

Travail de Fin d'Etudes : Etude de l'incorporation des cendres volantes de biomasse dans les mortiers

Auteur : Meys, Marine

Promoteur(s) : Courard, Luc

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil des constructions, à finalité spécialisée en "civil engineering"

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/9036>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

UNIVERSITÉ DE LIÈGE
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES RÉALISÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE DE
MASTER "INGÉNIEUR CIVIL EN CONSTRUCTION"

**Étude de l'incorporation des cendres volantes de
biomasse dans les mortiers**

Jury :

Luc COURARD (Promoteur)

Zengfeng ZHAO (Guidance)

Frédéric COLLIN

Stéphanie LAMBERT

Christian PIERRE

Marine MEYS

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Monsieur Luc Courard, promoteur de ce mémoire, pour l'aide et le suivi qu'il m'a apporté tout au long de ce travail de fin d'études. Merci pour son soutien, ses conseils et sa disponibilité durant cette période compliquée de pandémie.

Ensuite, je voudrais remercier Monsieur Zengfeng Zhao pour son aide dans l'analyse, la compréhension et l'interprétation de mes résultats, ainsi que sa disponibilité.

Je remercie également Monsieur Frédéric Michel pour l'attention portée à mon travail et ses conseils précieux lors de sa réalisation.

J'adresse également mes remerciements aux membres de mon jury, Madame Stéphanie Lambert, Monsieur Frédéric Collin et Monsieur Christian Pierre pour l'attention portée à mon travail.

Je tiens également à remercier l'ensemble des membres du Laboratoire des Matériaux de Construction pour leur concours et leurs recommandations lors de la réalisation de mon travail expérimental. Merci à Monsieur Amaury Daras, Madame Véronique Szepetiuk et Madame Fabienne Libioule. Je remercie tout particulièrement Madame Monique Denotte pour ses suggestions et le temps qu'elle a accordé à mon travail. Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Pierre Illing du Laboratoire de Géomécanique.

Je remercie mes collègues de travail : Adèle, Louis et Arthur, pour leur bonne humeur pendant toute la durée de ce travail de fin d'études.

Je remercie l'ensemble des personnes qui ont participé à la relecture de mon travail. Merci à Martine, Annette et Caroline.

Pour finir, je tiens à remercier mes proches, mes amis et ma famille pour leur soutien tout au long de mes études. Merci particulièrement à Romain pour son précieux soutien et pour avoir toujours cru en moi.

Abstract

The construction industry is a large consumer of cement which is used in the manufacture of concrete and mortar. Several substitute products (blast furnace slag, fly ash from thermal power stations) are used to replace clinker. The object of the work is to study the possibility of using residual biomass ash. This substitution would reduce the cost (economic and environmental) of cement while using renewable energy resources. This work consists in determining the limits of this substitution based on the mechanical strengths, the workability and the durability of masonry and plaster mortars.

Several materials were used to carry out this study :

- Two types of fly ash : biomass fly ash and conventional fly ash, for comparison purposes.
- Two types of sand : standard sand and yellow sand.
- Two types of cement : CEM I 52.5 N and CEM II / B-M (S-V) 32.5 N.
- Hydrated lime, to test the behavior of bastard mortars.

These materials have been combined to make different mortar compositions in which a certain percentage of cement will be replaced by fly ash. These substitution percentages vary between 0% and 50%.

Various tests have been carried out on these mortar samples. Some tests were carried out on fresh mortar :

- Density of fresh mortar
- Slump test with a smaller device

Some tests were carried out after 7, 28 and 90 days of hardening in a humid chamber :

- Density of hardened mortar
- Bending
- Compression
- Bulk porosity
- Water absorption by immersion

The results have been compared and analyzed in order to determine the substitution percentage limits, making it possible to guarantee normal behavior in the short and long term.

Note : Unfortunately, the lockdown imposed by the COVID-19 prevented certain tests from being carried out. The air content and setting time were initially supposed to be tested on all the mortar samples in order to study the behavior of the fresh mortar. Other tests such as the mortar's shrinkage or the plaster mortar's adhesion also had to be carried out in order to study the behavior of the hardened mortar. Finally, durability tests such as freeze/thaw had to be carried out on the hardened mortar samples.

Résumé

L'industrie de la construction est une grande consommatrice de ciment qui entre dans la fabrication du béton et du mortier. Plusieurs produits de substitution (laitiers de haut-fourneau, cendres volantes de centrales thermiques) sont utilisés en remplacement du clinker. L'objet du travail est d'étudier la possibilité d'employer les cendres résiduelles de biomasse. Cette substitution permettrait de réduire le coût (économique et environnemental) du ciment tout en utilisant des ressources énergétiques renouvelables. Ce travail consiste à déterminer les limites de cette substitution sur base des résistances mécaniques, de l'ouvrabilité et de la durabilité de mortiers de maçonnerie et d'enduit.

Plusieurs matériaux ont été utilisés afin de réaliser cette étude :

- Deux types de cendres volantes : cendres volantes de biomasse et cendres volantes classiques, à des fins de comparaison.
- Deux types de sable : sable normalisé et sable jaune.
- Deux types de ciment : CEM I 52,5 N et CEM II/B-M (S-V) 32,5 N.
- De la chaux hydratée, afin de tester le comportement des mortiers bâtards.

Ces matériaux vont être combinés afin de réaliser différentes compositions de mortier dans lesquelles un certain pourcentage de ciment va être substitué par des cendres volantes. Ces pourcentages de substitution varient entre 0% et 50%.

Différents essais vont être réalisés sur ces échantillons de mortiers. Certains essais sont réalisés sur du mortier à l'état frais :

- Masse volumique du mortier à l'état frais
- Étalement au mini cône

Certains essais sont réalisés après 7, 28 et 90 jours de durcissement dans une chambre humide :

- Masse volumique du mortier à l'état durci
- Flexion
- Compression
- Porosité apparente
- Absorption d'eau par immersion

Les résultats vont ensuite être comparés et analysés afin de déterminer les limites de pourcentage de substitution, permettant de garantir un comportement normal à court et long terme.

Note : Malheureusement, le lockdown imposé par le COVID-19 a empêché de réaliser certains essais. La teneur en air et le temps de prise devaient initialement être testés sur l'ensemble des échantillons de mortier afin d'étudier le comportement du mortier à l'état frais. D'autres essais comme le retrait du mortier ou l'adhérence du mortier d'enduit devaient également être réalisés afin d'étudier le comportement du mortier à l'état durci. Pour finir, des essais de durabilité comme le gel/dégel devaient être réalisés sur les échantillons de mortier durci.

Table des matières

I	Introduction générale	1
II	État de l'art	5
1	Mortiers	5
1.1	Composition	5
1.2	Mortier prêt à l'emploi vs mortier préparé sur chantier	6
1.3	Types de mortiers	6
2	Mortier d'enduit et mortier de maçonnerie	9
2.1	Définition	9
2.2	Matériaux utilisés	10
2.2.1	Ciment	10
2.2.2	Chaux hydratée	13
2.2.3	Matériaux légers	13
2.3	Propriétés du mortier à l'état frais	14
2.4	Propriétés du mortier à l'état durci	14
3	Cendres volantes de charbon	19
3.1	Origine et production	19
3.2	Cendres volantes siliceuses et calciques	25
3.3	Propriétés physiques et chimiques	26
3.4	Réactions chimiques	27
3.5	Avantages et inconvénients	28
3.6	Applications des cendres volantes	31
3.7	Propriété du mortier à l'état frais	33
3.8	Propriété du mortier à l'état durci	36
4	Cendres volantes de biomasse	42
4.1	Origine et production	42
4.2	Propriétés physiques et chimiques	43
4.3	Réactions chimiques	45
4.4	Avantages et inconvénients	45
4.5	Applications des cendres volantes de biomasse	48
4.6	Introduction des cendres volantes de biomasse dans les mortiers/bétons	48
4.7	Propriétés du mortier à l'état frais	49
4.8	Propriétés du mortier à l'état durci	53
5	Objectifs et problématiques du TFE	58
III	Programme de recherches expérimental	59
1	Méthodologie	59
2	Matériaux utilisés dans la composition des mortiers utilisés	59

3	Compositions des échantillons de mortier	62
3.1	Échantillons partie A	62
3.1.1	Échantillons partie A-1	62
3.1.2	Échantillons partie A-2	63
3.2	Échantillons partie B	65
3.2.1	Échantillons partie B-1	66
3.2.2	Échantillons partie B-2	69
4	Réalisation des échantillons de mortier	71
5	Descriptions des tests réalisés	72
5.1	Essai au pycnomètre au gaz	72
5.2	Mortier à l'état frais	72
5.3	Mortier à l'état durci	74
IV	Analyse des résultats	77
1	Essai au pycnomètre au gaz	77
2	Échantillons partie A	77
2.1	Mortier à l'état frais	77
2.1.1	Étalement au mini-cône	77
2.1.2	Masse volumique à l'état frais	79
2.2	Mortier à l'état durci	80
2.2.1	Masse volumique saturée en eau	80
2.2.2	Résistance mécanique	82
2.2.3	Porosité apparente et absorption d'eau par immersion	90
3	Échantillons partie B	93
3.1	Mortier à l'état frais	93
3.1.1	Étalement au mini-cône	93
3.1.2	Masse volumique à l'état frais	94
3.2	Mortier à l'état durci	95
3.2.1	Masse volumique saturée en eau	95
3.2.2	Résistance mécanique	97
3.2.3	Porosité apparente et absorption d'eau par immersion	103
V	Conclusions et recommandations	106
VI	Annexes	108
1	Caractéristiques du ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N	109
2	Caractéristiques du ciment CEM I 52,5 N	111
3	Caractéristiques du sable jaune 0/2 mm	113
4	Composition chimique des cendres volantes de biomasse venant de plusieurs espèces de bois [Ban & Ramli, 2011]	115

5	Essai au pycnomètre à gaz de la chaux hydratée	116
6	Essai au pycnomètre à gaz du ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N	117
7	Essai au pycnomètre à gaz des cendres volantes de biomasse	118
8	Production et utilisation des produits de combustion du charbon en 2016	119

Table des figures

1	Part des énergies renouvelables dans la production mondiale d'électricité en 2016 [EDF, 2017]	1
2	Part de la combustion de la biomasse par rapport aux autres sources d'énergie renouvelable [WattElse, 2019]	1
3	Évolution des productions par filières en GWh [Expresso, 2019]	2
4	Cycle neutre du carbone (via le CO ₂) lors de la valorisation énergétique de la biomasse [IBGE, 2009]	3
5	Composition des différents types de ciment [Wikipedia, 2020a]	12
6	Risques de fissuration en fonction du type de retrait [Wienerberger, 2020]	15
7	Efflorescences sur le mortier d'enduit [Wikipedia, 2020a]	17
8	Mode de fonctionnement d'une centrale électrique à charbon [Electrabel, 2016]	19
9	Évolution de la production de charbon des cinq principaux États de 1980 à 2012. [Wikipedia, 2020e]	20
10	Production de cendres volantes en Europe en 2002 et 2016 [Ecoba, 2016, Ayrinhac, 2008]	22
11	Voies de valorisation de la cendre volante en génie civil en Europe en 2002 et 2016 [Ecoba, 2016, Ayrinhac, 2008]	23
12	Gisement des déchets d'origine industrielle en Wallonie [Wallonie, 1995]	24
13	Évolution de la quantité totale des déchets générés par la production d'électricité de 1995 à 2004 [ICEDD, 2007]	25
14	Deux types de combustible : la lignite et l'antracite [Wikipedia, 2020a]	26
15	Terril de Saint-Antoine à Boussu-Bois abandonné [Wikipedia, 2020b]	29
16	Localisation du terril du Hénâ [Lognay et al., 2017]	30
17	Liste chronologique des normes françaises et européennes concernant des produits ou usages avec cendres volantes de charbon [Sow, 2016]	32
18	Étalement du mortier frais en fonction de la teneur en cendres volantes [Balakrishnan et al., 2017]	34
19	Teneur en air en fonction du taux de substitution des cendres volantes [Chindaprasirt et al., 2005]	35
20	Cubes de mortier avec différentes quantités de cendres volantes [Balakrishnan et al., 2017]	36
21	Résistance en compression du mortier durci contenant différents taux de substitution de cendres volantes et à différents temps de durcissement [Balakrishnan et al., 2017]	37
22	Porosité à l'eau après 1 et 3 mois de cure [Sow, 2016]	38
23	Évolution de la porosité entre 1 et 3 mois [Sow, 2016]	39
24	Carbonatation des éprouvettes après pulvérisation à la phénolphthaléine [Sow, 2016]	40
25	Profondeur de carbonatation après 3 mois de cure [Sow, 2016]	41
26	Différents types de biomasse [Wikipedia, 2020c]	44
27	Seuils des comportements à la lixiviation pour l'enfouissement [Boulday & Marcovecchio, 2016]	47
28	Proportions des mélanges des différents mortiers [Rajamma et al., 2015]	49
29	Demande en eau de la pâte de mortier en fonction du taux de substitution des cendres volantes de biomasse [Rajamma et al., 2015]	50
30	Étalement de la pâte de mortier en fonction du taux de substitution des cendres volantes de biomasse [Zhao et al., 2018]	51
31	Évolution de la température pendant l'hydratation de la pâte de ciment [Rajamma et al., 2015]	52
32	Résistance en compression du mortier durci en fonction du taux de substitution des cendres volantes de biomasse [Zhao et al., 2018]	53
33	Résistance en flexion du mortier durci en fonction du taux de substitution des cendres volantes de biomasse [Zhao et al., 2018]	54
34	Absorption d'eau (water absorption) en fonction de la teneur en cendres volantes de biomasse (WWA content) dans le mortier [Esteves et al., 2012]	55
35	Expansion du mortier à 14 et 28 jours [Esteves et al., 2012]	56
36	Répartition granulométrique des cendres volantes et du ciment utilisés dans les mortiers	61
37	Schéma récapitulatif des échantillons réalisés	62

38	Photos échantillons A-1	63
39	Photos échantillons A-2	65
40	Photos échantillons B-1a	67
41	Photos échantillons B-1b	68
42	Photos échantillons B-2	70
43	Étapes de réalisation des échantillons de mortier	71
44	Pycnomètre au gaz [Directindustry, 2020]	72
45	Étapes de réalisation du test au mini-cône	73
46	Étapes de mesure de la masse volumique du mortier à l'état frais	74
47	Essai de flexion sur le mortier durci	75
48	Essai de compression sur le mortier durci	75
49	Essai de porosité	76
50	Étalement en fonction du pourcentage de cendres volantes	78
51	Comparaison des étalements en fonction du pourcentage de cendres volantes	79
52	Masse volumique à l'état frais en fonction du pourcentage de cendres volantes	79
53	Comparaison des masses volumiques à l'état frais en fonction du pourcentage de cendres volantes	80
54	Masse volumique après 7 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes	81
55	Comparaison des masses volumiques après 7 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes	82
56	Résistance en compression après 7 jours, 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes	83
57	Résistance en flexion après 7 jours, 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes	85
58	Comparaison des résistances en compression après 7 jours, 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes	87
59	Comparaison des résistances en flexion après 7 jours, 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes	89
60	Comparaison des porosités et des absorptions d'eau par immersion après 28 jours de durcissement des mortiers avec cendres volantes	91
61	Rapport E/L en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse	93
62	Comparaison du rapport E/L en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse . . .	94
63	Masse volumique à l'état frais en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse . .	94
64	Comparaison des masses volumiques à l'état frais en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse	95
65	Masse volumique après 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse	96
66	Comparaison des masses volumiques après 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse	97
67	Résistance en compression après 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse pour le mortier d'enduit, le mortier de maçonnerie et le mortier bâtard	98
68	Résistance en flexion après 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse pour le mortier d'enduit, le mortier de maçonnerie et le mortier bâtard	100
69	Comparaison des résistances en compression après 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse	101
70	Comparaison des résistances en flexion après 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse	102

71	Comparaison des porosités et des absorptions d'eau par immersion après 28 jours de durcissement des mortiers de maçonnerie et d'enduit	104
----	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Liste des tableaux

1	Proportions d'un mortier ciment (%masse) [Chama, 2015]	9
2	Quantités de cendres volantes et de mâchefers produits par des centrales électriques [Wallonie, 1995]	24
3	Exigences relatives aux cendres volantes siliceuses [Taerwe, 2018]	27
4	Compositions chimiques des cendres volantes [Taerwe, 2018]	28
5	Demande en eau en fonction du taux de substitution des cendres volantes [Chindapasirt et al., 2005]	33
6	Temps de prise en fonction du taux de substitution des cendres volantes [Chindapasirt et al., 2005]	36
7	Production de cendres de biomasse en 2014 et 2020 [Boulday & Marcovecchio, 2016]	42
8	Retrait des échantillons de béton en fonction du taux de substitution et du temps de durcissement [Ban & Ramli, 2011]	57
9	Caractéristiques chimiques des sables	59
10	Caractéristiques chimiques des ciments	60
11	Caractéristiques chimiques des cendres volantes	60
12	Composition des mortiers avec des cendres volantes de charbon	63
13	Composition des mortiers avec des cendres volantes de biomasse	64
14	Composition des mortiers de maçonnerie avec des cendres volantes de biomasse	66
15	Composition des mortiers d'enduit avec des cendres volantes de biomasse	68
16	Composition des mortiers bâtards avec des cendres volantes de biomasse	69
17	Résultats pycnomètre au gaz	77
18	Perte d'ouvrabilité par rapport au mortier de référence en fonction du taux de substitution du ciment par des cendres volantes	78
19	Perte de résistance en compression en fonction du pourcentage de substitution des cendres volantes	84
20	Perte de résistance en flexion en fonction du pourcentage de substitution des cendres volantes	86
21	Gain de résistance en compression en fonction du temps de durcissement	88
22	Gain de résistance en flexion en fonction du temps de durcissement	90
23	Absorption d'eau par immersion et porosité apparente après 28 jours de durcissement du mortier avec cendres volantes de charbon	90
24	Absorption d'eau par immersion et porosité apparente après 28 jours de durcissement du mortier avec cendres volantes de biomasse	91
25	Perte de résistance en compression en fonction du pourcentage de substitution des cendres volantes de biomasse	99
26	Perte de résistance en flexion en fonction du pourcentage de substitution des cendres volantes de biomasse	101
27	Gain de résistance en compression en fonction du temps de durcissement	102
28	Gain de résistance en flexion en fonction du temps de durcissement	103
29	Absorption d'eau par immersion et porosité apparente après 28 jours de durcissement du mortier d'enduit	103
30	Absorption d'eau par immersion et porosité apparente après 28 jours de durcissement du mortier de maçonnerie	104

Nomenclature

Dans le cadre de ce travail de fin d'étude, certains termes sont écrits de manière simplifiée :

- **H** : Humidité relative ;
- **CVB** : Cendres volantes de biomasse ;
- **CVC** : Cendres volantes de charbon (ou classiques) ;
- **S** : Sable normalisé ou sable jaune naturel suivant l'échantillon dont il s'agit ;
- **E** : Eau du robinet de l'Université de Liège ;
- **C** : Ciment CEM I 52,5 N ou CEM II/B-M (S-V) 32,5 N suivant l'échantillon dont il s'agit ;
- **L** : Liants représentés par le ciment CEM I 52,5 N ou CEM II/B-M (S-V) 32,5 N, les cendres volantes de charbon ou de biomasse et la chaux hydratée suivant l'échantillon dont il s'agit.

Première partie

Introduction générale

Les bioénergies sont une source d’énergie renouvelable issue de déchets ménagers organiques, de déchets de bois ou d’autres composants solides. En 2016, 2 % de la production mondiale d’électricité est obtenue à partir des bioénergies renouvelables, soit 504 TWh. En comparaison, la production mondiale d’électricité obtenue à partir de l’énergie solaire photovoltaïque s’élève à 303 GW (FIGURE 1).

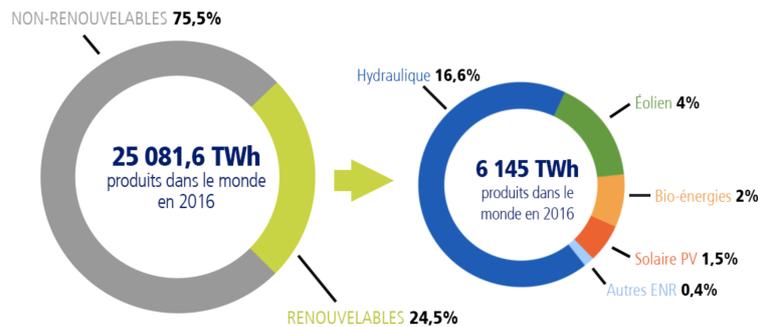


FIGURE 1 – Part des énergies renouvelables dans la production mondiale d’électricité en 2016 [EDF, 2017]

La biomasse est de la matière organique d’origine végétale, animale, bactérienne ou fongique. En Wallonie, la biomasse se trouve sous la forme de betteraves, des céréales, du chanvre, du colza, du bois ou encore des déchets organiques. La biomasse est une ressource énergétique durable et locale qui permet à la Wallonie de se séparer des produits pétroliers. La biomasse permet de produire de la chaleur, de l’électricité ou encore du biogaz. Depuis 2003, la biomasse est la première source d’énergie renouvelable en Wallonie. Fin 2018, l’APERe estime que la part de production d’origine renouvelable dans la consommation finale d’électricité est d’environ 19 %. Aujourd’hui, la biomasse permet de produire près de 40 % de l’électricité renouvelable et plus de 95 % de la chaleur renouvelable (FIGURE 2) [WattElse, 2019, Expresso, 2019, Wikipedia, 2020c] .

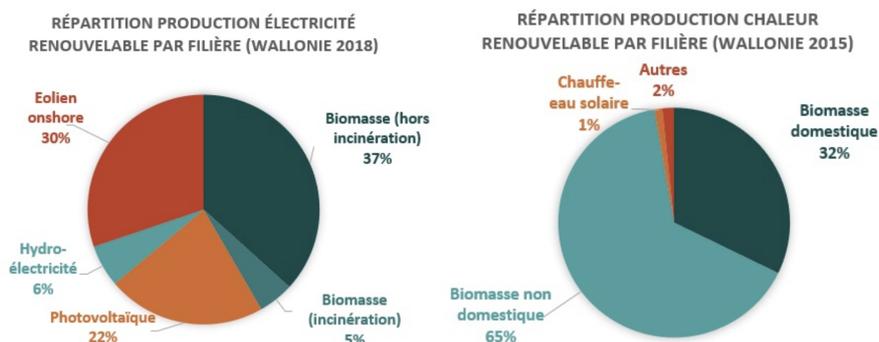


FIGURE 2 – Part de la combustion de la biomasse par rapport aux autres sources d’énergie renouvelable [WattElse, 2019]

Les matériaux biomassés sont de plus en plus fréquents dans l’industrie de la construction. Plusieurs exemples [Uliège, 2020] :

- Des briques de terre comprimée (BTC) sont réalisées en utilisant des coques de noix de palme ou des coques de fruits noirs comme agrégats dans le matériau terre. Les coques de noix de palme consti-

tuent des sous-produits agricoles qui sont abondants en Afrique et en Asie. Ces coques sont également utilisées comme agrégats dans les bétons légers.

- La fabrication du béton végétal est une technique très répandue. Le béton végétal est généralement utilisé pour remplir l'espace entre les parois d'une ossature bois. Le béton végétal peut également être utilisé pour augmenter les performances énergétiques d'un bâtiment. Lorsque la chènevotte, l'intérieur de la tige de chanvre, est mélangée à un liant à base de chaux, le béton obtenu présente une porosité ouverte avec des performances thermiques intéressantes. Le béton de chanvre est d'ailleurs commercialisé depuis de nombreuses années. Les copeaux de bois peuvent également être récupérés pour la fabrication de béton végétal. Lorsque les copeaux de bois et le ciment sont mélangés, le béton obtenu est plus léger que le béton traditionnel.
- La paille est également considérée comme un matériau de construction. En Belgique, la construction en paille est étudiée depuis une dizaine d'années. La paille, qui est constituée de tiges de certaines graminées comme le blé, l'orge, l'avoine et le seigle, est un co-produit de la production de céréales. La paille peut être utilisée sous forme de bottes comme matériau de remplissage d'une structure porteuse en bois. La paille peut également être utilisée pour remplir des caissons préfabriqués qui sont assemblés rapidement sur place.

Les sous-produits agricoles permettent généralement d'obtenir un matériau de construction plus léger, durable, à moindre coût, tout en ne réduisant pas la performance mécanique [Uliège, 2020].

Comme on peut le voir à la FIGURE 2, environ 5 % de la production d'électricité renouvelable en Wallonie vient de la biomasse d'incinération. En Belgique, la production d'énergie renouvelable ne cesse d'augmenter depuis 2005 (FIGURE 3). Chaque année, l'énergie produite à partir de la biomasse d'incinération augmente progressivement. En effet, une des alternatives pour la gestion des déchets de biomasse est l'incinération. Étant donné l'augmentation croissante de la production de déchets, le nombre d'incinérateurs dans les pays développés devrait augmenter, ce qui implique également une augmentation de la quantité de cendres volantes de biomasse. Malgré le fait qu'environ 46 % des cendres des incinérateurs de déchets en Europe soient réutilisées, il reste encore des milliards de tonnes qui doivent être traitées pour éviter des problèmes environnementaux futurs [Garcia-Lodeiro et al., 2016, Expresso, 2019].

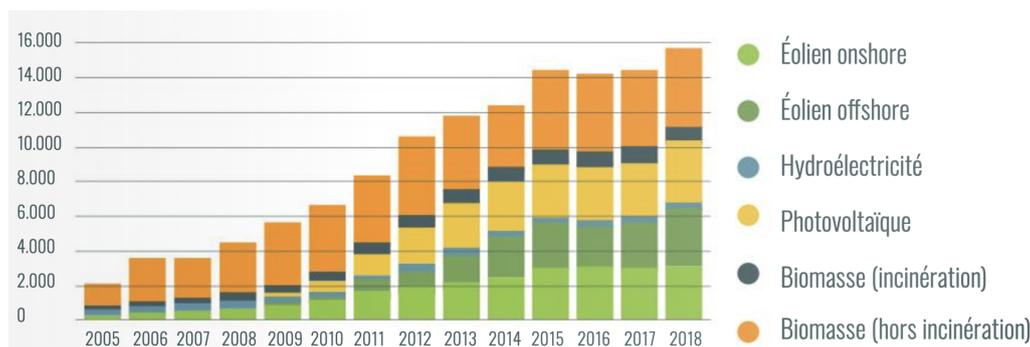


FIGURE 3 – Évolution des productions par filières en GWh [Expresso, 2019]

Les cendres volantes de biomasse sont des résidus, principalement basiques, de la combustion, de l'incinération, de la pyrolyse de diverses matières organiques et minérales végétales, naturelles et non-fossiles (bois, végétaux). La proportion de cendres sous foyer et 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 200 000 t en France, soit 1 500 à 4 000 kt en Europe. Ces valeurs devraient s'élever jusqu'à 300 à 600 kt en France et 2 800 à 5 500 kt en Europe

d'ici la fin de l'année 2020 [Boulday & Marcovecchio, 2016].

La combustion de la biomasse ou la co-combustion de la biomasse avec le charbon présente de nombreux avantages et inconvénients [Zhao et al., 2018, Garcia-Lodeiro et al., 2016, Garg & Pundir, 2012] :

Avantages :

- Elle permet de diminuer la consommation de charbon ;
- Elle permet de réduire les émissions mondiales de CO_2 (FIGURE 4) ;
- La biomasse est disponible partout et en grande quantité ;
- Les cendres volantes de biomasse permettent d'améliorer les performances mécaniques et de durabilité du mortier. En effet, ces cendres ont un effet de remplissage en comblant les vides dans la structure de mortier rendant le mélange plus compact ;
- Les cendres volantes peuvent être utilisées en grand volume et combinées avec d'autres déchets industriels comme le phosphogypse et les boues de chaux dans les matériaux de construction. Cette association contribue énormément à la protection de l'environnement et à la diminution des risques de pollution et de santé qu'ils produisent.

Inconvénients :

- Le stockage de cendres volantes de biomasse, résultant de la combustion de la biomasse, occupe une superficie importante ;
- Le stockage de cendres volantes de biomasse augmente le risque de contamination des eaux souterraines ;
- Les cendres volantes de biomasse doivent être prétraitées pour éliminer ou contrôler leur teneur en métaux lourds et ainsi éviter des concentrations indésirables de tels éléments.

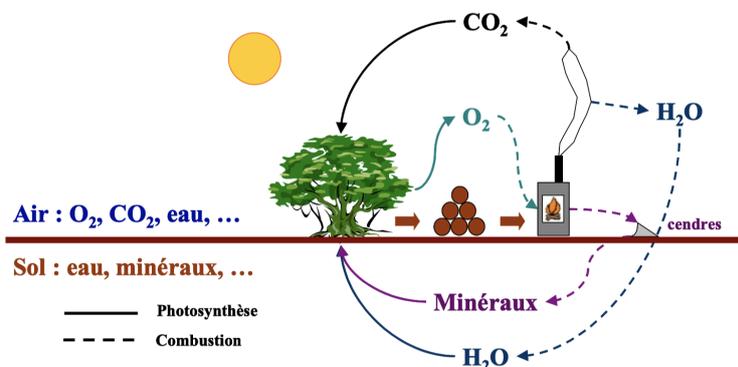


FIGURE 4 – Cycle neutre du carbone (via le CO_2) lors de la valorisation énergétique de la biomasse [IBGE, 2009]

Actuellement, les cendres volantes de biomasse sont utilisées à plusieurs fins telles que le contrôle de la pollution atmosphérique et la fertilisation dans l'agriculture. Cependant, la quantité de cendres volantes de biomasse ne cesse d'augmenter et leur stockage devient compliqué à gérer. D'un autre côté, la consommation du ciment Portland doit être réduite. La production de ce type de ciment consomme beaucoup d'énergie, détruit l'environnement écologique et nous apporte un sérieux effet de serre. Afin de remédier à ces problèmes, de nombreuses recherches se sont penchées sur le sujet afin d'étudier quels seraient les effets sur le mortier ou le béton si une partie du ciment qui les compose était substitué par des cendres volantes de biomasse. L'objectif est de définir une relation entre différents pourcentages de substitution du ciment par les cendres volantes de biomasse et de déterminer les propriétés physiques, chimiques et mécaniques du mortier et du béton associées

[Garg & Pundir, 2012, Zhao et al., 2018].

L'organisation du TFE est la suivante :

Première partie :

Cette partie concerne l'introduction générale. Elle permet d'introduire les principaux concepts abordés dans ce travail de fin d'étude.

Deuxième partie :

Cette partie concerne l'état de l'art. Elle a pour objectif de rappeler les connaissances théoriques essentielles à la bonne compréhension de ce travail de fin d'étude. Tout d'abord, ce chapitre aborde la notion de mortier, ses composants et les différents types de mortiers qui existent. Ensuite, le cas particulier des mortiers d'enduit et des mortiers de maçonnerie est étudié, suivi par l'utilisation des cendres volantes de charbon et des cendres volantes de biomasse dans les mortiers et les bétons. Ce chapitre se termine par la problématique au coeur de ce travail de fin d'étude.

Troisième partie :

Cette partie concerne le programme de recherches expérimental. Tout d'abord, les différents matériaux utilisés pour la réalisation des différents mortiers seront détaillés. Ensuite, la composition et la réalisation des différents mélanges seront expliquées. Ce chapitre se termine par une description des tests réalisés sur les différents mortiers afin de déterminer le pourcentage de substitution maximum envisageable du ciment par des cendres volantes.

Quatrième partie :

Cette partie concerne l'analyse des résultats. Dans cette partie, tous les résultats des différents tests effectués dans le programme de recherches expérimentales seront présentés et analysés. L'objectif est de trouver des explications plausibles aux résultats qui découlent des essais.

Conclusion :

Cette partie concerne la conclusion et les recommandations à retenir de ce travail de fin d'étude. Cette partie tente d'expliquer l'influence des cendres volantes de biomasse dans les mortiers et de déterminer le taux de substitution maximale envisageable. L'objectif est également de recommander de nouvelles études pour permettre à d'autres chercheurs d'approfondir le sujet à l'avenir.

Deuxième partie

État de l'art

1 Mortiers

1.1 Composition

Le mortier est un matériau de construction qui est fabriqué en mélangeant un liant, des agrégats fins et de l'eau. Celui-ci est généralement utilisé en maçonnerie comme un élément de liaison, un scellement ou un enduit [Wikipedia, 2020a].

Lors de la fabrication du mortier, il est nécessaire de suivre certaines règles simples. Plusieurs normes sont disponibles afin de réaliser convenablement les échantillons de mortier, comme par exemple :

- La norme NF EN 197-1 aborde la composition, les spécifications et les critères de conformité du ciment utilisé dans les mortiers ;
- La norme NF EN 196-1 aborde la procédure d'échantillonnage des mortiers ainsi que les tests de résistance mécanique ;
- La norme NF EN 998 définit et spécifie les différents mortiers pour la maçonnerie et les enduits minéraux extérieurs et intérieurs.

Les différents composants du mortier sont [Chama, 2015] :

- Ciment :
Les ciments utilisés pour le mortier doivent être de bonne qualité. Celle-ci peut être améliorée par le mode de stockage du ciment et sa durée de conservation. Les ciments doivent être stockés hors du sol dans un environnement sec et préservé de l'humidité. L'environnement chargé d'humidité affecte la durée de conservation du ciment. Le ciment a une durée de conservation limitée, il ne faut donc pas l'utiliser quand il est devenu grumeleux.
- Eau :
L'eau utilisée lors de la fabrication des mortiers doit être fraîche, propre et libérée de ses impuretés. De manière générale, si l'eau est potable, elle convient à la fabrication du mortier.
- Sable :
Le composant d'agrégat fin du mortier est le sable d'agrégat. Plusieurs types de sables sont utilisés, du sable grossier au sable fin, en fonction de l'environnement de liaison ou de l'utilisation. Le sable utilisé pour le mortier doit également être libéré de ses impuretés qui pourraient nuire à sa fonctionnalité.

D'autres matériaux peuvent également être utilisés, tels que [Chama, 2015] :

- Chaux hydratée :
La chaux hydratée est utilisée pour rendre le mortier plus crémeux ou plus maniable et durable. Au niveau de la durabilité, la chaux hydratée est perméable à l'air mais elle est imperméable à l'eau et protège le mortier des intrusions chimiques qui pourraient le détériorer. La chaux hydratée est saine et permet, dans les endroits humides, d'empêcher la prolifération des moisissures. La chaux hydratée est ignifuge, c'est-à-dire qu'elle permet d'augmenter la résistance au feu du mortier dans lequel elle est incorporée. Au niveau de la maniabilité, lorsque la chaux hydratée est ajoutée à la pâte de ciment, elle permet de retarder considérablement le temps de prise. Le mortier frais ainsi obtenu peut être utilisé plus longtemps que du mortier de ciment. La chaux hydratée est composée d'oxyde ou d'hydroxyde de calcium. Ces éléments aident à réduire les fissures lors du séchage du mélange.
- Chaux hydraulique :
La chaux hydraulique est généralement utilisée dans la construction pour la maçonnerie des cheminées ou certaines structures légèrement chargées dans les bâtiments. Généralement, le mortier réalisé avec

de la chaux hydraulique ne convient pas lorsqu'il est exposé à l'humidité.

La qualité du mortier est d'une importance primordiale dans tous les murs de briques ou de blocs car il sert à lier toutes les unités ensemble et donc à supporter le poids soutenu par le mur et scelle les joints afin de fournir un mur résistant aux intempéries [Chama, 2015].

1.2 Mortier prêt à l'emploi vs mortier préparé sur chantier

Sur chantier, le mortier peut se trouver selon deux formes : préparé sur chantier ou directement prêt à l'emploi. Les deux solutions ont leurs avantages et leurs inconvénients [Wienerberger, 2020] :

Mortier préparé sur chantier :

Ce type de mortier est déjà préparé mais il est toujours sous forme de poudre. Il suffit alors sur chantier de mélanger cette poudre avec de l'eau pour obtenir le mortier frais. La poudre de mortier et l'eau devront quand même être mélangées correctement avant utilisation. Le mélange sec de mortier sera livré dans des silos.

Les avantages et les inconvénients de cette forme de mortier sont les suivants [Wienerberger, 2020] :

- Ces mortiers sont préparés en usine et permettent d'obtenir un mélange homogène et régulier. Le ciment, le sable et les adjuvants éventuels sont parfaitement dosés ;
- Le mortier préparé sur chantier est tout près et permet de ne pas devoir doser soi-même les différents constituants et risquer de se tromper dans la formulation chimique du mortier. Tous les sacs sont dosés identiquement ;
- Il est possible d'ajuster sa fluidité ;
- Il est possible d'ajouter des adjuvants supplémentaires à l'aide d'un doseur ;
- Contrairement au mortier prêt-à-l'emploi, il ne contient pas d'inhibiteurs de prise ;
- Il nécessite plus de main d'œuvre pour le fabriquer et génère une plus grande perte de temps comparé au mortier prêt-à-l'emploi ;
- Il génère moins de gaspillage des matières premières ;
- Il faut faire attention de bien ajouter la bonne quantité d'eau pour garantir une qualité optimale.

Mortier prêt-à-l'emploi :

Ce type de mortier est entièrement préparé en usine et tous les constituants sont déjà mélangés avant d'arriver sur chantier. Le mortier est livré sur chantier dans des bacs et est directement prêt-à-l'emploi. Des inhibiteurs de prise sont généralement ajoutés au mélange pour allonger le temps de prise.

Les avantages et les inconvénients de cette forme de mortier sont les suivants [Wienerberger, 2020] :

- Il ne nécessite aucun ajout. Il limite donc les risques d'erreurs sur l'ajout d'eau comme pour les mortiers préparés sur chantier ;
- Il nécessite moins de main d'œuvre et est beaucoup plus rapide d'exécution ;
- Il génère plus de gaspillage de matière première ;
- Il n'est pas possible d'ajuster sa fluidité ;
- L'ajout d'adjuvants augmente le risque d'efflorescences.

1.3 Types de mortiers

Pendant plusieurs siècles, des mortiers à base de chaux ont été utilisés comme matériaux de liaison dans les monuments. La chaux aérienne était couramment utilisée et les caractéristiques finales des mortiers dépendaient fortement de la civilisation. En conséquence, une grande variété de mortiers se trouve désormais dans les bâtiments historiques. De nos jours, ces mortiers traditionnels ont été remplacés par des mortiers au ciment [Rajamma et al., 2015].

Plusieurs types de mortiers existent, tels que [Rajamma et al., 2015] :

- Le mortier de terre ;
- Le mortier de chaux grasse ;
- Le mortier de chaux hydraulique ;
- Le mortier de plâtre ;
- Le mortier de ciment Portland ;
- Le mortier bâtard.

Dans le cadre de ce travail, seulement deux types de mortiers sont étudiés : le mortier de ciment Portland et le mortier bâtard.

Le mortier de ciment Portland :

Celui-ci contient du ciment Portland conforme à la norme européenne EN 197-1. En variant le rapport L/S (Liant/Sable), différents types de mortiers peuvent être obtenus.

Les avantages et les inconvénients de ce type de mortier sont les suivants [Chama, 2015] :

- Il permet d'obtenir des résistances élevées comme pour la construction de piliers ou de murs supportants des charges lourdes ;
- Il permet d'obtenir un degré d'imperméabilité élevé ;
- Les problèmes de retrait sont généralement plus importants que pour les mortiers bâtards ;
- Il est plus difficile à mélanger et à travailler que les mortiers bâtards.

Les mortiers à base de ciment ont donc remplacé les mortiers à base de chaux pour les raisons suivantes [Arandigoyen & Alvarez, 2007] :

- Leur temps de prise plus rapide ;
- Leur résistance mécanique plus élevée ;
- Leur développement industriel avancé ;
- Leur coût abordable.

Cependant, malgré leur large utilisation en génie civil, les mortiers à base de ciment se sont révélés présenter des inconvénients majeurs en tant que mortiers de réparation pour la restauration du patrimoine culturel [Arandigoyen & Alvarez, 2007] :

- Ils présentent une grave incompatibilité avec les vieilles pierres ;
- Ils ont une teneur élevée en sel, ce qui peut endommager la pierre par des cycles de cristallisation et/ou d'hydratation ;
- Ils se sont avérés avoir une faible flexibilité, contrairement aux mortiers à base de chaux, ce qui entrave l'accommodation du mouvement résultant du fluage ou des effets thermiques.

Ces derniers temps, les interventions de restauration effectuées à l'aide de mortiers de ciment ont provoqué des défaillances importantes et une accélération des dommages aux monuments, ce qui conduit à conclure que les mortiers à base de ciment ne conviennent pas, car ils sont incompatibles avec les bâtiments historiques [Arandigoyen & Alvarez, 2007].

Le mortier bâtard :

L'étude des différents matériaux de liaison a été réalisée en réponse aux objections signalées à la fois aux mortiers de chaux et de ciment. Ces matériaux devraient avoir les caractéristiques suivantes [Arandigoyen & Alvarez, 2007] :

- La compatibilité chimique entre le mortier de réparation et les anciens matériaux (pierre ou brique et leur mortier de lièvre) ;
- La compatibilité physique, avec une référence particulière aux processus de solubilité et de transport de l'eau ;

— La compatibilité structurelle et mécanique avec les matériaux, pierres et mortiers anciens.

Une étude précédente indique spécifiquement qu'un mortier de rejointoiement doit être considérablement plus faible que la pierre, et doit se déformer considérablement avant la rupture [Arandigoyen & Alvarez, 2007].

Ce type de mortier contient du ciment, de la chaux hydraulique et du sable dans des proportions qui dépendent des exigences du travail [Courard, 2019, Chama, 2015] :

$$1 \text{ Volume (Ciment)} + 1 \text{ Volume (Chaux hydratée)} + 6 \text{ Volumes (Sable)} \quad (1)$$

Ces proportions satisfont la plupart des travaux. Ce mélange comprend 1 partie de chaux hydratée, 1 partie de ciment et 6 parties de sable en volume.

D'autres mélanges peuvent également être utilisés. Par exemple, si le travail demande une meilleure ouvrabilité, il suffit de réduire la quantité de ciment et d'augmenter la quantité de chaux hydraulique. Par exemple,

$$1 \text{ Volume (Ciment)} + 2 \text{ Volumes (Chaux hydratée)} + 9 \text{ Volumes (Sable)}$$

Les avantages et les inconvénients du mortier bâtard sont les suivants

[Courard, 2019, Chama, 2015, Arandigoyen & Alvarez, 2007] :

- Il permet d'obtenir une bonne ouvrabilité ;
- Il permet d'obtenir une résistance précoce. Cependant, les mortiers de chaux présentent des résistances plus faibles que les mortiers de ciment et mettent plus de temps à les atteindre ;
- Il augmente le temps de prise du mortier ;
- Il permet de réduire le retrait du mortier produit ;
- Il permet de réduire les inconvénients présentés par les mortiers à base de chaux et les mortiers à base de ciment ;
- Il permet d'obtenir un mortier plus élastique. Ces mortiers ont une grande zone plastique, ce qui pourrait être utile dans la durée de vie de ces mortiers en raison de leur capacité à absorber les contraintes causées par les mouvements des murs ;
- Il ne convient pas pour les travaux dans les zones humides.

La chaux hydraulique contient de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer en petites proportions. Lorsque l'eau et la chaux hydraulique sont mélangées, la chaux forme un mastic qui durcit sous l'eau. Dans ce type de mortier, le sable permet de réduire le retrait du mortier durci [Chama, 2015].

Un mélange composé uniquement d'un liant, d'eau et d'adjuvants s'appelle un coulis. Il s'agit d'un mortier de ciment fluide qui est utilisé afin de combler les vides et les joints ou pour réparer les fissures lors des travaux de maçonnerie. Ce type de mortier peut également être utilisé afin d'améliorer la capacité portante du sol. Le mortier est injecté pour remplir les fissures formées suite à la prise et le durcissement du béton. Dans ce cas, le rapport E/C (Eau / Ciment) doit être petit afin d'augmenter la résistance et diminuer le retrait. Le mortier de coulis ne s'applique pas de la même façon qu'un mortier ordinaire, il est coulé au lieu d'être étalé à la truelle [Chama, 2015].

Un mélange composé d'un liant, d'eau, d'agrégats et d'adjuvants s'appelle du béton. Ces agrégats sont généralement du sable, des cailloux et des gravillons. Le béton, le mortier et le coulis sont des matériaux différents. On peut considérer les coulis et les mortiers comme des cas particuliers du béton [Chama, 2015].

2 Mortier d'enduit et mortier de maçonnerie

2.1 Définition

Lors de la fabrication du mortier, il est indispensable d'utiliser les bons matériaux et de choisir le bon rapport de mélange qui donnera le mortier désiré.

Selon le mortier désiré, les proportions des composants varient. La TABLE 1 ci-dessous donne les proportions des différents composants en fonction du mortier souhaité [Chama, 2015] :

Type de mortier	Ciment	Sable
Maçonnerie	1	4-5
Enduit (intérieur)	1	4
Enduit (extérieur)	1	5-6

TABLE 1 – Proportions d'un mortier ciment (%masse) [Chama, 2015]

Mortier de maçonnerie :

Les travaux de maçonnerie sont réalisés en combinant des briques avec un mortier qui joue le rôle d'agent de liaison [Balakrishnan et al., 2017]. Le mortier de maçonnerie est défini comme une pâte obtenue en mélangeant [Chama, 2015] :

- Eau
- Mélange de granulats fins
- Liant : Argile, gypse, chaux, ciment, ou une combinaison de plusieurs d'entre eux.

Le matériau obtenu est capable de prendre et de durcir [Chama, 2015].

Le mortier de maçonnerie est l'un des matériaux de construction le plus utilisé dans la construction car tous les murs en briques sont finis avec du mortier. Les travaux de maçonnerie avec du mortier sont généralement réalisés avec du ciment, du sable et de l'eau [Balakrishnan et al., 2017].

L'utilisation du mortier dans les travaux de construction a été le fondement de la civilisation ancienne. A l'époque, les mélanges étaient simplement préparés en utilisant la combinaison de chaux, de sable et d'eau. La chaux à base de mortier a été remplacée par l'invention du ciment Portland au XIX^e siècle. Ce remplacement est principalement dû aux propriétés améliorées du mortier que le ciment Portland peut apporter [Balakrishnan et al., 2017].

Le mortier de maçonnerie a plusieurs objectifs à remplir [Balakrishnan et al., 2017, Chama, 2015] :

- Il doit être esthétique ;
- Il doit protéger la structure intérieure de la pénétration de l'air, de l'eau ou des éléments chimiques dans un ensemble de maçonnerie ;
- Il doit aider à supporter le poids placé sur le mur ;
- Il doit sceller les joints pour fournir un mur résistant aux intempéries.

Un bon mortier est d'une importance vitale dans tous les murs de briques ou de blocs car il lie les unités ensemble.

Dans le monde, les travaux de maçonnerie sont très fréquents. Par exemple, l'utilisation de la maçonnerie est le mode de construction principal en Thaïlande ainsi que dans les pays voisins. La plupart des murs de buildings

ou des maisons résidentielles sont réalisés en maçonnerie, faits de briques d'argile brûlée ou de blocs de béton, avec enduit des deux côtés [Chindaprasirt et al., 2005].

Mortier d'enduit :

A l'époque, un enduit désignait la deuxième couche réalisée avec du plâtre fin passé au tamis de crin ou sas sur une première couche qu'on nomme toujours aujourd'hui, le crépi.

Dans le domaine de la construction, un enduit est une couche de mortier qui est appliquée sur un mur ou en extérieur sur le manteau d'isolation de ce mur. Cet enduit peut aussi se trouver sous la forme de crépi qui est un enduit qui se fait sur une muraille avec du mortier ou du plâtre et qu'on laisse avec du relief au lieu de le rendre lisse.

Généralement, les enduits sont d'origine minérale tels que :

- Des mortiers de ciment ;
- Des mortiers de chaux ;
- Des plâtres.

Les enduits sont composés d'un liant (la chaux, le plâtre, le ciment Portland ou l'argile) et de charges minérales (les agrégats, ou les granulats). L'ajout de pigments colorés n'est pas indispensable et varie en fonction de l'effet recherché.

Habituellement, l'enduit de chaux est préféré à l'enduit de ciment pour ses qualités propres telles que :

- L'enduit de chaux permet aux murs de respirer et de travailler ce qui évite les fissures ;
- L'enduit de chaux possède des propriétés assainissantes ;
- L'enduit de chaux dispose de textures qui donnent un aspect chaleureux aux surfaces qu'il recouvre ;
- L'enduit de chaux permet d'obtenir des couleurs très variées. Ces couleurs dépendent des granulats employés et également des pigments que l'on peut y ajouter lorsque le sable utilisé est un sable lavé.

Le mortier d'enduit a également plusieurs objectifs à remplir :

- Il doit être résistant mécaniquement ;
- Il doit être esthétique car il est visible sur une partie du mur ;
- Il doit être étanche mais perméable à la vapeur d'eau.

La plupart des travaux de construction déjà exécutés ou encore en cours de réalisation concernent l'enveloppe extérieure des bâtiments, la façade et les toitures. L'objectif est généralement d'intervenir pour récupérer les enduits endommagés et les remplacer par des enduits neufs [Wikipedia, 2020d].

De nombreux travaux ont été réalisés par des industries de produits de construction afin de développer et commercialiser de nouveaux produits prémélangés pour la préparation de mortiers de plâtrage. Malheureusement, les résultats obtenus ne se sont pas toujours révélés durables dans le temps. Les principales causes de dégradation pathologique rapide de ce type de revêtements sont les suivantes [Dessy et al., 2000] :

- L'incompatibilité entre le matériau de base et le mortier ;
- La mauvaise stratification du plâtre ;
- La mauvaise connaissance des techniques d'application du mortier.

