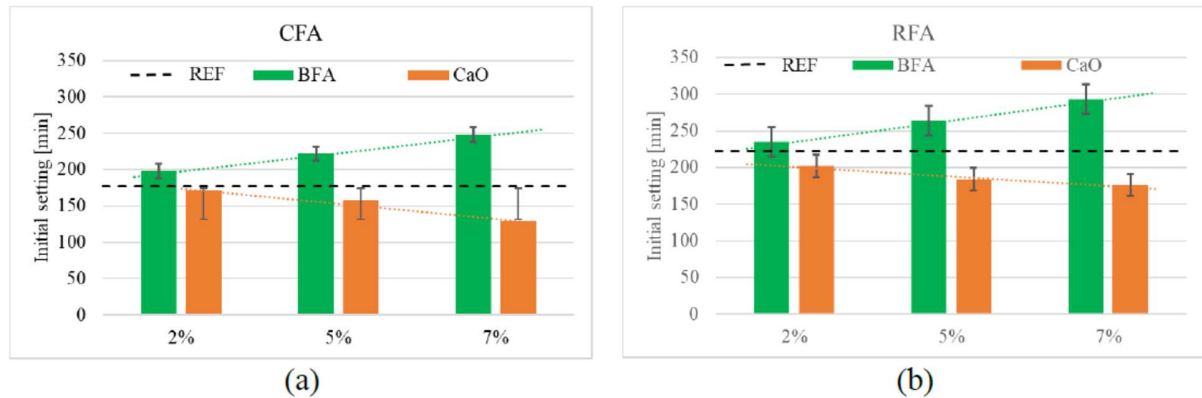


Figure 2.5 Temps de prise initial pour les mortiers AAM avec CFA (a) et BFA (b)

4. CFA a un potentiel non seulement en tant que précurseur de l'activation alcaline (ce qui a été prouvé dans cette recherche) mais également en tant qu'activateur de ce processus (après examen). La recherche a prouvé que les matériaux à haute teneur en oxyde de calcium peuvent être utilisés comme activateurs dans les géopolymères et les AAM.

Des conclusions à caractère scientifique peuvent être tirées pour la présente recherche, en tenant compte des caractéristiques spécifiques des différentes cendres volantes:

1. Les CFA ont des teneurs en aluminosilicate plus faibles et en calcium plus élevées que les cendres volantes de charbon. Des particules sphériques mélangées à de la chaux et des particules de bois non brûlées sont présentes. La surface spécifique des CFA est plus élevée que celle des cendres volantes de charbon étudiées et il est possible d'observer des particules plus grosses d'une dimension proche de 350 μm .

2. Les BFA sont caractérisées par une très faible teneur en oxydes primaires et des niveaux élevés de potassium, de calcium et de phosphore, et en tout cas plus élevés que dans les autres cendres volantes, en particulier les cendres volantes de charbon. Ils sont principalement composés de

plaques irrégulières remplies de composés de calcium et de phosphate. Le BFA avait une surface spécifique la plus basse et le pourcentage le plus bas de passant à 110 µm.

3. Pour les mélanges CFA avec NaOH ou CaO en tant qu'activateur unique, des résistances à la flexion et à la compression plus élevées ont été obtenues avec l'augmentation de la concentration molaire de NaOH plutôt qu'avec l'augmentation de la teneur en CaO. Pour les mélanges RFA avec NaOH ou CaO en tant qu'activateur unique, dans les deux cas, l'activation alcaline insuffisante a contribué à de faibles résistances mécaniques (inférieures à 1,0 MPa).

4. Parmi les activateurs combinés, le silicate de sodium et l'hydroxyde de sodium étaient les produits les plus efficaces pour la RFA. L'utilisation de silicate de sodium avec de l'hydroxyde de sodium comme activateurs n'offre pas des performances exceptionnelles des mortiers à base de CFA activés alcalins. Pour les mortiers CFA, de meilleurs résultats ont été obtenus avec NaOH et CaO (N5-C10). Ainsi, les différences les plus faibles de propriétés mécaniques entre les mortiers à base de RFA et de CFA ont été obtenues avec le système d'activation N5-C10 (Figure 2.15).

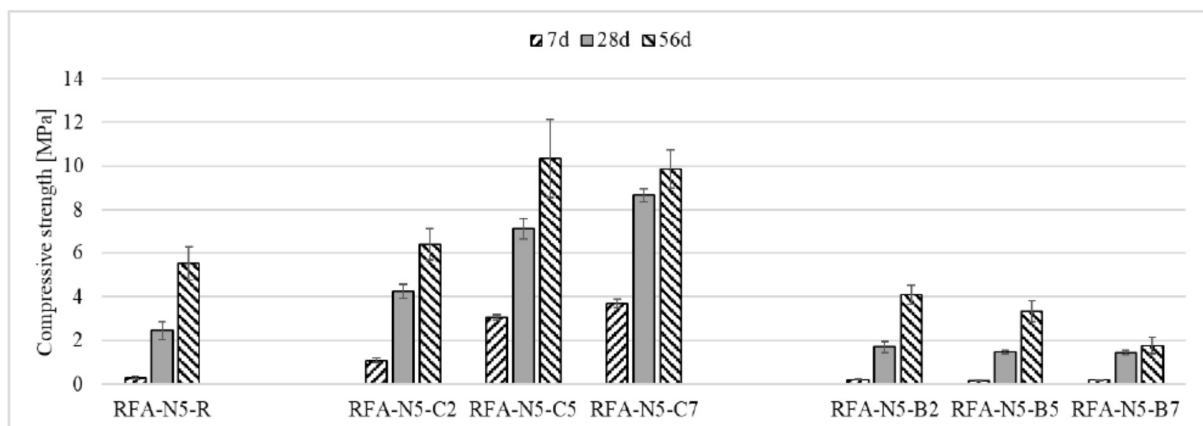


Figure 2.15 Résistance en compression des mortiers de type CFA, avec activateurs NaOH (N) et Cao (C)

5. L'ajout d'au moins 5% de CaO aux AAM peut réduire le temps de prise et améliorer la densité du matériau, les propriétés mécaniques et la durabilité. Il est principalement observé lorsque la teneur en CaO est augmentée dans les cendres volantes à haute teneur en silice. Ce CaO peut être fourni par addition de BFA.

6. L'analyse des microstructures et des caractéristiques minéralogiques des produits finaux montre clairement que 5% d'additif calcique (CaO ou BFA) favorise la formation de gel C-A-S-H et N-

A-S-H à long terme. La diminution de la résistance des mortiers CFA est causée par le durcissement rapide et l'apparition de microfissures et de pores de retrait. L'effet retardateur du BFA est causé par son composé de phosphore qui enveloppe dans une couche mince des particules de cendres volantes, ce qui retarde la réaction d'activation des cendres volantes en solution alcaline.

De nouvelles compositions de matériaux réalisées dans cette recherche permettent d'envisager certaines applications dans le domaine des mortiers d'enduit et / ou de maçonnerie. Sur la base du résumé du comportement des mélanges sélectionnés (Tableau 2.10), des conclusions peuvent être tirées:

1. Les mortiers activés à l'hydroxyde de sodium et à la chaux vive (RFA-N5-C5 et CFA-N5-C5) offraient les propriétés mécaniques les plus élevées répondant aux exigences du mortier M5. Ils peuvent être utilisés à la fois comme mortiers de maçonnerie et d'enduit.
2. Les mortiers CFA-N5-C5 n'ont pas pu supporter les cycles de gel-dégel. Par conséquent, leur utilisation est limitée aux murs intérieurs et aux travaux intérieurs.
3. Les mortiers activés avec de l'hydroxyde de sodium et du BFA (RFA-N5-B5 et CFA-N5-B5) sont facilement détruits après exposition à l'eau et aux cycles de gel-dégel. Encore une fois, leur utilisation est limitée à une exposition environnementale sèche (intérieure).
4. RFA-N5-B5 pourrait être utilisé comme mortier à usage général avec des propriétés mécaniques inférieures pour les murs intérieurs non porteurs.
5. CFA-N5-B5 pourrait être utilisé comme mortier de 2,5 M pour les murs intérieurs.

Tableau 2.10

Classification des mortiers étudiés

Classification of mortars			Examined mortars			
			RFA N5-C5	CFA N5-C5	RFA N5-B5	CFA N5-B5
According to properties and/or use	Masonry mortars	General purpose (G)	+	+	+/-	+
		Thin layer (T)	+/-	+/-	-	+/-
		Lightweight (L)	-	-	-	-
	Rendering/plastering mortars	General purpose (GP)	+	+	+/-	+
		Lightweight (LW)	-	-	-	-
		Coloured (CR)	+	+	+/-	+
		One-coat (OC)	+/-	+/-	-	+/-
		Renovation (R)	+/-	+/-	-	+/-
		Thermal insulating (T)	+/-	+/-	+/-	+/-
According to construction element	Foundations		-	-	-	-
	Walls below ground level		-	-	-	-
	Outer walls over ground level		+	-	-	-
	Inner walls	Construction walls	+	+	-	+/-
		Other	+	+	+	+
“+” - can be used; “+/-” - need further investigation; “-” - cannot be used.						

Cependant, certaines questions restent ouvertes et nécessitent de futures investigations. Elles concernent en particulier les thèmes suivants:

1. *Teneur en phosphate*: l'effet de la teneur en phosphate dans les mélanges de cendres volantes AAM doit être étudié avec différentes cendres volantes, teneurs en activateur et températures de durcissement afin de confirmer son effet retardateur;
2. *Rhéologie*: un modèle rhéologique des mortiers activés par les alcalis des cendres volantes doit être étudié pour divers paramètres et compositions afin d'obtenir des mortiers de composition et de consistance préférables;
3. *Durabilité*: la résistance au gel-dégel des mortiers activés par les alcalis des cendres volantes doit être examinée pendant plus de 25 cycles avec des teneurs différentes en activateur. Le but est de trouver une composition de mortiers activés par les alcalis résistant à plus de 25 cycles;
4. *Adjuvants*: l'influence des superplastifiants et des adjuvants entraîneurs d'air dans les mélanges AAMs de cendres volantes doit être étudiée avec différentes cendres volantes et différentes teneurs

en activateurs. L'objectif est de sélectionner les adjuvants influençant les AAM. Des adjuvants sélectionnés seront en outre utilisés pour modifier la durabilité et la rhéologie des AAM;

5. *Proportions*: différents rapports de cendres volantes de charbon sur cendres volantes de co-combustion doivent être analysés afin de trouver des compositions présentant les meilleures performances mécaniques. Ils doivent être mis en parallèle avec l'analyse du rapport granulats fin / liant afin de trouver la proportion optimale. Les résultats doivent être comparés aux mortiers OPC traditionnels.

Ces travaux de recherche ont permis de montrer qu'avec certaines précautions et dans des applications spécifiques, la biomasse ou les cendres de co-combustion peuvent remplacer partiellement les cendres volantes conventionnelles. Les matériaux sont en effet trop différents pour qu'il soit possible de remplacer complètement l'intégralité des cendres volantes des centrales au charbon. Cela ouvre des perspectives intéressantes pour la valorisation des produits, considérés aujourd'hui comme des déchets et, demain, comme d'éventuelles ressources secondaires. Il faut également rappeler ici qu'une caractérisation approfondie sera toujours nécessaire, car la variabilité des produits de la biomasse incinérés conduit à une variation significative des caractéristiques et de la composition des cendres volantes.

3. Granulats recyclés de bétons (GRB)

3.1. Recyclage et marché

De très grandes quantités de déchets de construction et de démolition sont produites chaque année. Les déchets de construction et de démolition (C&DW) représente une quantité estimée à environ 850 Mt générés chaque année dans l'UE-28, y inclus les sols excavés. Jusqu'à présent, seule une petite fraction de ces déchets de béton est réutilisée sous forme de granulats pour la fabrication de béton.

D'autre part, les besoins en granulats pour l'industrie de la construction sont énormes et représentent quelques 3 milliards de tonnes en 2019 (Figure 3.1).

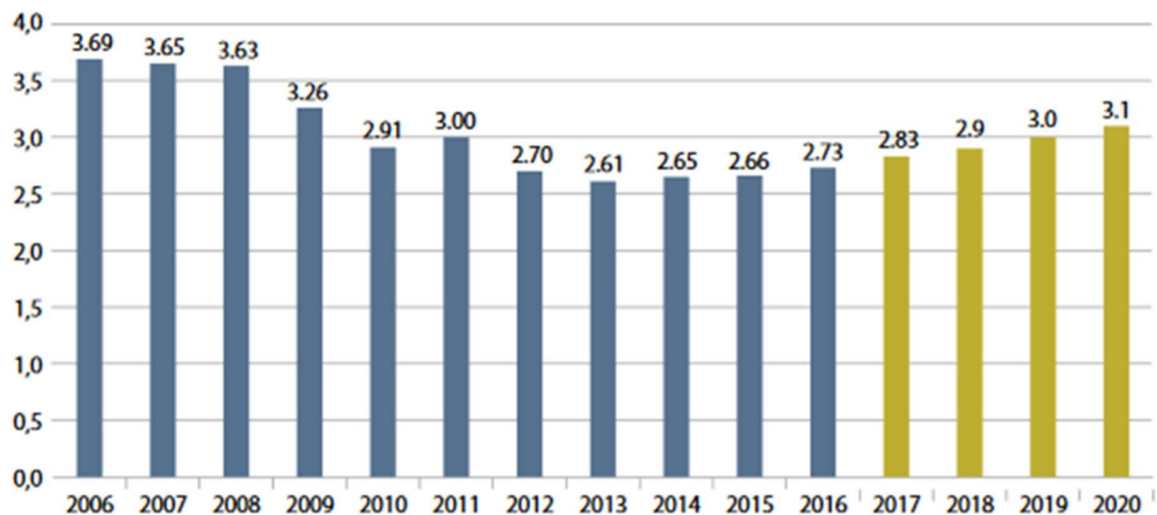


Figure 3.1 Tendances pour UE+ EFTA (tonnages en milliards de tonnes) (UEPG, 2017)

Poussés par l'objectif de valorisation de 70% d'ici 2020 (fixé par la directive-cadre sur les déchets de 2008 et défini comme incluant toutes les opérations de recyclage et autres opérations de valorisation telles que le remblayage), les pays affichent un taux de valorisation de plus en plus élevé. La plupart d'entre eux ont déjà dépassé l'objectif de 2020 en 2016 (Figure 3.2).

