

## **Travail de Fin d'Etudes : Comportement des mâchefers d'incinérateur d'ordures ménagères dans les bétons**

**Auteur :** Martin, Louis

**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/2268.2/9027>

---

### *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

**Comportement des mâchefers  
d'incinérateur d'ordures ménagères dans les  
bétons**

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de  
master Ingénieur Civil des Constructions par Louis Martin

---

Année académique 2019–2020

Promoteur : Luc Courard

Jury : Luc Courard (promoteur)  
Zengfeng Zhao (guidance)  
Frédéric Collin  
Stéphanie Lambert  
Christian Pierre



# Résumé

Dans le monde, plus de deux milliards de tonnes de déchets urbains sont produits chaque année. La valorisation énergétique de ces derniers est l'une des solutions les plus couramment utilisées pour leur traitement en raison d'une part, de la production d'électricité et d'autre part, de la réduction conséquente du volume. Après combustion, il subsiste un résidu correspondant à 20% de la masse initiale : ce sont les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères. Après avoir été traités, ils sont majoritairement utilisés dans les couches de sous-fondation pour la construction routière. Cependant leur utilisation ne se limite pas à ce simple usage. De nombreuses études ont été réalisées afin d'étudier l'influence de l'incorporation des mâchefers dans des bétons tant comme granulats que comme sable grossier.

L'objectif de ce travail de fin d'études est d'étudier l'influence de leur incorporation sous forme de granulats dans les bétons : 8 mélanges seront réalisés en faisant varier dans un premier temps le pourcentage de granulats (0%, 30%, 50%, 100%) et, dans un second temps, en y substituant un pourcentage de sables.

Pour pouvoir interpréter les résultats, une première phase de caractérisation des matériaux sera réalisée. Durant cette phase les essais suivants seront menés sur les différents constituants et essentiellement sur les mâchefers :

- ◇ Absorption d'eau ;
- ◇ Densité ;
- ◇ Granulométrie ;
- ◇ Humidité ;
- ◇ Micro-Deval.

Ensuite, les essais suivants seront effectués sur les 8 compositions :

- ◇ Affaissement ;
- ◇ Teneur en air ;
- ◇ Masse volumique ;
- ◇ Compression ;
- ◇ Absorption ;
- ◇ Carbonatation ;
- ◇ Diffusion forcée d'ions chlore ;
- ◇ Gel/Dégel ;
- ◇ Perméabilité à l'oxygène.

Une fois l'entièreté des tests réalisés, les résultats permettront, dans un premier temps, de comparer les mélanges entre eux et, dans un second temps, de vérifier l'adéquation de ces bétons avec des applications courantes de la construction.

Les avantages mais également les désavantages de leur utilisation seront mis en lumière. Cela permettra ainsi de répondre à la question de la durabilité qui, bien souvent, est la caractéristique primordiale requise puisqu'elle est indispensable pour assurer la longévité de l'ouvrage réalisé en béton.

# Abstract

Worldwide, more than two billion tonnes of urban waste are produced every year. The energy from this waste is one of the most commonly used solutions for its treatment because, on the one hand, it generates electricity and, on the other hand, it reduces the volume significantly. After combustion, there remains a residue corresponding to 20% of the initial mass : municipal solid waste bottom ash from the incineration of household waste. After being treated, they are mainly used in sub-base layers for road construction. However, their use is not limited to this simple use. A number of studies have been carried out to investigate the influence of incorporating bottom ash into concrete both as aggregates and as coarse sand.

The objective of this thesis is to study the influence of their incorporation in the form of aggregates in concrete : 8 mixes will be made by first varying the percentage of aggregates (0%, 30%, 50%, 100%) and then substituting a percentage of sand.

To be able to interpret the results, a first phase of material characterization will be carried out. During this phase the following tests will be performed on the different constituents and mainly on the bottom ash :

- ◇ Granulometry ;
- ◇ Density ;
- ◇ Humidity ;
- ◇ Micro-Deval ;
- ◇ Water absorption.

Then, the following tests will be performed on the 8 compositions :

- ◇ Slump ;
- ◇ Air content ;
- ◇ Density ;
- ◇ Compression ;
- ◇ Absorption ;
- ◇ Carbonation ;
- ◇ Chloride diffusion ;
- ◇ Freeze/thaw resistance ;
- ◇ Oxygen permeability.

Once all the tests have been done, the results will allow, firstly, to compare the mixes with each other and, secondly, to check the suitability of these concretes for common construction applications.

The advantages but also the disadvantages of their use will be highlighted. This will thus make it possible to answer the question of durability which, very often, is the primordial characteristic required since it is essential to ensure the longevity of the concrete structure.

# Remerciements

Ce travail est l'aboutissement de longs mois d'effort et il est maintenant temps de passer aux remerciements, mais par qui commencer ?

Afin de respecter le sérieux et la tradition, j'aimerais tout d'abord adresser ma reconnaissance la plus totale aux membres du jury qui ont permis à ce travail de prendre forme.

Je remercie tout particulièrement Pr. Luc Courard, professeur à l'université de Liège et promoteur de ce mémoire, ainsi que Dr. Zengfeng Zhao, chercheur sénior à l'université de Liège. Ensemble, ils m'ont donné de nombreux conseils et apporté leur aide à chaque fois que cela s'avérait nécessaire.

Je voudrais, ensuite, remercier Ir. Frédéric Michel pour son aide quant à la présentation et l'analyse des résultats.

Je ne peux également pas oublier Amaury Daras et Monique Denotte sans qui, ce travail n'aurait pu voir le jour. Ils m'ont été d'une grande aide, grâce à leur soutien lors des différents essais réalisés et leurs interventions lorsqu'il ne m'était pas possible d'effectuer la prise des mesures.

Je dis également merci à d'autres personnes telles que Fabienne et Véronique du laboratoire des Matériaux de Construction ou encore Pierre du laboratoire de Géomécanique, pour leur aide et leur disponibilité.

Je remercie également l'université de Liège et spécifiquement le département ArGenCo qui a mis à disposition ses laboratoires, le matériel et les matériaux nécessaires afin de réaliser l'ensemble des expérimentations.

Outre l'aspect professionnel, j'aimerais également adresser des remerciements à l'ensemble de ma famille, parents, petite copine et autres. Ces derniers m'ayant supporté et ayant relu mon travail à de multiples reprises. Une mention toute particulière pour mon grand-père, Michel Martin, qui a passé de nombreuses heures de relecture pour moi, afin de corriger l'orthographe.

Pour finir, merci également à Adèle, Arthur et Marine qui ont été mes partenaires de bureau, qui étaient toujours disponibles lorsque j'avais une question et qui ont permis de réaliser ce travail dans la bonne humeur.



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>I</b>	<b>État de l’art</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>M.I.O.M</b>	<b>5</b>
2.1	Contexte actuel . . . . .	5
2.2	Types de déchets incinérés . . . . .	7
2.3	Incinération & obtention des M.I.O.M . . . . .	9
2.4	Traitement des M.I.O.M . . . . .	12
2.5	Propriétés chimiques des M.I.O.M . . . . .	16
2.6	Facteurs influençant la composition . . . . .	20
2.6.1	Collecte sélective . . . . .	20
2.6.2	Incinération . . . . .	21
2.7	Propriétés physiques des M.I.O.M . . . . .	22
2.8	Application industrielle . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Béton et M.I.O.M</b>	<b>24</b>
3.1	Introduction . . . . .	24
3.2	Matériaux utilisés dans les bétons à base de M.I.O.M . . . . .	25
3.3	Réactions au sein du béton . . . . .	29
3.4	Avantages et désavantages . . . . .	31
3.4.1	Avantages . . . . .	32
3.4.2	Désavantages . . . . .	32
3.5	Propriétés à l’état frais . . . . .	33
3.6	Propriétés à l’état durci . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Durabilité</b>	<b>37</b>
4.1	Indicateur de durabilité . . . . .	37
4.2	Carbonatation . . . . .	41
4.3	Corrosion par des chlorures . . . . .	43
4.4	Gel/dégel . . . . .	45

4.5	Autres . . . . .	47
4.6	Conclusion . . . . .	50
<b>II</b>	<b>Expérimentation</b>	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>Matériaux utilisés pour la composition des bétons</b>	<b>52</b>
5.1	Ciment . . . . .	52
5.2	Sable naturel . . . . .	53
5.3	Granulats concassés calcaires . . . . .	54
5.4	M.I.O.M . . . . .	55
5.5	Comparaison des propriétés . . . . .	58
<b>6</b>	<b>Composition et réalisation des bétons</b>	<b>61</b>
6.1	Variation du pourcentage de M.I.O.M . . . . .	62
6.2	Introduction d'un pourcentage de sable grossier de mâchefers . . . . .	63
6.3	Procédure de réalisation . . . . .	64
<b>7</b>	<b>Essais réalisés sur des bétons à base de M.I.O.M</b>	<b>67</b>
7.1	Sur béton à l'état frais . . . . .	67
7.1.1	Affaissement . . . . .	67
7.1.2	Teneur en air . . . . .	68
7.1.3	Masse volumique . . . . .	69
7.2	Sur béton à l'état durci . . . . .	70
7.2.1	Compression à 28 jours . . . . .	70
7.2.2	Absorption d'eau par remontée capillaire . . . . .	72
7.2.3	Absorption d'eau totale par immersion . . . . .	74
7.2.4	Carbonatation accélérée . . . . .	75
7.2.5	Diffusion forcée d'ions chlore . . . . .	77
7.2.6	Gel/dégel . . . . .	81
7.2.7	Perméabilité à l'oxygène . . . . .	84
<b>III</b>	<b>Étude des résultats</b>	<b>87</b>
<b>8</b>	<b>Tests sur béton à l'état frais</b>	<b>88</b>
8.1	Affaissement . . . . .	88
8.2	Teneur en air . . . . .	90
8.3	Masse volumique . . . . .	93

---

<b>9 Tests sur béton à l'état durci</b>	<b>96</b>
9.1 Compression à 28 jours . . . . .	96
9.2 Absorption d'eau par remontée capillaire . . . . .	99
9.3 Absorption d'eau totale par immersion . . . . .	102
9.4 Carbonatation accélérée . . . . .	105
9.5 Diffusion forcée d'ions chlore . . . . .	110
9.6 Perméabilité à l'oxygène . . . . .	112
<b>10 Conclusion et Perspectives</b>	<b>114</b>
<b>IV Normes et annexes</b>	<b>116</b>
A Normes . . . . .	117
B Classes d'exposition . . . . .	118
C Fiche technique, ciment CEM I 52.5 N . . . . .	119
D Fiche technique, sable naturel 0-4mm . . . . .	121
E Fiche technique, granulats concassés 2-7 et 7-14mm . . . . .	122
F Compacité des granulats concassés . . . . .	123
G Coffrages réalisés pour les tests de Gel/Dégel pour trois compositions . . . . .	124
H Absorption d'eau par remontée capillaire . . . . .	125
I Carbonatation accélérée . . . . .	126
J Diffusion forcée d'ions chlore . . . . .	129
K Perméabilité à l'oxygène . . . . .	130
<b>Bibliographie</b>	<b>131</b>



# Table des figures

1.1	Émissions annuelles totales de gaz à effet de serre par groupement sur la période allant de 1970 à 2010 [Edenhofer et al., 2014]. . . . .	2
2.1	Modes de gestion des déchets ménagers et assimilés en Wallonie [de Thysebaert, 2017].	6
2.2	Étapes d’incinération des ordures ménagères [SMICTOM, ]. . . . .	10
2.3	Composition moyenne des ordures ménagères incinérées en France avant et après une collecte sélective optimale [Martin et al., 2003]. . . . .	11
2.4	Rapport entre la production de MIOM et une quantité d’ordures ménagères incinérées constante [Boisseau, 2001]. . . . .	12
2.5	Matériaux constitutifs des M.I.O.M utilisés au laboratoire. . . . .	16
2.6	Composants majeurs dans les M.I.O.M et comparaison avec un ciment de Portland général [Dou et al., 2017] . . . . .	17
2.7	Grain d’aluminium qui a causé l’éclatement d’un coin de l’échantillon de béton [Rübner, 2006] . . . . .	18
2.8	Concentration d’oligo-éléments dans les mâchefers de différentes régions [Dou et al., 2017].	19
3.1	Réalisation d’ouvrages en béton. . . . .	25
3.2	Composition volumique pour 1m <sup>3</sup> de béton [Courard, 2018]. . . . .	26
3.3	Ajout d’un entraîneur d’air [Calderon & Horgnies, 2013, GBB, 2018, Courard, 2019].	28
3.4	Produits d’hydratation du ciment Portland, image au microscope [Alizadeh, 2009]. .	30
3.5	Progression des réactions chimiques lors de l’hydratation du ciment de Portland [GBB, 2018]. . . . .	30
3.6	Objectif des nouveaux bétons recyclés [Dosho, 2007]. . . . .	32
4.1	Dégradation par carbonatation [Courard, 2019, GBB, 2018]. . . . .	41
4.2	Exemples de dégradation du béton suite à de la carbonatation [Courard, 2019]. . . .	42
4.3	Dégradation des armatures par corrosion [Courard, 2019, GBB, 2018]. . . . .	44
4.4	Dégradation du béton par cycle de Gel/Dégel et influence de la température. . . . .	46
4.5	Attaque alcali-silice : Photo de M. Müller, Langesthal - Eupen [Courard, 2019]. . . .	47
4.6	Attaque aux sulafes et effet du rapport E/C [Courard, 2018]. . . . .	48
4.7	Le retrait, différents types et exemple. . . . .	49
5.1	Sable naturel 0-4 mm saturé à surface sèche. . . . .	53

5.2	Courbe granulométrique du sable naturel 0-4mm. . . . .	54
5.3	Courbe granulométrique des granulats concassés calcaires 2-7mm. . . . .	55
5.4	Courbe granulométrique des granulats concassés calcaires 7-14mm. . . . .	55
5.5	Courbe granulométrique des M.I.O.M 0-6mm. . . . .	57
5.6	Courbe granulométrique des M.I.O.M 6-14mm. . . . .	58
5.7	Comparaison des granulométries entre les granulats concassés, les mâchefers et le sable naturel. . . . .	59
6.1	Analyse granulométrique via la méthode de Dreux-Gorisse. . . . .	62
6.2	Bétonneuse utilisée au laboratoire de l'université de Liège pour réaliser de gros volumes. . . . .	65
6.3	Ensemble des échantillons pour la composition BL G0 S30. . . . .	66
7.1	Mesure de l'affaissement via le cône d'Abrams pour le BL G100 S0. . . . .	68
7.2	Aéromètre : appareil de mesure pour la teneur en air. . . . .	69
7.3	Polissage des surfaces pour un cylindre de 160x320mm. . . . .	71
7.4	Essai de compression réalisé sur un cube de 150mm de côté [Canteneur, ]. . . . .	71
7.5	Absorption par remontée capillaire de BL G100 S0, BL G30 S0 et BL G0 S0, respectivement de gauche à droite. . . . .	73
7.6	Sciage d'une tranche d'un échantillon BL G100 S0. . . . .	75
7.7	Exemple de numérotation à réaliser lors des essais de carbonatation [Wintgens, 2019].	76
7.8	Illustration du front de carbonatation au temps zéro et après une semaine pour BL G0 S0, BL G30 S0 et BL G100 S0. . . . .	77
7.9	Préparation des échantillons de composition BL G0 S0 au test de diffusion forcée d'ions chlore. . . . .	78
7.10	Saturation en eau via une chambre sous vide, des échantillons utilisés pour le test de diffusion forcée d'ions chlore [Wintgens, 2019]. . . . .	79
7.11	Cellules connectés pour les essais de diffusion d'ions chlore. . . . .	80
7.12	Préparation des échantillons au gel/dégel. . . . .	82
7.13	Illustration d'un coffrage fait de plaques en plastique dur et une membrane en polyéthylène. . . . .	83
7.14	Cycle de température lors d'un cycle de gel/dégel selon la norme NBN EN 1338 avec en abscisse le temps (heure) et en ordonnée la température ( ° C). . . . .	83
7.15	Préparation des échantillons de composition BL G0 S0 au test de perméabilité à l'oxygène, mise en place de la résine époxy. . . . .	85
7.16	Fonctionnement des essais de perméabilité à l'oxygène. . . . .	85
8.1	Essais d'affaissement au cône d'Abrams. . . . .	88
8.2	Teneur en air. . . . .	90

8.3	Teneur en air et interpolation linéaire pour des bétons sans et avec 30% de sable grossier de mâchefers et dont le taux en granulats de mâchefers varie. . . . .	92
8.4	Masse volumique et écart-type à l'état frais. . . . .	93
8.5	Masse volumique et interpolation linéaire pour des bétons sans et avec 30% de sable grossier de mâchefers et dont le taux en granulats de mâchefers varie. . . . .	94
8.6	Ensemble des échantillons pour la composition BL G100 S100. . . . .	95
9.1	Essais de compression à 28 jours. . . . .	97
9.2	Essais de compression à 28 jours en fonction de leur masse volumique. . . . .	97
9.3	Variation de masse suite à des essais d'absorption d'eau par remontée capillaire pour trois compositions et écart-type correspondant. . . . .	99
9.4	Hauteur moyenne de remontée d'eau par absorption capillaire pour trois compositions. . . . .	100
9.5	Absorption capillaire mesurée sur 24 heures et interpolation linéaire afin de définir le coefficient de sorption de chaque composition. . . . .	100
9.6	Absorption totale d'eau et porosité. . . . .	102
9.7	Comparaison de la masse volumique obtenue à l'état frais et à l'état durci. . . . .	102
9.8	Comparaison de l'absorption totale entre des bétons ayant un taux de substitution de 0% et 30% de sable grossier de mâchefers. . . . .	103
9.9	Comparaison de la porosité totale ouverte entre des bétons ayant un taux de substitution de 0% et 30% de sable grossier de mâchefers. . . . .	103
9.10	Profondeur de carbonatation mesurée après 28 jours en chambre. . . . .	105
9.11	Avancement du front de carbonatation pour trois compositions contenant des granulats de mâchefers de 0 à 70 jours. . . . .	106
9.12	Avancement du front de carbonatation pour les quatre compositions contenant du sable grossier de mâchefers de 0 à 28 jours. . . . .	106
9.13	Progression de l'avancement du front de carbonatation (mm) pour le béton de composition BL G100 S0, mesure prise de 0 à 70 jours. . . . .	107
9.14	Comparaison de l'avancement du front de carbonatation entre des bétons ayant un taux de substitution de 0% et 30% de sable grossier de mâchefers à 28 jours. . . . .	108
9.15	Comparaison de l'avancement du front de carbonatation (mm) pour les bétons ayant carbonatés après 28 jours en chambre en fonction de chacune des faces exposées. . . . .	108
9.16	Intensité mesurée toutes les 10 minutes après un essai de diffusion forcée d'ions chlore pour les trois couches du béton de référence. . . . .	110
9.17	Coefficient de perméabilité apparente, $K_{app}$ , pour les trois couches du béton de référence en fonction d'une pression prédéterminée. . . . .	112
10.1	Photo représentant le front de carbonatation de chacun des bétons composés au temps $t_0$ . . . . .	126

---

10.2 Résultats par semaine, une fois que la carbonatation a débuté, de l'avancement du front de carbonatation (mm) pour 3 compositions de béton à base de granulats de M.I.O.M ayant carbonaté lors des essais. . . . .	127
10.3 Résultats par semaine, une fois que la carbonatation a débuté, de l'avancement du front de carbonatation (mm) pour 3 compositions de béton à base de sable grossier de mâchefers ayant carbonaté lors des essais. . . . .	128

# Liste des tableaux

2.1	Déchets municipaux mis en décharge, incinérés, recyclés et compostés, UE-28, 1996-2018 [Eurostat, 2019]. . . . .	6
2.2	Composition des OMB, 4 flux principaux [SPW, 2018]. . . . .	8
2.3	Composition chimique des mâchefers d'incinération de charbon . . . . .	9
2.4	Production moyenne de mâchefers au sein des pays de l'UE [Born & Brecht, 2014]. . . . .	10
2.5	Variations de composition selon différentes sources. . . . .	17
2.6	Granulométrie des M.I.O.M [Courard et al., 2002] . . . . .	23
3.1	Composition chimique et éléments primaires du ciment Portland, CEM I 52,5 N. . . . .	29
4.1	Synthèse des classes et valeurs limites (indicatives) relatives aux indicateurs de durabilité généraux (G) ou de substitution (S) : porosité, résistivité électrique, coefficient de diffusion et perméabilité. Les valeurs indiquées correspondent à des mesures réalisées selon les méthodes décrites [AFGC, 2004]. . . . .	40
5.1	Caractéristiques du ciment CEM I 52,5 N (ANNEXE C). . . . .	52
5.2	Caractéristiques du sable naturel 0-4. . . . .	53
5.3	Caractéristiques des granulats concassés calcaires, CC. . . . .	54
5.4	Caractéristiques des M.I.O.M et comparaison avec la littérature. . . . .	57
5.5	Comparaison des caractéristiques des différents matériaux. . . . .	58
6.1	Abréviations utilisées pour les différents bétons réalisés. . . . .	61
6.2	Composition des bétons à base de granulats de mâchefers pour $1\text{m}^3$ . . . . .	63
6.3	Composition des bétons à base de granulats de mâchefers et de sable grossier de mâchefers pour $1\text{m}^3$ . . . . .	64
7.1	Évaluation rapide du taux de perméabilité aux ions chlore d'un béton (Norme ASTM C 1202-05) . . . . .	81
8.1	Résultats d'affaissement au cône d'Abrams en fonction de la quantité de superplastifiant. . . . .	89
8.2	Résultats de la teneur en air et augmentation de celle-ci par rapport au béton de référence pour l'ensemble des compositions. . . . .	91
9.1	Pentes calculées sur des interpolations linéaires obtenues pour chacune des compositions. . . . .	101

---

10.1	Variation de masse moyenne suite à un essai de remontée d'eau par absorption capillaire pour trois compositions et écart-type correspondant. . . . .	125
10.2	Hauteur de remontée d'eau par absorption capillaire moyenne pour trois compositions et écart-type correspondant. . . . .	125
10.3	Charge passée en Coulombs en fonction du temps pour le béton de référence pour chacune des éprouvettes, moyenne, écart-type et intégration . . . . .	129
10.4	Perméabilité mesurée lors des essais de perméabilité à l'oxygène pour le béton de référence ainsi que les débits, moyenne et écart-type. . . . .	130

# Chapitre 1

## Introduction générale

La terre traverse depuis son origine des ères glaciaires et interglaciaires qui se succèdent à intervalles plus ou moins réguliers. Cependant, le changement qu'elle subit actuellement est d'un tout autre type. En effet, en regardant à l'échelle des temps géologiques, les transitions précédentes (de l'ordre d'une dizaine de degrés) se déroulaient sur plusieurs milliers d'années voire même des centaines de milliers d'années [Ramstein et al., 2004]. Celle qui sévit actuellement a une échelle de temps beaucoup plus faible puisqu'elle débute lors de la période industrielle (1760-1840). Depuis lors, les températures moyennes de chaque décennie n'ont cessé de croître, battant des records de températures et de sécheresses de plus en plus fréquemment (les 20 ° C recensés en ce début d'année en Antarctique en est l'exemple parfait). Actuellement, les prédictions sur l'augmentation de température d'ici 2100 varient fortement suite aux grands nombres de variables comme en témoigne le GIEC [Edenhofer et al., 2014]. Cependant, il est possible de retirer une fourchette de température qui oscille de 1.5° C pour les plus optimistes de 3.7° C dans les cas extrêmes [Auverlot, 2015].

Cette augmentation de température n'est pas sans conséquence sur l'écosystème, les glaciers fondent et les océans montent. Cette augmentation de niveau se fait déjà ressentir et ne va que s'accroître dans les années futures. Sur le dernier siècle, le niveau s'est élevé d'environ 0.19m atteignant une vitesse plus ou moins constante dans les années 1990 avec 3.1mm/an. Sur le siècle en cours, les prévisions vont bon train et les valeurs sont sans cesse en augmentation. À l'heure actuelle, la montée des eaux oscillerait entre 1 et 2m d'ici les années 2100 [Auverlot, 2015, Edenhofer et al., 2014, Mcleod et al., 2010, Sinan et al., 2009].

Ceci a également des conséquences pour l'homme. Ce dernier vit toujours plus proche de l'eau pour des raisons essentiellement économiques. En 1990, 16% de la population mondiale était recensée en bordure de mer dont 71% dans des agglomérations de plus 100.000 habitants qui représentent à elles seules, 660 millions de personnes. [Noin, 1999] La montée des eaux est donc une menace capitale qui ne doit pas être prise à la légère car elle va créer un flux d'immigrés climatiques colossal.

Afin d'endiguer ce phénomène, de nombreuses chartes et traités ont été rédigés et signés, cependant, ils ne s'avèrent pas toujours respectés. Le Protocole de Kyoto est l'exemple parfait de ce contraste. En effet, les pays développés avaient l'intention de diminuer de 5% leurs émissions de gaz à effet de serre sur la période 2008-2012. Or, celles-ci ont augmenté comme en témoigne la FIGURE 1.1 [Auverlot, 2015, Edenhofer et al., 2014]. Un changement de manière de vivre s'avère, dès lors difficile à mettre en place. C'est pourquoi il est important de privilégier des moyens de production et de consommation écologiques.

En parallèle à ce changement climatique, la terre est également pillée de ses ressources, et ce, aux quatre coins du globe. Il n'est plus possible de compter les mines qui extraient le charbon,

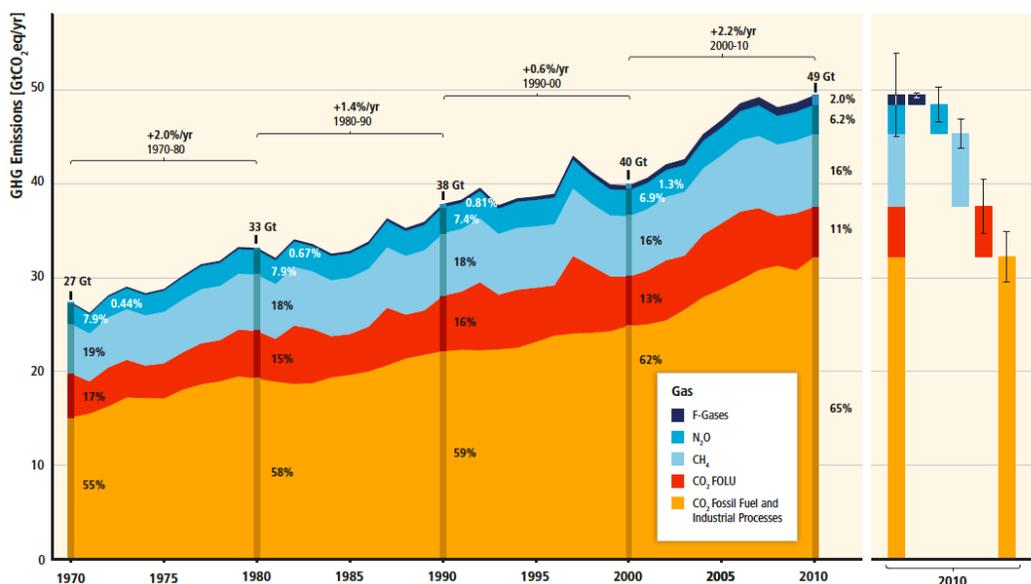


FIGURE 1.1 – Émissions annuelles totales de gaz à effet de serre par groupement sur la période allant de 1970 à 2010 [Edenhofer et al., 2014].

le pétrole mais aussi le fer, l'or et, de manière générale, les matières premières. Cependant, les ressources sont limitées et la capacité de régénération est bien plus faible que celle de l'extraction qui augmente progressivement depuis quelques années [UEPG, ]. Certains matériaux pourraient donc ne plus être disponibles [Wedig, 2020] et d'autres moyens d'approvisionnement doivent donc être pensés.

Un des facteurs qui pourrait expliquer cette constante croissance de la demande en matériaux est l'accroissement de la démographie. De 5 milliards en 1990, la terre abrite aujourd'hui plus de 7 milliards de personne. À l'horizon 2100, la population pourrait plus que doubler par rapport aux années 1990 pour atteindre le chiffre pharaonique de 11.2 milliards. [N-U, 2019]

En synthétisant ces lignes, il peut être conclu que la quantité de matières premières n'est pas illimitée. Cette dernière diminue et se raréfie de plus en plus vite. Par ailleurs, des actes concrets doivent être menés pour tenter de limiter au maximum le réchauffement climatique, et ce pour diverses raisons. Ces actes peuvent notamment se traduire par une diminution des émissions de gaz à effet de serre. Pour finir, la quantité de matière consommée va elle aussi augmenter ce qui induira, par transitivité, une augmentation des déchets produits.

Le béton est le matériaux de construction le plus utilisé au monde. Il se classe second des matériaux après l'eau [GGB, 2018]. En jouant sur les moyens de production et composition de celui-ci, il est possible d'impacter directement et indirectement les effets cités au préalable. C'est dans cette optique de renouvellement et d'écologie que s'inscrit ce travail de fin d'études puisqu'il étudie l'influence qu'ont les Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères (M.I.O.M) en substitution aux granulats naturels, sable, etc. dans les bétons.

Ce travail s'articulera autour de trois grands axes. Le premier s'appelle "État de l'art" et se consa-

crera à l'origine, au présent et au futur des M.I.O.M. Il mettra également en évidence les différentes études qui ont déjà été réalisées sur le sujet, essentiellement celles portant sur la composition des M.I.O.M. Pour finir, il introduira les premières observations qui ont été faites sur l'incorporation de ce nouveau type de granulats dans les bétons et les attaques susceptibles de se développer sur et au sein de ces derniers.

Le second est "l'Expérimentation", il parlera des différents matériaux utilisés pour l'élaboration des bétons. Les premières compositions joueront sur le pourcentage de mâchefers 6-14mm utilisés en substitution aux granulats naturels concassés. Les compositions suivantes introduiront les mâchefers 0-6mm en substitution au sable naturel en plus des mâchefers 6-14mm. En complément des compositions, seront également expliqués les différents essais de durabilité qui seront réalisés.

Le troisième, "Étude des résultats" mettra en évidence les résultats obtenus sur les échantillons décrits dans la partie précédente. Il mettra en lumière les évaluations importantes, les avantages mais aussi les désavantages.

La conclusion, quant à elle, résumera très brièvement l'ensemble de ceux-ci et répondra à la question initiale sur le comportement des M.I.O.M dans les bétons. De cette façon, l'utilisation de ces derniers dans un domaine plus large que celui dans lequel ils sont principalement utilisés actuellement pourra être envisagée.

# Première partie

## État de l'art

# Chapitre 2

## M.I.O.M

### 2.1 Contexte actuel

*"Le meilleur déchet est celui qui n'existe pas."* Bien que cette phrase soit, dans sa formulation, simple à comprendre, agir dans son sens n'est pas chose aisée. Sur les 10 dernières années, la production mondiale de déchets ménagers a doublé et continue de s'accroître chaque jour [Dou et al., 2017].

À une échelle plus locale, en 2016, environ 543 kg de déchets par habitant ont été collectés en Wallonie, ce qui, quotidiennement donne lieu à une production d'environ 1,5 kg d'immondices [SPW, 2019]. Mis bout-à-bout, cela représente donc pas moins de 1,957 million de tonnes de déchets par an. Les déchets industriels ne peuvent être négligés dans la quantité totale puisqu'ils représentent plus de 2/3 de la production de détritrus (de 4 à 7 millions de tonnes par an sur la période allant de 1995 à 2013 [de Thysebaert, 2017]). Cependant, ces derniers ne seront pas pris en compte ici puisque ce travail s'intéresse aux résidus issus des ordures ménagères.

À l'échelle européenne en 2014, 240 millions de tonnes de déchets ménagers ont été créés. Ce chiffre bien qu'impressionnant n'est rien comparé au 1,84 milliard de tonnes qui ont été produits au niveau mondial. Par ailleurs, pour ne pas arranger la situation, ce chiffre ne fait que s'accroître puisqu'en 2012, la production n'était "que " de 1,3 milliard de tonnes et que les prévisions donnent le chiffre pharaonique de 2,2 milliards de tonnes d'immondices d'ici 2025 [Dou et al., 2017, Hoornweg & Bhada-Tata, 2012, Lynn et al., 2016, Planétoscope, 2017].

Tous les déchets ne sont pas logés à la même enseigne, il existe d'innombrables filières pour les traiter. Les principales peuvent être résumées ci-dessous :

- ◇ Stockage via des centres d'enfouissement pour les résidus qui ne peuvent être valorisés énergiquement ou recyclés. L'objectif est de contrôler les divers effets qu'ils pourraient engendrer sur l'environnement (pollution notamment) ;
- ◇ Incinération dans le but de diminuer le volume mais également produire de la chaleur et, indirectement, de l'électricité ;
- ◇ Recyclage qui permet de donner une seconde vie à certains matériaux constituant d'un déchet en le réintroduisant dans la production d'un nouveau produit ;

- ◇ Compostage qui se tourne essentiellement vers les récoltes organiques. L'objectif est d'obtenir ici, un produit riche en matière nutritive afin d'enrichir le sol. En sus, si ce compostage passe par une méthanisation, cette valorisation organique produit en plus du biogaz.