2.2 Matériaux utilisés

2.2.1 Ciment

De nos jours, l'industrie cimentière possède un grand nombre de ciments. Chaque type de ciment présente des caractéristiques précises qui sont adaptées à des domaines d'emploi bien déterminés (FIGURE 5) [Infociments, 2005] :

- Ciments Portland CEM I (NF EN 197-1) :
Les ciments Portland sont composés de 95 % de clinker et de 5 % d'autres constituants secondaires. Ce ciment convient pour la fabrication du béton armé ou du béton précontraint grâce à sa résistance élevée. Il est également utilisé pour les travaux en milieu agressif, dans les eaux de mer ou les eaux sulfatées. Au vu de ses caractéristiques mécaniques, il n'est généralement pas utilisé pour de la maçonnerie ou des bétons faiblement armés. Il n'est pas utilisé pour les travaux d'ouvrage massif car la chaleur d'hydratation risque de conduire à une élévation de température importante lors de leur réalisation.
- Ciments Portland composés CEM II (NF EN 197-1) :
Les ciments Portland composés sont composés de 65 % de clinker et 35 % d'autres constituants tels que du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, des pouzzolanes ou de la fumée de silice. Ce ciment peut autant convenir pour les travaux de maçonnerie (CEM II 32,5) que pour la fabrication de béton, béton armé et béton précontraint (CEM II 42,5 ou CEM II 52,5). Contrairement au CEM I, les CEM II sont adaptés pour les travaux massifs exigeant une élévation de température modérée grâce à leur teneur en clinker plus faible.
- Ciments blancs (NF EN 197-1) :
Les ciments blancs sont des ciments de type CEM I ou CEM II où la teinte blanche est obtenue grâce à des matières premières très pures, comme le calcaire et le kaolin, qui sont exemptes d'oxyde de fer. Ce ciment est utilisé pour fabriquer des bétons de structure, des bétons architectoniques et des enduits décoratifs car il peut être coloré avec des pigments.
- Ciments comportant du laitier de haut fourneau (NF EN 197-1) :
Il existe trois types de ciments comportant des pourcentages de laitier importants : le ciment Portland au laitier CEM II/A-S ou B-S, le ciment de haut fourneau CEM III/A, B ou C et le ciment composé CEM V/A ou B. Ces ciments sont généralement utilisés pour des travaux hydrauliques en eaux agressives, en eaux de mer. Ils peuvent également être utilisés pour la construction d'ouvrages massifs comme des barrages ou des fondations. Cependant, ces ciments sont sensibles à la dessiccation et ne peuvent pas être utilisés pour les enduits.

Tous ces ciments ont cependant les mêmes exigences minimales de résistance en compression. La résistance en compression minimum après 7 jours de durcissement doit être comprise entre 10 et 14 MPa. La résistance en compression minimum après 28 jours de durcissement doit être comprise entre 30 et 50 MPa.

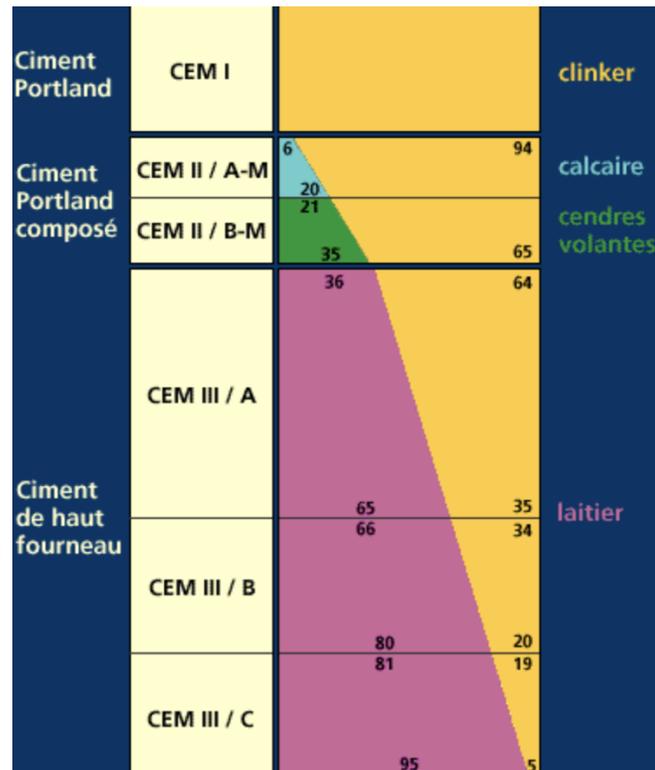


FIGURE 5 – Composition des différents types de ciment [Wikipedia, 2020a]

Lors de la fabrication de mortier de maçonnerie et d'enduit, les ciments mélangés sont préférés au ciment Portland normal pour les raisons suivantes [Chindaprasirt et al., 2005] :

- Les mélanges de mortier de ciment mixte présentent généralement une meilleure cohésion ;
- Les mélanges de mortier de ciment mixte ont un temps de prise/de travail plus long ;
- Les mélanges de mortier de ciment mixte coûtent moins cher que le ciment Portland.

Le ciment mixte correspond à un liant cimentaire fabriqué à partir de l'inter-broyage de clinker de ciment Portland avec environ 25 % d'un matériau inerte comme du sable à une finesse appropriée. Le sable étant essentiellement de la silice, ce type de ciment est parfois appelé ciment de silice [Chindaprasirt et al., 2005]. La plupart des fabricants de ciment, en Thaïlande par exemple, produisent commercialement un ciment mixte [Chindaprasirt et al., 2005].

Il existe également des ciments spécifiques pour la maçonnerie. L'utilisation de ce type de ciment dans la fabrication de mortier de maçonnerie est maintenant largement pratiquée. Les avantages et les inconvénients de ce type de ciment, comparés avec le ciment Portland classique, sont les suivants [Balakrishnan et al., 2017] :

- Il peut offrir une meilleure consistance plastique et de l'eau de manière rétentive offrant une ouvrabilité supérieure avec des fissures minimales ;
- Il est généralement capable de donner un bon écoulement ;
- Il génère peu de retrait ;
- Il crée une résistance satisfaisante. Il a une résistance inférieure à celle du mortier avec du ciment Portland mais cette résistance est supérieure à ce qui est réellement requis dans les applications de maçonnerie réelles ;
- Il permet d'améliorer les propriétés fraîches et durcies grâce à l'ajout d'additifs, tels que l'agent entraîneur d'air, et de sa faible teneur en clinker ;
- Il a une adhérence inférieure à celle obtenue avec le ciment Portland mais cette adhérence est supérieure

à ce qui est réellement requis dans les applications de maçonnerie réelles. Le mortier de maçonnerie a généralement un faible liant cimentaire en raison de la grande quantité de calcaire utilisée ;

- Il contient généralement moins de clinker que le ciment Portland ordinaire. Dans le mortier de ciment Portland ordinaire, une plus grande quantité de ciment hydraulique est disponible pour réagir immédiatement avec l'eau. Dans le ciment de maçonnerie, une partie du ciment Portland ordinaire est remplacé, par exemple, par des cendres volantes. Ces cendres ont des propriétés pouzzolaniques mais ne sont pas du ciment en soi. Elles contiennent néanmoins de la silice (et de l'alumine) sous une forme réactive ;
- Il est plus respectueux de l'environnement car il contient moins de clinker et utilise donc moins d'énergie lors de la fabrication.

2.2.2 Chaux hydratée

Dans certaines régions, le calcaire très présent remplace le sable pour la production de ciment mixte. La chaux apporte une certaine alcalinité et la blancheur du produit fini. En construction, la chaux possède de nombreuses fonctions [Chindaprasirt et al., 2005, Courard, 2019] :

- Flocculant, coagulant ;
- Réactif vis-à-vis des acides (CO_2) et des sels à caractère acide (SiO_2 , Al_2O_3) ;
- Plastifiant ;
- Liant aérien ;
- Agents de blanchiment.

Lorsque la chaux hydratée est utilisée dans la fabrication de mortier, elle apporte certains avantages et inconvénients [Chindaprasirt et al., 2005, Courard, 2019] :

- Elle permet d'améliorer l'ouvrabilité grâce à sa plasticité ;
- Elle permet d'améliorer la cohésion et l'adhésivité entre les briques de mortier grâce à sa plasticité et le remplissage des interstices ;
- Elle permet de rendre les joints plus souples grâce à sa flexibilité ;
- Elle permet de rendre le mortier plus imperméable grâce à la carbonatation et à l'augmentation du volume molaire ;
- Elle est n'est pas bon marché ;
- Tous les mélanges chimiques contenant de la chaux ne sont pas toujours disponibles.

En construction, la chaux est utilisée dans la stabilisation et l'assèchement des sols ou comme composants dans les ciments pouzzolaniques et les mortiers de maçonnerie et d'enduit.

2.2.3 Matériaux légers

Plusieurs matériaux légers peuvent être utilisés pour fabriquer des mortiers de maçonnerie ou d'enduit, tels que [Torres & García-Ruiz, 2009] :

- La perlite expansée ;
- Le verre expansé ;
- Les microsphères creuses ;
- Le polystyrène expansé.

Ces matériaux sont utiles pour améliorer la maniabilité et la capacité de couverture des mortiers, qui sont des caractéristiques importantes des enduits et des mortiers monocouches.

Il existe des différences et des similitudes notables entre les effets des granulats légers utilisés sur les mortiers. Par exemple, la perlite expansée et le polystyrène utilisés dans les mortiers permettent d'améliorer la

densité et sont capables d'augmenter la capacité de revêtement d'enduit dans le cas d'une surface couverte [Torres & García-Ruiz, 2009].

2.3 Propriétés du mortier à l'état frais

Les propriétés du mortier à l'état frais sont nécessaires pour garantir que l'application du mortier soit acceptable [Balakrishnan et al., 2017] :

Ouvrabilité :

L'ouvrabilité est l'une sinon la propriété la plus importante du mortier de maçonnerie et d'enduit. L'ouvrabilité est une combinaison de plusieurs caractéristiques du mortier comme la plasticité, la consistance et la cohésion. Cette caractéristique du mortier est évaluée par un maçon en observant le comportement, la réponse du mortier de maçonnerie et d'enduit à la truelle. Dans un laboratoire, l'ouvrabilité du mortier de maçonnerie et d'enduit peut être évaluée à l'aide de paramètres tels que la demande en eau, le débit et la rétention de l'eau [Chindaprasirt et al., 2005]. Le mortier doit être suffisamment plastique pour être mélangé et placé [Balakrishnan et al., 2017].

Temps de prise :

Le temps de prise est également un paramètre important pour le mortier de maçonnerie, en particulier dans un environnement tropical [Chindaprasirt et al., 2005].

2.4 Propriétés du mortier à l'état durci

Résistance mécanique :

Contrairement au béton, la résistance à la compression, à l'adhérence et à la flexion n'est souvent pas le principal facteur à considérer dans le mortier de maçonnerie et d'enduit [Chindaprasirt et al., 2005]. La résistance à la compression du mortier ne doit pas être surestimée car un mortier plus résistant pourrait ne pas être nécessaire pour la construction ou nécessairement meilleur pour l'unité de maçonnerie [Balakrishnan et al., 2017]. Les mortiers d'enduit et de maçonnerie doivent être résistants aux intempéries [Chama, 2015].

Comme expliqué précédemment, plusieurs types de mortiers existent, notamment des mortiers avec de la chaux, du ciment, ou un mélange des deux. Le comportement mécanique évolue en fonction des différents mélanges [Wikipedia, 2020a] :

— Le mortier de chaux hydraulique :

Ce type de mortier peut durcir, sous l'eau par exemple, où il n'a pas de contact direct avec l'air. Il est généralement utilisé dans la maçonnerie traditionnelle avec des pierres ou des briques. Le mortier de chaux est généralement plus flexible que le mortier de ciment. Il est également perméable à la vapeur d'eau et permet donc de réguler l'humidité ambiante des constructions. Par contre, ce type de mortier est plus technique et plus lent à mettre en œuvre. Il a besoin de conditions de température plus strictes que les mortiers de ciment.

— Le mortier de ciment :

Ce type de mortier est plus résistant que les mortiers de chaux. Par contre, le mortier de ciment est imperméable à l'air, conserve l'humidité et s'expose donc aux moisissures. Ce mortier ne peut être utilisé que pour la maçonnerie des blocs de béton. Ce type de mortier est rigide et a tendance à fissurer sous l'action des différences de température, notamment lors du phénomène de gel/dégel. Cependant, sa mise en œuvre est plus rapide, plus facile et avec moins de restrictions que le mortier de chaux.

— Le mortier bâtard :

Ce type de mortier respire d'avantage sans pour autant trop absorber l'eau. Il convient généralement

comme crépis car il ne fissure pas comme le mortier de ciment. La chaux contenue dans le mortier permet de le rendre plus collant, ce qui permet de l'utiliser comme enduit vertical. Plus le mortier bâtard contient du ciment, plus sa perméabilité à la vapeur d'eau diminue. Le mortier bâtard peut également être utilisé pour fixer des éléments de maçonnerie qui requièrent une résistance mécanique plus grande.

Retrait :

Le retrait est également une propriété importante [Chindaprasirt et al., 2005]. Dans le mortier, les réactions chimiques d'hydratation sont très compliquées. La quantité d'eau contenue dans la pâte et le rapport E/C jouent un rôle très important. Étant donné que le volume d'agglomérat percolant solide est inférieur à la somme des volumes individuels d'eau et de ciment, des cavités capillaires sont créées lors des réactions chimiques. Comme il faut de toute façon plus d'eau pour obtenir l'ouvrabilité désirée, les cavités capillaires se remplissent d'eau "interstitielle". Par la suite, cette eau peut s'évaporer et créer du retrait. Plus la quantité d'eau "interstitielle" est grande, plus la distance entre les grains de ciment augmente, plus la microstructure évolue moins vite et donc plus le mortier devient plus poreux. Plusieurs types de retrait existent [Wienerberger, 2020] :

- Retrait plastique : dû à l'évaporation de l'eau de gâchage en cours de prise ;
- Retrait de séchage : dû au départ d'eau après durcissement. Il est également appelé retrait hydraulique ou de dessiccation ;
- Retrait thermique : dû à la diminution de la température suite soit à l'échauffement occasionné par la chaleur d'hydratation du ciment (réaction exothermique), soit à la variation thermique du milieu de conservation ;
- Retrait chimique : dû aux réactions d'hydratation et autodesiccation ;
- Retrait de carbonatation : dû à la diminution de volume lors de la transformation de la portlandite en carbonate de calcium (réaction de carbonatation). Ce retrait est négligeable par rapport aux autres.

Le tableau de la FIGURE 6 représente les risques de fissuration en fonction du type de retrait :

Type de retrait	Risques de fissuration		Utilité / Efficacité de diverses mesures		
	Délai d'apparition	Types de fissures	Composition du béton	Cure	Armatures
Retrait plastique	avant ou pendant la prise	superficielles	faible	très élevée	nulle
Retrait par (auto) dessiccation, c.-à-d. consommation de l'eau du béton durant le durcissement (retrait endogène) ou séchage du béton durci (retrait hydraulique)					
• à court terme	quelques jours à quelques semaines après bétonnage	superficielles à traversantes	très élevée	très élevée	moyenne
• à long terme	quelques mois à quelques années après bétonnage	traversantes	très élevée	élevée	très élevée
Retrait thermique	15 h à 10 jours après bétonnage	superficielles à traversantes	élevée	très élevée	moyenne

FIGURE 6 – Risques de fissuration en fonction du type de retrait [Wienerberger, 2020]

Le retrait est une déformation qui se produit en l'absence de charge et qui se passe de manière différée. Ce phénomène croît avec le temps pour tendre, après quelques années, vers une limite admissible. Ces restrictions dépendent notamment de la composition du mortier, des dosages en ciment et en eau et de l'humidité relative de l'atmosphère environnante. En Belgique, le retrait unitaire total d'un béton est de l'ordre de 0,4 à 0,8

mm/m. L'existence du retrait dans le béton et le mortier est l'une des raisons pour lesquelles des joints sont parfois ajoutés dans les structures. Lorsque le retrait est empêché, des fissurations apparaissent. Ces fissures représentent la conséquence la plus préoccupante pour la qualité et la durabilité du béton [Wienerberger, 2020].

Évaporation et absorption d'eau par capillarité :

Les mouvements de l'eau interstitielle d'un mortier d'enduit dépendent de l'évaporation et de l'absorption capillaire par le support. Ces mécanismes affectent d'une part le processus d'hydratation du liant et d'autre part l'évolution des caractéristiques mécaniques du mortier. La valeur du rayon moyen des capillaires du mortier est le facteur essentiel qui détermine la vitesse d'évaporation et donc la durée de celle-ci. L'absorption capillaire par le support se poursuit tant qu'il existe au sein de celui-ci des capillaires non saturés de rayons inférieurs à ceux du mortier. Au vu de ces mécanismes, certaines recherches ont démontré que les variations de certains paramètres caractérisant la composition du mortier et sa mise en œuvre influent sur la nature des mouvements d'eau et par conséquent sur l'évolution des caractéristiques du mortier [Detriche et al., 1985].

Déformation :

Le type de mortier a une influence importante sur la déformation du mortier de maçonnerie. Des chercheurs ont montré qu'un changement de type de mortier augmente la déformation de fluage et le mouvement d'humidité de la maçonnerie par un facteur d'au moins 3 lorsque le mortier passe de 29 à 13 MPa. Cette étude démontre qu'il est nécessaire de quantifier la déformation du mortier afin d'estimer plus précisément les mouvements dans les bâtiments en maçonnerie et de concevoir plus efficacement les joints de mouvement. La prédiction des mouvements du mortier présente un intérêt pour les rendus de surface décoratifs liés à la fissuration. Toutefois, il est important de mentionner que l'état de durcissement des joints de mortier dans la maçonnerie est probablement différent de l'état de durcissement des échantillons de laboratoire utilisés dans l'analyse postérieure en raison des propriétés d'absorption de l'unité. Cet effet est très difficile à modéliser en pratique mais doit être pris en compte lors de l'utilisation de modèles composites pour estimer les mouvements de maçonnerie. Une autre approche consiste à développer des facteurs de modification pour les expressions du modèle de prédiction. En résumé, le type de mortier est important pour déterminer les mouvements de la maçonnerie et devrait être pris en compte dans les procédures de conception pour augmenter la précision de la prévision des mouvements de la maçonnerie [Brooks & Bakar, 2004].

Dégradations :

L'utilisation d'une teneur élevée en ciment dans le mortier de maçonnerie et d'enduit n'est pas nécessairement bonne car elle augmente le risque d'efflorescence ainsi que le risque de fissuration [Balakrishnan et al., 2017].

Plusieurs mécanismes physico-chimiques de dégradation des enduits de façades existent [Tedeschi, 2018] :

— Les efflorescences :

Avec le temps, des tâches blanchâtres peuvent apparaître sur les mortiers d'enduit, comme les efflorescences (FIGURE 7). Elles altèrent l'aspect décoratif des produits mais n'altèrent pas leurs prestations. Ces efflorescences sont créées par deux types de phénomène [Vimark, 2020] :

— L'efflorescence au séchage :

Ce phénomène est lié aux réactions d'hydratation des liants hydrauliques, comme le ciment et la chaux. Il dépend généralement des conditions météorologiques au moment de l'application et surtout pendant les heures et les jours suivants. La carbonatation des enduits se produit lorsque les températures sont inférieures à 8 °C et l'humidité ambiante est importante. Lors de la phase de prise et de durcissement de la pâte de ciment, il libère une quantité de chaux qui est en partie soluble dans l'eau. L'eau de gâchage non utilisée par les réactions d'hydratation du ciment tend à se déplacer vers l'extérieur en transportant la chaux libre en solution. Une fois que l'eau s'évapore, la chaux réagit avec l'anhydride carbonique présent dans l'air. Cette réaction forme du carbonate de calcium visible

à la surface. Dans des conditions météorologiques favorables, les cristaux de carbonate de calcium se forment sous la surface de l'enduit et ne sont donc pas visibles.

— La carbonatation différentielle à long terme :

A long terme, des différences de teintes peuvent apparaître sur les enduits lorsqu'ils sont soumis à des conditions d'expositions différentes. Il s'agit du même phénomène que pour l'efflorescence au séchage. Les tâches apparaissent lors des cycles d'humidification puis de séchage des parties les plus exposées.



FIGURE 7 – Efflorescences sur le mortier d'enduit [Wikipedia, 2020a]

— Les formations de sels :

Des sels solubles sont présents à l'intérieur des matériaux de construction suivant des quantités plus ou moins grandes. Lorsque ces sels se trouvent en présence d'une quantité d'eau suffisante, ils peuvent être dissous et transportés vers la surface des enduits. Une fois la surface atteinte, l'eau s'évapore et les sels sont déposés sur la surface. Ce phénomène crée donc des tâches blanchâtres à la surface des enduits. Ces sels peuvent également former des cristaux dans l'enduit. Cela produit des forces qui entraînent la décohésion du mortier et sa destruction.

— La dégradation des enduits et des pierres :

Les pierres de taille peuvent être attaquées par des bactéries qui métabolisent l'acide carbonique et dissolvent le carbonate de calcium en présence d'humidité et de poussière. Ce phénomène crée des creusements dans la pierre de taille.

— Les salissures et les mousses :

Des salissures peuvent apparaître sur les façades à cause de la pollution atmosphérique, du développement de micro-organismes comme les mousses, les algues et les lichens. Ces salissures apparaissent lorsque les façades sont très humides ou mal séchées.

— Les fissurations :

Les fissurations sont généralement dues à des problèmes de supports ou d'application. Les principales causes sont un excès d'eau de gâchage qui augmente le retrait, une épaisseur ou des variations d'épaisseur d'application trop importante, des conditions climatiques trop sèches ou un temps d'attente trop court entre les différentes couches.

— La pénétration de l'eau :

Lorsqu'il n'y a pas de fissures, l'eau peut pénétrer par porosité dans le matériau. Ce phénomène est rare et est essentiellement dû à des épaisseurs de recouvrement du support insuffisantes.

— Le décollement :

Le décollement de l'enduit de son support est généralement dû à une mauvaise préparation du support ou l'utilisation d'un enduit inadapté.

— Le gel :

Au niveau de certains pieds de mur, l'eau remonte par capillarité dans les matériaux. Quand les températures descendent et que le gel arrive, l'eau à l'intérieur de l'enduit gel. On peut alors observer une décohésion de l'enduit car il n'a pas la résistance nécessaire pour résister aux forces d'expansion de l'eau qui a gelé. Tous les enduits à base de chaux aérienne sont sujets à ce problème.

— Le brulage ou grillage de l'enduit :

Ce phénomène a lieu lorsque le séchage de l'enduit est trop rapide, soit par absorption d'eau du support soit par évaporation du fait des conditions atmosphériques. Ce phénomène se caractérise généralement par un poudrage de l'enduit en surface ou par une mauvaise adhérence au support.

— Le cisaillement du support :

Ce phénomène a généralement lieu lorsque les supports ne sont pas suffisamment résistants ou que l'enduit appliqué était inadapté. Cela commence généralement par une fissuration de l'enduit. Ensuite, le cisaillement du support est favorisé par l'abaissement de ses caractéristiques mécaniques du fait des pénétrations d'eau par les fissures.

3 Cendres volantes de charbon

3.1 Origine et production

Les cendres volantes dites classiques sont un sous-produit provenant de la combustion du charbon dans les centrales électriques au charbon. La combustion du charbon pulvérisé a lieu dans des chaudières de centrales thermoélectriques en présence ou non de co-combustibles. Suite à cette combustion, de fines particules sont extraites : les cendres volantes. 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) et de l'IEA Coal research (International Energy Association) [Balakrishnan et al., 2017, Rajamma et al., 2015, Taerwe, 2018, Ecoba, 2016, Ayrinhac, 2008].

Une centrale électrique à charbon est équipée d'un système d'épuration qui extrait le dioxyde de soufre (SO_2) et l'oxyde d'azote (NO_x) des gaz des fumées avant leur sortie de la cheminée. Les fines poussières, appelées cendres volantes sont quant à elles récupérées dans des trémies grâce à un électrofiltre, situé au point 10 de la FIGURE 8 [Electrabel, 2016].

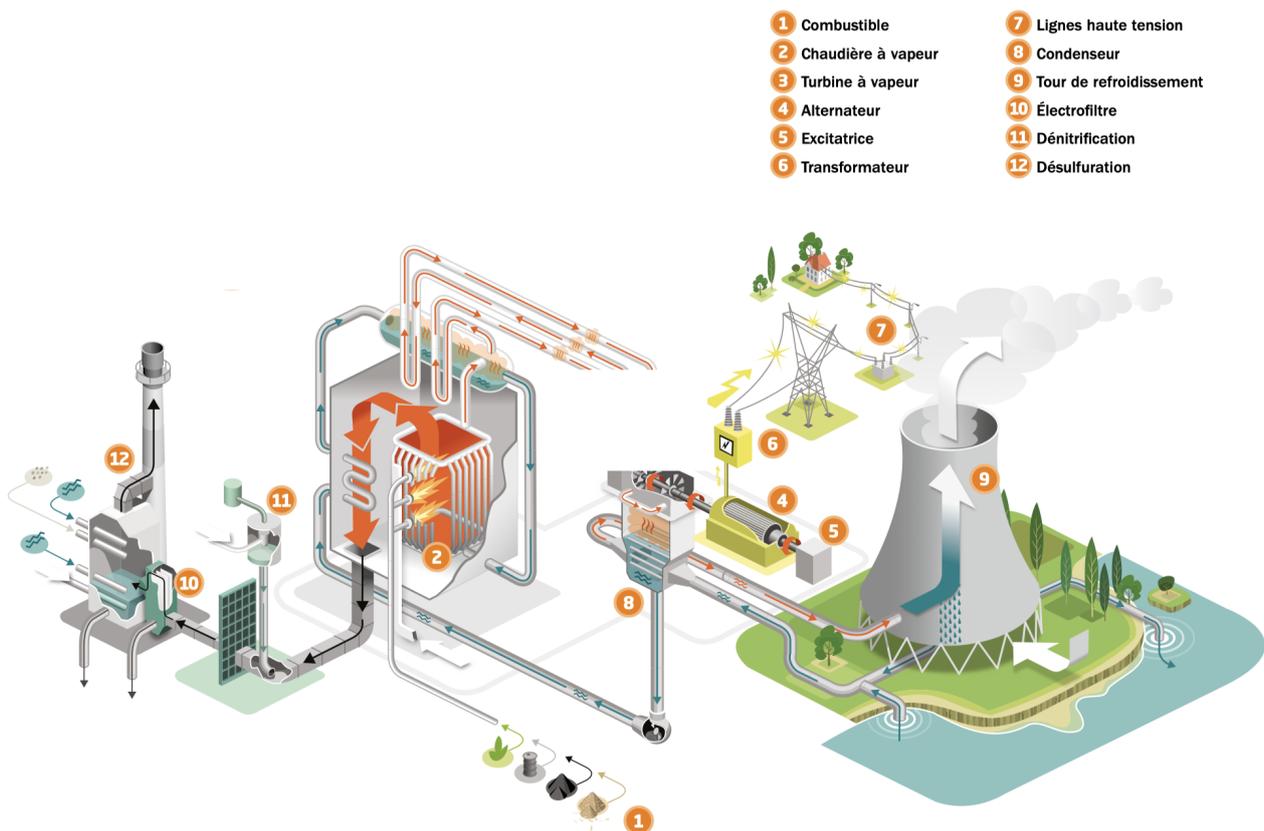


FIGURE 8 – Mode de fonctionnement d'une centrale électrique à charbon [Electrabel, 2016]

Dans certains pays, une quantité considérable de cendres volantes est produite et doit être réutilisée. En Thaïlande, de nombreuses centrales électriques produisent des cendres volantes. Une de leur plus grande centrale électrique au charbon, la centrale électrique de Mae Moh, se situe dans la province de Lampang au nord de

Bangkok. Cette centrale est en service depuis les années 70 et produit plus de 2,5 millions de tonnes de cendres volantes chaque année [Chindapasirt et al., 2005]. En Inde, les cendres volantes proviennent de centrales thermiques où la combustion du charbon pulvérisé se fait dans des fours à suspension. Ces centrales récoltent environ 100 millions de tonnes de cendres volantes par des précipitateurs électriques, mécaniques ou des cyclones [Garg & Pundir, 2012].

Comme montré à la FIGURE 9, la production de charbon a progressé en moyenne de 1,9 % par an entre 2002 et 2015. Ensuite, la production mondiale de charbon a décliné de 6,2 % en 2016. En 2016, la production mondiale de charbon était d'environ 3,5 milliards de tonnes, ce qui correspond à 110 tonnes par seconde. Aujourd'hui, la production américaine de charbon a baissé de 19 % et la production chinoise de 7,9 %. La Chine est toujours le premier producteur mondial, détenant à lui seul 46,1 % de la production mondiale. A titre de comparaison, la production mondiale de charbon en 2011 était de 7,695 milliards de tonnes, dont presque la moitié extraite en Chine, soit 3,520 milliards de tonnes [Planetoscope, 2016].

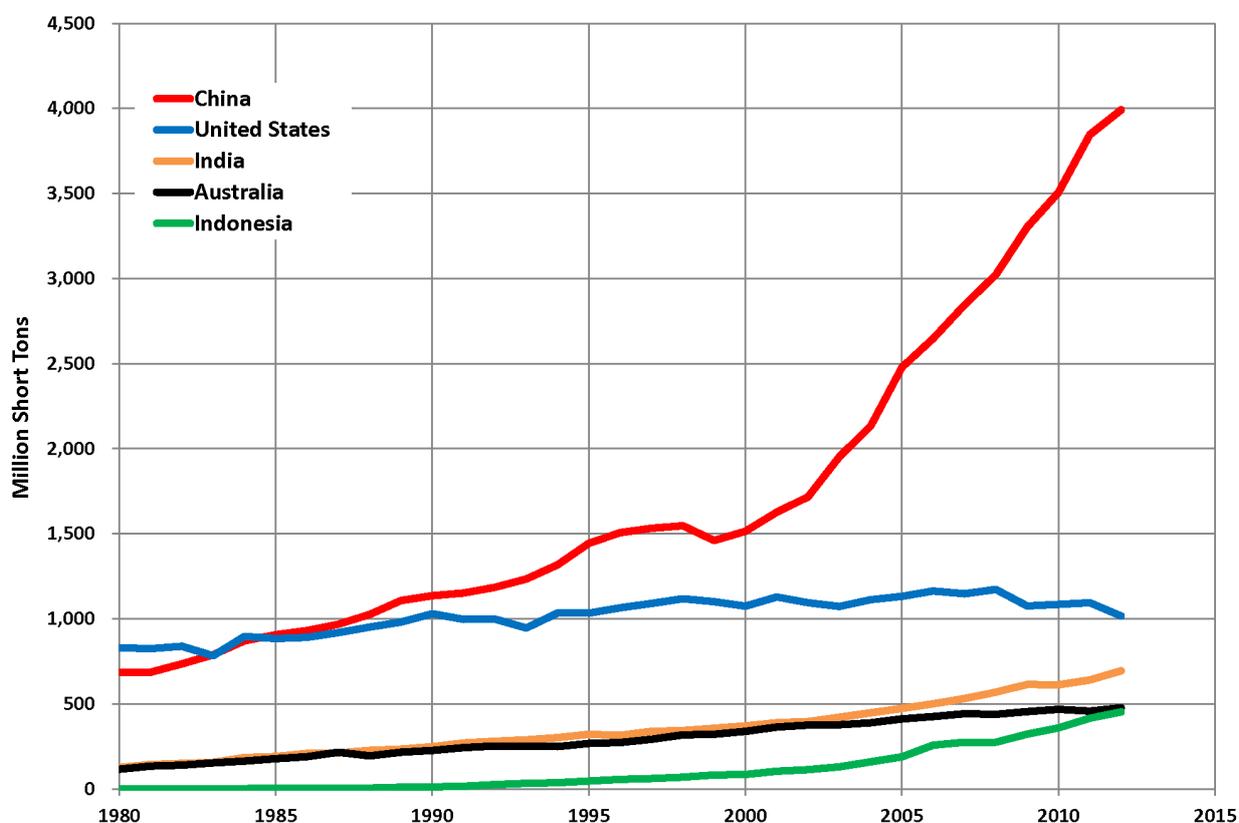


FIGURE 9 – Évolution de la production de charbon des cinq principaux États de 1980 à 2012. [Wikipedia, 2020e]

Les cendres de charbon sont produites suite à la combustion du charbon dans les centrales électriques. Au niveau mondial, les résultats affirment que la production de cendres volantes est proportionnelle à la production de charbon. Cependant, il ne faut pas oublier que plusieurs produits de combustion du charbon existent et que toutes les cendres volantes ne peuvent pas être exploitées.

Les produits de combustion du charbon sont multiples car le charbon présente différents composants minéraux et la combustion peut se faire suivant différentes techniques. Les différents produits de combustion du charbon

sont les suivants [Ecoba, 2016, Ayrinhac, 2008] :

- Les cendres volantes :
Les cendres volantes sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique en amont de la cheminée pour être ensuite refroidies. Les cendres volantes sont des particules poussiéreuses issues des fumées des fours alimentés au charbon ou au lignite à une température de 1100 à 1400 °C. Les cendres volantes se présentent sous la forme d'une poudre fine, composées principalement de particules vitreuses sphériques. En fonction du type de chaudière et le type de charbon, des cendres volantes produites sont siliceuses ou calcaires avec des propriétés hydrauliques pouzzolaniques et/ou latentes.
- Le gypse de désulfuration :
Le gypse est un produit de type gypse naturel qui est obtenu suite à la désulfuration humide des gaz de combustion et suite au traitement spécial des produits adsorbés.
- Cendres LFC :
Les cendres de combustion à lit fluidisé sont produites dans les chaudières à combustion à lit fluidisé. Cette technique consiste à combiner la combustion du charbon et la désulfuration des gaz de combustion dans la chaudière à des températures de 800 à 900 °C. Ces cendres sont riches en chaux et en soufre.
- Les scories de chaudière
- Les produits de lavage des fumées
- Les cendres de foyer CP :
Les cendres inférieures sont constituées d'un matériau granulaire retiré du fond des chaudières sèches. Ces cendres sont beaucoup plus grossières que le cendres volantes mais elles sont également formées lors de la combustion du charbon.

Chaque année, l'ECOBA réalise une étude statistique sur la production et l'utilisation des produits de combustion du charbon en Europe. Les données ne sont malheureusement pas disponibles pour tous les pays d'Europe, certains pays n'étant pas membre de l'ECOBA ou les chiffres des états membres n'étant tout simplement pas disponibles. Les données de production sont dès lors vérifiées par des chiffres statistiques sur la consommation de charbon. Ces chiffres concernent également la production et l'utilisation des cendres volantes.

Les statistiques de l'ECOBA sur la production des cendres volantes dans les pays de l'Union Européenne en 2002 et en 2016 sont présentées à la FIGURE 10. La production des produits de combustion du charbon évolue chaque année. Environ 63 millions de tonnes ont été produites en 2002 alors que 40 millions de tonnes ont été produites en 2016. Parmi tous les déchets, la proportions de la production des cendres volantes est de 67 % en 2002, soit 42 millions de tonnes, et de 64 %, soit 26 millions de tonnes, en 2016. Lors de la combustion du charbon, les cendres volantes représentent la plus grande quantité de produit de combustion [Ecoba, 2016, Ayrinhac, 2008].

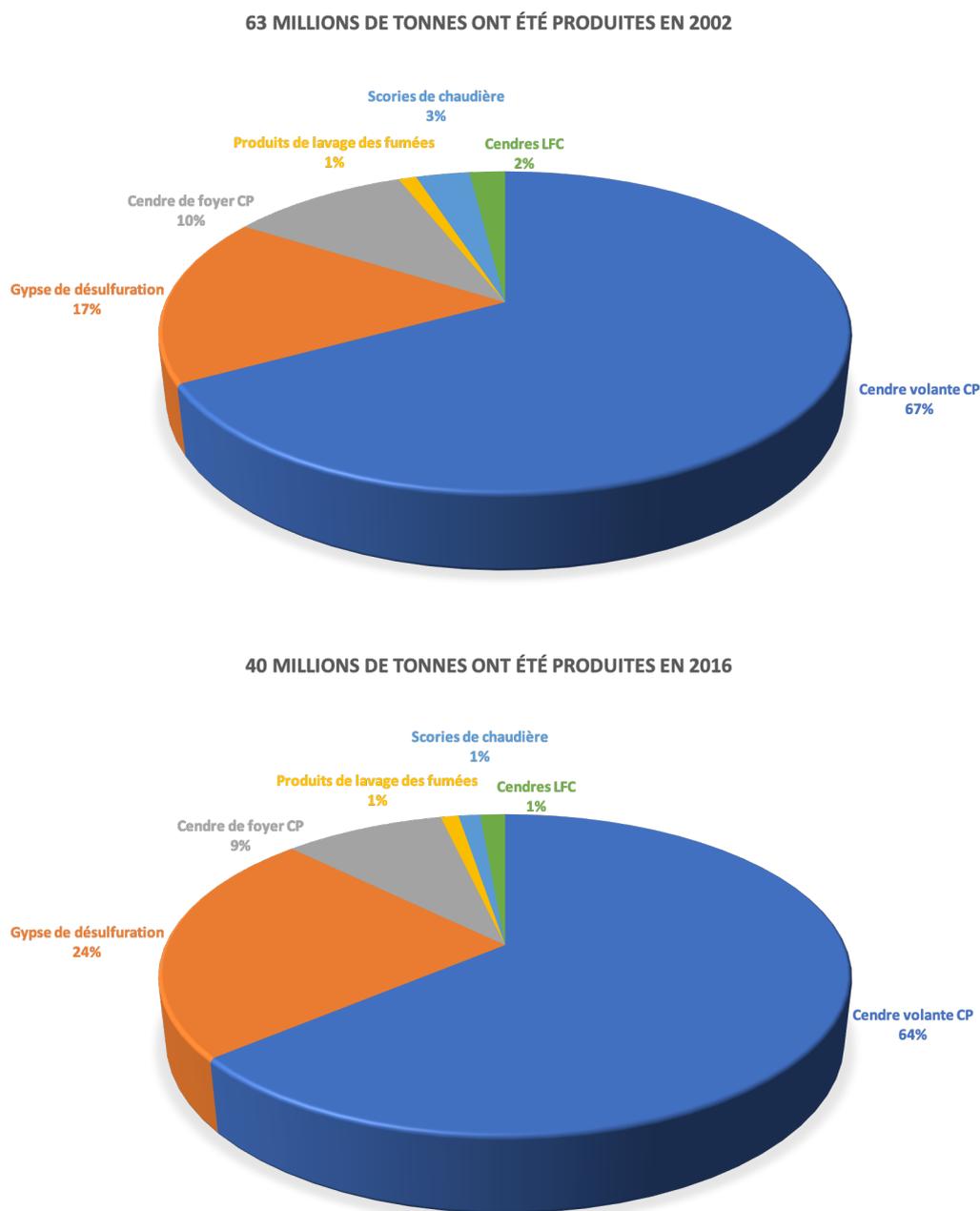


FIGURE 10 – Production de cendres volantes en Europe en 2002 et 2016 [Ecoba, 2016, Ayrinhac, 2008]

Les statistiques de l'ECOPA sur l'utilisation des cendres volantes dans les pays de l'Union européenne en 2002 et en 2016 sont présentées à la FIGURE 11. Les données sont obtenues de la même manière que pour les données de production. Cependant, pour la valorisation des cendres volantes, les données de tous les producteurs et des utilisateurs sont manquantes. Seuls les domaines d'application identifiés ont été représentés. En 2002, sur 42 millions de tonnes de cendres volantes produites, 10,5 millions de tonnes étaient revalorisées. En 2016, sur 26 millions de tonnes de cendres volantes produites, 11,4 millions de tonnes sont revalorisées. On peut donc constater que 42 % des cendres volantes étaient recyclées en 2016 contre 25 % en 2002. La quantité de cendres volantes recyclées par rapport à la quantité de cendres volantes produites augmente chaque année

[Ecoba, 2016, Ayrinhac, 2008].

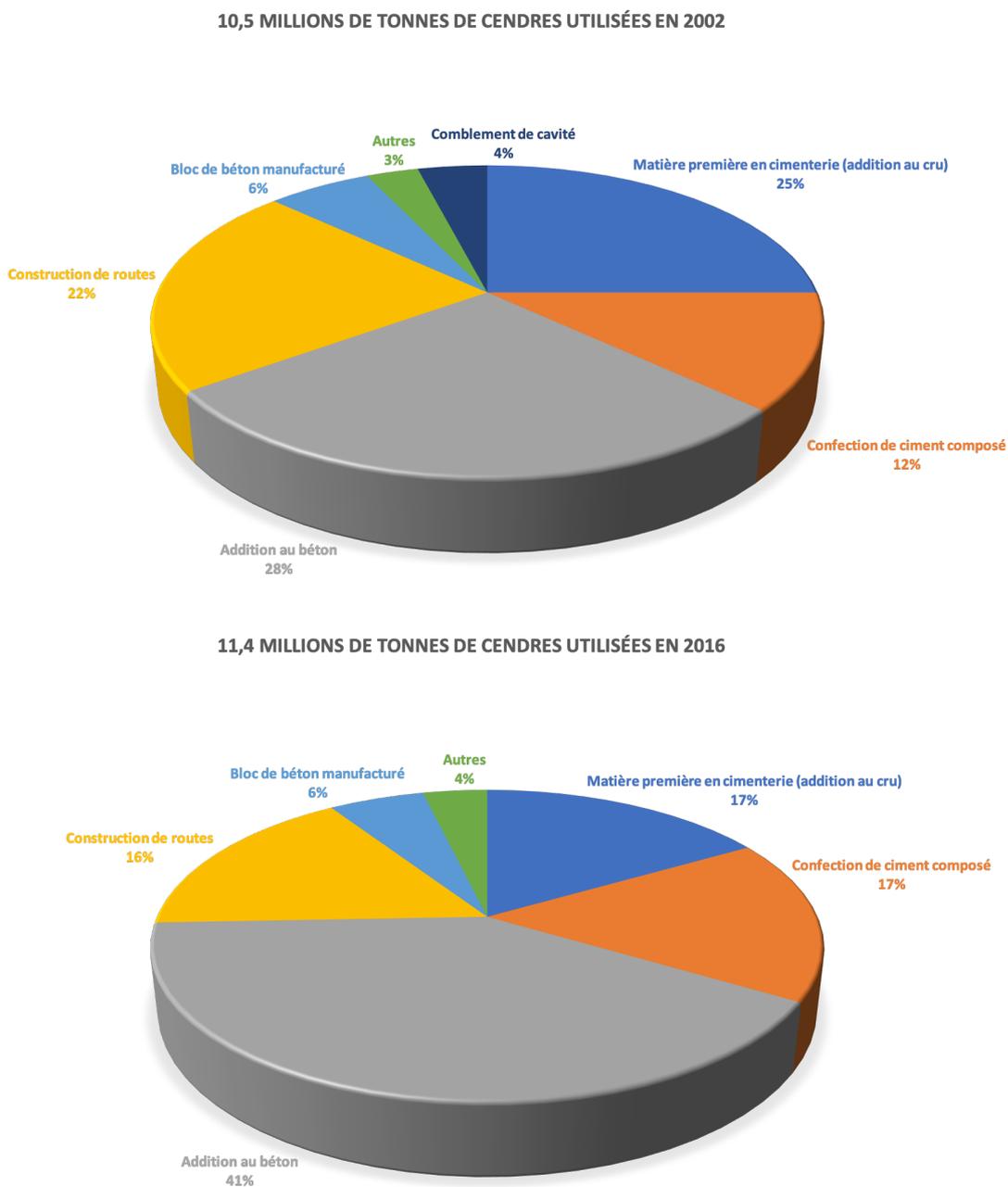


FIGURE 11 – Voies de valorisation de la cendre volante en génie civil en Europe en 2002 et 2016 [Ecoba, 2016, Ayrinhac, 2008]

Les détails des données récoltées se trouvent dans un tableau récapitulatif à l’ANNEXE 8. L’utilisation des produits de combustion du charbon est indiquée dans ce tableau, y compris le calcul des taux d’utilisation dans l’industrie de la construction ainsi que pour une utilisation supplémentaire pour la remise en état [Ecoba, 2016, Ayrinhac, 2008].

En Wallonie, la production et l'utilisation des déchets de fusion, d'incinération et combustion a également été étudiée. En 1995, le gisement des déchets d'origine industrielle représentait 3,732 millions de tonnes réparties de la manière suivante (FIGURE) 12 [Wallonie, 1995] :

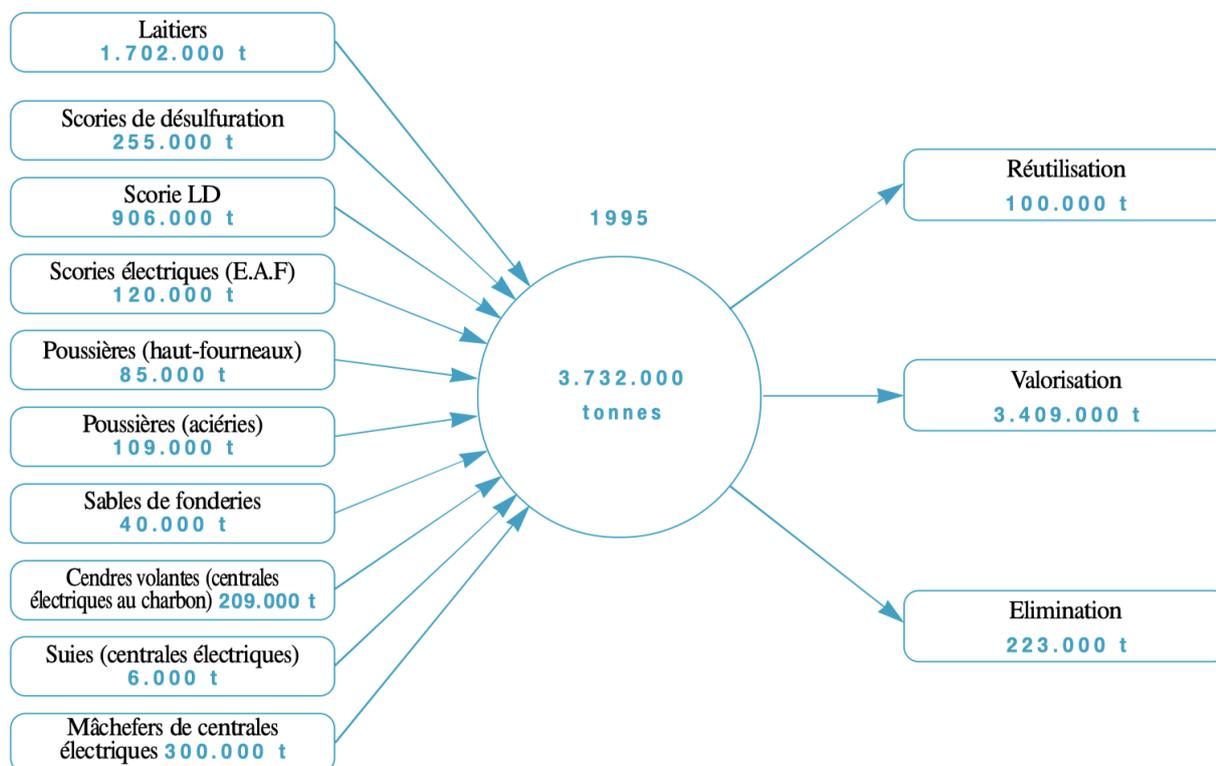


FIGURE 12 – Gisement des déchets d'origine industrielle en Wallonie [Wallonie, 1995]

En 1995, des chercheurs ont prédit l'évolution de la production des cendres volantes et des cendres de mâchefers issues des centrales électriques, en fonction du nouveau plan relatif à l'électricité entre 1995 et 2005. Selon Electrabel, ces quantités devraient évoluer comme représenté à la TABLE 2 [Wallonie, 1995] :

Années	1995	2000	2005	2010
Quantités produites (kilos tonnes)	515	120	60	60

TABLE 2 – Quantités de cendres volantes et de mâchefers produits par des centrales électriques [Wallonie, 1995]

La diminution des quantités produites est liée à la fermeture progressive des centrales électriques au charbon [ICEDD, 2007].