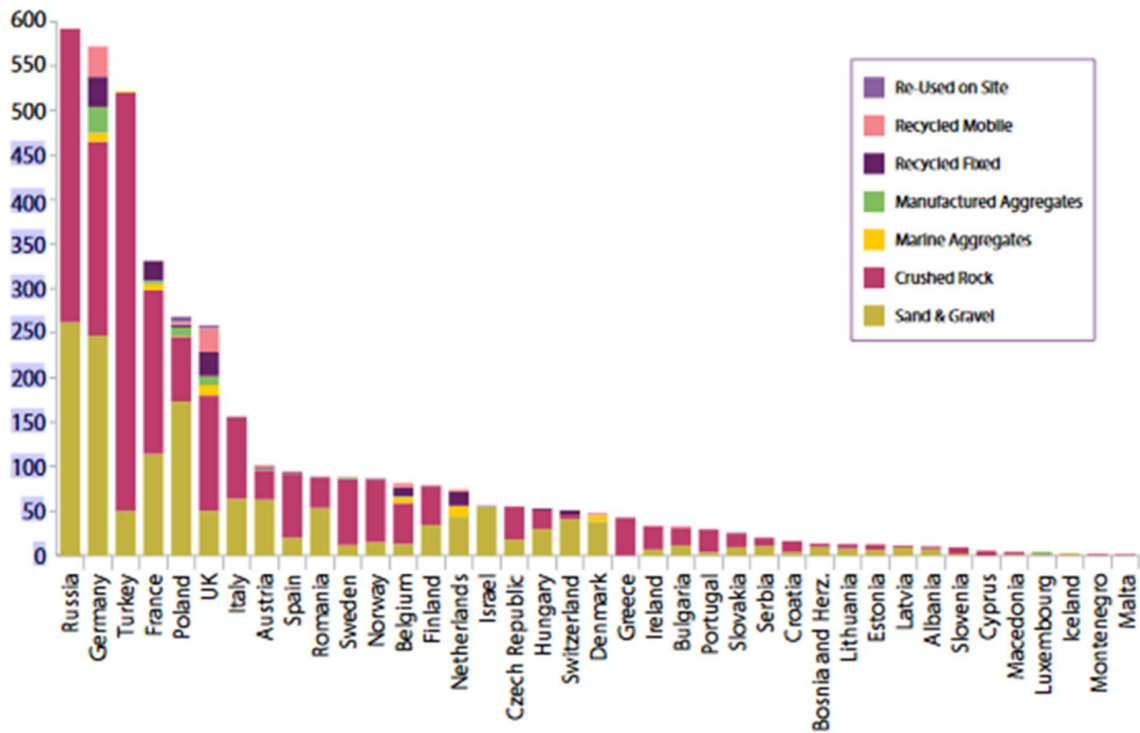


Figure 3.2 2016 aggregates production in Europe in millions of tonnes by country and type [7].

Le recyclage des déchets de construction et de démolition inertes sous forme d'agrégats et de sables est probablement la meilleure solution pour réduire le stockage des déchets car il y a un besoin crucial de matériaux (Figure 3.1).

Mais le faible pourcentage actuellement recyclé (Figure 3.1 et Tableau 3.1) indique, pour les pays d'Europe du Nord-Ouest, un besoin important en termes de recherches et d'optimisation des processus.

Table 3.1

Estimation of total and recycled sands and aggregates production

Estimation of total and recycled sands and aggregates production

Total production (millions of tons)	Recycled sands and aggregates (RS&A) production (millions of tons)	Percentage of RS&A vs total production (%)

Belgium	81	15	18.5
France	323	20	6.2
Germany	545	68	12.5
Ireland	28	0	0
Luxembourg	4	0	0
Netherlands	80	18	22.5
U.K.	248	52	9.5
<i>Switzerland</i>	<i>49</i>	<i>5</i>	<i>10.2</i>
EU28	2524	196	7.8

Le projet se focalise sur le recyclage des granulats et sables provenant du concassage du béton. Afin de faire bon usage des granulats recyclés (GR) dans le béton, il est très important d'étudier l'influence de la fraction granulaire et de l'origine des granulats recyclés sur leurs propriétés.

Les granulats recyclés (GR) sont composés d'un mélange de granulats naturels et de pâte de ciment durcie. Cette dernière est généralement beaucoup plus poreuse que les granulats naturels. La teneur en pâte de ciment durci et ses propriétés ont donc une influence déterminante sur les propriétés des granulats recyclés. Les propriétés des GR dépendent de beaucoup de paramètres tels que le béton d'origine, les contaminants, la méthode de broyage utilisée pour la production, le vieillissement et les conditions de stockage. La porosité des GR constitue un frein majeur à leur réutilisation dans la mesure où l'absorption de l'eau au moment du malaxage diminue l'ouvrabilité des bétons. La forme des granulats peut influencer la compacité de mélange de granulats et les propriétés des bétons.

3.2. Influence de la fraction granulaire et de l'origine des GRB

3.2.1. Matériaux et méthodes

Dans cette étude, des éléments de blocs (C8/10) et des cubes de contrôle de béton pour hourdis (C40/50) ont été broyés dans un concasseur à mâchoire de laboratoire en conservant la même ouverture de mâchoire pour tous les produits. Les granulats recyclés de blocs (GR_Blocs), de hourdis (GR_Hourdis) et les GR produits dans des plateformes de concassage industrielles (GR_Trade) ont été séparés en 4 fractions granulaires (0/2, 2/6,3, 6,3/14, 14/20mm). Chaque fraction granulaire des GRB a été caractérisée afin d'étudier l'influence de la fraction granulaire et de l'origine des granulats recyclés sur leurs propriétés. Les deux premiers bétons ont été réalisés

avec deux ciments (CEM I 52,5 N pour le béton de type hourdis et CEM III/A 42,5 pour le béton de type blocs) et avec des granulats naturels concassés calcaires. Les granulats recyclés (0/31,5mm) ont été fournis par la société Tradecowall et le centre de recyclage de Valorem à Mont-Saint-Guibert (Belgique). Les essais portant sur l'analyse des propriétés des granulats recyclés ont été réalisés.

Mesure de la teneur en pâte de ciment

Une méthode basée sur la dissolution de la pâte de ciment durcie des GR dans une solution d'acide salicylique a été développée. L'acide salicylique ne dissout pas les phases principales des granulats naturels (notamment la calcite) mais dissout de nombreux anhydres et hydrates de la pâte de ciment (silicates, portlandite et C-S-H par exemple).

Le protocole expérimental adopté pour cette mesure est le suivant:

- a) un échantillon représentatif de GR est séché à 105°C jusqu'à masse constante, puis broyé à une dimension inférieure à 200 µm;
- b) 0,5g (masse M_1) de l'échantillon broyé sont ensuite immergés dans une solution de 14g d'acide salicylique dans 80 ml de méthanol et mis sous agitation pendant 1 heure;
- c) la fraction solide est filtrée sur un verre fritté (Pyrex N°4, dimension des pores: 10-16µm) et lavée quatre fois avec du méthanol (2-3mm au-dessus du filtre à chaque lavage);
- d) le résidu solide est séché à l'étuve à 70°C jusqu'à masse constante (masse M_2);
- e) la teneur en pâte de ciment (TPC) est ensuite calculée de la manière suivante (Équation 1) :

$$TPC (\%) = (M_1 - M_2) / M_1 \times 100 \quad \text{Équation 1}$$

Absorption d'eau des granulats recyclés

Le coefficient d'absorption d'eau des trois fractions grossières des GRB pour les deux GRB étudiés a été déterminé en se basant sur la norme EN 1097-6. Le coefficient d'absorption de la fraction 0/2 mm des GRB a été déterminé en se basant sur la méthode proposée par Zhao et al.

Meure de la forme des GR

La forme des GR a été mesurée par analyse d'images avec le logiciel de la société Occhio. Les particules représentatives sont déposées sur une plaque en verre qui se positionne entre une caméra et une source lumineuse. Le logiciel mesure ensuite la taille et la forme de chaque particule individuellement. Les paramètres sélectionnés peuvent être séparés en deux catégories: la largeur (l) et la longueur (L). Le coefficient d'élongation q est déterminé par $q=l/L$. Pour chaque fraction granulaire, entre 2000 et 10000 particules ont été mesurées en quelques minutes.

L'indice de forme des GR a été aussi mesuré au pied à coulisse pour les trois fractions grossières. L'épaisseur (e), la largeur (l), et la longueur (L) de chaque particule ont été mesurées en se basant sur 200 particules représentatives ($L \geq l \geq e$). La norme britannique EN BS 812 caractérise la forme au moyen de 4 catégories: cubique (équidimensionnelle), plate, allongée, allongée et plate (Figure 3.3). Ces 4 catégories sont définies par le coefficient d'aplatissement p ($p=e/l$) et le coefficient d'élongation q ($q=l/L$).

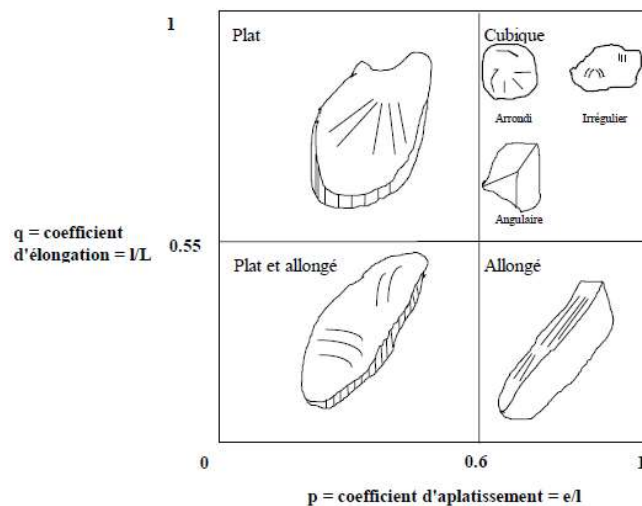


Figure 3.3 Catégories de forme en fonction du coefficient d'aplatissement et du coefficient d'élongation

3.2.2. Propriétés des GRB

La Figure 3.4 présente les courbes granulométriques des GR fabriqués au laboratoire et des GR « industriels » provenant du centre de recyclage Tradecowall. Cette figure montre que, pour les GR fabriqués au laboratoire et pour une même ouverture de mâchoire du concasseur, les courbes granulométriques sont similaires. Le GR industriel présente une quantité de fines plus importante que les autres. Le GR_Hourdis montre une quantité de fines (inférieur à 1 mm) plus importante

que le GR_Blocs, ce qui est dû à la composition initiale du béton des hourdis contenant une plus grande quantité de pâte de ciment (théoriquement de 19,5% en masse pour le béton du hourdis et de 14,0% en masse pour le béton du bloc).

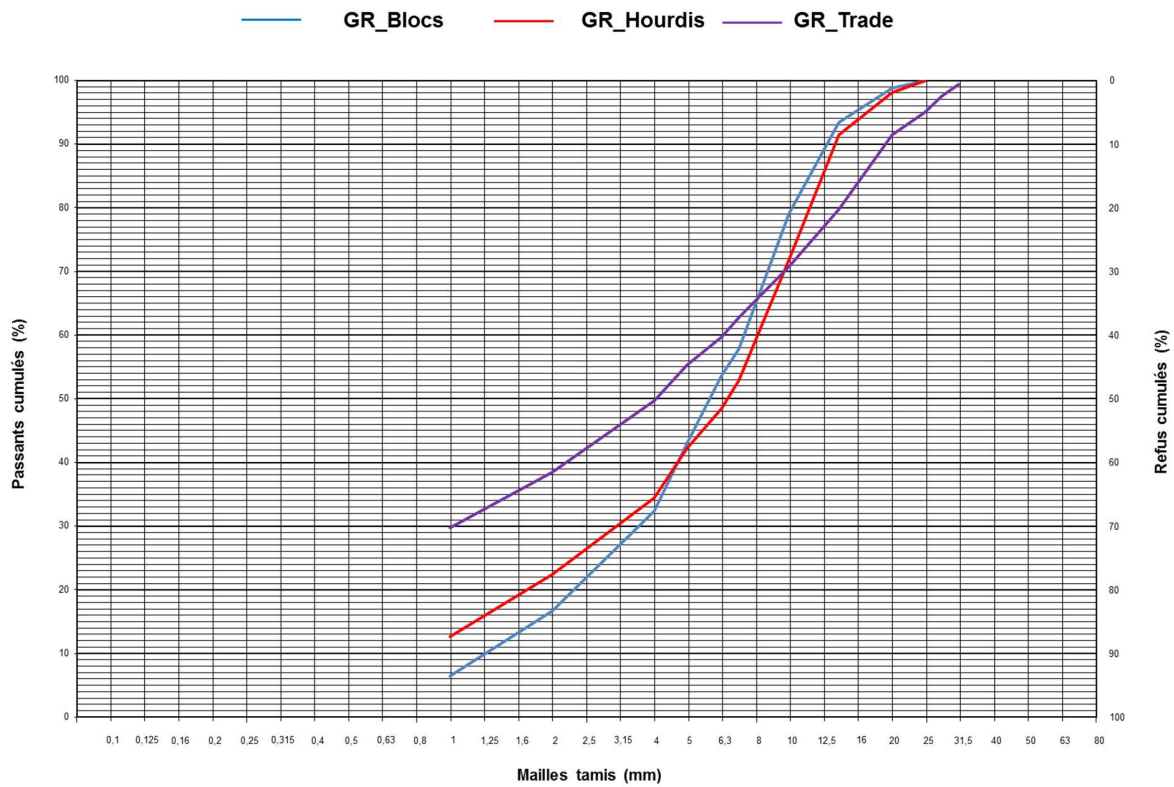


Figure 3.4 Courbes granulométriques des GR étudiés

La teneur en pâte de ciment durcie (TPC) des GRB a été mesurée. La Figure 3.5 montre la variation de la TPC en fonction de la fraction granulaire des GRB. Pour tous les GRB étudiés, la TPC de la fraction 0/2 mm est plus grande, comparée aux trois fractions grossières de GRB, tandis que les valeurs obtenues pour les trois fractions les plus grossières sont similaires. Les sables recyclés possèdent donc des teneurs en pâte de ciment plus élevées que les granulats recyclés grossiers, ce qui peut fortement pénaliser leurs propriétés d'utilisation par rapport aux granulats grossiers recyclés. Les valeurs TPC obtenues pour les GR_Blocs sont inférieures à celles des GR_Hourdis, ce qui pourrait être dû à la quantité inférieure de pâte de ciment initiale des blocs (théoriquement 19,5% pour les hourdis et 14% en poids pour les blocs, sur la base de la quantité introduite à l'état frais du béton d'origine). Les valeurs TPC obtenues pour GR_Blocs et GR_Hourdis sont

inférieures à ces valeurs théoriques. Dans le calcul théorique, la totalité de l'eau est prise en compte à partir de la composition à l'état frais du béton d'origine, tandis que la TPC du béton durci ne concerne que l'eau liée par hydratation, inférieure à la quantité totale d'eau. Cela pourrait aussi être dû à certaines phases telles que l'AFm, les scories et les produits carbonatés qui ne sont pas dissous, ce qui entraîne une sous-estimation de la TPC. Les valeurs de TPC obtenues pour le GR_Trade pourraient également être sous-estimées car le GRB de l'usine de recyclage peut lui aussi contenir des phases non dissoutes.