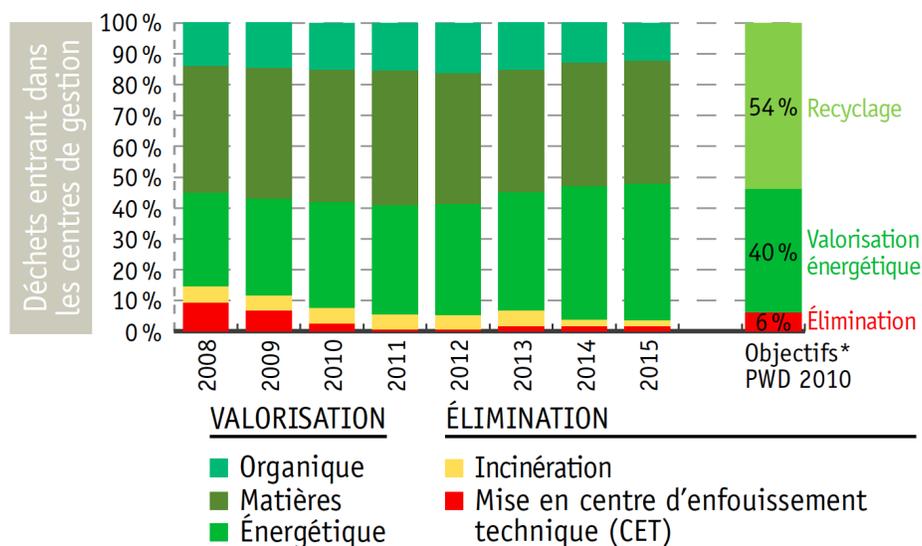


FIGURE 2.1 – Modes de gestion des déchets ménagers et assimilés en Wallonie [de Thysebaert, 2017].

Parmi cette masse colossale de détritrus, seules les ordures issues de l'incinération sont à prendre en compte dans ce travail. Au niveau national, cela représente pas moins de 40% de la quantité globale comme le démontre la FIGURE 2.1. La TABLE 2.1, quant à elle, permet de comparer rapidement la gestion des déchets belges à la gestion européenne. Par ailleurs, elle met également en évidence les différents efforts qui ont été fournis en terme de traitement de ces matières.

TABLE 2.1 – Déchets municipaux mis en décharge, incinérés, recyclés et compostés, UE-28, 1996-2018 [Eurostat, 2019].

	Unité	1996	2000	2004	2008	2012	2016	2018	Variation (%)
Enfouissement	(%)	61	55	47	39	32	24	23	-62
Incineration	(%)	14	15	17	21	24	28	28	100
Recyclage	(%)	12	16	19	23	27	29	30	150
Compostage	(%)	7	9	11	13	14	17	17	143
Autre	(%)	6	5	5	4	3	2	2	-67
Masse totale	(MT)	233	254	253	261	245	248	251	8

Les quelques enseignements qui peuvent être tirés de la TABLE 2.1 sont les suivants. D'une part, et contrairement à la tendance mondiale, la quantité totale de déchets en Europe est plus ou moins identique au fil des ans. Cela est dû au fait que la démographie est relativement constante depuis une vingtaine d'années maintenant [Avdeev et al., 2011]. D'autre part, des changements au sein de la gestion des ordures ont été réalisés. En effet, l'enfouissement, autrefois privilégié a laissé une

place conséquente au recyclage et à l'incinération. Le compostage arrivant juste derrière.

Les avantages que représentent le recyclage et le compostage sont nombreux. Il est, dès lors, aisé de comprendre pourquoi ces deux méthodes de gestion connaissent un tel succès. L'intensification de l'incinération est quant à elle plus complexe à comprendre et nécessite une petite explication. Il n'est pas toujours possible de réutiliser le matériau que ce soit totalement ou en partie. L'avantage majeur qui ressort d'une combustion est la production de chaleur qui peut être exploitée de diverses manières. Si cette chaleur est utilisée pour le chauffage, le rendement est conséquent puisqu'il atteint 90%. Dans le cas où celle-ci sert à la production d'électricité, le rendement est légèrement inférieur à celui d'une centrale nucléaire puisqu'il est égal à 20-30% [Dou et al., 2017]. À titre d'exemple, chez Suez, la combustion d'une tonne de déchets permet la production de 1500 kWh thermique et 700 kWh électrique [Picron et al., 2019]. Pour le centre de valorisation des déchets de Thumaide, source des mâchefers utilisés qui seront évoqués par la suite, le rendement est un peu moins bon. Pour une tonne de déchets incinérés, 600 kWh électrique sont produits ce qui, mis bout à bout représente 314 millions de kWh par an [Delbar, 2018].

Cette création de chaleur s'accompagne également d'une diminution de volume conséquente ( $\pm 80\%$ ). À une époque où l'espace est souvent au cœur des problèmes, ce gain de volume qui s'obtient au détriment de l'enfouissement est souvent apprécié des gouvernements [Dou et al., 2017, Lynn et al., 2016]. En outre, il subsiste un résidu correspondant à environ 20% de la masse initiale : ce sont les Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères. [Picron et al., 2019, Xuan et al., 2018].

## 2.2 Types de déchets incinérés

Avant de s'intéresser aux M.I.O.M mêmes, il faut porter un œil sur leurs moyens de production. Pour cela, une attention particulière se fera sur ce qu'est un déchet et de quoi il est composé. Par la suite, cette attention se tournera vers les traitements qu'il doit subir, et ce, jusqu'à l'obtention du dit mâchefer.

*"Le terme déchet ménager englobe tous les déchets produits par un ménage ou assimilés, c'est-à-dire par certaines petites entreprises et commerces ou par le secteur tertiaire. Ainsi y inclut-on les ordures ménagères résiduelles ou en mélange, les déchets issus des collectes sélectives et les déchets déposés en déchèterie."* [Mayer, ]

Afin de collecter l'ensemble de ces déchets en Wallonie, divers moyens sont mis en place. Ces derniers peuvent être résumés ci-dessous allant du plus conséquent au moins conséquent [SPW, 2018] :

- ◇ Recyparcs : 50,5% ;
- ◇ Collectes non sélective en porte à porte : 28,8% ;
- ◇ Collectes sélective en porte à porte : 12,9% ;
- ◇ Bulles : 4,7% ;
- ◇ Autres (Déchets communaux) : 3,2%.

Une fois l'ensemble des déchets collectés, ceux-ci sont tous amenés au sein du centre de tri de l'intercommunale (Intradel pour la région Liège-Verviers par exemple). Dans ce centre, les différents moyens en terme de gestion évoqués précédemment sont mis en place.

C'est également dans ces centres qu'il est possible de connaître la composition des ordures ménagères brutes (OMB). Il est possible de synthétiser l'ensemble des valeurs dans la TABLE 2.2.

TABLE 2.2 – Composition des OMB, 4 flux principaux [SPW, 2018].

Type	Pourcentage (%)
Matières organiques	41,4
Plastiques	12,6
Papiers-cartons	12,2
Inertes	11,3

À noter qu'une petite précision doit cependant être faite concernant les déchets inertes. En effet, la signification de ceux-ci n'est pas aussi évidente que celle des matières organiques, cartons, etc. Un déchet inerte ne va contribuer à aucune réaction que ce soit physique, biologique ou thermique lors de sa combustion. Les exemples parfaits se retrouvant en quantité significative dans les M.I.O.M sont les verres. Le béton, la brique, la pierre peuvent aussi s'y retrouver.

Bien que dans le cadre de ce mémoire, seuls les mâchefers issus de l'incinération d'ordures ménagères sont étudiés, pour être tout à fait complet par rapport à la production de ces derniers, il faut noter que d'autres filiales de production existent. À titre d'exemple, les mâchefers issus de l'incinération de charbon (M.I.C) ou de biomasse comme des noyaux d'olives [Beltran et al., 2014]. Il est important de connaître leur origine, car elle confère des propriétés physiques et chimiques bien distinctes.

Les noyaux d'olive, après incinération, ne permettent l'obtention que de sable grossier, donc ayant un diamètre compris entre 0 et 6mm [Beltran et al., 2014]. Après traitement, le diamètre de ces particules est encore réduit, les particules sont dites fines, puisque le diamètre oscille entre 0 et 2mm.

Les propriétés géométriques ne sont pas les seules à être impactées. L'absorption d'eau principalement varie très fortement puisqu'elle dépend bien souvent de la surface spécifique. Dans le cas présent, le coefficient d'absorption augmente considérablement puisqu'il passe de 6% pour les granulats de mâchefers et 13% pour du sable grossier de mâchefers utilisés à  $\approx 20\%$  (cfr. SECTIONS 2.7 et 5.4).

L'utilisation de mâchefers de charbon, quant à elle, n'amène pas à des propriétés si différents de celles des M.I.O.M, quoique... Bien que les fractions obtenues après incinérations soient relativement similaires à celles obtenues après l'incinération de déchets ménagers, des variations apparaissent surtout au niveau de la composition chimique. Celle des M.I.C est évoquée dans la TABLE 2.3 [Aggarwal & Siddique, 2014, Savadogo et al., 2015, Siddique et al., 2012, Yüksel et al., 2007], tandis que celle des M.I.O.M sera abordée dans la SECTION 2.5. En fonction des traitements réalisés, ces compositions peuvent énormément varier [Targan et al., 2003] et induire divers comportements au sein des bétons. C'est pourquoi il faut rester vigilant quant à leur utilisation.

TABLE 2.3 – Composition chimique des mâchefers d’incinération de charbon

Composition	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
M.I.C	50-60	20-25	1-2	8-10

Même si la composition des M.I.O.M ne sera abordée que dans la SECTION 2.5, il peut déjà être évoqué les quelques divergences. La chaux vive prodiguant des propriétés d’hydratation au matériau se voit fortement réduite alors que la concentration d’alumine qui reflète indirectement le taux d’aluminium présent dans les mâchefers, se voit, quant elle, doubler. Au sein d’un béton, cette augmentation représente une menace car, comme il le sera évoqué ultérieurement, une production d’hydrogène peut naître et engendrer des fissures voire même un éclatement du béton.

En terme de propriétés physiques, celles-ci sont également différentes. En effet, l’absorption d’eau oscille de 10-30% [Bilir, 2012, Singh & Siddique, 2015, Yüksel et al., 2007] en fonction de la fraction considérée, ce qui est bien supérieur à celle des M.I.O.M utilisés. L’ouvrabilité est donc fortement impactée puisque les mâchefers de charbon vont littéralement pomper l’eau nécessaire à la réaction d’hydratation.

La masse volumique est, elle aussi, affectée puisque les valeurs retrouvées sont souvent plus faibles que celles obtenues pour les M.I.O.M ce qui amène à des bétons plus légers et potentiellement moins résistants [Aggarwal & Siddique, 2014, Bilir, 2012, Singh & Siddique, 2015, Yüksel et al., 2007].

## 2.3 Incinération & obtention des M.I.O.M

Les principaux avantages de l’incinération ont déjà été évoqués. À ceux là peuvent être ajoutés l’efficacité et la rapidité de la méthode ainsi qu’une bonne gestion des grands volumes. Cependant, il faut rester vigilant sur certains points. D’une part, cette méthode est relativement onéreuse car elle nécessite de grands investissements. D’autre part, les fumées qui en résultent doivent impérativement être traitées. Elles risquent d’augmenter considérablement la pollution.

Les différentes étapes liées à l’incinération sont visibles à la FIGURE 2.2

[Bassirou & Souleymane, 2019, Gérard, 1999, Kaibouchi, 2004].

- ◇ Acheminement et stockage des déchets : via des bennes, les déchets sont acheminés au centre de tri et sont ensuite stockés afin d’éviter tout risque de pollution avec le monde extérieur ;
- ◇ Alimentation du four : via un grappin, les déchets sont transportés de la zone de stockage à la zone de combustion ;
- ◇ Combustion des déchets : à une température de 850 ° C avec apport d’oxygène, les déchets sont ensuite incinérés ;
- ◇ Récupération de chaleur : la combustion produit de la chaleur permettant la production d’électricité via de la vapeur d’eau ;
- ◇ Deux phases de traitements parallèles :
  - Traitement des matières solides : d’un côté, les matériaux ferreux n’ayant pas contribué à la combustion et d’un autre, les résidus solides, les mâchefers ;

- Traitement des fumées : celles-ci contiennent des poussières, du  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{NO}_x$ , etc. Une fois traité, le résidu de ces fumées génèrent des cendres volantes.

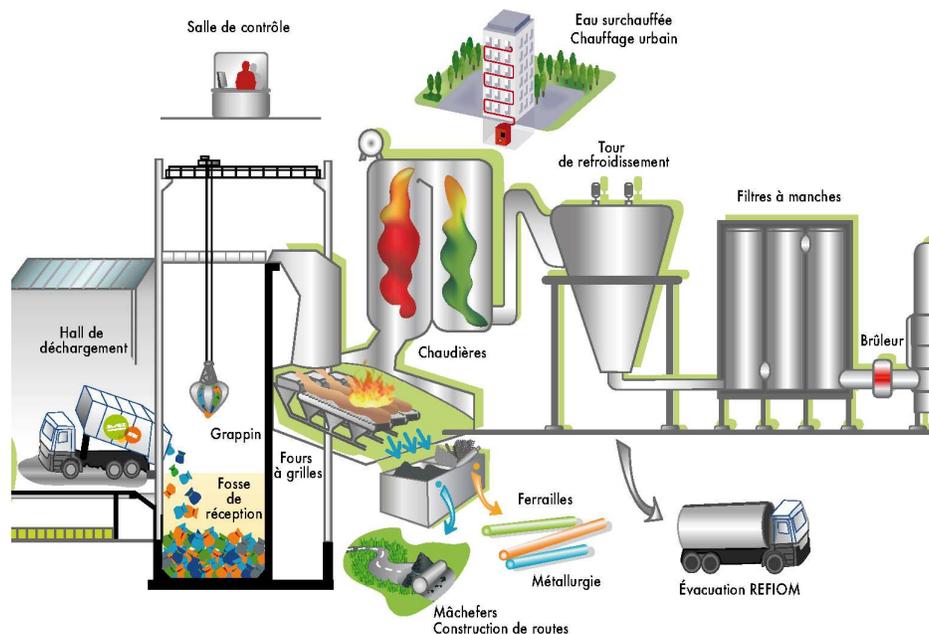


FIGURE 2.2 – Étapes d'incinération des ordures ménagères [SMICTOM, ].

La production des M.I.O.M connue, il faut s'intéresser au potentiel de ceux-ci, à leur quantité totale, à leur utilité et aux utilisations qui peuvent en découler. Précédemment le chiffre de 40% d'incinération en Wallonie a été évoqué. Cependant, cette valeur n'est pas représentative du potentiel mondial. En reprenant la TABLE 2.1, il en ressort que "seulement" 28% des déchets européens sont incinérés. Ces 28% permettent ainsi la production de 16 millions de tonnes de mâchefers [Lynn et al., 2016].

TABLE 2.4 – Production moyenne de mâchefers au sein des pays de l'UE [Born & Brecht, 2014].

Pays	Date	Déchets incinérés (millions de tonnes)	Mâchefers (millions de tonnes)
Belgique	2010	3,03	0,51
République Tchèque	2010	0,51	0,16
Danemark	2008	3,59	0,63
Finlande	2009	0,27	0,05
France	2008	11,60	2,70
Allemagne	2010	20,04	5,00
Hongrie	2008	0,40	0,09
Italie	2010	4,71	1,27
Pays-Bas	2011	7,20	1,60
Norvège	2010	1,35	0,25
Portugal	2011	1,13	0,21
Espagne	2011	2,42	0,42
Suède	2009	4,50	0,74

Il est également intéressant de visualiser la répartition de production par pays et pour cela, il faut se référer à la TABLE 2.4. Cette figure permet également de confirmer les propos tenus précédemment. En effet, l'ordre de grandeur entre déchets incinérés et mâchefers obtenus est bien respecté, la valeur tournant toujours autour des 20%.

En utilisant la valeur de 28% de déchets incinérés et en l'appliquant au niveau mondial, il est possible d'obtenir une masse totale de mâchefers avoisinant les 100 millions de tonnes par an. Néanmoins, des gros producteurs de déchets tels que la Chine, le Brésil, l'Inde, etc. n'ont pas encore adopté une politique verte en terme de tri et gestion des déchets. Par conséquent, l'incinération est généralement privilégiée par rapport au recyclage et compostage, les 28% se transformant ainsi, en 40-50%, voire même plus. Cette valeur de 100 millions est donc, en réalité bien en deçà des réelles estimations. En 2012, celles-ci tourneraient autour des 250 millions de tonnes [TOMRA, ]. Cette brève étude ne permet pas de prévoir la production de M.I.O.M dans le futur. Or si celle-ci devenait nulle dans les années à venir, l'étude des M.I.O.M n'aurait pas d'intérêt.

Il faut donc visualiser comment cette évolution va se comporter dans les 5, 10, 50 années à venir, va-t'elle perdurer ou au contraire s'amoinrir ?

Ci-dessous, une très brève étude portant sur l'influence du tri sélectif, des déchets mis en entrée et de la production mondiale de déchets a été réalisée pour comprendre qu'elles étaient les perspectives futures de ce matériau.

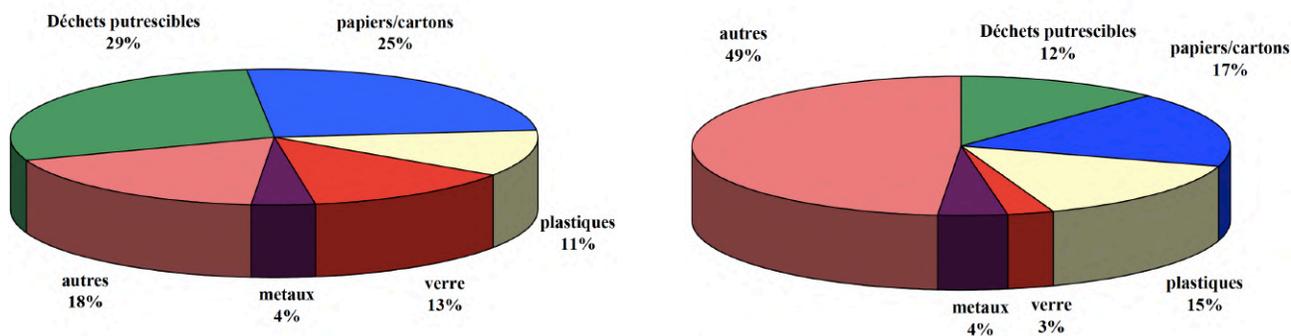


FIGURE 2.3 – Composition moyenne des ordures ménagères incinérées en France avant et après une collecte sélective optimale [Martin et al., 2003].

La FIGURE 2.3 montre la composition des ordures incinérées avant et après une collecte sélective optimale exécutée en France dans les années 2003 et pour une même quantité de déchets collectés.

Au regard de cette FIGURE 2.3, il peut être conclu une chose essentielle, les matières incombustibles qui constituent les mâchefers sont en diminution comparées aux matières combustibles telles que le papier, le plastique et les déchets "autres" [Boisseau, 2001, Piantone et al., 2000]. Bien qu'un pourcentage de déchets incombustibles se retrouve dans les déchets "autres", il ne compense pas totalement celui perdu. Le tri a donc pour effet de diminuer le pourcentage de mâchefers produits !

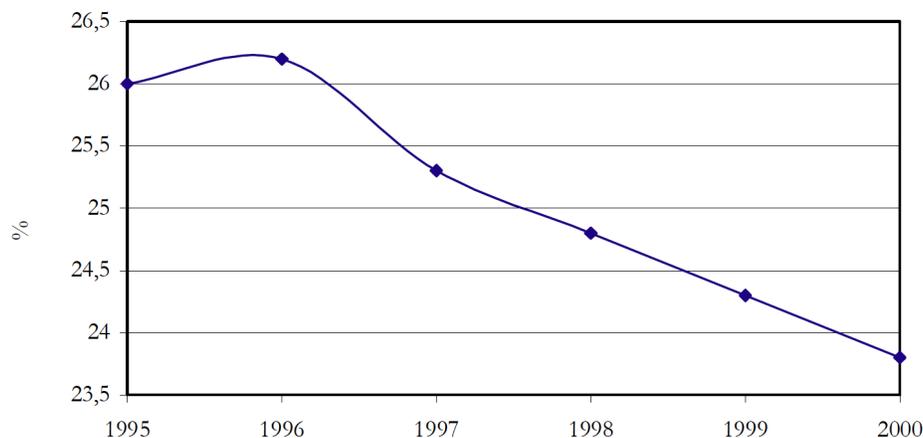


FIGURE 2.4 – Rapport entre la production de MIOM et une quantité d’ordures ménagères incinérées constante [Boisseau, 2001].

Au final, pour une même quantité de déchets d’ordures ménagères incinérées, la quantité obtenue de mâchefers a diminué au fil des années [Boisseau, 2001, Piantone et al., 2000]. Pour appuyer ces propos, il faut se référer à la FIGURE 2.4. Sur celle-ci, apparaît très clairement la diminution de quelques pourcents entre le rapport de mâchefers et d’ordures incinérées. Cette diminution sera d’autant plus importante que le tri sera efficace. À l’heure actuelle, ce rapport tourne bien souvent autour des 20% (cfr. SECTION 2.1).

Dans le futur, si le monde prend conscience que la quantité de déchets produits ne cesse d’augmenter et qu’il arrive à la diminuer ou du moins à la stabiliser, il y a fort à parier, qu’avec les progrès technologiques en terme de gestion de déchets qui se perfectionnent sans cesse, le ratio pour une même masse de déchets incinérés devrait décroître.

Cependant, il faut nuancer ces propos. En effet, la démographie tout comme les pays en voie de développement étant en perpétuelle croissance, la quantité de déchets au niveau mondial n’est donc pas prête de diminuer comme cela était évoqué dans la SECTION 2.1. Si la solution de l’incinération en terme de gestion des déchets reste l’une des solutions majeures dans le temps, alors les questions de gestion et d’utilisation des mâchefers sont donc, très intéressantes pour l’avenir !

## 2.4 Traitement des M.I.O.M

La transition économique qui se déroule actuellement peut être appliquée au cas des M.I.O.M. L’utilisation de ces derniers permet de se détacher de l’économie linéaire simpliste et archaïque pour s’orienter vers une économie circulaire. En effet, le cycle de vie d’un objet ne se résume plus qu’à "*extraire, fabriquer, consommer et jeter*", il existe des chemins alternatifs tels que le réemploi, la réutilisation, le recyclage et la valorisation des déchets. Par ailleurs, ces derniers ont déjà été évoqués dans la SECTION 2.1. Il existe de nombreux objectifs afin d’arriver à une économie plus circulaire quelques exemples des objectifs français peuvent être repris ci-dessous [MTES, 2019] :

- ◇ Diminution de 50% des déchets non dangereux mis en décharge d’ici 2025 et sur base des chiffres de l’année 2010 ;

- ◇ 100% du plastique utilisé devra être issu de plastiques recyclés d'ici 2025 ;
- ◇ Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> grâce au recyclage et à la réutilisation de matériaux.

L'utilisation des M.I.O.M s'inscrit dans le dernier de ces objectifs. Comme il vient d'être démontré, la quantité produite annuellement de M.I.O.M n'est pas anodine et il y a donc lieu de s'intéresser aux utilisations qui peuvent en résulter.

Cependant, avant cela, il est bon de regarder les différents traitements que ceux-ci doivent subir. Ces traitements sont indispensables car les mâchefers obtenus en sortie de salle de combustion contiennent une grande quantité de produits polluants et nocifs pour l'environnement. En sus, un refroidissement à l'eau<sup>1</sup> est souvent appliqué afin de récupérer les M.I.O.M. Cette eau s'incruste par la suite dans les mâchefers ( $\approx 15-30\%$ ) et, pour pouvoir les utiliser, il y faut l'extraire tout comme ces polluants. Si les traitements à mettre en place sont trop polluants et trop énergivores par rapport au gain qui résulte de leur emploi alors leur simple utilisation n'a pas lieu d'être.

En France par exemple, trois grandes sections ont été créées afin de savoir si oui ou non, il y a un intérêt de traiter le résidu de déchets incinérés dans le but d'une utilisation future. Ces trois catégories sont les suivantes [Bassirou & Souleymane, 2019, Gérard, 1999] :

- ◇ V signifiant que les M.I.O.M sont valorisables directement ;
- ◇ M signifiant que les M.I.O.M sont valorisables après maturation ;
- ◇ S signifiant que les M.I.O.M ne peuvent être valorisés et doivent être stockés en centre d'enfouissement.

Afin de procéder à ces tests, un échantillon de référence est prélevé à la sortie de l'incinérateur et, en le mélangeant avec une certaine quantité d'eau, il est possible d'évaluer la proportion de polluants solubilisés.

Ci-dessous est présenté un schéma type de traitement que les mâchefers de type M pourraient subir à leur sortie de chambre d'incinération. Il est important de noter que l'entièreté des étapes n'est pas indispensable à la bonne maturation des mâchefers. Par ailleurs, si la concentration d'un ou de plusieurs métaux lourds s'avérait trop importante, des traitements plus spécifiques existent afin de la diminuer [Courard et al., 2002, Dou et al., 2017, Hung, 2011, Joseph et al., 2018, Kaibouchi, 2004, Keulen et al., 2016, Tegelbeckers et al., 2015, Verbinnen et al., 2017, Xuan et al., 2018].

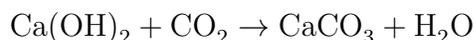
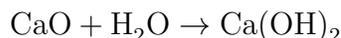
- ◇ Une première distinction des matériaux ferreux et non-ferreux, et ce, grâce à une séparation magnétique. Cela s'accompagne bien souvent d'un criblage ainsi qu'une séparation densimétrique. De cette façon, le produit acquiert un aspect plus homogène et son utilisation est plus aisée ;

---

1. Il existe également un traitement à l'air mais ce dernier n'est que très peu utilisé et des essais sont encore à réaliser bien que la technologie soit prometteuse [Piantone et al., 2000].

- ◇ La seconde étape est sans conteste la plus importante, il ne s'agit plus de mécanique mais de chimie, le vieillissement. Hormis leurs propriétés physiques très hétérogènes, les mâchefers devant être traités ont aussi la particularité d'avoir des compositions chimiques très instables. Durant le vieillissement, l'objectif est donc de stabiliser ces compositions et pour cela, il faut du temps. Bien souvent, une période oscillant de 1 à 12 mois avec une prédominance pour 3 mois est nécessaire afin que les métaux lourds ne soient plus une menace pour l'environnement [Keulen et al., 2016, Piantone et al., 2000, Tegelbeckers et al., 2015].

Durant cette phase, le pH décroît considérablement passant d'une valeur de l'ordre de 12 à environ 8, et ce, grâce à la carbonatation de la chaux détaillée ci-dessous. Cette diminution de pH n'est pas sans conséquence non plus sur les constituants des M.I.O.M qui seront détaillés dans la SECTION 2.5. En effet, les hydroxydes solubles à un pH de 12 deviennent insolubles avec un pH de 8 et sont donc stabilisés dans les mâchefers. Le risque de lixiviation des métaux lourds, qui est l'un des risques majeurs rencontrés en les utilisant comme le réfère le ministère de l'environnement [Piantone et al., 2000], est donc atténué. Ceci évite ainsi une pollution de l'environnement extérieur.



La carbonatation n'est pas le seul phénomène rencontré. En effet, il y a une oxydation qui se réalise entre l'oxygène, l'humidité extérieure et les différents éléments non captés lors du déferrailage comme le fer, l'aluminium, etc. La réaction d'oxydation du fer par exemple, s'écrit comme ceci :



Par ailleurs, il y a également un lessivage de divers constituants qui s'opère. Les concentrations de chlorures, sulfates, nitrates et autres qui, comme il sera détaillé par la suite, peuvent être nocives pour la durabilité des bétons, diminuent progressivement ;

- ◇ Après cette étape, les mâchefers subissent dans un premier temps, un deuxième criblage afin d'obtenir des tailles bien définies. Dans un second temps, une nouvelle séparation magnétique permet d'éliminer le maximum de matériaux non brûlés et métalliques ;
- ◇ Si les concentrations en métaux lourds sont inférieures à celles préconisées par les normes en vigueur (en Europe, il s'agit de la norme EN 12457)<sup>2</sup>, les traitements peuvent s'arrêter ici. Si en revanche, les résultats sont négatifs, il faut alors pousser plus loin les traitements. Pour cela, il est possible de pratiquer un lavage par voie humide [Carsana et al., 2016]. Grâce à l'eau, il est possible de venir laver les particules. De cette façon, les contaminants organiques et inorganiques contenus essentiellement dans les petites particules [Keulen et al., 2016], [Joseph et al., 2018, Lin & Lin, 2006] sont éliminés ;
- ◇ Grâce au lavage, des grains ont été davantage broyés ou du moins cassés pour libérer une fraction supplémentaire de particules métalliques ferreuses et non ferreuses qui étaient initialement couvertes de cendres. À nouveau à l'aide d'un champ magnétique, il est possible

---

2. Il existe une norme européenne mais chaque pays a également des normes supplémentaires, en Flandre par exemple, les limites se basent sur des tests faits en accord avec CMA/II/A.9.1 basé sur le Comité européen de normalisation/spécification technique, EN/TS 14405 :2004 [Joseph et al., 2018].

de récupérer ces métaux et d'éliminer leur effet potentiellement dommageable sur l'environnement et le béton.

Une fois l'entièreté de ces procédés réalisés, les mâchefers obtenus doivent avoir acquis des propriétés chimiques suffisantes pour que leur utilisation soit possible. S'il s'avérait que ce n'était pas le cas, il existe des traitements plus spécifiques. Ces derniers sont détaillés plus amplement ci-dessous.

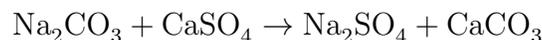
Le traitement thermique ou vitrification est l'un des plus utilisés notamment pour stabiliser les métaux lourds [Dou et al., 2017, Saika et al., 2015, Tegelbeckers et al., 2015, Verbinnen et al., 2017, Xuan et al., 2018, Zhang & Zhao, 2014]. Il consiste à amener les mâchefers que ce soit en sortie de four (procédé intégré) ou après un premier traitement (procédé de post-traitement), à une température très élevée, comprise entre 1100 et 1400 ° C. À cette température, une fusion partielle s'opère, permettant ainsi de diminuer la viscosité et donc, l'écoulement du vitrifiat. Une fois cette opération réalisée, la température est diminuée rapidement ou non en fonction de l'aspect final qu'il convient de donner aux mâchefers.

- ◇ Refroidissement lent : Le vitrifiat obtenu est amorphe et comparable à un caillou ;
- ◇ Refroidissement rapide (dans l'eau) : Le vitrifiat obtenu est granulaire avec une couleur noire et un aspect vitreux.

Les avantages qui ressortent de cette méthode sont multiples. Elle permet dans un premier temps, d'obtenir des mâchefers beaucoup plus homogènes que ce qu'ils n'étaient en sortie de four. Dans un second temps, une séparation magnétique entre métaux ferreux et non-ferreux beaucoup plus aisée suite à leurs propriétés chimiques différentes. Le dernier avantage majeur est le blocage de certains métaux lourds.

Le principal désavantage de cette méthode est son coût énergétique souvent important. À cela s'ajoute la complexité de mise en place pour atteindre les températures adéquates, traiter les gaz pour récupérer les polluants, etc.

Un traitement au carbonate de sodium,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  est également envisageable afin de diminuer la quantité de sulfate. La réaction qui s'opère entre, d'une part, l'agent traitant et, d'autre part, les mâchefers, est décrite ci-dessous. L'obtention de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  est bénéfique et recherchée, car ce dernier est bien plus soluble que  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , il va donc pouvoir se dissoudre plus rapidement, diminuant ainsi la quantité de sulfate. En prime, la création de carbonate de calcium,  $\text{CaCO}_3$ , va conférer de nouvelles propriétés, notamment au béton si ces derniers sont utilisés pour sa confection [Saika et al., 2015, Xuan et al., 2018].



Il existe encore de nombreux traitements comme la Phosphation, le "Revasol Process" [Joseph et al., 2018], mais ils ne peuvent tous être cités et explicités ici. Par la suite, deux autres types de traitements seront présentés. Le premier pour diminuer la quantité d'ions alcalins et le second, la quantité d'aluminium.

Finalement, il peut être conclu que les traitements de base que doivent subir les mâchefers, bien que longs, ne sont pas fastidieux et ne nécessitent pas de dépenses énergétiques et budgétaires trop

importantes hormis pour le traitement thermique. Cependant, ce dernier n'est pas indispensable et n'est pas toujours pratiqué. L'utilisation desdits mâchefers dans divers secteurs notamment celui de la construction peut donc se justifier.

## 2.5 Propriétés chimiques des M.I.O.M

L'origine des mâchefers étant connue, il est maintenant temps de se préoccuper de la composition chimique de ceux-ci. De cette façon, il ne restera plus que les propriétés mécaniques/physiques à aborder, cela sera fait dans les SECTIONS 2.7 et 5.4.

Il est important de bien connaître cette composition car de nombreux problèmes de durabilité au sein d'un béton sont issus de réactions chimiques imprévues entre des composants extérieurs mais aussi intérieurs. En connaissant parfaitement la composition des bétons et l'environnement extérieur, il est possible de prévoir et de se prémunir contre ces éventuelles dégradations.

Précédemment, il a été question des déchets qui ont été incinérés et qui ont permis l'obtention des M.I.O.M, il s'agissait de l'input. La FIGURE 2.5 représente quant à elle l'output, c'est-à-dire les matériaux qui sont retrouvés une fois l'incinération et les diverses phases de traitement réalisées. L'origine des matériaux est très variée comme en témoigne les différents éléments de cette FIGURE 2.5. En effet, des verres (environ 15% [Rübner, 2006]) se mélangent à des morceaux de céramique, de ferraille qui n'ont pas été captés en phase de pré-traitement mais surtout à des minéraux (environ 80%) comme le quartz [Berg & Neal, 1998, Filipponi et al., 2015, Rübner, 2006] (cfr. TABLE 2.5).