D'autres enquêtes ont été réalisées afin de connaître la quantité de déchets associées au secteur de la production de l'électricité. Ces enquêtes ont été menées par la DGRNE (Direction générale des ressources naturelles et de l'environnement) entre 1995 et 2004 auprès de 220 sièges d'exploitation en Wallonie. Les données ont été récoltées auprès de grands et moyens établissements de la Région wallonne qui ont un impact significatif sur l'environnement. Ces établissements produisent de l'électricité en utilisant uniquement du charbon. Les résultats exclus ceux relatifs à la production d'électricité issue des centrales nucléaires. Les résultats obtenus se trouvent à la FIGURE 13 [ICEDD, 2007] :

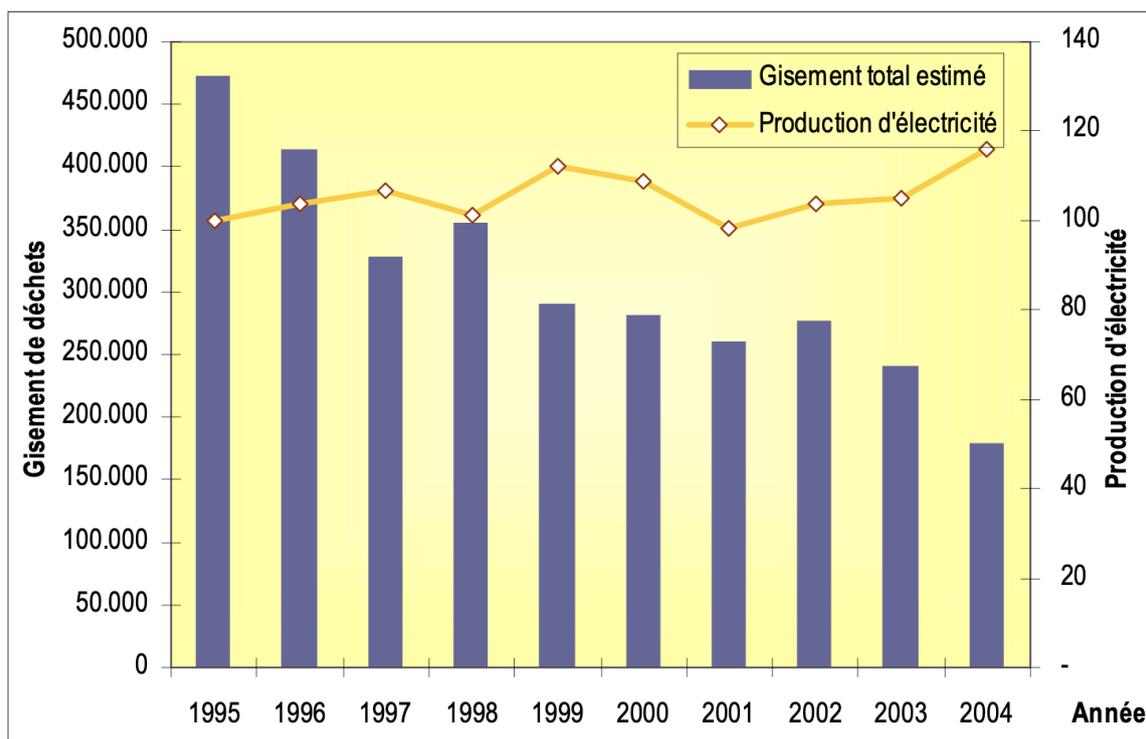


FIGURE 13 – Évolution de la quantité totale des déchets générés par la production d'électricité de 1995 à 2004 [ICEDD, 2007]

En 2004, le secteur de la production d'électricité a été défini comme le cinquième secteur le plus générateur de déchets de Wallonie après la métallurgie, l'industrie alimentaire, l'industrie chimique et l'industrie des minéraux non métalliques. Sa contribution au gisement total de l'industrie manufacturière est estimée à 179 kilos tonnes de déchets, soit 2,8 % de l'apport total industriel [ICEDD, 2007].

Ce gisement est principalement composé à 96 % de cendres volantes, de mâchefers et de suies issus des centrales thermiques. Il compte environ 163 kilos tonnes en 2004. Le reste des déchets provient des activités d'entretien, de démolition, de support ou d'assainissement [ICEDD, 2007].

3.2 Cendres volantes siliceuses et calciques

L'origine du combustible est un facteur essentiel pour déterminer les propriétés des cendres volantes. Suivant le type de combustible, les cendres volantes peuvent être de nature différente [Taerwe, 2018, Uliège, 2020] :

- Si le combustible est de la houille, comme l'antracite, les cendres volantes obtenues sont du type silico-alumineux. Les cendres volantes siliceuses ont des propriétés pouzzolaniques. En Belgique, seules les cendres volantes siliceuses sont disponibles.
- Si le combustible est de la lignite, les cendres volantes obtenues sont du type sulfo-calcique. Les cendres volantes calciques ont des propriétés pouzzolaniques et hydrauliques. Elles contiennent également une teneur en chaux importante avec un certain pourcentage de chaux libre.



FIGURE 14 – Deux types de combustible : la lignite et l'anthracite [Wikipedia, 2020a]

Lorsque les cendres volantes sont sèches, elles ont l'apparence d'une poudre fine majoritairement composée de petits grains sphériques (creux) dont la taille varie de 1 à 125 μm . La forme de ces cendres assure un certain effet de roulement à billes dans les mélanges de mortier à base de cendres volantes, ce qui favorise l'ouvrabilité [Taerwe, 2018, Uliège, 2020].

3.3 Propriétés physiques et chimiques

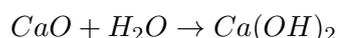
Les propriétés des cendres volantes sont variables et dépendent de plusieurs facteurs tels que :

- La composition du charbon ;
- La température de la flamme ;
- Les conditions d'oxydation ;
- Le mode de collecte des cendres volantes.

Les propriétés physiques et chimiques des cendres volantes jouent un rôle important dans la transmission de la réactivité pouzzolanique et dans la production de mortier de ciment et de béton [Garg & Pundir, 2012].

Les cendres volantes siliceuses (V) doivent satisfaire certaines exigences pour pouvoir être utilisées comme constituants du ciment. Ces exigences sont établies selon la norme NBN EN 197-1 et sont reprises à la TABLE 3 [Taerwe, 2018].

- Pour les cendres volantes siliceuses, la quantité de chaux réactive doit être inférieure à 10 %. La chaux réactive est la fraction de chaux (CaO) capable de former des liaisons avec l'alumine et la silice dans des conditions normales.
- Pour les cendres volantes siliceuses, la teneur en silice réactive ne doit pas être inférieure à 25,0 %. Cette condition assure que l'activité pouzzolanique sera suffisante.
- Pour les cendres volantes siliceuses, la teneur en chaux libre doit être limitée à 1,0 %. Lorsque la teneur en chaux libre se situe entre 1,0 et 2,5 %, les cendres volantes peuvent être utilisées moyennant des précautions spéciales, c'est-à-dire en contrôlant la réaction d'expansion selon la norme NBN EN 196-3. La chaux libre est présente sous forme de CaO susceptible de provoquer une réaction expansive en contact avec l'eau :



Cette réaction est une réaction interne de gonflement qui pourrait disloquer le béton ou le mortier durci.

- La perte au feu représente la présence de charbon non calciné dont une teneur excessive aurait des conséquences néfastes pour l'efficacité de certains adjuvants ainsi que pour la durabilité du béton. La perte au feu est définie par trois classes.

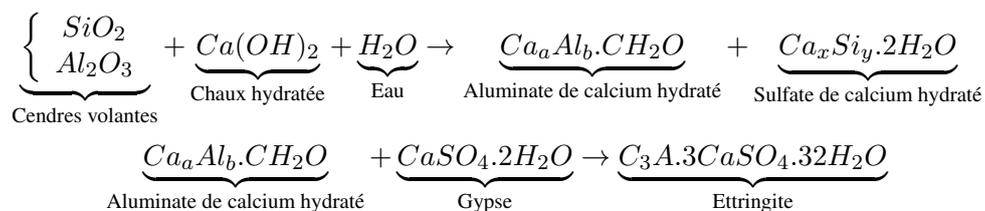
Propriétés	Exigence
(CaO) réactif	< 10,0 %
(SiO ₂) réactif	≥ 25,0 %
(CaO) libre	≤ 1,0 % (2,5 %)
Perte au feu	a). 0,0 % à 5,0 %
	b). 2,0 % à 7,0 %
	c). 4,0 % à 9,0 %

TABLE 3 – Exigences relatives aux cendres volantes siliceuses [Taerwe, 2018]

3.4 Réactions chimiques

Comme mentionné précédemment, les cendres volantes siliceuses ont des propriétés pouzzolaniques. Ces propriétés font que, à température ambiante et en présence d'eau, les cendres volantes peuvent lier la chaux Ca(OH)₂ qui a été précédemment libérée lors de l'hydratation du clinker [Taerwe, 2018].

L'activité pouzzolanique inclut toutes les réactions qui se passent entre les composants actifs des pouzzolanes avec la chaux en présence d'eau. Ces réactions peuvent s'écrire de façon suivante [Taerwe, 2018] :



La silice présente dans les cendres volantes réagit avec les ions Ca^{2+} apportés par l'hydratation du ciment Portland et de la chaux et forme des sulfates de calcium insolubles dans l'eau (C – S – H) et des composés d'hydrate d'aluminate. Outre les cendres volantes, les liants cimentaires contiennent du plâtre α -gypse qui, lors de l'ajout d'eau, libère des ions SO_4^{2-} qui se combinent en outre avec Al_2O_3 et CaO disponibles dans la phase aqueuse et forment de l'ettringite [Garg & Pundir, 2012].

L'interaction entre les cendres volantes, la chaux et l'eau forme une structure plus dense d'hydrate d'ettringite et de monosulfoaluminate qui remplit les pores de la pâte et améliore la résistance du béton [Garg & Pundir, 2012]. Les cendres volantes contribuent donc ainsi au développement de la résistance du ciment. A plus long terme, elles diminuent également la perméabilité du béton [Taerwe, 2018].

Plusieurs facteurs influencent la pouzzolanité des cendres volantes [Taerwe, 2018] :

- Il faut que la composition chimique soit riche en oxydes acides (Silice (S) + Alumine (A) + Oxyde de fer III (F)) pour pouvoir former des liaisons stables avec la chaux.
- Il faut que la silice soit réactive. Comme pour le laitier de haut fourneau, c'est le traitement thermique suivi d'un refroidissement rapide qui fige la silice en une phase minéralogique vitreuse (non cristalline) qui, à long terme, n'est pas stable à température ambiante.
- Il faut que la matière soit finement divisée.

D'un point de vue chimique, les cendres volantes siliceuses sont majoritairement composées de silice (S) et d'alumine (A). Elles possèdent également, en plus faibles teneurs (< 10 %), de l'oxyde de fer III (F) et de la chaux (C). La composition minéralogique des cendres volantes est variable (TABLE 4). Des gros écarts de valeurs sont possibles en fonction de la provenance de ces cendres et donc de l'origine du charbon [Taerwe, 2018].

Oxydes	Teneur (%)
SiO ₂ (S)	43 - 54
Al ₂ O ₃ (A)	22 - 32
Fe ₂ O ₃ (F)	4 - 13
CaO (C)	1 - 8
MgO (M)	1 - 3
Na ₂ O	0,5 - 2
K ₂ O	2 - 5
C (carbone/imbrulé)	< 7

TABLE 4 – Compositions chimiques des cendres volantes [Taerwe, 2018]

3.5 Avantages et inconvénients

Les cendres volantes sont largement utilisées dans le monde et comportent de nombreux avantages [Balakrishnan et al., 2017] :

— Techniques :

L'utilisation des cendres volantes classiques dans les mortiers de maçonnerie peut améliorer la résistance mécanique, la résistance aux intempéries physiques et chimiques ainsi que les propriétés d'écoulement. Le remplacement des cendres volantes à haut volume est également une alternative viable pour la fabrication de mortier de maçonnerie respectueux de l'environnement car elles permettent une meilleure ouvrabilité et des propriétés de résistances acceptables. Des recherches ont également démontré que les mortiers de maçonnerie fabriqués avec des cendres volantes sont mieux lotis que le mélange sans celles-ci. L'hydratation du ciment de maçonnerie dans lequel des cendres volantes sont incorporées libère toujours du Ca(OH)₂ qui réagit avec ces cendres pour former une résistance supplémentaire donnant l'hydrate de silicate de calcium. [Balakrishnan et al., 2017].

— Économiques :

L'utilisation des cendres volantes pour la fabrication des mortiers de maçonnerie et d'enduit est une solution faisable et économiquement viable lorsque les cendres volantes peuvent être mises à disposition à un prix raisonnable [Chindaprasirt et al., 2005].

— Environnementaux :

L'utilisation des cendres volantes permet de minimiser les impacts environnementaux liés à leurs stockages ou à leurs éliminations [Chindaprasirt et al., 2005]. L'emploi des cendres volantes permet également de diminuer le CO₂ provenant de la production de clinker de ciment et de réduire la consommation de matières premières naturelles telles que le calcaire. Elles permettent de recycler les cendres générées par la centrale au charbon [Balakrishnan et al., 2017]. L'objectif est donc de maximiser leurs applications.

— Disponibilités :

En Europe, environ 40 millions de tonnes de cendres volantes ont été produites en 2016. Ces cendres de charbon peuvent être réutilisées dans différents domaines, comme expliqué précédemment, ou elles peuvent être stockées dans des terrils. Comme détaillé à l'ANNEXE 8, environ 263 000 tonnes de cendres volantes ont été stockées.

En Belgique, de nombreux terrils se trouvent sur les bassins de la Meuse et de la Sambre. Ils sont considérés comme faisant partie intégrante du paysage et témoignent du riche passé minier du sillon

Sambre-et-Meuse. Par exemple, le terril Saint-Antoine est un terril situé dans la commune de Dour et de Boussu (FIGURE 15). Ce terril s'étend sur une longueur de 1 km et fait 60 m de haut. Il possède environ 32 944 000 m³ de cendres de charbon [Wikipedia, 2020b].



FIGURE 15 – Terril de Saint-Antoine à Boussu-Bois abandonné [Wikipedia, 2020b]

Un autre exemple est le terril de la Héna à Flémalle (FIGURE 16). Ce terril est composé de 2,3 millions de tonnes de cendres volantes provenant de la centrale électrique des Awirs, également située sur la rive gauche de la Meuse, à environ 2 km au Sud-Est du terril. Le terril de la Héna est actuellement en travaux car de nombreuses études ont estimé que les risques de liquéfaction des cendres volantes étaient trop dangereux et qu'il fallait l'évacuer. L'objectif est d'excaver les cendres volantes et de les valoriser dans leur intégralité au travers du processus des cimenteries dans la filière des clinkers. Les cendres volantes sont très intéressantes pour les cimentiers car elles contiennent des oxydes d'aluminium. En ajoutant environ 20 % de cendres volantes dans le clinker, cela permet de remplacer la bauxite qui est habituellement utilisée comme additif. Les cendres volantes permettent d'apporter une quantité d'oxyde d'aluminium intéressante, pas trop d'imbrûlés et pas trop de présence de carbone [Uliège, 2020, Lognay et al., 2017].

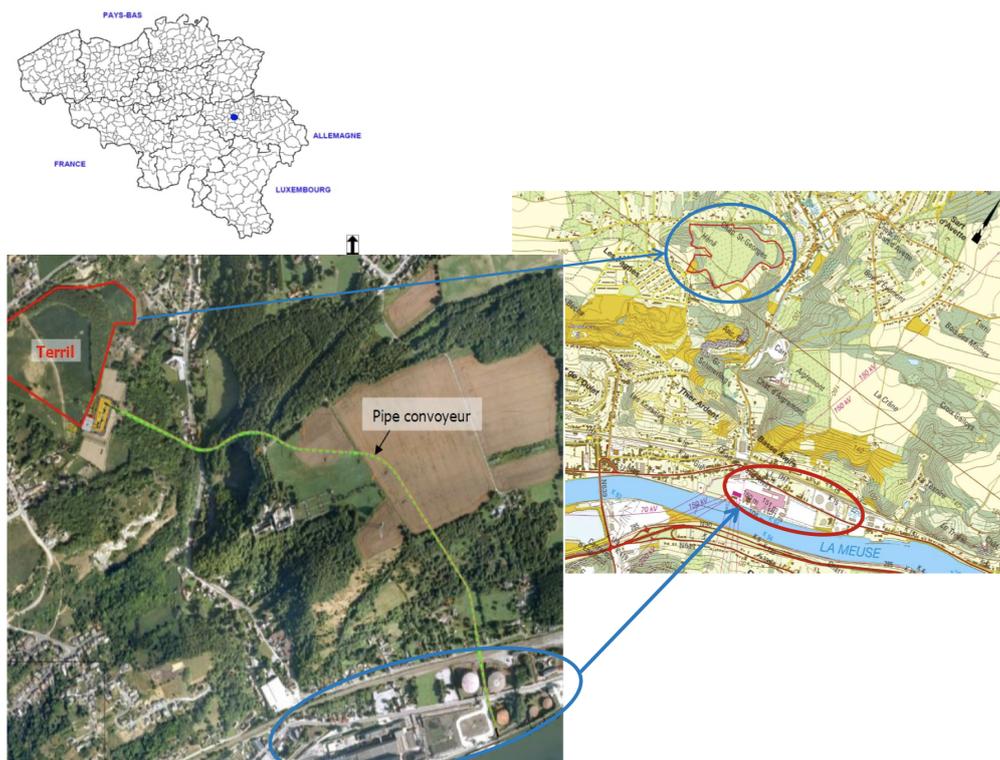


FIGURE 16 – Localisation du terril du Hénâ [Lognay et al., 2017]

L'évacuation des cendres volantes du Hénâ est avant tout un projet lié à un problème sécuritaire pour la population et n'est pas du tout lié à un projet économique. Le terril doit être évacué et stabilisé car il pourrait, sous certaines conditions défavorables, provoquer une liquéfaction des cendres volantes et donc une avalanche de ces cendres sur le village en aval. Plusieurs catastrophes ont déjà eu lieu [Uliège, 2020, Lognay et al., 2017] :

- Glissement de Bressoux (Belgique - 1961) : Le terril a glissé à cause de la hauteur de nappe et de la circulation d'eau souterraine. Un volume de 150 000 m³ a glissé sur 600 m ce qui a engendré 11 victimes.
- Aberfan (UK - 1996) : Cette catastrophe, où 144 victimes ont péri, est due au glissement d'un terril de résidus miniers saturé d'eau. Environ 140 000 tonnes de cendres du terril ont glissé.
- Glissement de Milwaukee (US - 2011) : Environ 2000 m³ de cendres du terril ont glissé sur une longueur de 120 m.

Les cendres volantes présentent également certains inconvénients :

— Techniques :

Lorsqu'une partie du ciment est substitué par des cendres volantes, 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 des cendres volantes réduisait la résistance du mortier ou du béton fabriqué [Balakrishnan et al., 2017]. De plus, lorsque les cendres volantes sont incorporées en grande quantité dans le ciment de maçonnerie, le ciment dans le mortier est en quelque sorte dilué. Cela limite un remplacement de haut niveau du ciment de maçonnerie par des matériaux de substitution [Balakrishnan et al., 2017].

— Disponibilités :

Dans certains pays, des cendres volantes de bonne qualité ne sont pas toujours disponibles et sont parfois moins réactives par rapport aux cendres volantes étrangères [Garg & Pundir, 2012].

3.6 Applications des cendres volantes

Les cendres volantes de charbon ont déjà été le sujet de nombreuses recherches et sont déjà utilisées dans plusieurs pays dans le monde [Rajamma et al., 2015].

Les différentes applications des cendres volantes de charbon sont les suivantes :

— Production de béton ou de mortier :

La communauté scientifique s'inquiète à propos du volume élevé de cendres volantes à stocker dans le monde et cherche des moyens de réduire leurs impacts environnementaux. La solution principale étudiée est celle de la valorisation des cendres volantes en tant que matériaux et agrégats dans les pâtes de ciment, les mortiers et les bétons à base de ciment Portland [Garcia-Lodeiro et al., 2016].

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 prometteuse [Chindaprasirt et al., 2005, Balakrishnan et al., 2017]. Des cendres volantes de taille assez grossière sont utilisées pour réaliser des mortiers de maçonnerie adaptés pour réaliser les joints de briques et de l'enduit. Les chercheurs ont remarqué une faible rétention d'eau. Ce problème pourrait être amélioré avec une meilleure qualité de cendres volantes ou en utilisant du superplastifiant. Ils ont constaté que, lorsque le taux de substitution se situe entre 20 % et 40 %, du mortier de Type N ou S peut être réalisé [Chindaprasirt et al., 2005]. D'autres recherches ont observé qu'il était possible de produire du mortier où 20 à 40% du ciment était remplacé par des cendres volantes avec une résistance suffisante [Balakrishnan et al., 2017]. Certaines recherches ont également montré que le liant des cendres volantes est approprié pour la fabrication du béton léger et des briques [Garg & Pundir, 2012]. L'avantage de la filière des cimentiers est qu'elle permet d'englober des quantités importantes de cendres volantes [Uliège, 2020].

Aujourd'hui, seules les cendres volantes siliceuses peuvent être utilisées dans les matrices à base de ciment. En France, les spécifications et critères de conformité des cendres volantes sont régies par la norme NF EN 450-1. La fabrication de ciments composés avec des cendres volantes et/ou d'autres constituants est encadrée par la norme NF EN 197-1. Aujourd'hui, plusieurs normes concernent les cendres volantes de charbon provenant des centrales thermiques. Ces normes concernent essentiellement les cendres volantes issues du charbon pulvérisé (CP) et du lit fluidisé (LF). Une liste chronologique des normes spécifiques aux cendres volantes est représentée à la FIGURE 17. Ces normes concernent également les produits et les applications liées aux cendres volantes [Sow, 2016].

Norme	Désignation	Norme antérieure	Date
NF P 11-300	Exécution des terrassements – Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de formes d'infrastructures routières	-	1992
NF P98-111	Assise de chaussées-Essai de réactivité des cendres volantes silico-alumineuses à la chaux	-	1992
NF EN 197-1/A1	Ciment – Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants	NF EN 197-1	2004
NF EN 450-2	Cendres volantes pour béton - Partie 2 : évaluation de la conformité	NF EN-450	2005
NF EN 206-1/A1	Béton - partie 1 : spécification, performances, production et conformité	NF EN 206-1	2005
NF EN 206-1/A2	Béton - partie 1 : spécification, performances, production et conformité	NF EN 206-1	2005
NF EN 14227-1	Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 1 : mélanges granulaires traités au ciment	NF P98-113 NF P98-116	2005
NF EN 14227-2	Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 2 : mélanges traités au laitier	NF P98-106 NF P98-113 NF P98-116	2005
NF EN 14227-3	Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 3 : mélanges granulaires traités au ciment	NF P98-113 NF P98-116 NF P98-124	2005
NF EN 14227-4	Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 4 : mélanges granulaires traités au ciment	NF P98-110 NF P98-112	2005
NF EN 14227-5	Mélanges traités aux liants hydrauliques - Spécifications - Partie 5 : mélanges granulaires traités au ciment	NF P98-113 NF P98-116	2005
NF EN 450-1+A1	Cendres volantes pour béton - Partie 1 : définition, spécifications et critères de conformité	NF EN-450	2007
NF EN 197-1/A3	Ciment – Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants	NF EN 197-1	2009
NF P18-545	Granulats – Eléments de définition, conformité et codification	XP P 18-545	2011

FIGURE 17 – Liste chronologique des normes françaises et européennes concernant des produits ou usages avec cendres volantes de charbon [Sow, 2016]

La norme NF 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 5,0 % 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 0,10 % en masse.
- Teneur en anhydride sulfurique SO_3 (EN 196-2) : elle ne doit pas excéder 3,0 % en masse.
- Teneur en oxyde de calcium libre (EN 451-1) : elle ne doit pas excéder 1,0 % 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.
- Stabilité (EN 196-3) : l'expansion, déterminée sur un ciment préparé avec 50 % en masse de cendres volantes et 50 % en masse de ciment ne doit pas excéder 10 mm.
- Masse volumique (EN 196-6) : elle ne doit pas s'écarter de plus de $\pm 150 \text{ kg/m}^3$ de la valeur moyenne déclarée par le producteur.

— Technique routière :

Les cendres volantes peuvent être utilisées en technique routière. Cependant, cette application demande de très grandes quantités de cendres volantes, bien plus grande que ce qui peut être écoulé dans l'industrie cimentière. L'utilisation des cendres volantes sur un chantier doit être réalisée sur des périodes relativement courtes et discontinues. Les cendres volantes doivent alors être fournies par un terril à proximité du chantier. En France, les cendres volantes de charbon ont été utilisées pour réaliser le noyau du TGV et des voies ferrées [Uliège, 2020].

— Stabilisation/solidification de déchets :

De nombreux procédés existent pour piéger les déchets toxiques de matériaux industriels. Une de ces méthodes employée est la stabilisation de ces déchets. La stabilisation de déchets avec des cendres volantes a un avantage économique considérable. Le procédé de stabilisation consiste à mélanger le matériau avec de l'eau, des cendres volantes 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 sont généralement [Uliège, 2020] :

- 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 favorisant ce type de liaisons.

— Valorisation des sols :

Les cendres volantes peuvent également être utilisées dans l'amendement des sols ou le soil-mixing [Uliège, 2020].

3.7 Propriété du mortier à l'état frais

Ouvrabilité :

Afin de tester la demande en eau, du ciment mixte et des cendres volantes de charbon ont été utilisés. Le ciment est un mélange entre le ciment Portland et le calcaire avec quelques minéraux argileux. Il est broyé à une finesse légèrement supérieure à celle du ciment Portland normal. Les cendres volantes sont fournies par la centrale électrique de Mae Moh. Pour les différentes proportions de mélange de mortier de base, la demande en eau a été déterminée en suivant les procédures décrites dans la norme ASTM C807 avec un rapport L/S fixe de 1/3 et une teneur en eau ajustée pour donner la consistance spécifiée (étalement constant). Pour tous les mélanges de mortier, le rapport E/C est déterminé en suivant les procédures décrites dans la norme ASTM C109 [Chindaprasirt et al., 2005].

Les résultats pour la demande en eau sont donnés à la TABLE 5 :

Mélanges	E/C
0 % de cendres volantes	0,60
20 % de cendres volantes	0,58
40 % de cendres volantes	0,56

TABLE 5 – Demande en eau en fonction du taux de substitution des cendres volantes [Chindaprasirt et al., 2005]

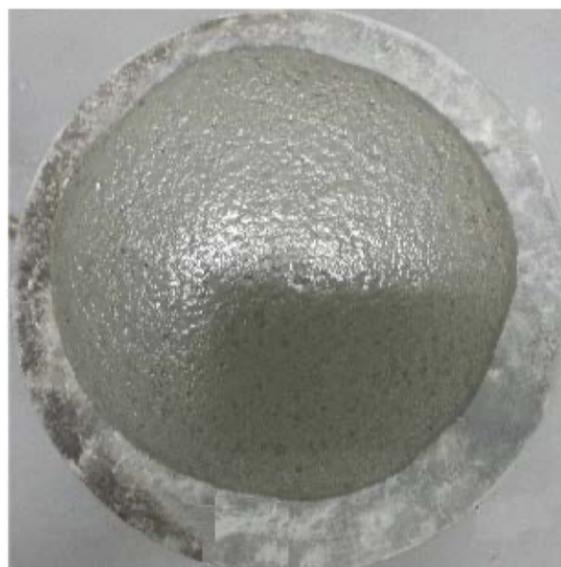
Les résultats indiquent que les besoins en eau des mélanges de mortier diminuent avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes. De plus, les résultats indiquent que l'inclusion de cette cendre volante particulière

dans le mortier de maçonnerie n'affecte pas négativement les performances d'un plastifiant couramment utilisé [Chindaprasirt et al., 2005].

L'utilisation de cendres volantes peut être un moyen potentiel d'augmenter l'ouvrabilité du mortier, ce qui est bénéfique pour les travaux de maçonnerie où l'application et le nivellement du mortier sont plus faciles avec une meilleure consistance plastique. Une comparaison d'écoulement montrant la consistance lisse et plastique du mortier avec les cendres volantes est illustrée à la FIGURE 18. Le ciment de maçonnerie utilisé dans cette étude est classé MC 12,5 (EN 413-1). Le ciment de maçonnerie contient au minimum 40% clinker de ciment Portland et une résistance à la compression entre 12,5 MPa à 32,5 MPa lorsqu'il est testé selon EN 196-1. Le mortier est préparé avec un rapport L/S de 1/3. Les taux de substitution du ciment par des cendres volantes de charbon sont 0%, 10%, 20%, 30%, 40% et 50% [Balakrishnan et al., 2017].



(a) Mortar with 0% fly ash



(b) Mortar with 50% fly ash

FIGURE 18 – Étalement du mortier frais en fonction de la teneur en cendres volantes [Balakrishnan et al., 2017]

L'utilisation des cendres volantes augmente l'ouvrabilité du mortier, ce qui est bénéfique pour un mortier de maçonnerie. Le mortier d'enduit doit avoir une meilleure ouvrabilité que le mortier de maçonnerie. L'introduction des cendres volantes n'affecte pas les performances du mortier de maçonnerie [Balakrishnan et al., 2017, Chindaprasirt et al., 2005].

Teneur en air :

Pour les mortiers d'enduit et de brique, la teneur en air a été testée. La teneur en air du mortier a été déterminée en suivant les procédures décrites dans la norme ASTM C185. Dans cette étude, la teneur en air de trois mélanges de mortier a été étudiée. Le ciment et les cendres volantes de charbon utilisés sont les mêmes que pour le test de demande en eau ci-dessus. Les rapport E/C et L/S sont également identiques. Un ciment Portland ordinaire (OPC) a été également utilisé en plus du ciment mixte (MC). Ces mortiers contiennent respectivement 0 % (OPC), 20 % (20 F0) et 40 % (40 F0) de cendres volantes [Chindaprasirt et al., 2005]. Les résultats obtenus sont représentés à la FIGURE 19.

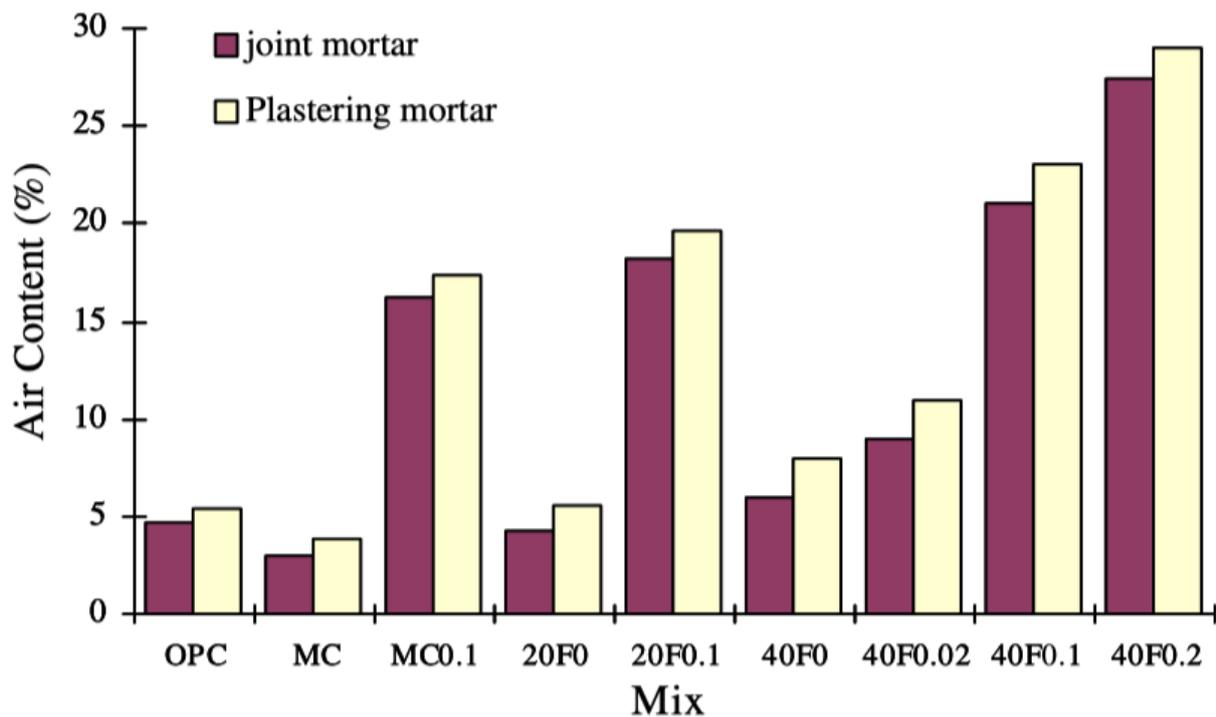


FIGURE 19 – Teneur en air en fonction du taux de substitution des cendres volantes [Chindaprasirt et al., 2005]

Les petites bulles d'air contenues dans le mortier contribuent au roulement des particules et peuvent fournir une bonne maniabilité. En pratique, un mélange de mortier contenant une quantité appropriée d'air peut être répandu et travaillé facilement par un maçon.

Lorsque la cendre volante est utilisée, la teneur en air augmente. La teneur en air du mortier de référence est de 4,7 % pour les joints de brique et 5,4 % pour le plâtrage. Les teneurs en air du mortier 20 F0 et 40 F0 sont respectivement de 4,3 % et 6,0 % pour les joints de brique et de 5,6 % et 8,0 % pour le plâtrage. Le mortier de maçonnerie a une teneur en air à chaque fois un peu inférieure à la teneur en air du mortier d'enduit. Ces résultats impliquent que l'utilisation des cendres volantes comme remplacement partiel du ciment mélangé est bénéfique et permet d'économiser sur l'agent d'entraînement de l'air ou le plastifiant. Lorsqu'un plastifiant ou un agent d'entraînement de l'air est utilisé, il faut veiller à ce que leur quantité ne soit pas excessive (même dans le dosage recommandé). Un excès d'air contenu réduirait la résistance et les caractéristiques de liaison [Chindaprasirt et al., 2005, Balakrishnan et al., 2017].

Temps de prise :

Pour les différentes proportions de mélange de mortier de base, la teneur en air a été déterminée en suivant les procédures décrites dans la norme ASTM C807 avec un rapport L/S fixe de 1/3 et une teneur en eau ajustée pour donner la consistance spécifiée. Pour tous les mélanges de mortier, le rapport E/C est déterminé en suivant les procédures décrites dans la norme ASTM C109. Le ciment et les cendres volantes de charbon utilisés sont les mêmes que pour le test de demande en eau ci-dessus [Chindaprasirt et al., 2005].

Les résultats pour le temps de prise sont donnés à la TABLE 6 :

Mélanges	Temps de prise initial (minutes)	Temps de prise final (minutes)
0 % de cendres volantes	200	256
20 % de cendres volantes	210	270
40 % de cendres volantes	220	283

TABLE 6 – Temps de prise en fonction du taux de substitution des cendres volantes [Chindaprasirt et al., 2005]

L'incorporation de cendres volantes dans le mélange de mortier entraîne une augmentation des temps de prise. Des temps de prise retardés, en particulier le temps de prise initial, peuvent être bénéfiques dans un climat tropical chaud. La cuisson précoce du mortier à chaud peut entraîner la fissuration du mortier de maçonnerie. Il est également intéressant de noter que, si l'utilisation de plastifiant entraîne une réduction de la teneur en eau des mélanges de cendres volantes, cela n'entraîne pas un raccourcissement du temps de prise initial comme observé pour le mortier en ciment mélangé [Chindaprasirt et al., 2005, Balakrishnan et al., 2017].

3.8 Propriété du mortier à l'état durci

Résistance mécanique :

Les tests de résistance à la compression sont effectués pour différentes périodes de durcissement de 7, 28 et 90 jours en utilisant des échantillons de cube de 50 mm (FIGURE 20) selon la norme BS EN 196-1. Pour chaque mélange, trois échantillons ont été fabriqués et testés. Le ciment de maçonnerie (MC 12,5) utilisé est le même que pour le test d'étalement ci-dessus. Les rapport L/S est également identique. Les résultats de résistance à la compression sont donc une moyenne des trois valeurs obtenues. Après 24 heures, les cubes sont démoulés et durcis à l'eau à $27 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à l'âge du test. L'essai de résistance à la compression a été effectué en suivant la méthode stipulée dans ASTM 109 [Balakrishnan et al., 2017].

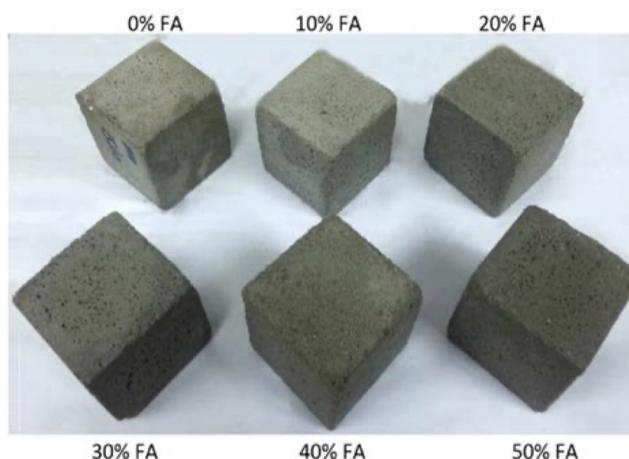


FIGURE 20 – Cubes de mortier avec différentes quantités de cendres volantes [Balakrishnan et al., 2017]

La résistance à la compression du mortier de maçonnerie contenant divers niveaux de cendres volantes est présenté sur la FIGURE 21. Comme attendu, à un âge précoce, la résistance à la compression du mortier diminue avec l'augmentation du taux de substitution des cendres volantes. Ce comportement a changé avec le temps de durcissement. À l'âge de 7 jours, par exemple, on constate que le mortier de maçonnerie contenant 10 % de cendres volantes a acquis presque la même résistance à la compression que le mortier ordinaire. Cependant, à 28 jours de durcissement, le mortier contenant 10, 20, 30 et 40 % de cendres volantes dépassait la résistance à

la compression du mortier ordinaire. À l'âge de 90 jours, le mélange de mortier contenant 50 % de cendres volantes atteignait 16,2 MPa tandis que le mortier ordinaire ne gagnait en même temps que 13,0 MPa. Cela indique que le développement de la résistance à la compression du mortier avec des cendres volantes nécessite un temps de durcissement plus long par rapport au mortier ordinaire sans aucune cendre [Balakrishnan et al., 2017].

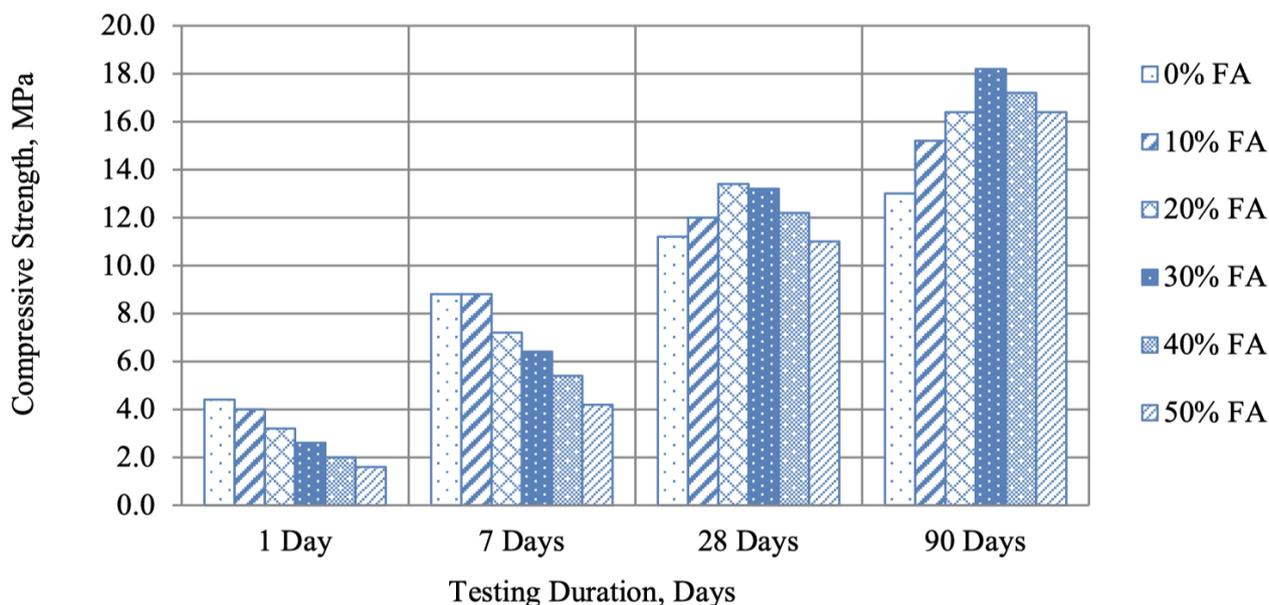


FIGURE 21 – Résistance en compression du mortier durci contenant différents taux de substitution de cendres volantes et à différents temps de durcissement [Balakrishnan et al., 2017]

Ce graphique permet de constater que le mortier de cendres volantes rattrape sa résistance assez rapidement. L'augmentation continue de la résistance a été attribuée au comportement pouzzolanique des cendres, qui persiste à réagir avec le ciment pour produire de l'hydrate de silicate de calcium en présence d'eau [Balakrishnan et al., 2017].

Porosité accessible à l'eau :

La porosité ouverte correspond au rapport du volume total des pores ouverts dans un corps poreux à son volume apparent. Les essais de porosité accessible à l'eau s'appuient sur la norme NF P18-459. Cette norme consiste à déterminer, en pesant la masse d'un corps sec, sa masse lorsqu'il est saturé en eau et son volume apparent par pesée hydrostatique. Les éprouvettes réalisées sont conservées dans l'eau à 20 °C sont mises à saturation sous vide avec de l'eau. Ensuite, la masse de l'air est déterminée par une simple pesée et la masse de l'eau est mesurée par pesée hydrostatique. Après ces pesées, les éprouvettes sont placées dans une étuve à 105 °C jusqu'à que la masse sèche des éprouvettes soit constante. La porosité accessible à l'eau peut alors être calculée. Les essais sont réalisés sur au moins 3 éprouvettes cylindriques de 11 cm de diamètre et de 5 cm de haut. Les pesées sont réalisées à l'aide d'une balance précise à 0,01g près [Sow, 2016].

La porosité ouverte est directement liée à la composition du béton et à sa formulation, notamment au rapport E/C. La porosité permet de nous donner une idée de la caractéristique intrinsèque du réseau poreux des bétons [Sow, 2016].

L'étude de la porosité sur du béton a été réalisée en choisissant sept ciments différents qui ont été fabriqués par broyages séparés des constituants [Sow, 2016] :

- CEM II/A-P15 : ciment Portland avec 15 % de pouzzolane naturelle ;

- CEM II/B-P30 : ciment Portland avec 30 % de pouzzolane naturelle ;
- CEM II/AV15 : ciment Portland avec 15 % de cendres volantes ;
- CEM II/B-V30 : ciment Portland avec 30 % de cendres volantes ;
- CEM IV/A-P10-V25 : ciment Portland avec 10 % de pouzzolane naturelle et 25 % de cendres volantes ;
- CEM V/A-S20-V20 : ciment Portland avec 20 % de laitier de hauts fourneaux et 20 % de cendres volantes ;
- CEM II/A-V*15 : ciment Portland avec 15 % de cendres volantes traitées. Ce ciment est utilisé pour mesurer l'effet des imbrûlés contenus dans les cendres volantes vis-à-vis de la durabilité du béton.

La FIGURE 22 présente les résultats de porosité à l'eau après 1 et 3 mois de cure humide. Les traits rouges représentent les valeurs limites pour les classes de durabilité potentielle selon les critères du guide de la durabilité de l'AFGC AFREM [Sow, 2016] :

- F : Faible ;
- TF : Très faible.

Selon les critères de l'AFGC APREM, les bétons de classe XS1, dont les porosités après 1 et 3 mois de cure sont supérieures à 16 %, sont tous placés dans la gamme " Durabilité potentielle Très Faible ". Les bétons de classe XS3, dont les porosités sont comprises entre 14 % et 16 %, se situent dans la gamme de " Durabilité potentielle Faible " [Sow, 2016].

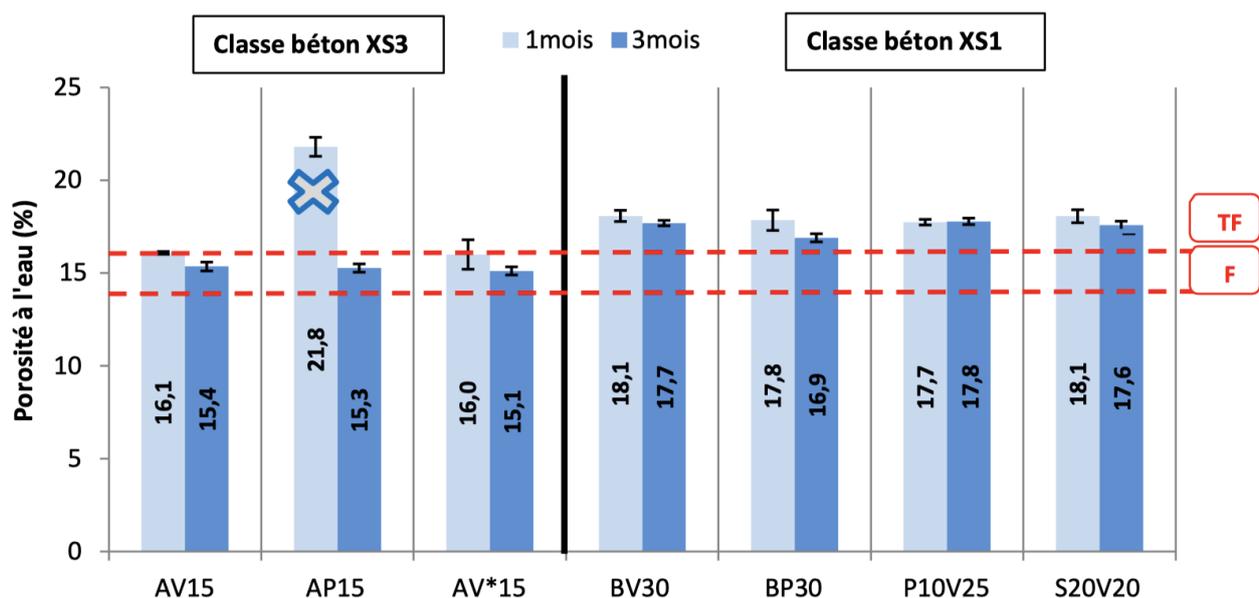


FIGURE 22 – Porosité à l'eau après 1 et 3 mois de cure [Sow, 2016]

D'après les résultats repris à la FIGURE 22, les porosités des bétons d'une même classe sont équivalentes. Les cendres volantes n'entraînent donc ni détérioration, ni amélioration de la porosité par rapport à la pouzzolane couramment utilisée. Les absorptions d'eau des additions semblent avoir également un effet négligeable sur la porosité à l'eau, malgré les différences engendrées à l'état frais [Sow, 2016].

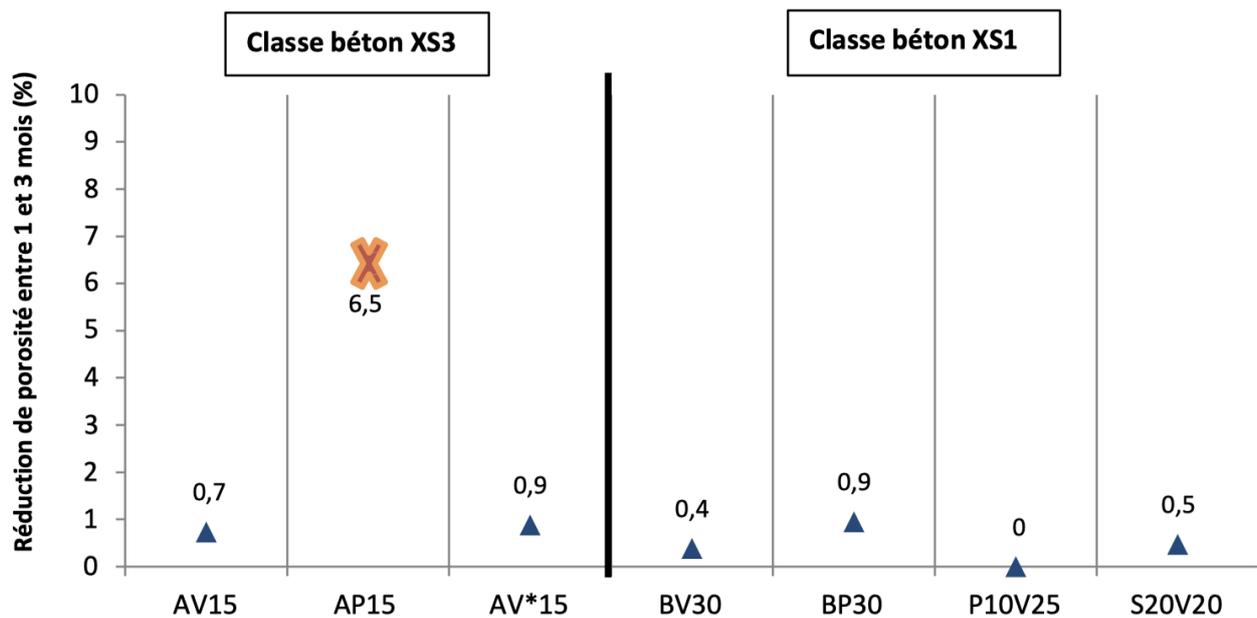
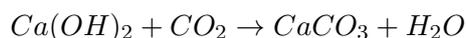


FIGURE 23 – Évolution de la porosité entre 1 et 3 mois [Sow, 2016]

Les porosités à 1 mois sont peu diminuées après 2 mois de cure supplémentaire. Comme on peut le voir à la FIGURE 23, les réductions de porosité sont toutes inférieures à 1 %, à l'exception du béton AP15 dont la valeur à 1 mois est très probablement due à une erreur d'expérimentation ou à des éprouvettes de mauvaise qualité [Sow, 2016].

Carbonatation :

La carbonatation est une réaction chimique de combinaison avec le dioxyde de carbone. Dans cette réaction, les bases sont carbonatées, à l'air par exemple. L'air contient un peu de ce gaz, environ 0,04 % de CO_2 dans notre atmosphère. Lors de la carbonatation des bétons, la Portlandite $Ca(OH)_2$ se carbonate par absorption du dioxyde de carbone de l'air. Le résultat de cette réaction forme du carbonate de calcium $CaCO_3$. Cette réaction n'est possible que si elle a lieu en présence d'eau. La réaction décrite est la suivante [Sow, 2016] :



Le ciment est constitué en majorité par de l'oxyde de calcium CaO . Une fois que l'oxyde de calcium est gâché, il se transforme en hydroxyde de calcium. Cette espèce chimique donne au ciment un pH élevé (environ 12,5). La carbonatation du ciment est une réaction lente qui a lieu entre le dioxyde de carbone atmosphérique (acide) et le ciment (principalement basique). La migration du CO_2 dans une matrice cimentaire s'effectue [Sow, 2016] :

- En phase gazeuse : lorsqu'elle n'est pas entièrement saturée ;
- En phase liquide : sous forme d'ions carbonates lorsqu'elle est saturée en eau.