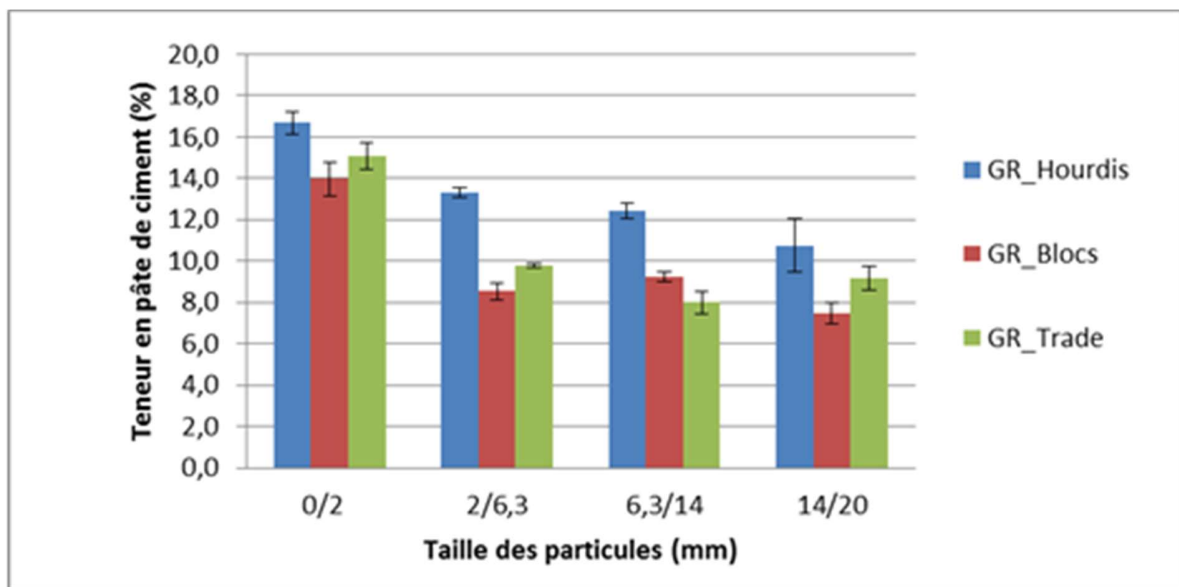


Figure 3.5 Variation de la TPC en fonction de la taille des particules pour les GRB

La Figure 3.6 présente la variation de l'absorption d'eau en fonction de la fraction granulaire mesurée selon la méthode EN 1097-6 pour tous les GR étudiés: la fraction 0/2 mm de GRB a révélé une plus grande absorption d'eau par rapport aux trois fractions grossières de GR, alors que les valeurs obtenues étaient similaires pour les trois fractions plus grossières. Le sable recyclé présente une absorption d'eau supérieure à celle des granulats recyclés grossiers. Les valeurs obtenues sur GR_Trade sont plus grandes que celles du GR produit en laboratoire, ce qui pourrait être dû aux constituants complexes d'origine différente du vieux béton (faible qualité) et d'autres contaminations telles que les briques.

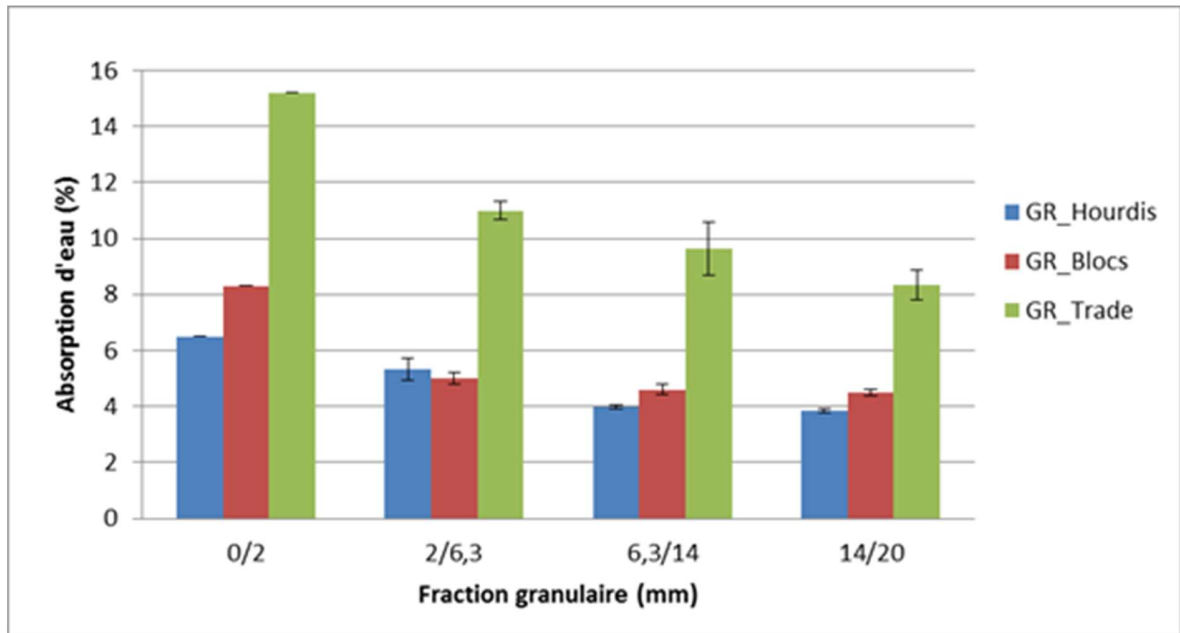


Figure 3.6 Variation de l'absorption d'eau en fonction de la taille des particules pour les GRB

La Figure 3.7 présente la variation du coefficient d'élongation (q) des GRB en fonction de la classe granulaire par analyse d'image. L'analyse d'image est réalisée avec le logiciel Occhio qui est développé par le groupe GeMMe (ULiège). Pour toutes les fractions de GR, les GR_Hourdis offrent un coefficient d'élongation inférieur à celui des GR_Blocs (les GR_Hourdis sont plus anguleux que les GR_Blocs), ce qui pourrait probablement être lié à la résistance à la compression différente du béton d'origine.

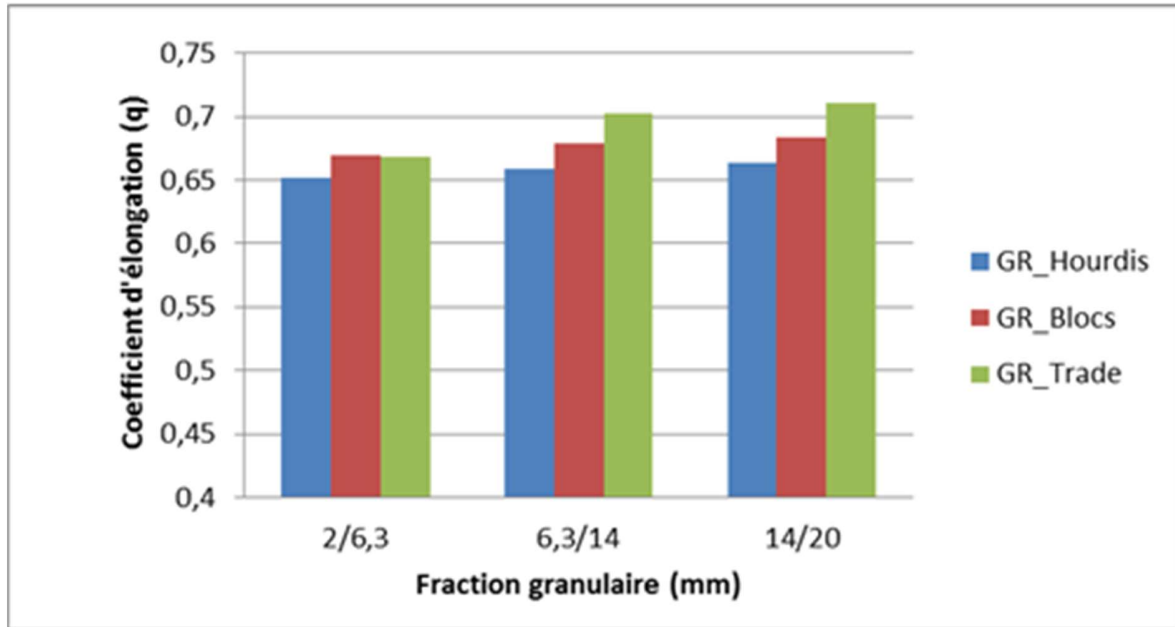


Figure 3.7 Variation du coefficient d'élongation en fonction de la taille des particules des GRB

L'indice de la forme des GRB a été aussi mesuré au pied à coulisse. L'épaisseur (e), la largeur (l), et la longueur (L) de chaque particule ont été mesurées au pied à coulisse (200 particules ; $L \geq l \geq e$). Pour rappel, 4 catégories sont considérées: cubique (équidimensionnelle), plate, allongée, allongée et plate (Figure 3.3). Ces 4 catégories sont définies par le coefficient d'aplatissement p ($p=e/l$) et le coefficient d'élongation q ($q=l/L$). La Figure 3.8 montre les catégories de forme mesurées par l'épaisseur en fonction du coefficient d'aplatissement et du coefficient d'élongation de trois fractions grossières de tous les GRB étudiés.

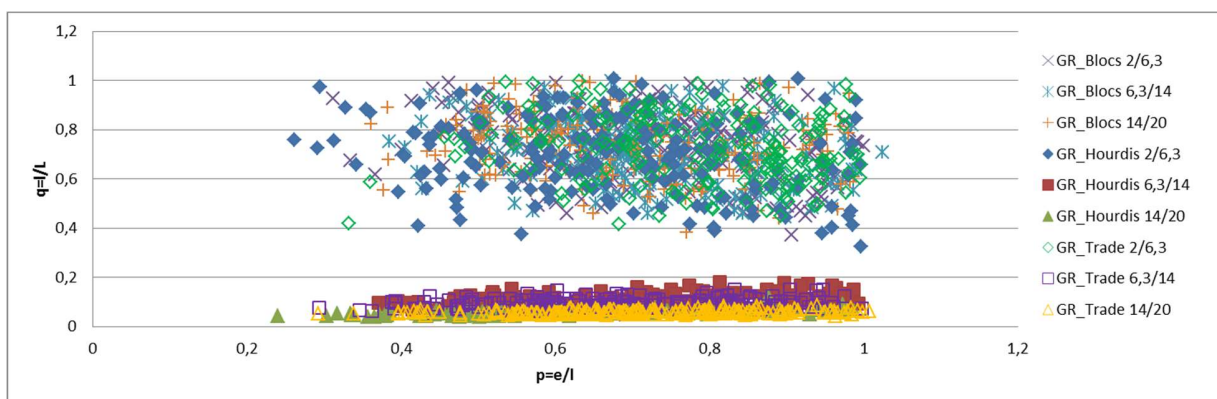


Figure 3.8 Catégories de formes en fonction du coefficient d'aplatissement et du coefficient d'élongation pour la fraction grossière des GRB

Les GR_Blocs présentent un plus grand pourcentage de grains cubiques que les GR_Hourdis (Tableau 3.2). Les GR_Hourdis ont une plus grande quantité de particules de forme plate (confirmé par les résultats d'analyse d'image). La forme des GRB pourrait être due aux différentes résistances à la compression du béton original. Cela pourrait aussi être dû à la granulométrie maximale des granulats utilisés : le Dmax des hourdis sont de 14 mm alors qu'il est de 8 mm pour les blocs. L'interface entre les granulats et la pâte de ciment dans les blocs est beaucoup plus facile à casser et cela a contribué à beaucoup plus de fissuration pendant le concassage. D'autre part, pour les hourdis, la pâte de ciment adhère bien au granulats naturels. Les fractions 6,3/14 et 14/20 mm de GR_Trade présentent un pourcentage plus élevé de particules de forme plate que la fraction 2/6,3 mm.

Tableau 3.2

Répartition de la forme déterminée au pied à coulisse (%)

Fractions (mm)	Cubique	Plate	Allongé	Allongé et plate
GR_Hourdis 2/6,3	51	31	13,5	4,5
GR_Hourdis 6,3/14	0,0	0,0	71,0	29
GR_Hourdis 14/20	0	0	57,5	42,5
GR_Blocs 2/6,3	65,5	22,5	11	1
GR_Blocs 6,3/14	70,5	17	11,5	1
GR_Blocs 14/20	62	31,5	6	0,5
GR_Trade 2/6,3	77,5	12,0	10,0	0,5
GR_Trade 6,3/14	0,0	0,0	67,5	32,5
GR_Trade 14/20	0,0	0,0	76,5	23,5

La présence d'une quantité plus importante de pâte de ciment dans les fractions fines est confirmée par l'essai Micro-Deval : les valeurs de l'indice sont globalement plus faibles pour les fractions plus grossières.

Tableau 3.3

Résistance à l'usure de GR mesuré par Micro-Deval (%)

Fractions (mm)	2/6,3	6,3/14	14/20
----------------	-------	--------	-------

Masse de la charge (g)	2000±5	4400±5	5500±5
GR_Hourdis	24,4	14,8	13,2
GR_Blocs	27	8,3	8,6
GR_Trade	19	11,1	14,5

Les Figure 3.9 à Figure 3.11 présentent la variation de la compacité des GN, GR_Hourdis et GR_Blocs respectivement. La vibration a un grand impact sur la compacité des particules. La compacité augmente généralement avec l'augmentation du temps de vibration pour tous les types de matériaux. L'augmentation du taux de compacité est la plus élevée dans les 15 premières secondes de vibration pour tous les types de matériaux ; la pente diminue avec le temps de vibration. La fraction la plus fine du granulat a une plus grande compacité.