FIGURE 2.5 – Matériaux constitutifs des M.I.O.M utilisés au laboratoire.

Cette diversité de composés est intéressante et va donner lieu à des compositions qui varient en fonction de l'origine des déchets mais aussi du traitement qu'ils ont subi (cfr. SECTIONS 2.4 et 2.6).

TABLE 2.5 – Variations de composition selon différentes sources.

Source	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Pays	Date
[Andrade et al., 2007]	50,46	28,35	2,07	10,69	Brésil	2002
[Courard et al., 2002]	50,00	10,00	10,00	5,00	Belgique	1998
[Ginés et al., 2009]	49,38	6,58	14,68	8,38	Espagne	2009
[Li et al., 2012]	59,59	18,61	7,58	5,50	Chine	2012
[Pera et al., 1997]	54,60	8,00	11,10	8,50	France	2002
[Piantone et al., 2000]	55,57	10,22	14,39	7,58	-	-
[Rübner, 2006]	55,70	14,10	11,90	8,80	Allemagne	2005
Moyenne	53,61	13,69	10,25	7,78		
Écart-type	3,78	7,61	4,36	1,97		

Les variations rencontrées peuvent également s'illustrer au moyen d'un graphique, chose qui a été faite à la FIGURE 2.6. Comme représenté, les fluctuations sont dues, ici, à des zones géographiques différentes qui engendrent des origines mais aussi des traitements variés. Il faut aussi noter que les valeurs retrouvées dans la TABLE 2.5 ne coïncident pas exactement avec celle de la FIGURE 2.6. Dans cette table, l'Europe est bien représentée avec quatre origines distinctes, les valeurs sont facilement comparables et cohérentes avec celles qui se retrouvent dans la FIGURE 2.6. Si l'une d'elle est aberrante, elle serait "absorbée" par les 3 autres, perspective qui n'est pas vraie pour l'Asie et "autres".

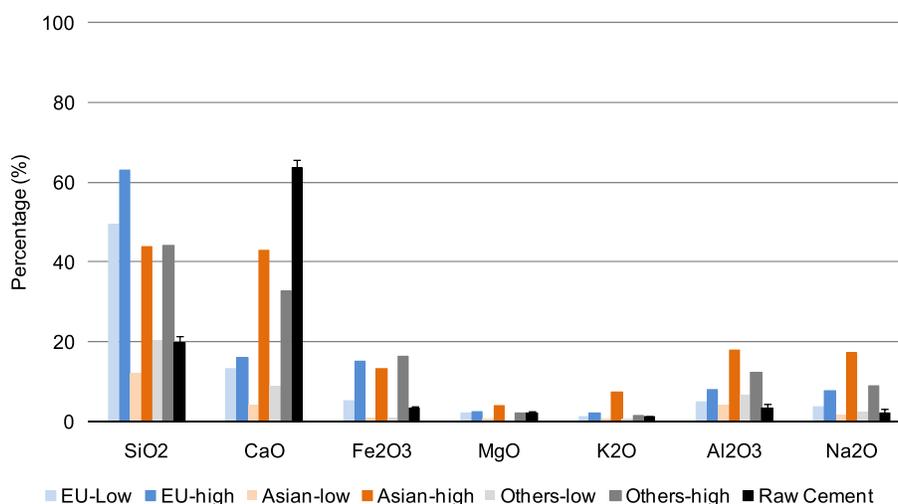
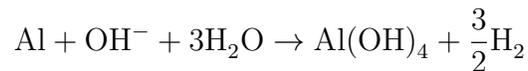


FIGURE 2.6 – Composants majeurs dans les M.I.O.M et comparaison avec un ciment de Portland général [Dou et al., 2017]

Les divergences visibles dans la TABLE 2.5 et la FIGURE 2.6 peuvent donner lieu, lorsque les mâchefers seront introduits dans un béton, à des comportements bien distincts. Ci-dessous, les réactions qu'engendrent une augmentation ou une diminution des quatre composés majeurs ainsi que des métaux lourds au sein des bétons sont décrites. De cette façon, il sera aisé de comprendre pourquoi les phases de traitements sont si indispensables.

La présence de chaux vive,  $\text{CaO}$ , va conférer aux mâchefers des propriétés pouzzolaniques. Au plus sa teneur sera élevée, au plus ces propriétés seront importantes. À titre de comparaison, le ciment possède une teneur en chaux vive tournant autour des 50% tandis que les granulats concassés ont une teneur bien plus faible, chose qui sera détaillée dans la SECTION 5.1.

La teneur en Alumine est elle aussi importante car elle reflète indirectement la quantité d'aluminium présente dans les mâchefers. En effet, si les traitements n'ont pas été suffisamment longs ou efficaces (cfr. SECTION 2.4), certaines particules n'ont pas eu le temps de s'oxyder et se retrouvent donc isolées. Cette présence est néfaste pour les bétons. En effet, lors de leur réalisation, l'eau utile à la réaction d'hydratation et de l'hydroxyde vont se combiner à l'aluminium comme illustré dans la réaction suivante [Pera et al., 1997, Rübner, 2006, del Valle-Zermeno et al., 2017, Xuan et al., 2018] :



De l'hydrogène est libéré, ce qui va créer une pression interne dans le béton. Si cette dernière augmente trop ou si le béton n'a pas atteint une résistance suffisante, des fissures voire même un éclatement local peuvent survenir comme cela est représenté à la FIGURE 2.7. Ces fissures sont évidemment malvenues car elles engendrent bien souvent une perte de résistance mais aussi une diminution de la durée de vie de l'ouvrage considéré.

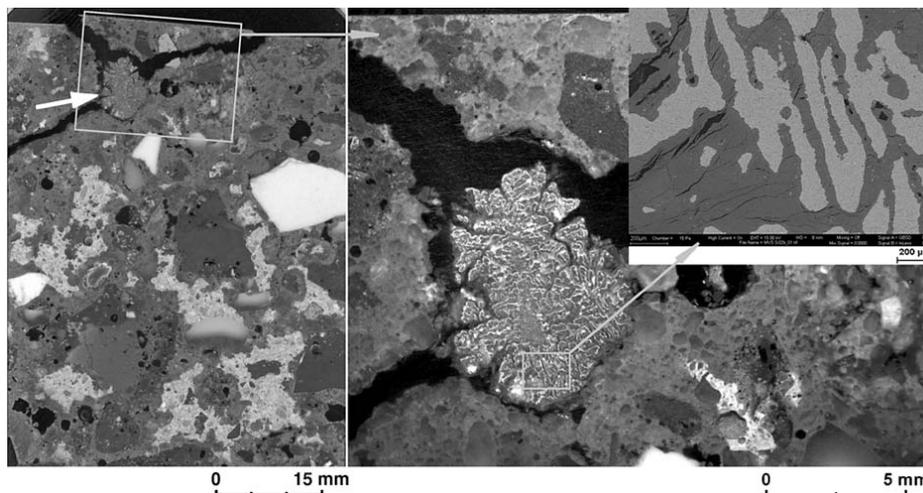
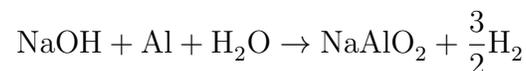


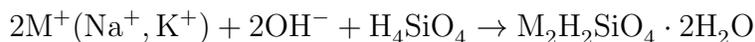
FIGURE 2.7 – Grain d'aluminium qui a causé l'éclatement d'un coin de l'échantillon de béton [Rübner, 2006]

Afin de diminuer la quantité d'aluminium, si celle-ci n'est pas suffisamment basse après les nombreuses phases de traitement évoquées dans le SECTION 2.4, il existe notamment une cure à base d'hydroxyde de sodium,  $\text{NaOH}$  [Pera et al., 1997, Zhang & Zhao, 2014]. Cette dernière permet de libérer l'hydrogène gazeux,  $\text{H}_2$ , dans une phase amont à celle de la confection du béton :



Il est bien évidemment important de parler de la silice puisqu'elle constitue à elle seule 50% des mâchefers. Cette dernière mise en présence d'ions alcalin solubles tels que  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et d'ions

hydroxyde  $\text{OH}^-$  qui se retrouvent dans la solution interstitielle du béton, va entraîner une réaction alcali-silicate comme celle évoquée dans le CHAPITRE 4. Elle peut s'écrire comme ci-dessous [Xuan et al., 2018] :



Cette réaction a pour effet de produire un gel qui vient gonfler le béton et qui peut engendrer des fissures voire un éclatement comme précédemment [Rübner, 2006]. Il est important de noter que ces réactions sont plus amplement détaillées dans les SECTIONS 3.3 et 4.5.

Pour finir cette partie sur la composition des M.I.O.M, il est important d'aborder le sujet des métaux lourds. Ils représentent l'un des principaux freins à la réutilisation des mâchefers comme matériaux de construction secondaires [Dou et al., 2017]. La cause, la lixiviation qui vient littéralement nettoyer les mâchefers de ces métaux qui polluent l'environnement extérieur.

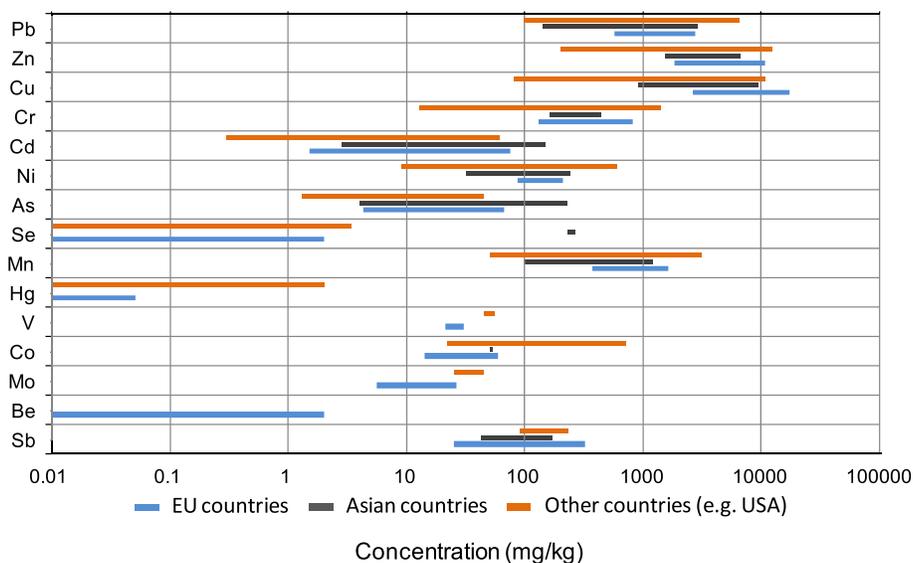


FIGURE 2.8 – Concentration d'oligo-éléments dans les mâchefers de différentes régions [Dou et al., 2017].

Comme le démontre la FIGURE 2.8 et les valeurs trouvées dans la littérature [Courard et al., 2002, Dou et al., 2017, Ginés et al., 2009, Hung, 2011, Kaibouchi, 2004, Keulen et al., 2016, Lynn et al., 2016, Saika et al., 2015, Tegelbeckers et al., 2015, Xuan et al., 2018], le pourcentage de ceux-ci est très changeant. En effet, leur concentration dépend du traitement subi, si celui-ci n'est pas suffisant ou pas adéquat, l'utilisation des mâchefers représente un risque de pollution majeur. Les concentrations limites dépendent directement de l'utilisation future, c'est pourquoi il est probable de retrouver des valeurs limites différentes dans les documents cités. De façon synthétique, une série de ces valeurs peut se retrouver dans les normes européennes, essentiellement : EN 12457 .

Il faut cependant rester lucide quant à celles-ci car, dans le cadre de ce travail, les mâchefers seront mélangés à une matrice cimentaire, les métaux lourds auront tendance à se figer comme cela est mentionné dans la SECTION 3.4.1.

Si le risque de lixiviation est donc limité, ce n'est pas pour autant que la concentration en métaux lourds ne puisse augmenter considérablement. En effet, leur présence va impacter la cinétique d'hydratation au sein des bétons tant de manière bénéfique que néfaste.

La présence de  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  par exemple, va entraîner une accélération de la prise tandis que le plomb et le zinc vont considérablement la ralentir [Piantone et al., 2000]. En parallèle, la présence de  $\text{Cl}^-$  et de  $\text{SO}_4^{2-}$  peut mener à la formation d'étringite secondaire entraînant des fissures, ceci est appelé "attaque au sulfate" (cfr. SECTION 4.5).

Bien que les propriétés conférées par les métaux lourds ne soient pas unidirectionnelles, la tendance globale qui s'en échappe, est un retard du temps de prise. Ce dernier n'est pas anodin et devra être pris en compte dans les analyses futures, essentiellement dans la PARTIE III de ce mémoire.

En guise de conclusion, il est important de connaître la composition des mâchefers utilisés dans la confection des bétons. En effet, comme il vient de l'être démontré, chacun d'eux va octroyer des propriétés particulières au béton qu'il y a lieu de prendre en compte dans les futures analyses de durabilité.

## 2.6 Facteurs influençant la composition

Comment est-il possible d'expliquer les quelques divergences de composition ? Bien que quatre produits semblent constituer à eux seuls 80% des mâchefers, leurs concentrations varient tout comme celle des métaux lourds. Les deux phases durant lesquelles des divergences pourraient apparaître sont, d'une part, les produits mis en entrée et donc l'influence d'une collecte par rapport à une autre et, d'autre part, le type d'incinération réalisée.

### 2.6.1 Collecte sélective

Il est évident que le type de déchets mis en entrée va conditionner la composition des mâchefers et pour connaître le type de déchets, il faut se focaliser sur la collecte et le tri qui ont été réalisés en amont. Pour cela, une étude réalisée en France dans les années 2000 et un rapport sur les perspectives d'utilisation des mâchefers seront utilisées comme base de réflexion [Hung, 2011, Kaibouchi, 2004, Tegelbeckers et al., 2015, de Thysebaert, 2017].

Sur base de la FIGURE 2.3 évoquée dans la SECTION 2.2 plusieurs conclusions peuvent être tirées. Hormis la quantité de plastique qui semble relativement constante, l'ensemble des domaines tend à diminuer. En effet, la mise en place d'espaces verts/compostes diminue considérablement les déchets putrescibles (restes alimentaires). Les quantités de verres comme de papiers cartons sont elles aussi fortement impactées puisqu'elles sont respectivement divisées par 4 et 1,5. Évidemment cette diminution se fait au profit d'un autre type de déchets, les "autres", appelés en Belgique, aujourd'hui, les poubelles noires.

En prenant le verre en exemple, la diminution de sa présence dans les déchets laisse penser à une diminution considérable de la quantité de silice dans les mâchefers. Or, elle reste le produit numéro 1 comme le démontre les valeurs de la TABLE 2.5. Si cette valeur ne semble pas être impactée,

c'est que le verre ou du moins la silice est introduite d'une autre façon.

En réalité, les immondices que contiennent la catégorie "autres" se composent de tous types de déchets, notamment des plastiques mais aussi en moindre mesure, du verre, des papiers, etc. Ce mélange de déchets permet donc d'amener des concentrations plus ou moins similaires que ce soit avant ou après tri. Deux effets antagonistes se compensent donc.

En conclusion, bien que la composition des M.I.O.M semble être impactée par un tri sélectif, elle est en réalité plus ou moins constante, les composés étant introduits d'une autre façon. Les variations évoquées ultérieurement dans la TABLE 2.5 et la FIGURE 2.6 de l'ordre de quelques pourcents peuvent donc se justifier par cette influence du tri qui, il est bon de le rappeler, diverge de pays à pays, de communes à communes.

Il faut cependant, nuancer ces propos. En effet, si 80% des produits mis en entrée d'incinération sont des verres, il est évident que la composition des mâchefers obtenus sera totalement différentes de celle évoquée dans la TABLE 2.5<sup>3</sup>.

Le cas du Brésil dans la TABLE 2.5 est un bon exemple pour illustrer cela. Les valeurs que proposent ce pays varient du simple au double en comparaison des autres. Il y a donc lieu de se questionner sur la composition des déchets incinérés et des pré-traitements qui ont été réalisés. Y-a-t'il eu un déferraillage comme c'est le cas en Europe? Il y a fort à parier que non au vu de la grande teneur en alumine et en oxyde de fer.

## 2.6.2 Incinération

La façon dont la combustion est réalisée lors de l'incinération des déchets peut potentiellement amener des compositions distinctes. Ci-dessous, les trois types de fours généralement utilisés pour incinérer les déchets sont détaillés. Les avantages, inconvénients mais aussi les variations de composition qu'ils peuvent engendrer, sont également évoqués [Hung, 2011, Kaibouchi, 2004, Piantone et al., 2000, Rendek, 2006, Tegelbeckers et al., 2015].

- ◇ Four à grille : Technique la plus simple et la plus répandue car elle permet d'incinérer un gros débit de déchets en peu de temps. Les grilles jouent un rôle multiple puisqu'elles doivent assurer le transport tout en permettant un bon étalement des déchets et une bonne distribution de l'air pour obtenir une combustion complète. Les caractéristiques géométriques des grilles permettent un passage de l'air aisé. Cependant, la distribution des composés n'est pas parfaitement homogène et il arrive bien souvent que des composés organiques imbrûlés se retrouvent en sortie de four ;
- ◇ Four rotatif : Permet d'atteindre des températures de combustion plus importantes que des fours à grille, cela limite le temps dans la chambre. Par ailleurs, la rotation du four et le brassage permettent également d'assurer un temps de combustion minimum tout en maximisant le taux de combustion. Les désavantages de cette méthode sont : un volume relativement faible et la détérioration de la chambre de combustion plus rapide suite aux chocs thermique entre déchets "froids" ( $\approx 100^\circ\text{C}$ ) et gaz très chauds ( $\geq 1000^\circ\text{C}$ ) ;

---

3. Le cas échéant, dans les mâchefers, il ne sera pratiquement retrouvé que de la silice  $\text{SiO}_2$  et de l'oxyde de sodium,  $\text{Na}_2\text{O}$ .

- ◇ Four à lit fluidisé : Une fois les déchets traités une première fois (déferrailage et broyage), ils sont amenés dans la chambre de combustion. Dans cette dernière se trouve un lit de sable chaud ( $\approx 850^\circ\text{C}$ ) appelé lit fluidisé. De l'air est ensuite introduit, et ce pour deux raisons. La première, brasser le mélange sable/déchets et assurer une bonne homogénéisation. La seconde, permettre une combustion la plus complète possible. Le désavantage majeur de cette méthode est le pré-traitement à infliger aux déchets. Ceux-ci étant relativement peu homogènes, un broyage assez poussé doit s'opérer car un four à lit fluidisé fonctionne sur base d'une taille et d'une densité déterminées.

En conclusion, certains fours semblent montrer de meilleures dispositions que d'autres à l'incinération des déchets. Les fours rotatifs permettent une meilleure combustion et homogénéisation que les fours à grille et ne demandent pas de réaliser un pré-traitement des déchets comme pour les fours à lit fluidisé [Rendek, 2006].

Cependant, bien que ces divergences amènent à des taux de combustion différents, quelle que soit la composition chimique ou la composition minéralogique, ceux-ci restent relativement constants et ne font apparaître que peu de variations [Delville, 2003]. Ces dernières, présentées dans la TABLE 2.5 peuvent donc, si elles ne sont pas justifiées par l'influence du tri sélectif et des produits mis en entrée, s'expliquer par la technologie d'incinération mise en place.

## 2.7 Propriétés physiques des M.I.O.M

Après les propriétés chimiques, viennent les propriétés physiques. Dans le CHAPITRE 5, différents tests seront évoqués afin de caractériser les matériaux. Les valeurs obtenues devront donc être comparées avec les grandeurs retrouvées dans la littérature. Dans cette section, celles-ci seront présentées.

Sur base de divers essais et notamment des essais d'absorption les masses, volumiques absolues du sable grossier de mâchefers (diamètre inférieur à 6mm) et des granulats de mâchefers (diamètre supérieur à 6mm) peuvent être obtenues. Celles-ci sont comprises entre 2200 et 2500kg/m<sup>3</sup> [Courard et al., 2002, Ginés et al., 2009, Lynn et al., 2016].

En continuant cette étude, il faut maintenant tourner son attention vers l'absorption d'eau. Ici, les valeurs qu'il est possible de trouver oscillent fortement. Cependant, il est possible d'en retirer une fourchette pour chacun des diamètres. Pour du sable grossier de mâchefers, les valeurs trouvées tournent autour de 10 à 20% de la masse tandis que les particules d'un diamètre supérieur voient leur coefficient divisé par un facteur d'environ deux, avec des valeurs allant de 2 à 10% [Ginés et al., 2009, Gress & All., 1991, Kaibouchi, 2004, Lynn et al., 2016, Pera et al., 1997].

Le coefficient de micro-Deval,  $M_{DE}$ , est lui aussi changeant en fonction du diamètre des particules considéré. Pour les plus grossières d'entre elles, le coefficient moyen est de l'ordre de 15% tandis que pour du sable grossier de mâchefers, il est plus que doublé avec des valeurs pouvant atteindre les 45% [Courard et al., 2002, Hung, 2011]. Ces résultats semblent bien coïncider avec la physique du problème. En effet, le sable grossier de mâchefers est plus susceptible d'atteindre un diamètre inférieur à 1,6mm. Les particules plus grossières, elles, nécessitent un temps de broyage plus important.

Ce phénomène peut s'apparenter à deux boules de neige qui fondent au soleil. Il est évident que la boule la plus petite disparaîtra avant la plus grosse qui a besoin de plus de temps pour voir son centre se réchauffer.

La dernière caractéristique mécanique indispensable pour composer les futurs bétons est la granulométrie. Dans les documents cités ([Bkanchard & All., 1989, Courard et al., 2002, Dou et al., 2017, Pera et al., 1997, del Valle-Zermeno et al., 2017]), une analyse granulométrique est présentée. Les résultats concordent entre eux et c'est pourquoi n'est présenté ci-dessous que l'une d'entre elles.

TABLE 2.6 – Granulométrie des M.I.O.M [Courard et al., 2002]

<b>Fraction (mm)</b>	<b>Moyenne (%)</b>	<b>Min. - Max.</b>
0,002 - 0,02	6,5	6,0 - 7,0
0,02 - 0,06	8,6	8,5 - 8,7
0,06 - 0,2	4,4	4,2 - 4,5
0,2 - 2	16,0	15,2 - 16,7
2 - 20	71,1	70,4 - 71,8

## 2.8 Application industrielle

À l'heure actuelle, les M.I.O.M sont quasiment toujours utilisés comme matériaux de construction pour des couches de soubassement et de remblais dans la construction routière, les ouvrages d'art, construction de parkings et autres. [Born & Brecht, 2014].

Cependant, leur utilisation ne se limite pas qu'à cette fonction de couche de fondation. Depuis quelques années, diverses études ont été réalisées afin de comprendre le comportement des mâchefers dans les bétons.

À titre d'exemple, des pavés en béton dans lesquels, une partie des matériaux a été substituée par des M.I.O.M [Courard et al., 2002]. Il a été démontré que des résultats concluants peuvent être obtenus en remplaçant jusqu'à 35% de la masse totale des constituants par des mâchefers. Ceci n'est évidemment qu'un exemple parmi tant d'autres puisqu'ils peuvent également être utilisés à l'élaboration de tuiles, de blocs, panneaux et de manière plus générale, à l'élaboration de béton tant comme substitution aux granulats, qu'au sable et ciment [Dou et al., 2017, Li et al., 2012, Safiuddin et al., 2010, Verbinnen et al., 2017].

# Chapitre 3

## Béton et M.I.O.M

Après avoir introduit le procédé de création des mâchefers, l'attention va se tourner, dans un premier temps, sur les bétons et, dans un second temps, sur l'incorporation des dits mâchefers aux bétons. De cette façon, diverses études pourront être menées afin de vérifier la congruence entre mâchefers et béton.

### 3.1 Introduction

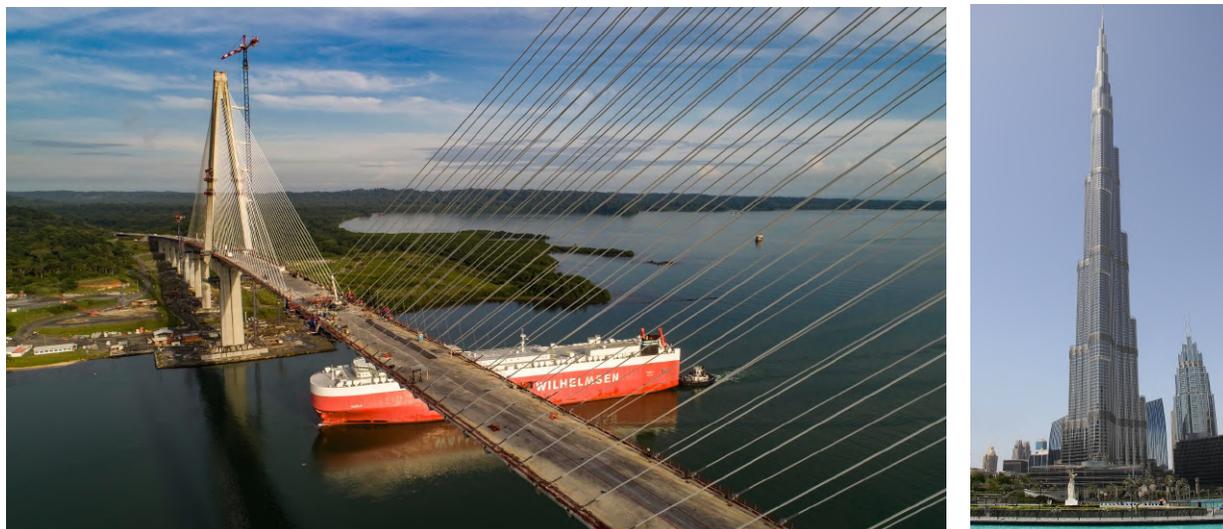
Le béton en chiffres, c'est [Courard, 2018] :

- ◇ 4,7 milliards de tonnes/an de gravier ;
- ◇ 2,2 milliards de tonnes/an de sable ;
- ◇ 1,3 milliards de tonnes/an de ciment ;
- ◇ 800 milliards de litres/an d'eau ;

À titre de comparaison, la quantité d'eau représente environ 50 fois le débit journalier de la Meuse. L'ensemble de ces valeurs mises bout à bout, mène à une quantité de béton produite titanesque de 9-10 milliards de tonnes. Cela représente donc une production d'un peu plus d'un mètre cube de béton/an/habitant [GBB, 2018].

Le béton est donc l'un des matériaux les plus utilisés au monde si ce n'est le plus utilisé. Ce dernier est présent dans l'ensemble des secteurs de la construction. En effet, il est employé pour la confection de ponts, de tours (cfr. FIGURE 3.1), de routes et à moindre mesure de maisons, de chapes, de pieux de fondation et autres.

La raison de sa grande popularité est son faible coût comparé à d'autre matériau comme l'acier. Par ailleurs, ses bonnes propriétés physiques et chimiques lui confèrent une durabilité assez importante. En sus, il peut facilement s'allier avec l'acier puisqu'ils disposent du même coefficient de dilatation thermique ( $12 \cdot 10^{-6}/K$  [Courard, 2019, Mihaylov, 2018]). De cette façon, du béton armé ou précontraint est créé combinant les avantages des deux matériaux : coût, légèreté, résistance en compression mais aussi en traction grâce à la ductilité de l'acier, etc.



(a) Pont de l'Atlantique Panama.

(b) Burj Khalifa.

FIGURE 3.1 – Réalisation d'ouvrages en béton.

Le béton a cependant son côté obscur puisqu'à lui seul, il contribue à environ 8% des émissions de  $\text{CO}_2$  mondiale [Li et al., 2012, Lynn et al., 2016, Savadogo et al., 2015]. La part la plus importante de ces émissions provient de la production de ciment ( $\approx 85\%$  [Younsi, 2011]) car elle nécessite des températures très importantes ( $1450^\circ\text{C}$  pour la calcination) mais aussi un broyage très fin des particules.

En effet, le broyage des particules demande une quantité d'énergie non négligeable et cette dernière est d'autant plus importante que la taille des particules initiales est importante. L'utilisation de particules déjà pré-broyées et donc plus fines, notamment pour les granulats, permettrait donc de limiter ces émissions.

En parallèle à cette solution, utiliser des additions minérales lors du malaxage des bétons permet de limiter la quantité de ciment. Il a été montré qu'en substituant 25% de ciment par des cendres volantes diminue de 24,6% les émissions de  $\text{CO}_2$  totale [Younsi, 2011].

En mettant de côté la pollution, le béton pille également la terre de ses ressources. Chaque année, ce n'est pas moins de 670 pyramides de Khéops en granulat qui pourraient être érigées [Courard, 2018]. L'utilisation de nouveaux matériaux est donc primordiale si le développement de l'économie mondiale se poursuit dans cette direction. Auquel cas, arrivera un moment où des entreprises devront se délocaliser pour retrouver des matières premières proches ou feront face à des coûts de transport très importants.

## 3.2 Matériaux utilisés dans les bétons à base de M.I.O.M

Comme évoqué dans l'introduction, les constituants principaux du béton sont au nombre de 4. Le sable mélangé à de l'eau et du ciment permettent l'obtention de mortier auquel des graviers peuvent être ajoutés lors du malaxage pour former du béton. À ces quatre constituants de base,

des adjuvants peuvent venir s'ajouter pour conférer des propriétés plus spécifiques. Une composition volumique pour un béton classique est également représentée à la FIGURE 3.2 afin de permettre une meilleure compréhension.

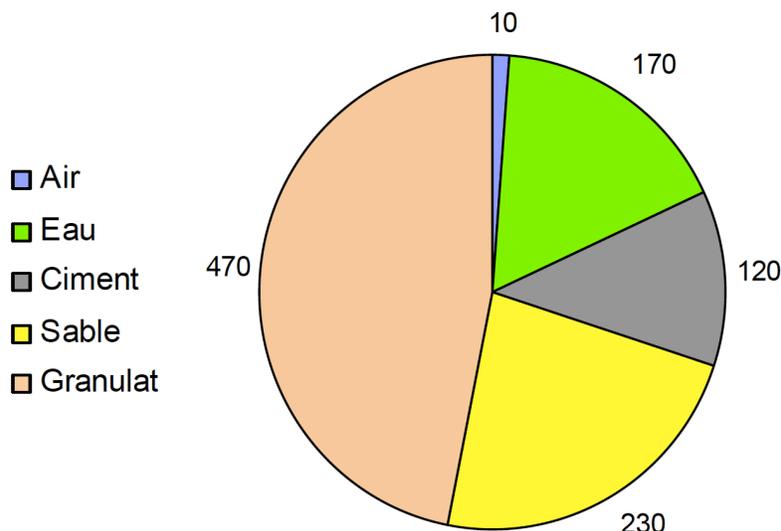


FIGURE 3.2 – Composition volumique pour  $1\text{m}^3$  de béton [Courard, 2018].

## Ciment

Le type de ciment dépend bien souvent de l'utilisation future des bétons ainsi que l'environnement dans lequel ils seront placés. Aujourd'hui, il existe quatre grandes classes de béton qui se distinguent les unes des autres par leur quantité de clinker Portland (K), laitier de haut-fourneau (F), cendres volantes siliceuses (S) et calcaire (L ou LL). Chacun d'eux est normalisé par la norme EN 197-1 et possède des propriétés physiques et chimiques que ce soit à court ou à long terme bien différentes [Courard, 2017, Courard, 2018, GBB, 2018].

Il est par exemple possible d'obtenir un béton de type :

- ◇ LA, "Low Alkali" : Utilisation de ciment contenant du laitier de haut-fourneau, type CEM III 42,5-LA, pour éviter des réactions alcalis, pouvant entraîner des fissures au sein du béton ;
- ◇ HSR, "High Sulfate Resisting" : Utilisation de ciment contenant un minimum de 66% de laitier de haut-fourneau (CEM III B 42,5-HSR) quand les bétons sont en contact avec des eaux de mer, des eaux usées, etc. afin d'éviter des réactions entre le sulfate et la chaux éteinte ;
- ◇ HES, "High Early Stregth" : Utilisation de ciment développant une grande résistance, type CEM I 52,5-HES pour obtenir une prise rapide dans le cas où un décoffrage doit avoir lieu par exemple. En complément, il est possible d'ajouter un ciment alumineux afin de développer une résistance encore plus rapide ;
- ◇ LH, "Low Heat", Utilisation d'un ciment "plus grossier" de type CEM I 32,5-LH. Les particules étant moins fines, l'hydratation se déroule plus lentement ce qui réduit la chaleur dégagée pour une même unité de temps. Ce type de ciment est principalement utilisé pour des ouvrages massifs afin de limiter le gonflement et le retrait.

Dans le cadre de ce mémoire, le ciment utilisé est CEM I 52,5 N, les propriétés de ce dernier seront plus amplement détaillées dans la SECTION 5.1.

## Eau

Bien que l'eau qui sort du robinet en Belgique puisse être utilisée pour la confection des bétons, ce n'est pas le cas dans tous les pays. Il existe des limites notamment en terme de matières en suspension et sels dissous à ne pas dépasser pour ne pas impacter la durabilité des bétons. Par ailleurs, il existe une norme pour l'eau de gâchage qui est la suivante : EN 1008 et qui permet d'assurer une qualité suffisante.

À titre d'exemples, les eaux de mer, industrielles, usées ne peuvent être utilisées, *a contrario* de l'eau de pluie ou de recyclage [Courard, 2018, GBB, 2018].