Plusieurs minéraux constitutifs des matrices cimentaires sont susceptibles de réagir avec les ions carbonates [Sow, 2016] :

- La portlandite $Ca(OH)_2$ (principalement) ;
- Les silicates de calcium hydratés (C-S-H) ;
- Les aluminates ;
- Les sulfoaluminates de calcium hydratés.

Les essais ont été réalisés selon le mode opératoire de l'AFPC-APREM de 1998. Les éprouvettes ont été placées dans une enceinte de carbonatation contenant 4 % de CO_2 . L'épaisseur de la zone carbonatée a été mise

en évidence à l'aide de la phénolphthaléine. Cette épaisseur est mesurée sur des morceaux obtenus par fendage aux échéances de 7, 14, 28 et 90 jours. La FIGURE 24 représente la mise en évidence de la carbonatation des éprouvettes. La zone colorée représente la zone non carbonatée [Sow, 2016].



FIGURE 24 – Carbonatation des éprouvettes après pulvérisation à la phénolphthaléine [Sow, 2016]

Les cendres volantes ou les pouzzolanes naturelles sont généralement connues pour avoir un effet néfaste sur la carbonatation. Ces additions pouzzolaniques crée une réaction pouzzolanique qui réduit la réserve de portlandite, qui est souvent nécessaire au ralentissement de la progression du CO_2 dans la matrice. Les objectifs sont [Sow, 2016] :

- comparer les effets des cendres volantes vis-à-vis de la pouzzolane ;
- observer l'effet des combinaisons dans les ciments ternaires utilisés ;
- voir le rôle des imbrûlés sur la carbonatation accélérée des bétons coulés.

La FIGURE 25 donne les profondeurs de carbonatation, après 3 mois de cure, à 14, 28, 56 et 90 jours d'immersion dans une atmosphère à 4 % de CO_2 [Sow, 2016].

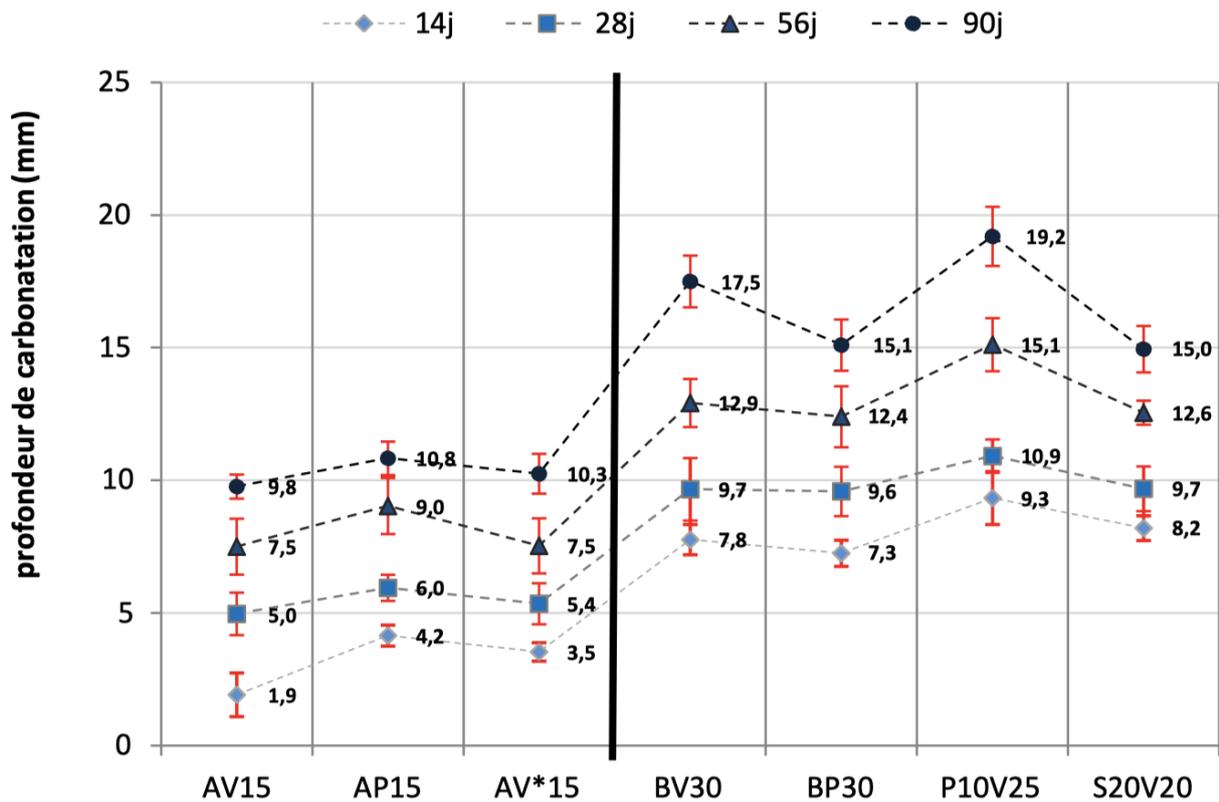


FIGURE 25 – Profondeur de carbonatation après 3 mois de cure [Sow, 2016]

Les résultats de la FIGURE 25 montrent que les cendres volantes ont une légère tendance à détériorer la résistance à la carbonatation face à la pouzzolane naturelle. Cependant, cette tendance n'est pas observable à 15 % de remplacement. De plus, les imbrûlés ne semblent pas avoir d'effet sur la carbonatation. Cependant, à ce taux d'incorporation, il est difficile de garantir cette observation [Sow, 2016].

Comme expliqué précédemment, la carbonatation est une réaction chimique entre l'hydroxyde de calcium et le dioxyde de carbone. Logiquement, plus la teneur en Portlandite est faible dans le matériau, comme pour les bétons qui contiennent des pouzzolanes naturelles ou des cendres volantes de charbon puisque la Portlandite est consommée lors des réactions pouzzolaniques, plus le front de carbonatation avance rapidement. Lorsque la pouzzolane est combinée aux cendres volantes, le résultat semble être défavorable pour la carbonatation accélérée comparé à celles des bétons BP30 et BV30. En effet, cette combinaison donne une moins bonne compacité que le BV30 et une consommation de la portlandite plus élevée que le BP30, l'éprouvette est ainsi plus carbonatée [Sow, 2016].

4 Cendres volantes de biomasse

4.1 Origine et production

La biomasse provient généralement des déchets de bois des forêts, des déchets des exploitations agricoles ou encore des déchets de l'agro-alimentaire [Berra et al., 2015].

Tous les déchets issus de la biomasse ne sont pas tous les mêmes et ils n'ont pas tous le même potentiel. Par exemple, les déchets de bois sont préférés à d'autres biomasses comme les déchets herbacés et agricoles car l'incinération des déchets de bois génère moins de cendres volantes [Ban & Ramli, 2011]. L'objectif est évidemment de produire le moins de déchets possible pour avoir moins de problèmes de stockage et de recyclage.

Au niveau Européen, la production de cendres volantes de biomasse a augmenté d'année en année, comme le montre la TABLE 7. Ces cendres volantes de biomasse sont issues de la biomasse solide utilisée dans les chaufferies dédiées et collectives, les industries et les cogénérations. Les cendres de bois de feu sont exclues.

	2014	2020
Masse de combustible (millions de tonnes)	145	2,8
Masse de cendres volantes de biomasse (millions de tonnes)	270	5,5

TABLE 7 – Production de cendres de biomasse en 2014 et 2020 [Boulday & Marcovecchio, 2016]

Au Portugal par exemple, deux centrales thermiques, utilisant de la biomasse forestière comme principal combustible, sont actuellement en activité. Ces centrales produisent de l'électricité et sont connectées au réseau national. Ces deux centrales vont être rejointes par 17 nouvelles centrales dans un avenir proche. Ces centrales seront des centrales thermiques à biomasse. Cette augmentation du nombre de centrales thermiques engendrera une hausse de la production de plusieurs milliers de tonnes de cendres de biomasse par an. Les autorités devront alors suivre de manière attentive et gérer de manière appropriée cet accroissement de la quantité de cendres [Rajamma et al., 2009, Ban & Ramli, 2011].

Au niveau de la Wallonie, la production de cendres volantes de biomasse est décrite dans l'introduction générale aux FIGURES 2 et 3.

Comme pour les cendres volantes de charbon, l'utilisation des cendres volantes de biomasse comporte de nombreux avantages. En Europe, la demande en énergie renouvelable est croissante dû à la pression sur l'environnement mondial et l'énergie. La diversification de l'approvisionnement énergétique devient indispensable. Les ressources d'énergies renouvelables sont une alternative nécessaire et ont l'avantage d'être neutre en CO₂ [Rajamma et al., 2009].

Les cendres volantes de biomasse sont un sous-produit industriel des industries énergétiques et ont un potentiel important pour une utilisation comme adjuvant minéral pouzzolanique et comme activateur ou liant pour les matériaux composés de ciments. Actuellement, les cendres volantes de biomasse ne sont pas encore beaucoup utilisées commercialement, contrairement aux cendres volantes de charbon. La plupart des cendres volantes de biomasse produites par les centrales électriques sont soit mises en décharge, soit recyclées sur des champs ou forêts, et souvent cela se passe sans aucune forme de contrôle [Rajamma et al., 2015].

De plus, le boom actuel de l'industrie de la construction a causé une augmentation massive de la demande de ciment. Le ciment est le principal matériau constitutif de la production de béton qui est un matériau indispensable dans le domaine de la construction. La production du ciment demande l'utilisation de matériaux bruts tel que le calcaire ainsi que beaucoup d'énergie. La production de ciment dégage également beaucoup de CO₂ dans

l'atmosphère. L'augmentation de la demande de ciment engendre un taux de détérioration de l'environnement plus élevé car [Ban & Ramli, 2011]

- Les activités d'extraction du calcaire augmentent ;
- La demande en combustibles fossiles est plus élevée ;
- Le taux de rejet de gaz à effet de serre est plus élevé.

Pour toutes ces raisons, une gestion durable doit être établie. La quantité des cendres volantes ne fait que croître et leur coût d'élimination aussi. L'objectif est de trouver une solution pour les recycler [Rajamma et al., 2009].

Les cendres volantes de biomasse sont différentes des cendres volantes de charbon car elles proviennent de différents combustibles [Wang et al., 2008]. Les cendres de biomasse diffèrent des cendres volantes de charbon surtout en ce qui concerne leur chimie et leur minéralogie [Rajamma et al., 2009]. En comparaison avec les cendres volantes de charbon, les cendres volantes de biomasse contiennent beaucoup d'oxyde de calcium (CaO), de silice (SiO₂) et d'alumine (Al₂O₃) et peu d'oxyde de fer (Fe₂O₃) [Esteves et al., 2012].

En Europe, aucune norme ne permet actuellement d'incorporer des cendres volantes de biomasse dans les ciments. Seule la Suisse autorise la valorisation des cendres volantes dans les ciments sous réserve de teneurs limites en métaux comme le zinc. La norme EN-450 autorise néanmoins l'utilisation des cendres volantes dans les bétons si elles sont issues de co-combustion de combustibles qui contiennent maximum 50 % de biomasse [Boulday & Marcovecchio, 2016]. La co-combustion a été pensée afin de moderniser les centrales à charbon existantes et de réduire leurs émissions de CO₂. Lorsque la biomasse est introduite dans le combustible de ces centrales, cela permet de diminuer leurs émissions de CO₂ et de réduire leur contribution à l'effet de serre. La biomasse présente également des taux de soufre plus faibles que les combustibles et contribue donc à réduire les émissions gazeuses soufrées. Cependant, la substitution d'une partie du combustible par la biomasse a des impacts sur la conduite des installations. Lorsque les teneurs en biomasse sont inférieures à 10 % en masse, l'installation ne nécessite pas de modification importante. Pour des teneurs plus importantes, des modifications plus importantes sont nécessaires [Caillat et al., 2010].

4.2 Propriétés physiques et chimiques

La qualité et les caractéristiques des cendres volantes de biomasse sont influencées par de nombreux facteurs [Rajamma et al., 2009, Ban & Ramli, 2011] :

Type de biomasse :

Les caractéristiques des cendres volantes de biomasse dépendent de la biomasse utilisée, comme les matières herbacées, le bois, les écorces, ... (FIGURE 26) Le type de biomasse utilisée a un impact sur les propriétés chimiques et physiques des cendres volantes produites. La composition chimique, comme la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃), l'oxyde de fer (Fe₂O₃) et la chaux vive (CaO) varie considérablement en fonction des espèces d'arbres. Les variations dans la composition chimique des cendres produites à partir de différentes espèces d'arbres sont répertoriées dans la TABLE de l'ANNEXE 4 [Rajamma et al., 2009, Ban & Ramli, 2011]. Les performances des cendres volantes de biomasse ligneuse en tant que mélange minéral dépend fortement de ses caractéristiques physico-chimiques qui, à leurs tours, dépendent du type de biomasse ligneuse et du type de combustion adopté dans la centrale thermique [Berra et al., 2015].



FIGURE 26 – Différents types de biomasse [Wikipedia, 2020c]

Type et hydrodynamique des traitements thermiques :

La technologie de combustion a également une forte influence sur la qualité et les caractéristiques des cendres volantes. Par exemple, la combustion peut se faire dans un lit fixe ou dans un lit fluidisé. Différents types de technologies de combustion ont des effets significatifs sur les propriétés physiques des cendres produites. Par exemple, dans un four à grille, les cendres de bois produites sont de nature plus grossières et ont tendance à se déposer à l'intérieur de la chambre de combustion sous forme de cendres de fond. Au contraire, pour les fours à lit fluidisé plus avancés et plus efficaces, les cendres produites sont principalement des cendres volantes avec une granulométrie plus fine avec seulement une petite fraction de cendres grossières retenues dans la chambre de combustion [Rajamma et al., 2009, Ban & Ramli, 2011].

Température de combustion :

La température à laquelle la biomasse a été brûlée a également un impact sur sa qualité et ses propriétés. La température de combustion du bois brut à l'intérieur du four a un impact sur le rendement et les compositions chimiques des cendres de déchets de bois résultantes. En termes de rendement en cendres, la combustion des déchets de bois à des températures plus élevées entraîne généralement une moindre quantité de cendres de déchets de bois produites. Par exemple, lorsque la température de combustion augmente de 538°C à 1093°C, le volume des cendres de déchets de bois diminue de 45 %. Lorsque les déchets de bois sont brûlés à des températures supérieures à 1000°C, cela diminue fortement leur teneur en carbonate car le composé chimique se décompose à de telles températures. Lorsque la température de combustion est inférieure à 500°C, ce sont les carbonates et les composés bicarbonates, en particulier la calcite (CaCO_3) qui prédominent dans les cendres de bois produites et les composés oxydés tels que la chaux vive (CaO) deviennent prédominants dans la phase chimique des cendres de bois produites. Lorsque la quantité des carbonates et de bicarbonates, qui contribue à l'alcalinité des cendres de bois à des températures de combustion plus élevées, est réduite, l'alcalinité des

cendres diminue naturellement. De plus, la composition des éléments métalliques légers tels que le potassium (K), le sodium (Na) et le zinc (Zn) dans les cendres de déchets de bois a diminué avec l'augmentation de la température de combustion [Rajamma et al., 2009, Ban & Ramli, 2011].

L'emplacement de collecte de la biomasse :

L'emplacement où les cendres volantes sont collectées, a un impact sur leur qualité. Par exemple, les cendres peuvent être récoltées dans la partie inférieure de la chambre de combustion ou sous forme de cendres volantes [Rajamma et al., 2009].

4.3 Réactions chimiques

Les réactions chimiques des cendres volantes de biomasse sont très similaires à celles des cendres volantes de charbon. Ces réactions sont détaillées à la SECTION 3.4 ci-dessus.

Toutefois, certaines recherches ont remarqué un avantage considérable à l'utilisation des cendres volantes de biomasse. Les cendres volantes de biomasse atténuent la réaction silico-alkaline qui a lieu entre la pâte de ciment et certains agrégats silicieux. Cette réaction dégrade beaucoup les grandes structures en béton comme les barrages et les ponts. Ces fissurations créent des grandes expansions. Ce phénomène provoque des longues, complexes et coûteuses réparations. Les facteurs qui favorisent la réaction silico-alkaline sont les suivants [Esteves et al., 2012] :

- L'utilisation d'agrégats réactifs
- Une forte alcalinité
- L'eau ou un grand taux d'humidité
- La porosité du béton
- La température extérieure
- Les alcalins introduits par des minéraux supplémentaires
- La quantité d'eau présente

Le gel ASR est produit par la réaction entre les cations alkali (K^+ , Na^+) et le groupe hydroxyl (OH^-) présent dans la solution interstitielle et dans certains agrégats silicieux. Les cendres volantes de biomasse de classe C contenant une grande quantité de CaO (grand taux de calcium) sont jugées utiles pour lutter contre cette expansion [Esteves et al., 2012].

4.4 Avantages et inconvénients

Avantages :

Les cendres volantes de biomasse, comme les cendres volantes de charbon, comportent de nombreux avantages :

- Techniques :
L'incorporation des cendres volantes de biomasse dans le ciment permettra la production de ciment ou de béton plus écologique [Ban & Ramli, 2011].
- Économiques :
Le recyclage des cendres volantes de biomasse permet de réduire les coûts liés à la production de ciment Portland. Les cendres volantes de biomasse offrent une alternative aux ressources minérales naturelles [Rajamma et al., 2009, Ban & Ramli, 2011].
- Environnementaux :
Les cendres volantes de biomasse sont produites dans des centrales électriques. Ensuite, elles sont soit mises dans une décharge, soit recyclées sur des champs ou des forêts et cela sans aucune forme de

contrôle. Comme pour les cendres volantes, les cendres volantes de biomasse contiennent dans leur composition des métaux lourds qui sont toxiques pour l'environnement. Les cendres récoltées au niveau du filtre ont également un niveau de contamination élevé. Cependant, toutes les cendres volantes n'ont pas le même niveau de toxicité. Les cendres volantes provenant de la combustion du bois, par exemple, sont classées comme des déchets non dangereux. L'utilisation des cendres volantes de biomasse sous forme de déchets industriels permet de recycler les déchets, d'éviter une menace toxique croissante de l'environnement et de rationaliser les techniques actuelles d'élimination des déchets en les rendant plus abordables. Les cendres volantes de biomasse permettent également de réduire les impacts environnementaux liés à la production de ciment Portland en diminuant le CO₂ rejeté dans l'atmosphère à cause de leur production. Le ciment Portland est réalisé à partir de matières premières traditionnelles telles que le calcaire et l'argile. L'utilisation des cendres volantes de biomasse permet également la préservation des ressources naturelles de la production de ciment. Les cendres volantes de biomasse sont une source prometteuse d'énergie renouvelable avec un faible coût d'exploitation associé à un carburant renouvelable en continu [Rajamma et al., 2015, Rajamma et al., 2009, Berra et al., 2015, Ban & Ramli, 2011, Esteves et al., 2012].

Inconvénients :

— Techniques :

Les cendres volantes de biomasse encrassent beaucoup les fours où la biomasse est brûlée [Rajamma et al., 2009]. Les cendres volantes de biomasse ne peuvent pas encore être remplacées dans le ciment contenu dans le béton car ce n'est pas encore autorisé dans les normes UNI EN 450-1 et ASTM C 618 régissant la production de ciment et de béton. Les normes actuelles régissant l'utilisation des cendres volantes empêchent l'utilisation de tout matériau non issu de la combustion du charbon. La future extension de la réglementation actuelle à la réutilisation des cendres volantes issues de la combustion de biomasse pure comme adjuvants minéraux dans le béton doit être limitée aux échantillons capables de remplir les exigences physiques et chimiques spécifiées dans les normes l'ASTM C 618 ou UNI EN 450-1. De plus, le contenu de carbone non brûlé et de composés inorganiques dans les échantillons de cendres volantes pourrait affecter de manière significative les propriétés du béton tel que l'ouvrabilité, le temps de prise et la résistance mécanique. La présence d'une quantité considérable de métaux lourds pourrait poser de sérieuses limitations à la réutilisation de ces déchets en ciment [Berra et al., 2015]. Toutes les cendres volantes de biomasse n'ont pas la même réactivité. Certaines recherches démontrent que les cendres volantes venant du bois ont une forme irrégulière contrairement aux autres cendres volantes qui ont une forme plus sphérique. Les plus petites particules de cendres volantes ont une meilleure réactivité vu qu'elles ont une plus grande surface spécifique relative. Les cendres volantes de biomasse contenant beaucoup de fer ont une meilleure réactivité pouzzolanique [Wang et al., 2008].

— Économiques :

Il faut tenir compte des coûts excessifs nécessaires pour les traitements préliminaires de ces cendres volantes (broyage et lavage des cendres) ainsi que pour le traitement des eaux usées résultantes, afin d'éliminer la quantité de métaux lourds libérés par les cendres volantes pendant l'étape de lavage. Le coût de l'élimination par enfouissement de telle cendres peuvent également avoir une implication en terme de coût. A long terme, cette solution n'est pas rentable et il faut trouver un nouveau moyen plus économique d'éliminer ces cendres [Berra et al., 2015, Ban & Ramli, 2011].

— Sanitaires :

Les cendres volantes issues des arbres sont de très fines particules et peuvent facilement être emportées par le vent ce qui peut créer des problèmes respiratoires pour les résidents se trouvant dans les alen-

tours. Les eaux souterraines peuvent également être contaminées par les métaux lourds contenus dans les cendres volantes [Ban & Ramli, 2011].

— Environnementaux :

Certaines cendres volantes contiennent trop de métaux lourds pour être utilisées comme engrais minéraux. Cela pourrait bloquer l'utilisation de ces cendres pour des applications agricoles mais elles pourraient être utilisées dans les matériaux à base de ciment comme adjuvant minéral. Les cendres volantes de biomasse peuvent créer de graves problèmes environnementaux et sanitaires [Berra et al., 2015, Ban & Ramli, 2011]. Les cendres volantes de biomasse, produites en grande quantité, sont également amenées à être enfouies afin d'être stockées. Cet enfouissement peut représenter des impacts environnementaux importants. Dans la pratique, les cendres volantes de biomasse sont enfouies dans des installations de stockage pour déchets dangereux. Dès lors, elles doivent respecter des seuils de lixiviation imposés pour les déchets dangereux. Si elles ne respectent pas ces critères, elles doivent subir une stabilisation préalable qui augmente de nouveau le coût du traitement. Les seuils des comportements à la lixiviation pour l'enfouissement sont décrits à la FIGURE 27 [Davidenko, 2015, Boulday & Marcovecchio, 2016].

Composant	Seuils règlement 2003/33/CE indicatifs pour ISDND	Déchets dangereux en ISDD
	Matière sèche en mg/kg	
As	2	25
Ba	100	300
Cd	1	5
Cr total	10	70
Cu	50	100
Hg	0,2	2
Mo	10	30
Ni	10	40
Pb	10	50
Sb	0,7	5
Se	0,5	7
Zn	50	200
Chlorures	15 000	25 000
Fluorures	150	500
Sulfates	20 000	50 000
COT sur éluat	800	1 000
Fraction soluble	60 000	100 000

FIGURE 27 – Seuils des comportements à la lixiviation pour l'enfouissement [Boulday & Marcovecchio, 2016]

4.5 Applications des cendres volantes de biomasse

Les cendres volantes de biomasse sont actuellement utilisées dans l'agriculture comme engrais pour les champs et les forêts ou comme matériau de remplissage dans la construction de chaussées pour les routes et les autoroutes. Leur utilisation pour les sols agricoles et les forêts pourrait être bloquée à cause de leur toxicité due aux métaux lourds qu'elles contiennent. [Rajamma et al., 2009, Berra et al., 2015, Ban & Ramli, 2011, Esteves et al., 2012]. Les cendres volantes de biomasse pourraient être utilisées dans les matériaux à base de ciment comme adjuvant minéral [Berra et al., 2015]. Les cendres volantes de biomasse sont également utilisées pour l'électricité, le chauffage et le refroidissement. L'utilisation de la biomasse comme carburant permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre (CO_2) [Rajamma et al., 2009, Berra et al., 2015]. L'objectif est d'intégrer les cendres volantes de biomasse dans les cycles naturels [Rajamma et al., 2009].

Un autre type de cendres volantes de biomasse est également utilisé en Afrique : les cendres issues de la calcination des balles de riz. En Afrique, le riz est important dans la sécurité alimentaire des habitants et dans l'économie locale. Chaque année, environ 15 millions de tonnes de riz sont produites et cette production ne cesse d'augmenter. Sous sa forme brute, le grain de riz se trouve entouré d'une enveloppe en forme de balle. Les balles de riz sont séparées du grain de riz lors du processus de décortication. Pour une tonne de riz brut, environ 200 kg de balles de riz sont récupérées. De nombreuses recherches se sont penchées sur le sujet afin de trouver une façon de valoriser ce sous-produit disponible en grande quantité. Les balles de riz peuvent être utilisées comme litière pour les animaux, comme engrais dans les sols agricoles ou comme combustibles lors de la production d'électricité ou de chaleur. Les cendres issues de cette dernière application ont été récupérées et analysées. Les cendres de balles de riz sont composées presque exclusivement de silice (SiO_2) ce qui leur permet d'avoir une haute réactivité pouzzolanique. Grâce à leurs propriétés physiques et chimiques, ces cendres peuvent être utilisées dans les ciments Portland afin d'améliorer les performances mécaniques et la durabilité des mortiers produits. Ces cendres de balle de riz peuvent également être utilisées comme stabilisant pour la terre crue ou pour la fabrication de bétons légers isolants [Uliège, 2020].

4.6 Introduction des cendres volantes de biomasse dans les mortiers/bétons

Malgré que ça ne soit pas encore autorisé, de nombreuses études ont déjà étudié la possibilité d'incorporer des cendres volantes de biomasse dans les matériaux de construction [Rajamma et al., 2009] :

Une première étude constate que l'introduction des cendres volantes de biomasse affecte les caractéristiques à l'état durci du mortier mais ne les compromet pas. Les cendres volantes ont été testées, dans le cadre de cette étude, dans plusieurs applications telles que : des matériaux à faible-moyenne résistance, du béton à résistance faible-moyenne, des produits de maçonnerie, du béton compacté au rouleau, des matériaux pour les routes et des ciments mélangés [Rajamma et al., 2015].

Une seconde étude a étudié l'utilisation des cendres des déchets agricoles en tant que constituants du béton, comme les cendres de riz, les cendres de sciure de bois, les cendres de bagasse et les cendres de combustible d'huile de palme. Ils ont constaté que ces matériaux peuvent être utilisés comme matériaux pouzzolaniques en remplacement du ciment. Cependant, comme mentionné ci-dessus, les cendres volantes de biomasse sont, pour le moment, exclues de l'addition dans le béton selon les normes en raison de son origine non houillère. Pour rappel, la houille est une roche fabriquée à partir de végétaux carbonisés [Rajamma et al., 2009].

Selon la norme EN 12620, les cendres volantes de biomasse pourraient être également utilisées dans les mélanges de béton comme matériau de remplacement partiel du sable et, en partie, comme matériau de remplissage pour le béton non-armé avec aucune catégorie d'exigence [Berra et al., 2015].

Une dernière étude remarque que l'utilisation des cendres volantes de biomasse dans le ciment ou le béton

permet d'obtenir des bétons de qualité structurale et de durabilité dont les performances sont acceptables. Ces cendres, issues du bois, peuvent être utilisées de manière appropriée comme matériau constitutif pendant la production de béton auto-compactant de qualité structurale avec des propriétés mécaniques et de durabilité acceptables [Ban & Ramli, 2011].

4.7 Propriétés du mortier à l'état frais

Ouvrabilité :

Les matériaux utilisés pour la réalisation de la pâte de mortier pour les tests de demande en eau sont les suivants :

- Ciment : CEM I 42,5 R ;
- Sable : Sable siliceux (entre 0,15 et 4,75 mm) ;
- Superplastifiant : Sikament 300 Plus ;
- Cendres volantes de biomasse : Deux types de cendres volantes de biomasse : BFA1 et BFA2. Leur surface spécifique est respectivement de $40 \text{ m}^2/\text{g}$ et $8 \text{ m}^2/\text{g}$ et leur densité apparente est respectivement de $2,59 \text{ g}/\text{cm}^3$ et $2,54 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Le rapport L/S utilisé est de 1/3 et le rapport E/C varie de 0,55 à 0,65 en fonction du taux de substitution des cendres volantes de biomasse afin d'avoir un étalement constant. La FIGURE 28 représente les différentes proportions utilisées pour la réalisation des différents mortiers.

Sample code	Composition					
		BFA	Cement	SP	W/B	Sand
		(g)				
Ref 1	CEM 42.5 R Type 1	0	400	3.00	0.55	1200
10BFA1	90% CEM + 10% BFA1	40	360	3.00	0.55	1200
20BFA1	80% CEM + 20% BFA1	80	320	3.00	0.60	1200
30BFA1	70% CEM + 30% BFA1	120	280	3.00	0.65	1200
10BFA2	90% CEM + 10% BFA2	40	360	3.00	0.55	1200
20BFA2	80% CEM + 20% BFA2	80	320	3.00	0.55	1200
30BFA2	70% CEM + 30% BFA2	120	280	3.00	0.60	1200

FIGURE 28 – Proportions des mélanges des différents mortiers [Rajamma et al., 2015]

La FIGURE 29 ci-dessous montre les valeurs de demande en eau de la pâte de mortier contenant deux types de cendres volantes de biomasse à différents taux de substitution (0%, 10%, 20% et 30%) [Rajamma et al., 2015] :

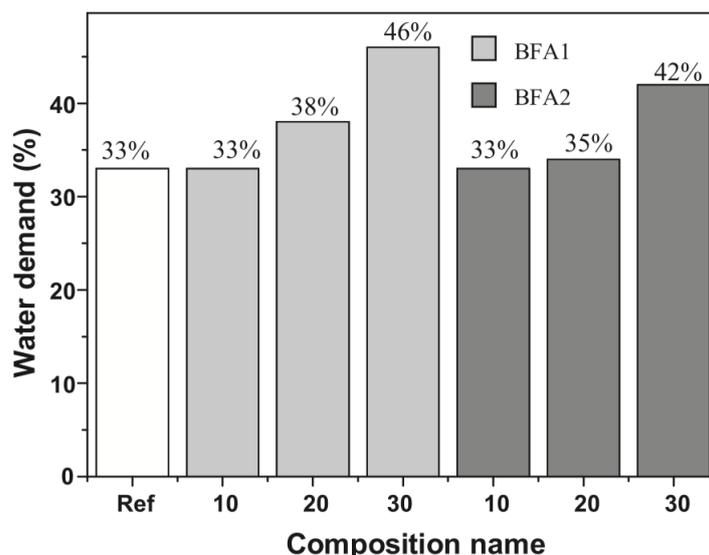


FIGURE 29 – Demande en eau de la pâte de mortier en fonction du taux de substitution des cendres volantes de biomasse [Rajamma et al., 2015]

La demande en eau augmente lorsque le taux de substitution des cendres volantes de biomasse augmente, quel que soit le type de cendres volantes de biomasse utilisées. Cela reflète un impact négatif des cendres volantes sur la pâte de mortier. Jusqu'à 10 % de cendres volantes, l'influence dans la consistance n'est pas visible. Au-delà, la demande en eau augmente de manière significative [Rajamma et al., 2015].

Pour les tests d'étalement, d'autres échantillons de mortier ont été réalisés. Les cendres volantes de biomasse utilisées pour ces échantillons ont été récupérées lors de la combustion de granulés 100 % bois. La densité apparente des cendres volantes de biomasse est de $2,73 \text{ g/cm}^3$, inférieure à celle du ciment Portland qui est de $3,12 \text{ g/cm}^3$. Les cendres volantes de biomasse sont de formes irrégulières. Les chercheurs ont également utilisé un sable siliceux standard CEN de densité apparente égale à $2,66 \text{ g/cm}^3$. Un ciment Portland ordinaire CEM I 52,5 N de densité apparente de $3,12 \text{ g/cm}^3$ et un sable siliceux standard CEN de densité apparente de $2,66 \text{ g/cm}^3$ sont également utilisés. Le rapport E/C de 0,5 est constant et le rapport L/S est de 1/3 [Zhao et al., 2018].

La FIGURE 30 ci-dessous montre les valeurs d'étalement de la pâte de mortier contenant des cendres volantes de biomasse à différents taux de substitution (0%, 10%, 20%, 30% et 50% en masse) et du ciment Portland ordinaire CEM I 52,5 N [Zhao et al., 2018] :

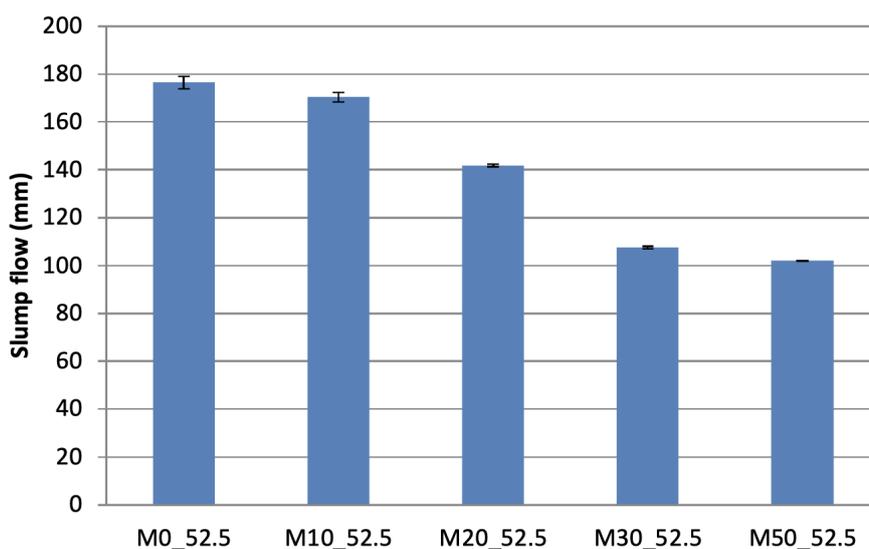


FIGURE 30 – Étalement de la pâte de mortier en fonction du taux de substitution des cendres volantes de biomasse [Zhao et al., 2018]

D'après [Rajamma et al., 2015, Rajamma et al., 2009, Berra et al., 2015, Ban & Ramli, 2011, Zhao et al., 2018] :

- L'ouvrabilité diminue lorsque le taux de substitution des cendres volantes de biomasse augmente. Les caractéristiques physiques des cendres volantes sont en partie responsables de cette tendance. La forme irrégulière et la finesse des particules déterminent la surface spécifique élevée. La surface spécifique des cendres volantes de biomasse est plus élevée que celle du ciment. Ainsi, une partie de l'eau de mélange devait être absorbée par les cendres volantes de la biomasse et, par conséquent, la quantité d'eau libre a diminué, entraînant une perte significative de maniabilité. La présence de matière organique pourrait également favoriser l'absorption des molécules d'eau, diminuant la quantité libre pour le pétrissage. Les cendres volantes de biomasse contiennent une quantité significative de combustibles organiques ce qui induit une grande absorption d'eau. La distribution hétérogène de la taille des particules pourrait également contribuer à cet effet, car elle contrôle la compacité des mélanges.
- L'ouvrabilité peut être facilement contrôlée en adaptant le E/C. Pour assurer un bon mélange, il faut cependant que le rapport E/C ne soit pas inférieur à 0,6.

Masse volumique :

La densité de mortier frais diminue au fur et à mesure que la substitution du ciment par les cendres volantes de biomasse augmente. Cette observation est due à la densité plus faible des cendres volantes de biomasse par rapport au ciment [Zhao et al., 2018, Ban & Ramli, 2011].

Les valeurs des densités spécifiques des différentes cendres volantes de biomasse sont variables. Ces valeurs sont généralement comprises entre 2,14 et 2,60 g/cm³. Elles peuvent également avoir plusieurs valeurs de masse volumique apparente. Ces valeurs sont généralement comprises entre 760 et 830 kg/m³. Les cendres volantes de biomasse peuvent aussi avoir des valeurs de surfaces spécifiques très variables. Certaines ont une surface spécifique autour de 40,29 m²/g et d'autres autour de 7,92 m²/g. Une surface spécifique plus élevée est généralement due à un degré plus élevé d'irrégularité dans la forme des particules et la porosité de sa surface [Ban & Ramli, 2011].

Étant donné que les propriétés physiques des cendres volantes de biomasse ont un effet significatif sur la réactivité pouzzolanique et hydraulique, un degré élevé de variation des propriétés physiques des cendres obtenues à partir de différentes sources exige une caractérisation appropriée des cendres volantes de biomasse avant

d'être incorporées comme matériau de remplacement du ciment dans la production de béton ou de matériaux de construction [Ban & Ramli, 2011].

Temps de prise :

Dans ces études, des cendres volantes de biomasse issues de déchets de bois sont utilisées. Ces cendres volantes sont moins réactives que le ciment dans la pâte de ciment mélangée. La présence de cendres volantes de biomasse, issues de déchets de bois, entraîne un taux de retard d'hydratation du ciment qui contribue également au retard dans la prise de la pâte de ciment mélangé [Ban & Ramli, 2011].

Les cendres volantes de biomasse permettent d'allonger le temps de prise. Lorsque le taux de substitution augmente, le temps de prise augmente, pour un rapport E/C fixe. Quand le temps de prise est prolongé pour les pâtes de ciment, cela représente un attribut pour le ciment mélangé car le temps pendant lequel la pâte peut être travaillée est plus long [Ban & Ramli, 2011, Berra et al., 2015, Rajamma et al., 2009, Rajamma et al., 2015].

De plus, les mélanges contenant des cendres volantes ont une chaleur d'hydratation inférieure à des mélanges contenant 100 % de ciment Portland. Cela s'explique par le taux d'hydratation plus faible des cendres volantes de biomasse comparé au taux d'hydratation du ciment. La température d'hydratation diminue car la quantité relative d'hydratation des produits diminuent vu qu'il y a moins de ciment dans les mélanges. Cet effet permet de développer des chaleurs plus faibles pour pouvoir compenser la contrainte induite par la différence de température telle que le travail de bétonnage en masse. De plus, les fines particules de cendres volantes de biomasse absorbent l'eau, minimisant la portion disponible pour l'hydratation du ciment [Ban & Ramli, 2011, Rajamma et al., 2009, Rajamma et al., 2015].

La FIGURE 31 représente l'évolution de la température pendant l'hydratation de la pâte de ciment :

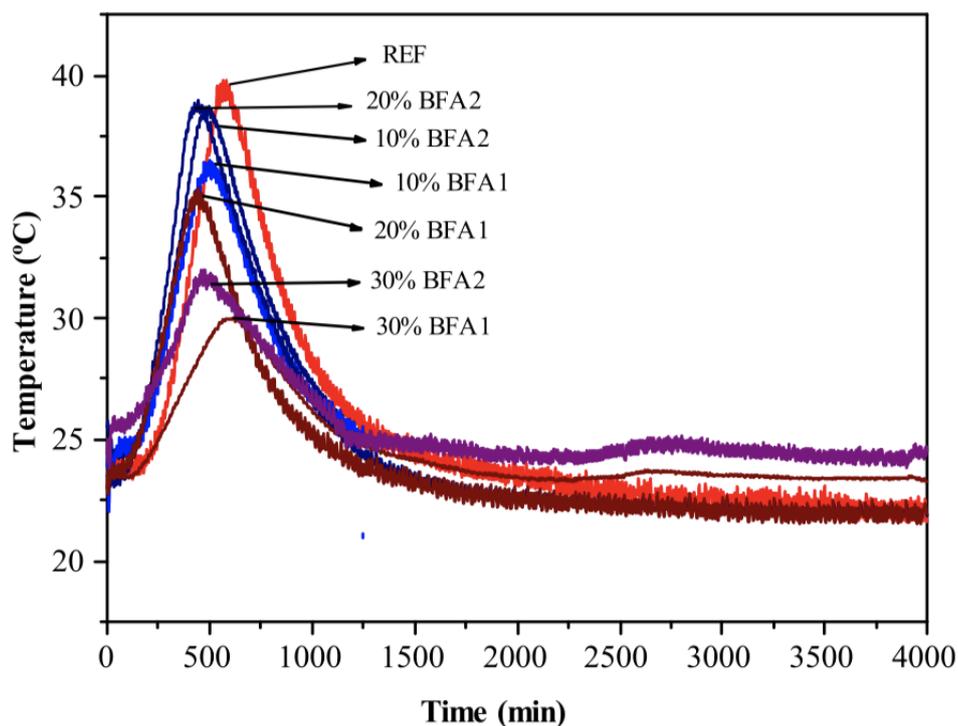


FIGURE 31 – Évolution de la température pendant l'hydratation de la pâte de ciment [Rajamma et al., 2015]

Les cendres volantes de biomasse diminuent également la température au début du processus du durcissement,

ce qui réduit aussi les ASR et contribue positivement à réduire l'expansion [Esteves et al., 2012]. Selon certaines études, l'inclusion de cendres volantes de biomasse contribue de manière significative à la réduction de l'ampleur du mortier lors du séchage. Il s'agit d'un avantage considérable car cela permet de réduire la formation de micro-fissures dans le mélange de béton lors du séchage et de créer des problèmes de résistance par la suite [Esteves et al., 2012]. Les cendres volantes de biomasse étant moins réactives que le ciment, elles permettent de ralentir l'hydratation du ciment, d'allonger le temps de prise et limiter le retrait du mortier durci [Ban & Ramli, 2011]. Le phénomène de gonflement est décrit dans la suite.

4.8 Propriétés du mortier à l'état durci

Résistance mécanique (Flexion/compression) :

La préparation des éprouvettes (40 mm x 40 mm x 160 mm) pour les tests de résistance mécanique a été suivie conformément à la norme EN 196-1. Les résistances à la flexion et à la compression du mortier durci ont été déterminées conformément à la norme EN 196-1. Ces deux tests mécaniques ont été réalisés avec un INSTRON 5585 (capacité de charge de 200 KN) après durcissement 7, 28 et 90 jours dans l'eau. Les différents mélanges de mortier, le rapport E/C et le rapport L/S sont identiques à ceux décrits pour les tests d'étalement ci-dessus [Zhao et al., 2018].

Les FIGURES 32 et 33 présentent les résistances à la flexion et à la compression des mortiers. Ces valeurs sont des moyennes obtenues par trois mesures de résistance à la flexion et six mesures de résistance à la compression. Les mortiers contiennent des cendres volantes de biomasse et du ciment CEM I 52,5 N, à différents taux de substitution (0%, 10%, 20%, 30% et 50%) et à trois temps de durcissement (7, 28 et 90 jours) [Zhao et al., 2018] :

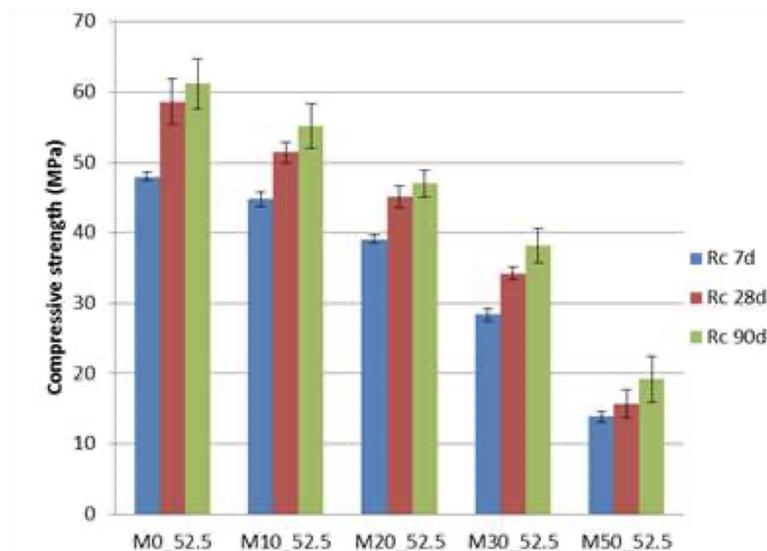


FIGURE 32 – Résistance en compression du mortier durci en fonction du taux de substitution des cendres volantes de biomasse [Zhao et al., 2018]

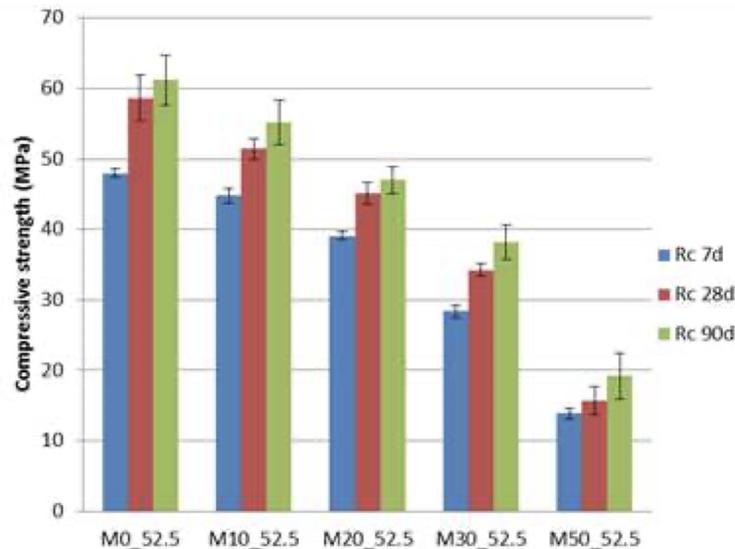


FIGURE 33 – Résistance en flexion du mortier durci en fonction du taux de substitution des cendres volantes de biomasse [Zhao et al., 2018]

D'après [Rajamma et al., 2015, Rajamma et al., 2009, Berra et al., 2015, Ban & Ramli, 2011] :

- La résistance en compression diminue lorsque le taux de substitution des cendres volantes de biomasse augmente. Cela peut s'expliquer car les cendres volantes de biomasse agissent plus comme remplisseur dans la pâte de ciment plutôt que comme un matériau liant. L'accroissement de la quantité de cendres volantes augmente la surface de matériaux de remplissage et diminue la quantité de ciment ce qui diminue la résistance mécanique.
- La résistance après 7 jours est inférieure à celle après 28 jours, qui est également inférieure à celle après 90 jours. Le développement de la résistance mécanique a lieu grâce à l'activité pouzzolanique des cendres volantes de biomasse et leur activité hydraulique.
- Les deux types de cendres volantes de biomasse ont un comportement mécanique similaire.

Ces recherches conseillent d'ajouter jusqu'à 20 % de substitution de cendres volantes de biomasse pour avoir une résistance mécanique acceptable. La résistance mécanique se détériore rapidement lorsque des cendres volantes de biomasse sont substituées au delà de 20 % [Zhao et al., 2018].

Porosité :

Pour ces tests, les pâtes de ciment ont été réalisées avec deux taux de remplacement du ciment Portland par les cendres volantes de biomasse (20 et 40% par masse) et un rapport E/L constant égale à 0,5. Un mélange avec 100 % de ciment Portland ordinaire CEM I a également été utilisé comme référence. Le sable utilisé est un sable normalisé (ASTM C778) [Davidenko, 2015].

L'ajout des cendres volantes de biomasse engendre des changements dans la morphologie de la pâte de ciment. Lorsque le taux de remplacement du ciment par des cendres volantes de biomasse augmente, la porosité de la pâte augmente. La porosité observée dans la pâte est probablement due [Davidenko, 2015] :

- à la cristallisation des produits d'hydratation volumineux dans un milieu déjà légèrement durci ;
- au rapport E/L effectif qui diminue. Lorsque le rapport E/L diminue, cela entraîne une mauvaise dispersion des particules. Dès lors, une large porosité peut être créée à long terme dans les régions où l'eau est piégée entre les floculations des grains.

Absorption d'eau :

Certaines études ont étudié les propriétés d'absorption d'eau du mortier avec des cendres de déchets de bois comme matériau de remplacement partiel du ciment. Les mélanges de mortier sont composés de cendres volantes de biomasse avec une teneur variant entre 5 % et 30 % par incréments de 5 %. Des tests d'absorption d'eau ont été réalisés sur ces échantillons [Ban & Ramli, 2011].

Les résultats obtenus sont représentés à la FIGURE 34. Les valeurs obtenues montrent que l'absorption d'eau du béton avec des cendres volantes de biomasse en tant que matériau de remplacement partiel du ciment augmentait progressivement de 0,14 à 1,05 % avec l'augmentation du niveau de remplacement du ciment de 5 % à 30 %. Lorsque le taux de substitution du ciment par des cendres volantes de biomasse ne dépasse pas 30%, le mélange de mortier produit présente encore des valeurs d'absorption d'eau satisfaisantes. Ces valeurs sont acceptables pour la plupart des matériaux de construction car elles sont inférieures à 10 %, la valeur maximum admissible [Ban & Ramli, 2011].