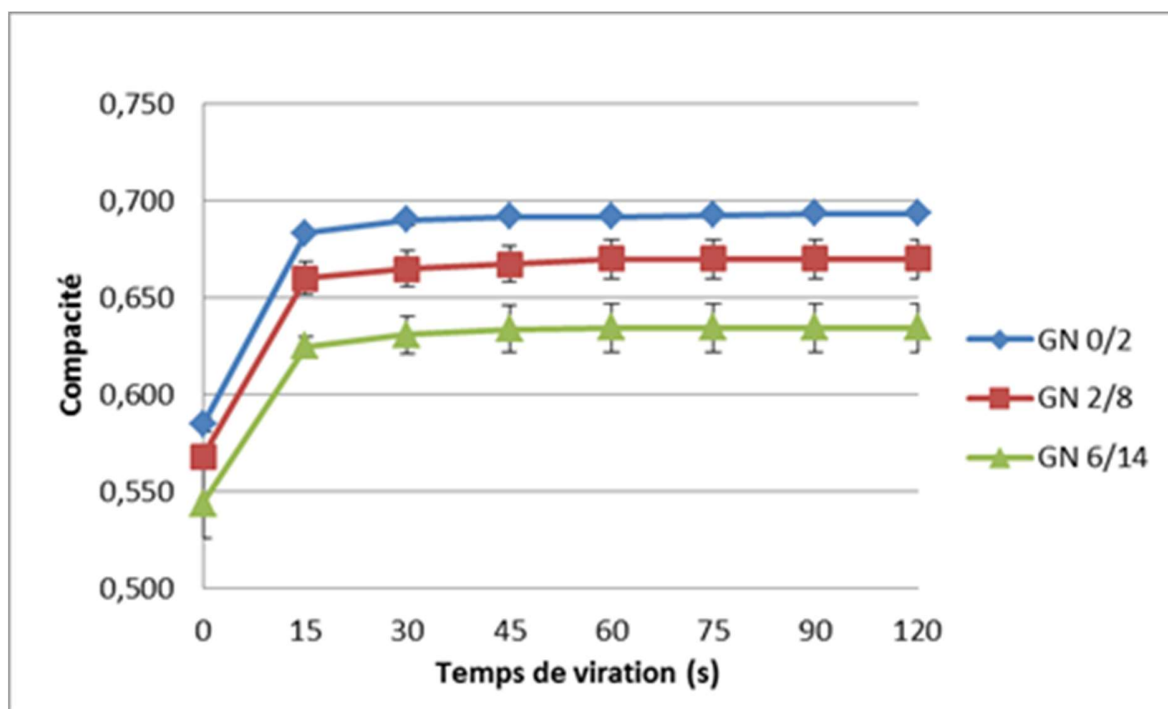


Figure 3.9 Variation de la compacité du GN en fonction du temps de vibration

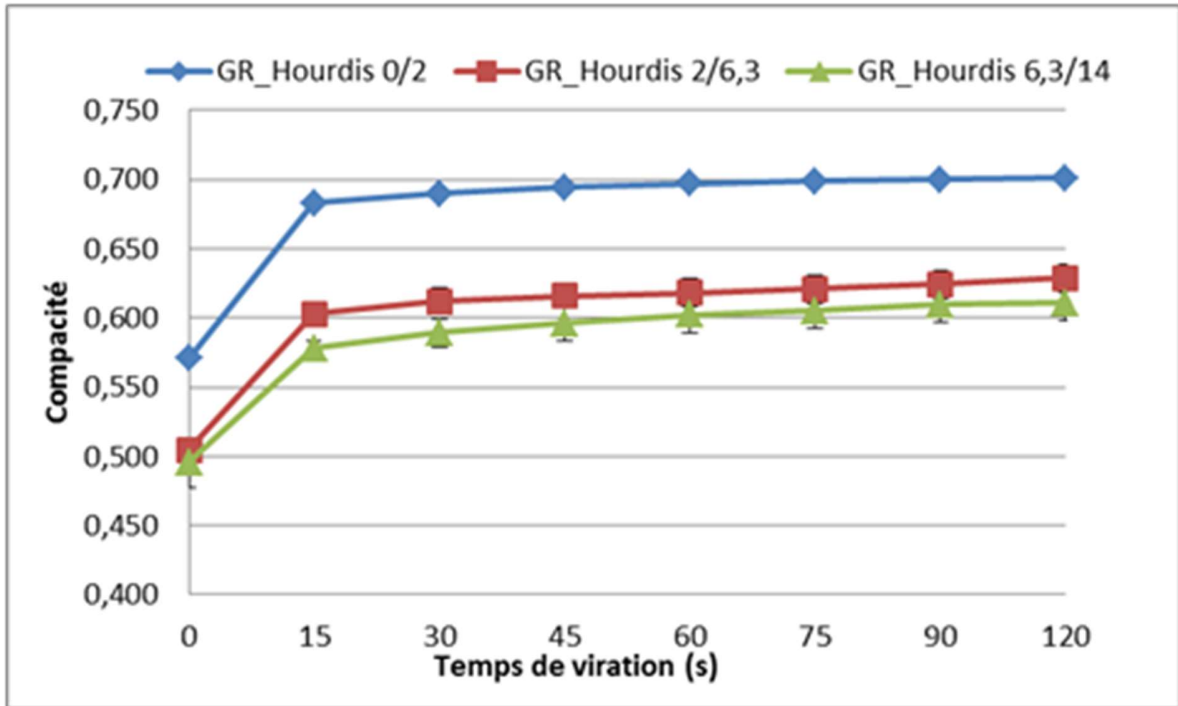


Figure 3.10 Variation de la compacité du GR_Hourdis en fonction du temps de vibration

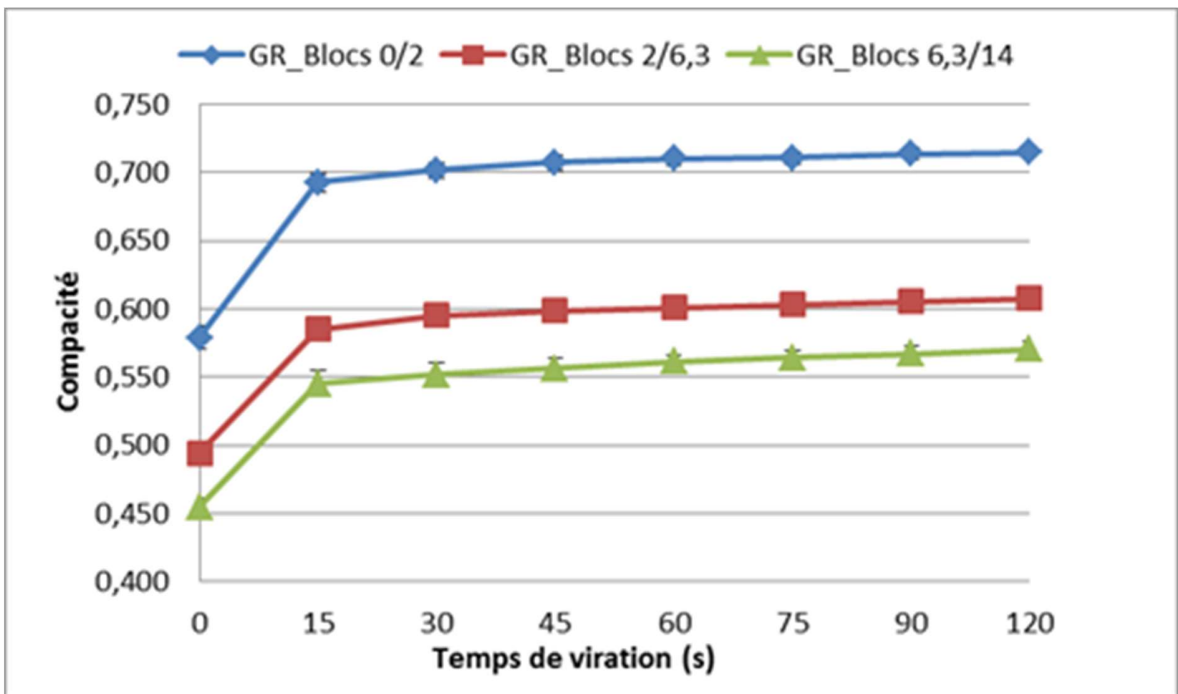


Figure 3.11 Variation de la compacité du GR_Blocs en fonction du temps de vibration

Parmi toutes les fractions des GRB, les GR_Hourdis présentent plus grande compacité que les GR_Blocs (Tableau 3.), qui est due au fait que les GR_Hourdis sont plus angulaires que les GR_Blocs : les GR_Hourdis présentent une plus grande quantité de particules de forme plate et les GR_Blocs ont un plus grand pourcentage de grains de forme cubique que les GR_Hourdis.

Tableau 3.4

Compacité maximale des granulats

GN		GR_Hourdis		GR_Blocs	
GN 0/2	0,693	GR_Hourdis 0/2	0,698	GR_Blocs 0/2	0,688
GN 2/8	0,670	GR_Hourdis 2/6,3	0,636	GR_Blocs 2/6,3	0,606
GN 6/14	0,635	GR_Hourdis 6,3/14	0,611	GR_Blocs 6,3/14	0,575

3.2.3. Conclusions

En conclusion, des granulats recyclés issus de blocs (GR_Blocs), de hourdis (GR_Hourdis) et d'une usine de recyclage (GR_Trade) ont été caractérisés afin d'étudier l'influence de la fraction granulaire et de l'origine des granulats recyclés sur leurs propriétés. La teneur en pâte de ciment durcie adhérente de GRB a été mesurée par dissolution dans de l'acide salicylique. Les résultats ont montré que les sables recyclés possèdent une teneur en pâte de ciment significativement plus élevée que les granulats recyclés grossiers. Ainsi, le sable recyclé a un coefficient d'absorption d'eau plus élevé par rapport aux granulats recyclés grossiers. Les quantités de pâte de ciment durci obtenues pour les GR_Blocs sont inférieures à celles mesurées sur les GR_Hourdis. La forme de GRB a été mesurée par analyse d'image et au pied à coulisse. Les résultats ont montré que, pour toutes les fractions de GRB, les GR_Hourdis ont un coefficient d'élongation inférieur aux GR_Blocs. La forme des GRB mesurée au pied à coulisse a montré que les GR_Hourdis ont un plus grand pourcentage de particules de forme plate. La forme des GRB produite est liée à la composition initiale du béton et à la qualité – résistance en compression - du béton d'origine. Les résultats obtenus dans cette étude ne sont valables que pour le concasseur de béton étudié: il est possible qu'un autre type de concasseur (par exemple à marteaux ou à percussion) donne d'autres formes et d'autres teneurs en fines. La résistance à l'usure de GR est également bien liée à la composition de béton d'origine et à la qualité du béton d'origine. Ces résultats sont notamment importants pour les propriétés à l'état frais du nouveau béton à base de GRB.

3.3. Utilisation de GRB dans le béton

Comme déjà indiqué, la porosité importante des GRB constitue un frein à leur utilisation dans les bétons. Il existe différentes solutions (carbonatation accélérée, composition adaptée avec un mixte de granulats naturels, ...etc). L'originalité de l'étude vise ici à remplacer la partie plus fine du squelette granulaire par des fillers calcaires.

Le filler calcaire est un sous-produit de la production d'agrégats calcaires. La norme européenne (EN 197-1) autorise jusqu'à 5% de filler calcaire comme constituant supplémentaire mineur du ciment Portland (CEM I). Cette norme identifie également quatre types de *ciments Portland au calcaire* contenant respectivement 6 à 20% de calcaire (types II/A-L et II/A-LL) et 21 à 35% de calcaire (types II/B-L et II/B-LL). Les fillers calcaires sont également utilisés comme additions ou produits de substitution au ciment, notamment dans les bétons auto-compactants. Non réactifs chimiquement, ils agissent en complétant la courbe granulométrique du squelette granulaire, ainsi que comme site de nucléation pour la formation des hydrates. De nombreuses études ont été menées sur l'effet des fillers calcaires sur les propriétés des bétons conventionnels, tandis que peu d'études se sont concentrées sur l'effet de filler calcaire sur les performances du béton à base de granulats recyclés (GRB).

3.3.1. Matériaux et méthodes

Dans cette étude, des granulats recyclés ont été produits en laboratoire à partir du concassage de blocs de béton et ont ensuite été utilisés dans la formulation de nouveaux bétons. Le ciment utilisé dans le béton est un ciment Portland (CEM I 52,5 N), avec une densité de $3,10 \text{ g/cm}^3$, mesurée au pycnomètre à hélium et une surface spécifique de $4400 \text{ cm}^2/\text{g}$, déterminée par la méthode Blaine selon la norme EN 196-6.

Un granulat naturel calcaire (noté NA 2/7) a été utilisé pour la fabrication de bétons : son absorption d'eau est limitée à 0,68% et sa densité vaut $2,70 \text{ g/cm}^3$ (EN 1097-6). Un sable de rivière naturel (noté NS 0/2) est entré dans la composition du béton, avec une absorption d'eau de 0,70% et une densité de $2,65 \text{ g/cm}^3$. Les déchets de blocs de béton (C8/10) ont été collectés auprès de Prefer Company (Belgique) puis broyés dans un concasseur à mâchoires de laboratoire en conservant la même ouverture de mâchoire pour tous les produits. Après broyage, les GR_Blocs ont été séparés en quatre fractions granulaires (0/2, 2/6,3, 6,3/14, 14/20 mm). Seule la fraction

2/6,3 mm (Dmax est de 6,3 mm) a été utilisée pour la fabrication du béton. L'absorption d'eau du GR 2/6,3 mm était de 5,0% et sa densité de 2,4 g/cm³.

Quatre bétons ont été fabriqués afin d'étudier l'influence de filler calcaire sur les performances du béton de granulats recyclés (BGR). Le Tableau 3.5 montre les compositions du béton. Les bétons ont été fabriqués avec ajout de différents pourcentages de filler calcaire (0%, 10% et 20% de la masse de ciment) et avec substitution de 30% de granulats naturels par des granulats recyclés. Des granulats naturels et des granulats recyclés ont été utilisés à l'état séché à l'air. L'eau a été ajustée en fonction de la teneur en eau des granulats et de leur absorption d'eau. La moitié de l'eau totale a été ajoutée pour pré-saturer les granulats dans le mélangeur pendant 5 minutes avant l'addition de ciment. L'autre moitié de l'eau a été ajoutée après l'introduction du ciment.

Tableau 3.5

Composition des bétons de granulats recyclés (1m³) avec filler calcaire

	C_0R_0F	C_30R_0F	C_30R_10F	C_30R_20F
NS 0/2 (kg)	738	749	737	737
NA 2/7 (kg)	1098	779	767	767
GR 2/6.3 (kg)	0	297	292	292
Ciment (kg)	284	288	284	283
Filler calcaire (kg)	0	0	25	49
Superplastifiant (kg)	2	2	2	2
Eau efficace (kg)	189	192	189	189
Eau absorbée (kg)	13	25	25	25
E _{eff} /C	0,67	0,67	0,67	0,67

Après malaxage, l'affaissement du béton à l'état frais a été mesuré au cône Abrams (EN 12350-2). La teneur en air du béton à l'état frais a été mesurée conformément à la norme EN 12350-7. Les échantillons ont été coulés avec la table vibrante, stockés dans des conditions de laboratoire et recouverts d'un film plastique afin d'éviter l'évaporation de l'eau. Après 24h, ils ont été démoulés et stockés en chambre climatique (20 ± 2 °C et 95 ± 5% H.R.). La résistance à la compression du béton a été mesurée selon la norme EN 12390-3 sur des échantillons cubiques (150 mm x 150 mm x 150 mm) après 7 et 28 jours de durcissement en chambre climatique, respectivement.

3.3.2. Propriétés des BGR

La Figure 3.12 présente l'affaissement de béton en fonction des types de bétons. Comme on peut le voir, l'affaissement de tous les bétons est compris entre 0 et 50 mm (classe S1 de la norme EN 206). L'affaissement obtenu pour le BGR à base de 30% de GR est plus faible que pour le béton de référence. On constate également une forte diminution de l'affaissement quand on ajoute des fillers calcaires.

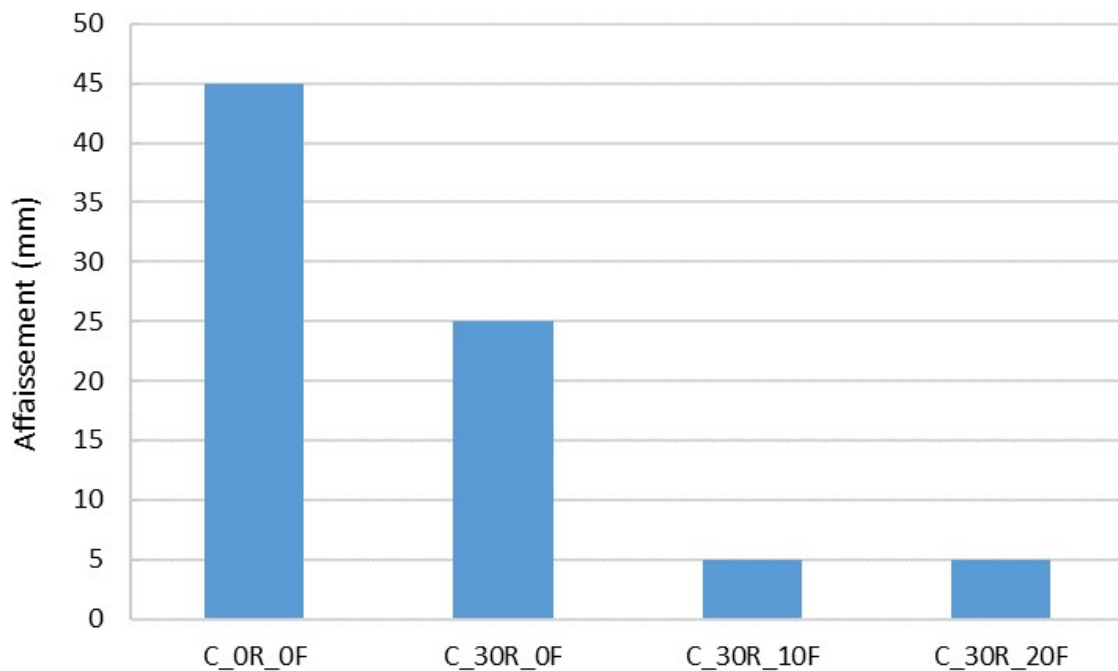


Figure 3.12 Affaissement des bétons de granulats recyclés avec filler calcaire

La Figure 3.13 présente la teneur d'air de béton en fonction des types de bétons. La teneur en air des bétons frais reste similaire à celle du béton de référence pour tous les mélanges avec filler calcaire. L'ajout de filler calcaire n'a pas d'influence significative sur la teneur en air des BGR.