## Granulats

Il existe de nombreux types de granulats, les quatre catégories majeures à travers lesquelles les granulats s'identifient, sont les granulats naturels, artificiels, recyclés et récupérés. L'utilisation de M.I.O.M s'inscrit dans la seconde catégorie puisqu'il s'agit d'un matériau ayant subi une modification thermique [GBB, 2018]. Les SECTIONS 2.5-2.7 et 5.3-5.4 donnent plus d'informations sur les propriétés des M.I.O.M mais également des granulats concassés calcaires utilisés dans les bétons.

De manière très synthétique, il est possible de dissocier trois grands types de granulats. Les fillers avec un diamètre inférieur à 0,063mm, le sable grossier avec un diamètre oscillant entre 0,063 et 4-6mm et pour finir les granulats en tant que tels, avec un diamètre supérieur à 4-6mm. Chaque catégorie de granulats, en fonction de son calibre, a des propriétés physiques (granulométrie, forme, géométrie, etc.) et chimiques (teneur en chlorure, sulfate, composition) différentes. Certaines de ces propriétés ont des limites à ne pas dépasser comme la teneur en chlorure et c'est pourquoi il existe une norme concernant les granulats en béton, la norme EN 12620 [Courard, 2018, GBB, 2018].

Bien que les granulats soient prédominants dans un béton comme le démontre la FIGURE 3.2, ce ne sont pas eux qui déterminent la résistance de celui-ci. En effet, ceux-ci ont une résistance à la compression bien trop importante comparée à la matrice cimentaire. En réalité ce qui conditionne essentiellement la résistance à la compression est la liaison à l'interface granulat/pâte de ciment. C'est pourquoi, afin d'assurer une durabilité optimale, il y a donc lieu de s'intéresser à toutes les propriétés des granulats utilisés et pas seulement à leur résistance.

## Sable

Le sable peut être compris comme un granulat fin. Il dispose d'une section à part entière car il représente bien souvent un pourcentage massique important au sein des bétons comme le montre à nouveau la FIGURE 3.2. Combiné avec les granulats, ils forment entre 70-80% du volume du béton [GBB, 2018]. Bien que pouvant être classé dans la catégorie des granulats, le rôle du sable n'est pas tout à fait identique à ceux-ci.

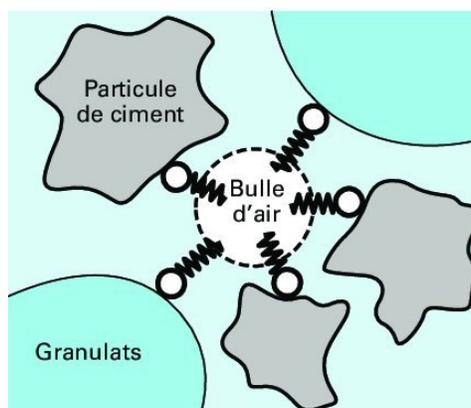
La granulométrie des granulats étant souvent grossières, du sable fin est utilisé afin de la compléter. De cette façon, il occupe l'espace situé entre les granulats et rend le béton beaucoup plus compact. Ceci explique également pourquoi du sable de forme, généralement arrondie est préféré au sable concassé. En effet, ce dernier ayant un forme plus angulaire, il ne permet pas de d'obtenir un taux de compactage si élevé. En sus, la forme arrondie permet de donner un aspect lisse en surface au béton.

La forme du sable est donc primordiale et c'est pourquoi il est important de pouvoir l'évaluer. Pour ce faire le calcul du coefficient d'écoulement ! La procédure à suivre est, quant à elle reprise, dans la norme NBN EN 933-6 [GBB, 2018].

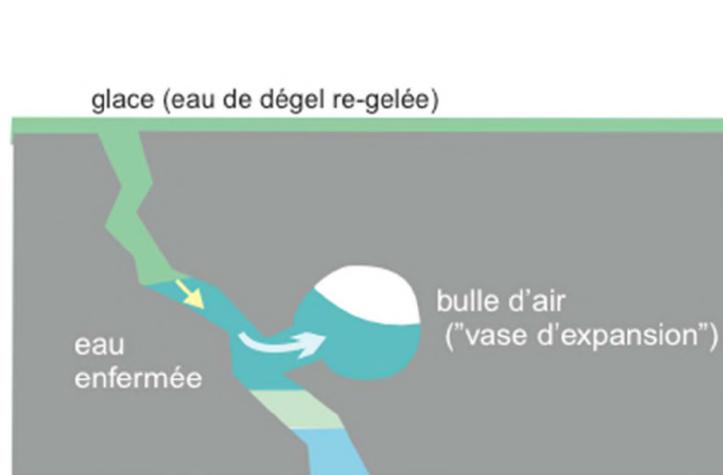
## Adjuvants

Le béton étant utilisé dans l'ensemble des pays du globe et les ouvrages réalisés, comme le montre la FIGURE 3.1, divergeant très fortement, les conditions de mise en place et les aspects de surface requis diffèrent énormément (en plus des propriétés de durabilité et de résistance). Afin de pouvoir répondre à l'ensemble de la demande, des adjuvants ont été créés pour conférer des propriétés particulières au béton à plus ou moins long terme. Ci-dessous, une liste non-exhaustive de ces adjuvants a été réalisée ainsi que les propriétés qu'ils octroient au béton [Courard, 2018, Courard, 2019, GBB, 2018, Pigeon, 1989, Ployaert, 2012, Rens, 2016] :

- ◇ Accélérateur de prise : En augmentant la vitesse d'hydratation des composants du clinker notamment le  $C_3A$  qui sera évoqué dans la section suivante et qui permet l'obtention de la résistance ;
- ◇ Couleur au béton : En intégrant lors du malaxage des pigments très fins et inertes qui ne possèdent aucune propriété hydraulique, une couleur bien spécifique peut être obtenue. L'hématite,  $Fe_2O_3$ , présent dans les M.I.O.M permet par exemple l'obtention d'un béton rouge. Il est important de noter que le rapport eau/ciment, E/C, le type de ciment, sable et autres additions peuvent également influencer la couleur finale ;



(a) Principe.



(b) Exemple de "vase d'expansion".

FIGURE 3.3 – Ajout d'un entraîneur d'air [Calderon & Horgnies, 2013, GBB, 2018, Courard, 2019].

- ◇ Entraineur d'air : En utilisant de longues chaines constituées d'une partie hydrophobe et d'une autre partie hydrophile, les bulles d'air vont se charger négativement en surface. De la sorte, elles vont se repousser l'une l'autre et se stabiliser dans la matrice cimentaire tout en garantissant une répartition uniforme comme le montre la FIGURE 3.3a. Si l'eau venait à geler, elle pourrait se dilater dans chacune de ces bulles d'air et ainsi éviter des surpressions internes (cfr. FIGURE 3.3b) ;
- ◇ Retardateur de prise : Composé de saccharose, de phosphate ou encore d'amidon ou cellulose, le coulis est ajouté au mélange lors du malaxage. De cette façon, l'hydratation du mélange et donc la prise est fortement atténuée. Il est possible d'obtenir des bétons ayant un temps de prise oscillant de quelques heures à un jour en fonction de la quantité du coulis injecté ;
- ◇ Superplastifiant : De la même façon que les entraineurs d'air, des polymères linéaires viennent se fixer par adsorption à la surface des grains de ciment. Dès lors, chargés négativement, ceux-ci se repoussent l'un l'autre ce qui permet d'augmenter l'ouvrabilité du béton et à défaut de vouloir augmenter l'ouvrabilité, il est possible de diminuer la quantité d'eau totale.  
*A priori*, le superplastifiant n'a pas d'effet négatif sur le béton. Cependant, en s'intéressant à l'ensemble des réactions qu'il provoque, il est possible d'isoler un effet négatif secondaire. En effet, suite à leur action tensioactive, il modifie également la tension superficielle de l'eau ce qui peut avoir comme effet d'augmenter la teneur en air du béton à l'état frais.

### 3.3 Réactions au sein du béton

Le ciment qui sera utilisé pour constituer le béton est comme évoqué précédemment un CEM I 52,5 N et c'est pourquoi, toute l'attention va maintenant se tourner sur les réactions d'hydratation qui naissent entre ce matériau et l'eau lorsqu'il est mélangé au sein d'un béton [Courard, 2017, Courard, 2018, Courard, 2019, GBB, 2018].

TABLE 3.1 – Composition chimique et éléments primaires du ciment Portland, CEM I 52,5 N.

Composants de base	Annotation	Teneur (%)	Composants hydrauliques	Annotation
CaO	C	62-68	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
SiO <sub>2</sub>	S	19-25	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	2-9	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	1-5	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

Les composés de base sont donc identiques à ceux retrouvés dans la TABLE 2.5 cependant leur concentration est bien différente puisqu'ici, la chaux vive est largement dominante à l'inverse des M.I.O.M où la silice l'est. C'est cette variation qui permet de conférer au ciment des propriétés hydrauliques très importantes que les M.I.O.M n'ont pas.

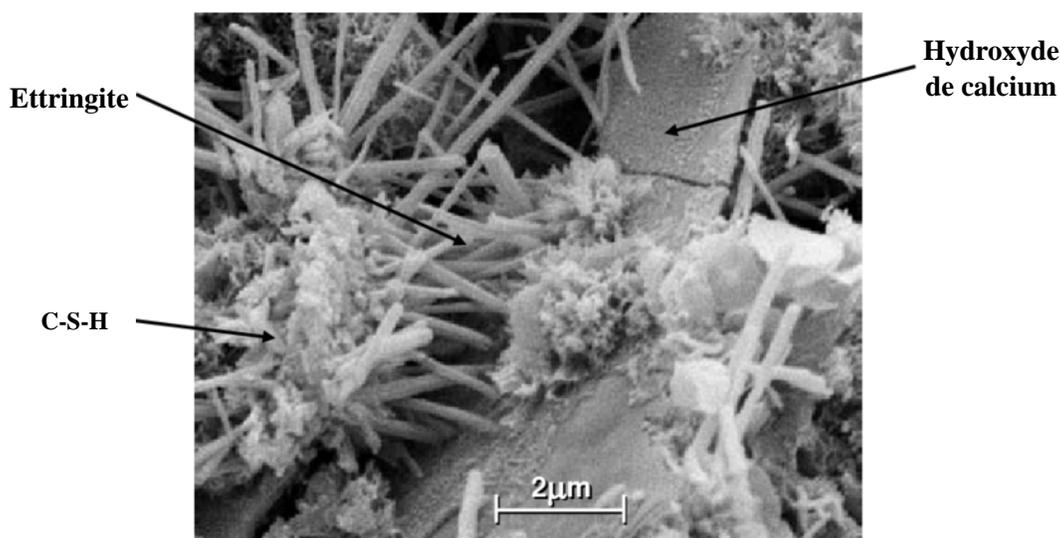


FIGURE 3.4 – Produits d’hydratation du ciment Portland, image au microscope [Alizadeh, 2009].

L’alite,  $C_3S$  et la bélite,  $C_2S$  se combinent avec l’eau,  $H_2O$  pour former des silicates de calcium hydraté (majoritairement de la tobermorite) et de la portlandite respectivement noté C – S – H et CH ou  $Ca(OH)_2$ . Ces deux constituants sont les principaux produits de la réaction puisqu’ils constituent entre 50-60% pour le premier, et 20-5% pour le second, de la masse totale des bétons. Ils sont également représentés à la FIGURE 3.4.

Le CH assure la caractère basique du liquide interstitiel ( $pH \approx 13$ ), évitant ainsi la corrosion de l’acier grâce à une couche de passivation. Il peut également se carbonater et donc se combiner avec du  $CO_2$  afin de produire du carbonate de calcium,  $CaCO_3$  chose qui sera détaillée dans le CHAPITRE 4.

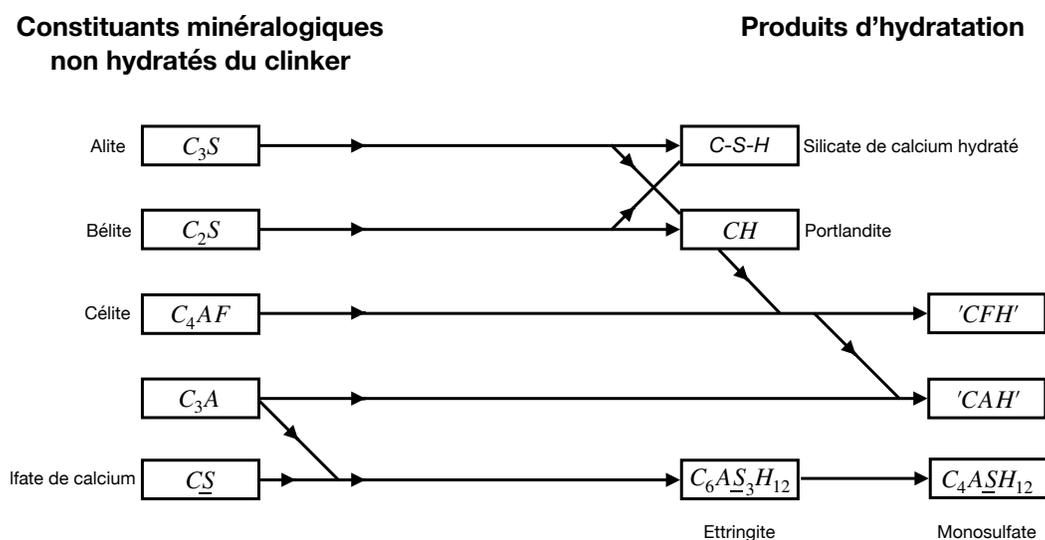


FIGURE 3.5 – Progression des réactions chimiques lors de l’hydratation du ciment de Portland [GBB, 2018].

Le CH peut également, en moindre mesure, se combiner avec la délite,  $C_4AF$  et/ou l’aluminat,

$C_3A$  pour former du CFH et CAH ce qui peut influencer la prise mais très peu la résistance finale. Pour être tout à fait complet, il faut également noter que pour réguler au mieux la prise, un faible pourcentage de sulfate de calcium, CS est introduit. Ce dernier réagit avec l'aluminate pour former de l'ettringite primaire qui peut se transformer par la suite en monosulfate.

L'ensemble de ces réactions est représenté sous la forme d'un graphe synthétique à la FIGURE 3.5.

L'addition de M.I.O.M est une addition qui peut se qualifier de pouzzolanique et, même si l'ensemble des réactions entre ciment et M.I.O.M n'est pas connu, il est possible d'en retirer une tendance globale. Lorsqu'ils sont introduits, ils contribuent au développement de la résistance grâce à une réaction entre le CH du ciment et la silicie,  $SiO_2$  des M.I.O.M. En effet, cela permet la formation de C – S – H, véritable colle du béton ce qui peut accroître la résistance de ce dernier. Cette formation est cependant, relativement lente et le gain de résistance arrive souvent de manière décalée comme il le sera détaillé dans la SECTION 3.6.

### 3.4 Avantages et désavantages

Lorsqu'un béton est réalisé, il doit permettre une résistance et une longévité importante. En effet, il n'y a que peu d'intérêt à construire dix fois en dix années successives la même route. D'une part cela engendre des coûts trop importants et d'autre part, cela crée des contraintes externes et une pollution supplémentaire, déjà bien trop présente dans le monde du béton.

À l'heure actuelle, lorsqu'il est question de "technologie des bétons", ceux-ci doivent se développer en prenant en compte trois critères essentiels [Bilir, 2012, Dosho, 2007, Yüksel et al., 2007] :

- ◇ Le coût des matières premières ainsi que le coût d'entretien de la construction ;
- ◇ Utilisation de nouveaux matériaux dits "verts" ou issus du recyclage ;
- ◇ Assurant une durabilité importante ce qui, le cas échéant permet de réduire les coûts et la pollution.

La FIGURE 3.6 résume bien cette balance entre les trois critères grâce au cercle rouge qui est le compromis entre coût/environnement/durabilité.

L'utilisation de M.I.O.M permet, sans réaliser de grandes études au préalable, de déjà répondre à deux de ces critères, le coût et l'utilisation d'un matériau "vert". Ce sont d'ailleurs les principaux avantages des M.I.O.M comme cela va être détaillé dans la SECTION 3.4.1.

Pour ce qui est de la durabilité, des études plus approfondies doivent être menées et c'est dans cet objectif que diverses expérimentations seront réalisées dans la PARTIE II et analysées dans la PARTIE III.

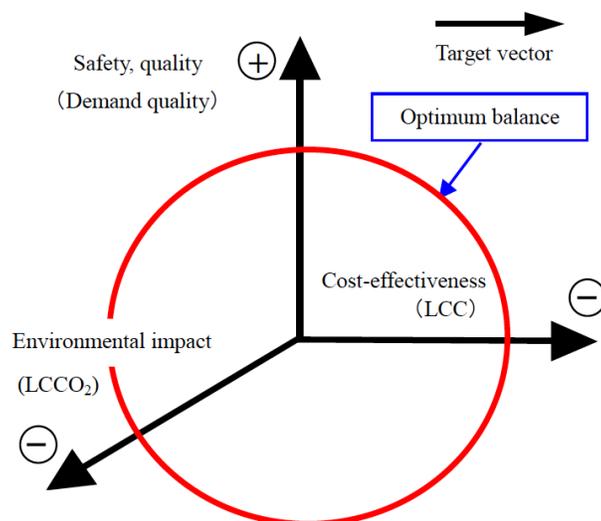


FIGURE 3.6 – Objectif des nouveaux bétons recyclés [Dosho, 2007].

### 3.4.1 Avantages

Ne pas utiliser les M.I.O.M et les stocker dans un parc de maturation ou un centre d'enfouissement nécessite un traitement souvent onéreux. C'est pourquoi les mâchefers ont souvent un coût de revente très faible et bien plus faible que celui des granulats traditionnels. Leur utilisation permet donc de diminuer de manière drastique, les coûts de matières premières [Tegelbeckers et al., 2015].

Ils sont des matériaux "verts" et s'inscrivent dans la politique d'une économie circulaire (cfr. SECTION 2.4). Issus de déchets et permettant de préserver les ressources naturelles comme le sable, graviers et autres, ils sont, avec les déchets de construction, les nouvelles technologies, etc., la solution de demain pour continuer à produire toujours plus de façon à répondre à la demande croissante.

Cependant, les avantages ne sont pas unidirectionnels. En effet, les bétons ne "profitent" pas seulement de l'incorporation des mâchefers, ils permettent également de limiter la lixiviation de ceux-ci. Les métaux lourds, polluants, se voient stabiliser dans la matrice cimentaire et ne peuvent plus être aussi facilement lessivés que ce qu'ils l'étaient en couche de remblais, sous-bassement, etc. [Dou et al., 2017, Joseph et al., 2018, Juric et al., 2006, Kaibouchi, 2004, Tang et al., 2016, Verbinnen et al., 2017].

### 3.4.2 Désavantages

Néanmoins, il ne peut pas y avoir que des avantages et certaines ombres viennent noircir l'utilisation des M.I.O.M.

Les propriétés physiques et plus spécifiquement géométriques ne sont pas des plus favorables pour constituer un squelette granulaire compact. La forme anguleuse des particules de mâchefers ne

permet par un emboîtement optimum et justifie l'obtention de bétons avec une plus grande porosité [Bilir, 2012, Keulen et al., 2016, Rübner, 2006]. Cette porosité peut, certes être bénéfique lors de cycle de gel/dégel mais elle engendre bien souvent une perte de résistance, une diffusion des chlorures et autres matières nocives, plus aisée, etc. Ces propriétés seront étudiées plus en détail par la suite.

En faisant abstraction de toutes leurs propriétés physiques, leurs propriétés chimiques sont aussi une source d'indétermination et donc de désavantages. En effet, comme il l'a été démontré dans la SECTION 2.5, les compositions peuvent varier selon de nombreux paramètres (température de four, type d'incinérateur, collecte des déchets, etc.). Tant d'indéterminations peuvent ainsi induire des réactions impromptues, néfastes à la durabilité de l'ouvrage réalisé.

En sus des indéterminations, des phases de pré-traitements longues sont nécessaires avant de les utiliser. Si celles-ci ne sont pas correctement réalisées, des particules résiduelles vont pouvoir se combiner avec les autres constituants du béton pour former du gaz ou autres composés entraînant une détérioration partielle voire complète, l'aluminium étant l'exemple parfait (cfr. SECTION 2.4).

### 3.5 Propriétés à l'état frais

Après avoir évoqué les avantages qui résultent de l'utilisation de M.I.O.M dans les bétons, il y a lieu de s'intéresser aux propriétés à l'état frais de ces bétons. Une fois que cela sera réalisé, cette attention se tournera sur les propriétés à l'état durci et plus particulièrement sur les résistances mécaniques.

#### Ouvrabilité

La première propriété à déterminer lors de la confection d'un béton est son ouvrabilité. En effet, lorsqu'un béton est défini, un affaissement représentant son ouvrabilité est également défini. Au plus l'ouvrabilité est importante, au plus son affaissement doit être grand. Un béton auto-compactant par exemple doit avoir un affaissement pratiquement total.

De manière générale, lorsque des éléments avec un grand pouvoir d'absorption d'eau sont utilisés dans la composition générale, il faut augmenter progressivement le rapport E/C pour conserver la même consistance [Aggarwal et al., 2007, Aggarwal & Siddique, 2014]. Si cela n'est pas fait, l'ouvrabilité diminue fortement, le béton est ferme.

L'utilisation de M.I.O.M ne déroge pas à la règle! En effet, l'ajout de de M.I.O.M demande, pour obtenir un même affaissement un ajout de superplastifiant qui est non négligeable, et ce, même en travaillant avec un rapport E/C efficace constant. Cette addition est d'autant plus importante que les particules de M.I.O.M utilisées sont fines. En effet, le sable grossier de mâchefers va amener à un béton beaucoup plus ferme que le simple ajout de granulats de M.I.O.M [Carsana et al., 2016, Juric et al., 2006, Lynn et al., 2016].

Par ailleurs, il faut noter que cette diminution d'ouvrabilité n'impacte pas de manière significative la cohésion [Carsana et al., 2016, Juric et al., 2006].

### Teneur en air

Après que le béton ait atteint l'affaissement désiré, une mesure de la teneur en air est réalisée. Un béton de référence, sans ajout d'adjuvant, de filières particulières ou de granulats avec des propriétés spécifiques, possède une teneur en air de l'ordre de 1-2% (cfr. FIGURE 3.2) [Courard, 2018, Wong et al., 2011].

Le fait de venir substituer des granulats naturels par des M.I.O.M va entraîner une augmentation de cette teneur en air [van der Wegen et al., 2013]. La raison? La forme anguleuse évoquée dans la SECTION 3.4.2. En effet, cette forme va réduire le compactage et donc offrir une teneur en air plus importante [Aggarwal et al., 2007, Courard et al., 2002, Keulen et al., 2016, van der Wegen et al., 2013].

### Masse volumique

Une dernière mesure est souvent la bienvenue sur les bétons à l'état frais, il s'agit de la masse volumique. La masse volumique des M.I.O.M est inférieure à celle du sable naturel ou des granulats concassés (cfr. SECTION 2.7). *A priori*, les bétons à base de M.I.O.M devraient donc être plus légers. Pour connaître leur masse finale, il suffirait de réaliser une simple règle de trois entre taux de substitution et masse volumique des particules. Or d'autres paramètres doivent être pris en compte.

En travaillant à E/C efficace constant, ce qui sera le cas lors des expérimentations, de l'eau est ajoutée pour compenser la "sur-absorption" d'eau des M.I.O.M. De cette façon, l'eau nécessaire à la réaction d'hydratation n'est pas entièrement pompée par ceux-ci, et pour s'en assurer, ces derniers sont bien souvent pré-saturés 24 heures à l'avance. Les M.I.O.M qui, à l'état sec, ont une masse volumique inférieure à celles des granulats classiques, peuvent au final avoir à l'état saturé, une masse volumique identique ou supérieure [van der Wegen et al., 2013, Zhang & Zhao, 2014]. À ce phénomène, doit également être ajouté le taux de compactage. Comme il vient de l'être démontré, le compactage est bien souvent plus faible [Aggarwal et al., 2007], ce qui diminue, *ipso facto*, la masse volumique.

## 3.6 Propriétés à l'état durci

Les propriétés à l'état durci se résumeront dans un premier temps à la résistance en compression, flexion et tension. Les propriétés telles que la porosité, la capillarité ou encore la perméabilité, etc. seront abordées dans la SECTION 4.1 puisqu'elle décrit les indicateurs de durabilité.

### Résistance à la compression

De manière générale, la résistance en compression à 28 jours des bétons à base de M.I.O.M est inférieure à celle d'un béton ordinaire [Aggarwal et al., 2007, Andrade et al., 2007, Juric et al., 2006, Li et al., 2012, Lin & Lin, 2006, Park et al., 2016, Pera et al., 1997, Zhang & Zhao, 2014].

Cette affirmation est d'autant plus vraie que les particules de M.I.O.M considérées sont petites [Lynn et al., 2016]. Les raisons majeures qui expliquent cette perte de résistance sont d'une part, une masse volumique plus faible résultant d'un moins bon compactage et, d'autre part, une teneur

en air plus importante. En effet, 1% d'air en plus peut réduire de 5% la résistance et même plus si l'air se trouve à l'interface granulat/matrice cimentaire [Wong et al., 2011].

Dès lors, au plus la concentration en M.I.O.M est importante, au plus la perte de résistance l'est aussi.

Cependant, pour un taux de substitution "normal" qui sera évoqué par la suite, il est possible d'obtenir des résistances tout à fait satisfaisantes. En sus, à long terme, la résistance des bétons à base de M.I.O.M augmente plus significativement qu'un autre et donc, la différence de résistance entre béton ordinaire et béton fait de M.I.O.M s'amenuise. À 90 jours, il est possible d'obtenir des résistances pratiquement équivalentes et à 365 jours, des résistances légèrement supérieures [Aggarwal et al., 2007, Lin & Lin, 2006, Zhang & Zhao, 2014].

La raison ? L'introduction de M.I.O.M induit une réaction d'hydratation plus lente. En effet, la première phase d'hydratation produit essentiellement de la portlandite qui représente une phase faible du béton. À plus long terme, la portlandite va réagir avec la silice largement présente au sein des M.I.O.M comme l'a montré la TABLE 2.5. Cette combinaison va donner naissance à de la silice de calcium hydraté ou C-S-H et c'est ce dernier qui va conférer au béton une résistance plus importante comme il l'a été mentionné dans la SECTION 3.3 [Lin & Lin, 2006, Singh & Siddique, 2015, Zhang & Zhao, 2014].

Pour être tout à fait complet, il faut également spécifier que les M.I.O.M vont agir comme des réservoirs d'eau. En effet, s'ils ont été pré-saturés avant d'être incorporés dans le mélange et que la quantité d'eau présente n'est pas suffisante pour permettre une hydratation complète, elle va pouvoir être relâchée sur le long terme pour le permettre [Keulen et al., 2016, Singh & Siddique, 2015]. Le sable grossiers de mâchefer possédant un potentiel pouzzolanique plus important tout comme une capacité d'absorption plus importante, c'est lors de l'introduction de ces particules, que les variations au long terme se feront le plus ressentir [Keulen et al., 2016].

Au final, la résistance en compression peut, sur le long terme, être conservée. Évidemment, cela dépend du taux de substitution mais aussi des particules substituées.

De manière générale, une substitution allant jusqu'à 25% pour en sable grossier de mâchefers et 50% pour des granulats de mâchefers permet d'obtenir une résistance à 28 jours légèrement inférieure et à long terme, une résistance identique voire même meilleure [Aggarwal et al., 2007, Tang et al., 2016, Zhang & Zhao, 2014].

### **Résistance à la flexion**

La résistance à la flexion est complexe à évaluer. Au contraire du test en compression, ici, le moindre petit défaut va induire une perte importante de résistance et les résultats disponibles peuvent fortement varier.

Il faut identifier ici deux cas, l'introduction du sable grossier de mâchefers ou l'introduction de granulats de mâchefers. Les granulats de mâchefers entraînent une diminution de la résistance en flexion suite à la présence de gros morceaux de céramique et de verre qui sont lisses et qui ne permettent pas une bonne adhérence entre matrice cimentaire et granulats. Le sable grossier de mâchefers ne rencontre pas ce problème. Suite à leur forme anguleuse et leur rugosité de surface

élevée, les résultats de résistance en flexion sont assimilables à ceux d'un béton ordinaire sur le long terme car comme il l'a été évoqué, la réaction d'hydratation est plus lente lors de l'utilisation de M.I.O.M [Aggarwal et al., 2007, Keulen et al., 2016].

### **Résistance à la traction**

Les essais de résistance en traction sont tout aussi complexes que ceux en flexion. En effet, un simple petit défaut peut mener à des résultats bien en-dessous de ceux escomptés.

Les remarques réalisées sur la résistance en flexion sont également valables pour la résistance en traction. Il est possible, sur le long terme, d'obtenir des résultats similaires à ceux d'un béton de référence en utilisant du sable grossier de mâchefers. Les granulats de mâchefers, quant à eux, tendent à donner des résultats inférieurs du fait de la présence de gros morceaux de verres et céramiques [Aggarwal et al., 2007, Keulen et al., 2016].

Néanmoins, il faut préciser que ces conclusions dépendent fortement du traitement que les M.I.O.M ont subi. Un concassage plus important par exemple peut diminuer la quantité de ces gros morceaux et donc améliorer la résistance en flexion et traction.

Ceci clôture ainsi ce troisième chapitre. Les propriétés des bétons à base de M.I.O.M tant à court terme qu'à moyen et long terme semblent donner des résultats plus que satisfaisants pour poursuivre leur étude. Il est donc maintenant temps de s'intéresser à la durabilité potentielle de ces bétons.

# Chapitre 4

## Durabilité

Le béton est bien souvent assimilé à résistance et longévité. Pour assurer ces caractéristiques, d'une part, il faut réaliser une composition adéquate en fonction de son utilisation et d'autre part, tenir compte des agents extérieurs qui pourraient détériorer le béton. Par ailleurs, la durabilité est l'un des trois critères essentiels à la formation des bétons issus de "nouvelles technologies" (cfr. FIGURE 3.6).

Dans un premier temps, il sera question des indicateurs de durabilité. Ces derniers, comme leur nom l'indique, permettent de donner un ordre de grandeur sur la longévité du béton en fonction de l'environnement extérieur.

Ensuite, seront développées les principales attaques qui peuvent se développer au sein d'un béton aussi bien armé que non armé. Il est important de noter que la liste des attaques potentielles est beaucoup plus longue que les quelques attaques présentées. Cependant, ces dernières seront étudiées plus en détail au laboratoire grâce à divers tests, c'est pourquoi une attention toute particulière leur est consacrée.

Chacune des attaques sera, dans un premier temps, détaillée dans le cas d'un béton ordinaire, dit de référence. L'explication des phénomènes physico-chimiques sera complétée par des exemples concrets. Dans un second temps, le cas des bétons à base de M.I.O.M sera évoqué. Via la littérature, il sera possible d'évaluer les comportements qu'ont ces bétons vis-à-vis de ces attaques et d'en dégager la tendance globale.

### 4.1 Indicateur de durabilité

Chaque béton, lors de sa confection est associé à une classe d'environnement. Cette dernière dépend, comme son nom l'indique, de l'environnement extérieur et donc des risques que les bétons encourent. Au total, il existe 18 classes d'exposition présentées dans l'ANNEXE B. Chacune a pour première, la lettre "X" pour eXposure de l'anglais. Suivi de cette lettre, cinq possibilités :

- ◇ "C" : Carbonatation ;
- ◇ "D" : Deicing salt ou Sel déverglaçage ;
- ◇ "S" : Seawater ou Eau de mer ;

- ◇ "F" : Frost ou Gel ;
- ◇ "A" : Agressive ou Environnement agressif.

Chacune de ces lettres est accompagnée d'un chiffre qui caractérise une action plus particulière et qui peut accélérer la dégradation du béton [GBB, 2018].

Un béton soumis à un environnement de type XA3 est bien plus susceptible de se dégrader qu'un béton placé dans un environnement de type X0. Afin, d'éviter cette dégradation accélérée, il faut respecter les limites fixées par les indicateurs. Ci-dessous, certains de ceux-ci sont évoqués. Ils sont détaillés pour des bétons à base de M.I.O.M et sont comparés à un béton de référence.

### Porosité

Il existe deux grands types de porosité, la porosité fermée et la porosité ouverte. Cette dernière est la plus problématique car elle permet à l'eau, au sel de déverglaçage et autres agents agressifs de se propager au sein du béton.

Afin d'évaluer le pourcentage de porosité ouverte, il faut effectuer le rapport suivant :

$$\text{Porosite ouverte} = \frac{\text{Volume des pores ouverts}}{\text{Volume apparent du solide}} \quad (\%) \quad (4.1)$$

Au plus la valeur est élevée, au plus les risques encourus sont grands.

Dans le cas de l'utilisation de M.I.O.M, la porosité est plus importante que pour des bétons ordinaires [Collepari et al., , Courard et al., 2002, Keulen et al., 2016]. Comme cela a été évoqué dans la SECTION 3.5 qui se consacre aux propriétés à l'état frais du béton à base de M.I.O.M, le taux de compactage et la teneur en air sont fortement influencés par la présence de M.I.O.M et engendrent cette porosité plus importante. À cela peut être ajouté un troisième phénomène, la réaction avec l'aluminium. Lors de cette réaction, de l'hydrogène peut se libérer et une nouvelle forme de vide se crée autour des grains d'aluminium [Rübner, 2006].