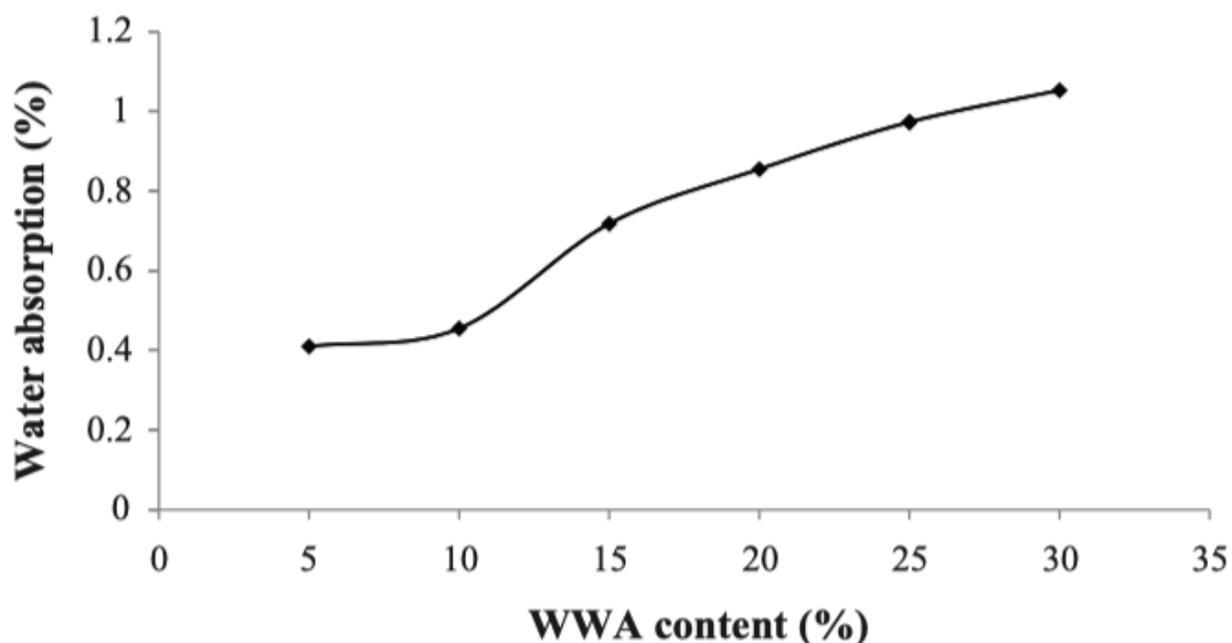


FIGURE 34 – Absorption d'eau (water absorption) en fonction de la teneur en cendres volantes de biomasse (WWA content) dans le mortier [Esteves et al., 2012]

Dès lors, le taux d'absorption d'eau ("water absorption") augmente lorsque le taux de substitution des cendres volantes de biomasse ("wood waste ash content") augmente [Ban & Ramli, 2011].

Gonflement :

Les cendres volantes de biomasse utilisées pour ces tests de gonflement sont de deux types (classe C) : BFA1 et BFA2. Leurs surfaces spécifiques sont respectivement de 28,52 m²/g et 1,74 m²/g. La plus grande valeur peut s'expliquer par un grand nombre de particules imbrulées et la forme irrégulière des particules. Le rapport E/C est de 0,47 en masse et le rapport L/S est de 0,44 en masse.

La dégradation des grandes structures en béton au fil du temps est bien connue. L'une des principales raisons est la réaction qui se produit entre la pâte de ciment et certains agrégats siliceux réactifs, ce qui provoque une

expansion importante qui dépend des matériaux utilisés et des conditions d'exposition de la structure. Ce processus est connu sous le nom de réaction alcaline-silice (ASR) et affecte plusieurs structures dans le monde, y compris les principaux barrages et ponts à long terme. Le comportement expansif a été étudié sur des mortiers où le ciment a été partiellement remplacé (20–30 % en poids) par les cendres volantes de la biomasse [Esteves et al., 2012].

Les cendres volantes de biomasse permettent de réduire l'expansion du mortier. Les résultats obtenus par les chercheurs, conformément à la méthode ASTM C 1260, sont représentés à la FIGURE 35. L'expansion est réduite au fur et à mesure du durcissement. La longueur des barres est mesurée pendant 28 jours. L'expansion du mortier diminue lorsque le taux de substitution en cendres volantes augmente. L'expansion du mortier augmente aussi entre 14 jours de durcissement et 28 jours de durcissement pour la même composition. L'ajout de metakaolin permet de réduire encore plus l'expansion du mortier, il est plus efficace que les cendres volantes. Le metakaolin permet de réduire l'expansion car ses particules sont très fines et sa composition chimique permet une grande réactivité. Néanmoins, les cendres volantes de biomasse sont des particules fines, ce qui engendre une mixture plus compacte et réduit la perméabilité à l'eau. La pâte étant plus compacte, l'introduction d'alkali dans la région interstitielle est réduite, réduisant la réaction ASR et donc réduisant l'expansion [Esteves et al., 2012].

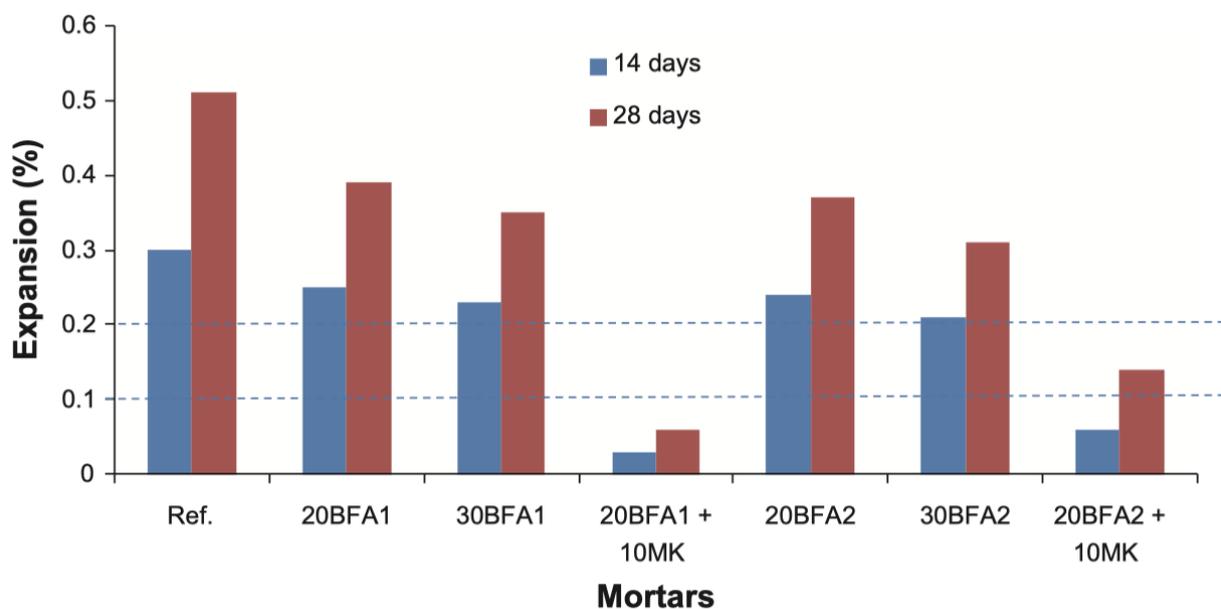


FIGURE 35 – Expansion du mortier à 14 et 28 jours [Esteves et al., 2012]

Retrait :

D'autres recherches ont également étudié les propriétés de retrait au séchage des mélanges de béton fabriqués par l'incorporation de cendres de déchets de bois comme matériau de remplacement partiel du ciment. Pour les mélanges produits au cours de l'étude, les cendres volantes de biomasse ont été utilisées à un niveau de substitution du ciment de 0, 5 %, 8 % et 12 %. Les changements de longueur des échantillons de béton produits ont été surveillés jusqu'à 232 jours. Les résultats obtenus sont représentés à la TABLE 8 ci-dessous [Ban & Ramli, 2011].

Retrait (%)	7 (jours)	232 (jours)
0 % de cendres volantes de biomasse	-0,0092	-0,052
5 % de cendres volantes de biomasse	-0,012	-0,027
8 % de cendres volantes de biomasse	-0,014	-0,013
12 % de cendres volantes de biomasse	-0,0051	-0,044

TABLE 8 – Retrait des échantillons de béton en fonction du taux de substitution et du temps de durcissement [Ban & Ramli, 2011]

À partir des résultats du retrait au séchage contenu dans la TABLE 8, les valeurs montrent que l'inclusion de cendres volantes de biomasse contribue de manière significative à la réduction de l'ampleur du béton lors du séchage. Il s'agit d'un attribut souhaitable qui peut réduire la formation de micro-fissures dans le mélange de béton lors du séchage [Ban & Ramli, 2011].

5 Objectifs et problématiques du TFE

Problématiques :

Comme expliqué précédemment, la quantité de cendres volantes de biomasse produites ne cesse d'augmenter. A l'heure actuelle, ces cendres ne sont pas suffisamment valorisées, surtout dans le domaine de la construction. Les cendres volantes de biomasse doivent pouvoir être valorisées dans la fabrication des mortiers et des bétons.

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. De nombreuses recherches ont déjà commencé à essayer de démontrer leurs potentiels et leurs limites de substitution. Des résultats ont déjà été obtenus pour certains types de cendres volantes de biomasse.

Objectifs :

L'objectif est de continuer ces recherches. Ce travail consiste à déterminer les limites de substitution des cendres volantes de biomasse sur base des résistances mécaniques, des essais à l'état frais (ouvrabilités, temps de prise, ...) et des essais de durabilités obtenues sur des mortiers de maçonnerie et d'enduit.

Ce travail cherche à répondre aux questions suivantes :

- Les résultats expérimentaux correspondent-ils aux résultats expérimentaux précédemment obtenus par d'autres chercheurs ?
- Les résultats obtenus avec des cendres volantes de biomasse sont-ils proches des résultats précédemment obtenus avec des cendres volantes de charbon ? Quels sont les différences ?
- Les cendres volantes de biomasse peuvent-elles être utilisées pour la fabrication de mortier de maçonnerie ou d'enduit ?
- Quel est le taux de substitution maximal admissible du ciment Portland par des cendres volantes de biomasse ? Ce taux de substitution est-il envisageable en pratique ?

Troisième partie

Programme de recherches expérimental

1 Méthodologie

Ce travail de fin d'études concerne le recyclage d'un sous-produit industriel : les cendres volantes de biomasse.

Dans un premier temps, les cendres volantes de biomasse ont remplacé un certain pourcentage en masse de ciment dans un mélange de mortier contenant de l'eau, du ciment CEM I 52,5 N et du sable normalisé conforme à la norme EN 196-1. Les mêmes échantillons sont également réalisés avec des cendres volantes de charbon afin de pouvoir comparer les différences de comportement entre les deux types de cendres.

Ensuite, les cendres volantes de biomasse ont remplacé un certain pourcentage en volume de ciment afin de réaliser deux types de mortier : un mortier de maçonnerie et un mortier d'enduit. Ces mélanges sont composés de cendres volantes de biomasse, d'eau, de ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N et d'un sable jaune naturel.

Pour terminer, les cendres volantes de biomasse vont remplacer un certain pourcentage en volume de ciment afin de réaliser un mortier "bâtard". Ces mélanges sont composés de cendres volantes de biomasse, d'eau, de ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N, de chaux hydratée et d'un sable jaune naturel.

L'ensemble des résultats est obtenu en terme d'ouvrabilité, de masse volumique, de résistance mécanique (flexion et compression), de porosité apparente et d'absorption d'eau par immersion. Les résultats seront analysés et interprétés. L'objectif est de déterminer le pourcentage de substitution maximum, du ciment par des cendres volantes de biomasse, qui est réalisable et viable.

2 Matériaux utilisés dans la composition des mortiers utilisés

Plusieurs matériaux différents ont été utilisés afin de réaliser l'ensemble des échantillons.

Deux types de sable ont été utilisés :

— Sable normalisé :

Il s'agit d'un sable standard CEN conforme à la norme européenne EN 196-1. Ce sable est emballé dans des sacs en polyéthylène de 1350 ± 5 g.

— Sable jaune naturel 0/2 mm :

Les principales caractéristiques chimiques de ce sable sont reprises de la fiche technique située à l'ANNEXE 3 et résumées dans la TABLE 9.

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
Sable jaune 0/2 (%)	95,1	0,7	2,48	0,14	0,15	0,31	1,08	0,079

TABLE 9 – Caractéristiques chimiques des sables

Deux types de ciment ont été utilisés :

— CEM I 52,5 N :

Il s'agit d'un ciment Portland ordinaire belge qui est fabriqué par la Heidelberg CBR Cement Company à Lixhe. Les ciments sont élaborés conformément à la norme européenne EN 197-1. Les principales caractéristiques chimiques de ce ciment sont reprises de la fiche technique située à l'ANNEXE 2 et résumées dans la TABLE 10. La densité apparente du ciment est de $3,10 \text{ g/cm}^3$.

— CEM II/B-M (S-V) 32,5 N :

Il s'agit d'un ciment Portland composé belge qui est fabriqué par la Heidelberg CBR Cement Company à Lixhe. Les ciments sont élaborés conformément à la norme européenne EN 197-1. Les principales caractéristiques chimiques de ce ciment sont reprises de la fiche technique située à l'ANNEXE 1 et résumées dans la TABLE 10. La densité apparente du ciment, obtenue à l'aide d'un essai au pycnomètre au gaz, est de 2,86 g/cm³.

	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Cl	Na ₂ O	K ₂ O
CEM I 52,5 N (%)	20,5	63,6	-	4,8	3,4	2,9	0,04	0,83	-
CEM II/B-M (S-V) 32,5 N (%)	27,6	50,9	-	8,3	3,5	2,6	0,08	1,05	-

TABLE 10 – Caractéristiques chimiques des ciments

Deux types de cendres volantes, à titre de comparaison :

— Cendres volantes dites classiques (CVC) :

Ces cendres volantes proviennent de la combustion de 100% de charbon brûlé et sont stockées au Terril du Hénâ à Flémalle (Belgique). Les principales caractéristiques chimiques de ces cendres volantes sont résumées dans la TABLE 11. La densité apparente des cendres volantes de charbon utilisées est de 2,75 g/cm³.

— Cendres volantes de biomasse (CVB) :

Ces cendres volantes sont fabriquées à la centrale d'Awirs et proviennent de la combustion de 100 % de bois. Les principales caractéristiques chimiques de ces cendres volantes sont résumées dans la TABLE 11. Ces caractéristiques sont cohérentes par rapport aux résultats obtenus dans la littérature [Ban & Ramli, 2011] et repris dans l'ANNEXE 4. La densité apparente des cendres volantes de biomasse utilisées, obtenue à l'aide d'un essai au pycnomètre au gaz, est de 2,61 g/cm³.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	NaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂
CVC (%)	49,3	27,7	7,9	0,1	1,6	1,4	0,8	4	0,3	1
CVB (%)	24,7	5,3	3,2	1	9,3	25,8	2,3	7,9	4,9	0,4

TABLE 11 – Caractéristiques chimiques des cendres volantes

La répartition granulométrique des cendres volantes et du ciment utilisés dans les mortiers est représentée à la FIGURE 36. Ces résultats sont repris des précédentes recherches effectuées par Monsieur Zengfeng Zhao.

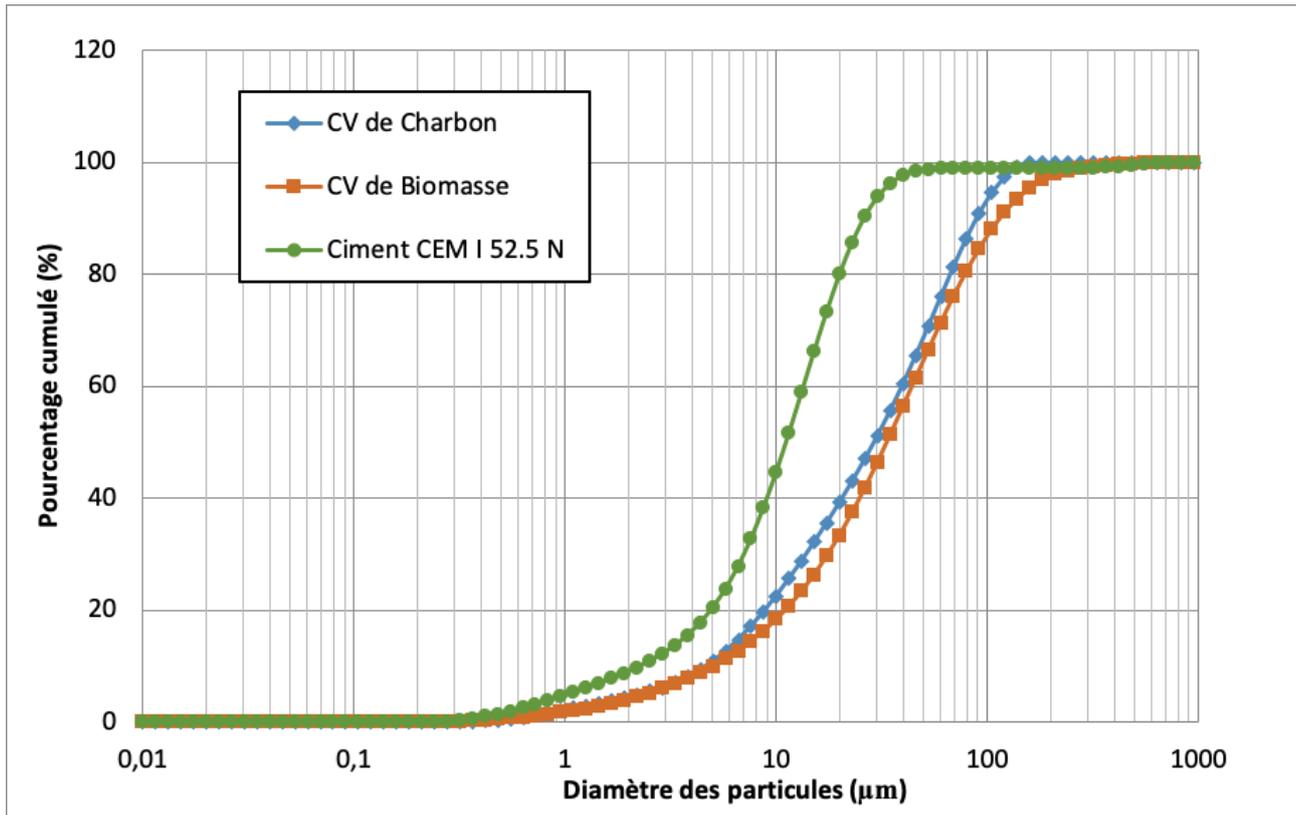


FIGURE 36 – Répartition granulométrique des cendres volantes et du ciment utilisés dans les mortiers

De la chaux hydratée est également utilisée afin de réaliser les échantillons de mortier bâtard. La densité apparente de la chaux hydratée, obtenue à l'aide d'un essai au pycnomètre au gaz, est de $2,26 \text{ g/cm}^3$.

L'eau du robinet de l'Université de Liège (Belgique) a également été utilisée pour réaliser les différentes compositions. Celle-ci est propre et ne contient aucun élément qui pourrait nuire à la qualité des échantillons.

3 Compositions des échantillons de mortier

Un schéma décrivant l'organisation des échantillons réalisés se trouve à la FIGURE 37. De nombreux échantillons de mortiers ont été réalisés avec des compositions différentes, c'est pourquoi il est essentiel de les organiser correctement.

La partie A de la FIGURE 37 correspond à une première série d'échantillons de mortier qui a été réalisée avec du sable normalisé selon la norme EN 196-1 et du ciment CEM I 52,5 N. Une partie du ciment a été substitué par des cendres volantes de charbon (partie A-1) à des taux de substitution de 0 %, 10 %, 20 %, 30 % et 50 % ou par des cendres volantes de biomasse (partie A-2) à des taux de substitution de 0 %, 10 %, 20 % et 30 %.

La partie B de la FIGURE 37 correspond à une deuxième série d'échantillons de mortier qui a été réalisée avec du sable jaune 0/2 mm et du ciment CEM II 32,5/B-M (S-V) 32,5 N. Le ciment de ces échantillons a été substitué par des cendres volantes de biomasse à des taux de substitution de 0 %, 10 % et 20 %. Dans cette série d'échantillons, plusieurs types de mortiers ont été réalisés : du mortier de maçonnerie, du mortier d'enduit et du mortier bâtard. Le mortier bâtard est composé de ciment, des cendres volantes de biomasse et de chaux. Les mortiers d'enduit et de maçonnerie contiennent du ciment et des cendres volantes de biomasse. La différence entre les deux types de ciment se trouve dans leur composition ainsi que le rapport E/L.

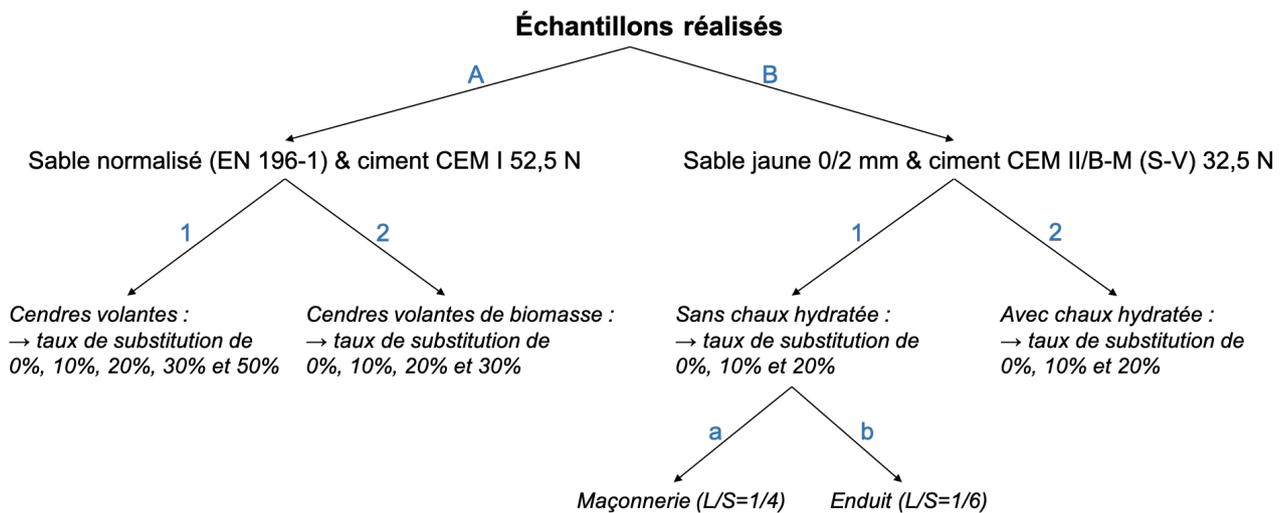


FIGURE 37 – Schéma récapitulatif des échantillons réalisés

3.1 Échantillons partie A

3.1.1 Échantillons partie A-1

Les compositions de ces mortiers sont données à la TABLE 12. Elles ont été établies suivant les conditions suivantes :

- La substitution du ciment CEM I 52,5 N par des cendres volantes de charbon est une substitution en masse.
- Le rapport E/L est fixé à 0,5 où
 - E représenté la masse de l'eau ;
 - L représente la somme de la masse du ciment et de la masse de cendres volantes.
- Le sable normalisé n'absorbe pas l'eau. Il n'est donc pas nécessaire d'ajouter de l'eau pour palier à cette absorption.

- Le rapport L/S est fixé à 1/3 où
 - S représente la masse de sable normalisé ;
 - L représente la somme de la masse du ciment et de la masse de cendres volantes.

Masse (g)	M0	M10	M20	M30	M50
Sable normalisé	1350	1350	1350	1350	1350
Ciment CEM I 52,5 N	450	405	360	315	225
Cendres volantes	0	45	90	135	225
Eau efficace	225	225	225	225	225
E/L	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

TABLE 12 – Composition des mortiers avec des cendres volantes de charbon

La composition nommée "M0" correspond au mélange de ciment Portland pur. La composition nommée "M10" correspond au mélange où 10 % du ciment Portland a été substitué par des cendres volantes (FIGURE 38).

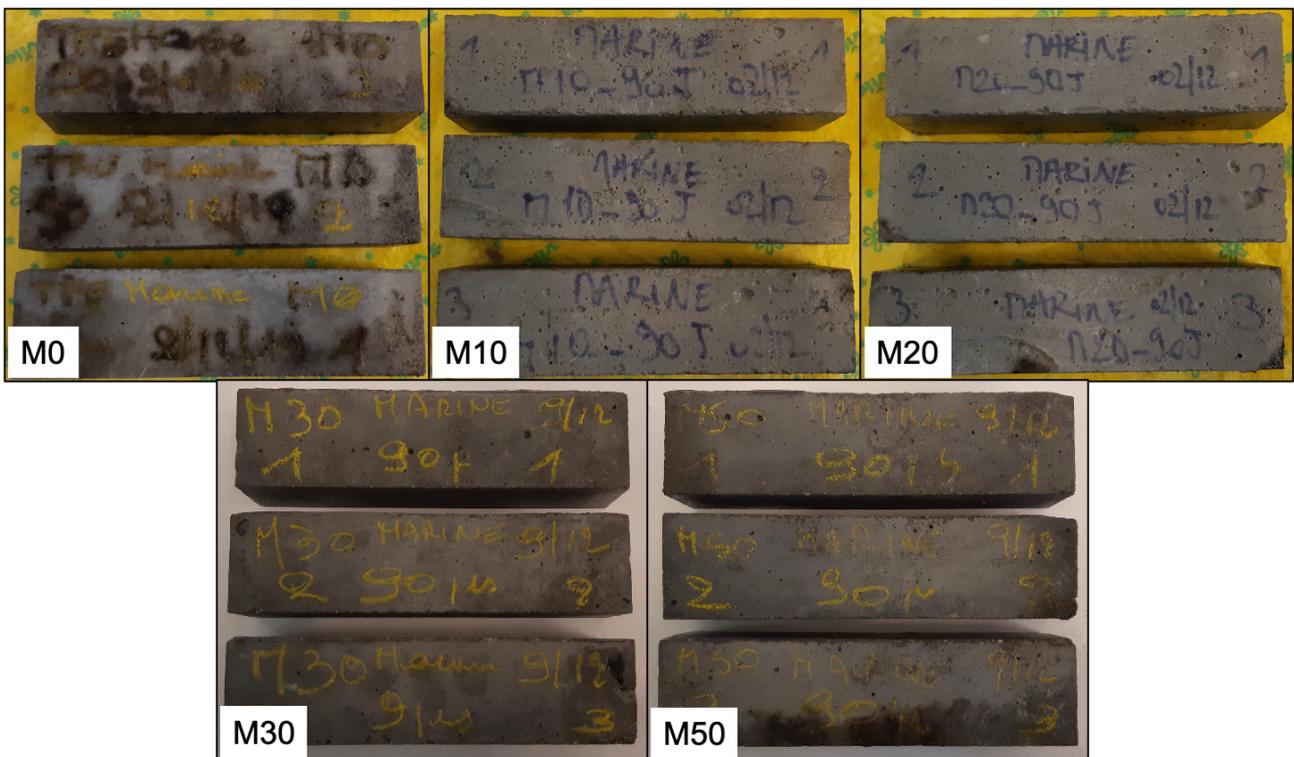


FIGURE 38 – Photos échantillons A-1

3.1.2 Échantillons partie A-2

Les compositions de ces mortiers sont données à la TABLE 13. Elles ont été établies suivant les conditions suivantes :

- La substitution du ciment CEM I 52,5 N par des cendres volantes de biomasse est une substitution en masse.
- Le rapport E/L est fixé à 0,5 où
 - E représenté la masse de l'eau ;

- L représente la somme de la masse du ciment et de la masse de cendres volantes de biomasse.
- Le sable normalisé n'absorbe pas l'eau. Il n'est donc pas nécessaire d'ajouter de l'eau pour palier à cette absorption.
- Le rapport L/S est fixé à 1/3 où
 - S représente la masse de sable normalisé ;
 - L représente la somme de la masse du ciment et de la masse de cendres volantes de biomasse.

Masse (g)	M0	M10	M20	M30
Sable normalisé	1350	1350	1350	1350
Ciment CEM I 52,5 N	450	405	360	315
Cendres volantes de biomasse	0	45	90	135
Eau efficace	225	225	225	225
E/L	0.5	0.5	0.5	0.5

TABLE 13 – Composition des mortiers avec des cendres volantes de biomasse

La composition nommée "M0" correspond au mélange de ciment Portland pur. La composition nommée "M10" correspond au mélange où 10 % du ciment Portland a été substitué par des cendres volantes de biomasse (FIGURE 39).

Comme on peut le remarquer à la TABLE 13, le mélange où 50 % du ciment Portland est substitué par des cendres volantes de biomasse (M50) n'a pas été réalisé. En effet, suite à la réalisation des mélanges avec des cendres volantes de charbon, les tests expérimentaux ont montré que l'ouvrabilité du mélange M50 n'était pas suffisante. De plus, lors de la réalisation du mélange où 30 % du ciment Portland a été substitué par des cendres volantes de biomasse (M30), les tests expérimentaux ont également montré que l'ouvrabilité n'était pas suffisante. Pour ces deux raisons, il n'a pas été jugé nécessaire de réaliser le mélange où 50% du ciment est substitué par des cendres volantes de biomasse (M50).

Des photos de ces échantillons se trouvent à la FIGURE 39 :

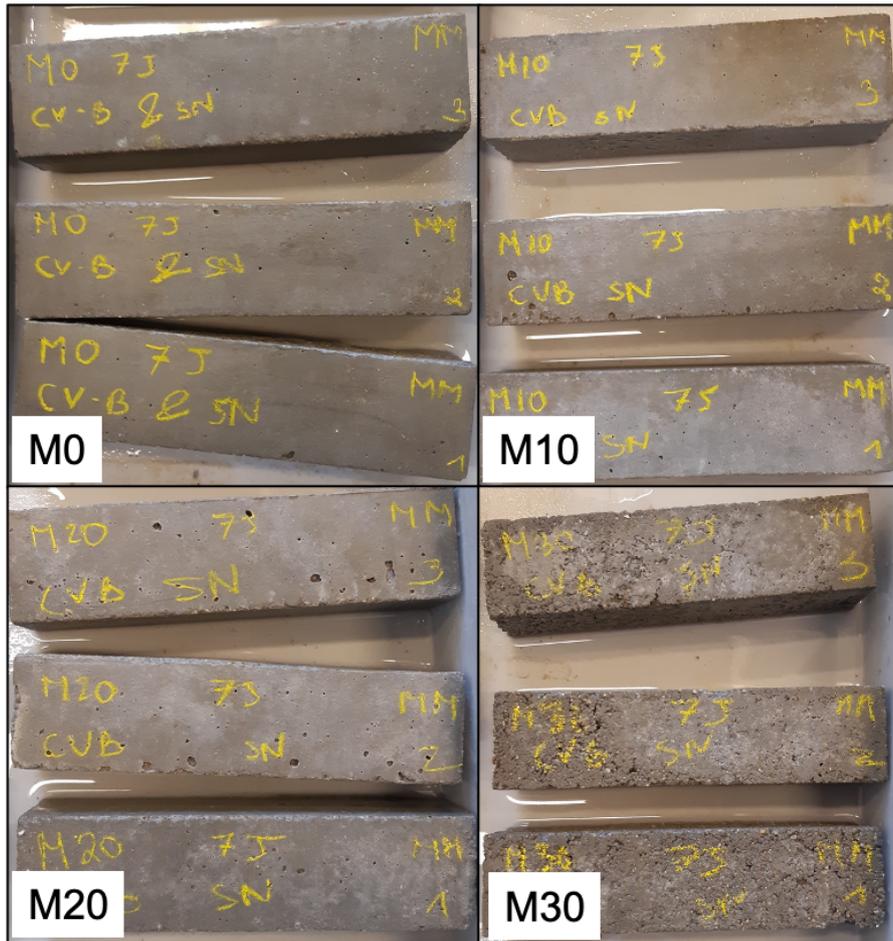


FIGURE 39 – Photos échantillons A-2

3.2 Échantillons partie B

Pour ces échantillons, les conditions de réalisations changent :

- Le sable normalisé est remplacé par du sable jaune 0/2 mm. La raison de ce changement est que le sable normalisé est cher et moins disponible au laboratoire. Il faut cependant faire attention que ce remplacement peut affecter l'ouvrabilité du mortier. En effet, l'ouvrabilité du mortier est affectée par la forme des grains du sable jaune et de la surface poreuse [Tchamdjou et al., 2017] :
 - La forme des grains : La structure poreuse du sable influe sur l'ouvrabilité du mortier frais car le sable absorbe l'eau du mélange et de la pâte de ciment à l'intérieur de ses pores. D'un autre côté, le sable normalisé a une surface lisse et l'absorption d'eau est proche de zéro.
 - La surface poreuse : Les particules du sable jaune sont plus allongées alors que celles du sable normalisé sont plus rondes. Ces agrégats façonnent la rhéologie du mortier car les particules plus allongées entraînent une friction plus élevée et réduisent donc la consistance.
- Afin que le sable jaune n'affecte pas l'ouvrabilité, une certaine quantité d'eau, correspondant au taux d'absorption d'eau du sable jaune, sera ajoutée à chaque mélange. L'objectif n'est pas d'évaluer l'impact du sable jaune sur l'ouvrabilité mais de mesurer l'effet des cendres volantes sur l'ouvrabilité.
- Le ciment CEM I 52,5 N est remplacé par du ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N. La raison de ce changement est que le ciment CEM I 52,5 N est plus souvent utilisé pour le béton de haute performance alors que le ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N est suffisant pour la fabrication de mortier.

- La substitution du ciment par des cendres volantes ne se fait plus en masse mais en volume. La raison de ce changement est que les mortiers sont généralement formulés en volume [Wikipedia, 2020d].
- Le rapport E/L n'est plus fixe, il varie pour obtenir une consistance de mortier convenable. La consistance de 175 ± 10 mm est une exigence pour que les mortiers soient correctement mis en œuvre selon la norme EN 1015-2. L'objectif est de travailler sur le même type de mortier et de garder une consistance constante. La norme ne demande pas d'exigence pour le rapport E/L.

3.2.1 Échantillons partie B-1

Échantillons partie B-1a :

Les compositions de ces mortiers de maçonnerie sont données à la TABLE 14. Elles ont été établies suivant les conditions suivantes :

- La substitution du ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N par des cendres volantes de biomasse est une substitution en volume.
- Le rapport E/L n'est pas fixe. Les échantillons ont été réalisés afin d'obtenir une ouvrabilité suffisante. Ce rapport E/L, où E représente la masse de l'eau et L représente la somme de la masse du ciment et de la masse de cendres volantes de biomasse, a été déterminé pour obtenir un étalement au mini-cône de 175 ± 10 mm.
- Le sable jaune absorbe l'eau. Il est donc nécessaire d'ajouter de l'eau pour palier à cette absorption. La masse d'eau à ajouter correspond à la masse d'eau absorbée par le sable jaune, soit 0,7 % de la masse totale du sable jaune (ANNEXE 3).
- Le rapport L/S est fixé à 1/4 où
 - S représente la masse de sable normalisé.
 - L représente la somme de la masse du ciment et de la masse de cendres volantes de biomasse.

La valeur du rapport L/S est choisie suivant les résultats des précédentes recherches pour le mortier de maçonnerie. Ces valeurs sont reprises à la SECTION 2.1 à la TABLE 1.

Masse (g)	M0	M10	M20
Sable jaune 0/2 mm	1350	1350	1350
Ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N	369	332	295
Cendres volantes de biomasse	0	35	70
Eau efficace	240	257	256
Eau absorbée	9	9	9
E/L	0.65	0.70	0.70

TABLE 14 – Composition des mortiers de maçonnerie avec des cendres volantes de biomasse

Comme précédemment, la composition nommée "M0" correspond au mélange de ciment Portland pur. La composition nommée "M10" correspond au mélange où 10 % du volume du ciment Portland a été substitué par des cendres volantes de biomasse (FIGURE 40).

Comme on peut le remarquer à la TABLE 14, les mélanges où 30 % et 50 % du volume du ciment Portland est substitué par des cendres volantes de biomasse (M30 et M50) n'ont pas été réalisés. La première raison est la même que précédemment. Lors de la réalisation des mélanges précédents, où 50 % (respectivement 30 %) du ciment Portland est substitué par des cendres volantes (respectivement des cendres volantes de biomasse), les tests expérimentaux ont montré que l'ouvrabilité de ces mélanges n'était pas suffisante. La deuxième raison est une question de temps et d'efficacité. Le nombre d'échantillons à réaliser dans le temps imparti étant élevé, un choix a dû être fait pour limiter le nombre de mélanges à réaliser. Ce choix a été fait en accord avec la littérature

et les résultats expérimentaux précédemment obtenus. Pour ces deux raisons, il n'a pas été jugé nécessaire de réaliser les mélanges M30 et M50.

Des photos de ces échantillons se trouvent à la FIGURE 40 :

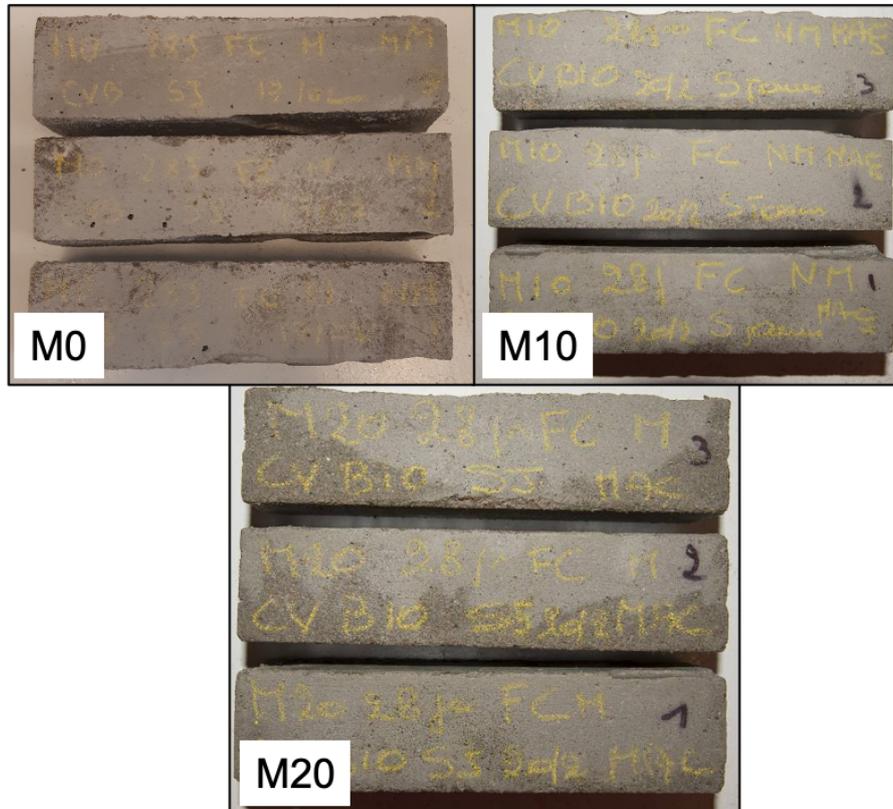


FIGURE 40 – Photos échantillons B-1a

Échantillons partie B-1b :

Les compositions de ces mortiers d'enduit sont données à la TABLE 15. Elles ont été établies suivant les conditions suivantes :

- La substitution du ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N par des cendres volantes de biomasse est une substitution en volume.
- Le rapport E/L n'est pas fixe. Les échantillons ont été réalisés afin d'obtenir une ouvrabilité suffisante. Ce rapport E/L, où E représente la masse de l'eau et L représente la somme de la masse du ciment et de la masse de cendres volantes de biomasse, a été déterminé pour obtenir un étalement au mini-cône de 175 ± 10 mm.
- Le sable jaune absorbe l'eau. Il est donc nécessaire d'ajouter de l'eau pour palier à cette absorption. La masse d'eau à ajouter correspond à la masse d'eau absorbée par le sable jaune, soit 0,7 % de la masse totale du sable jaune (ANNEXE 3).
- Le rapport L/S est fixé à 1/6 où
 - S représente la masse de sable normalisé.
 - L représente la somme de la masse du ciment et de la masse de cendres volantes de biomasse.

La valeur du rapport L/S est choisie suivant les résultats des précédentes recherches pour le mortier d'enduit (extérieur). Ces valeurs sont reprises à la SECTION 2.1 à la TABLE 1.

Masse (g)	M0	M10	M20
Sable jaune 0/2 mm	1350	1350	1350
Ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N	246	222	197
Cendres volantes de biomasse	0	23	47
Eau efficace	251	250	249
Eau absorbée	9	9	9
E/L	1.02	1.02	1.02

TABLE 15 – Composition des mortiers d'enduit avec des cendres volantes de biomasse

Comme précédemment, La composition nommée "M0" correspond au mélange de ciment Portland pur. La composition nommée "M10" correspond au mélange où 10 % du volume du ciment Portland a été substitué par des cendres volantes de biomasse (FIGURE 41).

Comme on peut le remarquer à la TABLE 15, les mélanges où 30 % et 50 % du ciment Portland est substitué par des cendres volantes de biomasse (M30 et M50) n'ont pas été réalisés. Ces raisons sont les mêmes que pour les échantillons de la partie B-1a.

Des photos de ces échantillons se trouvent à la FIGURE 41 :

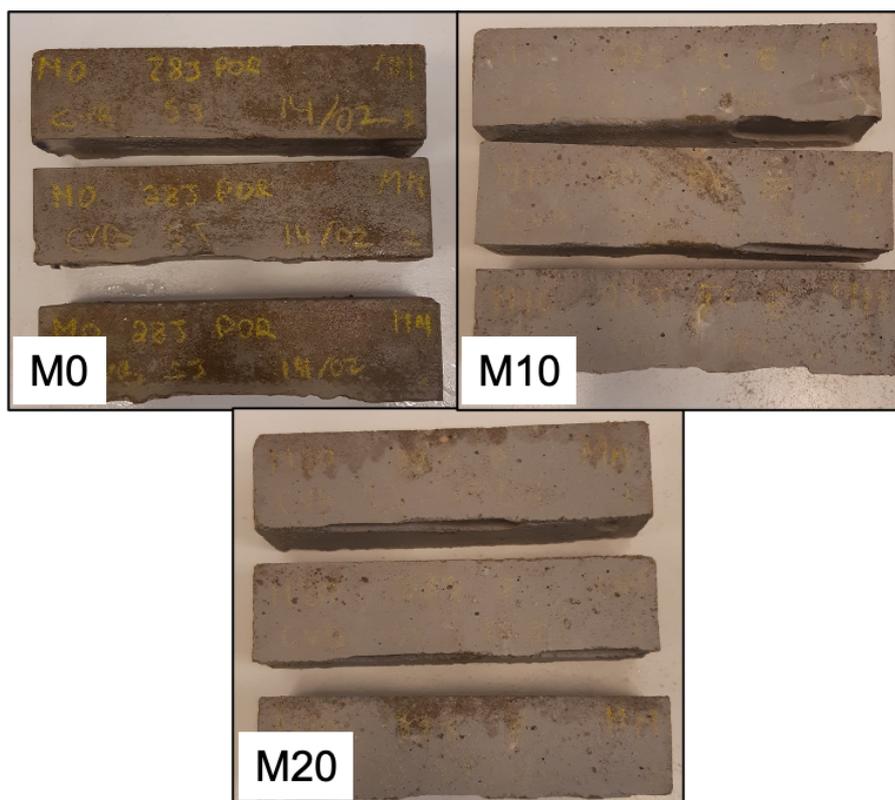


FIGURE 41 – Photos échantillons B-1b

3.2.2 Échantillons partie B-2

Les compositions de ces mortiers bâtards sont données à la TABLE 16. Elles ont été établies suivant les conditions suivantes :

- La substitution du ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N par des cendres volantes de biomasse est une substitution en volume.
- Le rapport E/L n'est pas fixe. Les échantillons ont été réalisés afin d'obtenir une ouvrabilité suffisante. Ce rapport E/L, où E représente la masse de l'eau et L représente la somme de la masse du ciment, de la masse de cendres volantes de biomasse et de la masse de chaux hydratée, a été déterminé pour obtenir un étalement au mini-cône de 175 ± 10 mm.
- Le sable jaune absorbe l'eau. Il est donc nécessaire d'ajouter de l'eau pour palier à cette absorption. La masse d'eau à ajouter correspond à la masse d'eau absorbée par le sable jaune, soit 0,7 % de la masse totale du sable jaune (ANNEXE 3).
- Les compositions sont réalisées sur base de l'ÉQUATION (1) en accord avec la littérature [Courard, 2019]. Pour rappel, la répartition des volumes est la suivante :

1 Volume (Ciment) + **1** Volume (Chaux hydratée) + **6** Volumes (Sable)

Masse (g)	M0	M10	M20
Sable jaune 0/2 mm	1350	1350	1350
Ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N	263	237	211
Cendres volantes de biomasse	0	23	47
Chaux hydratée	192	173	154
Eau efficace	319	303	292
Eau absorbée	9	9	9
E/L	0.70	0.70	0.71

TABLE 16 – Composition des mortiers bâtards avec des cendres volantes de biomasse

Comme précédemment, la composition nommée "M0" correspond au mélange de ciment Portland pur. La composition nommée "M10" correspond au mélange où 10 % du volume du ciment Portland a été substitué par des cendres volantes de biomasse.

Comme on peut le remarquer à la TABLE 16, les mélanges où 30 % et 50 % du volume du ciment Portland est substitué par des cendres volantes de biomasse (M30 et M50) n'ont pas été réalisés. Ces raisons sont les mêmes que pour les échantillons de la partie B-1a et B-1b.

Des photos de ces échantillons se trouvent à la FIGURE 42 :

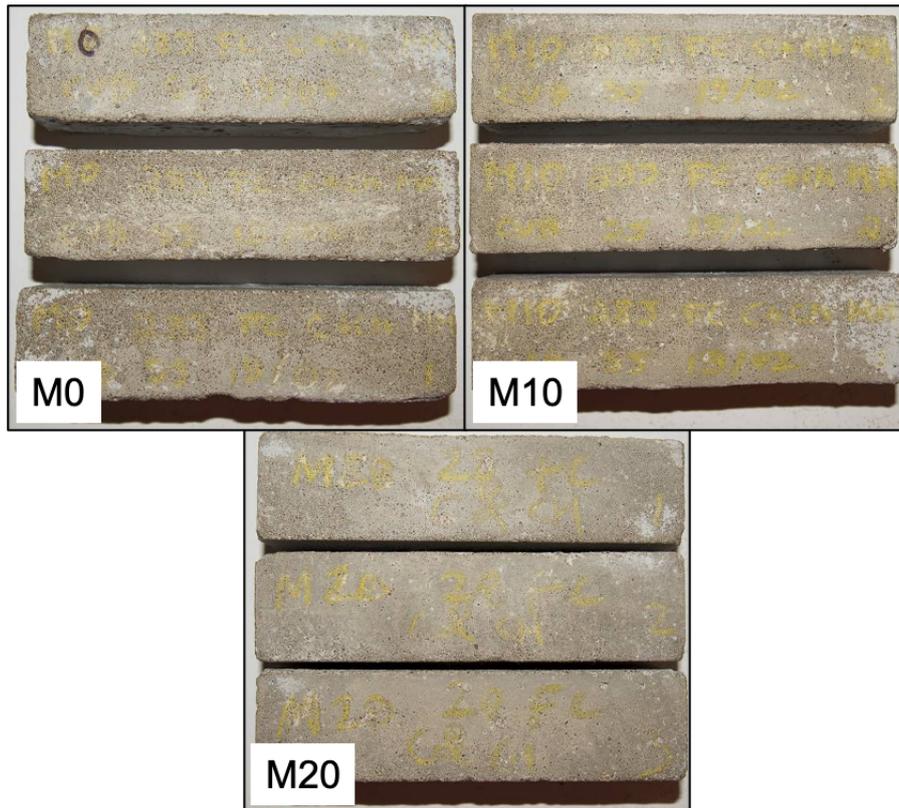


FIGURE 42 – Photos échantillons B-2

4 Réalisation des échantillons de mortier

Les échantillons de mortier ont tous été réalisés en laboratoire dans les mêmes conditions selon la norme EN 196-1. Les étapes de réalisation sont les suivantes :

- (a) Chaque constituant du mortier est pesé avec précision suivant les compositions mentionnées ci-dessus. La balance est précise au centième de gramme près.
- (b) Ensuite, les différents constituants sont mélangés avec un malaxeur selon la norme EN 196-1.
- (c) Le moule destiné à recevoir la pâte de mortier frais est préalablement assemblé, huilé et pesé. Ce moule doit avoir trois compartiments horizontaux permettant la préparation simultanée de trois éprouvettes prismatiques de section transversale de 40 mm x 40 mm et de 160 mm de longueur.
- (d) Une table à choc, conforme à la norme EN 196-1, est utilisée pour tasser le mortier dans le moule.
- (e) Le moule, contenant cette fois-ci le mortier frais, est une nouvelle fois pesé afin de déterminer la masse volumique à l'état frais du mortier.
- (f) Les moules sont alors placés dans une chambre humide (à $21 \pm 2^\circ\text{C}$ et 95 % HR) pour 24 heures.
- (g) 24 heures après, les barrettes de mortier sont démoulées et stockées dans des bacs d'eau qui se situent dans la chambre humide (à 21°C et 90 % HR) pour un temps de durcissement de 7, 28 ou 90 jours.



FIGURE 43 – Étapes de réalisation des échantillons de mortier

5 Descriptions des tests réalisés

5.1 Essai au pycnomètre au gaz

Un pycnomètre au gaz, AccuPyc II 1345 Pycnometer (FIGURE 44), est utilisé afin de mesurer la densité solide des échantillons de chaux hydratée, de ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N et de cendres volantes de biomasse.

Le pycnomètre au gaz utilise la méthode du déplacement de gaz pour mesurer le volume avec précision. Des gaz inertes, comme l'hélium dans notre cas, sont utilisés comme milieu de déplacement. Les étapes de mesure sont les suivantes :

1. L'échantillon est scellé dans le compartiment de l'instrument de volume connu.
2. L'hélium est admis.
3. L'hélium est détendu dans un autre volume interne de précision.

Les pressions observées, d'une part lors du remplissage de la chambre d'échantillon, d'autre part lors de sa décharge dans une seconde chambre vide, permettent de calculer le volume solide de l'échantillon. Les molécules d'hélium remplissent rapidement des pores, même s'ils sont minuscules. Seule la phase solide de l'échantillon déplace le gaz. La division de ce volume par le poids d'échantillon donne la densité de déplacement du gaz [Directindustry, 2020].