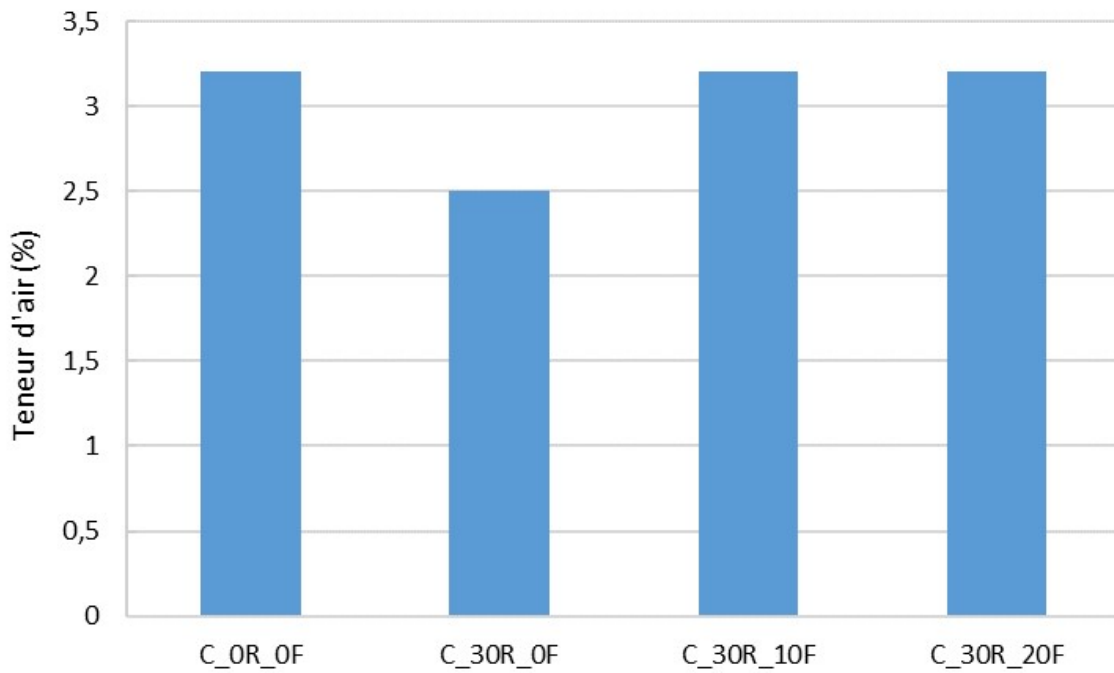


Figure 3.13 Teneur en air des bétons de granulats recyclés avec filler calcaire

La Figure 3.14 présente la densité de béton à l'état frais en fonction des types de bétons. La densité des bétons à l'état frais ne varie pas ou peu, suite à l'utilisation de GBR ou de filler calcaire.

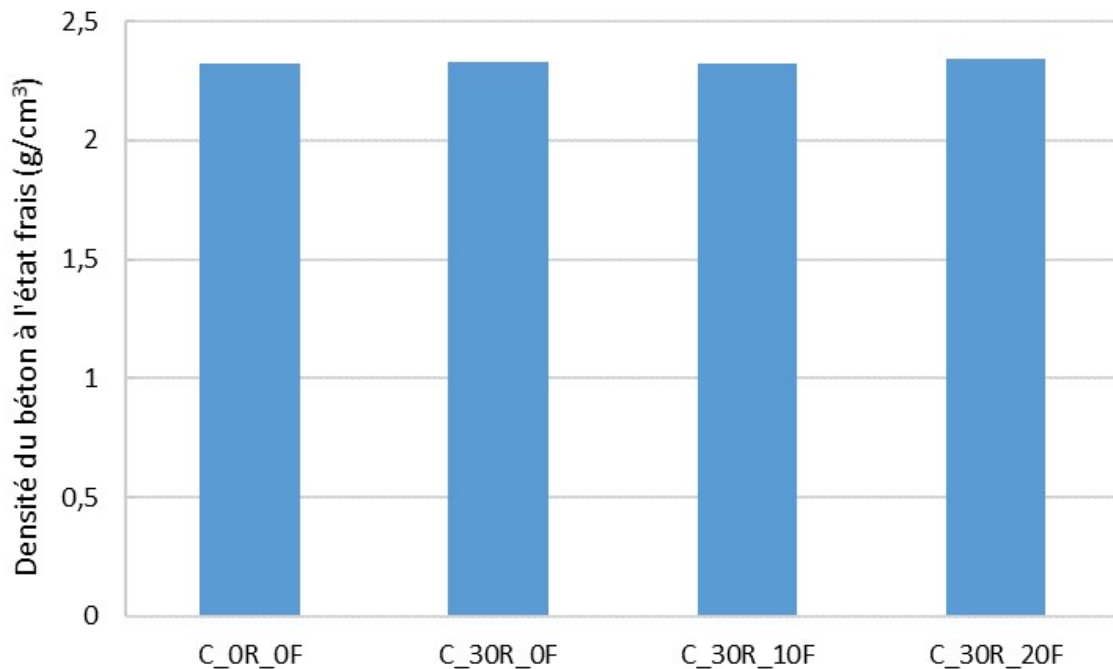


Figure 3.14 Densité à l'état frais des bétons de granulats recyclés avec filler calcaire

La Figure 3.15 montre la résistance à la compression des différents mélanges à différents âges. La résistance à la compression du béton avec 30% de GR est similaire sinon meilleure que celle du béton de référence. Le béton C_30R_10F fabriqué avec 30% de GR et 10% de filler calcaire offre une résistance à 28 jours de 47,2 MPa, ce qui correspond à une augmentation jusqu'à 9,5% par rapport au béton C_30R_0F (43,1 MPa). Avec 20% de filler calcaire (béton C_30R_20F), l'augmentation est de 7,9% à 28 jours. Cette augmentation de résistance est probablement due à une meilleure compacité et, potentiellement, au phénomène de nucléation hétérogène. La présence de filler calcaire implique une modification de la porosité initiale du mélange. Pendant ce temps, les particules de filler calcaire ont agi comme des sites de nucléation, augmentant l'hydratation précoce du ciment et produisant une cristallisation plus désorientée de la portlandite. La présence de 10% de filler calcaire engendre une augmentation significative de la résistance ; passer à 20% de filler calcaire n'a pas d'effet bénéfique supplémentaire.

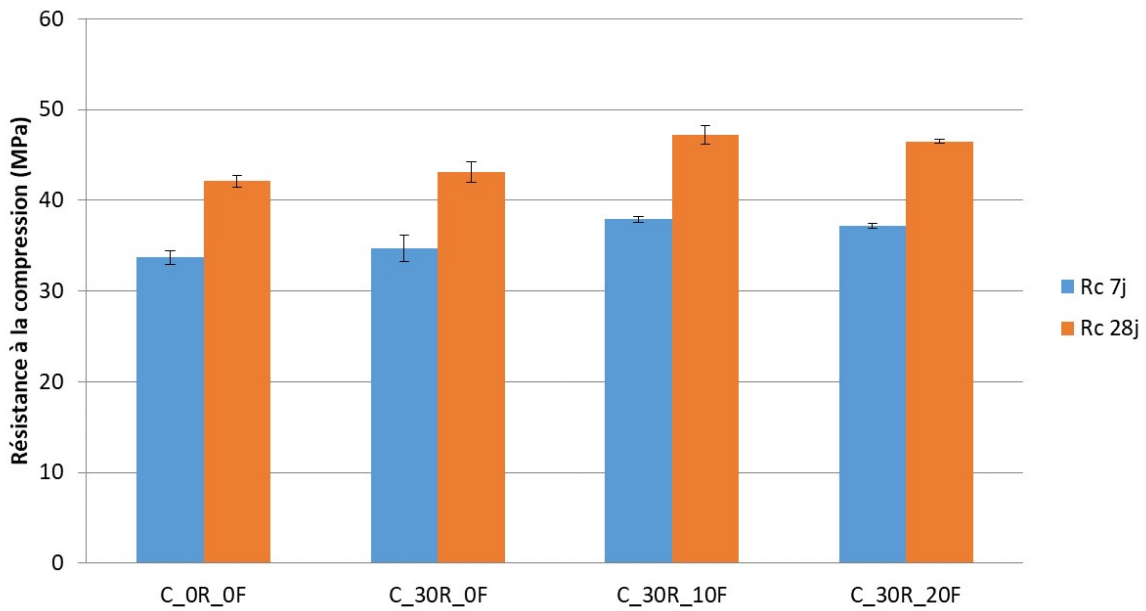


Figure 3.15 Résistance à la compression des bétons de granulats recyclés avec filler calcaire

3.3.3. Conclusions

L'utilisation de fillers calcaires en combinaison avec des GBR montre des résultats intéressants. Les performances mécaniques du BGR fabriqué avec 30% de GR sont comparables (égales voire supérieures) à celles du béton de référence fabriqué avec des granulats naturels. Bien plus, en ajoutant des fillers calcaires à raison de 10% par rapport à la masse de ciment, on obtient des résistances en compression plus élevées. Il faudra néanmoins vérifier que les propriétés à l'état frais (béton très sec) permettent une mise en œuvre aisée, par exemple dans la fabrication de blocs ou de pavés. Des essais de durabilité devraient également confirmer les possibilités d'utilisation sur le long terme.

4. Granulats recyclés de mâchefers

4.1. Contexte général

La production mondiale de déchets ménagers a doublé sur les 10 dernières années et continue de s'accroître. A une échelle plus locale, environ 543 kg de déchets par habitant ont été collectés en Wallonie en 2016. A l'échelle européenne en 2014, 240 millions de tonnes de déchets ménagers ont été créés. Ce chiffre bien qu'impressionnant n'est rien comparé aux 1,8 milliard de tonnes qui ont été produits au niveau mondial. L'incinération est une technique utilisée en vue de diminuer le volume mais également de produire de la chaleur et de l'électricité. Pour le centre de valorisation des déchets de Thumaide, source de mâchefers utilisés dans le cadre de cette recherche, 600 kWh électrique sont produits pour une tonne de déchets incinérés. Cette création de chaleur s'accompagne également d'une diminution de volumique conséquente d'environ 80%. En outre, il subsiste un résidu correspondant à environ 20% de la masse initiale : ce sont les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM). Les résidus du traitement des ordures ménagères par incinération sont en fait de 3 types (Figure 4.1):

- les gaz de combustion;
- les mâchefers;
- les cendres volantes.

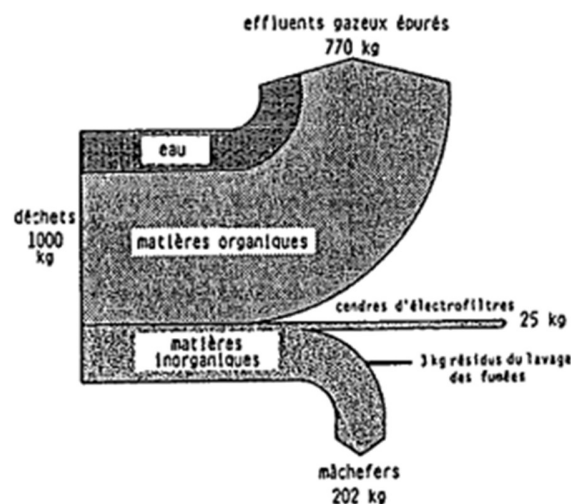


Figure 4.1 Bilan massique global d'un incinérateur de déchets ménagers

Les effluents gazeux peuvent être traités par des techniques spéciales. Le génie civil peut, quant à lui, être intéressé par l'éventuelle récupération des résidus minéraux.

Les mâchefers d'incinération des ordures ménagères sont les scories retirées des foyers où s'effectue la combustion des ordures, à ne pas confondre avec les cendres volantes, lesquelles sont issues du système de dépoussiérage des fumées. Il est important de ne pas mélanger ces deux sous-produits, dans la mesure où les cendres volantes contiennent des éléments nocifs et dangereux en plus grande quantité que les mâchefers.

Après combustion entre 1100 et 1200°C, les mâchefers sont extraits des foyers puis évacués par une chasse hydraulique vers une fosse de réception d'où ils sont repris au grappin vers une trémie d'égouttage. Contenant 20 à 30 % en masse d'eau, les mâchefers ont l'aspect de solides noirs plus ou moins divisés et très hétérogènes où apparaissent, pour environ un tiers, des emballages métalliques, des morceaux de verre et diverses pièces de taille importante.

Les éléments majeurs entrant dans la composition chimique des mâchefers sont les suivants:

Tableau 4.1

Composition chimique moyenne des MIOM

Silice	SiO ₂	50 %
Aluminium	Al ₂ O ₃	10 %
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	5 %
Chaux	CaO	10 %
Oxyde de sodium	Na ₂ O	5 %
Magnésie	MgO	3 %
Potasse	K ₂ O	1 %
Carbonate	CO ₃ ²⁻	5 %
Sulfate	SO ₄ ²⁻	1 %
Chlorure	Cl ⁻	0,1 %
Métaux lourds		1 %

Différents facteurs vont influencer la qualité du produit "mâchefer". Ces facteurs sont la plupart du temps hors de portée du champ de l'utilisateur potentiel du sous-produit fabriqué.

Parmi les plus importants, on peut citer :

- le type, la nature et la provenance du déchet (quartier, saison,...);
- le mode de combustion choisi (température,...);
- la réincorporation éventuelle de cendres dans les mâchefers, ce qui a pour effet de les déclasser immédiatement et de les envoyer en décharge;
- le traitement postcombustion (criblage, tamisage, lavage, déferraillage,...).

Le contrôle-qualité est donc nécessaire afin d'assurer une constance dans les propriétés des produits employés.

A l'heure actuelle, les MIOM sont quasiment toujours utilisés comme matériaux de construction pour des couches de remblais dans la construction routière, la construction de parkings et autres applications en fondation. Cependant, leur utilisation ne se limite pas qu'à cette fonction de couche de fondation. Dans cette étude, divers essais ont été réalisés afin de mieux comprendre le comportement des mâchefers et la faisabilité de leur utilisation dans la formulation des bétons.

4.2. Matériaux utilisés pour la composition des bétons

Dans le cadre de cette étude, l'influence des MIOM utilisés comme granulats dans les bétons a été étudiée.

4.2.1. Ciment et granulats naturels

Le ciment utilisé est un ciment Portland ordinaire (CEM I 52,5 N) fourni par CBR Company. Sa masse spécifique vaut $3,10 \text{ g/cm}^3$ au pycnomètre à hélium. Deux granulats naturels calcaires (notés CC 2/7 et CC 7/14) ont été utilisés pour la fabrication de bétons. L'absorption d'eau de CC 2/7 est 1,2% et sa densité vaut $2,59 \text{ g/cm}^3$ selon la norme EN 1097-6. L'absorption d'eau de CC 7/14 est 1,1% et sa densité égale à $2,63 \text{ g/cm}^3$ selon la norme EN 1097-6. Un sable de rivière naturel (noté SN 0/4) a été utilisé pour la fabrication du béton. L'absorption d'eau du sable naturel vaut 0,2% et sa densité apparente a été évaluée à $2,67 \text{ g/cm}^3$ selon la norme EN 1097-6.