De manière générale, les mâchefers ont donc pour effet d'augmenter le réseau capillaire, la connectivité et donc la porosité totale [Andrade et al., 2007]. Néanmoins, la réaction d'hydratation étant retardée suite à la présence des mâchefers, la porosité qui initialement était importante dégraisse de manière significative au fil du temps. Pour un pourcentage "normal" de substitution comme défini précédemment, la porosité tend au long terme, vers celle d'un béton de référence tout en restant supérieure à ce dernier [Kasemchaisiri & Tangtermsirikul, 2008, Singh & Siddique, 2015] .

Pour affirmer ces propos, les résultats des essais d'absorption d'eau par immersion totale peuvent être étudiés car ils reflètent directement la porosité ouverte. Lorsqu'une grande quantité de mâchefers est introduite, l'absorption totale augmente fortement. En sus, cette augmentation est d'autant plus forte que les mâchefers substitués sont petits [Collepari et al., , Lynn et al., 2016].

Il est important de noter que la structure des pores peut fortement influencer la porosité ouverte/fermée et donc la durabilité. Cependant, elle ne fera pas l'objet d'une étude plus poussée ici car il n'est pas envisageable de réaliser une analyse granulométrique de la porosité à l'université de Liège dans le cadre de ce mémoire.

## Transport par perméabilité

La perméabilité peut se définir comme "*son aptitude à se laisser traverser par un fluide sous un gradient de pression*" [Ollivier & Torrenti, 2008]. Faisant intervenir un gradient de pression, la loi de Darcy (ÉQUATION 4.2) est utilisée pour évaluer la perméabilité [GBB, 2018].

$$Q = \frac{k}{\mu} A \frac{dp}{dx} \quad (m^3/s) \quad (4.2)$$

- ◇  $k$  : La perméabilité ( $m^2$ ) ;
- ◇  $\mu$  : La viscosité du liquide ( $kg/s \ m$ ) ;
- ◇  $A$  : L'aire de la section apparente ( $m^2$ ) ;
- ◇  $dp$  : Le différentiel de pression ( $kg/s^2 \ m$ ) ;
- ◇  $dx$  : L'épaisseur ( $m$ ).

Pour déterminer le coefficient  $k$ , des essais de perméabilité à l'oxygène par exemple, peuvent être menés. Bien que la porosité soit intrinsèquement liée à la perméabilité, une grande porosité ne donne pas forcément lieu à une grande perméabilité. Les pores fermés, notamment ne permettent pas le passage de liquide ou gaz et ne doivent donc, de ce fait, pas entrer dans le calcul de la perméabilité.

Outre la porosité, d'autres paramètres tels que le diamètre et la forme des pores, leur connectivité, etc. sont à prendre en compte [GBB, 2018].

Comme dit précédemment, la porosité est plus grande lorsque des M.I.O.M sont utilisés pour confectionner des bétons, tout comme la connectivité des pores. En réalité, le seul paramètre qui tend à réduire la perméabilité est la saturation des M.I.O.M en eau car l'humidité obstrue l'écoulement. Cependant, ce paramètre n'est pas suffisant au regard des autres propriétés et c'est pourquoi, globalement, les bétons à base de M.I.O.M ont une perméabilité, pour un même fluide, plus importante qu'un béton de référence [Andrade et al., 2007, GBB, 2018].

## Transport par diffusion

Au contraire de la perméabilité qui nécessite une force extérieure pour se développer, le transport par diffusion se met en place lorsqu'une différence de concentration est présente. Là où la concentration est la plus faible, elle est équilibrée par des solutés provenant de la zone à plus forte concentration [GBB, 2018]. Ce déplacement est très nuisible pour les bétons car il peut entraîner la migration d'ions chlore, sulfate, etc. qui s'attaquent aux armatures, comme détaillée dans la SECTION 4.3.

Afin de limiter ce mode de transport, il faut diminuer au maximum la porosité!

À nouveau, pour des concentrations adéquates (comprises entre 20% et 50% de M.I.O.M, cfr. SECTION 3.6), la diffusion est sensiblement la même que pour un béton de référence. Au plus le temps passe, au plus les bétons à base de M.I.O.M verront leur coefficient de diffusion diminuer significativement par rapport au béton de référence suite à la diminution de porosité [Aggarwal & Siddique, 2014, Collepardi et al., , Kasemchaisiri & Tangtermsirikul, 2008, Park et al., 2016,

van der Wegen et al., 2013].

Il faut aussi noter que l'introduction de M.I.O.M n'induit que des variations minimales comparées à un changement de type de ciment qui lui, peut multiplier le coefficient de diffusion par 5 [Colleparidi et al., , van der Wegen et al., 2013].

De manière générale, il peut être conclu que les indicateurs de durabilité ne sont pas propices pour l'utilisation de béton à base de M.I.O.M si le taux de substitution est trop important. Lorsque ce taux est adapté, les indicateurs de durabilité laissent présager une durabilité identique à celle d'un béton de référence. Au travers des différentes expérimentations qui seront menées dans la PARTIE III, il faudra confirmer ces propos.

Pour conclure cette première introduction sur la durabilité potentielle des bétons à base de M.I.O.M, il faut se référer à la TABLE 4.1. En prenant en compte les différents indicateurs de durabilité ci-dessus, elle synthétise ce qui a été dit. En effet, elle montre très clairement que pour une porosité, une perméabilité ou un coefficient de diffusion plus important, la durabilité potentielle est atténuée.

Durant la 3<sup>ème</sup> partie de ce mémoire, diverses expérimentations seront réalisées afin d'évaluer directement ou indirectement les valeurs de ces indicateurs. Cela permettra dans un premier temps, de mettre en évidence l'influence du taux de substitution et, dans un second temps, de conclure sur la durabilité potentielle des bétons à base de M.I.O.M.

TABLE 4.1 – Synthèse des classes et valeurs limites (indicatives) relatives aux indicateurs de durabilité généraux (G) ou de substitution (S) : porosité, résistivité électrique, coefficient de diffusion et perméabilité. Les valeurs indiquées correspondent à des mesures réalisées selon les méthodes décrites [AFGC, 2004].

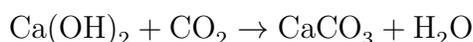
<b>Durabilité potentielle → Indicateur général ↓</b>	<b>Très Faible</b>	<b>Faible</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Élevée</b>	<b>Très Élevée</b>
Porosité accessible à l'eau (%)	>16	14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9
Coefficient de diffusion "effectif" des $Cl^-$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	>8	2 à 8	1 à 2	0,1 à 1	<0,1
Coefficient de diffusion "apparent" des $Cl^-$ (Essai de migration) ( $10^{-12}m^2/s$ )	>50	10 à 50	5 à 10	1 à 5	<1
Perméabilité "apparente" aux gaz ( $10^{-18}m^2$ ) à S=0	>1000	300 à 1000	100 à 300	30 à 100	<30
Perméabilité intrinsèque à l'eau liquide ( $10^{-18}m^2$ ) à S=1	>10	1 à 10	0,1 à 1	0,01 à 0,1	<0,01
Teneur en $Ca(OH)_2$ % par rapport à la masse de ciment	<10	10 à 13	13 à 20	20 à 25	>25

## 4.2 Carbonatation

### Béton référence

La carbonatation [Courard, 2018, Courard, 2019, GBB, 2018, Mai-Nhu, 2013] est l'une des attaques les plus courantes pour un béton extérieur. Le simple fait d'être à l'extérieur ne permet cependant pas au béton de se carbonater, il faut que l'air ait une humidité relative comprise entre 40 et 80%<sup>1</sup>. Le béton, dans ces conditions, est alors fortement susceptible de se carbonater mais que se passe-t'il exactement ?

Le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère va pénétrer par les pores et se diluer dans l'eau présente entraînant par la même occasion une chute du pH de 13 à ≈ 9. Le Ca(OH)<sub>2</sub> se dilue alors, et se combine avec le CO<sub>2</sub> pour former du calcaire, CaCO<sub>3</sub> comme le montre l'équation suivante :



À partir de ce moment, la carbonatation est visible puisque un dépôt calcaire est marqué dans les pores comme le montre la FIGURE 4.1a. La vitesse d'avancement dépend ensuite de la taille des pores et de l'apport en CO<sub>2</sub>. De manière générale, cette vitesse décroît essentiellement pour deux raisons. La première est que la distance à parcourir pour le CO<sub>2</sub> est de plus en plus longue ralentissant ainsi les échanges avec l'extérieur. La seconde, le CaCO<sub>3</sub> formé prend plus d'espace que les réactifs, la porosité est donc amoindrie et le CO<sub>2</sub> n'a donc plus toujours l'espace disponible pour avancer ce qui peut stopper net l'avancement du front de carbonatation.

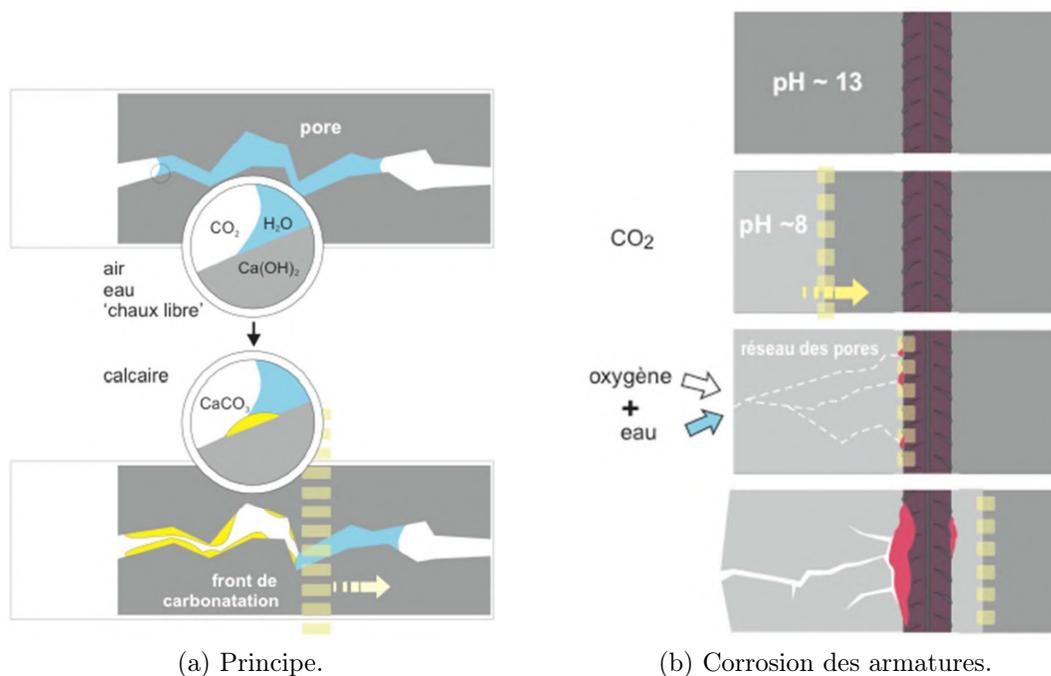


FIGURE 4.1 – Dégradation par carbonatation [Courard, 2019, GBB, 2018].

1. Si l'humidité est trop importante, le CO<sub>2</sub> ne pourra se mouvoir au travers du béton. En effet, sa diffusion se déroule 10.000 fois plus rapidement dans l'air que dans l'eau. Cela signifie donc, que pour des bétons immergés, la carbonatation ne peut avoir lieu.

Dans le cas où il s'agit d'un béton non armé et que ce dernier n'est pas encastré à chacune de ses extrémités, la carbonatation n'est pas négative, au contraire elle est même positive. En effet, la  $\text{CaCO}_3$  étant plus volumineux, il diminue la porosité du béton et augmente sa résistance. En revanche, s'il est maintenu et qu'aucun joint de dilatation n'est prévu, l'augmentation de volume peut engendrer des fissures.

Le béton non armé est néanmoins de moins en moins courant. Les armatures, bien qu'elles augmentent la résistance globale du béton, représentent aussi l'une des menaces dormantes les plus importantes.

Le front de carbonatation avançant, le pH diminue et supprime concomitamment la couche de passivation. Les armatures n'étant plus protégées, si des variations d'humidité venaient à survenir comme c'est souvent le cas dans un environnement extérieur, de la rouille pourrait se créer (cfr. SECTION 4.3). Plus volumineuse que l'acier, la rouille va entraîner des pressions internes qui, si elles sont suffisantes, peuvent faire exploser le béton comme l'illustre la FIGURE 4.1b et le montrent les FIGURES 4.2a et 4.2b.



(a) Photo : C. Malmedy.



(b) Photo : T. Goléa.

FIGURE 4.2 – Exemples de dégradation du béton suite à de la carbonatation [Courard, 2019].

Pour lutter contre la carbonatation, il n'existe pas énormément de méthode. Soit supprimer le  $\text{CO}_2$ , soit fermer les pores. La première option semble très peu envisageable, notamment lorsque le béton est utilisé pour réaliser des bâtiments, ouvrages d'arts au cœur d'une ville. La seule option est donc de jouer avec la porosité des bétons (diminution du rapport E/C, meilleur compactage, etc.).

Enfin, pour éviter que de la rouille n'apparaisse sur les armatures, la meilleure solution est de garantir un enrobage suffisant. De cette manière, le front de carbonatation va progresser, ralentir et s'arrêter avant d'avoir pu attaquer la couche de passivation de l'acier.

## Béton à base de M.I.O.M

Il y a deux paramètres importants à prendre en compte, le taux de substitution et la pré-saturation des mâchefers ou non. Si la substitution est de l'ordre de 20% et qu'ils ont été pré-saturés, alors le front de carbonatation avance au même rythme que dans un béton de référence, si ce n'est plus lentement. En sus, sur le long terme, la vitesse d'avancement régresse plus significativement lorsque des M.I.O.M sont utilisés suite à la diminution de porosité elle aussi plus forte (cfr. SECTION 4.1) [Colleparidi et al., , Lynn et al., 2016, Park et al., 2016, van der Wegen et al., 2013].

Néanmoins, si la concentration en mâchefers devient trop importante, la porosité le devient aussi comme il l'a été mentionné, et l'avancement du front de carbonatation est bien plus rapide.

Il faut aussi noter qu'à taux de substitution identique, le remplacement par du sable grossier de mâchefers donne des résultats similaires qu'un remplacement par des granulats de M.I.O.M. Le fait est que le sable grossier de mâchefers apporte plus de porosité mais a un pouvoir d'absorption plus important, les deux effets se compensent en quelque sorte [Lynn et al., 2016, van der Wegen et al., 2013].

Une petite remarque doit être ajoutée. Si la substitution ne se fait plus sur le sable et/ou les granulats mais sur le ciment, la vitesse de carbonatation augmentera rapidement. Les M.I.O.M possédant un pH bien inférieur à celui du ciment, ils confèrent également de moins bonnes propriétés vis-à-vis de la carbonatation.

## 4.3 Corrosion par des chlorures

### Béton référence

Avec la carbonatation, les chlorures représentent les deux menaces principales des armatures et sont les causes majeures de corrosion. Les chlorures sont introduits dans les bétons de deux façons bien distinctes. Soit ceux-ci sont présents lors du malaxage, soit ceux-ci pénètrent dans les pores et se propagent par la suite. Il est important de bien distinguer ces deux filiales [Courard, 2018, GBB, 2018]!

- ◇ Présence initiale : Contenus dans les granulats, ils ne représentent en réalité qu'une menace mineure pour les éventuelles armatures. En effet, lors du malaxe, ceux-ci se meuvent et vont se figer dans la pâte de ciment ;
- ◇ Présence par pénétration : Suite à des agents extérieurs comme le sel de déverglaçage, le sel de mer, l'eau saumâtre, etc., des chlorures peuvent se présenter à la surface des bétons. Si ces derniers sont suffisamment poreux, ils peuvent pénétrer à l'intérieur de ceux-ci. Le mode de transport qui s'opère dépend ensuite des conditions d'humidité. Un béton saturé va entraîner une diffusion, tandis qu'un béton non saturé va permettre une pénétration par absorption capillaire.  
Cette présence est d'autant plus dangereuse que les chlorures peuvent se mouvoir et donc attaquer les armatures.

Pour se prémunir de leur effet néfaste, il existe des concentrations maximales à ne pas dépasser, s'il s'agit d'un béton armé, non armé ou précontraint. En Belgique par exemple, il faut se référer

à la norme NBN EN B 15-001. Cependant, il vient d'être montré qu'il fallait dans un premier temps, éviter une pénétration de ceux-ci et pour cela, il n'existe pas de norme. D'autres méthodes doivent donc être mises en place pour obvier à cette pénétration. Avant d'en parler, il faut avant tout expliquer ce qu'est le phénomène de corrosion par des chlorures.

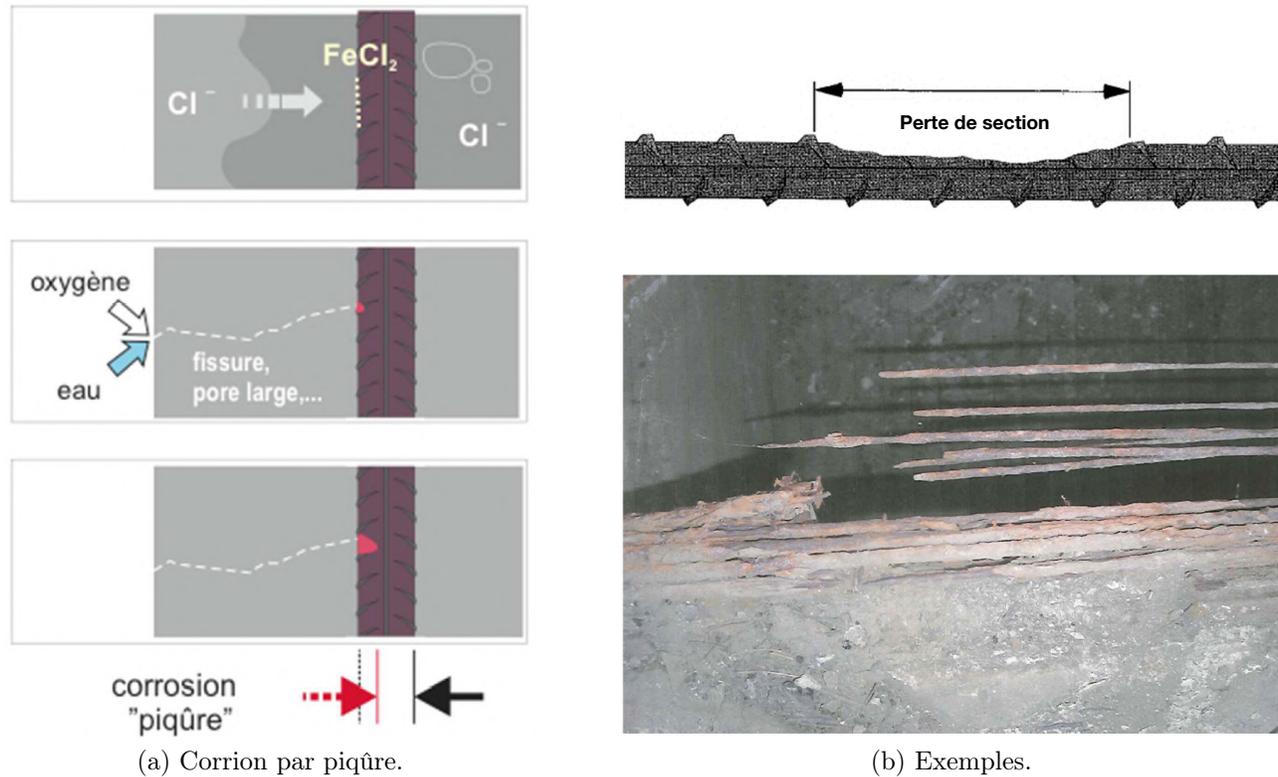
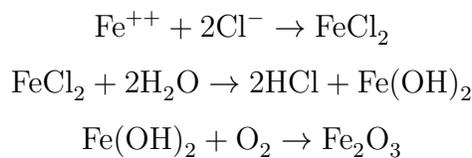


FIGURE 4.3 – Dégradation des armatures par corrosion [Courard, 2019, GBB, 2018].

Au contraire de la carbonatation, la corrosion des armatures par des chlorures est très localisée et se fait par piqûre. Les réactions chimiques qui s'opèrent sont explicitées ci-dessous et vont en parallèle de la FIGURE 4.3a [Courard, 2018, Courard, 2019, GBB, 2018, Mai-Nhu, 2013].



La corrosion se forme donc en trois grandes étapes :

- ◇ La première, les ions fer, libérés à l'anode, vont se combiner aux ions chlore pour donner naissance à du chlorure de fer,  $\text{FeCl}_2$  ;
- ◇ La seconde, le  $\text{FeCl}_2$ , en présence d'humidité et donc d'eau, va se dissoudre et donner naissance à de l'hydroxyde de fer ;
- ◇ Pour finir, le  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  soluble, progresse jusqu'en surface où, en présence d'oxygène,  $\text{O}_2$ , de la rouille est produite,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Cette dernière étape est très intéressante. La rouille étant visible à la surface, elle permet d'indiquer là où les attaques ont eu lieu et de procéder à une réparation si celle-ci s'avère possible. Bien souvent ces réparations sont nécessaires afin d'assurer la longévité de la structure. La raison ? la diminution de section des armatures. Comme le montre la FIGURE 4.3b, la rouille va venir progressivement ronger, millimètre par millimètre, la section de l'acier. Cela a donc pour effet de concentrer les contraintes sur une plus faible surface, ce qui peut amener à la ruine des armatures ou des tendons précontraints comme le montre la FIGURE 4.3b et, à une plus grande échelle, la ruine de l'ouvrage entier.

Dans le cas où le béton est placé dans un environnement agressif, il faut alors empêcher à tout prix une propagation des ions chlore et pour cela il existe deux grandes solutions. Ces dernières sont identiques à celles mises en place pour éviter la carbonatation, à savoir un enrobage suffisant et une porosité maximale fortement limitée. De la sorte, les chlorures ne pourront que très peu circuler dans le béton et ne pourront pas attaquer les barres d'armatures.

### Béton à base de M.I.O.M

Pour ce qui est de l'utilisation des M.I.O.M, bien que cela n'ait pas été abordé dans les SECTIONS 2.4 et 2.5, ils possèdent un taux en chlorures plus élevé que les granulats dits traditionnels<sup>2</sup>. Cette concentration qui, avant traitement, peut-être 2 à 10 fois plus en fonction du pays [Xuan et al., 2018]), ne peut être négligée. Néanmoins, leur effet est moindre comparé aux chlorures pénétrant et circulant dans le réseau capillaire puisque ceux-ci sont fixés dans la matrice cimentaire comme évoqué précédemment. Il faut malgré tout rester vigilant et une étude plus détaillée devra être menée, chose qui sera faite dans la PARTIE III.

Point de vue des propriétés physiques, celles-ci ont déjà été abordées longuement dans la SECTION 4.1 lors des discussions sur le transport par diffusion. Celles-ci ne seront donc pas ré-expliquées ici.

## 4.4 Gel/dégel

### Béton référence

Les cycles de Gel/Dégel sont courants dans les zones de hautes latitudes mais aussi dans les latitudes moyennes comme en Belgique, là où le climat est tempéré. Un béton subissant ces cycles peut s'affaiblir si aucune précaution n'avait été prise lors de sa conception [Courard, 2018, Courard, 2019, GBB, 2018, Pigeon, 1989].

En effet, l'eau présente dans le béton va geler ; or, elle est l'un des seuls éléments qui possède un volume plus important dans sa phase solide que dans sa phase liquide. Cette augmentation de volume ( $\approx 10\%$ ) entraîne des pressions internes qui, si elles n'ont pas été anticipées, peuvent amener à une explosion du béton (FIGURE 4.4a).

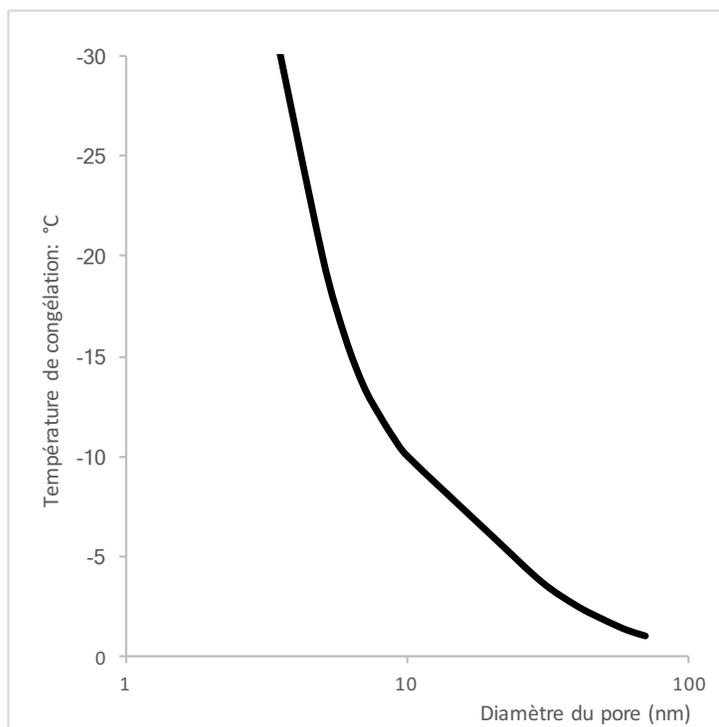
---

2. Pour éviter que ce taux ne soit trop important, des traitements doivent être mis en place [Rübner, 2006, Xuan et al., 2018].

Il faut cependant noter que dans les bétons, l'eau ne gèle pas de manière uniforme, pour une même température comme l'indique la FIGURE 4.4b.



(a) Photo de V. Grigore [Courard, 2019].



(b) Solidification de l'eau en fonction de la taille de pores [GGB, 2018].

FIGURE 4.4 – Dégradation du béton par cycle de Gel/Dégel et influence de la température.

Au plus les pores sont fins, au moins l'eau a tendance à geler rapidement. L'eau contenue dans les bétons aura donc tendance à geler dans un premier temps dans les pores de taille importante et dans un second temps, quand la température s'abaissera, dans les pores plus fins.

Ce phénomène a également donné naissance à certaines expressions comme : "*Geler à pierre fendre*". La porosité des pierres telles que les granits, le marbre, etc. étant très faible et les pores si fins, la température doit diminuer de manière drastique, bien en dessous des 0 °C avant que l'eau ne gèle.

Afin de préserver les bétons, deux solutions sont envisageables. La première, limiter la porosité et donc le rapport E/C. De cette façon le béton ne disposera que de capillaires très fins, l'eau ne pourra pas geler. La seconde, ajouter un entraîneur d'air. Les effets de ce dernier ont déjà été évoqués dans la SECTION 3.2 et ne seront donc pas ré-explicités ici.

### Béton à base de M.I.O.M

Une porosité limitée n'est pas la principale caractéristique des bétons à base de M.I.O.M, au contraire. Cependant, les mâchefers ont un effet analogue à celui des entraîneurs d'air. La réaction entre le ciment, l'eau et les grains d'aluminium va libérer de l'hydrogène. Ainsi, ces poches de gaz

vont permettre, si de l'eau venait à geler, à compenser l'augmentation de volume. Sur le long terme, les mâchefers ont donc un effet bénéfique vis-à-vis des cycles de gel/dégel [Keulen et al., 2016, Lynn et al., 2016, Park et al., 2016, van der Wegen et al., 2013].

Cet effet bénéfique n'est malgré tout possible que pour un taux de substitution relativement faible qui tourne autour des 20-30%. Au dessus de cela, la quantité d'eau absorbée est trop importante et son expansion de volume ne peut être contenue dans les vides, des fissures ou des explosions peuvent survenir.

Bien qu'il subsiste encore de nombreux problèmes de durabilité, les tests effectués au laboratoire se tourneront essentiellement vers les trois attaques décrites précédemment. La section suivante se consacrera aux autres attaques susceptibles de diminuer la longévité du béton mais elles ne seront pas étudiées en détail.

## 4.5 Autres

Malgré le fait qu'elles ne soient pas étudiées en profondeur, ces dernières ne peuvent être négligées pour assurer une longévité suffisante! Ci-dessous, une liste non-exhaustive de ces attaques [Courard, 2018, Courard, 2019, GBB, 2018] :

### ◇ Béton référence - RAS

Cette **R**éaction s'opère entre les **A**lcalis présents dans l'eau interstitielle et des **S**ilices contenues dans les granulats (RAS). Ensemble cela donne naissance à des produits expansifs. Cependant, avant d'arriver à ce stade, trois critères doivent être réunis. Les granulats doivent être suffisamment réactifs, la teneur en alcalis doit dépasser une certaine valeur pour initier la réaction et le béton doit se trouver dans un environnement humide (85%) à une température d'environ 20 ° C. Si ces trois critères venaient à s'assembler, les produits expansifs vont entraîner un gonflement du béton créant des fissures en surface et dans une moindre mesure, précipiter pour donner naissance à un gel blanc/ocre parfois brun/noir comme l'illustre la FIGURE 4.5.



FIGURE 4.5 – Attaque alcali-silice : Photo de M. Müller, Langesthal - Eupen [Courard, 2019].

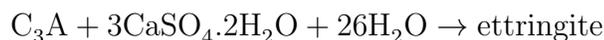
Afin d'éliminer le risque de voir naître cette attaque, la meilleure option est de choisir des granulats ayant une réactivité très faible ou de limiter la teneur en alcali en choisissant par exemple un ciment de type 'LA', présenté dans la SECTION 3.2.

### Béton à base de M.I.O.M :

Ces derniers possédant une grande quantité de silice qui plus est, ayant une réactivité importante, le risque de voir apparaître des fissures issues de réactions RAS est important [Rübner, 2006];

#### ◇ Béton référence - Sels et acides

Du sulfate par exemple,  $\text{SO}_4^{2+}$ , de l'environnement extérieur peut se combiner avec des cations pour former un sel. Par diffusion ou absorption capillaire, ce dernier est transporté à l'intérieur du béton et peut réagir avec divers constituants tels que la chaux nommée CH ou encore le  $\text{C}_3\text{A}$  (cfr. TABLE 3.1). Cela peut mener à la formation d'un produit plus volumique comme l'ettringite, la réaction est la suivante :



En limitant la quantité d'aluminate de calcium et donc en utilisant un ciment de type HSR (cfr. SECTION 3.2), cette formation d'ettringite secondaire est empêchée.

En diminuant la perméabilité, le même effet est constaté. En effet, les sels ne peuvent circuler à l'intérieur du béton et ne sont donc plus capables de réagir avec la portlandite. Pour ce faire, une des solutions est de diminuer le rapport E/C, chose démontrée à la FIGURE 4.6.

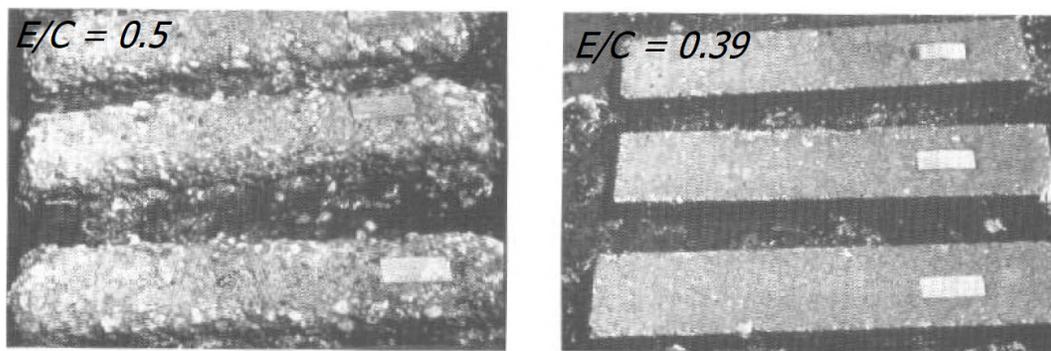


FIGURE 4.6 – Attaque aux sulafes et effet du rapport E/C [Courard, 2018].

### Béton à base de M.I.O.M :

Ces derniers ne permettant pas à court terme d'obtenir une perméabilité suffisamment faible, il est donc préférable d'utiliser un ciment type 'HSR'. Par ailleurs, les M.I.O.M contenant une quantité non négligeable de sulfate, le choix d'un ciment 'HSR' se renforce. Si ce choix n'était pas respecté, une quantité potentiellement importante d'ettringite serait formée ce qui entrainerait la formation de nombreuses fissures [Rübner, 2006];

#### ◇ Béton référence - Retrait

Ce dernier n'est pas vraiment une attaque à proprement parler ; mais plutôt une dégradation qui apparaît sous plusieurs formes : de retrait plastique, de dessiccation et d'auto-dessiccation

et pour finir, de retrait thermique. Les effets se combinent de façon à avoir un retrait total, tous ensemble, ils peuvent entraîner de grandes fissures permettant à des agents extérieurs agressifs de pénétrer au cœur du béton.