FIGURE 44 – Pycnomètre au gaz [Directindustry, 2020]

5.2 Mortier à l'état frais

Étalement au mini-cône :

La consistance du mortier est évaluée à l'aide de la mesure de l'étalement au mini-cône selon la norme NF EN 1015-3. L'objectif de ce test est de déterminer la valeur de l'étalement du mortier frais en mesurant le diamètre moyen de celui-ci suite à l'action d'une table à secousses. L'appareillage est constitué d'un socle, d'un plateau rigide sur lequel est dessiné un disque, un axe horizontal, une came de levage et une tige de levage. Un moule de forme conique est préalablement placé au niveau du cercle dessiné sur le socle. Ce moule est en acier inoxydable ou en laiton et ses dimensions sont les suivantes :

- Hauteur : $60 \pm 0,5$ mm
- Diamètre intérieur à la base : $100 \pm 0,5$ mm
- Diamètre intérieur au sommet : $70 \pm 0,5$ mm

Les parois du moule sont entièrement lisses pour ne pas obstruer le mouvement du mortier à l'intérieur. Une dame est également utilisée afin que le mortier frais soit correctement dispersé à l'intérieur du moule et pour obtenir un remplissage uniforme. Une dame est une baguette rigide de section circulaire non absorbante. Elle mesure environ 200 mm de long et 40 mm de diamètre. La face de damage est lisse et perpendiculaire à son axe. Un pied à coulisse est finalement utilisé pour mesurer le diamètre du mortier frais.

Les étapes de la réalisation de ces mesures sont représentées à la FIGURE 45.

- (a) Avant de commencer chaque essai, le disque, la surface intérieure et les bords du moule sont essuyés avec un chiffon humide. Le moule est ensuite placé sur le socle à l'endroit où le cercle est dessiné.
- (b) Un échantillon de mortier frais est placé à l'intérieur du disque pendant sa période d'ouvrabilité, juste après avoir été mélangé. Le mortier est introduit en deux couches. Chaque couche est compactée par 10 coups de dame. Le moule est maintenu sur le socle pendant toute la durée du remplissage. Une fois le moule rempli, l'excédant est retiré avec un couteau à araser. Le moule est finalement enlevé lentement et verticalement.
- (c) Ensuite, le mortier est étalé sur le disque en réalisant 15 secousses régulières à la table. Les secousses sont verticales et soulèvent la table à secousses en la laissant retomber librement.
- (d) Enfin, le diamètre du mortier est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse dans deux directions perpendiculaires et une direction en diagonale. L'objectif est de déterminer trois mesures afin de pouvoir obtenir le diamètre d'étalement moyen car le mortier ne s'étale pas de la même façon dans les trois directions.



FIGURE 45 – Étapes de réalisation du test au mini-cône

Masse volumique à l'état frais :

La masse volumique apparente du mortier à l'état frais est déterminée selon la norme NF EN 1015-6. Cette mesure est réalisée pendant la procédure d'échantillonnage décrite à la SECTION 4.

La masse volumique apparente du mortier frais, ρ_m , est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_e} \quad (2)$$

où

ρ_m est la masse volumique apparente (kg/m^3);
 m_1 est la masse du moule vide (g);
 m_2 est la masse du moule rempli de mortier frais (g);
 V_e est le volume des trois échantillons (L).

La masse m_1 est mesurée comme montré à la FIGURE 46 (a). La masse m_2 est mesurée comme montré à la FIGURE 46 (b). Les moules sont composés de trois parties de dimension 4 cm x 4 cm x 16 cm. Dès lors, le volume des trois échantillons est égal à :

$$V_e = 3 * (4 * 4 * 16) = 0,768 \text{ L}$$



FIGURE 46 – Étapes de mesure de la masse volumique du mortier à l'état frais

5.3 Mortier à l'état durci

Masse volumique saturée en eau :

La masse volumique des échantillons a également été mesurée après 7, 28 ou 90 jours de durcissement dans la chambre humide. Une fois sortis de la chambre, les échantillons sont pesés. La masse volumique est simplement obtenue en divisant leur masse par le volume de l'échantillon, soit 0,256 L. De cette manière, la masse volumique après une certaine période de durcissement peut être comparée à la masse volumique à l'état frais du mortier afin d'évaluer l'éventuelle variation.

Résistance mécanique - Flexion et Compression :

Les résistances en compression et en flexion des échantillons de mortier durci sont testées à l'aide de la machine INSTRON 5585 (cellule de 250 kN) selon la norme NF EN 196-1 d'août 1995 (FIGURES 47 et 48) .

Le test de résistance en flexion est effectué en premier sur l'échantillon de mortier entier (FIGURE 47). A la fin de cet essai, une fissure apparaît généralement au milieu de l'échantillon. Cette fissure sépare l'échantillon en deux morceaux.

Le test de résistance en compression est ensuite réalisé sur les deux moitiés d'échantillons de mortier (FIGURE 48). A la fin de cet essai, l'échantillon de mortier est en plusieurs morceaux et ne peut plus être utilisé.

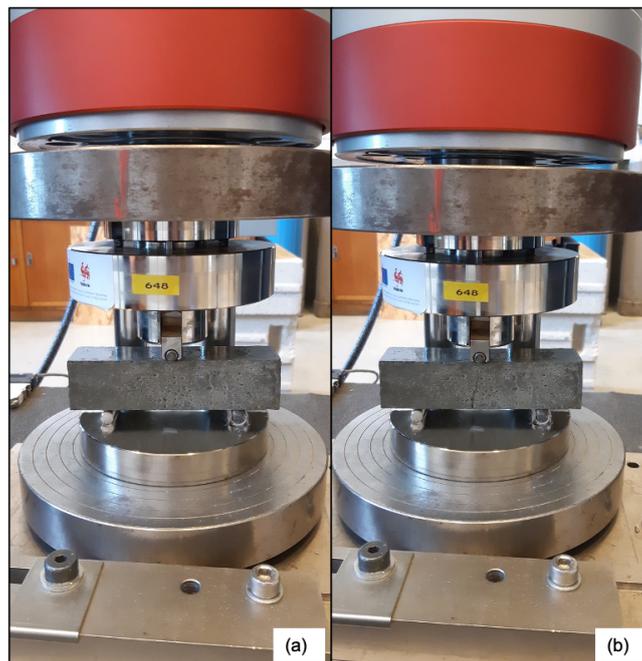


FIGURE 47 – Essai de flexion sur le mortier durci



FIGURE 48 – Essai de compression sur le mortier durci

Pour chaque mélange de mortier différent, trois essais sont à chaque fois réalisés sur trois échantillons identiques pour la résistance en flexion. On dispose alors de deux fois plus d'essais, soit six échantillons, pour le test

de résistance à la compression. La résistance en flexion finale du mortier est obtenue en faisant la moyenne des trois résultats, tandis que la résistance en compression finale est obtenue en faisant la moyenne des six résultats.

Porosité et absorption d'eau par immersion :

Les tests de porosité et d'absorption par capillarité ont été réalisés suivant la norme NBN B15-215. Cette norme concerne les essais sur les bétons mais elle convient aussi pour les essais sur les mortiers.

Après 28 jours de durcissement dans la chambre humide (à 21°C et 95% de HR), les échantillons sont conditionnés 14 jours dans le laboratoire de mortier (à 21 ± 2°C et 60 % ± 10% de HR). Les échantillons sont pesés jusqu'à obtenir une masse constante. Ensuite, les échantillons sont immergés dans l'eau et pesés jusqu'à obtenir une nouvelle fois une masse constante (FIGURE 49). Deux types de pesées sont réalisées : une pesée hydrostatique ($m_{sat,eau}$) et une pesée dans l'air ($m_{sat,air}$). Pour terminer, les échantillons sont séchés à 105 °C et pesés jusqu'à obtenir une masse constante (m_{sec}). Pour chaque mélange, trois échantillons de mortier sont à chaque fois pesés. Le résultat final de chaque pesée est donné par la moyenne des trois valeurs obtenues.



FIGURE 49 – Essai de porosité

Le volume apparent (cm^3) est donné par la différence entre la masse humide dans l'air et la masse humide dans l'eau divisée par la densité de l'eau.

$$V = \frac{m_{sat,air} - m_{sat,eau}}{\rho_w}$$

La masse volumique sèche (g/cm^3) est donnée par le rapport entre la masse sèche sur le volume apparent :

$$\rho_d = \frac{m_{sec}}{V} = \frac{m_{sec}}{m_{sat,air} - m_{sat,eau}} * \rho_w$$

L'absorption d'eau par immersion (%masse) est donnée par la différence entre la masse humide dans l'air et la masse humide dans l'eau divisée par la masse sèche :

$$AE = \frac{m_{sat,air} - m_{sat,eau}}{m_{sec}} * 100$$

La porosité apparente (%volume) est déterminée par l'absorption d'eau par immersion multipliée par la masse sèche et divisée par le volume apparent :

$$n = AE * \frac{m_{sec}}{V} = AE * \rho_d$$

Quatrième partie

Analyse des résultats

1 Essai au pycnomètre au gaz

Les résultats obtenus lors des essais au pycnomètre au gaz (hélium) se trouvent dans les ANNEXES 5, 6 et 7. Ils sont résumés dans la TABLE 17 ci-dessous :

	Masse tare (g)	Masse totale (g)	Masse matériau (g)	Volume total (cm ³)	Densité apparente (g/cm ³)
Chaux hydratée	1,520	2,918	1,398	0,6179	2,2624
Ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N	1,520	4,763	3,243	1,1356	2,8559
Cendres volantes de biomasse	1,520	2,627	1,107	0,4250	2,6050

TABLE 17 – Résultats pycnomètre au gaz

La tare représente la masse de l'élément qui contient le matériau (la chaux hydratée, le ciment ou les cendres volantes de biomasse). La masse totale représente la tare à laquelle on ajoute la masse du matériau. Grâce à ces deux valeurs, la masse du matériau seul peut être obtenue.

Ensuite, cinq mesures sont effectuées afin de déterminer le plus précisément possible le volume occupé par le matériau. A partir de toutes ces données, la densité apparente du matériau est calculée. Ces valeurs sont utilisées pour déterminer les compositions des différents mélanges de mortier.

2 Échantillons partie A

2.1 Mortier à l'état frais

2.1.1 Étalement au mini-cône

L'ouvrabilité est souvent une évaluation qualitative du mortier. Elle est utile pour décrire la consistance des mortiers par le diamètre d'étalement obtenu par le test de l'étalement au mini-cône.

Résultats :

La FIGURE 50 représente l'évolution de l'étalement au mini-cône du mortier frais en fonction du taux de substitution du ciment par des cendres volantes classiques ou des cendres volantes de biomasse. Il faut également noter que le mélange où 50 % de la masse du ciment a été substituée par des cendres volantes (M50) a uniquement été réalisé avec les cendres volantes classiques et pas avec les cendres volantes de biomasse.

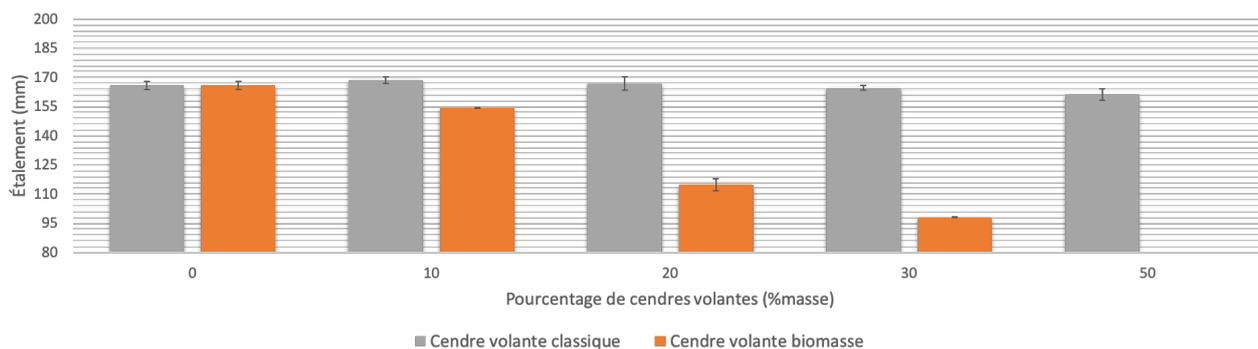


FIGURE 50 – Étalement en fonction du pourcentage de cendres volantes

Pour un rapport E/L constant, on peut remarquer que les valeurs d'étalement diminuent lorsque le taux de substitution du ciment par des cendres volantes classiques ou des cendres volantes de biomasse augmente. L'ouvrabilité est largement plus affectée par les cendres volantes de biomasse. Les résultats correspondent à ceux obtenus par [Zhao et al., 2018]. La surface spécifique des cendres volantes de biomasse est plus élevée que celle du ciment CEM I 52,5 N, ce qui implique que les cendres volantes de biomasse absorbent une quantité d'eau plus importante que le ciment. Au fur et à mesure que la quantité de cendres volantes de biomasse augmente et que la quantité de ciment diminue, l'eau du mélange est de plus en plus absorbée par les cendres volantes de biomasse. Par conséquent, la quantité d'eau libre diminue petit à petit entraînant une perte significative de maniabilité.

Les résultats obtenus correspondent à ceux obtenus par [Rajamma et al., 2015]. Jusqu'à 10 % de substitution en masse du ciment par des cendres volantes de charbon ou des cendres volantes de biomasse (M10), l'influence dans la consistance n'est pas visible. Au-delà, la demande en eau augmente de manière significative.

La perte d'ouvrabilité peut également être évaluée par rapport au mortier de référence (TABLE 18). Pour rappel, le mortier de référence contient uniquement du ciment et ne contient pas de cendres volantes.

Perte d'ouvrabilité (%)	0 %	10 %	20 %	30 %	50 %
Cendre volante classique	0	-2	-1	1	3
Cendre volante de biomasse	0	7	44	69	-

TABLE 18 – Perte d'ouvrabilité par rapport au mortier de référence en fonction du taux de substitution du ciment par des cendres volantes

Le TABLE 18 montre que la perte d'ouvrabilité lorsque 30 % de la masse du ciment est remplacée par des cendres volantes de biomasse (M30) est très importante. L'ouvrabilité est réduite de 69 % par rapport au mortier de référence. L'ouvrabilité n'étant pas suffisante, c'est la raison pour laquelle ce taux de substitution ne sera plus réalisé dans la suite des tests. Les résultats confirment également que les cendres volantes de charbon n'affectent pas l'ouvrabilité du mortier.

Comparaison :

La FIGURE 51 montre également que les cendres volantes de biomasse ont un plus gros impact sur l'ouvrabilité que les cendres volantes de charbon. L'ouvrabilité n'est pas affectée par l'ajout des cendres volantes de charbon. Comme expliqué par [Rajamma et al., 2015], les caractéristiques physiques des cendres volantes de biomasse sont principalement responsables de cette tendance. Les cendres volantes de biomasse ont une surface spécifique plus élevée que celle des cendres volantes de charbon étant donné la finesse de ses particules et leurs formes irrégulières. La référence [Ban & Ramli, 2011] montre également que les cendres volantes de

biomasse contiennent de la matière organique qui favorise l'adsorption des molécules d'eau. La quantité d'eau libre pour le pétrissage est alors réduite. La distribution hétérogène de la taille des particules peut également contribuer à la diminution de l'ouvrabilité des mortiers contenant des cendres volantes de biomasse car elle contrôle la compacité des mélanges. Pour un même étalement, les mélanges contenant des cendres volantes de biomasse nécessitent un dosage supplémentaire en eau comparé avec les mélanges contenant des cendres volantes de charbon. Pour finir, les résultats expérimentaux ont montré que les mortiers contenant des cendres volantes acquièrent facilement une ouvrabilité souhaitable en manipulant simplement le rapport E/L dans les limites admissibles.

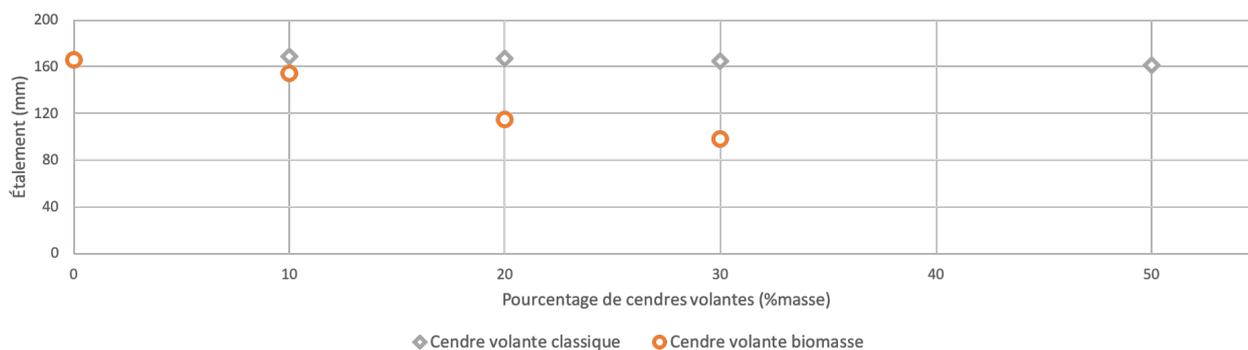


FIGURE 51 – Comparaison des étalements en fonction du pourcentage de cendres volantes

2.1.2 Masse volumique à l'état frais

Résultats :

La FIGURE 52 représente la variation de la masse volumique à l'état frais en fonction du pourcentage de cendres volantes classiques ou de cendres volantes de biomasse.

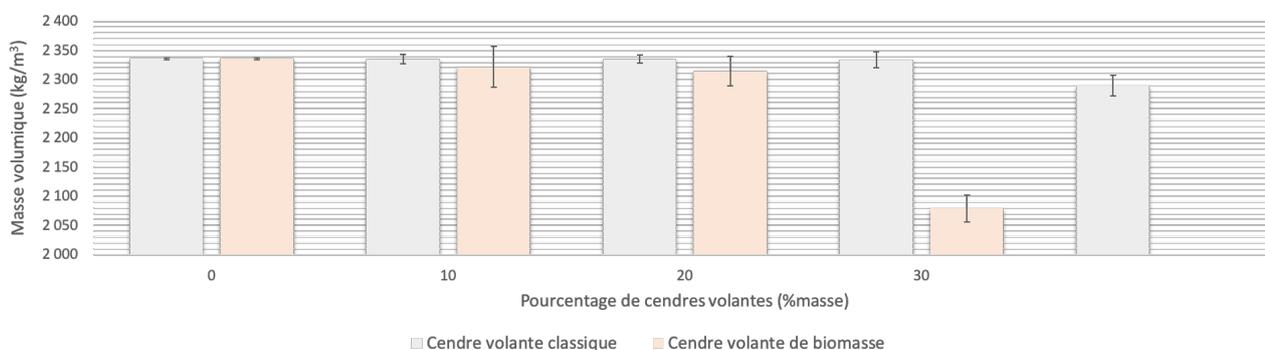


FIGURE 52 – Masse volumique à l'état frais en fonction du pourcentage de cendres volantes

Comme on peut le voir à la FIGURE 52, la masse volumique des mortiers avec des cendres volantes de charbon ou avec cendres volantes de biomasse est relativement constante quel que soit le taux de substitution utilisé.

Cependant, lorsque le ciment est substitué par des cendres volantes de biomasse, la masse volumique diminue légèrement lorsque le taux de substitution augmente. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par [Zhao et al., 2018, Ban & Ramli, 2011], où la densité de mortier frais diminue au fur et à mesure que la substitution du ciment par les cendres volantes de biomasse augmente. Cette observation est due à la densité plus faible des cendres volantes de biomasse par rapport au ciment CEM I 52,5 N. Le rapport E/L est le même pour tous les échantillons et les masses volumiques varient légèrement.

Comparaison :

La FIGURE 53 compare les masses volumiques à l'état frais des mortiers avec cendres volantes classiques et des mortiers avec des cendres volantes de biomasse.

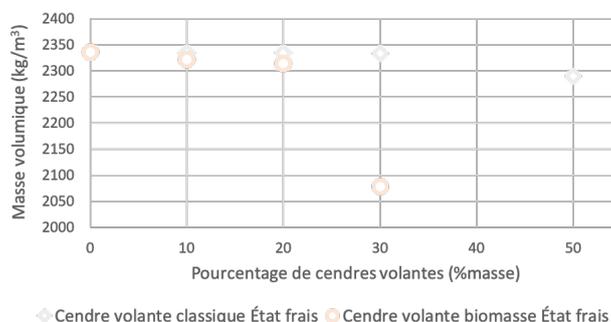


FIGURE 53 – Comparaison des masses volumiques à l'état frais en fonction du pourcentage de cendres volantes

Comme on peut le voir à la FIGURE 53, la masse volumique à l'état frais obtenue pour l'échantillon de mortier où 30 % de la masse de ciment est substituée par des cendres volantes de biomasse (M30) est très faible. Comme montré à la FIGURE 39, les échantillons M30 contiennent beaucoup d'air. La masse volumique des échantillons M30 est donc réduite à cause de la présence d'air.

2.2 Mortier à l'état durci

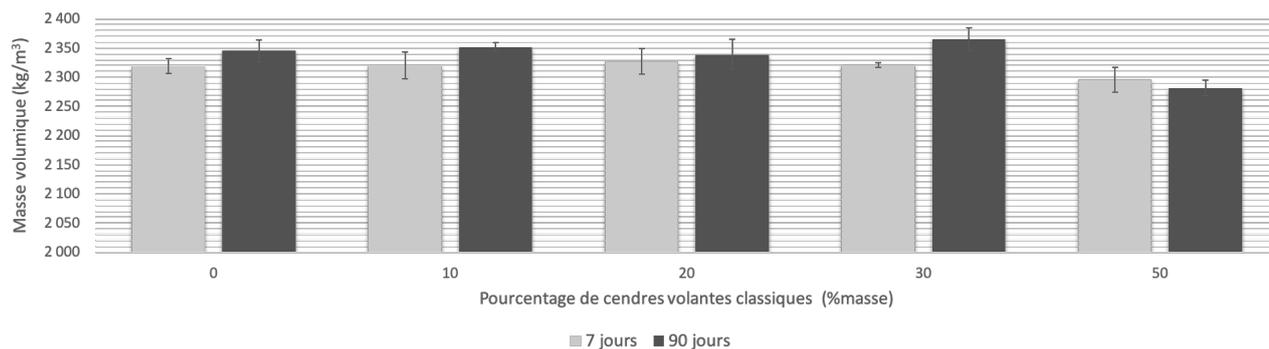
Ce travail de fin d'études n'a pas été réalisé dans des conditions idéales. La pandémie due à l'épidémie de Covid-19 a eu un impact considérable sur les recherches en laboratoire. Certains tests, initialement prévus, ont dû être annulés et le nombre d'échantillons fabriqués considérablement réduits. Les différents tests réalisés sur mortier durci ont été réalisés en fonction des disponibilités du laboratoire. Pour les tests de la partie A, certaines modifications ont dû être apportées :

- Résistance mécanique : Certains tests prévus à 90 jours de durcissement ont peut-être été effectués à 88 jours ou à 92 jours. Certaines données précédemment obtenues par d'autres chercheurs ont été réutilisées afin de compléter les résultats obtenus dans le cadre de ce travail.
- Porosité apparente : Tous les tests après 90 jours de durcissement n'ont pas pu être réalisés.
- Absorption par capillarité : Tous les tests après 90 jours de durcissement n'ont pas pu être réalisés.

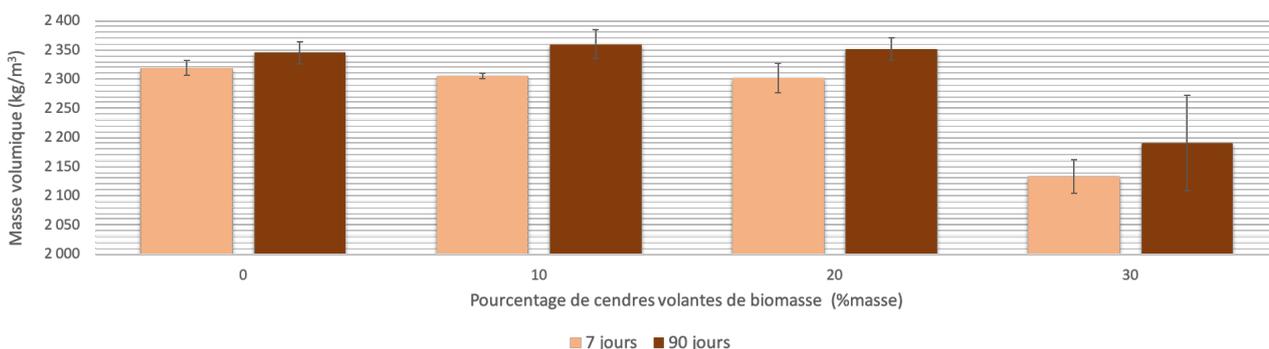
2.2.1 Masse volumique saturée en eau

Résultats :

La FIGURE 54 représente la variation de la masse volumique après 7 et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes classiques ou de cendres volantes de biomasse.



(a) Cendres volantes classiques



(b) Cendres volantes de biomasse

FIGURE 54 – Masse volumique après 7 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes

Comme on peut le voir à la FIGURE 54, la masse volumique des mortiers avec des cendres volantes de charbon ou avec cendres volantes de biomasse est relativement constante quel que soit le taux de substitution utilisé.

Une nouvelle fois, lorsque le ciment est substitué par des cendres volantes de biomasse, la masse volumique diminue légèrement lorsque le taux de substitution augmente. Ces résultats sont toujours cohérents avec ceux obtenus par [Zhao et al., 2018, Ban & Ramli, 2011].

Comparaison :

La FIGURE 55 compare les masses volumiques après 7 et 90 jours de durcissement des mortiers avec cendres volantes classiques et des mortiers avec des cendres volantes de biomasse.

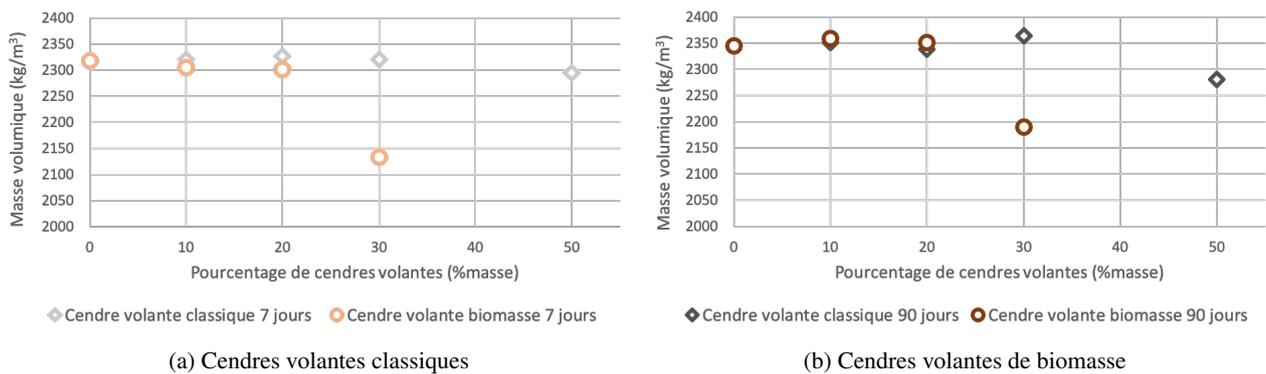


FIGURE 55 – Comparaison des masses volumiques après 7 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes

Comme on peut le voir à la FIGURE 55, les masses volumiques des mortiers avec des cendres volantes classiques ou des cendres volantes de biomasse est relativement constante quel que soit le temps de durcissement.

Comme pour la masse volumique à l'état frais, les masses volumiques après 7 et 90 jours de durcissement obtenues pour l'échantillon de mortier M30 sont très faibles. Les échantillons M30 contiennent beaucoup d'air. La masse volumique des échantillons M30 est donc réduite à cause de la présence d'air.

2.2.2 Résistance mécanique

Résultats :

La FIGURE 56 représente l'évolution de la résistance en compression en fonction du pourcentage de cendres volantes classiques et de biomasse à différents temps de durcissement. Comme expliqué ci-dessus, l'ensemble des échantillons initialement prévus n'ont pas pu être réalisés. Dans le cadre du test de la résistance à la compression, les résultats des tests précédemment effectués par Monsieur Zeng Feng Zhao ont été repris pour les échantillons où 0 % (M0), 30% (M30) et 50% (M50) en masse du ciment a été substitué par des cendres volantes de charbon et ceux où 0 % (M0) et 30% (M30) en masse du ciment a été substitué par des cendres volantes de biomasse. Le test de la résistance à la compression sur des échantillons M50 a seulement été effectué avec des cendres volantes de charbon et pas avec des cendres volantes de biomasse.

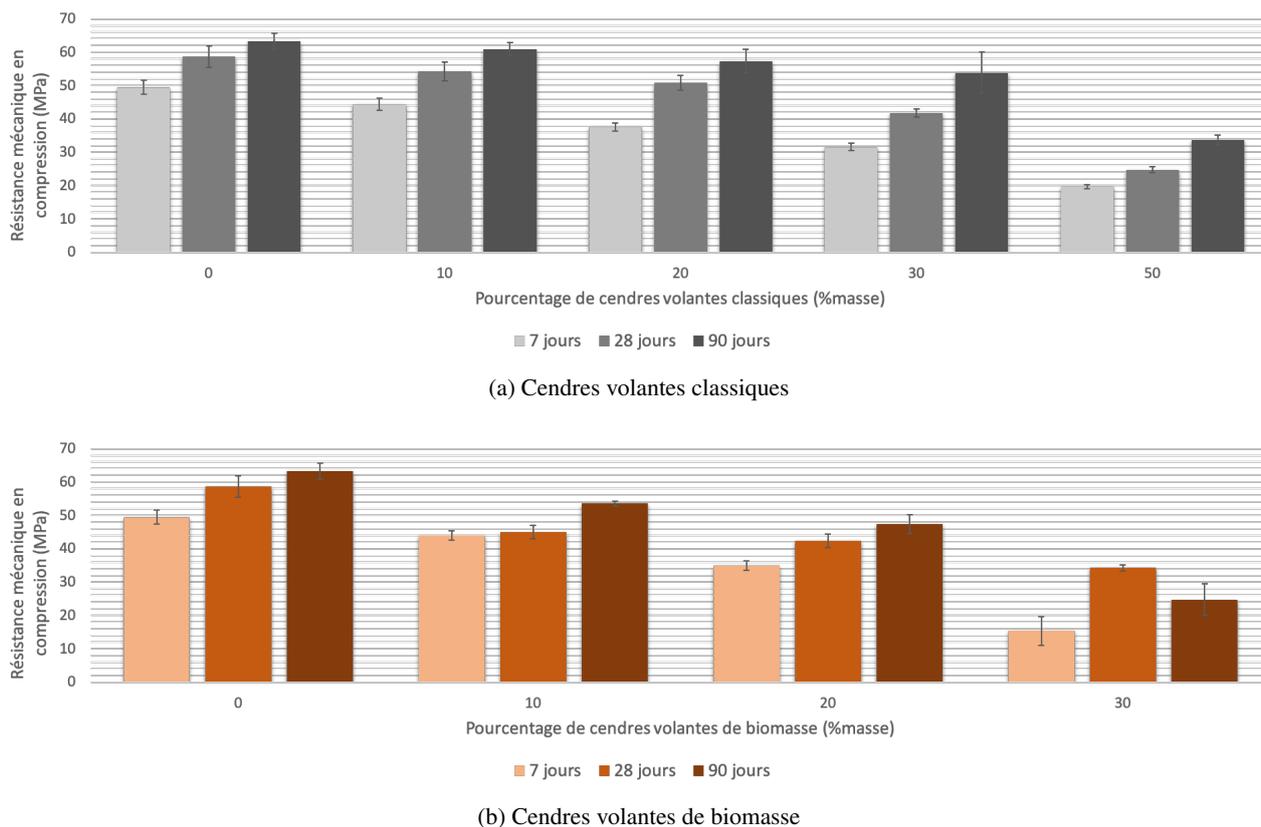


FIGURE 56 – Résistance en compression après 7 jours, 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes

Comme on peut le voir à la FIGURE 56, la résistance mécanique en compression diminue lorsque le taux de substitution du ciment CEM I 52,5 N par des cendres volantes de charbon ou des cendres volantes de biomasse augmente. Ce comportement peut s'expliquer par le fait que les cendres volantes, de charbon ou de biomasse, ont un effet filler. Comme expliqué dans la littérature [Ban & Ramli, 2011, Rajamma et al., 2009, Rajamma et al., 2015], les cendres volantes agissent plus comme remplisseur dans la pâte de ciment plutôt que comme un matériau liant, comme le ciment. Les cendres volantes de biomasse ont un effet négatif car elles altèrent le processus d'hydratation de la matrice cimentaire car elles n'ont pas un fort caractère hydraulique et pouzzolanique. L'ajout de cendres volantes diminue les réactions de liaison lors de l'hydratation de la pâte de ciment. Les cendres volantes ont plutôt tendance à remplir l'espace dans la pâte de mortier (effet filler) et ainsi profiter à la compacité du mélange plutôt que de créer des liaisons chimiques avec les autres constituants et ainsi profiter à la résistance mécanique du mortier (effet liant). Lorsque la quantité de cendres volantes augmente, la quantité de ciment diminue. De cette manière, les matériaux remplisseurs et moins réactifs remplacent petit à petit les matériaux réactifs. Dès lors, la résistance en compression diminue lorsque le taux de substitution du ciment par des cendres volantes augmente.

On peut également remarquer à la FIGURE 56 que la résistance en compression chute lorsque 30% du ciment est substitué par des cendres volantes de biomasse (M30). Cette chute de résistance s'explique par une présence importante d'air dans l'échantillon de mortier, comme on peut le voir à la FIGURE 39. L'échantillon M30 est très poreux ce qui réduit considérablement la résistance en compression.

Comme expliqué ci-dessus, la résistance à la compression diminue au fur et à mesure que des cendres volantes sont ajoutées. Pour cette raison, il est intéressant d'évaluer la perte de résistance en compression des échantillons de mortier au fur et à mesure que des cendres volantes sont ajoutées dans le mélange. La TABLE 19

montre, pour chaque temps de durcissement (7, 28 et 90 jours), la perte de résistance entre la résistance en compression obtenue pour chaque taux de substitution (M10, M20, M30 et M50) et la résistance en compression obtenue pour le mortier de référence (M0).

Perte de résistance en compression (%)	7 jours				
	0 %	10 %	20 %	30 %	50 %
Cendre volante classique	0	10	24	36	60
Cendre volante de biomasse	0	11	29	69	-
	28 jours				
	0 %	10 %	20 %	30 %	50 %
Cendre volante classique	0	4	9	15	47
Cendre volante de biomasse	0	15	25	61	-
	90 jours				
	0 %	10 %	20 %	30 %	50 %
Cendre volante classique	0	8	14	29	58
Cendre volante de biomasse	0	23	28	42	-

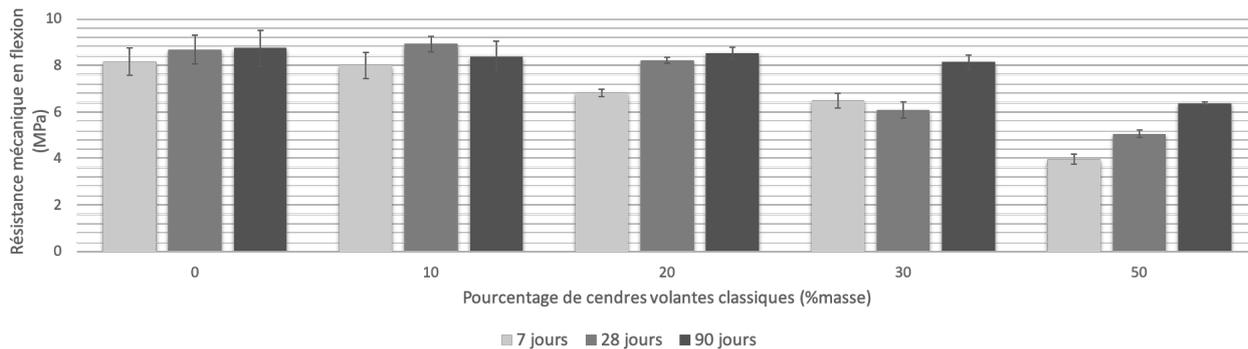
TABLE 19 – Perte de résistance en compression en fonction du pourcentage de substitution des cendres volantes

De plus, on peut remarquer que les cendres volantes de biomasse ont un effet plus négatif sur la résistance en compression que les cendres volantes de charbon. Ce comportement peut s'expliquer par le fait que les cendres volantes de biomasse sont des composés moins réactifs que les cendres volantes de charbon. Plus le taux de substitution du ciment par des cendres volantes augmente, plus le ciment est dilué par des composés non réactifs ou légèrement réactifs, plus la résistance en compression chute. Comme on peut le voir à la TABLE 19, la perte de résistance en fonction de l'évolution du taux de substitution du ciment par des cendres volantes est plus grande lorsque des cendres volantes de biomasse sont utilisées.

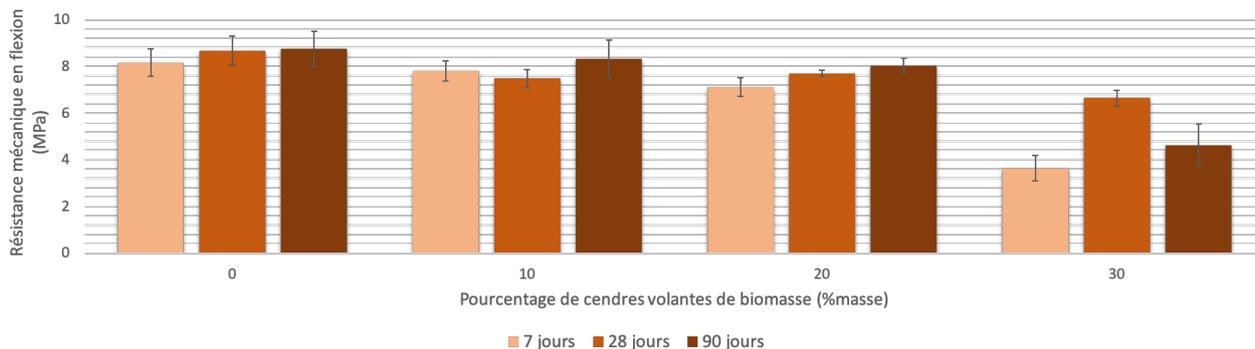
Contrairement à la résistance en compression, la résistance en flexion est plus délicate à interpréter. Cette difficulté d'interprétation vient du fait que la résistance à la flexion est le résultat d'une rupture au niveau d'un défaut de l'échantillon. Si un défaut est trop prononcé dans un échantillon, le test de la résistance en flexion de cet échantillon pourrait être altéré et les résultats considérablement réduits.

De manière générale, les résultats des tests de résistance en flexion sur les échantillons de mortier sont totalement cohérents avec ceux obtenus pour les tests de résistance en compression obtenus précédemment.

La FIGURE 57 représente l'évolution de la résistance en flexion en fonction du pourcentage de cendres volantes classiques et de biomasse à différents temps de durcissement. Comme pour le test de la résistance en compression, les résultats des tests précédemment effectués par Monsieur Zeng Feng Zhao ont été repris pour les échantillons où 0 % (M0), 30% (M30) et 50% (M50) en masse du ciment ont été substitués par des cendres volantes de charbon et ceux où 0 % (M0) et 30% (M30) en masse du ciment ont été substitués par des cendres volantes de biomasse. Le test de la résistance à la flexion sur des échantillons M50 a seulement été effectué avec des cendres volantes de charbon et pas avec des cendres volantes de biomasse.



(a) Cendres volantes classiques



(b) Cendres volantes de biomasse

FIGURE 57 – Résistance en flexion après 7 jours, 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes

Comme on peut le voir à la FIGURE 57, la résistance mécanique en flexion diminue lorsque le taux de substitution du ciment CEM I 52,5 N par des cendres volantes de charbon ou des cendres volantes de biomasse augmente. Ces résultats sont cohérents avec ceux précédemment obtenus pour la résistance en compression et peuvent être interprétés de la même manière.

Comme pour la résistance en compression, il est intéressant d'évaluer la perte de résistance en flexion des échantillons de mortier au fur et à mesure que des cendres volantes sont ajoutées dans le mélange. La TABLE 20 montre, pour chaque temps de durcissement (7, 28 et 90 jours), la perte de résistance entre la résistance en flexion obtenue pour chaque taux de substitution (M10, M20, M30 et M50) et la résistance en flexion obtenue pour le mortier de référence (M0).

Perte de résistance en flexion (%)	7 jours				
	0 %	10 %	20 %	30 %	50 %
Cendre volante classique	0	2	16	21	51
Cendre volante de biomasse	0	4	13	55	-
	28 jours				
	0 %	10 %	20 %	30 %	50 %
Cendre volante classique	0	4	3	7	27
Cendre volante de biomasse	0	5	8	47	-
	90 jours				
	0 %	10 %	20 %	30 %	50 %
Cendre volante classique	0	-3	5	30	42
Cendre volante de biomasse	0	14	11	23	-

TABLE 20 – Perte de résistance en flexion en fonction du pourcentage de substitution des cendres volantes

Comme pour la résistance en compression, on peut remarquer que les cendres volantes de biomasse ont un effet plus négatif sur la résistance en flexion que les cendres volantes de charbon. Comme on peut le voir à la TABLE 20, la perte de résistance en fonction de l'évolution du taux de substitution du ciment par des cendres volantes est plus grande lorsque des cendres volantes de biomasse sont utilisées. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus pour la résistance en compression et peuvent être interprétés de la même façon.

Comparaison :

La FIGURE 58 compare les résistance en compression après 7, 28 et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes de charbon ou de biomasse.

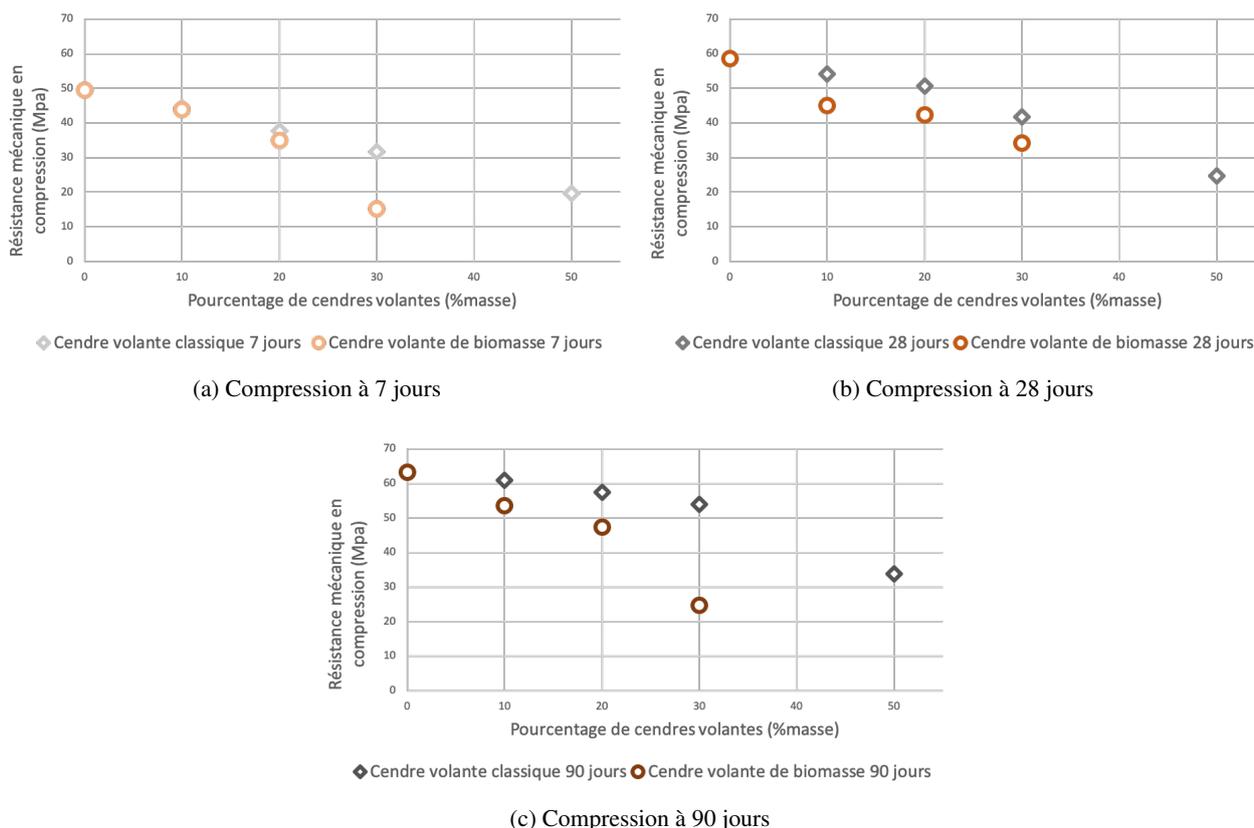


FIGURE 58 – Comparaison des résistances en compression après 7 jours, 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes

Comme on peut le voir, la résistance en compression des échantillons de mortier augmente lorsque le temps de durcissement augmente, quel que soit le taux de substitution du ciment par des cendres volantes de charbon ou de biomasse. Lorsqu'on compare la résistance en compression d'un mortier ne contenant pas de cendres volantes (M0) avec un mortier contenant des cendres volantes (M10, M20, M30 et M50), on remarque que le développement de la résistance en compression des mortiers avec des cendres volantes est plus lent que pour celui du mortier de référence (M0). Cependant, en accord avec la littérature [Balakrishnan et al., 2017], le mortier contenant des cendres volantes finit par rattraper sa résistance assez rapidement après un certain temps de durcissement. Les mortiers avec des cendres volantes ont besoin de plus de 28 jours de durcissement pour acquérir une résistance proche de celle du mortier de référence. L'augmentation continue de la résistance en compression des mortiers contenant des cendres volantes est attribuée au comportement pouzzolanique des cendres volantes qui persistent à réagir avec le ciment pour produire de l'hydrate de silicate de calcium en présence d'eau. Comme expliqué dans la littérature, la fabrication d'hydrate de silicate de calcium permet d'augmenter la résistance mécanique des échantillons de mortier.

Comme mentionné ci-dessus, la résistance en compression se développe lorsque le temps de durcissement augmente. Pour cette raison, la TABLE 21 montre, pour chaque taux de substitution (M0, M10, M20, M30 et M50), le gain de résistance entre la résistance en compression obtenue pour 28 et 90 jours de durcissement par rapport à la résistance à la compression obtenue pour 7 jours.

Gain de résistance en compression (%)	M0		
	7 jours	28 jours	90 jours
Cendre volante classique	0	16	22
Cendre volante de biomasse	0	16	22
	M10		
	7 jours	28 jours	90 jours
Cendre volante classique	0	18	27
Cendre volante de biomasse	0	2	18
	M20		
	7 jours	28 jours	90 jours
Cendre volante classique	0	26	34
Cendre volante de biomasse	0	17	26
	M30		
	7 jours	28 jours	90 jours
Cendre volante classique	0	24	41
Cendre volante de biomasse	0	55	38
	M50		
	7 jours	28 jours	90 jours
Cendre volante classique	0	20	42

TABLE 21 – Gain de résistance en compression en fonction du temps de durcissement

Comme on peut le voir, plus le taux de substitution du ciment par des cendres volantes augmente, plus le temps de durcissement a un effet positif sur la résistance en compression. Pour un mortier où des cendres volantes ne sont pas utilisées (M0), le gain de résistance entre 7 jours et 90 jours est de 22 %, que ce soit pour les cendres volantes de charbon ou les cendres volantes de biomasse. Lorsque le taux de substitution augmente, par exemple pour un mortier où 30 % de la masse de ciment est remplacée par des cendres volantes de charbon ou de biomasse (M30), le gain de résistance entre 7 jours et 90 jours est respectivement de 41 % et 38 %. Le gain de résistance augmente au fur et à mesure que le temps de durcissement augmente.

Il faut également noter que le gain de résistance est plus faible pour les mortiers contenant des cendres volantes de biomasse comparé aux mortiers contenant des cendres volantes de charbon. Pour un mortier où 30 % de la masse de ciment est remplacée par des cendres volantes (M30), le gain de résistance entre 7 jours et 90 jours de durcissement est de 41 % pour les cendres volantes de charbon et de 38 % pour les cendres volantes de biomasse. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus dans la littérature [Ban & Ramli, 2011].

La FIGURE 59 compare les résistances en flexion après 7, 28 et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes de charbon ou de biomasse.