4.2.2. Mâchefers d'incinérateurs d'ordures ménagères (MIOM)

Les MIOM ont été collectés au centre de valorisation des déchets de Thumaide en Belgique. Le traitement des MIOM réalisé après l'incinération consiste en plusieurs opérations:

- Les mâchefers avec un diamètre supérieur à 100mm nécessitent un broyage trop important. Pour ceux compris entre 20 et 100mm, ceux-ci sont concassés à un diamètre maximum de 20mm ;
- Un électro-aimant permet la séparation des métaux ferreux et un courant de Foucault permet l'extraction des métaux non-ferreux tels que le laiton, le cuivre et l'aluminium ;
- Un vieillissement dans un hall de maturation pendant 18 semaines est réalisé. De cette façon, les propriétés chimiques et physiques des mâchefers se stabilisent pour permettre leur utilisation en tant que matériaux de construction.

Les propriétés des MIOM ont été analysées et les valeurs obtenues sont présentées dans le Tableau 4.2. Les valeurs obtenues pour l'absorption d'eau (WA) sont plus grandes pour les MIOM par rapport des granulats naturels, ce qui est dû à la plus grande porosité des MIOM. L'absorption d'eau des MIOM type 6/14 est 6,0% (contre 1,1% pour CC 7/14) selon la norme EN 1097-6, avec une densité de 2578 kg/m³, qui est inférieure à celle du granulats naturels de dimensions équivalentes (2630 kg/m³ pour CC 7/14).

Tableau 4.2

Comparaison des caractéristiques des matériaux

Propriété	MIOM 6/14	MIOM 0/6	CC 7/14	CC 2/7	SN 0/4
Densité apparente (kg/m ³)	2578	2540	2630	2590	2674
WA (%)	6,0	13,1	1,1	1,2	0,2
Teneur d'eau (%)	2,0	6,9	0,3	0,3	0,2
Densité à l'état SSS (kg/m ³)	2681	2698	2651	2613	2674

4.2.3. Composition des bétons

Huit mélanges de béton ont été fabriqués afin d'étudier l'influence des MIOM du béton. Le Tableau 4. montre les compositions du béton. Les bétons ont été fabriqués avec différents taux de substitution de granulats naturels par les MIOM 6/14 (0, 30, 50 et 100% en volume) et différents taux de substitution de sable naturel par les MIOM 0/6 (0, 30 et 100% en volume). Les abréviations

utilisées pour les différents bétons «Gx_Sy» (G: Granulats de mâchefers, x% de substitution du CC 7/14 par des MIOM 6/14; S: Sables de mâchefers, y% de substitution du CC 2/7 et du SN 0/4 par des MIOM 0/6). Les granulats recyclés de MIOM ont été pré-saturés 24 h à l'avance avec une partie de l'eau totale. L'eau de mélange a été ajustée en fonction de la teneur en eau des granulats et de leur absorption d'eau. Il peut déjà être mentionné que la quantité de superplastifiant nécessaire à un affaissement de type S3 est plus importante en présence de MIOM que pour le béton de référence, particulièrement pour le béton G100_S100.

Tableau 4.3

Composition des bétons à base de granulats des MIOM

	G0_S 0	G30_S0	G50_S 0	G100_S 0	G0_S30	G30_S3 0	G100_S3 0	G100_S100
CEM I 52,5 (kg)	320	320	320	320	320	320	320	320
Eau efficace (kg)	160	160	160	160	160	160	160	160
Eau absorbée (kg)	15	29	37	59	39	52	83	139
E/C efficace	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
SN 0/4 (kg)	703	703	703	703	492	492	492	0
CC 2/7 (kg)	182	182	182	182	127	127	127	0
CC 7/14 (kg)	963	674	482	0	963	674	0	0
MIOM 0/6 (kg)	0	0	0	0	192	192	192	641
MIOM 6/14 (kg)	0	264	440	879	0	264	879	879
% de SP/CEM I	0,6	0,6	0,6	0,7	1,2	1,1	1,2	4,2

4.3. Méthodes de caractérisation des bétons

4.3.1. Béton à l'état frais

Les propriétés du béton à l'état frais permettent de donner des informations sur les conditions de mise en place et de coulage, notamment dans les coffrages. L'affaissement du béton à l'état frais a été déterminé avec le cône d'Abrams selon la norme EN 12350-2. Un béton de classe S3 est l'objectif, ce qui représente un affaissement compris entre 10 et 15cm.

Une fois que l'affaissement atteint, la mesure de la teneur en air (EN 12350-7-) et de la masse volumique (EN 12350-6) ont été réalisées.

4.3.2. Béton à l'état durci

Les échantillons sont coulés dans les moules à l'aide de la table vibrante. Les échantillons sont démoulés 24 h après la fabrication et stockés en chambre climatique (20 ± 2 °C et $95 \pm 5\%$ H.R.). La résistance à la compression du béton après 28 jours de cure a été déterminée selon la norme EN 12390-3 sur des échantillons cubiques (150 mm x 150 mm x 150 mm).

L'absorption d'eau par remontée capillaire du béton à l'état durci après 28 jours de cure a été déterminée sur les cubes (100 mm x 100 mm x 100 mm) selon la norme EN 13057. L'absorption d'eau par immersion a été testée sur base de la norme NBN 15-215. La différence entre la masse à l'état saturé et la masse à l'état sec permettra de donner une information de la porosité ouverte du béton.

La résistance à la carbonatation du béton durci a été mesurée selon la norme EN 12390-12. Un prisme (100 mm x 100 mm x 400 mm) est placé en chambre de carbonatation dans laquelle la concentration en CO₂ équivaut à 3%. Un indicateur coloré de pH, la phénolphthaléine, est utilisé pour mesurer la profondeur de carbonatation.

4.4. Résultats et discussion

4.4.1. Affaissement

Le Tableau 4. présente les résultats d'affaissement au cône d'Abrams. L'affaissement recherché doit être compris entre 10 et 15 cm afin de répondre aux critères d'un béton de classe S3. La quantité de superplastifiant (SP) est ajoutée afin de rencontrer cette exigence. Au plus la concentration en MIOM s'avère élevée, au plus la concentration en SP pour obtenir le même affaissement devient importante. Le sable de MIOM impacte plus fortement (diminue) l'affaissement que les granulats de MIOM. Les résultats montrent que lorsque seulement 30% en masse de sable MIOM est introduit dans le mélange, la concentration en SP doit doubler. Quand le taux atteint les 100% (G100_S100), la proportion en SP est multipliée par 7 en comparaison du béton de référence.

Tableau 4.4

Affaissement au cône d'Abrams en fonction de la quantité de superplastifiant

Propriété	Affaissement (cm)	% de SP/Ciment
G0_S0	14,5	0,6

G30_S0	12	0,6
G50_S0	11	0,6
G100_S0	13	0,7
G0_S30	12	1,22
G30_S30	11	1,11
G100_S30	11	1,22
G100_S100	11	4,22

4.4.2. Teneur en air

La Figure 4.2 présente la teneur en air des bétons. Il semble qu'au plus la proportion de MIOM est grande, au plus la teneur en air l'est également. Les granulats de MIOM ont, suite à leur forme anguleuse et leur plus grande porosité, tendance à faire augmenter la teneur en air.

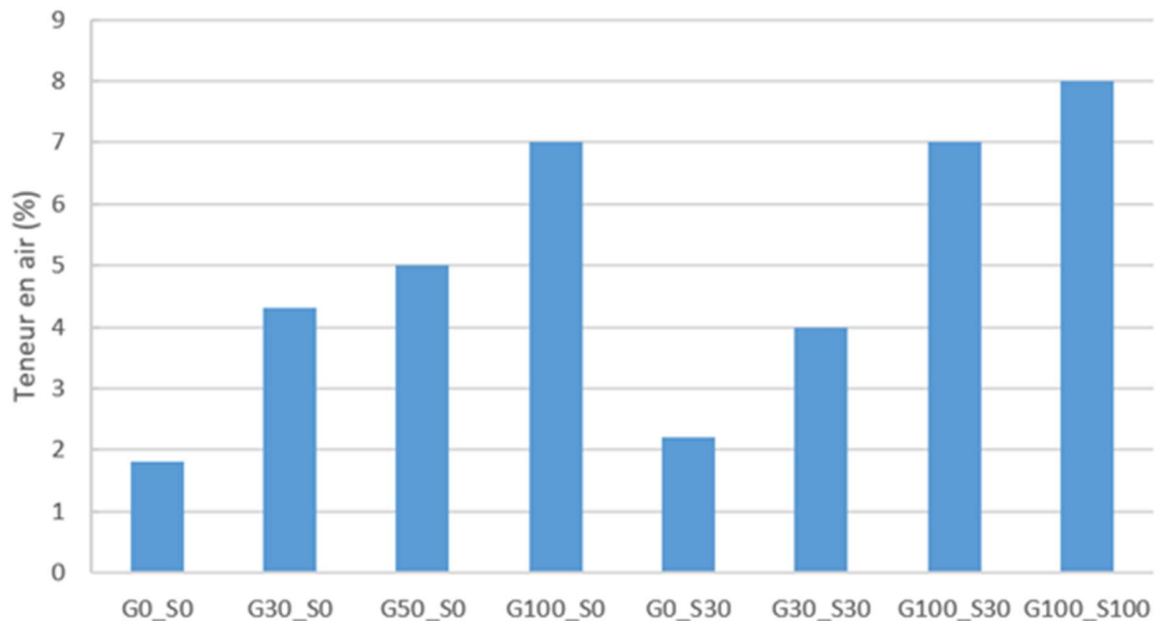


Figure 4.2 Teneur en air des bétons avec MIOM

4.4.3. Masse volumique à l'état frais

La Figure 4.3 présente la masse volumique du béton à l'état frais. La masse volumique est d'autant plus faible que la proportion de MIOM est importante. De plus, le sable de MIOM a plus d'impact que les granulats de MIOM sur la masse volumique de béton, ce qui est dû à sa plus faible densité par rapport au granulat de MIOM et au granulat naturel.

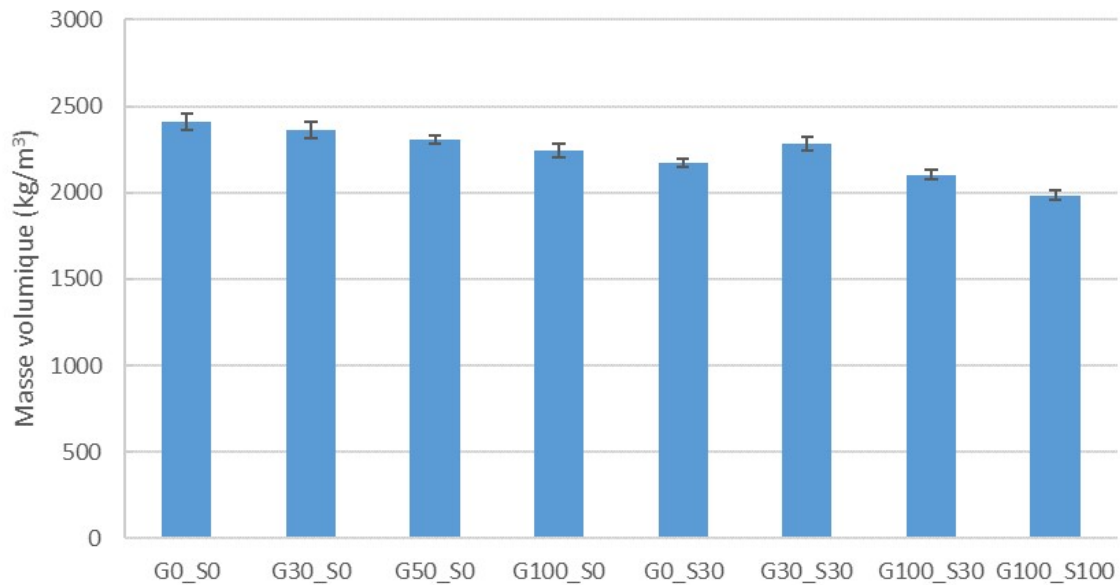


Figure 4.3 Masse volumique des bétons avec MIOM à l'état frais

Les trois tests décrits précédemment montrent que les sables de MIOM ont un impact non négligeable sur le comportement et les propriétés physiques des bétons. En effet, la demande en SP est très conséquente lorsque du sable de MIOM est introduit, ce qui induit un prix de production plus important. Cependant, une quantité limitée de MIOM (inférieure à 30 ou 50%) permet d'obtenir, malgré une teneur en air plus élevée et une masse volumique plus faible, des résultats plus que satisfaisants. Néanmoins, les propriétés à l'état frais seules ne garantissent pas une bonne pérennité à un béton. Il faut se concentrer sur les propriétés mécaniques à l'état durci et la durabilité des bétons ainsi fabriqués.

4.4.4. Résistance à la compression

La Figure 4.4 présente les résultats de résistance en compression pour les différentes compositions. Il est important de noter qu'il s'agit, ici, des résistances obtenues sur cylindre ($f_{c,k, cube} = 1,265 f_{c,k, cylindre}$). Plus la proportion de MIOM est importante, moins la résistance est élevée. En effet, aucun béton n'a une résistance supérieure à celle du béton de référence. La raison qui peut expliquer cette perte de résistance est double. D'une part, il y a une masse volumique inférieure et, d'autre part, une teneur en air qui est plus grande lorsque des MIOM sont utilisés. Par ailleurs, l'objectif d'une résistance C30/37 est plus qu'atteint dans le cas du béton de référence. En revanche,

dans le cas de G100_S30 et G100_S100, les résistances obtenues ne sont pas suffisantes pour satisfaire ce critère.

Combiné avec une substitution par des granulats de MIOM, une substitution par du sable de MIOM donne lieu à des résistances encore plus faibles. Deux bétons n'ont vraisemblablement pas atteint la résistance attendue (G50_S0 et G0_S30). Le béton G0_S30 a une masse volumique trop faible par rapport à celle escomptée, ce qui explique pourquoi la résistance obtenue est très en deçà des objectifs. Pour le béton G50_S0, la forme d'éprouvette testée n'était pas parfaitement conforme à la norme (160×320mm) et un mauvais remplissage du moule a été observé.