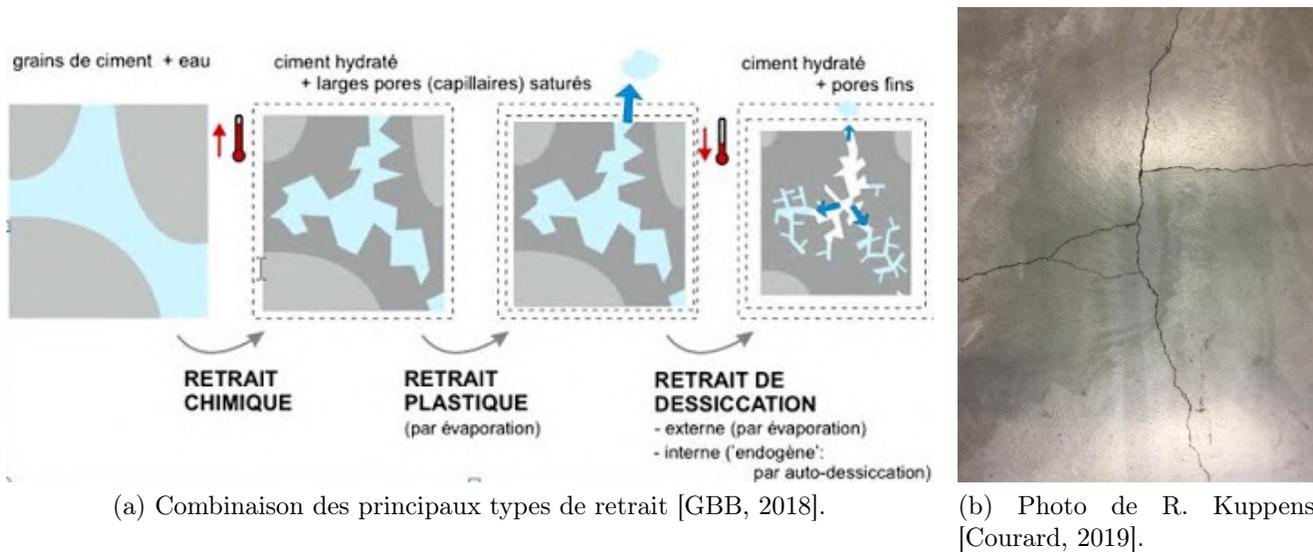


FIGURE 4.7 – Le retrait, différents types et exemple.

Limiter les effets du retrait s'avère plus complexe que précédemment car il n'existe pas une cure ou un composé pour tous les limiter.

Pour le retrait thermique par exemple, il est préconisé d'utiliser un ciment à faible chaleur d'hydratation. De cette façon, les gradients thermiques créés seront faibles et limiteront ce type de retrait. Le retrait par dessiccation est tout autre en revanche. Ce dernier est engendré par l'évaporation de l'eau n'ayant pu contribuer à la réaction d'hydratation. Lorsque les températures sont élevées, que le temps est sec et venteux, il est donc préconisé de venir couvrir les bétons afin d'empêcher l'eau de disparaître.

#### Béton à base de M.I.O.M :

L'ajout de granulats de mâchefers n'induit pas un comportement particulier au sein du béton par rapport au retrait. En revanche, le sable grossier de mâchefers vient considérablement l'augmenter. Pour seulement 20% de substitution du sable et des granulats fins, le retrait augmente de 40%. Le fluage, bien qu'il n'ait pas été évoqué auparavant, augmente lui, de 70% [van der Wegen et al., 2013]. Le retrait doit donc être anticipé dans le cas où du sable grossier de mâchefers est utilisé.

## 4.6 Conclusion

En guise de première conclusion, pour clôturer cette première partie qui ne concernait que "l'État de l'art" au sujet des M.I.O.M, des bétons et des bétons à base de M.I.O.M, plusieurs points peuvent être repris.

Tout d'abord, les mâchefers, moyennant quelques traitements sont une source potentiellement importante en granulats et/ou sable grossier. Ces traitements sont indispensables car s'ils ne sont pas réalisés correctement, des produits tels que des métaux lourds, pourront entraîner des dommages irréversibles au sein des bétons (production de gaz, attaque alcali-silice, etc.).

Le béton s'affiche aujourd'hui comme LE matériau. Néanmoins, sa production a montré certaines failles notamment en terme de pollution et c'est pourquoi il y a lieu de s'intéresser à des filières parallèles qui permettraient l'obtention d'un béton "vert". L'utilisation des mâchefers est l'une de ces filières !

Bien que certains problèmes de durabilité aient déjà été mis en avant suite à l'utilisation des M.I.O.M, les propriétés tant à l'état frais qu'à l'état durci des bétons à base de M.I.O.M semblent donner des résultats satisfaisants lorsque le taux de substitution est limité (compris entre 20% et 50% en fonction des attaques considérées) [Colleparidi et al., , Lynn et al., 2016, Park et al., 2016, van der Wegen et al., 2013].

Les deux parties suivantes vont maintenant tenter d'amener des valeurs chiffrées sur l'ensemble de ces faits. Mise en parallèle avec la littérature, ces parties permettront de répondre à la question de base qui est, il faut le rappeler :

*"Quel est le comportement en termes de durabilité et résistivité des bétons à base de M.I.O.M ?"*

Deuxième partie

Expérimentation

# Chapitre 5

## Matériaux utilisés pour la composition des bétons

Les quatre matériaux qui composent la base du béton ont déjà été évoqués dans la SECTION 3.2. Dans un premier temps, il est intéressant de se focaliser sur les propriétés physiques et/ou chimiques de ces quatre matériaux.

Ci-dessous, un bref descriptif pour chacun d'eux est réalisé et une attention toute particulière sera portée sur les granulats. En effet, dans le cas présent, ceux-ci sont de deux types, d'un côté, il y a les granulats concassés calcaires et de l'autre, les M.I.O.M.

Il est important de noter l'utilisation des abréviations suivantes pour certaines caractéristiques :

- ◇  $\rho_a$  : Masse volumique absolue ;
- ◇  $\rho_{rd}$  : Masse volumique réelle après séchage à l'étuve ;
- ◇  $\rho_{ssd}$  : Masse volumique réelle saturée à surface sèche ;
- ◇  $WA_{24}$  : Coefficient d'absorption d'eau après 24 Heures.

### 5.1 Ciment

Le ciment est le liant hydraulique utilisé dans la majorité des bétons "classiques". Celui qui est utilisé ici est un CEM I 52,5 N. Sa résistance, une fois mélangée à l'eau, au bout de 28 jours, doit être au minimum de 52,5 MPa. D'autres propriétés, notamment la masse volumique, peuvent être retrouvées dans la TABLE 5.1. Pour connaître l'ensemble des propriétés de ce produit, il faut se référer à l'ANNEXE C.

TABLE 5.1 – Caractéristiques du ciment CEM I 52,5 N (ANNEXE C).

Propriétés	Moyenne	Minimum	Maximum
Masse volumique ( $\text{kg/m}^3$ )	3100	-	-
Teneur en clinker K (%)	99	95	100
Résistance à 28 jours, $R_c$ (MPa)	64	52,5	-

## 5.2 Sable naturel

Conformément à la norme NBN EN 1097-6, trois essais d'absorption d'eau sur le sable ont été réalisés. Avant de détailler davantage les résultats obtenus, une précision s'impose sur ce qu'est un "granulat" saturé à surface sèche et pour cela, il faut se référer à la FIGURE 5.1. Comme il y est montré, les particules sont donc sèches en surface. Cependant, elles gardent une certaine cohésion entre elles. De cette façon, l'affaissement est presque total mais conserve tout de même un pic bien visible, le profil de la surface ne peut donc s'apparenter à une courbe.



FIGURE 5.1 – Sable naturel 0-4 mm saturé à surface sèche.

Au regard des valeurs présentes dans la TABLE 5.2, deux conclusions s'imposent. D'une part, les valeurs coïncident bien à celles qui peuvent être trouvées dans la littérature pour d'autres sables naturels du même type mais elles coïncident également avec la fiche technique du sable utilisé. Cette dernière peut être retrouvée dans l'ANNEXE D. D'autre part, la faible valeur d'absorption d'eau va induire un comportement particulier dans les bétons. En effet, l'interaction ne sera que très faible entre le sable et les autres constituants. Sa principale fonction est donc de compléter la courbe granulométrique comme il l'était évoqué dans la SECTION 3.2.

TABLE 5.2 – Caractéristiques du sable naturel 0-4.

Propriété	Moyenne	Écart-type
$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	2674	15,03
$\rho_{rd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2659	19,85
$\rho_{ssd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2664	18,00
$WA_{24}$ (%)	0,22	0,07
Teneur en eau (%)	0,21	0,01

La granulométrie s'est faite, quant à elle, sur base de deux échantillons de référence conformément à ce qui est prescrit dans la norme NBN EN 933-1 et NBN EN 933-2. Les résultats sont présentés à la FIGURE 5.2 et sont identiques à ceux retrouvés dans l'ANNEXE D.

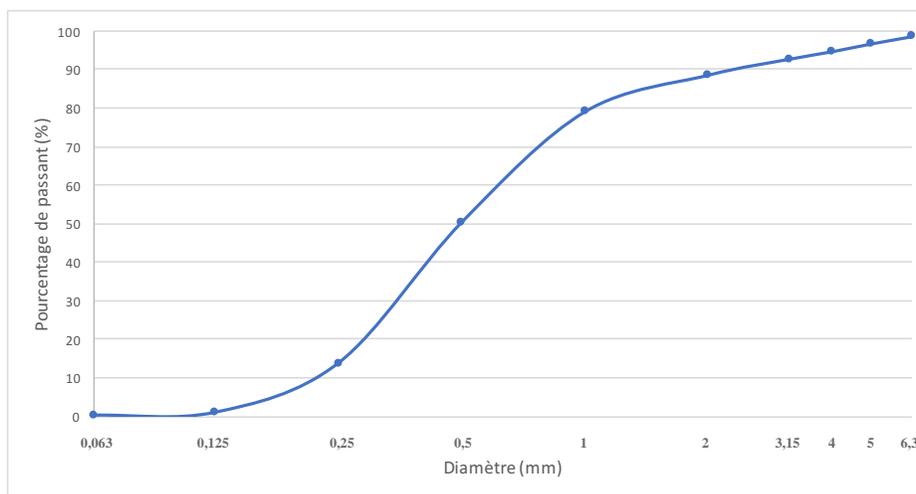


FIGURE 5.2 – Courbe granulométrique du sable naturel 0-4mm.

### 5.3 Granulats concassés calcaires

Les granulats constituent, en terme de pourcentage volumique mais aussi massique, la partie la plus importante du béton, il est donc primordiale de bien connaître leurs propriétés. Dans le cas présent, les granulats utilisés seront des granulats concassés calcaires appelés "CC". Suivi de cette abréviation, se trouvera le diamètre des grains. Ce dernier sera compris entre 2-7mm pour les grains plus fins et entre 7-14mm pour les grains ayant un calibre plus important.

Les différentes caractéristiques de ces deux types de granulats peuvent être retrouvées à la TABLE 5.3. Elles sont issues des fiches techniques des matériaux utilisés au laboratoire de l'université de Liège (ANNEXE E). Contrairement à ce qui avait été dit pour le sable naturel, les granulats participeront activement à la réaction d'hydratation. En effet, l'absorption d'eau, ici, est pratiquement 6 fois supérieure à celle retrouvée dans la TABLE 5.2 pour une teneur en eau sensiblement identique.

TABLE 5.3 – Caractéristiques des granulats concassés calcaires, CC.

Type	Propriété	Moyenne	Écart-type
CC 2-7mm	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	2590	-
	$WA_{24}$ (%)	1,24	-
	Teneur en eau (%)	0,34	0,01
CC 7-14mm	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	2630	-
	$WA_{24}$ (%)	1,11	-
	Teneur en eau (%)	0,31	0,01

Pour ce qui est de la granulométrie, les résultats utilisés ici sont issus d'une caractérisation des matériaux réalisée par Arthur Fanara dans le cadre de son travail de fin d'études [Fanara, 2020] conformément aux normes NBN EN 933-1 et NBN EN 933-2. Les résultats sont présentés aux FIGURES 5.3 et 5.4 et sont identiques à ceux retrouvés dans l'ANNEXE E.

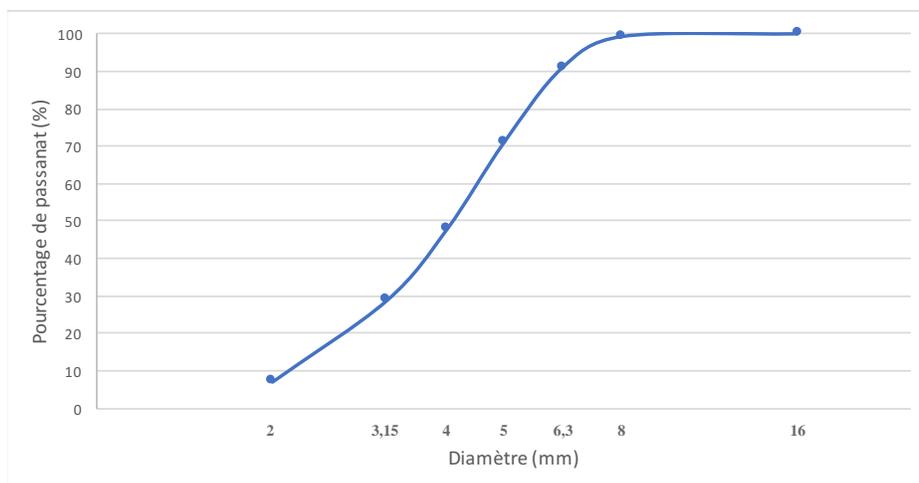


FIGURE 5.3 – Courbe granulométrique des granulats concassés calcaires 2-7mm.

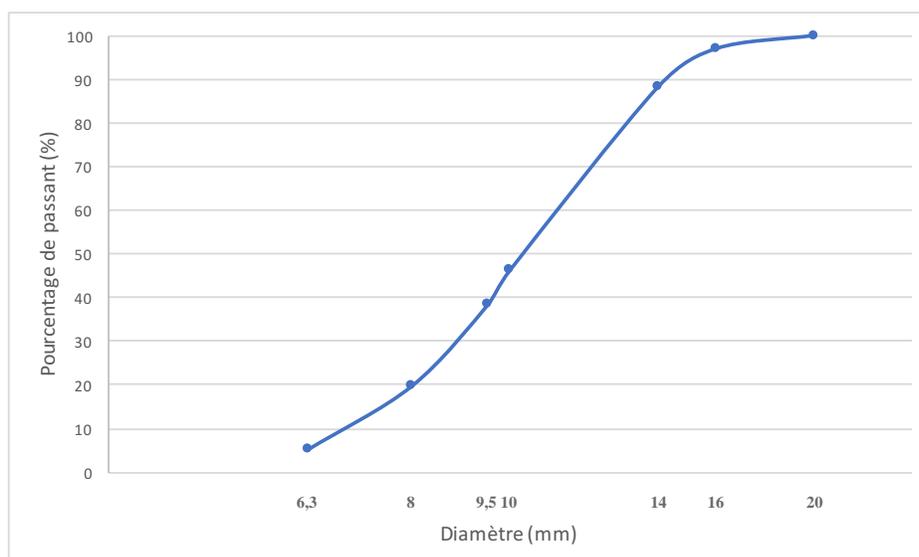


FIGURE 5.4 – Courbe granulométrique des granulats concassés calcaires 7-14mm.

## 5.4 M.I.O.M

Maintenant que les matériaux de base ont été détaillés, l'attention va se tourner sur les mâchefers. Ceux dont le laboratoire dispose sont des mâchefers issus du centre de valorisation des déchets de Thumaide en Belgique.

Pour ce qui est des propriétés chimiques, cela correspond donc aux valeur de la 2<sup>ème</sup> ligne de la TABLE 2.5. Néanmoins, en 22 ans, certaines modifications ont été apportées à ce centre comme l'ajout, en 2002, d'un système de récupération des métaux non-ferreux, permettant ainsi d'accroître la qualité des M.I.O.M valorisables tout en maximisant la quantité de matériaux recyclables [Delbar, 2018]. Les valeurs retrouvées dans la TABLE 2.5 ont donc quelque peu changé au fil des

années suite aux différentes méthodes de traitement qui leur sont appliquées. Les valeurs moyennes de la TABLE 2.5 permettent donc de réaliser une bonne approximation de la composition finale des M.I.O.M utilisés.

Il est également intéressant de parler plus en détail du traitement post-incinération que les mâchefers ont subi. Dans la SECTION 2.4, des généralités avaient été évoquées concernant le traitement que les mâchefers recevaient après incinération. Maintenant que la provenance de ceux-ci est connue et a été abordée, des précisions peuvent être faites [Delbar, 2018] :

1. Les mâchefers avec un diamètre supérieur à 100mm nécessitent un broyage trop important et sont donc écartés du circuit pour être valorisés d'une autre manière ;
2. Si les mâchefers ont une taille inférieure à 20mm, ils ne requièrent pas de criblage supplémentaire, pour ceux compris entre 20 et 100mm, ceux-ci sont concassés à un diamètre maximum de 20mm ;
3. Grâce à un électro-aimant, les mâchefers se voient dépossédés des métaux ferreux et, par la suite, un courant de Foucault permet l'extraction des métaux non-ferreux tels que le laiton, le cuivre et l'aluminium ;
4. Pour finir, un vieillissement dans un hall de maturation pendant 18 semaines est réalisé. De cette façon, les propriétés chimiques et physiques des mâchefers se stabilisent pour permettre leur utilisation en tant que matériaux de construction.

À noter, bien que de nombreux procédés soient mis en place afin d'acquérir des mâchefers d'une qualité très haute, la présence, en faible quantité, de métaux lourds ferreux et non-ferreux est inévitable comme l'a prouvé la FIGURE 2.5.

Les propriétés chimiques étant connues, il faut maintenant se tourner vers les propriétés physiques. Comme précédemment, divers essais de caractérisation ont été réalisés. Les valeurs obtenues seront brièvement comparées à celles de la SECTION 2.7.

Avant cela, une précision s'impose tout de même concernant les différentes tailles de mâchefers utilisés. Pour ce qui est du sable grossier de mâchefers, le diamètre des grains oscillera entre 0 et 6mm tandis que pour les particules plus grossières, les granulats de mâchefers, celui-ci oscillera entre 6 et 14mm. Ces derniers seront respectivement appelés M.I.O.M 0-6 et M.I.O.M 6-14.

Les premières valeurs intéressantes sur lesquelles il faut s'attarder sont bien évidemment les résultats d'essais d'absorption qui peuvent être obtenus via la norme NBN EN 1097-6 comme cela a été fait pour le sable naturel. À cela peut également s'ajouter la teneur en eau naturelle ainsi que les résultats des essais micro-Deval (NBN EN 1097-1). Le tout peut se résumer dans la TABLE 5.4.

À noter que le dernier essai réalisé, l'essai Micro-Deval, n'utilise pour la fraction 0-6mm de M.I.O.M qu'une fraction plus grossière, 2-6mm. En effet, après essais, les particules sont passées dans un tamis de 1,6mm. Seulement celles possédant un diamètre supérieur sont conservées, prendre des particules trop fines viendraient donc, complètement fausser les résultats.

Ceci étant dit, l'essai permet l'obtention d'un coefficient  $M_{DE}$ , le coefficient micro-Deval. Ce dernier traduit la résistance à l'abrasion des particules. Au plus le coefficient est important, au plus les particules sont susceptibles de se dégrader et de se détériorer sous l'action d'une contrainte

comme mentionné dans la SECTION 2.7.

Dans cette table sont également reprises, les valeurs approximatives et moyennes retrouvées dans la littérature et évoquées dans la SECTION 2.7. Les valeurs obtenues pour les essais d'absorption sont un peu supérieures, néanmoins, les autres valeurs sont concordantes. Au final, elles pourront donc être utilisées pour la confection des bétons.

TABLE 5.4 – Caractéristiques des M.I.O.M et comparaison avec la littérature.

Type	Propriété	Moyenne	Écart-type	Littérature
M.I.O.M 0-6	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	2540	95,04	2200-2500
	$\rho_{rd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1905	69,14	1640
	$\rho_{ssd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2155	66,92	1880
	$WA_{24}$ (%)	13,14	1,08	10-20
	Teneur en eau (%)	6,93	0,10	-
	$M_{DE}$ (%)	40,53	1,60	45
M.I.O.M 6-14	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	2578	2,49	2200-2500
	$\rho_{rd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2233	28,09	2340
	$\rho_{ssd}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2367	16,69	2480
	$WA_{24}$ (%)	6,00	0,59	2-10
	Teneur en eau (%)	1,99	0,08	-
	$M_{DE}$ (%)	13,13	1,98	15

La dernière caractéristique mécanique indispensable pour composer les futurs bétons est la granulométrie. Cette dernière peut se retrouver aux FIGURES 5.5 et 5.6 respectivement pour les sable grossier de mâchefers et les granulats de mâchefers.

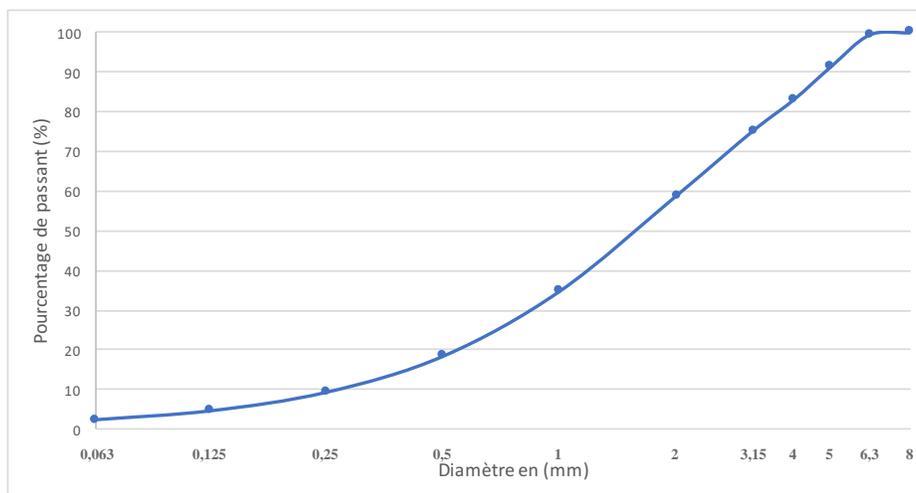


FIGURE 5.5 – Courbe granulométrique des M.I.O.M 0-6mm.

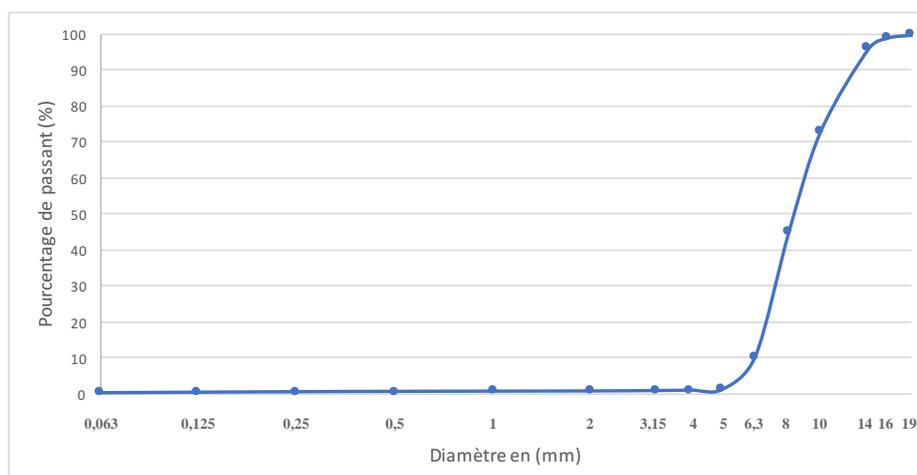


FIGURE 5.6 – Courbe granulométrique des M.I.O.M 6-14mm.

## 5.5 Comparaison des propriétés

La comparaison des propriétés est intéressante afin de comprendre les différents phénomènes qui pourront être rencontrés pendant et après la confection des bétons. Pour cela, il faut comparer les propriétés des matériaux qui substituent à savoir les mâchefers, et les propriétés des matériaux qui sont substitués à savoir le sable naturel et les granulats concassés. Pour ce faire, les TABLES 5.2 à 5.4 vont être utilisées et, pour plus de clarté, les paramètres comparés sont synthétisés dans la TABLE 5.5.

À noter, la masse volumique saturée,  $\rho_{sature}$ , est obtenue en ajoutant à la masse volumique absolue, l'eau totale absorbée et en retirant la teneur en eau déjà présente.

TABLE 5.5 – Comparaison des caractéristiques des différents matériaux.

Propriété	SN 0-4	CC 2-7	M.I.O.M 0-6	CC 7-14	M.I.O.M 6-14
$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	2674	2590	2540	2630	2578
$WA_{24}$ (%)	0,22	1,24	13,14	1,11	6,00
Teneur en eau (%)	0,21	0,34	6,93	0,31	1,99
$\rho_{sature}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2674	2613	2698	2651	2681

Cette comparaison va s'articuler autour de trois grands points. Dans un premier temps, les masses volumiques des différents matériaux, dans un second temps, le comportement qu'ils ont vis-à-vis de l'eau et pour finir les granulométries.

Comme le montre la TABLE 5.5, une substitution des CC 7-14 par des particules de M.I.O.M 6-14 devrait donner lieu à une masse volumique plus faible. Cette masse sera d'autant plus faible que le pourcentage de CC substitués est important. Cette différence est également visible pour une substitution des SN 0-4 et CC 2-7 par des M.I.O.M 0-6 et, elle est encore plus prononcée. En effet, la différence entre le SN 0-4, qui est le constituant principal en terme de granulats fins (cfr. CHAPITRE 6) et les M.I.O.M 0-6 est plus importante que la différence entre les CC 7-14 et les M.I.O.M 6-14.

Dès lors, à substitution égale en sable grossier de mâchefers ou en granulats de mâchefers, pour deux bétons distincts, la masse volumique sera plus faible dans le béton contenant un pourcentage de sable grossier de mâchefers que dans un béton contenant un pourcentage de granulats de mâchefers [van der Wegen et al., 2013].

L'utilisation du conditionnel est importante. Effet, il ne s'agit ici que d'une hypothèse car la masse volumique va également dépendre du taux de compactage et de la pré-saturation ou non des particules. Si celles-ci sont pré-saturées en eau, la différence entre les masses volumiques diminue et la proportion de chaque constituant pourra faire basculer la balance d'un côté ou d'un autre. Au final, cela rejoint donc les propos tenus dans la SECTION 3.5.

À quantité d'eau égale, le rapport E/C efficace est inférieur suite à l'utilisation de M.I.O.M car ils absorbent beaucoup plus que les autres matériaux. Ce rapport est d'autant plus petit que les particules de mâchefers utilisées sont petites. Une substitution totale des CC et du SN donnera donc lieu à un rapport E/C efficace très faible si une même quantité d'eau est conservée [van der Wegen et al., 2013]. Cela donnera donc lieu à une ouvrabilité faible et à un affaissement quasiment nul (cfr. SECTION 3.6).

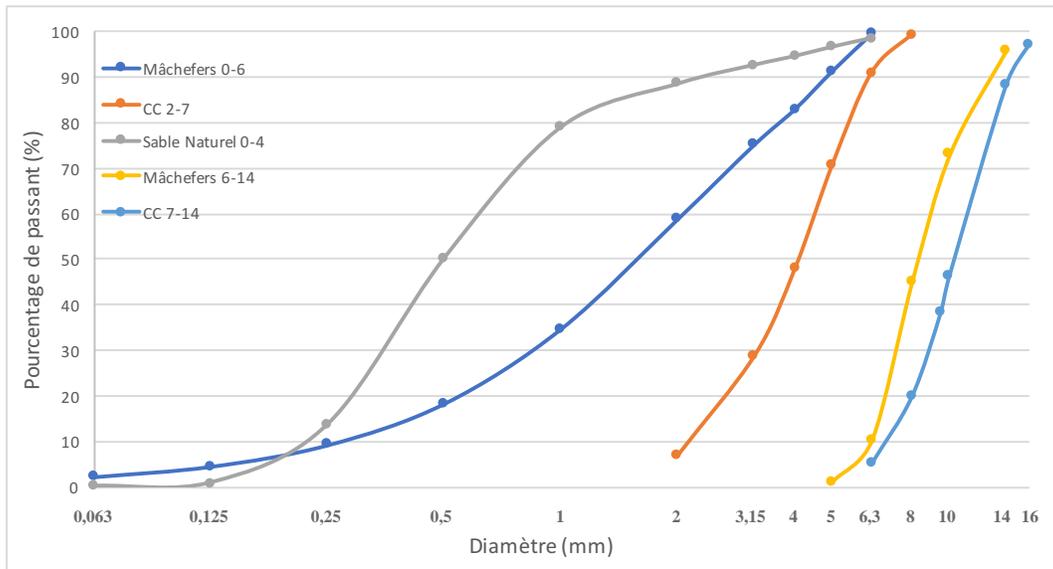


FIGURE 5.7 – Comparaison des granulométries entre les granulats concassés, les mâchefers et le sable naturel.

Au regard de la FIGURE 5.7, il est possible de comparer les granulométries. Les M.I.O.M 0-6 ont une granulométrie plus grossière que le sable naturel mais plus fines que les granulats concassés calcaires 2-7. Comme le CHAPITRE 6 le montrera, le sable naturel sera bien plus présent que les CC 2-7 que ce soit en terme de volume qu'en terme de masse. Dès lors, une substitution du sable naturel et des CC 2-7 par des M.I.O.M 0-6 amènera des bétons moins compacts. Cette diminution de compacité est importante car elle peut engendrer une augmentation de la porosité, une diminution de résistance, de masse volumique, etc.

Pour les particules grossières, les courbes granulométriques entre les M.I.O.M 6-14 et les CC 7-14 coïncident déjà bien plus. À l'inverse des M.I.O.M 0-6 vis-à-vis des CC 2-7, les mâchefers sont, ici, moins grossiers que les granulats de base. En théorie, cela permettrait la production de bétons plus

compacts. Cependant, il ne faut pas oublier la forme anguleuse des mâchefers (cfr. SECTION 3.4.2).

Au final, une substitution par des mâchefers amène à des propriétés bien distinctes qui ont déjà été discutées lors dans la SECTION 3.5. Il faudra, lors de l'analyse des résultats, bien garder à l'esprit ces divergences et, en fonction du taux de substitution qui est appliqué, en tirer des conclusions.

# Chapitre 6

## Composition et réalisation des bétons

Il est maintenant temps d'aborder le cœur du problème, les bétons à base de M.I.O.M. Dans la TABLE 6.1 seront énumérés les différents bétons réalisés ainsi que les substitutions qui leurs ont été appliquées. Néanmoins, avant de tourner son intérêt sur cette table, une petite précision s'avère nécessaire quant aux abréviations utilisées. La première est la même pour tous les bétons, il s'agit de BL pour "Béton Louis". À cela s'ajoute deux lettres :

- ◇ G : Granulats de mâchefers. Cela représente les particules de granulats concassés calcaires, CC 7-14mm qui seront remplacées par des M.I.O.M 6-14mm ;
- ◇ S : Sable grossier de mâchefers. Cela représente le sable naturel 0-4mm et les granulats concassés calcaires, CC 2-7mm qui seront remplacées par des M.I.O.M 0-6mm.

Le chiffre suivant la lettre représente quant à lui le taux de substitution qui a été appliqué sur la composition des mélanges.

TABLE 6.1 – Abréviations utilisées pour les différents bétons réalisés.

Abréviations utilisées	Substitution réalisée
BL G0 S0	0% de granulats de mâchefers et 0% de sable grossier de mâchefers
BL G30 S0	30% de granulats de mâchefers et 0% de sable grossier de mâchefers
BL G50 S0	50% de granulats de mâchefers et 0% de sable grossier de mâchefers
BL G100 S0	100% de granulats de mâchefers et 0% de sable grossier de mâchefers
BL G0 S30	0% de granulats de mâchefers et 30% de sable grossier de mâchefers
BL G30 S30	30% de granulats de mâchefers et 30% de sable grossier de mâchefers
BL G100 S30	100% de granulats de mâchefers et 30% de sable grossier de mâchefers
BL G100 S100	100% de granulats de mâchefers et 100% de sable grossier de mâchefers

Une première phase sera d'abord réalisée sur les particules grossières du mélange avec quatre compositions ayant un taux de M.I.O.M de plus en plus important allant de 0 à 100%. Le premier béton servira également de béton de référence puisqu'il ne contiendra aucune trace de mâchefer. Par la suite, une deuxième phase verra le jour en introduisant du sable grossier de mâchefers. Un premier béton sera réalisé dans le but de comparer l'influence du sable grossier de mâchefers seul sur le béton. Cependant, cette situation n'est que peu réaliste et c'est pourquoi des particules plus grossières de mâchefers seront introduites sur les 3 dernières compositions pour, au final, obtenir un béton fait exclusivement de ciment, d'eau et de mâchefers retirant ainsi toute présence de granulats concassés calcaires et de sable naturel.

## 6.1 Variation du pourcentage de M.I.O.M

L'objectif est d'obtenir ici un béton non armé C30/37 de classe S3. Grâce à l'ANNEXE F, sachant que le diamètre maximum atteint les 14mm et que la consistance est plastique, il est possible de retirer une compacité égale à 0,82. Cette dernière doit être imputée d'un coefficient 0,01 car il s'agit de sable roulé et de gravillon concassé, ce qui amène à une compacité totale de 0,81. En fixant le rapport E/C efficace à 0,5, il est possible de déterminer le volume total de particules solides grâce à l'ÉQUATION 6.1. De cette valeur peut être déduit le volume de sable+granulats, ce dernier vaut au final 70,4% du volume total.

$$\gamma = \frac{(V_s + V_g + V_c)}{1000} \iff \gamma * 1000 - V_c = V_s + V_g \quad (6.1)$$

- ◇  $V_s$  : Volume de sable ;
- ◇  $V_g$  : Volume de granulats ;
- ◇  $V_c$  : Volume de ciment ;
- ◇  $\gamma$  : Compacité

Il faut ensuite connaître les proportions de sable et de granulats et pour cela, la méthode de Dreux-Gorisse qui se base sur les courbes granulométriques a été préconisée. Une fois les coordonnées des différents points connues (cfr. [Courard, 2018, GBB, 2018]), les intersections sont connues. En se référant à la FIGURE 6.1, les proportions suivantes ressortent : 38%, 10% et 52% respectivement pour SN 0-4, CC 2-7 et CC 7-14.