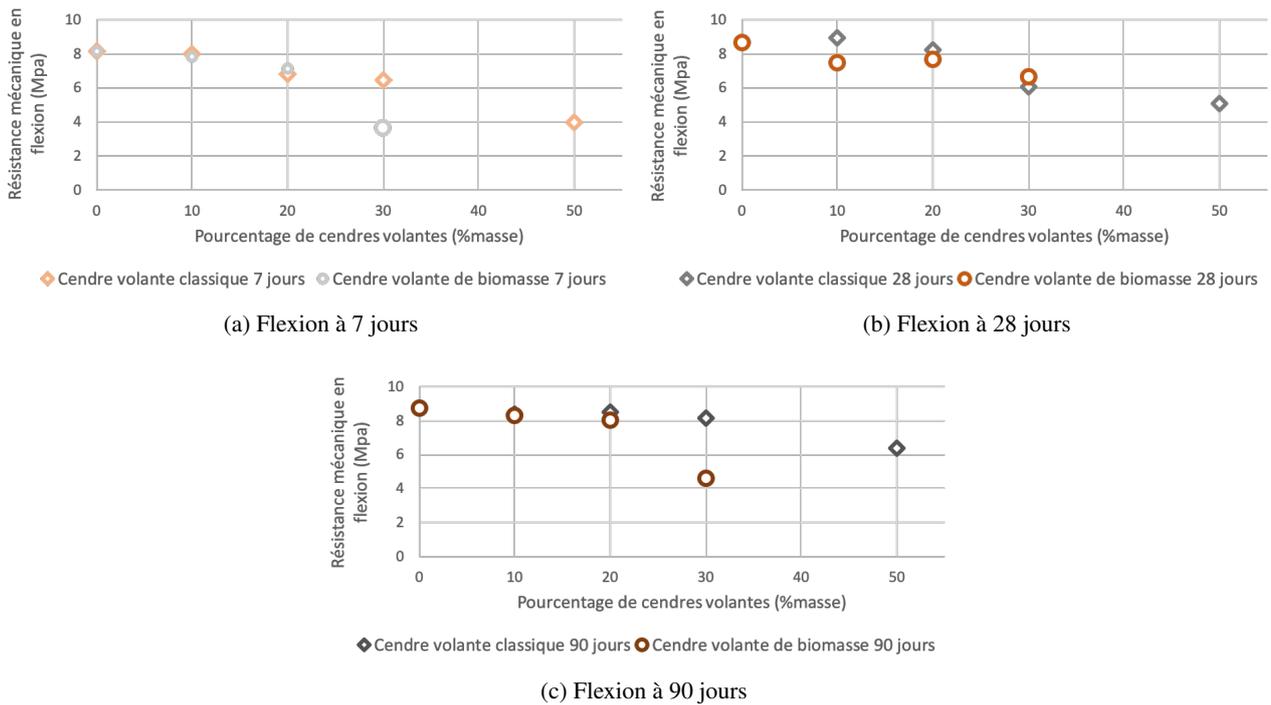


FIGURE 59 – Comparaison des résistances en flexion après 7 jours, 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes

Comme pour la résistance en compression, la résistance en flexion se développe lorsque le temps de durcissement augmente. Pour cette raison, la TABLE 22 montre, pour chaque taux de substitution (M0, M10, M20, M30 et M50), le gain de résistance entre la résistance en flexion obtenue pour 28 et 90 jours de durcissement par rapport à la résistance à la flexion obtenue pour 7 jours.

Gain de résistance en flexion (%)	M0		
	7 jours	28 jours	90 jours
Cendre volante classique	0	6	7
Cendre volante de biomasse	0	6	7
	M10		
	7 jours	28 jours	90 jours
Cendre volante classique	0	10	5
Cendre volante de biomasse	0	-5	6
	M20		
	7 jours	28 jours	90 jours
Cendre volante classique	0	17	20
Cendre volante de biomasse	0	8	12
	M30		
	7 jours	28 jours	90 jours
Cendre volante classique	0	-6	20
Cendre volante de biomasse	0	45	21
	M50		
	7 jours	28 jours	90 jours
Cendre volante classique	0	22	38

TABLE 22 – Gain de résistance en flexion en fonction du temps de durcissement

En accord avec la littérature [Rajamma et al., 2009, Ban & Ramli, 2011], le taux de substitution du ciment par des cendres volantes de biomasse doit être limité à 20 % pour avoir une résistance mécanique acceptable. La résistance mécanique se détériore rapidement lorsque les cendres volantes de biomasse sont substituées au delà de 20 %.

2.2.3 Porosité apparente et absorption d'eau par immersion

Résultats :

Les résultats d'absorption d'eau par immersion et de porosité apparente après 28 jours de durcissement des mortiers réalisés avec des cendres volantes de charbon ou de biomasse se trouvent aux TABLES 23 et 24.

		21°C et 60% HR	Immersion		séchage 105°C	Densité	Absorption eau	Porosité
		m (g)	m _{sat,eau} (g)	m _{sat,air} (g)	m _{sec} (g)	d (g/cm ³)	(% masse)	n(% vol)
M0	1	287,21	165,28	291,8	271,51	2,15	7,47	16,04
	2	285,75	164,47	290,35	270,27	2,15	7,43	15,95
	3	292,53	167,87	296,75	276,42	2,14	7,35	15,77
M10	1	283,38	161,35	287,93	266,92	2,11	7,87	16,60
	2	289,37	164,87	293,67	272,25	2,11	7,87	16,63
	3	290,92	165,95	295,42	273,99	2,12	7,82	16,55
M20	1	280,35	159,22	285,26	262,96	2,09	8,48	17,69
	2	286,32	162,5	291,16	268,49	2,09	8,44	17,62
	3	286,84	162,15	291,11	268,76	2,08	8,32	17,33

TABLE 23 – Absorption d'eau par immersion et porosité apparente après 28 jours de durcissement du mortier avec cendres volantes de charbon

		21°C et 60% HR	Immersion		séchage 105°C	Densité	Absorption eau	Porosité
		m (g)	m _{sat,eau} (g)	m _{sat,air} (g)	m _{sec} (g)	d (g/cm ³)	(% masse)	n(% vol)
M0	1	287,21	165,28	291,8	271,51	2,15	7,47	16,04
	2	285,75	164,47	290,35	270,27	2,15	7,43	15,95
	3	292,53	167,87	296,75	276,42	2,14	7,35	15,77
M10	1	284,37	158,85	287,04	264,1	2,06	8,69	17,90
	2	282,29	159,51	289,02	265,75	2,05	8,76	17,97
	3	277,91	157,33	282,90	260,71	2,08	8,51	17,67
M20	1	285,05	162,35	291,15	266,41	2,07	9,29	19,21
	2	282,93	160,97	288,86	264,28	2,07	9,30	19,22
	3	262,55	149,09	267,79	245,50	2,07	9,08	18,78

TABLE 24 – Absorption d'eau par immersion et porosité apparente après 28 jours de durcissement du mortier avec cendres volantes de biomasse

Comparaison :

La FIGURE 60 représente la comparaison des porosités et des absorptions d'eau par immersion après 28 jours de durcissement des mortiers réalisés avec des cendres volantes de charbon et de biomasse.

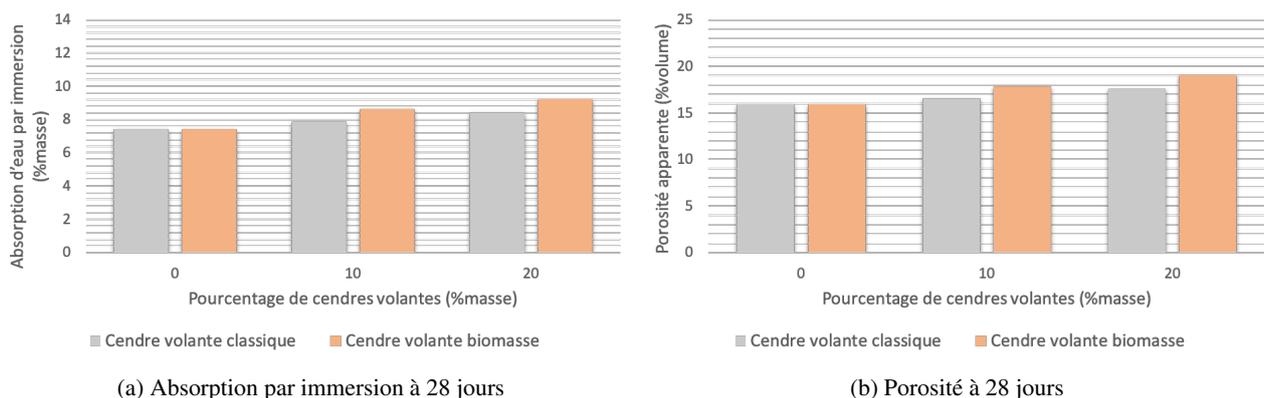


FIGURE 60 – Comparaison des porosités et des absorptions d'eau par immersion après 28 jours de durcissement des mortiers avec cendres volantes

Comme on peut le voir à la FIGURE 60 (a), l'absorption d'eau par immersion augmente lorsque le taux de substitution du ciment CEM I 52,5 N par les cendres volantes (de charbon ou de biomasse) augmente. Ces résultats sont en accord avec la littérature [Ban & Ramli, 2011].

Comme le montre la FIGURE 60 (b), la porosité augmente également lorsque le taux de substitution du ciment CEM I 52,5 N par les cendres volantes classiques ou de biomasse augmente. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans la littérature [Davidenko, 2015, Sow, 2016]. La porosité observée de la pâte est probablement due à la cristallisation des produits d'hydratation volumineux dans un milieu déjà légèrement durci. Lorsque la teneur en cendres volantes de biomasse est grande, le rapport E/L effectif diminue, ce qui entraîne une mauvaise dispersion des particules. Par conséquent, une large porosité peut être également créée à long terme dans les régions où l'eau est piégée entre les floculations des grains.

Les cendres volantes de biomasse ont un impact plus négatif que les cendres volantes classiques car la porosité et l'absorption d'eau par immersion augmentent d'avantage au fur et à mesure que le taux de substitution

augmente.

3 Échantillons partie B

3.1 Mortier à l'état frais

3.1.1 Étalement au mini-cône

Résultats :

La FIGURE 61 représente la variation du rapport E/L en fonction du taux de substitution du ciment par des cendres volantes de biomasse.

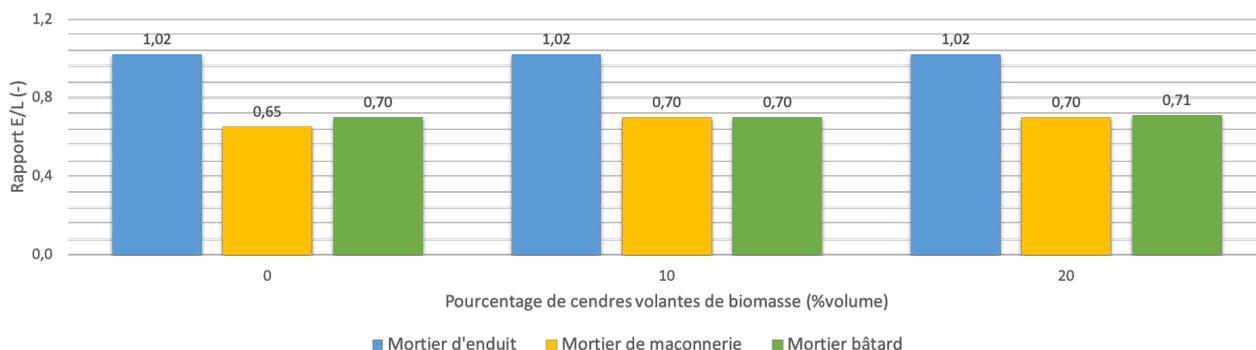


FIGURE 61 – Rapport E/L en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse

Pour rappel, les échantillons de la partie B ont été réalisés afin d'obtenir un étalement constant de 175 ± 10 mm en variant le rapport E/L. L'ouvrabilité est une propriété très importante pour les mortiers d'enduit, les mortiers de maçonnerie et les mortiers bâtards. De manière générale, le mortier d'enduit doit avoir une meilleure ouvrabilité que le mortier de maçonnerie.

Comme montré à la FIGURE 61, 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. Les rapports E/L obtenus pour le mortier de maçonnerie et pour le mortier bâtard sont relativement équivalents. Cela signifie que pour une même ouvrabilité, le mortier d'enduit a une demande en eau plus importante que le mortier de maçonnerie et le mortier bâtard. Pour rappel, le rapport L/S est de 1/6 pour le mortier d'enduit, de 1/4 pour le mortier de maçonnerie. Pour la même masse de sable, la masse de ciment est plus importante pour le mortier de maçonnerie que pour le mortier d'enduit alors que la masse d'eau est plus importante pour le mortier d'enduit que pour le mortier de maçonnerie. Pour le mortier bâtard, la composition a été réalisée selon l'ÉQUATION (1). Les masses de sables, de ciment et de chaux utilisées dans la composition des échantillons de mortier bâtard est plus proche de celles des mortiers de maçonnerie, ce qui explique pourquoi leurs rapport E/L sont similaires.

Il est important de noter que la différence entre les rapports E/L obtenus pour le mortier d'enduit, le mortier de maçonnerie et pour le mortier bâtard n'est pas majeure. Les résultats sont issus d'expériences en laboratoire qui ne sont pas à l'abri d'erreurs de mesure.

Comparaison :

Comme le montre la FIGURE 62, le rapport E/L reste relativement constant pour le mortier d'enduit, le mortier de maçonnerie et pour le mortier bâtard quel que soit le taux de substitution. Pour un même étalement, la demande en eau n'augmente pas de manière significative lorsque le taux de substitution du volume de ciment par des cendres volantes de biomasse augmente. Cela signifie que, dans ce cas, les cendres volantes de biomasse n'affectent pas l'ouvrabilité du mortier frais. Ces résultats ne sont pas vraiment en accord avec

[Ban & Ramli, 2011] qui avait remarqué que, pour un même étalement, la demande en eau augmente lorsque le taux de substitution augmente.

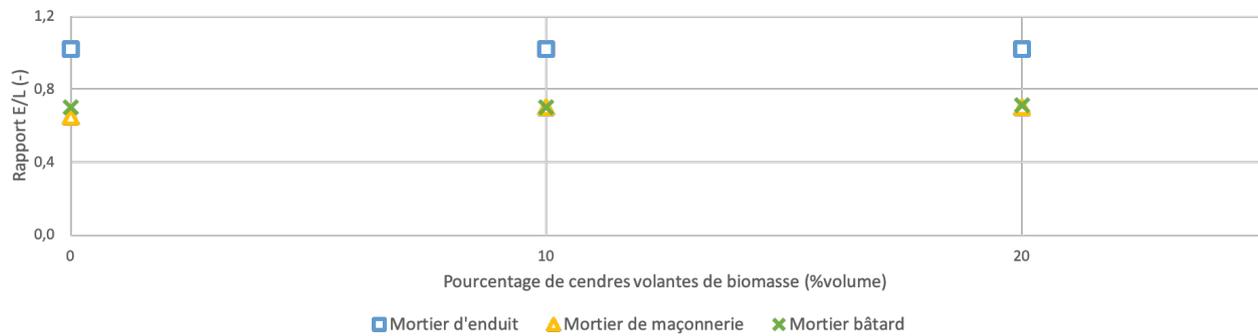


FIGURE 62 – Comparaison du rapport E/L en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse

3.1.2 Masse volumique à l'état frais

Résultats :

La FIGURE 63 représente la variation de la masse volumique à l'état frais du mortier d'enduit, du mortier de maçonnerie et du mortier bâtard en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse.

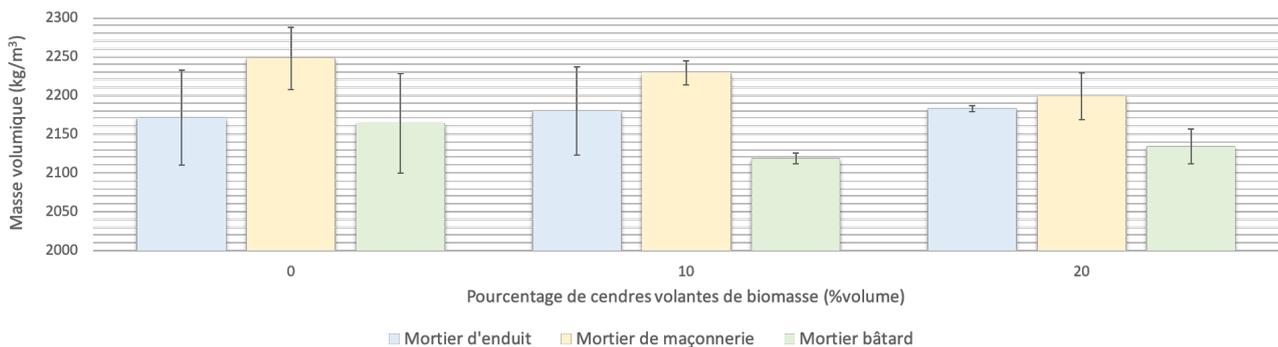


FIGURE 63 – Masse volumique à l'état frais en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse

Comme précédemment pour le mortier avec des cendres volantes classiques ou des cendres volantes de biomasse, les masses volumiques à l'état frais du mortier d'enduit, du mortier de maçonnerie et du mortier bâtard sont relativement constantes quel que soit le taux de substitution des cendres volantes de biomasse.

Comparaison :

La FIGURE 64 compare les masses volumiques à l'état frais en fonction du taux de substitution du ciment par des cendres volantes de biomasse pour les mortiers d'enduit, les mortiers de maçonnerie et les mortiers bâtards.

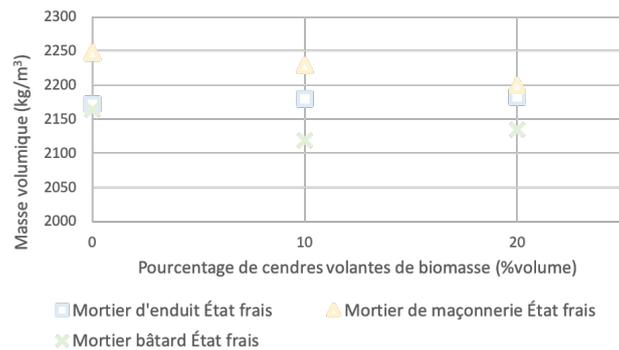


FIGURE 64 – Comparaison des masses volumiques à l'état frais en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse

Comme précédemment pour les mortiers avec des cendres volantes classiques ou des cendres volantes de biomasse, la masse volumique à l'état frais du mortier d'enduit, du mortier de maçonnerie et du mortier bâtard est relativement constante quel que soit le temps de durcissement. Les valeurs des masses volumiques des mortiers d'enduit, de maçonnerie et bâtards sont comparables comme leurs rapports E/L.

3.2 Mortier à l'état durci

Comme pour les échantillons de la partie A, ce travail de fin d'études n'a pas été réalisé dans des conditions idéales. La pandémie due à l'épidémie de Covid-19 a eu un impact considérable sur les recherches en laboratoire. Pour les tests de la partie B, certaines modifications ont dû être apportées :

- Résistance mécanique : Certains tests prévus à 90 jours de durcissement ont pu être effectués à 88 jours ou à 92 jours.
- Porosité apparente : Tous les tests après 90 jours de durcissement n'ont pas pu être réalisés. La porosité apparente après 28 jours de durcissement pour les mortiers bâtards n'a pas pu être testée.
- Absorption par immersion : Tous les tests après 90 jours de durcissement n'ont pas pu être réalisés. L'absorption d'eau par immersion après 28 jours de durcissement pour les mortiers bâtards n'a pas pu être testée.

3.2.1 Masse volumique saturée en eau

Résultats :

La FIGURE 65 représente la variation de la masse volumique après 28 et 90 jours de durcissement du mortier d'enduit, du mortier de maçonnerie et du mortier bâtard en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse.

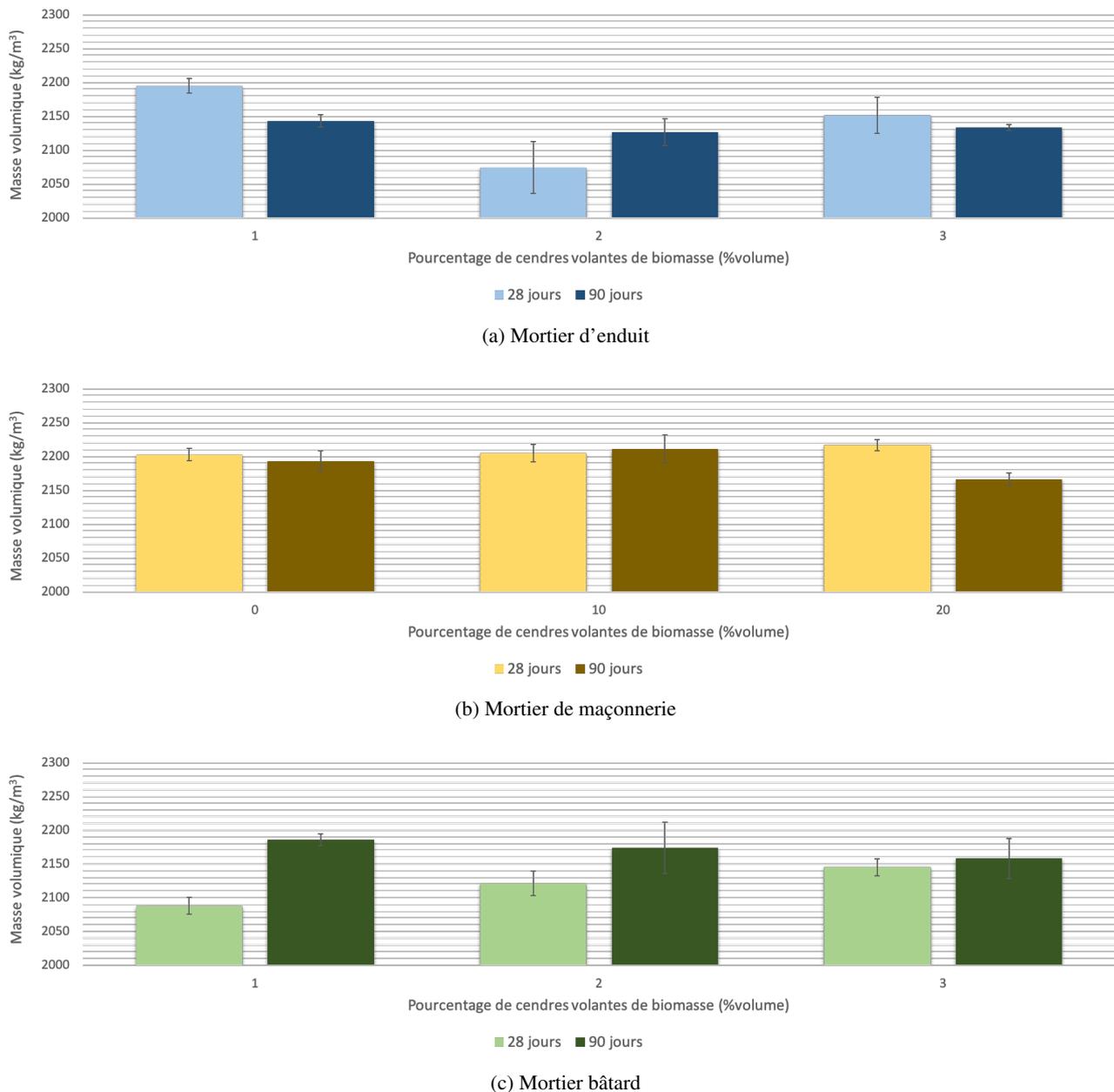


FIGURE 65 – Masse volumique après 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse

Comme précédemment pour le mortier à l'état frais, les masses volumiques après 28 et 90 jours de durcissement du mortier d'enduit, du mortier de maçonnerie et du mortier bâtard sont relativement constantes quel que soit le taux de substitution des cendres volantes de biomasse.

Comparaison :

La FIGURE 66 compare les masses volumiques après 28 et 90 jours de durcissement en fonction du taux de substitution du ciment par des cendres volantes de biomasse pour les mortiers d'enduit, les mortiers de maçonnerie et les mortiers bâtards.

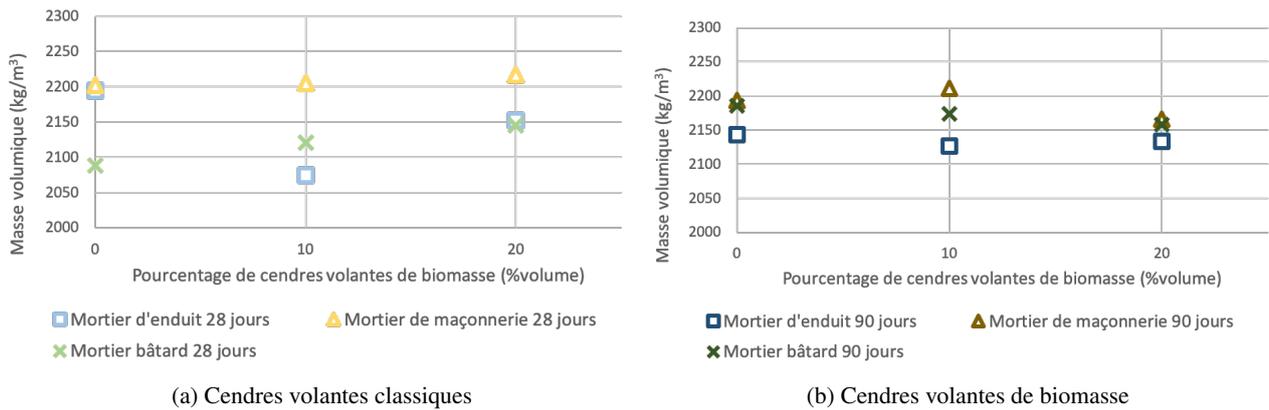


FIGURE 66 – Comparaison des masses volumiques après 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse

Comme précédemment pour les mortiers à l'état frais, la masse volumique après 28 et 90 jours de durcissement du mortier d'enduit, du mortier de maçonnerie et du mortier bâtard est relativement constante quel que soit le temps de durcissement. Les valeurs des masses volumiques des mortiers d'enduit, de maçonnerie et bâtards sont comparables comme leur rapports E/C.

3.2.2 Résistance mécanique

Résultats :

La résistance mécanique n'est pas la propriété la plus importante pour les mortiers d'enduit, les mortiers de maçonnerie et les mortiers bâtards car ils n'ont pas la même fonction que les mortiers structuraux. Pour ces mortiers, l'ouvrabilité est une propriété bien plus importante.

La FIGURE 67 représente l'évolution de la résistance mécanique en compression après 28 et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse pour un mortier d'enduit, un mortier de maçonnerie et un mortier bâtard.

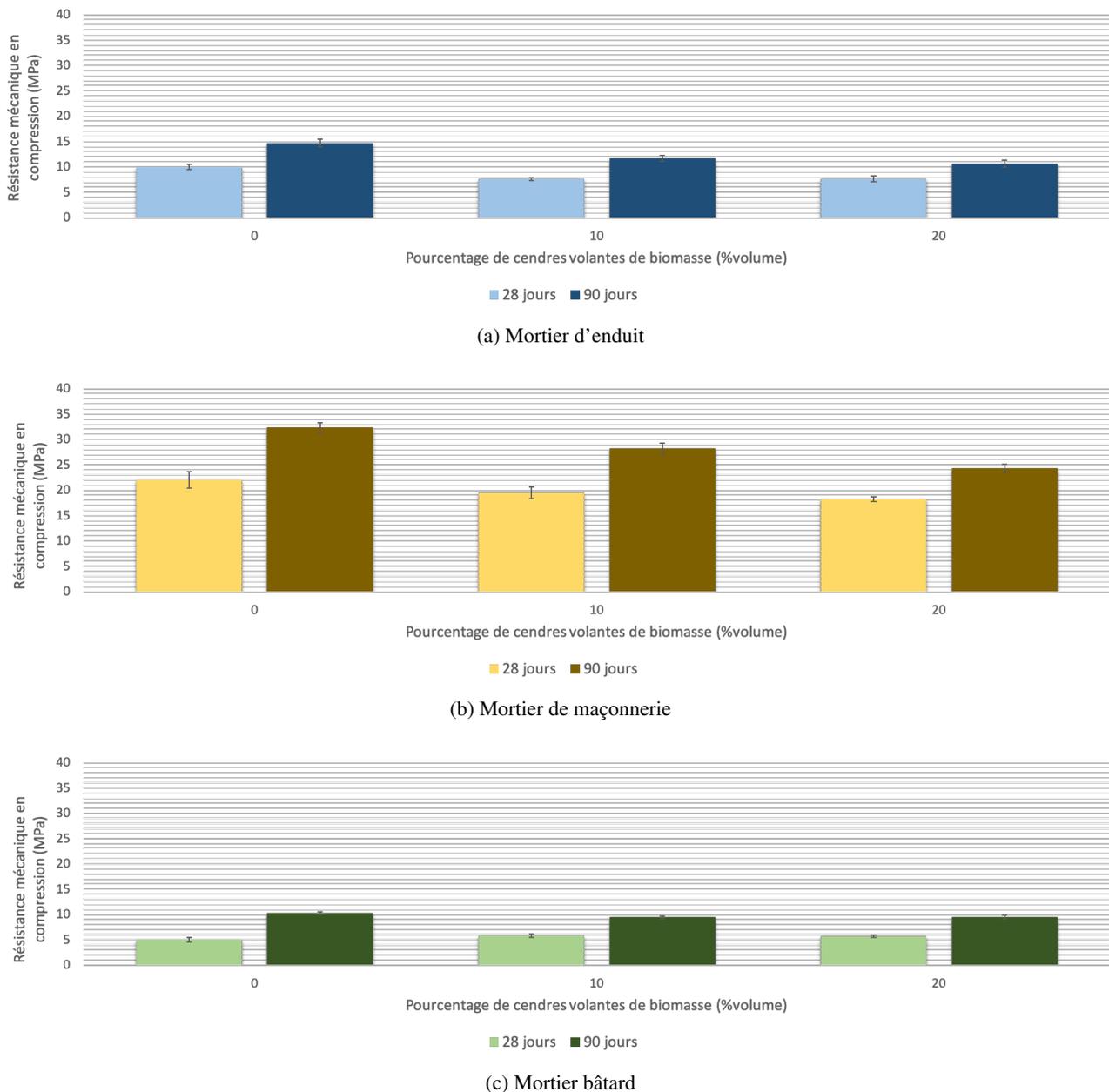


FIGURE 67 – Résistance en compression après 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse pour le mortier d'enduit, le mortier de maçonnerie et le mortier bâtard

Contrairement à précédemment pour les mortiers de la partie A, la résistance en compression est relativement constante pour les mortiers d'enduit, les mortiers de maçonnerie et les mortiers bâtards quel que soit le taux de substitution en volume du ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N par des cendres volantes de biomasse.

On peut également remarquer que la résistance en compression du mortier de maçonnerie est supérieure à celle du mortier d'enduit et du mortier bâtard. En accord avec la littérature [Garg & Pundir, 2012], ce comportement peut s'expliquer par le rapport L/S utilisé lors de la composition des mortiers d'enduit et de maçonnerie. Pour rappel, le mortier de maçonnerie a un rapport L/S de 1/4 alors que le mortier d'enduit a un rapport L/S de 1/6. Pour la même quantité de sable, le mortier de maçonnerie contient plus de ciment que le mortier d'enduit. Par exemple, pour le mortier de référence (M0), le mortier de maçonnerie contient 369 g de ciment pour 1350 g de sable alors que le mortier d'enduit contient 246 g de ciment pour 1350 g de sable. Comme expliqué précédem-

ment dans la partie A, le ciment est réactif et permet de créer des réactions de liaison lors de l'hydratation de la matrice cimentaire. En toute logique, ces liaisons permettent d'augmenter la résistance mécanique des mortiers. La quantité de ciment étant plus importante pour les mortiers de maçonnerie que pour les mortiers d'enduit, la résistance mécanique des mortiers de maçonnerie est donc plus grande. En ce qui concerne le mortier bâtard, de la chaux hydraulique remplace une partie du ciment. La quantité de ciment est alors également réduite par rapport à un mortier de ciment. De plus, la chaux retarde le temps de prise du mortier ce qui rend le temps de durcissement beaucoup plus long et donc la résistance plus faible qu'un mortier de ciment.

Comme on peut le voir à la TABLE 25, la perte de résistance en compression est nettement moins importante que pour les mortiers de la partie A. Pour un temps de durcissement donné, la résistance en compression est relativement constante quel que soit le taux de substitution. Pour les mortiers d'enduit, la perte de résistance en compression est légèrement plus grande. Cependant, les valeurs restent relativement comparables. A 28 jours de durcissement, la résistance en compression passe de 9,99 MPa pour M0 à 7,64 MPa pour M10.

Perte de résistance en compression (%)	28 jours		
	0 %	10 %	20 %
Mortier d'enduit	0	24	23
Mortier de maçonnerie	0	11	17
Mortier bâtard	0	-15	-13
	90 jours		
	0 %	10 %	20 %
Mortier d'enduit	0	20	28
Mortier de maçonnerie	0	13	25
Mortier bâtard	0	8	8

TABLE 25 – Perte de résistance en compression en fonction du pourcentage de substitution des cendres volantes de biomasse

La FIGURE 68 représente l'évolution de la résistance mécanique en flexion après 28 et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse pour un mortier d'enduit, un mortier de maçonnerie et un mortier bâtard. Comme expliqué précédemment dans la partie A, la résistance en flexion est plus délicate à interpréter que la résistance en compression en raison de la rupture lors d'un défaut.

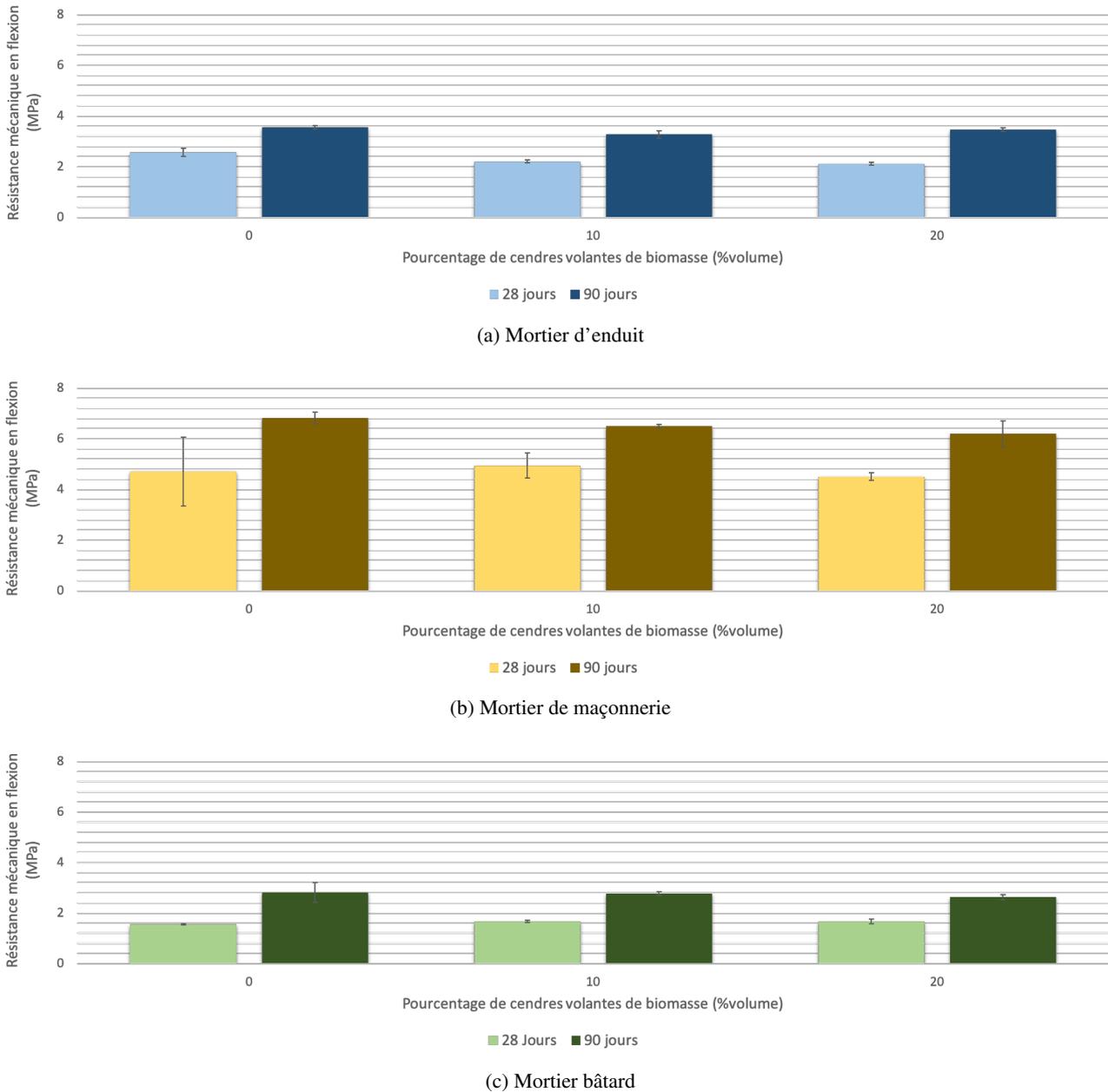


FIGURE 68 – Résistance en flexion après 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse pour le mortier d’enduit, le mortier de maçonnerie et le mortier bâtard

Comme pour la résistance en compression, la résistance en flexion est relativement constante pour les mortiers d’enduit, les mortiers de maçonnerie et les mortiers bâtards quel que soit le taux de substitution en volume du ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N par des cendres volantes de biomasse. De plus, la résistance en flexion du mortier de maçonnerie est supérieure à celle du mortier d’enduit et du mortier de bâtard. Ces comportements sont cohérents avec ceux précédemment obtenus pour la résistance en compression et peuvent être interprétés de la même manière.

La TABLE 26 montre également, comme pour la résistance en compression, que la perte de résistance en flexion à un temps de durcissement donné est très faible quel que soit le taux de substitution.

Perte de résistance en flexion (%)	28 jours		
	0 %	10 %	20 %
Mortier d'enduit	0	14	17
Mortier de maçonnerie	0	-5	4
Mortier bâtard	0	-8	-8
	90 jours		
	0 %	10 %	20 %
Mortier d'enduit	0	8	2
Mortier de maçonnerie	0	5	9
Mortier bâtard	0	2	7

TABLE 26 – Perte de résistance en flexion en fonction du pourcentage de substitution des cendres volantes de biomasse

Comparaison :

La FIGURE 69 compare les résistances mécaniques en compression après 28 et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse.

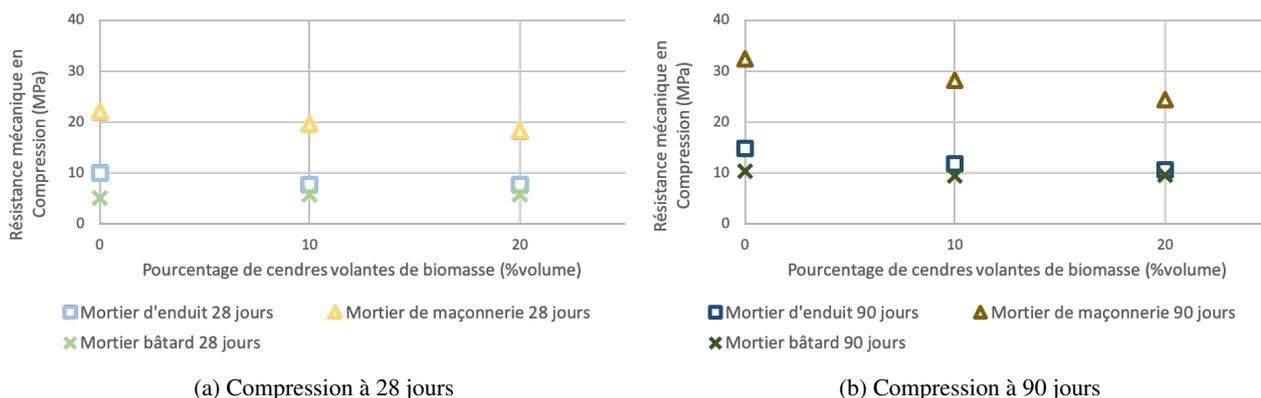


FIGURE 69 – Comparaison des résistances en compression après 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse

Comme pour les mortiers de la partie A, les mortiers d'enduit, les mortiers de maçonnerie et les mortiers bâtards ont une résistance mécanique à la compression qui augmente lorsque le temps de durcissement augmente. Ces résultats sont cohérents avec la littérature [Garg & Pundir, 2012]. Les mortiers de cendres volantes ont une faible résistance dans les premiers âges et ont un taux d'augmentation de résistance satisfaisant. Le développement de la résistance au fur et à mesure du temps de durcissement peut être attribué à l'hydratation de la pâte de ciment. Le développement de cette résistance peut être dû à la réaction pouzzolanique des cendres volantes et à l'hydratation du ciment Portland. Le silicate présent dans les cendres volantes réagit avec les ions Ca^{2+} apportés par l'hydratation du ciment Portland et de la chaux et forme des silicates de calcium insolubles dans l'eau (C-S-H), des C_4AH_{13} et des composés d'hydrate d'aluminate. L'acquisition de la résistance avec hydratation dans les liants est due à la formation de tobermorite et d'ettringite.

Il faut cependant noter que le gain de résistance en compression en fonction du temps de durcissement est beaucoup moins important que pour les mortiers de la partie A.

La TABLE 27 montre le gain de résistance en compression des échantillons de mortiers d'enduit, de maçonnerie et bâtards en fonction du temps de durcissement. Comme pour les mortiers de la partie A, la résistance en compression augmente lorsque le temps de durcissement des mortiers augmente. Le gain de résistance en compression est relativement identique pour les mortiers d'enduit et les mortiers de maçonnerie. Le gain de résistance en compression des mortiers bâtards est légèrement plus élevé.

Gain de résistance en compression (%)	M0	
	28 jours	90 jours
Mortier d'enduit	0	32
Mortier de maçonnerie	0	32
Mortier bâtard	0	51
	M10	
	28 jours	90 jours
Mortier d'enduit	0	35
Mortier de maçonnerie	0	31
Mortier bâtard	0	39
	M20	
	28 jours	90 jours
Mortier d'enduit	0	28
Mortier de maçonnerie	0	25
Mortier bâtard	0	40

TABLE 27 – Gain de résistance en compression en fonction du temps de durcissement

La FIGURE 70 compare les résistances mécaniques en compression après 28 et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse.

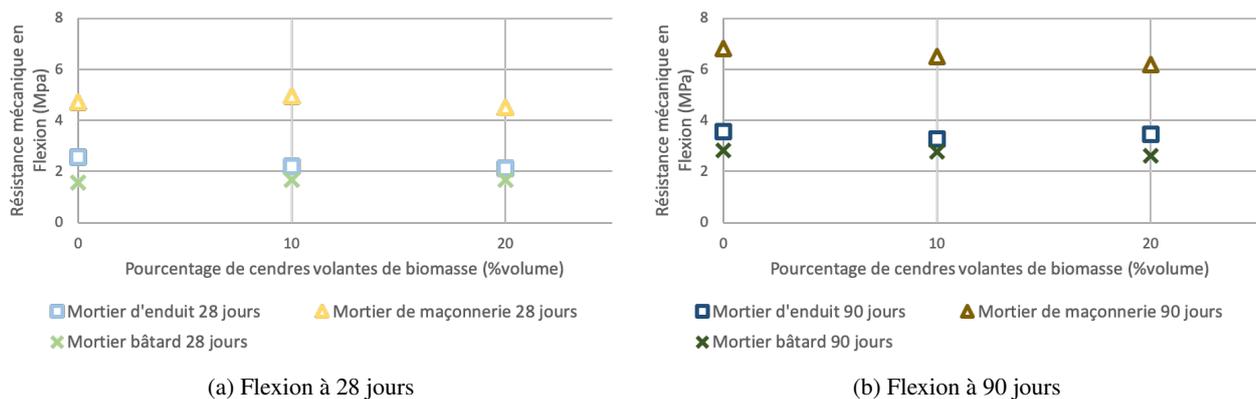


FIGURE 70 – Comparaison des résistances en flexion après 28 jours et 90 jours de durcissement en fonction du pourcentage de cendres volantes de biomasse

Comme pour la résistance en compression, les mortiers d'enduit, les mortiers de maçonnerie et les mortiers bâtards ont une résistance mécanique en flexion qui augmente lorsque le temps de durcissement augmente. Le gain de résistance en flexion en fonction du temps de durcissement est également beaucoup moins important que pour les mortiers de la partie A. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus pour la résistance en compression et peuvent être interprétés de la même façon.

La TABLE 28 montre le gain de résistance en flexion des échantillons de mortiers d'enduit, de maçonnerie et bâtards en fonction du temps de durcissement. Comme pour la résistance en compression, la résistance en flexion augmente lorsque le temps de durcissement des mortiers augmente. Le gain de résistance en flexion est relativement identique pour les mortiers d'enduit et les mortiers de maçonnerie. Le gain de résistance en flexion des mortiers bâtards est également légèrement plus élevé.

Gain de résistance en flexion (%)	M0	
	28 jours	90 jours
Mortier d'enduit	0	28
Mortier de maçonnerie	0	31
Mortier bâtard	0	45
	M10	
	28 jours	90 jours
Mortier d'enduit	0	33
Mortier de maçonnerie	0	24
Mortier bâtard	0	40
	M20	
	28 jours	90 jours
Mortier d'enduit	0	39
Mortier de maçonnerie	0	27
Mortier bâtard	0	36

TABLE 28 – Gain de résistance en flexion en fonction du temps de durcissement

3.2.3 Porosité apparente et absorption d'eau par immersion

Résultats :

Les résultats d'absorption d'eau par immersion et de porosité après 28 jours de durcissement des mortiers de maçonnerie et d'enduit réalisés avec des cendres volantes de biomasse se trouvent aux TABLES 29 et 30. Malheureusement, étant donné les circonstances dans lesquelles ce travail de fin d'études a été mené, l'évaluation des porosités et des absorptions d'eau par immersion des mortiers bâtards n'a pas pu être réalisée.

		21°C et 60% HR	Immersion		séchage 105°C	Densité	Absorption eau	Porosité
		m (g)	m _{sat,eau} (g)	m _{sat,air} (g)	m _{sec} (g)	d (g/cm ³)	(% masse)	n(% vol)
M0	1	235,26	141,00	257,93	228,82	1,96	12,72	24,90
	2	245,43	147,25	268,40	239,23	1,97	12,19	24,08
	3	241,47	144,96	262,93	235,37	2,00	11,71	23,36
M10	1	253,48	151,75	275,04	248,03	2,01	10,89	21,91
	2	254,79	152,86	277,67	249,32	2,00	11,37	22,71
	3	249,94	149,39	272,09	244,50	1,99	11,28	22,49
M20	1	244,90	146,97	268,05	239,67	1,98	11,84	23,44
	2	242,10	144,88	265,23	236,67	1,97	12,07	23,73
	3	239,69	143,80	263,03	234,34	1,97	12,24	24,06

TABLE 29 – Absorption d'eau par immersion et porosité apparente après 28 jours de durcissement du mortier d'enduit

		21°C et 60% HR	Immersion		séchage 105°C	Densité	Absorption eau	Porosité
		m (g)	m _{sat,eau} (g)	m _{sat,air} (g)	m _{sec} (g)	d (g/cm ³)	(% masse)	n(% vol)
M0	1	254,37	148,93	268,48	242,97	2,03	10,50	21,34
	2	257,31	151,03	272,17	246,44	2,03	10,44	21,24
	3	256,31	149,68	270,67	244,87	2,02	10,54	21,32
M10	1	261,29	153,73	277,86	249,40	2,01	11,41	22,93
	2	257,57	151,32	274,10	245,80	2,00	11,51	23,05
	3	257,28	151,37	274,06	245,82	2,00	11,49	23,02
M20	1	254,12	149,40	273,31	243,10	1,96	12,43	24,38
	2	254,68	149,82	273,53	243,92	1,97	12,14	23,94
	3	251,88	147,70	270,76	241,16	1,96	12,27	24,05

TABLE 30 – Absorption d'eau par immersion et porosité apparente après 28 jours de durcissement du mortier de maçonnerie

Comparaison :

La FIGURE 71 représente la comparaison des porosités et des absorptions d'eau par immersion après 28 jours de durcissement des mortiers de maçonnerie et d'enduit réalisés avec des cendres volantes de biomasse.

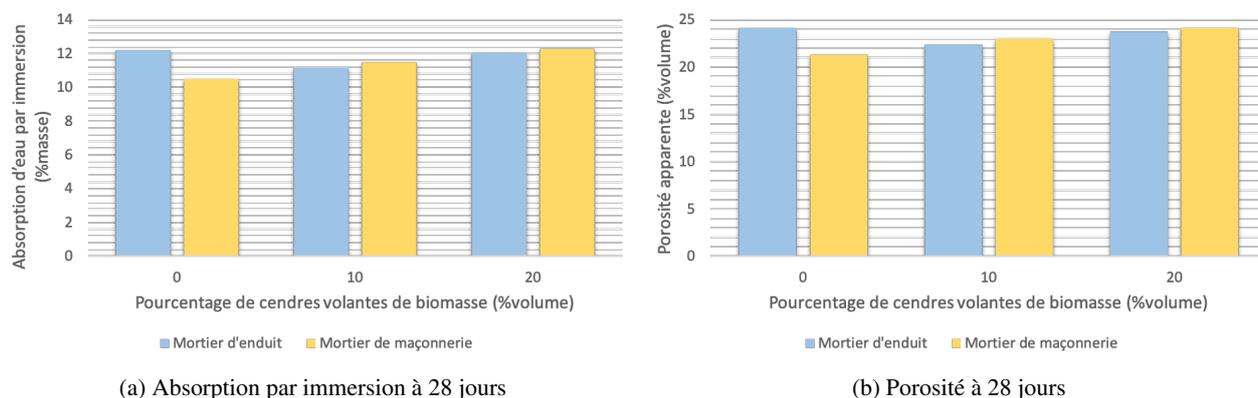


FIGURE 71 – Comparaison des porosités et des absorptions d'eau par immersion après 28 jours de durcissement des mortiers de maçonnerie et d'enduit

Comme on peut le voir sur les FIGURES 71 (a) et (b), la porosité et l'absorption par immersion des mortiers de maçonnerie et des mortiers d'enduit sont relativement équivalentes. Les deux types de mortiers sont composés de cendres volantes de biomasse. La différence entre les rapports L/S des deux types mortiers a seulement une influence au niveau du mélange M0. Comme expliqué précédemment, le mortier d'enduit et le mortier de maçonnerie ont un rapport L/S respectivement égal à 1/6 et 1/4. Le mortier de maçonnerie a donc un plus grand volume de liant que le mortier d'enduit, ce qui explique pourquoi sa résistance mécanique est supérieure, sa porosité apparente plus faible et son absorption d'eau par immersion également plus faible. Pour les autres mélanges (M10 et M20), la différence entre les deux rapports L/S n'a pas d'influence sur les valeurs de porosité apparente et d'absorption d'eau par immersion.

Comme on peut le voir à la FIGURE 71 (a), l'absorption d'eau par immersion augmente lorsque le taux de substitution du ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N par les cendres volantes de biomasse augmente. Comme pour

les mortiers de la partie A, ces résultats sont en accord avec la littérature [Ban & Ramli, 2011].