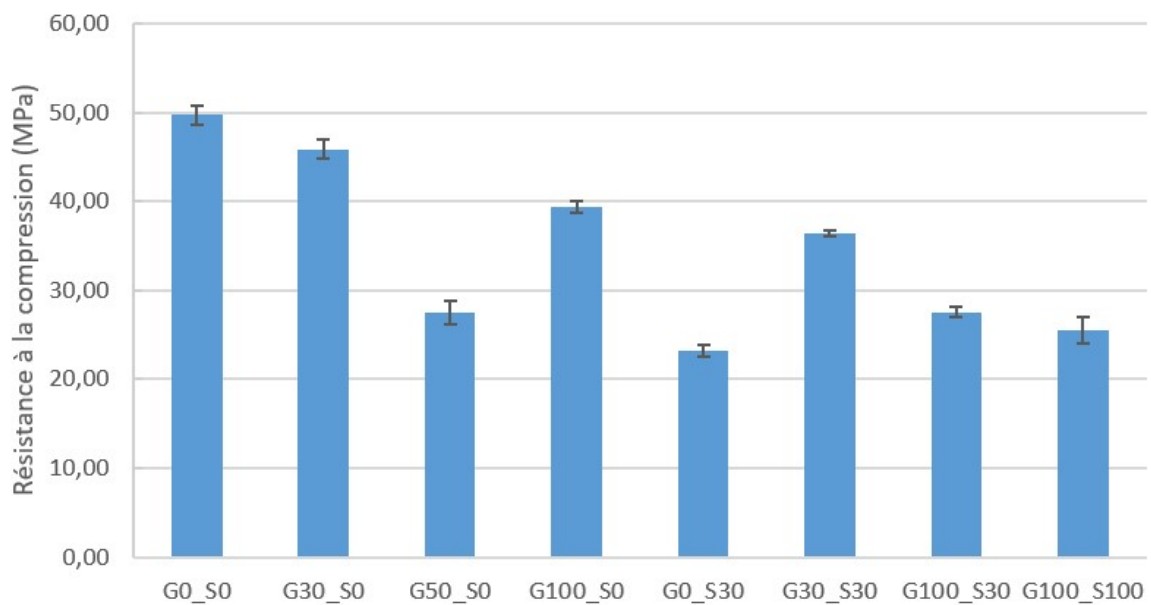


Figure 4.4 Résistance à la compression de béton durcie à 28 jours

4.4.5. Absorption d'eau capillaire

La Figure 4.5 présente la variation de masse générée par l'absorption d'eau dans les capillaires (absorption d'eau par capillarité) en fonction du temps. Il est important de noter qu'en abscisse, il s'agit de la racine carrée du temps. Au plus la concentration en MIOM est importante, au plus l'eau absorbée par remontée capillaire (coefficient de sorption capillaire) l'est aussi comme le montre la Figure 4.. Le coefficient de sorption capillaire des bétons G0_S0, G30_S0, G100_S0 est de $0,0121 \text{ g/cm}^2\text{h}^{0,5}$, $0,0155 \text{ g/cm}^2\text{h}^{0,5}$, $0,0186 \text{ g/cm}^2\text{h}^{0,5}$, respectivement. L'introduction de MIOM au sein d'un béton induit une augmentation de la porosité et du réseau capillaire. Cette

augmentation entraîne irrémédiablement une augmentation de la quantité d'eau pouvant être absorbée. Dans un premier temps, les pores les plus grossiers se remplissent d'eau, ce qui entraîne une augmentation conséquente de la masse. Par la suite, si la connectivité capillaire le permet, l'eau remonte par les pores. Au fil du temps, ce sont des pores de plus en plus fins qui se remplissent d'eau, ce qui se traduit par une quantité d'eau absorbée de plus en plus faible. Il faut noter que ce phénomène, bien que les valeurs soient plus importantes, est observable quel que soit le taux de substitutions de MIOM.

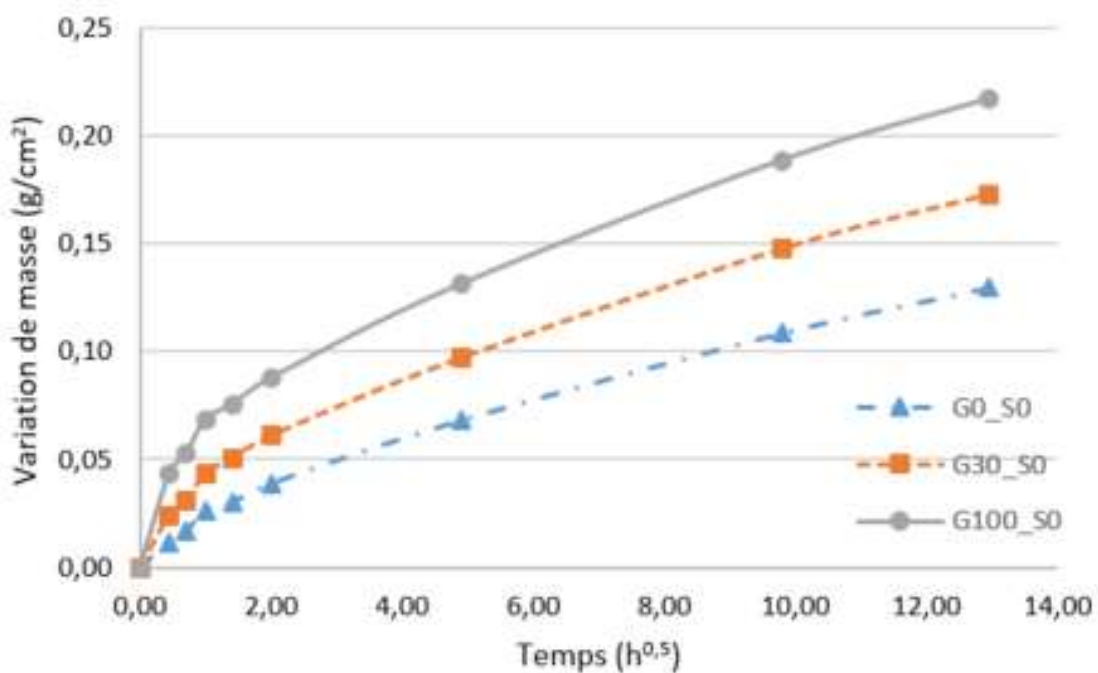


Figure 4.5 Absorption d'eau capillaire de béton en fonction du temps

4.4.6. Absorption d'eau par immersion

Les résultats d'absorption d'eau totale de béton par immersion sont présentés dans la Figure 4. : plus la concentration en MIOM est importante, plus l'absorption d'eau totale et la porosité sont importantes. Les valeurs obtenues restent dans les limites « acceptables » ($WA = \pm 6\%$) comparées à celles du béton de référence, si ce n'est pour le béton G100_S100. La forme anguleuse et la porosité des MIOM semblent amener une porosité bien plus importante des bétons. Cette augmentation de porosité permet également d'expliquer pourquoi l'absorption capillaire est plus

importante. Le cas de G100_S100 est particulier : les sables de MIOM, utilisés en quantité très importante, induisent une porosité plus grande encore et donc, une absorption d'eau totale également plus importante.

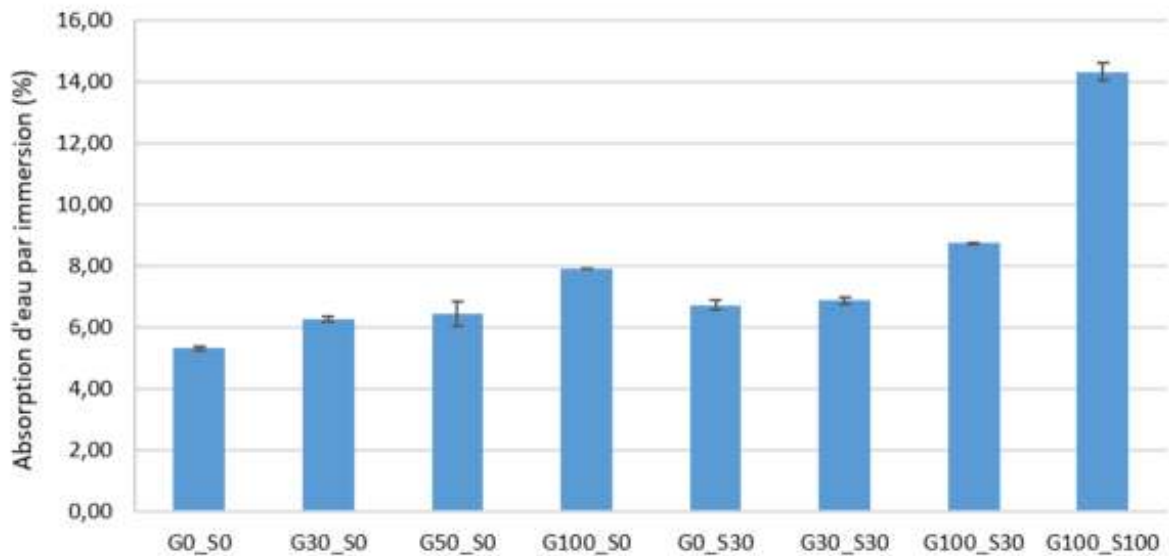


Figure 4.6 Absorption d'eau de béton par immersion

4.4.7. Résistance à la carbonatation

La Figure 4.7 montre la profondeur de carbonatation mesurée après 28 jours en chambre de carbonatation avec 3% de CO₂. Les valeurs sont issues d'une moyenne entre l'avancement du front de carbonatation mesuré sur les quatre faces de l'échantillon testé. Les Figure 4. et Figure 4. permettent de mieux visualiser l'avancement du front de carbonatation. Ces figures sont importantes car elles permettent d'une part, de comparer les différentes compositions et, d'autre part, de mettre en avant la cinétique de phénomène. En effet, au plus la pente de la droite est élevée, au plus la progression du front de carbonatation est rapide.

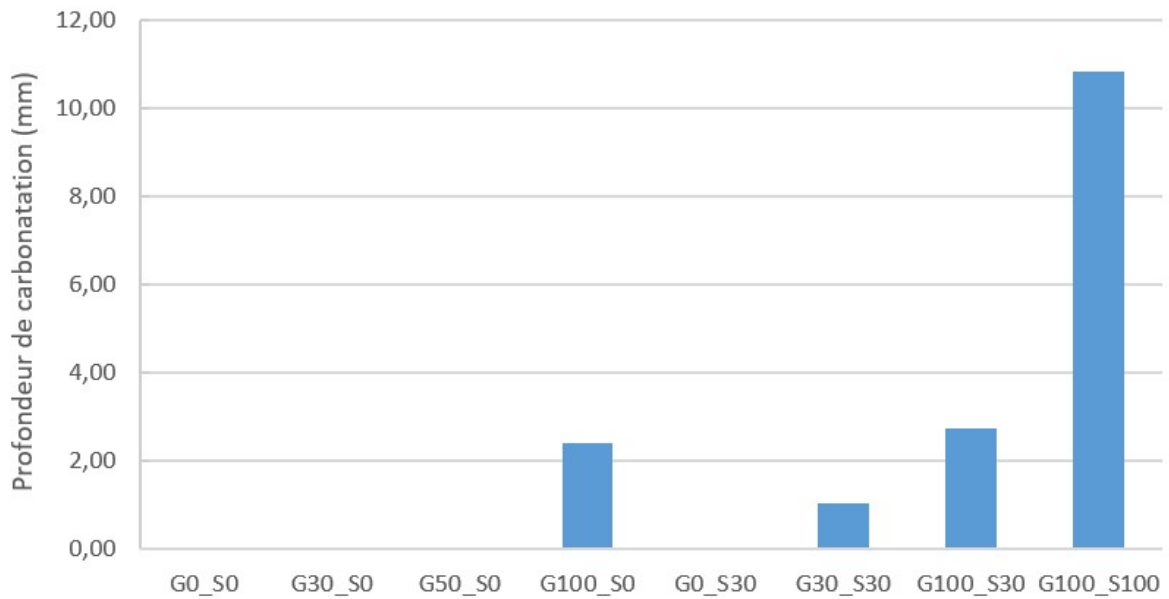


Figure 4.7 Profondeur de carbonatation mesurée après 28 jours en chambre de carbonatation

Une substitution par des MIOM augmente la progression du front de carbonatation comme en témoigne les figures. A 28 jours, il est possible de comparer la progression du front de carbonatation entre le béton à base de sable de MIOM et béton n'en comportant pas. Il apparaît clairement que, dès que du sable de MIOM est introduit, la vitesse de carbonatation est bien plus élevée, ce qui se traduit par un avancement bien plus conséquent. En effet, l'introduction des MIOM induit une augmentation de la porosité : plus la porosité est importante, plus la diffusion du CO_2 au sein de l'échantillon est aisée et donc, la carbonatation rapide. Très rapidement, la carbonatation produit du carbonate de calcium (CaCO_3), plus volumineux que les réactifs de base ce qui a pour effet de boucher ou diminuer la section des pores, et donc de diminuer la vitesse de carbonatation.

La profondeur de carbonatation a été mesurée sur les quatre faces de l'échantillon. De manière générale et récurrente, les mesures effectuées sur la face supérieure (face 1) sont plus grandes que les trois autres. Les mesures des faces 2 et 4, représentant les côtés de l'échantillon, donnent quant à elles, le même ordre de grandeur. La face inférieure (face 3) révèle des valeurs d'avancement plus faibles que les trois autres. Lors de la confection des échantillons, les prismes sont moulés en trois couches successives. La table vibrante est utilisée afin de réaliser le compactage le plus

efficace possible. Dès lors, la couche inférieure a été beaucoup plus compactée que la couche supérieure. On peut également suspecter que les 3 autres faces, qui sont en contact avec le moule et l'huile de démoulage, soient moins « ouverte » que la face supérieure.

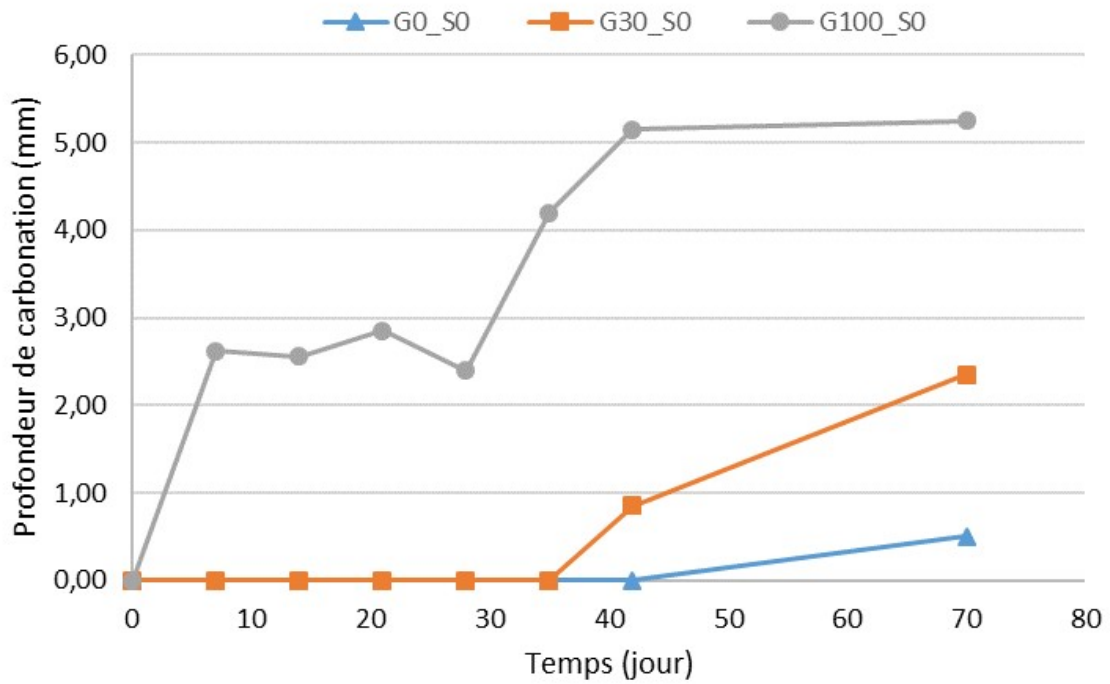


Figure 4.8 Profondeur de carbonatation des bétons contenant des granulats de MIOM