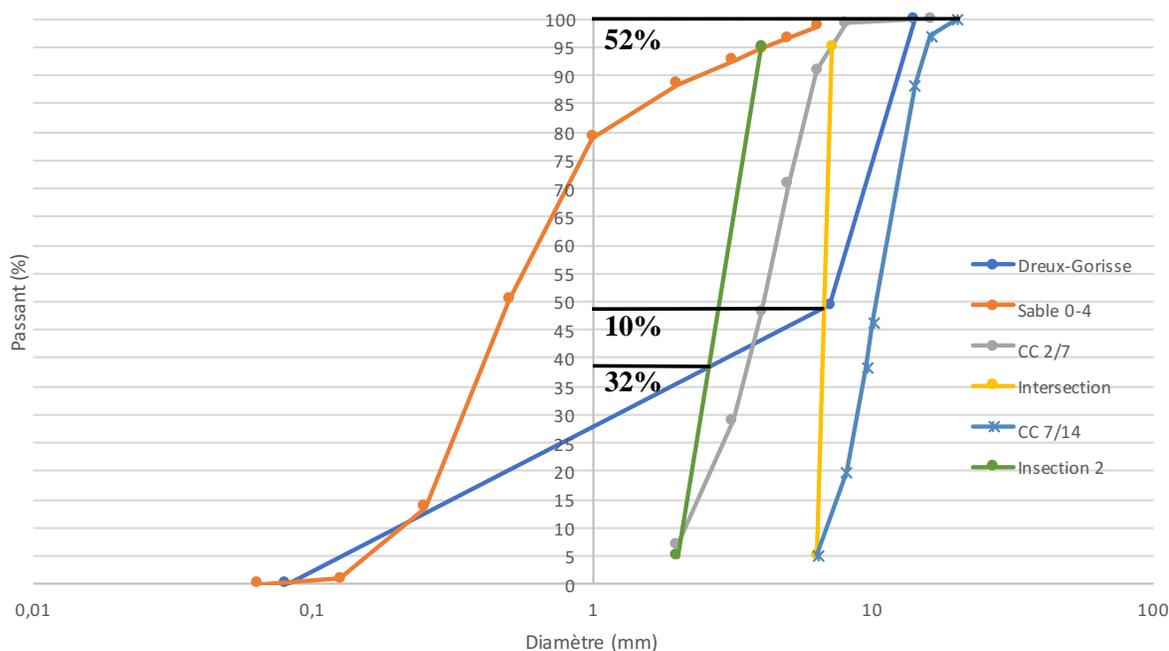


FIGURE 6.1 – Analyse granulométrique via la méthode de Dreux-Gorisse.

Sur base des masses volumiques présentées dans le CHAPITRE 5, les masses des différents matériaux sont finalement obtenues. Par la suite, les substitutions adéquates sont réalisées pour produire les

bétons présentés dans la TABLE 6.1. Il faut préciser ici qu'il s'agit d'une substitution volumique et non massique. La raison ? Les masses volumiques des M.I.O.M par rapport aux granulats concassés et au sable étant si différentes, que cette dernière est préférée [Andrade et al., 2007].

Il est important de noter que le rapport E/C efficace est gardé constant. Il faut donc, pour chaque composé, soustraire la teneur en eau initiale mais également ajouter la quantité d'eau qui sera absorbée,  $WA_{24}$ .

TABLE 6.2 – Composition des bétons à base de granulats de mâchefers pour  $1\text{m}^3$ .

	BL G0 S0	BL G30 S0	BL G50 S0	BL G100 S0
CEM I 52,5 N (kg)	320	320	320	320
Eau efficace (kg)	160	160	160	160
Eau absorbée (kg)	175	189	197	219
E/C efficace	0,5	0,5	0,5	0,5
E/C total	0,55	0,59	0,62	0,69
Sable 0-4mm (kg)	703	703	703	703
CC 2-7mm (kg)	182	182	182	182
CC 7-14mm (kg)	963	674	482	0
M.I.O.M 6-14 (kg)	0	264	440	879
% de SP/CEM I 52,5	0,6	0,6	0,6	0,7
Total (kg)	2344	2332	2324	2305

Au final, les quatre premières compositions sont présentées à la TABLE 6.2. De cette table, plusieurs observations peuvent être tirées. La première, la masse volumique diminue à mesure que les bétons contiennent plus de M.I.O.M, chose qui avait été mentionnée dans la SECTION 5.5. La seconde, la quantité d'eau totale augmente au plus la concentration de M.I.O.M augmente. Cela est dû, à l'absorption d'eau beaucoup plus importante dans les mâchefers que dans les granulats concassés calcaires. Pour finir, bien que cela soit l'objet de la SECTION 8.1 et que les résultats sont beaucoup plus significatifs dans la TABLE 6.3, il peut déjà être noté la tendance suivante : la quantité de Superplastifiant nécessaire à un affaissement de type S3 est plus importante en présence de M.I.O.M que pour le béton de référence. Ceci confirme également ce qui avait été avancé précédemment (cfr. SECTION 3.5).

## 6.2 Introduction d'un pourcentage de sable grossier de mâchefers

Sur base du même principe que la substitution des granulats de mâchefers, une substitution par du sable grossier de mâchefers est réalisée. Par la suite, il est possible d'obtenir la TABLE 6.3 qui reprend les proportions des différents constituants du béton pour  $1\text{m}^3$ .

Les observations faites précédemment sont également valables lors de l'utilisation de sable grossier de mâchefers et elles le sont d'autant plus que leur masse volumique est faible et que leur absorption d'eau est importante. En effet, comme l'a montré la SECTION 5.5, la masse volumique du sable

TABLE 6.3 – Composition des bétons à base de granulats de mâchefers et de sable grossier de mâchefers pour  $1\text{m}^3$ .

	BL G0 S30	BL G30 S30	BL G100 S30	BL G100 S100
CEM I 52,5 N (kg)	320	320	320	320
Eau efficace (kg)	160	160	160	160
Eau totale (kg)	199	212	243	299
E/C efficace	0,5	0,5	0,5	0,5
E/C total	0,62	0,66	0,76	0,93
Sable 0-4mm (kg)	492	492	492	0
CC 2-7mm (kg)	127	127	127	0
CC 7-14mm (kg)	963	674	0	0
M.I.O.M 0-6 (kg)	192	192	192	641
M.I.O.M 6-14 (kg)	0	264	879	879
% de SP/CEM I 52,5	1,22	1,11	1,22	4,22
Total (kg)	2295	2283	2255	2140

grossier de mâchefers est plus faible que celle des granulats de mâchefers et, *a contrario*, leur coefficient d'absorption d'eau,  $WA_{24}$ , est plus important. Au regard des TABLES 6.2 et 6.3, ces phénomènes se font bien ressentir. La masse volumique finale des bétons est plus faible mais il faut introduire une quantité d'eau totale plus grande pour conserver le même rapport E/C efficace.

### 6.3 Procédure de réalisation

La procédure de réalisation est très importante car elle peut influencer de nombreux paramètres comme le compactage, le temps de prise, une éventuelle ségrégation, etc. Ci-dessous sont énumérées les différentes étapes de réalisation :

- ◇ **Préparation des composants et des moules** : Chaque composé est pesé et placé dans un seau. Si des mâchefers sont présents dans la composition, ceux-ci sont pré-saturés 24 heures à l'avance avec une partie de l'eau totale. De cette façon, lorsqu'ils seront introduits dans le mélange, ils n'absorberont pas toute l'eau nécessaire à l'hydratation. Les moules, quant à eux, sont lubrifiés. De cette façon, les éprouvettes en béton n'adhéreront pas à la surface et, lors du démoulage, elles glisseront aisément le long des parois ;
- ◇ **Réalisation du béton** : Celle-ci se déroule en plusieurs étapes en utilisant la bétonneuse visible à la FIGURE 6.2 :
  1. Humidifier les parois de la bétonneuse (cfr. FIGURE 6.2), de la brouette et de tous les composants qui seront en contact avec le béton (cône d'Abrams, aéromètre, truelle, etc.) ;
  2. Ajout du sable et des granulats et malaxage pendant 30 secondes ;
  3. Ajout de la moitié de l'eau et malaxage pendant 120 secondes suivi d'un repos de 120 secondes ;
  4. Ajout de l'autre moitié de ciment et malaxage pendant 30 secondes ;

5. Ajout de l'autre moitié d'eau et malaxage jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène.



FIGURE 6.2 – Bétonneuse utilisée au laboratoire de l'université de Liège pour réaliser de gros volumes.

- ◇ **Ajout de Superplastifiant** : Afin d'obtenir un béton de classe S3, l'affaissement au cône d'Abrams doit être compris entre 10 et 15cm. Si le béton est trop compact, du superplastifiant (cfr. SECTION 3.2) est ajouté au béton qui est à nouveau mélangé. Cet ajout se fait par 20, 50 ou 100gr en fonction de l'aspect du béton, de sa fluidité mais aussi de la quantité ajoutée lors de la réalisation du béton précédent. Le superplastifiant étant ajouté au fur et à mesure et de manière non prévisible, la quantité d'eau qu'il apporte n'a pas été prise en compte dans les TABLES 6.2 et 6.3. De ce fait, la quantité d'eau réelle au sein des différentes compositions est très légèrement supérieure à celle annoncée ;
- ◇ **Mesure de l'affaissement** : Conformément à la SECTION 7.1.1, grâce au cône d'Abrams, l'affaissement est mesuré. S'il n'est suffisant, l'étape précédente est réitérée et une nouvelle mesure est prise après malaxage ;
- ◇ **Mesure de la teneur en air** : Conformément à la SECTION 7.1.2, grâce à un manomètre, la teneur en air est mesurée ;
- ◇ **Vibration et réalisation des échantillons** : La vibration est réalisée à l'aide de la table vibrante, les moules, préalablement lubrifiés, sont ensuite remplis en trois couches :
  - a) 3 cubes de 150x150x150mm ou 4 cylindres de 160x320mm pour les essais en compression à 28 jours ;

- b) 2 cylindres 150x300mm pour les essais de perméabilité à l'oxygène et à la diffusion forcée d'ions chlore ;
  - c) 3 prismes 100x100x400mm pour les essais de carbonatation, de gel/dégel, et d'absorption capillaire ;
  - d) Un dernier cylindre 160x320mm est utilisé pour ne pas jeter les éventuels restes.
- ◇ **Démoulage** : *In fine*, 24 heures après que les bétons aient été coulés, ils sont démoulés. Le résultat, lorsque tous les échantillons ont été démoulés, est présenté à la FIGURE 6.3.



FIGURE 6.3 – Ensemble des échantillons pour la composition BL G0 S30.

# Chapitre 7

## Essais réalisés sur des bétons à base de M.I.O.M

Les essais qui seront réalisés, s'articuleront autour de deux grands axes, celui du béton à l'état frais et celui du béton à l'état durci. L'ensemble des essais permettra d'évoquer les différentes pistes d'utilisation des bétons à base de M.I.O.M. Ils permettront également de mettre avant les problèmes de durabilité. Ce faisant, un taux optimal de M.I.O.M sera évoqué.

Il faut noter que toutes les normes utilisées sont synthétisées dans la PARTIE IV, ANNEXE A.

### 7.1 Sur béton à l'état frais

Les propriétés du béton à l'état frais permettent de donner des informations sur les mises en place qu'il est possible de réaliser. Ces propriétés pourront également se retrouver à l'état durci et c'est pourquoi, dans l'objectif d'assurer une bonne durabilité, il faut s'y intéresser.

#### 7.1.1 Affaissement

##### Objectif

L'objectif est de déterminer l'affaissement du béton. Ici, la classe S3 est souhaitée ce qui signifie qu'il doit être compris entre 10 et 15cm. La mesure de l'affaissement est très intéressante car elle donne une idée sur l'ouvrabilité du béton réalisé comme évoqué dans la SECTION 3.5.

##### Mode opératoire

La norme NBN EN 12350-2 sera utilisée pour déterminer l'affaissement. Dans un premier temps, le cône d'Abrams sera humidifié, de cette façon, il n'y aura aucune adhérence entre les parois et le béton. Ensuite, il sera rempli en trois couches successives. Entre chacune de ces couches, le béton sera piqué au moyen d'une tige de piquage, vingt-cinq fois. Ce piquage est indispensable car il permet d'assurer la bonne homogénéité du béton à l'intérieur du cône. Une fois cette étape réalisée, il faut retirer rapidement le cône et, au moyen d'une règle, mesurer la différence de hauteur entre la hauteur originale et le point le plus haut du béton affaissé.

La FIGURE 7.1 représente l'affaissement du béton BL G100 S0 mesuré à 13cm.



FIGURE 7.1 – Mesure de l’affaissement via le cône d’Abrams pour le BL G100 S0.

## 7.1.2 Teneur en air

### Objectif

Sur base de la norme NBN EN 12350-7, l’objectif ici, sera de mesurer le pourcentage d’air que contient le mélange. Ce pourcentage est important car il reflète directement la porosité totale du béton. En effet, celui-ci n’étant pas encore solide, l’entièreté de l’air présent en son sein peut-être mesuré.

La connaissance de la porosité est importante. Si celle-ci est trop grande, elle permet à de nombreuses attaques de se développer comme expliqué dans le CHAPITRE 4.

### Mode opératoire

Une fois que l’affaissement est suffisant, une certaine quantité de béton vient remplir l’aéromètre présenté à la FIGURE 7.2. Le remplissage s’opère à nouveau en trois couches afin de maximiser le compactage et limiter les poches d’air. Entre chaque couche, une aiguille de piquage est utilisée vingt-cinq fois. Cette dernière s’accompagne de coups de maillet sur le côté de l’aéromètre afin d’éliminer les bulles d’air à la surface et les traces de l’aiguille de piquage.

Une fois l’aéromètre plein, il faut le fermer à l’aide de la partie supérieure, visible à la FIGURE 7.2. Par la suite de l’eau est injecté et la pression est stabilisée sur la pression initiale grâce la pompe. Pour finir, en appuyant sur le bouton vert, la soupape principale s’ouvre et la teneur en air peut être lue sur le cadran.



FIGURE 7.2 – Aéromètre : appareil de mesure pour la teneur en air.

### 7.1.3 Masse volumique

#### Objectif

Une première évaluation de la masse volumique est réalisée sur béton frais. Celle-ci sera appuyée par la masse volumique à l'état durci conformément à la norme NBN EN 12350-6. L'objectif est d'obtenir une première estimation de la masse volumique. Sa valeur est capitale ! Si elle est trop basse, cela peut refléter une trop grande teneur en air, une mauvaise compacité et, amener à une résistance à la compression trop faible.

#### Mode opératoire

Les moules cubiques ou cylindriques sont pesés à vide puis une seconde fois lorsqu'ils ont été remplis de béton. En connaissant le volume de chacun des échantillons et la masse totale de béton introduite, il est possible d'en tirer la masse volumique. Pour évaluer si de l'eau de gâchage s'est évaporée, les échantillons démoulés et durcis sont pesés une nouvelle fois, et les valeurs obtenues sont comparées à la différence de masse effectuée 24 heures auparavant. Si elles sont similaires, aucune eau ne s'est évaporée et la masse volumique est obtenue.

Il faut noter que trois tests au minimum sont réalisés pour pallier à un éventuel mauvais remplissage d'un des moules, un mauvais compactage, etc.

## 7.2 Sur béton à l'état durci

Une fois démoulés, les échantillons sont placés dans une chambre humide pendant 28 jours, cette période est appelée la cure du béton. Durant celle-ci, il acquerra ses propriétés chimiques et physiques.

La cure terminée, les tests détaillés ci-dessous seront réalisés afin de lever le voile qui plane au dessus du comportement des mâchefers au sein des bétons.

### 7.2.1 Compression à 28 jours

#### Objectif

Sur base des normes NBN EN 12390-3 & 4, la résistance en compression à 28 jours va pouvoir être mesurée. Cette résistance est l'un des critères essentiels à la durabilité du béton. En effet, ce dernier doit généralement reprendre de lourdes charges, dynamiques ou ponctuelles. Sans cette résistance, le béton se détériorerait directement.

#### Préparation des échantillons

La préparation des échantillons est des plus simples. Lorsque les essais sont réalisés sur des cubes, ceux-ci ont une dimension standard de 150x150x150mm. Après 28 jours en chambre humide, les cubes peuvent directement être utilisés. Des essais sur cylindres de 160x320mm demandent quant à eux, une plus grande préparation car rien ne permet d'affirmer la condition suivante : 2 faces parfaitement lisses et parallèles. Il faut donc venir polir les deux extrémités comme cela est montré à la FIGURE 7.3. Cette opération faite, les essais peuvent débuter.



FIGURE 7.3 – Polissage des surfaces pour un cylindre de 160x320mm.

### Mode opératoire

Si le matériel est à disposition, les essais sont très simples et rapides à effectuer. Néanmoins, avant de compresser les échantillons, deux mesures de vérifications doivent être prises. La masse, et la surface. La seconde est d'autant plus importante car c'est elle qui va conditionner la force à exercer. Si la surface est très importante la force pour une même contrainte devra être bien plus importante également.



FIGURE 7.4 – Essai de compression réalisé sur un cube de 150mm de côté [Canteneur, ].

Une fois ces mesures prises, l'échantillon est calé et la presse vient le comprimer comme le montre la FIGURE 7.4. Ensuite la force mesurée lors de la rupture de l'échantillon est convertie à l'aide de l'ÉQUATION 7.1.

$$\sigma = \frac{F}{A} \left( \frac{N}{mm^2} \right) \quad (7.1)$$

Il faut noter que la forme de l'échantillon joue beaucoup sur la résistance finale. Le cylindre étant plus élancé que le cube, la résistance obtenue sur ce dernier est généralement plus faible<sup>1</sup>. Un facteur d'équivalence doit donc être utilisé et pour cela, la table 3 du document suivant sera employée : [Bavelard & Beinish, 2006].

Au final, afin d'avoir l'équivalence entre cylindre et cube, il faudra multiplier les résistances en compression sur cube par un facteur de 0,925. Ce facteur prend ainsi en compte les dimensions du cube, les dimensions du cylindre mais aussi la durée de séchage dont a bénéficié l'échantillon.

## 7.2.2 Absorption d'eau par remontée capillaire

### Objectif

L'objectif est d'étudier la capacité d'absorption des différents bétons, et ce, grâce au réseau capillaire qui s'est développé. À cette fin, différentes masses seront prises à des temps bien définis. Cela donnera une idée de la porosité ouverte du béton.

### Préparation des échantillons

La norme utilisée ici est la NBN EN 13057. Chaque composition sera testée trois fois. L'un des prismes initialement de 100x100x400, sera coupé en cubes de 100x100x100mm. Ceux-ci auront subi, dans un premier temps, une cure de 28 jours en chambre humide comme annoncé dans l'introduction et, dans un second temps, un séchage au four à une température de  $40 \pm 2$  °C. Le séchage s'arrête une fois que la variation de masse entre deux mesures successives est inférieure à 0,2%.

Le temps nécessaire varie du simple au double en fonction de la concentration de M.I.O.M et c'est pourquoi il n'est pas possible de donner un temps de séchage précis pour l'ensemble des compositions.

### Mode opératoire

Les échantillons secs sont ensuite placés dans une caisse, sur des billes situées à chaque coin de façon à minimiser la surface de contact et ne pas perturber l'absorption capillaire. De l'eau est ensuite ajoutée de façon à obtenir une profondeur d'immersion de  $2 \pm 1$ mm comme le montre la FIGURE 7.5. En sus, un couvercle vient recouvrir le tout pour éviter que de l'eau ne s'évapore entre

---

1. Cela dépend bien évidemment du ratio hauteur/diamètre. Si celui-ci est tout petit, la résistance sur cube sera plus faible que celle sur cylindre. Cependant, dans le cas présent, il est égal à deux, la résistance mesurée sur cube sera donc plus importante.

les mesures.

Ces mesures sont prises à des temps bien définis, 12 et 30 minutes ainsi que 1, 2, 4 et 24 heures. Pour être tout à fait complet dans l'étude et, afin de bien visualiser le ralentissement de l'absorption au cours du temps, des mesures à 4 et 7 jours ont également été effectuées.

Mais que représentent ces mesures? Il y a d'une part, la masse de l'échantillon qui a absorbé une certaine quantité d'eau et, d'autre part, la hauteur de remontée d'eau par absorption capillaire sur chacune des faces. Afin de donner un sens à ces mesures, il faut utiliser les ÉQUATIONS 7.2 et 7.3 qui donnent respectivement la variation de masse et le coefficient d'absorption en fonction du temps. Celles-ci seront utilisées dans le CHAPITRE 9, lors de l'analyse des résultats.

$$\frac{\Delta m}{A} = \frac{m_{t_i} - m_{t_0}}{A} \left( \frac{kg}{mm^2} \right) \quad (7.2)$$

$$S_i = \frac{m_{t_i} - m_{t_0}}{A * T^{0,5}} \left( \frac{kg}{mm^2 h^{0,5}} \right) \quad (7.3)$$

- ◇  $\Delta m$  : Variation de masse (kg);
- ◇  $m_{t_0}$  : Masse au temps 0 (kg);
- ◇  $m_{t_i}$  : Masse au temps i (kg);
- ◇  $A$  : Aire en contact avec l'eau (mm<sup>2</sup>);
- ◇  $S_i$  : Coefficient d'absorption;
- ◇  $T$  : Temps (h).



FIGURE 7.5 – Absorption par remontée capillaire de BL G100 S0, BL G30 S0 et BL G0 S0, respectivement de gauche à droite.

### 7.2.3 Absorption d'eau totale par immersion

#### Objectif

En complément de l'absorption capillaire, il est possible de calculer l'absorption d'eau totale par immersion, chose qui sera faite sur base de la norme NBN EN 15-215. La différence entre la masse à l'état saturé et la masse à l'état sec permettra de donner une information de la porosité ouverte du béton. Il sera également possible d'en retirer la masse volumique à l'état durci.

#### Préparation des échantillons

À la base, aucun échantillon n'a été prévu pour réaliser les essais d'absorption totale par immersion. Les échantillons utilisés seront donc ceux qui ont servi aux essais d'absorption par remontée capillaire. Une fois ces essais finis, les échantillons sont immergés complètement dans l'eau et seront pesés à l'état sec par la suite. Il est important de noter qu'aucune des dimensions n'a été impactée durant l'essai précédent, les échantillons restent donc, toujours avec les dimensions d'un cube de 100mm de côté.

#### Mode opératoire

Les échantillons immergés sont pesés chaque jour jusqu'à obtention d'une masse constante. Pour l'obtenir, il faut que pour deux mesures successives de 24 heures, la différence de masse n'excède pas 0,1%. Par la suite, chaque échantillon sera séché à l'étuve à une température de  $105 \pm 5$  °C. Les masses sont à nouveau pesées chaque jour pour obtenir la masse constante à l'état sec. Il sera ainsi possible de calculer l'absorption d'eau totale sur base de l'ÉQUATION 7.4.

$$Absorption = \frac{M_2 - M_1}{M_2} * 100 \quad (-) \quad (7.4)$$

- ◇  $M_1$  : Masse à l'état sec (kg) ;
- ◇  $M_2$  : Masse à l'état saturé (kg).

En complément, lorsque les échantillons sont saturés en eau, ils peuvent être pesés sous-eau. Grâce à cette opération, il sera possible d'évaluer leur masse volumique (cfr. ÉQUATION 7.5). Sur base de ces deux valeurs, il sera également possible de déterminer la porosité grâce à l'ÉQUATION 7.6.

$$\rho_{beton} = \rho * \frac{M_1}{M_2 - M_3} \quad \left( \frac{kg}{m^3} \right) \quad (7.5)$$

- ◇  $M_1$  : Masse à l'état sec (kg) ;
- ◇  $M_2$  : Masse à l'état saturé (kg) ;
- ◇  $M_3$  : Masse sous eau (kg) ;
- ◇  $\rho$  : Masse volumique de l'eau ( $kg/m^3$ ).

$$Porosite = 100 * \frac{M_2 - M_1}{M_2 - M_3} \quad (\%) \quad (7.6)$$

## 7.2.4 Carbonatation accélérée

### Objectif

La carbonatation est, comme l'a montré la SECTION 4.2, l'une des attaques les plus fréquentes au sein des bétons armés. Le but sera ici, d'observer la progression du front de carbonatation des échantillons soumis à une concentration élevée de  $\text{CO}_2$ <sup>2</sup>. Au plus l'avancement sera important et rapide, au moins le béton sera résistant à ce type d'attaque et certaines précautions devront donc être prises en cas d'utilisation.

### Préparation des échantillons

Un prisme de 100x100x400mm, a, après sa cure, été placé en chambre d'acclimatation. Dans cette chambre, la température vaut  $20 \pm 2$  °C et l'humidité relative, HR, est égale à 65%. L'objectif est d'obtenir une masse constante pour chaque échantillon, ce qui signifie que, comme précédemment, la variation entre deux mesures prises à 24 heures d'intervalle ne pouvait pas dépasser 0,1%. Elle sera obtenue après une durée de  $\pm 30$  jours en fonction des compositions. L'acclimatation faite, le test de carbonatation accélérée pourra être effectuée.

### Mode opératoire



FIGURE 7.6 – Sciage d'une tranche d'un échantillon BL G100 S0.

Après avoir atteint une masse constante, une première découpe, en  $t_0$ , est effectuée sur le prisme. En théorie, cette découpe devrait se faire par fendage. Cependant, l'épaisseur de chaque échantillon coupé par fendage avoisine les 50mm. Dès lors, il n'est pas possible de réaliser une découpe toutes les semaines et atteindre 70 jours de mesures<sup>3</sup>.

2. La concentration moyenne de  $\text{CO}_2$  dans l'air ambiant est de 0,03%. Pour l'expérimentation, elle sera multipliée par 100, pour atteindre une concentration de 3%.

3.  $10 \times 50 = 500$ mm or, l'échantillon ne faisant que 400mm de longueur, l'ensemble des mesures ne peut être effectuées.

C'est pourquoi une découpe par sciage (cfr. FIGURE 7.6) est préférée. En effet, elle permet d'obtenir des tranches beaucoup plus fines (20mm seulement) et donc d'effectuer plus de mesures. Il faut noter que le sciage peut faire pénétrer une faible quantité d'eau dans les bétons. Afin de limiter cette quantité, ceux-ci sont découpés le plus rapidement possible et séchés en surface au moyen d'un chiffon. De cette façon, la quantité d'eau qui a potentiellement pu entrer dans l'échantillon est très très limitée.

Les prismes peuvent ensuite être placés en chambre de carbonatation dans laquelle la concentration en  $\text{CO}_2$  équivaut à 3%. La température et l'humidité relative sont semblables à celles de la chambre d'acclimatation, respectivement  $23 \pm 1$  ° C, et 65%. Toutes les semaines, une nouvelle découpe de 20mm est réalisée. Sur cette découpe, la face supérieure, initialement à l'air libre lors du moulage, est numérotée 1. Ensuite et, dans le sens antihorlogique, les autres faces sont numérotées. La face de gauche porte donc le numéro 2, la face inférieure, le 3 et la face de droite, le numéro 4. Pour plus de clarté, il faut se référer à la FIGURE 7.7.



FIGURE 7.7 – Exemple de numérotation à réaliser lors des essais de carbonatation [Wintgens, 2019].

La découpe et la numérotation faites, de la phénolphthaléine est projetée sur la face adéquate et donne une indication du pH. Cette dernière réagit si le pH est supérieur à 9, ce qui signifie que la carbonatation n'a pas encore eu lieu. Un exemple est donné à la FIGURE 7.8. Dans cette dernière, il apparaît clairement que la carbonatation n'est pas initiée ou très peu, car presque toutes les surfaces sont couvertes de rose. Dans le cas contraire, elle reste incolore et le front de carbonatation a progressé. Il faut donc évaluer l'avancement du front et pour cela, cinq mesures sont prises par face.

Il faut aussi noter que cet essai permet de donner indirectement une idée de la teneur en chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  au sein du béton.



FIGURE 7.8 – Illustration du front de carbonatation au temps zéro et après une semaine pour BL G0 S0, BL G30 S0 et BL G100 S0.

## 7.2.5 Diffusion forcée d'ions chlore

### Objectif

L'objectif est d'évaluer la résistivité du béton au passage d'ions chlore. Moins les ions se déplaceront, plus la résistance sera grande, ce qui est positif pour la durabilité du béton considéré. La norme qui sera utilisé ici est la suivante : ASTM C 1202-05.

Dans le cas où une étude plus approfondie sur la mobilité d'ions chlore voudrait être menée, il est également possible de combiner ces résultats avec un test de diffusion d'ions chlore en régime stationnaire.

### Préparation des échantillons

Pour cet essai, les échantillons demandent un temps de préparation bien plus conséquent que pour la carbonatation ou la résistance en compression par exemple. En effet, après 28 jours en chambre humide, l'un des deux cylindres de 150x300mm est scié en cinq tranches de 50mm de haut<sup>4</sup> grâce à la scie présentée à la FIGURE 7.6. Une fois les morceaux obtenus, les trois parties centrales seront, dans un premier temps, utilisées. Le choix de ces parties est le plus judicieux. En effet, les parties extrêmes pourraient donner des résultats bien différents car elles ont subi de grandes variations au point de vue du compactage. La partie inférieure a été compactée bien plus longuement et fortement que la partie supérieure qui a été coulée en dernier lieu et donc beaucoup moins compactée. Après la découpe, vient le carottage. Les trois échantillons concernés voient leur diamètre se réduire

4. Les deux extrémités d'une vingtaine de millimètres sont quant à elles jetées car elles ne pourront être utilisées.

d'un tiers, celui-ci passant de 150mm à 100mm. Pour cette opération, la carotteuse de la FIGURE 7.9a est utilisée.



(a) Carottage.



**BL G0 S0 - Haut**

**BL G0 S0 - Milieu**

**BL G0 S0 - Bas**

(b) Résine époxy.

FIGURE 7.9 – Préparation des échantillons de composition BL G0 S0 au test de diffusion forcée d'ions chlore.

Une fois que les propriétés géométriques désirées sont obtenues, il faut peindre les bords des échantillons au moyen d'une résine époxy afin de les isoler. De cette façon, si de l'eau, de l'air ou un quelconque produit est placé sur le béton, il ne peut se transmettre qu'à travers les deux extrémités. Pour que cette isolation soit totale, trois couches sont posées à trois jours d'intervalle, le résultat final est représenté à la FIGURE 7.9b.

La résine époxy sèche, il ne reste plus qu'une étape avant de procéder au test, il s'agit de la saturation en eau via une chambre sous vide. Les différents points à réaliser lors de cette étape sont repris ci-dessous :

1. Mise en place des échantillons dans le bassin comme le montre la FIGURE 7.10a. Le vide est ensuite effectué, la pression doit être inférieure à 50 mm Hg. (Durée : 3 heures) ;
2. De l'eau désaérée est ensuite introduite lentement pour permettre à l'absorption capillaire de se dérouler comme le montre la FIGURE 7.10b. (Durée : 1 heure) ;
3. Une fois les échantillons submergés, le vide est maintenu pour permettre une bonne saturation. (Durée : 1 heure) ;
4. La pompe est arrêtée et de l'air est ré-injecté et les échantillons restent trempés dans l'eau. (Durée :  $18 \pm 2$  heures).



(a) Mise en place des échantillons dans la chambre sous vide.



(b) Saturation en eau.

FIGURE 7.10 – Saturation en eau via une chambre sous vide, des échantillons utilisés pour le test de diffusion forcée d’ions chlore [Wintgens, 2019].

### Mode opératoire

La préparation terminée, les essais peuvent débuter. Les échantillons sont placés dans des cellules qui contiennent à chaque extrémité une solution bien particulière. À l’anode, une solution de soude caustique, NaOH (0,3N) est préconisée tandis qu’à la cathode, il s’agit d’une solution à base de NaCl (3%). Entre ces bornes, un générateur permet de créer une différence de potentiel de 60V (en théorie). Cette différence de potentiel sera maintenue durant six heures afin d’avoir l’estimation la plus réaliste possible. Un temps plus court ne permettrait pas au régime stationnaire de se mettre en place. Par ailleurs, si la saturation n’est pas parfaite, le temps nécessaire à l’obtention de ce régime est plus conséquent. C’est pourquoi une période de six heures est préconisée.

Physiquement, ce qui se passe au sein de ces cellules est très simple. Les ions  $\text{Cl}^-$  vont transiter au travers du béton pour aller de l’anode à la cathode. Grâce à l’installation présentée à la FIGURE 7.11, l’intensité du courant transitant est mesurée à des temps bien définis et la résistance équivalente peut en être déduite. Ici, elle sera évaluée toutes les 600 secondes. Dans l’ÉQUATION 7.7 seules les valeurs aux demi-heures et aux heures seront prises en compte. Cela permettra par la suite de déterminer la quantité totale de courant ayant transité à travers l’échantillon et de la comparer à des normes (cfr. TABLE 7.1).

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + \dots + 2I_i + \dots + 2I_{360-30} + I_{360}) \quad (\text{Coulomb}) \quad (7.7)$$

- ◇  $Q$  : Charge passée (coulomb) ;
- ◇  $I_0$  : Courant mesuré immédiatement après l'application de la différence de potentiel (ampère) ;
- ◇  $I_i$  : Courant mesuré  $i$  minutes après l'application de la différence de potentiel (ampère) ;
- ◇  $I_{360}$  : Courant mesuré six heures après l'application de la différence de potentiel (ampère).