Comme le montre la FIGURE 71 (b), la porosité augmente également lorsque le taux de substitution du ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N par les cendres volantes de biomasse augmente. Comme pour les mortiers de la partie A, ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans la littérature [Davidenko, 2015, Sow, 2016].

Cinquième partie

Conclusions et recommandations

Plusieurs tests ont été réalisés afin d'évaluer la différence de comportement entre les cendres volantes de charbon et les cendres volantes de biomasse :

- L'ouvrabilité du mortier frais est beaucoup plus affectée par l'ajout de cendres volantes de biomasse que par l'ajout de cendres volantes de charbon. Les cendres volantes de biomasse ont un impact négatif sur la maniabilité du mortier.
- Contrairement à l'ouvrabilité, la masse volumique n'est pas affectée par l'ajout de cendres volantes de charbon ou par l'ajout de cendres volantes de biomasse.
- Au niveau de la résistance mécanique des mortiers, elle se détériore plus rapidement pour des mortiers contenant des cendres volantes de biomasse que pour des mortiers contenant des cendres volantes de charbon. Lorsque des cendres volantes de charbon sont ajoutées au mélange de mortier, les performances mécaniques à long terme sont généralement améliorées. Cependant, au delà de 30% de substitution, les performances mécaniques à long terme commencent à diminuer.
- Les cendres volantes de biomasse ont un impact plus négatif que les cendres volantes de charbon sur la porosité apparente et l'absorption d'eau par immersion. Les valeurs de porosité apparente et d'absorption d'eau par immersion obtenues augmentent d'avantage lorsque les cendres volantes de biomasse sont utilisées. Habituellement, l'ajout de cendres volantes de charbon diminue l'absorption d'eau par immersion.

Ensuite, des tests ont été réalisés afin d'étudier l'impact des cendres volantes de biomasse sur les mortiers d'enduit, les mortiers de maçonnerie et les mortiers bâtards :

- Les cendres volantes de biomasse n'affectent pas l'ouvrabilité de ces mortiers, la demande en eau étant relativement similaire pour chacun.
- La masse volumique n'est pas non plus affectée ni par l'ajout de cendres volantes de biomasse ni par le temps de durcissement. Le temps de durcissement pourrait affecter la masse volumique car plus les échantillons de mortier durcissent, plus l'eau contenue dans ceux-ci est consommée et donc plus la masse volumique diminue.
- Au niveau de la résistance mécanique, elle n'est pas non plus affectée ni par l'ajout de cendres volantes de biomasse ni par le temps de durcissement. La résistance mécanique des mortiers de maçonnerie est supérieure à celle des mortiers d'enduit et les mortiers bâtards. Le mortier d'enduit est moins résistant que le mortier de maçonnerie car il contient moins de ciment. Pour le même temps de durcissement, le mortier bâtard est moins résistant que le mortier de maçonnerie. Le mortier bâtard va prendre plus de temps à atteindre une résistance équivalente car la chaux retarde le temps de prise.
- Les cendres volantes de biomasse ont une nouvelle fois un impact plus négatif que les cendres volantes classiques sur la porosité apparente et l'absorption d'eau par immersion. Les valeurs de porosité apparente et d'absorption d'eau par immersion augmentent au fur et à mesure que la quantité de cendres volantes de biomasse augmente.

Suite à l'ensemble de ces tests, on peut affirmer que les cendres volantes de biomasse ont un impact plus négatif sur le mortier d'enduit et de maçonnerie que les cendres volantes de charbon. Cependant, les cendres volantes de biomasse peuvent être utilisées comme substitut du ciment Portland si le taux de substitution est limité à 20 %. Au delà, la résistance mécanique est rapidement détériorée, l'ouvrabilité largement réduite et la porosité apparente trop grande.

Ce travail de fin d'étude n'a pas permis d'effectuer l'ensemble des tests qu'il faudrait réaliser avant de pouvoir déterminer si les cendres volantes de biomasse peuvent être utilisées pour la fabrication des mortiers de ma-

çonnerie ou d'enduit. A l'avenir, plusieurs tests doivent être effectués afin de pouvoir évaluer avec exactitude le taux de substitution maximal admissible du ciment Portland par des cendres volantes de biomasse. Ces tests permettront de savoir si ce taux de substitution est envisageable en pratique. Les tests qui doivent être effectués sont les suivants :

- Les tests d'absorption par immersion et de porosité apparente doivent être effectués pour des temps de durcissement plus long, par exemple 90 jours.
- Au niveau des tests sur mortier frais, il est nécessaire de tester la teneur en air et le temps de prise des mortiers de maçonnerie et d'enduit.
- Il est également essentiel de tester la durabilité des mortiers de maçonnerie et d'enduit. L'évaluation du comportement au gel/dégel, à la diffusion chlorure, à la carbonatation accélérée et au gonflement est indispensable.

Sixième partie

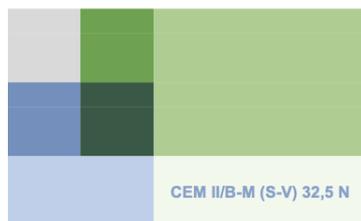
Annexes

1 Caractéristiques du ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N

Ciment Portland Composé

CEM II/B-M (S-V) 32,5 N

Février 2017 CEM II/B-M



CEM II/B-M (S-V) 32,5 N

1. Normes et certificats

Désignation	Marque	Norme	Certificat N°
CEM II/B-M (S-V) 32,5 N CE	CE	NBN EN 197-1	0965-CPR-C0097
CEM II/B-M (S-V) 32,5 N CE BENOR	BENOR	NBN B12	17/02/097
CEM II/B-M (S-V) 32,5 N CE	KOMO	BRL 2601	1118-16-1055
CEM II/B-M (S-V) 32,5 N CE NF	NF	NF 002	11.16

2. Composition déclarée

	Unité	Méthode d'essai	Valeurs moyennes	Exigences	
				Min	Max
Constituants en % de la somme des constituants principaux et secondaires					
Clinker (K)	%	-	70	65	79
Laitier (S)	%	-	11	6	35
Cendres volantes (V)	%	-	15	6	35
Calcaire (LL)	%	-	-	-	-
Filler	%	-	4	0	5
Ajouts en % du ciment fini					
Régulateur de prise	%	-	5	-	-
Agent de mouture	%	-	0.024	-	-
Agent réducteur *	%	-	0.3	-	-

* Conformément au Règlement CE 1907/2006 (Reach), un agent réducteur est ajouté à certains ciments afin de limiter la teneur en chrome (VI) soluble à 0,0002% maximum.

3. Caractéristiques chimiques et minéralogiques

	Unité	Méthode d'essai	Valeurs moyennes	Exigences	
				Min	Max
CaO	%	EN 196-2	50.9	-	-
SiO ₂	%	EN 196-2	27.6	-	-
Al ₂ O ₃	%	EN 196-2	8.3	-	-
Fe ₂ O ₃	%	EN 196-2	3.5	-	-
C ₂ A	%	EN 196-2	7.2	-	-
SO ₃	%	EN 196-2	2.6	-	≤ 3.5
Résidu insoluble	%	EN 196-2	13	-	-
Perte au feu	%	EN 196-2	2.5	-	-
Chlorures	%	EN 196-2	0.08	-	≤ 0.10
Chrome (VI) *	%	EN 196-10	< 0.0002	-	≤ 0.0002
Na ₂ Oeq**	%	EN 196-2	1.05	-	-
Sulfures	%	EN 196-2	-	-	-

* Conformément au Règlement CE 1907/2006 (Reach), la teneur en chrome (VI) soluble est limitée à 0,0002 % maximum.

** Valeur moyenne + 1,96 x écart-type.

Cimenteries CBR

Assistance Technique

Chaussée de La Hulpe 185 Terhulpsesleeweg

1170 Bruxelles

Tel : + 32 2 678 35 10

Fax : + 32 2 675 23 91

communication@cbr.be

www.cbr.be

ENCI

Assistance Technique

Postbus 3233

5203 DE 's-Hertogenbosch

Tel : + 31 73 640 12 20

Fax : + 31 73 640 12 18

tv@enci.nl

www.enci.nl



Usine de Lixhe

4. Caractéristiques physiques

	Unité	Méthode d'essai	Valeurs moyennes	Exigences	
				Min	Max
Blancheur	%	CIE 1931	0	-	-
Clarté L	%	CIE Lab	60	-	-
Eau de consistance normale	%	EN 196-3	27.5	-	-
Début de prise	min	EN 196-3	250	≥ 75	-
Fin de prise	min	EN 196-3	310	-	≤ 720
Stabilité	mm	EN 196-3	<1	-	≤ 10
Surface spécifique (Blaine)	cm ² /g	EN 196-6	3000	-	-
Refus au tamis de 200 µm	%	EN 196-6	0.02	-	≤ 3.0
Chaleur d'hydratation à 7 jours	J/g	EN 196-8	-	-	-
Masse volumique - Absolue	kg/m ³	-	2910	-	-
Masse volumique - Apparente	kg/m ³	-	1100	-	-

5. Caractéristiques mécaniques

	Unité	Méthode d'essai	Valeurs moyennes	Exigences	
				Min	Max
A 1 jour	MPa	EN 196-1	-	-	-
A 2 jours	MPa	EN 196-1	18.5	-	-
A 7 jours	MPa	EN 196-1	32.5	≥ 16	-
A 28 jours	MPa	EN 196-1	47.5	≥ 32.5	≤ 52.5
2d/28d	-	-	0.39	-	-

6. Production et conditionnement

Ce ciment est disponible dans les conditionnements suivants :

Vrac bateau	Vrac camion	Sac
X	X	X

7. Système de management certifié de l'usine.



8. Déclaration de performance

Déclaration de performance CPR(EU) Nr. 305/2011

Identification : 0965-CPR-C0097

Site internet : www.cbr.be

Les valeurs reprises ci-dessus sont des valeurs moyennes qui sont données à titre indicatif.
Les limites garanties figurent dans la colonne exigences.

2 Caractéristiques du ciment CEM I 52,5 N

Ciment Portland

CEM I 52,5 N (2)

CEM I

Février 2016

CEM I 52,5 N (2)

1. Normes et certificats

Désignation	Marque	Norme	Certificat N°
CEM I 52,5 N (2) CE	CE	NBN EN 197-1	0965-CPR-C0318
CEM I 52,5 N (2) CE BENOR	BENOR	NBN B12	16/02/318
CEM I 52,5 N (2) CE	KOMO	BRL 2601	1118-16-1059
CEM I 52,5 N (2) CE NF	NF	NF 002	11.15

2. Composition déclarée

	Unité	Méthode d'essai	Valeurs moyennes	Exigences	
				Min	Max
Constituants en % de la somme des constituants principaux et secondaires					
Clinker (K)	%	-	99	95	100
Laitier (S)	%	-	-	-	-
Cendres volantes (V)	%	-	-	-	-
Calcaire (LL)	%	-	-	-	-
Filler	%	-	1	0	5
Ajouts en % du ciment fini					
Régulateur de prise	%	-	6	-	-
Agent de mouture	%	-	0.13	-	-
Agent réducteur *	%	-	0.5	-	-

* Conformément au Règlement CE 1907/2006 (Reach), un agent réducteur est ajouté à certains ciments afin de limiter la teneur en chrome (VI) soluble à 0,0002% maximum.

3. Caractéristiques chimiques et minéralogiques

	Unité	Méthode d'essai	Valeurs moyennes	Exigences	
				Min	Max
CaO	%	EN 196-2	63.6	-	-
SiO ₂	%	EN 196-2	20.5	-	-
Al ₂ O ₃	%	EN 196-2	4.8	-	-
Fe ₂ O ₃	%	EN 196-2	3.4	-	-
C ₃ A	%	EN 196-2	-	-	-
SO ₃	%	EN 196-2	2.9	-	≤ 4.0
Résidu insoluble	%	EN 196-2	0.5	-	≤ 5.0
Perte au feu	%	EN 196-2	1.1	-	≤ 5.0
Chlorures	%	EN 196-2	0.04	-	≤ 0.10
Chrome (VI) *	%	EN 196-10	< 0.0002	-	≤ 0.0002
Na ₂ Oeq**	%	EN 196-2	0.83	-	-
Sulfures	%	EN 196-2	-	-	-

* Conformément au Règlement CE 1907/2006 (Reach), la teneur en chrome (VI) soluble est limitée à 0,0002 % maximum.

** Valeur moyenne + 1,96 x écart-type.

Cimenteries CBR

Assistance Technique

Chaussée de La Hulpe 185 Terhulpselaanweg
1170 Bruxelles

Tel : + 32 2 678 35 10

Fax : + 32 2 675 23 91

communication@cbr.be

www.cbr.be

ENCI

Assistance Technique

Postbus 3233

5203 DE 's-Hertogenbosch

Tel : + 31 73 640 12 20

Fax : + 31 73 640 12 18

tv@enci.nl

www.enci.nl



Usine de Lixhe

4. Caractéristiques physiques

	Unité	Méthode d'essai	Valeurs moyennes	Exigences	
				Min	Max
Biancheur	%	CIE 1931	0	-	-
Clarté L	%	CIE Lab	61	-	-
Eau de consistance normale	%	EN 196-3	26.8	-	-
Début de prise	min	EN 196-3	120	≥ 60	-
Fin de prise	min	EN 196-3	180	-	≤ 720
Stabilité	mm	EN 196-3	<1	-	≤ 10
Surface spécifique (Blaine)	cm ² /g	EN 196-6	4600	-	-
Refus au tamis de 200 µm	%	EN 196-6	0.01	-	≤ 3.0
Chaleur d'hydratation à 7 jours	J/g	EN 196-8	-	-	-
Masse volumique - Absolue	kg/m ³	-	3100	-	-
Masse volumique - Apparente	kg/m ³	-	1100	-	-

5. Caractéristiques mécaniques

	Unité	Méthode d'essai	Valeurs moyennes	Exigences	
				Min	Max
A 1 jour	MPa	EN 196-1	21	-	-
A 2 jours	MPa	EN 196-1	35	≥ 20	-
A 7 jours	MPa	EN 196-1	52	-	-
A 28 jours	MPa	EN 196-1	63	≥ 52.5	-
2d/28d	-	-	0.56	-	-

6. Production et conditionnement

Ce ciment est disponible dans les conditionnements suivants :

Vrac bateau	Vrac camion	Sac
X	X	-

7. Système de management certifié de l'usine.



8. Déclaration de performance

Déclaration de performance CPR(EU) Nr. 305/2011

Identification : 0965-CPR-C0318

Site internet : www.cbr.be

Les valeurs reprises ci-dessus sont des valeurs moyennes qui sont données à titre indicatif.
Les limites garanties figurent dans la colonne exigences.

3 Caractéristiques du sable jaune 0/2 mm

Rheinische Baustoffwerke GmbH Auenheimer Straße 25 D - 50129 Bergheim Site: Buir Kieswäsche		 0778 13				Page No.: 1/2 Révision: 00 Date: 24.06.2013			
Performances déclarées / Fiche technique avec description précise des caractéristiques des matériaux Annexe de la déclaration des performances No. 8.642-1/1									
EN 12620 - Granulats pour bétons					Certificat-No.: 0778-CPD-8642- 1/1 -12620				
EN 13139 - Granulats pour mortiers					Certificat-No.: 0778-CPD-8642- 1/1 -13139				
EN 13043 - granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et d'autres zones de circulation					Certificat-No.: 0778-CPD-8642- 1/1 -13043				
Description précise des caractéristiques des matériaux									
Nature et origine géologique: Quartär der Erft-Scholle; Hauptterrasse (H 16)									
No. du produit	58712	58701	58730	58705	58706	58707	58708	58709	58710
Granulométrie	0/1	0/2	0/4 MS	2/8	2/16	2/32	8/16	8/32	16/32
Contrôlé selon EN 12620:2002+A1:2008	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Contrôlé selon EN 13139:2002	●	●	●	●	---	---	---	---	---
Contrôlé selon EN 13043:2002	---	●	---	---	---	---	---	---	---
Catégorie G	G _F 85	G _F 85	G _F 85	G _C 85/20	G _C 90/15	G _C 90/15	G _C 85/20	G _C 90/15	G _C 85/20
Teneur en fines EN 12620	f ₃	f ₃	f ₁₀	f _{1,5}	f _{1,5}	f _{1,5}	f _{1,5}	f _{1,5}	f _{1,5}
Teneur en fines EN 13139	Kat. 1	Kat. 1	Kat. 3	Kat. 1	---	---	---	---	---
Teneur en fines EN 13043	---	f ₃	---	---	---	---	---	---	---
Contaminants légères EN 12620, EN 13139	Q _{0,5}	Q _{0,25}	Q _{0,5}	Q _{0,05}	Q _{0,05}	Q _{0,05}	Q _{0,05}	Q _{0,05}	Q _{0,05}
Contaminants légères EN 13043	---	m _{LPC} 0,1	---	---	---	---	---	---	---
Teneur en matière humique	adminse	adminse	adminse	---	---	---	---	---	---
Coefficient d'aplatissement	---	---	---	FI ₁₅	FI ₁₅	FI ₁₅	FI ₁₅	FI ₁₅	FI ₁₅
Masse volumique réelle ρ _a [Mg/m ³]	2,65	2,65	2,65	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,61
Absorption d'eau [% WA]	0,8	0,7	0,7	2,0	---	---	1,4	---	1,1
Éléments coquillers	---	---	---	SC ₁₀	SC ₁₀	SC ₁₀	SC ₁₀	SC ₁₀	SC ₁₀
Chlorures	Cl _{0,02}	Cl _{0,02}	Cl _{0,02}	Cl _{0,02}	Cl _{0,02}	Cl _{0,02}	Cl _{0,02}	Cl _{0,02}	Cl _{0,02}
Sulfates solubles dans l'acide	AS _{0,2}	AS _{0,2}	AS _{0,2}	AS _{0,2}	AS _{0,2}	AS _{0,2}	AS _{0,2}	AS _{0,2}	AS _{0,2}
Soufre total [M.-%]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Résistance Gel-Dégel	---	---	---	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁
Résistance Gel-Dégel**	---	---	---	F _{EC5}	F _{EC5}	F _{EC5}	F _{EC5}	F _{EC5}	F _{EC5}
Valeur de sulfate de magnésium***	---	---	---	MS ₁₈	MS ₁₈	MS ₁₈	MS ₁₈	MS ₁₈	MS ₁₈
Polissage accéléré	---	---	---	PSV _{NR}	PSV _{NR}	PSV _{NR}	PSV _{NR}	PSV _{NR}	PSV _{NR}
Écoulement des Sables (E _{CS} Déclarée)	E _{CS} 30	E _{CS} 29	E _{CS} 13	---	---	---	---	---	---
Résistance à l'abrasion	---	---	---	AAV _{NR}	AAV _{NR}	AAV _{NR}	AAV _{NR}	AAV _{NR}	AAV _{NR}
Résistance à l'abrasion provoquée par les pneus au crampons	---	---	---	A _N NR	A _N NR	A _N NR	A _N NR	A _N NR	A _N NR
Petrait au séchage*	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD
Emission de radioactivité*	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD
Libération de métaux lourds*	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD
Libération d'hydrocarbures polycycliques*	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD
Libération d'autres substances dangereuses*	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD	NPD
Durabilité face à la réaction alcalisilice	E I	E I	E I	E I	E I	E I	E I	E I	E I
*) NPD = "NO PERFORMANCE DETERMINED" (Pas déterminée par le producteur) **) Selon TL Gestein-SIB 04 et ZTV-ING 2006 Testée avec solution 1 % de chlorure de sodium; Pourcentage de perte de masse < 5 % ***) MS ₁₈ : Examinée par méthode NaCl									

Rheinische Baustoffwerke GmbH Auenheimer Straße 25 D - 50129 Bergheim Site: Buir Kieswäsche	 0778 13		Page No.: 2/2 Révision: 00 Date: 24.06.2013
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------

Valeurs spécifiques avec tamis intermédiaires

sable												
No. du produit	Granulométrie	granularité typiques du site										tolérances d'après Tableau 4 ou Tableau C.1
		Pourcentage en masse du passant										
		0,063	0,25	1	1,4	2	2,8	4	5,6	8		
58712	0/1	2	41	93	97	100						Tab. 4
58701	0/2	1	9	75	---	94	99	100				Tab. C.1
58730	0/4	Composants granulométriques sur demande										
58510	0/4 (MS)	6	16	77	---	92	---	99	100	100		Tab. 4

gravillon												
Sorte	Granulométrie	0,063	1	2	4	8	16	22,4	31,5	45	63	tolérances
58706	2/16	1	2	3	20	50	95	100	100			G _T 17,5 (8 mm)
58707	2/32	1	2	3	10	25	65	90	98	100	100	G _T 17,5 (16 mm)
58709	8/32	1			2	5	50	80	100	100	100	G _T 17,5 (16 mm)
58704	0/32	1			50	60	80	95	100	100	100	non requis
58710	16/32	1				1	6	58	99	100	100	

grave													
No. du produit	Granulométrie	Limites générales des tamis indiqués ci-dessous. Pourcentage en masse du passant +/- 20 %.					Catégorie						
		1	2	4	8	16	Catégorie G	teneur en fines					
58702	0/8	40		70			G _A 90	f ₃					
58703	0/16		40		70		G _A 90	f ₃					
58704	0/32			40		70	G _A 90	f ₃					
500--	WBZ	Composants granulométriques selon DIN 1045-2											

d'autres caractéristiques

Les caractéristiques et les propriétés suivantes ont été déterminées par notre FPC, mais hors de la surveillance des organismes externes et de la CE.

Granulométrie	0/1	0/2	0/4 MS	2/8	2/16	2/32	8/16	8/32	16/32
Equivalent de sable [SE]	---	89	---	---	---	---	---	---	---
Essai au bleu de méthylène [MB]	1,0	0,5	1,3	---	---	---	---	---	---
Grosseur du sable	FP	MP	MP	---	---	---	---	---	---
Module de finesse des sables	FF = 1,8 CF = 2,9 CF = 2,7			---	---	---	---	---	---
Résistance au polissage (selon "Wehner Schulze")	---	0,60	---	---	---	---	---	---	---
Masse volumique en vrac, non compacté [Mg/m³]	1,48	1,51	---	1,47	---	---	1,46	---	1,44
Masse volumique en vrac, séché et compactée [Mg/m³]	---	1,76	---	1,68	---	---	1,64	---	1,61
Porosité intergranulaire, sèche en compactée [%]	---	30	---	36	---	---	37	---	38
Teneur en carbonate [M.-%]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Los Angeles	---	---	---	---	---	---	LA ₃₅	---	---
Micro-Deval	---	---	---	---	---	---	MD _E 15	---	---

analyse chimique de sable 0/2 selon "RdErl des Ministeriums für Frauen, Jugend Familie und Gesundheit v. 16.03.2000 - III - B 4 - 0292.5.31" - (test d'aptitude du sable pour des terrains de jeux)

Analyse chimique	valeur réelle	valeur limite	Les concentrations mesurée de substances: l'arsenic, le cadmium, le chrome et le plomb sont dans les limites pour des terrains de jeux.
Arsen [mg/kg TS]	< 5,0	10	
Cadmium [mg/kg TS]	0,02	0,5	
Chrom ges. [mg/kg TS]	9,6	15	
Plomb [mg/kg TS]	7,4	20	

perte au feu, sable 0/2	durée 1 h	pH (sable 0/2)	Analyse par fluorescence X sable 0/2									
			SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂		
bei 550°C	[%]	0,5										
bei 1050°C	[%]	0,8										
		pH _{CaCl₂, 0,01mol/l} =										
		7,4	[%]	95,1	0,7	2,48	0,14	0,15	0,31	1,08	0,079	

4 Composition chimique des cendres volantes de biomasse venant de plusieurs espèces de bois [Ban & Ramli, 2011]

Biomass group, sub-group and variety	SiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	TiO ₂
<i>Wood and woody biomass</i>										
Alder-fir sawdust	37.49	26.41	6.1	2.02	12.23	4.04	8.09	0.83	1.81	0.98
Balsam bark	26.06	45.76	10.7	4.87	1.91	2.33	2.65	2.86	2.65	0.21
Beech bark	12.4	68.2	2.6	2.3	0.12	11.5	1.1	0.8	0.9	0.1
Birch bark	4.38	69.06	8.99	4.13	0.55	5.92	2.24	2.75	1.85	0.13
Christmas trees	39.91	9.75	8.06	2.46	15.12	2.59	9.54	11.66	0.54	0.37
Elm bark	4.48	83.46	5.47	1.62	0.12	2.49	0.37	1	0.87	0.12
Eucalyptus bark	10.04	57.74	9.29	2.35	3.1	10.91	1.12	3.47	1.86	0.12
Fir mill residue	19.26	15.1	8.89	3.65	5.02	5.83	8.36	3.72	29.82	0.35
Forest residue	20.65	47.55	10.23	5.05	2.99	7.2	1.42	2.91	1.6	0.4
Hemlock bark	2.34	59.62	5.12	11.12	2.34	14.57	1.45	2.11	1.22	0.11
Land clearing wood	65.82	5.79	2.19	0.66	14.85	1.81	1.81	0.36	2.7	0.55
Maple bark	8.95	67.36	7.03	0.79	3.98	6.59	1.43	1.99	1.76	0.12
Oak sawdust	29.93	15.56	31.99	1.9	4.27	5.92	4.2	3.84	2	0.39
Oak wood	48.95	17.48	9.49	1.8	9.49	1.1	8.49	2.6	0.5	0.1
Olive wood	10.24	41.47	25.16	10.75	2.02	3.03	0.88	2.65	3.67	0.13
Pine bark	9.2	56.83	7.78	5.02	7.2	6.19	2.79	2.83	1.97	0.19
Pine chips	68.18	7.89	4.51	1.56	7.04	2.43	5.45	1.19	1.2	0.55
Pine pruning	7.76	44.1	22.32	5.73	2.75	11.33	1.25	4.18	0.42	0.17
Pine sawdust	9.71	48.88	14.38	6.08	2.34	13.8	2.1	2.22	0.35	0.14
Poplar	3.87	57.33	18.73	0.85	0.68	13.11	1.16	3.77	0.22	0.28
Poplar bark	1.86	77.31	8.93	2.48	0.62	2.36	0.74	0.74	4.84	0.12
Sawdust	26.17	44.11	10.83	2.27	4.53	5.34	1.82	2.05	2.48	0.4
Spruce bark	6.13	72.39	7.22	2.69	0.68	4.97	1.9	1.88	2.02	0.12
Spruce wood	49.3	17.2	9.6	1.9	9.4	1.1	8.3	2.6	0.5	0.1
Tamarack bark	7.77	53.5	5.64	5	8.94	9.04	3.83	2.77	3.4	0.11
Willow	6.1	46.09	23.4	13.01	1.96	4.03	0.74	3	1.61	0.06
Wood	23.15	37.35	11.59	2.9	5.75	7.26	3.27	4.95	2.57	1.2
Wood residue	53.15	11.66	4.85	1.37	12.64	3.06	6.24	1.99	4.47	0.57
Mean	22.22	43.03	10.75	3.48	5.09	6.07	3.44	2.78	2.85	0.29

5 Essai au pycnomètre à gaz de la chaux hydratée



Université de Liège

Université de Liège - Laboratoire de Géotechnologies

Essai au pycnomètre à gaz



Dossier :

Opérateur : IP

Calibration Vcell et Vexp

Vcell :	8,6218825	Tare :	1,52
Vexp :	6,2261874	Tare+tech :	2,918
Pres.Cal (PSI):	14,35		

Calcul échantillon:

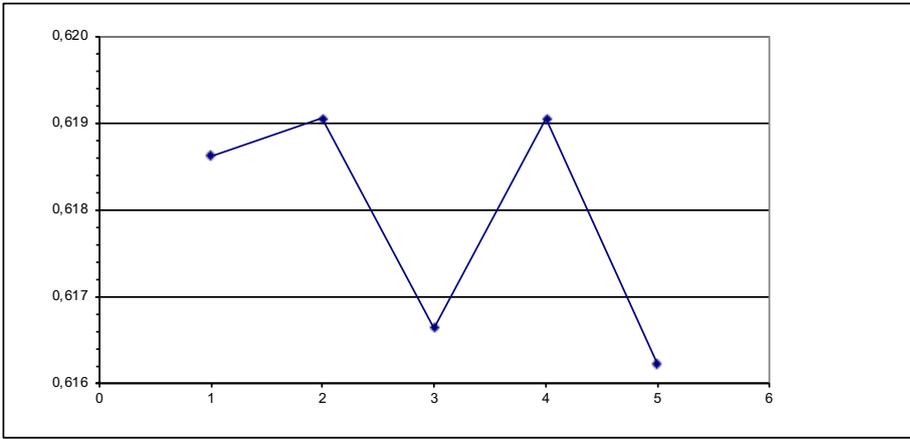
Nom échantillon :	chaux	Long. Plug (cm):	0
Masse (gr) :	1,398	diam. plug(cm):	0
Date de mesure :	12/02/20	Vtot plug (cm³):	0,000
Opérateur :	IP		

Vsample=Vcell-Vexp/((P1/P2)-1)

	P1	P2	cm³ Vs	gr/cm³ densité	cm³ Volume por	% porosité
1	14,341	8,066	0,61863	2,25984		
2	14,336	8,063	0,61905	2,25829		
3	14,327	8,059	0,61664	2,26712		
4	14,32	8,054	0,61906	2,25828		
5	14,316	8,053	0,61622	2,26868		

porosite %=INT((Vtot - Vs(i)) / Vtot) *100

nb.mesure:	5	Moyenne :	0,6179	2,2624	-
------------	---	-----------	--------	--------	---



Measurement	Vs (cm³)
1	0,61863
2	0,61905
3	0,61664
4	0,61906
5	0,61622

6 Essai au pycnomètre à gaz du ciment CEM II/B-M (S-V) 32,5 N



Université de Liège

Université de Liège - Laboratoire de Géotechnologies

Essai au pycnomètre à gaz



Dossier : _____ Opérateur : IP

Calibration Vcell et Vexp

Vcell : 8,6218825
 Vexp : 6,2261874
 Pres.Cal (PSI): 14,35

Tare : 1,52
 Tare+tech : 4,763

Long. Plug (cm): 0
 diam. plug(cm): 0
 Vtot plug (cm³): 0,000

Calcul échantillon:

Nom échantillon : CEM
 Masse (gr) : 3,243
 Date de mesure : 13/02/20
 Opérateur : IP

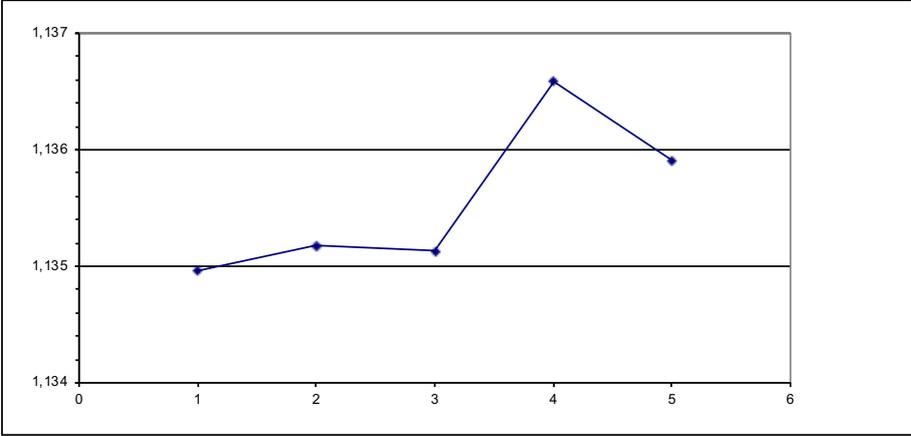
Vsample=Vcell-Vexp/((P1/P2)-1)

porosite %=INT((Vtot - Vs(i)) / Vtot) *100

	P1	P2	cm³ Vs	gr/cm³ densite	cm³ Volume por	% porosite
1	14,336	7,827	1,13496	2,85737		
2	14,36	7,84	1,13518	2,85682		
3	14,316	7,816	1,13513	2,85694		
4	14,331	7,8235	1,13658	2,85329		
5	14,324	7,82	1,13591	2,85499		

nb.mesure: 5

Moyenne : 1,1356 2,8559



7 Essai au pycnomètre à gaz des cendres volantes de biomasse



Université de Liège

Université de Liège - Laboratoire de Géotechnologies

Essai au pycnomètre à gaz



Dossier : _____ Opérateur : IP

Calibration Vcell et Vexp

Vcell : 8,6218825
 Vexp : 6,2261874
 Pres.Cal (PSI): 14,35

Tare : 1,52
 Tare+tech : 2,627

Long. Plug (cm): 0
 diam. plug(cm): 0
 Vtot plug (cm³): 0,000

Calcul échantillon:

Nom échantillon : CVB
 Masse (gr) : 1,107
 Date de mesure : 12/02/19
 Opérateur : IP

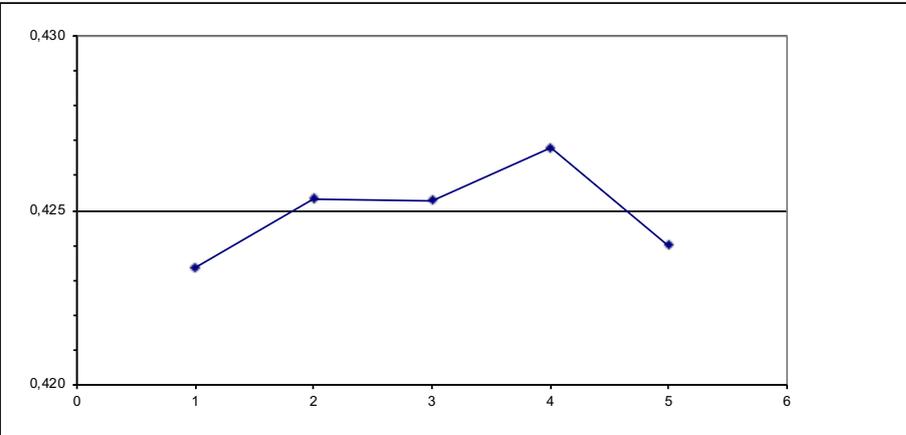
Vsample=Vcell-Vexp/((P1/P2)-1) porosite %=(Vtot - Vs(i)) / Vtot *100

	P1	P2	cm³ Vs	gr/cm³ densite	cm³ Volume por	% porosite
1	14,276	8,114	0,42336	2,61478		
2	14,303	8,1285	0,42534	2,60264		
3	14,288	8,12	0,42528	2,60299		
4	14,3085	8,131	0,42680	2,59373		
5	14,28	8,116	0,42400	2,61084		

nb.mesure: 5

Moyenne : 0,4250 2,6050

-



8 Production et utilisation des produits de combustion du charbon en 2016

Production and Utilisation of CCPs in 2016 in Europe (EU 15) [kilo tonnes (metric)]

	Fly Ash	Bottom Ash	Boiler Slag	FBC-Ash	Other ¹⁾	SDA-Product	FGD-Gypsum			
	1	2	3	4	5	6	7			
CCP Production										
Subtotal 1 - 5	25,741	3,618	490	568	1	384	9,531			
Subtotal 6 - 7										
Total 1 - 7								9,915		
									40,333	
CCP Utilisation										
Cement raw material	1	1,881	186					Cement raw material	2,076	5.0
Blended cement	2	1,936	0		0			Blended cement	1,936	4.7
Concrete addition	3	4,638	1	13				Concrete addition	4,652	11.2
Aerated concrete blocks	4	433	8					Aerated concrete blocks	441	1.1
Non-aerated concrete blocks	5	195	649					Non-aerated concrete blocks	844	2.0
Lightweight aggregate	6							Lightweight aggregate		
Bricks + ceramics	7	63	22					Bricks + ceramics	85	0.2
Grouting	8	229			0			Grouting	229	0.6
Asphalt filler	9	22						Asphalt filler	22	0.1
Subgrade stabilisation	10	71	18		0			Subgrade stabilisation	89	0.2
Pavement base course	11		80	60				Pavement base course	140	0.3
General engineering fill	12	928	322		173		29	General engineering fill	1,452	3.5
Structural fill	13	569	89				15	Structural fill	673	1.6
Soil amendment	14	43						Soil amendment	43	0.1
Infill	15	167			67		121	Infill	355	0.9
Blasting grit	16			417				Blasting grit	417	1.0
Plant nutrition	17					0		Plant nutrition	0	0.0
Set retarder for cement	18						536	Set retarder for cement	536	1.3
Projection plaster	19						749	Projection plaster	749	1.8
Plaster boards	20						4,173	Plaster boards	4,173	10.0
Gypsum blocks	21						287	Gypsum blocks	287	0.7
Self levelling floor screeds	22						1,356	Self levelling floor screeds	1,356	3.3
Other uses	23	187	0	0	6	1	17	Other uses	234	0.6
Reclamation, Restoration	24	13,854	1,968		213		127	Reclamation, Restoration	17,239	41.5
Temporary stockpile	25	263	60	0	0		407	Temporary stockpile	730	1.8
Disposal	26	1,359	280	29	100		75	Disposal	2,778	6.7
Total utilisation 1 - 23	27	11,362	1,375	490	255	1	182	Total utilisation 1 - 23	20,789	50.1
Utilisation rate in %	28	42	37	94	45	100	47	Utilisation rate in %		
Average utilisation rate in %	29							Average utilisation rate in %		
Total utilisation 1 - 24	30	25,216	3,343	490	468	1	309	Total utilisation 1 - 24	38,028	91.6
Utilisation rate in %	31	94	91	94	82	100	80	Utilisation rate in %		
Average utilisation rate in %	32							Average utilisation rate in %		
Reuse of stockpiled CCPs	33	1,097	65	29	0	0	12	Reuse of stockpiled CCPs	1,203	2.9
Total production 1-26 incl. reuse	34	26,838	3,683	519	568	1	384	Total production 1-26 incl. reuse	41,536	100.0

¹⁾ cenospheres, sludges



Références

- [Arandigoyen & Alvarez, 2007] Arandigoyen, M. & Alvarez, J. (2007). Pore structure and mechanical properties of cement–lime mortars. *Cement and Concrete Research*, 37.
- [Ayrinhac, 2008] Ayrinhac, F. (2008). *Valorisation des cendres de chaudières à lit fluidisé circulant dans la filière du génie civil*. PhD thesis, Université de Toulouse.
- [Balakrishnan et al., 2017] Balakrishnan, B., Awal, A. S. M. A., Abdullah, A. H. B., & Hossain, M. Z. (2017). Flow properties and strength behaviour of masonry mortar incorporating high volume fly ash. *International Journal of GEOMATE*, 12.
- [Ban & Ramli, 2011] Ban, C. C. & Ramli, M. (2011). The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar : An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 55.
- [Berra et al., 2015] Berra, M., Mangialardi, T., & Paolini, A. E. (2015). Reuse of woody biomass fly ash in cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 76.
- [Bouarroudj et al., 2017] Bouarroudj, M. E. K., Colman, C., Robinet, E., Zhao, Z., Michel, F., Courard, L., Remond, S., & Bulteel, D. (2017). Utilisation du béton recyclé dans la formulation des bétons auto-compactants. In *18e édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton*.
- [Boulday & Marcovecchio, 2016] Boulday, D. & Marcovecchio, F. (2016). Valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse - revue des gisements et des procédés associés. *RECORD*.
- [Braga et al., 2012] Braga, M., de Brito, J., & Veiga, R. (2012). Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. *Construction and Building Materials*, 36.
- [Brocken et al., 2000] Brocken, H. P., van der Pers, N. M., & Larbi, J. A. (2000). Composition of lime-cement and air-entrained cement mortar as a function of distance to the brick-mortar interface : consequences for masonry. *Matériaux et Constructions*, 33.
- [Brooks & Bakar, 2004] Brooks, J. J. & Bakar, B. H. A. (2004). Shrinkage and creep of masonry mortar. *Matériaux et Constructions*, 37.
- [Caillat et al., 2010] Caillat, S., Perdrix, E., Tabet, K., & Taupin, B. (2010). Cocombustion de charbon et de biomasse - cas des chaudières industrielles. *Techniques de l'ingénieur*.
- [Chama, 2015] Chama, F. (2015). Composition and uses of lime and mortar. *Building Technology Demystified*.
- [Chindaprasirt et al., 2005] Chindaprasirt, P., Buapa, N., & Cao, H. (2005). Mixed cement containing fly ash for masonry and plastering work. *Construction and Building Materials*, 19.
- [Courard, 2018] Courard, L. (2018). *Transforming wastes into secondary resources : challenges for construction industry*. Department ARGENCO Urban and Environmental Engineering, University of Liège.
- [Courard, 2019] Courard, L. (2019). *Matériaux à liants hydrauliques La chaux et le plâtre*. Département ArGENCO Secteur GEMME - Matériaux de Construction.
- [Davidenko, 2015] Davidenko, T. (2015). *Hydratation d'un système cimentaire binaire contenant des cendres volantes de biomasse*. PhD thesis.
- [Dessy et al., 2000] Dessy, P., Fantucci, A., V.Galimberti, & L.Nironi (2000). Performance and durability tests for plastering mortars. In *12th international brick/block masonry conference*.
- [Detriche et al., 1985] Detriche, C., Gallias, J., Grandet, J., & Maso, J. (1985). Influence des paramètres de mise en œuvre et de composition sur le comportement des mortiers d'enduit. *Matériaux et Constructions*, 18.
- [Directindustry, 2020] Directindustry (2020). <https://www.directindustry.fr/prod/micromeritics-instrument-corp/product-30867-312418.html>. Accessed 31 May 2020.

- [Ecoba, 2016] Ecoba (2016). <http://www.ecoba.com/ecobaccpprod.html>. Accessed 13 May 2020.
- [EDF, 2017] EDF (2017). La biomasse en chiffres. <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/la-biomasse-en-chiffres>. Accessed 12 May 2020.
- [Electrabel, 2016] Electrabel (2016). Engie electrabel - produire l'électricité : investir dans un parc diversifié. https://corporate.engie-electrabel.be/wp-content/uploads/2016/04/160420_engie_centrales techno_fr_web.pdf. Accessed 15 May 2020.
- [Esteves et al., 2012] Esteves, T., Rajamma, R., Soares, D., Silva, A., Ferreira, V., & Labrincha, J. (2012). Use of biomass fly ash for mitigation of alkali-silica reaction of cement mortars. *Construction and Building Materials*, 26.
- [Expresso, 2019] Expresso (2019). production d'énergies renouvelables en belgique.
- [Fendeleur et al., 1998] Fendeleur, S., Trouvé, G., & Delfosse, L. (1998). Métaux lourds et incinération de déchets industriels : localisation et spéciation dans les cendres volantes et les mâchefers. *Déchets - sciences et techniques*, 12.
- [Fernández-Ledesma et al., 2016] Fernández-Ledesma, E., Jiménez, J., Ayuso, J., Corinaldesi, V., & Iglesias-Godino, F. (2016). A proposal for the maximum use of recycled concrete sand in masonry mortar design. *Materiales de Construcción*, 66.
- [Garcia-Lodeiro et al., 2016] Garcia-Lodeiro, I., Carcelen-Taboada, V., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2016). Manufacture of hybrid cements with fly ash and bottom ash from a municipal solid waste incinerator. *Construction and Building Materials*, 105.
- [Garg & Pundir, 2012] Garg, M. & Pundir, A. (2012). Comprehensive study of fly ash binder developed with fly ash - alpha gypsum plaster - portland cement. *Construction and Building Materials*, 37.
- [IBGE, 2009] IBGE (2009). La biomasse et la bioenergie (er 12).
- [ICEDD, 2007] ICEDD (2007). Situation environnementale des industries : La production d'électricite. <http://environnement.wallonie.be/enviroentreprises/input/acrobat/Rapport%20Energie%202007.pdf>. Accessed 15 May 2020.
- [Infociments, 2005] Infociments (2005). Caractéristiques et emplois des ciments. <https://www.infociments.fr/ciments/caracteristiques-et-emplois-des-ciments>. Accessed 26 May 2020.
- [Jiménez et al., 2013] Jiménez, J., Ayuso, J., López, M., Fernández, J., & de Brito, J. (2013). Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. *Construction and Building Materials*, 40.
- [Ledesma et al., 2015] Ledesma, E. F., Jimenez, J. R., Ayuso, J., Fernandez, J. M., & de Brito, J. (2015). Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production e part-i : ceramic masonry waste. *Journal of Cleaner Production*, 87.
- [Lognay et al., 2017] Lognay, V., Buchet, G., & Brasseur, N. (2017). Le terril du hénâ - les défis de sa stabilisation à son évacuation finale. In *CERES*.
- [Micromeritics, 2020] Micromeritics (2020). Effective solutions for material characterization - specification sheet. <https://www.micromeritics.com/product-showcase/AccuPyc-II-1340.aspx>. Accessed 28 March 2020.
- [Mokhtar et al., 2018] Mokhtar, R., Abdelouahed, K., & Abdessamed, M. (2018). Physico-mechanical properties of plaster mortar reinforced with date palm fibers. *Trends in Civil Engineering and its Architecture*, 3.

- [Planetoscope, 2016] Planetoscope (2016). La production mondiale de charbon. <https://www.planetoscope.com/Source-d-energie/1467-production-mondiale-de-charbon.html>. Accessed 18 May 2020.
- [Ployaert, 2010] Ployaert, C. (2010). Limiter la fissuration - condition indispensable a la durabilite des betons. *Technologie*.
- [Rajamma et al., 2009] Rajamma, R., Ball, R. J., Tarelho, L. A., Allen, G. C., Labrincha, J. A., & Ferreira, V. M. (2009). Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. *Journal of Hazardous Materials*, 172.
- [Rajamma et al., 2015] Rajamma, R., Senff, L., Ribeiro, M., Labrincha, J., Ball, R., & Allen, G. (2015). Biomass fly ash effect on fresh and hardened state properties of cement based materials. *Composites Part B*, 77.
- [Samiei et al., 2015] Samiei, R. R., Daniotti, B., Pelosato, R., & Dotelli, G. (2015). Properties of cement–lime mortars vs. cement mortars containing recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 84.
- [Sow, 2016] Sow, M. (2016). *Réalisation d'éco-ciments par la valorisation de cendres volantes de charbon non conventionnelles issues de centrales thermiques Spreader Stoker*. PhD thesis, Université Paul Sabatier (Toulouse III).
- [Taerwe, 2018] Taerwe, L., Ed. (2018). *Technologie du Béton*. Groupement Belge du Béton.
- [Tchamdjou et al., 2017] Tchamdjou, W. H. J., Grigoletto, S., Michel, F., Courard, L., Abidi, M. L., & Cheradi, T. (2017). An investigation on the use of coarse volcanic scoria as sand in portland cement mortar. *Case Studies in Construction Materials*, 7.
- [Tedeschi, 2018] Tedeschi, L. (2018). Mécanismes physico-chimiques de dégradation des enduits de façades. *Chaux et enduits de Saint-Astier (CESA)*.
- [Torres & García-Ruiz, 2009] Torres, M. L. & García-Ruiz, P. (2009). Lightweight pozzolanic materials used in mortars : Evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption. *Cement and Concrete Composites*, 31.
- [Uliège, 2020] Uliège (2020). Mooc construirecycler.
- [Vimark, 2020] Vimark (2020). Le phénomène naturel de la carbonatation des enduits. <https://www.vimark.com/fr/phenomene-naturel-carbonatation-enduits/>. Accessed 25 May 2020.
- [Wallonie, 1995] Wallonie (1995). Les catégories de déchets. <http://environnement.wallonie.be/rapports/owd/pwd/catflux1.pdf>. Accessed 15 May 2020.
- [Wang et al., 2008] Wang, S., Baxter, L., & Fonseca, F. (2008). Biomass fly ash in concrete : Sem, edx and esem analysis. *Fuel*, 87.
- [WattElse, 2019] WattElse (2019). La biomasse, un secteur d'avenir pour les énergies renouvelables en wallonie ! <https://wattelse.be/biomasse-wallonie/>. Accessed 12 May 2020.
- [Wienerberger, 2020] Wienerberger (2020). Une question concernant le mortier de maçonnerie ? <https://www.wienerberger.be/fr/facade/inspiration-et-conseils/questions-concernant-mortier.html>. Accessed 25 May 2020.
- [Wikipedia, 2020a] Wikipedia (2020a). [https://fr.wikipedia.org/wiki/Mortier_\(matériaux\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mortier_(matériaux)). Accessed 28 March 2020.
- [Wikipedia, 2020b] Wikipedia (2020b). <https://fr.wikipedia.org/wiki/Terril>. Accessed 16 May 2020.
- [Wikipedia, 2020c] Wikipedia (2020c). [https://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse_\(energie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse_(energie)). Accessed : 28 March 2020.

- [Wikipedia, 2020d] Wikipedia (2020d). [https://fr.wikipedia.org/wiki/Enduit_\(batiment\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Enduit_(batiment)). Accessed 28 March 2020.
- [Wikipedia, 2020e] Wikipedia (2020e). Liste des pays par production de charbon. https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_pays_par_production_de_charbon. Accessed 18 May 2020.
- [Wintgens, 2019] Wintgens, M. (2019). Durabilité des liants fabriqués à partir de fines provenant du recyclage de brique.
- [Zhao, 2014] Zhao, Z. (2014). *Valorisation des sables de béton recyclé pour la fabrication de mortiers*. PhD thesis, L'école des mines de Douai and L'Université Lille 1.
- [Zhao et al., 2018] Zhao, Z., Courard, L., Michel, F., & Remond, S. (2018). Use of biomass fly ash as partial cement replacement in the manufacture of mortars. In *Feder Ecoliser (ÉCOLiants pour traitement de Sols, Etanchéité et Routes)*.
- [Zhao et al., 2013] Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., & Xu, W. (2013). Influence of hardened cement paste content on the water absorption of fine recycled concrete aggregates. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*.
- [Zhao et al., 2015] Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., & Xu, W. (2015). Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 81.