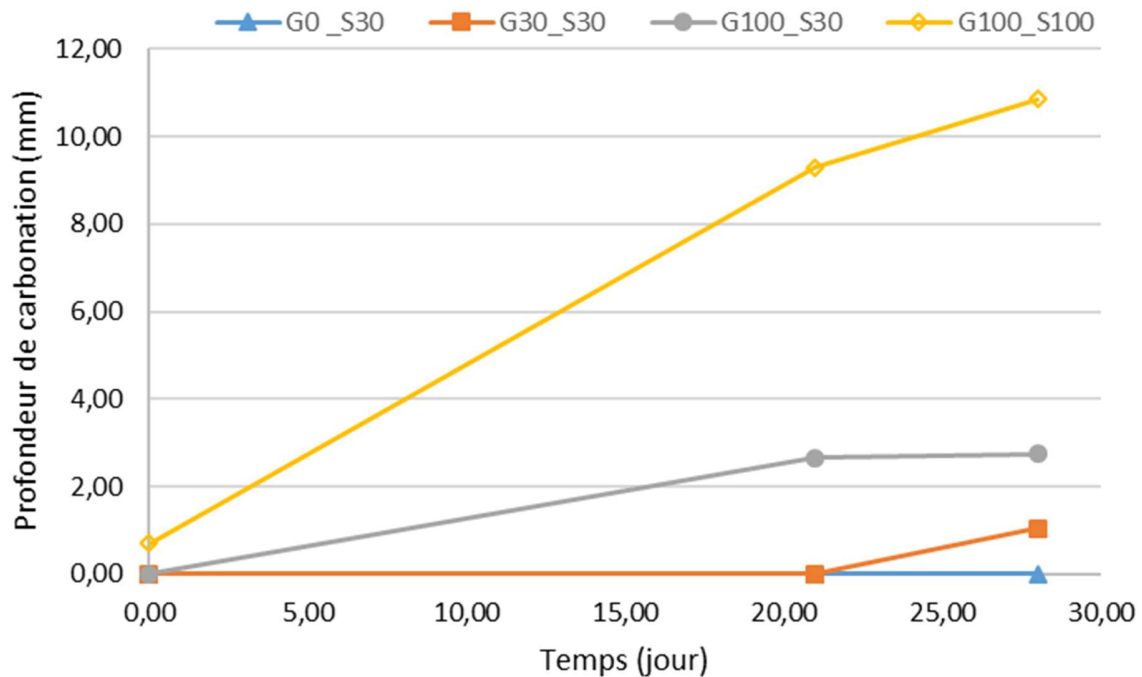


Figure 4.9 Profondeur de carbonatation des bétons contenant des granulats et sables de MIOM

4.5. Conclusions

Le travail de recherche montre que, moyennant des traitements plus ou moins importants afin de stabiliser leur composition et éliminer les particules nocives, les MIOM peuvent être utilisés comme granulats et sables au sein des bétons. Ce travail permet notamment de tirer les conclusions suivantes :

- A l'état frais : l'utilisation de granulats de MIOM n'a que peu d'effet sur l'ouvrabilité du béton, si ce n'est lorsque sa concentration est très importante. En revanche, le sable de MIOM impacte de manière beaucoup plus significative l'ouvrabilité suite à son plus grand pouvoir d'absorption d'eau. Dès lors, une quantité de superplastifiant importante doit être ajoutée pour conserver la même fluidité ce qui amène à un coût de production nettement supérieur. De manière générale, la teneur en air est augmentée lorsque des granulats de MIOM sont introduits. Il faut également souligner que les MIOM induisent des bétons plus légers.

- A l'état durci : la résistance à la compression ne diminue que de quelques MPa si la substitution en MIOM reste limitée ($\leq 30\%$). Dans le cas où ce taux n'est pas limité, la résistance à la compression est fortement réduite. L'absorption d'eau (par immersion et par remontée capillaire) et la porosité, tout comme la carbonatation, augmentent lorsque des MIOM sont introduits. Cette augmentation est d'autant plus marquée lorsque du sable de MIOM est utilisé.

Les MIOM peuvent donc être utilisés dans des concentrations modérées, 30% pour du sable de MIOM et jusqu'à 50% pour des granulats de MIOM, pour fabriquer des bétons sans augmenter de manière significative la porosité. Les perspectives d'avenir pour les granulats de MIOM semblent donc assez prometteuses lorsque le taux de substitution ne dépasse pas les 50%. En effet, la porosité reste suffisamment limitée et la résistance en compression suffisamment élevée, pour pouvoir utiliser le béton dans les environnements classiques (pas d'agents agressifs extérieurs tels que le sulfate, les acides, etc.).

Pour les bétons à base de sable de MIOM, la situation est un peu différente. En effet, pour un béton de classe de consistance S3, l'ouvrabilité est fortement diminuée à mesure que la quantité en sable de MIOM augmente. Dès lors, il eut été préférable de fabriquer un béton sec, très peu fluide, avec une consistance S1. De plus, pour le béton que nous avons étudié, si le taux de substitution en sable de MIOM n'est pas limité en dessous d'une certaine valeur ($\leq 30\%$), le béton ne peut être utilisé qu'à de très rares occasions car il présente une porosité bien trop importante. Si le taux de substitution des sables naturels reste en dessous de cette valeur limite (30%), le béton peut être utilisé au même titre qu'un béton fait de granulats de MIOM.

Conclusions générales

Le projet Ecoliser avait pour objectif de développer des formulations d'écoliants à base de sous-produits industriels ou de déchets. Nous avons envisagé d'utiliser des cendres volantes de charbon et des cendres volantes de biomasse, des mâchefers d'incinérateur d'ordures ménagères et des granulats recyclés de béton. Nous avons fabriqué, avec ces produits, de nouveaux bétons à base de liants hydrauliques (ciments) ou de liants alcali-activés. Les applications visées concernaient autant les structures routières que le bâtiment et le génie civil. Il apparaît clairement qu'il est possible, moyennant certaines conditions, principalement au niveau des quantités utilisées, de développer des produits finis présentant des performances mécaniques suffisantes.

Les cendres volantes de biomasse et de charbon

Les propriétés mécaniques des mortiers avec des cendres volantes de charbon restent toujours plus élevées que celles des mortiers fabriqués avec des cendres de biomasse : il n'est donc pas possible de substituer purement et simplement les cendres volantes de charbon par des cendres de biomasse (ou de co-combustion). Ainsi, contrairement aux cendres volantes de charbon, la composition chimique des cendres volantes de biomasse n'est pas appropriée pour induire une activité pozzolanique. Par conséquent, les cendres volantes de biomasse étudiées provenant de la combustion de 100 % de pellet de bois ne répondaient pas aux exigences européennes de la norme EN 450-1 pour la réutilisation en tant qu'additions minérales. Cela n'exclut pas la réutilisation possible de ce type de cendres volantes de biomasse générées par un processus de combustion bien défini dans les mortiers, mais à un faible niveau de remplacement du ciment (entre 5 et 20 %). Une utilisation est également possible dans la formulation de liants alcali-activés, dans lesquels le ciment traditionnel est remplacé par une solution de soude et de chaux : les cendres de biomasse peuvent être utilisées en complément d'activation calcique.

Ces observations nous ont amenés à réfléchir sur l'importance du traitement des cendres de biomasse avant utilisation. C'est pourquoi nous avons déposé un projet sur le sujet dans le cadre de Win2Wal (BioFACon2 *BIObased Fly Ash treatments for engineerd CONcrete products*) et

ERA MIN (ABITIBI *Ashes from Biomass for lower environmental Impact of cement Based materials*).

Les granulats recyclés de béton

Les principales applications des granulats recyclés de béton (GRB) restent les structures routières. Nous avons voulu explorer d'autres voies, en particulier les produits finis de construction, utilisés dans le bâtiment ou en génie civil. Des granulats recyclés issus de blocs (GR_Blocs), de hourdis (GR_Hourdis) et d'une usine de recyclage (GR_Trade) ont été sélectionnés afin de représenter différents types de bétons : de bonne qualité pour les hourdis, à performances réduites pour les blocs et moins purs pour l'usine de recyclage. Ces granulats provenant du concassage des bétons ont été caractérisés afin d'étudier l'influence de leur fraction granulaire et de leur origine. Les sables recyclés possèdent une teneur en pâte de ciment significativement plus élevée que les granulats recyclés grossiers : ainsi, le sable recyclé a un coefficient d'absorption d'eau plus élevé. Les teneurs en pâte de ciment durci obtenues pour les GR_Blocs sont inférieures à celles mesurées sur les GR_Hourdis. La forme des GRB a été mesurée par analyse d'image et au pied à coulisse. Les résultats ont montré que, pour toutes les fractions de GRB, les GR_Hourdis ont un coefficient d'élongation inférieur aux GR_Blocs. La forme des GRB est donc liée à la composition initiale et à la qualité du béton d'origine. Les résultats obtenus dans cette étude ne sont bien entendu valables que pour le concasseur de béton étudié : il est possible qu'un autre type de concasseur (par exemple à marteaux ou à percussion) donne d'autres formes et d'autres teneurs en fines. La résistance à l'usure de GRB est également bien liée à la composition de béton d'origine et à la qualité du béton d'origine.

Les effets de l'utilisation de GRB sur les performances des bétons dépendent des taux de substitution. Les bétons ont été fabriqués en ajoutant différents pourcentages de filler calcaire (0%, 10% et 20% de la masse de ciment) et en remplaçant 30% des granulats naturels par des GR. Les résultats ont montré que les performances du béton fabriqué avec 30% de GR étaient comparables à celles du béton de référence fabriqué avec des granulats naturels. La résistance à la compression du béton avec 10% de filler calcaire et 30% de GRB était de 47,2 MPa après 28 jours, contre 43,1 MPa pour le béton de référence. La présence de filler calcaire a donc un effet bénéfique sur les performances du BGR, probablement à cause de l'amélioration de la compacité du squelette

granulaire et l'effet de nucléation hétérogène. L'addition de 10% de filler calcaire semble être le pourcentage optimal selon cette étude.

Le problème lié à la valorisation de la partie fine des granulats de béton recyclé nous a incités à rechercher d'autres voies que la composition de bétons traditionnels. Nous avons ainsi proposé une valorisation dans les bétons imprimés 3D (INTERREG NWE CirMAP *Design and manufacture of customized 3D printed urban furniture using recycled sand*) et la calcination contrôlée (INTERREG Grande Région CO2REDRES *Traitement des ressources secondaires pour une réduction des émissions de CO2 dans l'industrie de la construction*).

Les granulats recyclés de mâchefers d'incinérateurs d'ordures ménagères

Les MIOM, après maturation, constituent des granulats et des sables présentant souvent d'assez bonnes qualités géotechniques. La valorisation de ces produits dans des bétons à liant hydraulique est également possible aux conditions suivantes :

- A l'état frais : l'utilisation de granulats de MIOM n'a que peu d'effet sur l'ouvrabilité du béton, si ce n'est lorsque sa concentration est très importante. En revanche, le sable de MIOM impacte de manière beaucoup plus significative l'ouvrabilité suite à son plus grand pouvoir d'absorption d'eau. Dès lors, une quantité de superplastifiant importante doit être ajoutée pour conserver la même fluidité, ce qui peut amener à un coût de production nettement supérieur. De manière générale, la teneur en air est augmentée lorsque des granulats de MIOM sont introduits.
- A l'état durci : la résistance en compression ne diminue que de quelques pourcents lorsque le taux de substitution reste limité ($\leq 30\%$). Dans le cas où ce taux n'est pas limité, la résistance à la compression est fortement réduite. L'absorption d'eau (par immersion et par remontée capillaire) et la porosité tout comme la vitesse de carbonatation augmentent lorsque des MIOM sont utilisés. Cette augmentation est d'autant plus marquée lorsque du sable de MIOM est utilisé.

Les MIOM peuvent donc être utilisés dans des concentrations modérées, 30% pour du sable et jusqu'à 50% pour des granulats, pour constituer des bétons sans augmenter de manière

significative la porosité. Les perspectives d'avenir pour les MIOM semblent donc assez prometteuses.

Ces observations ont amené une réflexion sur la capacité des MIOM à capturer du CO₂, de façon à réduire leur impact environnemental et diminuer leur porosité. Un projet REMIND WALLONIA devrait permettre d'étudier les processus et la valorisation des MIOM carbonatés comme granulats et sables dans la fabrication d'éléments préfabriqués.

Remerciements

Les auteurs remercient la société ENGIE Electrabel pour la fourniture de la cendre volante de biomasse et de charbon et les sociétés Tradecowall et Prefer pour la fourniture des granulats recyclés de béton. Ils remercient le centre de valorisation des déchets de Thumaide pour la fourniture des MIOM. Les auteurs remercient M. Amaury DARAS et Mme Monique DENOTTE pour leur aide dans la réalisation des certains essais. Les auteurs remercient également M. Louis MARTIN et Mlle Marine MEYS pour leurs travaux de fin d'étude apportant des informations complémentaires pour ce projet. Enfin, les auteurs remercient le Fonds européen de développement régional et la Wallonie pour leur soutien financier à travers le projet Feder Ecoliser (ÉCOLIants pour traitement de Sols, Etanchéité et Routes). Les auteurs remercient aussi tous les partenaires (CTP, MateriaNova, INISMa, Certech, ULB-4MAT, ULiège-ArGEnCo-GEO³, ULiège-LGC-PDD...) du projet Ecoliser pour les échanges intéressants.

Publications et communications

- Influence of activators on mechanical properties of modified fly ash based geopolymer mortars. P. Prochon, Z. Zhao, L. Courard, T. Piotrowski, F. Michel, A. Garbacz. *Materials* 2020 (ed. MDPI), 13(5), 24p. (<https://www.mdpi.com/1996-1944/13/5/1033#cite>)(<http://hdl.handle.net/2268/245538>)
- Influence of granular fraction and origin of recycled concrete aggregates on their properties. Z. Zhao, L. Courard, F. Michel, S. Remond, D. Damidot (2017). *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 22, 1457-1467. (<http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2017.1304281>)

Conferences

- Use of municipal solid waste incineration bottom ash for roller compacted concrete. Z. Zhao, W. Hyoumbi, F. Michel, L. Courard. 74th RILEM Annual Week & 40th Cement and Concrete Science Conference, Sheffield, 2020 (<http://hdl.handle.net/2268/251564>)

- Mechanical strength and durability of mortar containing biomass fly ash as partial replacement of cement. Z. Zhao, L. Courard, S. Remond, D. Damidot. 15th International Congress on the Chemistry of Cement ICCM, Prag (16-19 september 2019) (<http://hdl.handle.net/2268/252662>).
- Influence de l'activant sur la formulation des géopolymères à base de cendres volantes/Influence of activator on fly ash based geopolymer formation. P. Prochon, Z. Zhao, T. Piotrowski, F. Michel, A. Garbacz, L. Courard. NoMaD 2018, Nouveaux Matériaux et Durabilité, Liège, 7-8 novembre 2018, 10p.
- Effect of saturation state of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. Z. Zhao, S. Rémond, D. Damidot, L. Courard. The Fourth International Conference Progress of Recycling in the Built Environment), Lisbon, 11- 12 October 2018.
- Use of biomass fly ash as partial replacement in the manufacture of mortars. Z. Zhao, L. Courard, F. Michel, S. Remond. 100 ans du Laboratoire des Matériaux de Construction - Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 19-22 August 2018 (<http://hdl.handle.net/2268/228428>)
- Properties of concrete with recycled construction and demolition wastes: a research experience in Belgium. Z. Zhao, L. Courard, F. Michel, S. Delvoie, M. ElKarim Bouarroudj, C. Colman, J. Xiao. Industry-Academia Forum on Advances in Structural Engineering IFASE (in: Sustainable structures and materials, ed. Xiao Jianzhuang, China Architecture and Building Press). Tongji University, Shanghai, 7-9 September 2018, 79-90 (<http://hdl.handle.net/2268/228475>).
- Mechanical and durability properties of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Z. Zhao, L. Courard, F. Michel, S. Rémond, D. Damidot. The 3rd International Conferences on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, Nanjing, China, October 24-26, 2016.
- Influence de la fraction granulaire et de l'origine des granulats recyclés sur leurs propriétés. Z. Zhao, L. Courard, F. Michel, S. Rémond, D. Damidot. Rencontres Universitaires de Génie Civil, Liège (25-27 mai 2016), 10p.