Avant de pouvoir utiliser ces résultats, une dernière correction doit être faite. La norme prévoit initialement d'utiliser des échantillons de 95mm et non 100mm. La charge passée,  $Q$ , doit donc être corrigée chose qui sera faite sur base de l'ÉQUATION 7.8.

$$Q_s = Q_x \left( \frac{95}{X} \right)^2 \quad (\text{Coulomb}) \quad (7.8)$$

- ◇  $Q_s$  : Charge passée à travers un échantillon de 95mm (coulomb) ;
- ◇  $Q_x$  : Charge passée à travers un échantillon de diamètre  $X$  (coulomb) ;
- ◇  $X$  : Diamètre de l'échantillon (mm) ;

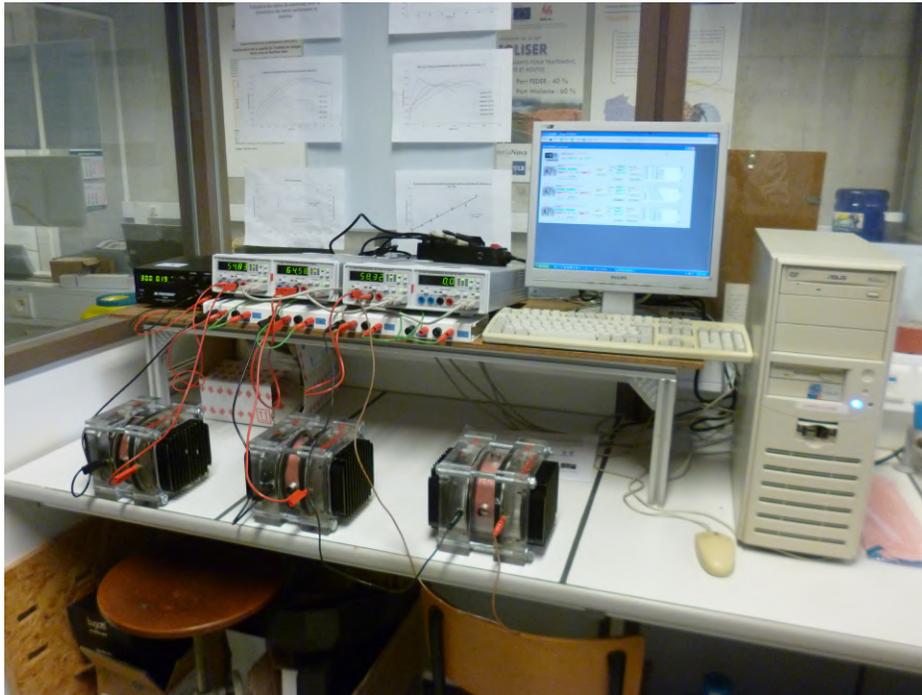


FIGURE 7.11 – Cellules connectés pour les essais de diffusion d'ions chlore.

Pour finir, la charge passée peut être comparée à des valeurs courantes, c'est notamment l'objet de la TABLE 7.1. Comme évoqué, lorsque la charge est importante, cela signifie que la résistance est faible et donc, que les chlorures ont une grande facilité de se mouvoir. Cela peut, potentiellement comme l'a montré la SECTION 4.3, amener à des problèmes de durabilité.

TABLE 7.1 – Évaluation rapide du taux de perméabilité aux ions chlore d'un béton (Norme ASTM C 1202-05)

Charge passée (Coulomb)	Pénétration d'ions
$\geq 4000$	Haut
2000 - 4000	Modéré
1000 - 2000	Bas
100 - 1000	Très bas
$\leq 100$	Négligeable

Néanmoins, il faut rester vigilant quant aux valeurs de cette table. En effet, le laboratoire de l'université de Liège ne dispose pas du matériel adéquat pour évaluer les températures des deux solutions. Si celles-ci augmentent trop, elles vont s'évaporer. Si la température continue de grimper ceci pourra causer, *ipso facto*, un incendie. Bien qu'il existe des méthodes pour éviter les surchauffes<sup>5</sup>, celles-ci ne peuvent garantir l'évaporation des solutions.

La meilleure solution est de diminuer la différence de potentiel initiale et donc, de limiter l'effet Joule. Au lieu de travailler à une tension de 60V, une tension de 30V sera préconisée.

Les valeurs de la TABLE 7.1 ne peuvent être utilisées directement et une mise à niveau pour délimiter un taux haut, modéré, bas, etc, doit être faite sur base de cette nouvelle tension.

## 7.2.6 Gel/dégel

### Objectif

Ici, il s'agit d'étudier le comportement qu'ont les différentes compositions à l'épreuve du gel et du sel de déverglaçage. En soumettant l'une des faces d'un échantillon à de l'eau salée et des cycles répétés de gel/dégel, le béton va progressivement s'écailler et s'effriter en surface. L'objectif sera de quantifier cette perte de masse. Au plus elle sera importante au moins le béton considéré aura un comportement durable vis-à-vis du gel. La norme utilisée est la suivante : NBN EN 1338.

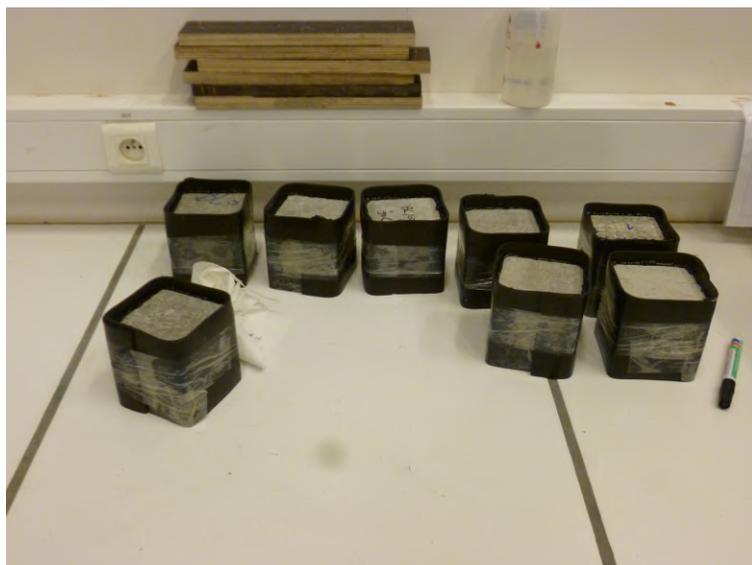
### Préparation des échantillons

La préparation est, *a priori*, moins complexe que celle évoquée dans la section précédente. L'un des prismes qui est préalablement découpé en trois cubes de 100x100x100mm servira de base. À leur sortie de chambre humide, ils sont placés dans la chambre d'acclimatation, évoquée précédemment, et ce, jusqu'à obtention de la masse constante (cfr. SECTION 7.2.4).

La masse constante atteinte, l'objectif est maintenant d'isoler les extrémités à l'aide de caoutchouc tout en garantissant un rebord de  $20 \pm 2$ mm en partie supérieure pour y placer une solution à base de sel lors des cycles de gel/dégel. Comme le montre la FIGURE 7.12a, le caoutchouc est serré à l'aide d'adhésif et il est collé au béton au moyen d'un joint en polyéthylène. Ce joint vient également faire le pourtour de l'échantillon dans sa partie supérieure afin d'éviter la présence d'eau

5. Les éléments noirs de la FIGURE 7.11 par exemple, sont des aérateurs. De l'air peut facilement y transiter ce qui permet une meilleure diffusion de la chaleur.

entre le caoutchouc et le béton.



(a) Membrane caoutchouteuse et polyéthylène pour la coller.



(b) Fissures pour le 2<sup>ème</sup> échantillon de composition G100 S0.

FIGURE 7.12 – Préparation des échantillons au gel/dégel.

Cependant, la présence de micro/macro-fissures représentées à la FIGURE 7.12b ne permet pas d'assurer cette condition. En effet, de l'eau s'infiltrera au travers des fissures et ruisselle jusqu'en base de l'échantillon. Par ailleurs, le caoutchouc étant relativement rigide et les coins des échantillons n'étant pas échancrés, il est difficile, même avec un ajout de polyéthylène, d'assurer une isolation sur cette partie. Une autre méthode doit donc être préconisée!

Il faut noter que l'essai de gel/dégel sur l'échantillon visible à la FIGURE 7.12b n'a pas lieu d'être car ce dernier n'est pas représentatif d'un nouveau béton. Lorsque la solution sera placée en partie supérieure, elle s'infiltrera directement en son sein. Lors du premier cycle de gel, l'eau va se dilater et entraîner l'explosion de l'ensemble de l'échantillon. La perte de masse à mesurer sera donc disproportionnée par rapport aux autres mesures.

La nouvelle méthode est de composer un coffrage sur-mesure à l'aide de plaques en plastique dur. Ces plaques seront collées de la même façon que le caoutchouc, c'est-à-dire avec du polyéthylène. Néanmoins, leur rigidité et leurs arêtes affûtées vont permettre de bien adhérer au béton et de ne plus laisser passer l'eau. Du polyéthylène peut également être ajouté sur chaque angle ainsi que sur le pourtour supérieur comme cela est représenté à la FIGURE 7.13.

Il faut noter que l'ANNEXE G présente l'ensemble des coffrages réalisés pour les compositions BL G0 S0, BL G30 S0 et BL G100 S0.

Pour assurer l'étanchéité,  $5 \pm 2$  mm d'eau doivent être versés sur la surface d'essai. *A priori*, cette eau doit rester en partie supérieure durant  $72 \pm 2$  heures et sera enlevée une fois que les essais seront lancés.



FIGURE 7.13 – Illustration d'un coffrage fait de plaques en plastique dur et une membrane en polyéthylène.

### Mode opératoire

L'eau enlevée, elle est remplacée par une solution à base de NaCl (3%) sur, à nouveau,  $5\pm 2\text{mm}$ . Les éprouvettes sont ensuite placées dans l'enceinte réfrigérante et vont subir 28 cycles de gel/dégel. La température durant ces 28 cycles va évoluer comme le montre la FIGURE 7.14.

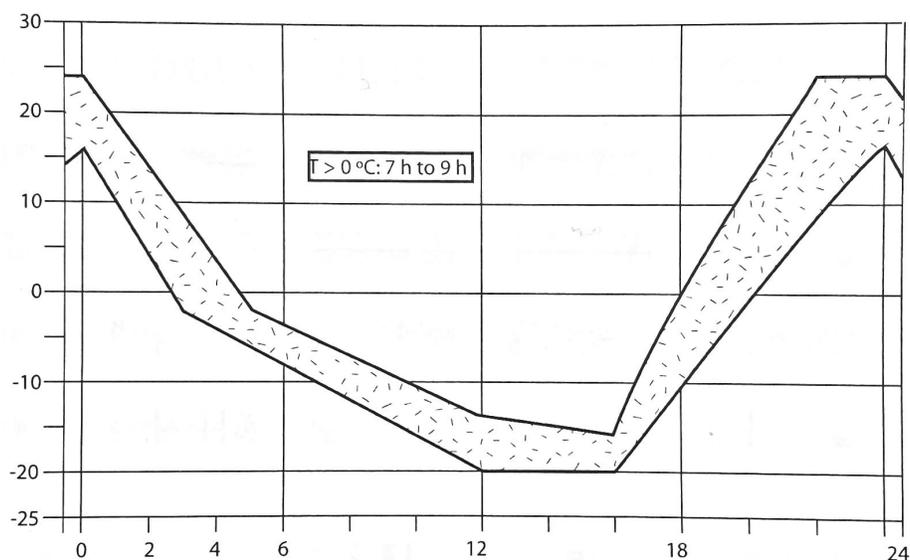


FIGURE 7.14 – Cycle de température lors d'un cycle de gel/dégel selon la norme NBN EN 1338 avec en abscisse le temps (heure) et en ordonnée la température ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Au bout de 7 et 14 cycles, en période de dégel, une quantité de solution peut être ajoutée si besoin est, afin de conserver une couche plus ou moins constante de  $5\pm 2\text{mm}$ . À la fin des 28 cycles, deux opérations doivent être réalisées.

La première, consiste à enlever la matière écaillée et à la placer dans une éprouvette. Pour plus de facilité, un pinceau peut être utilisé, il permettra également de recueillir les plus petites particules.

La seconde verra la matière du récipient nettoyée au travers d'un filtre en papier. De l'eau douce est utilisée pour qu'à la fin, il n'y ait plus de NaCl subsistant. *In fine*, la matière nettoyée est séchée à l'étuve à  $105 \pm 5$  ° C et la perte de masse est évaluée à l'aide de l'ÉQUATION 7.9.

$$L = \frac{M}{A} \left( \frac{kg}{m^2} \right) \quad (7.9)$$

- ◇  $L$  : Perte de masse par unité de surface ;
- ◇  $M$  : Masse écaillée après 28 cycles (kg) ;
- ◇  $A$  : Superficie de la surface d'essai ( $m^2$ ).

## 7.2.7 Perméabilité à l'oxygène

### Objectif

La norme utilisée pour cet essai est basé sur l'article "The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method - a recommendation" de 1989. En injectant de l'oxygène sous pression, il sera possible de déterminer des coefficients de perméabilité. Sur base de ceux-ci, la porosité apparente du béton sera connue et d'éventuels problèmes de durabilité pourront être mis en avant.

### Préparation des échantillons

Comme pour la diffusion forcée d'ions chlore, les échantillons pris, sont issus d'un cylindre 150x300mm et à nouveau, trois plus petits cylindres de 150x50mm en sont extraits. Cependant, dans le cas présent, le diamètre est conservé, ils ne doivent pas être carottés à un diamètre inférieur.

Ensuite, les échantillons sont stockés en chambre d'acclimatation jusqu'à ce que la masse constante soit atteinte (Régime A de la norme)<sup>6</sup>. Par la suite, et comme pour la diffusion forcée d'ions chlore, les bords de chaque échantillon sont peints trois fois au moyen d'une résine époxy afin de les isoler de l'environnement extérieur (voir FIGURE 7.15).

---

6. Ce régime est préféré car il rejoint les conditions des autres tests. En sus, il représente le mieux les conditions d'un environnement extérieur.



BL G0 S0 - Haut

BL G0 S0 - Milieu

BL G0 S0 - Bas

FIGURE 7.15 – Préparation des échantillons de composition BL G0 S0 au test de perméabilité à l’oxygène, mise en place de la résine époxy.

### Mode opératoire

Les échantillons sont placés dans les cellules métalliques représentées à la FIGURE 7.16a. Dans celles-ci, si une diffusion doit avoir lieu, elle ne peut se dérouler qu’entre les deux extrémités, les bords étant isolés d’une couche de résine mais aussi d’une chambre à air.

Par la suite, une pression de départ de  $1,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$  est injectée, celle-ci est visible sur la jauge de pression aux FIGURES 7.16a et 7.16b. Après 30 minutes, une première mesure du débit d’air transitant à travers l’échantillon,  $Q_i$  est réalisée. 15 minutes plus tard, une seconde mesure est réalisée, toujours à la même pression. Si celle-ci a une différence inférieure à 3% de celle calculée 15 minutes auparavant, la pression peut augmenter, le cas échéant, 15 minutes doivent être ajoutées, et ce, jusqu’à obtenir une différence inférieure à 3% entre deux mesures successives.

Initialement, la pression est  $1,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ , lorsque la différence entre deux mesures est suffisamment faible, la pression est incrémentée de  $0,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ . Cet incrément est réalisé quatre fois jusqu’à obtenir comme dernière pression, une valeur de  $3,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ .

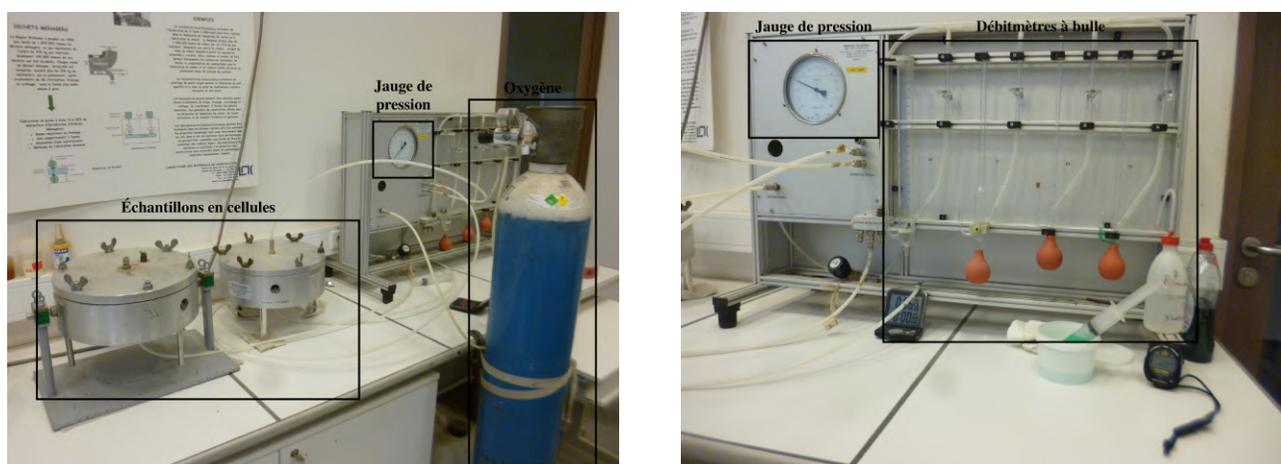


FIGURE 7.16 – Fonctionnement des essais de perméabilité à l’oxygène.

Le débit permet de calculer un coefficient de perméabilité spécifique comme montré. Ci-dessous (ÉQUATION 7.10). Dans le cas où le fluide utilisé est de l'oxygène, l'équation peut se simplifier (ÉQUATION 7.11) :

$$K = \frac{2Qp_0L\eta}{A(p^2 - p_a^2)} \quad (m^2) \quad (7.10)$$

- ◇  $Q$  : Débit d'air mesuré ( $m^3/s$ );
- ◇  $p_0$  : Pression auquel le débit est déterminé, égal à  $p_a$  ( $N/m^2$ );
- ◇  $p_a$  : Pression de sortie, égale à la pression atmosphérique ( $N/m^2$ );
- ◇  $p$  : Pression d'entrée ( $N/m^2$ );
- ◇  $\eta$  : Viscosité dynamique dépendant de la température, à  $20^\circ C$ , égal à  $2,02 \cdot 10^{-5}$  ( $N/s \ m^2$ );
- ◇  $A$  : Superficie de la surface d'essai ( $m^2$ );
- ◇  $L$  : Épaisseur de l'échantillon ( $m$ ).

$$K_{oxygène} = \frac{1,14 \times 10^{-4} Q p_a}{(p^2 - p_a^2)} \quad (m^2) \quad (7.11)$$

- ◇  $D$  : Le diamètre vaut 150mm;
- ◇  $L$  : La Hauteur vaut 50mm;
- ◇  $\eta$  : Viscosité dynamique vaut  $2,02 \cdot 10^{-5}$   $N/s \ m^2$ .

Sur base de ces équations, il sera ensuite possible de déterminer si les bétons ont une perméabilité plus ou moins importante impactant directement la durabilité des bétons (cfr. SECTION 4.1).

En effet, une faible perméabilité signifie que le béton est peu poreux et se protège de la sorte contre de nombreuses attaques. *A contrario*, une grande porosité peut amener de manière péremptoire de nombreuses attaques comme l'a démontré le CHAPITRE 4.

Ceci clôture donc la présentation de l'ensemble des expérimentations réalisés. Il est maintenant temps de procéder à l'analyse des résultats obtenus sur chacune d'entre elles.

Troisième partie  
Étude des résultats

# Chapitre 8

## Tests sur béton à l'état frais

Tous les résultats vont maintenant être analysés. Cette analyse se déroulera en trois étapes bien distinctes. La première présentera les résultats sous la forme de divers graphiques. La seconde sera l'observation : quelles sont les phénomènes qui sont visualisés sur base des résultats, que faut-il en tirer ? Pour finir viendra l'analyse. Celle-ci permettra de mettre en avant, les avantages mais aussi les inconvénients de l'utilisation des M.I.O.M dans les bétons.

Il faut noter que certains paramètres comme la masse volumique par exemple influence de nombreux résultats, dans le cas présent, la résistance à la compression, la porosité, la carbonatation, etc. Des liens entre chaque résultat devront être ainsi faits afin de comprendre le comportement global et pouvoir répondre à la question initiale.

### 8.1 Affaissement

#### Résultats

La FIGURE 8.1 expose les résultats obtenus après l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.

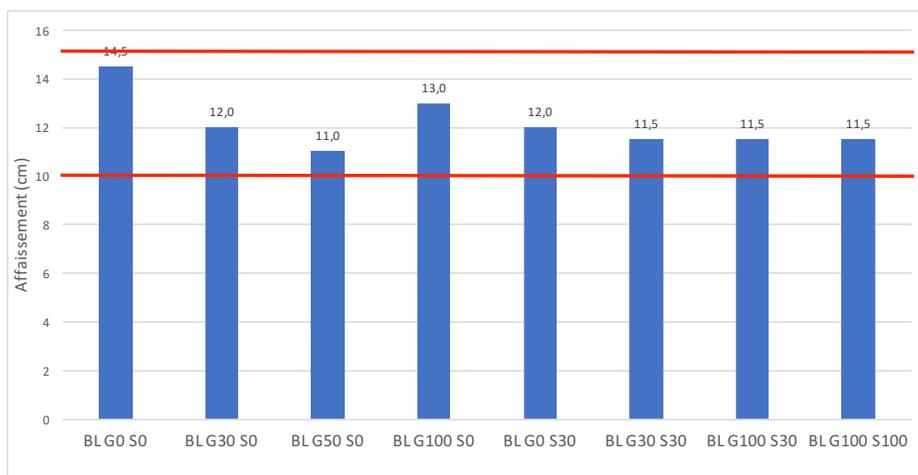


FIGURE 8.1 – Essais d'affaissement au cône d'Abrams.

L'affaissement recherché doit être compris entre 10 et 15cm afin de répondre aux critères d'un béton de classe S3. Du superplastifiant, SP, est ajouté petit à petit. Dès lors, il est important d'étudier

la quantité de SP ajoutée afin de rencontrer cette exigence. Pour cela, il faudra se référer à la TABLE 8.1.

TABLE 8.1 – Résultats d'affaissement au cône d'Abrams en fonction de la quantité de superplastifiant.

Type	% de SP/Ciment	Affaissement (cm)
BL G0 S0	0,6	14,5
BL G30 S0	0,6	12
BL G50 S0	0,6	11
BL G100 S0	0,7	13
BL G0 S30	1,22	12
BL G30 S30	1,11	11
BL G100 S30	1,22	11
BL G100 S100	4,22	11

Il faut noter que la composition BL G0 S30 a fait figure de "cobaye" comme béton à base de sable grossier de mâchefers. Dès lors, la quantité de superplastifiant à introduire était indéterminée et les ajouts se sont faits très minutieusement par 10 grammes. Le problème étant que la réaction d'hydratation qui se déroulait entre deux mesures d'affaissement compensait l'ajout du superplastifiant. Au final, le temps entre le premier et le dernier ajout de SP a été considérablement allongé et explique de ce fait, une quantité de SP supérieure pour ce béton comparé au béton BL G30 S30. Si la durée avant l'obtention d'un affaissement acceptable était restée dans des temps "corrects", ce phénomène ne serait pas survenu. L'idéal aurait donc, été de recommencer un mélange en ajoutant la quantité déterminée pour vérifier la valeur d'affaissement obtenue.

## Observations

- ◇ **Observation 1 :** Au plus la concentration en M.I.O.M s'avère élevée, au plus la concentration en superplastifiant doit l'être également pour obtenir le même affaissement. Dans le cas où du SP n'est pas ajouté entre deux compositions ayant un taux de M.I.O.M différent, celle où la concentration est la plus élevée a un affaissement plus faible ;
- ◇ **Observation 2 :** Le sable grossier de mâchefers impacte plus fortement l'affaissement que les granulats de mâchefers. La TABLE 8.1 montre très clairement que lorsque seulement 30% de sable grossier de mâchefers est introduit, la concentration en SP doit doubler. Quand le taux atteint les 100%, la proportion en SP est multiplié par 7 en comparaison du béton de référence et par 6 par rapport au BL G100 S0.

## Analyse

- ◇ **Interprétation 1** : Les M.I.O.M ont pour effet de diminuer l'affaissement et donc l'ouvrabilité. Bien que ceux-ci aient été pré-saturés 24 heures auparavant, leur grand pouvoir d'absorption nécessite un ajout de superplastifiant pour conserver la même consistance. Ceci amène donc, aux mêmes conclusions que faites dans la SECTION 3.5. Par ailleurs, le temps de prise semble diminuer lors de l'ajout de mâchefers [Aggarwal et al., 2007, Aggarwal & Siddique, 2014] Des réactions se développent rapidement entre ces derniers, le ciment et l'eau comme mentionné (cfr. SECTION 3.5) . En effet, pour le béton BL G0 S30, du SP a été ajouté par 10 grammes et la réaction d'hydratation compensait cet ajout. L'affaissement n'augmentait donc pas entre deux mesures. Pour le béton de référence, BL G0 S0, l'addition de SP se faisait également par 10 grammes, or, l'affaissement diminuait bien entre deux mesures. Cela signifie donc que les M.I.O.M ont tendance à accélérer la prise sur le très court terme ;
- ◇ **Interprétation 2** : Le sable grossier de mâchefers ayant un pouvoir d'absorption deux fois plus important que les granulats de mâchefers, il capte une quantité d'eau nettement supérieure, et ce, même lorsqu'il a été pré-saturé. Les effets mentionnés précédemment sont donc amplifiés par rapport à la simple substitution de granulats de mâchefers. La TABLE 8.1 montre également que pour un taux de remplacement suffisamment faible en sable grossier de mâchefers (<30%), quelle que soit la concentration de granulats de mâchefers, la quantité de superplastifiant à injecter reste dans des limites acceptables. Au dessus de cette valeur, la quantité requise augmente très fortement.

## 8.2 Teneur en air

### Résultats

La FIGURE 8.2 illustre l'ensemble des résultats pour la teneur en air. Bien que relativement simple, elle permet, à l'inverse d'un tableau, une comparaison directe et relativement aisée des variations en fonction des différentes compositions.

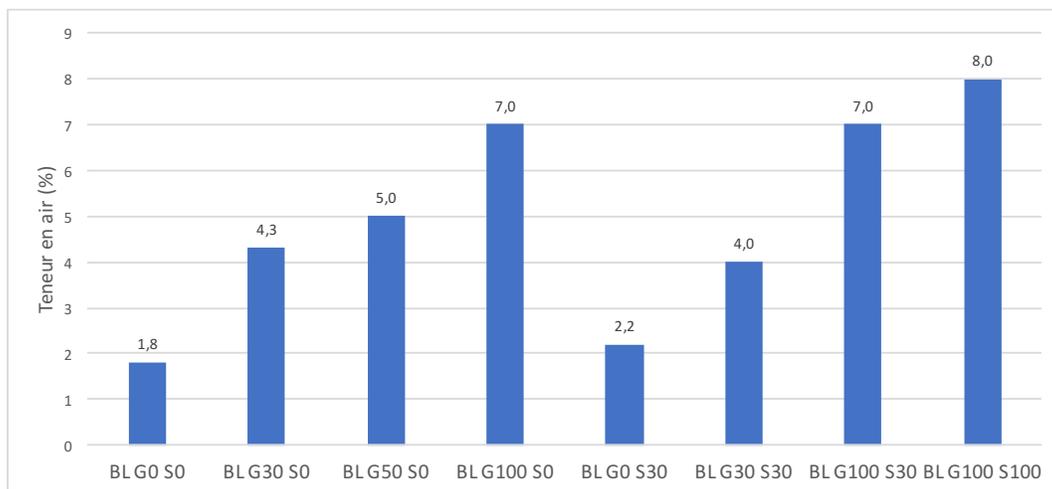


FIGURE 8.2 – Teneur en air.

Pour compléter la FIGURE 8.2, la TABLE 8.2 est proposée. Dans celle-ci se trouve chacune des teneurs en air mais aussi le l'augmentation recensée entre le béton X et celui de référence.

TABLE 8.2 – Résultats de la teneur en air et augmentation de celle-ci par rapport au béton de référence pour l'ensemble des compositions.

Type	Teneur en air (%)	Variation (%)
BL G0 S0	1,8	-
BL G30 S0	4,3	139
BL G50 S0	5,0	178
BL G100 S0	7,0	289
BL G0 S30	2,2	22
BL G30 S30	4,0	122
BL G100 S30	7,0	289
BL G100 S100	8,0	344

Afin d'être tout à fait complet, une rapide comparaison entre béton contenant du sable grossier de mâchefers et béton n'en contenant pas peut également être réalisée, chose qui a été faite à la FIGURE 8.3. Sur cette figure apparait, d'un côté, les bétons sans sable grossier de mâchefers et pour lesquels la concentration en granulats de mâchefers augmente progressivement. D'un autre côté, les bétons contenant un taux de 30% en sable grossier de mâchefers et dans lesquels, à nouveau, la concentration en granulats de mâchefers augmente progressivement.

Il est important de noter que la teneur en air du béton BL G100 S0 est confondue avec celle du béton BL G100 S30 et c'est pourquoi ce point n'apparait pas sur la FIGURE 8.3.

## Observations

- ◇ **Observation 1** : Il semble indéniable qu'au plus la proportion de M.I.O.M est grande, au plus la teneur en air l'est également. Cela peut se justifier par la FIGURE 8.2 où, il apparait clairement une augmentation de la teneur en air. Les résultats quant à l'augmentation par rapport au béton de référence qui se retrouvent dans la TABLE 8.2 appuient ce fait ;
- ◇ **Observation 2** : La FIGURE 8.3 montre que pour un taux en sable grossier de mâchefers relativement limité (seulement 30%), la teneur en air n'est pas impactée. Cela se traduit via les deux interpolations, par des pentes quasiment similaires. Par ailleurs, avec un taux de substitution de 100% en sable grossier de mâchefers, la teneur en air n'augmente que très peu, de 7 à 8% respectivement pour les bétons BL G100 S0 et BL G100 S100 ;
- ◇ **Observation 3** : La dernière observation qui peut être faite concerne l'évolution même de cette teneur en air. Celle-ci dépend presque exclusivement de la proportion de granulats de mâchefers qui est introduite comme mentionné et, elle évolue de manière pratiquement linéaire. Il n'y a pas de pic, de valeur maximale qui entrainerait une augmentation subite et marquée.

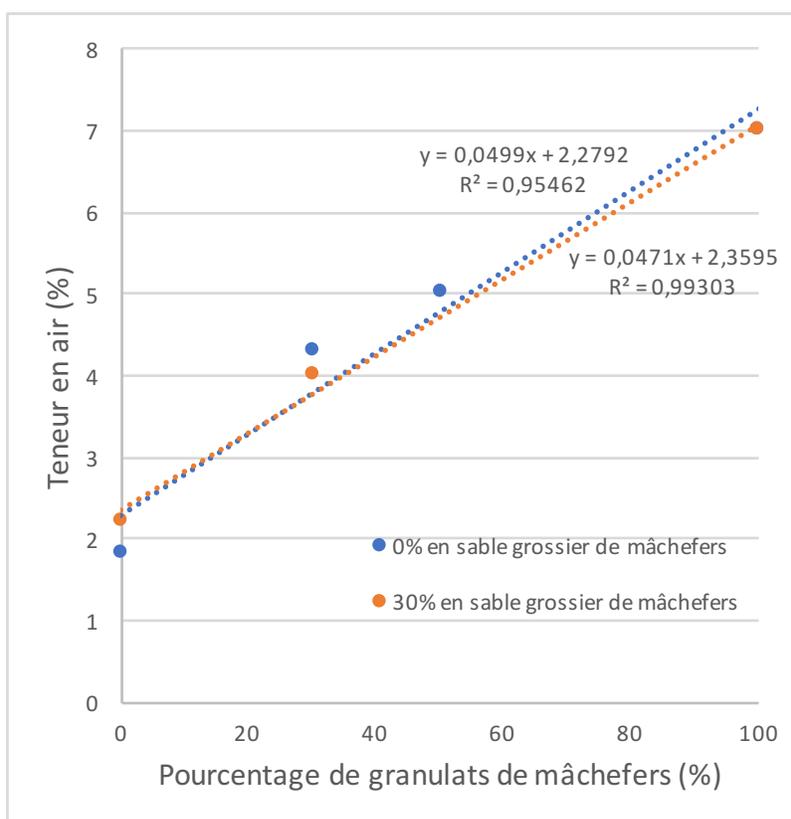


FIGURE 8.3 – Teneur en air et interpolation linéaire pour des bétons sans et avec 30% de sable grossier de mâchefers et dont le taux en granulats de mâchefers varie.

## Analyse

- ◇ **Interprétation 1 :** Les observations réalisées concordent avec ce qui a été dit dans la SECTION 3.5. Les granulats de mâchefers ont, suite à leur forme anguleuse, une tendance à faire augmenter la teneur en air. Bien qu'ils aient une granulométrie plus fine que les granulats concassés calcaires, comme l'a montré la FIGURE 5.7, leur forme si particulière, ne permet pas d'acquiescer un compactage aussi important que le béton de référence ;
- ◇ **Interprétation 2 :** Bien que le sable grossier de mâchefers ait aussi une forme anguleuse, celle-ci se fait bien moins ressentir que pour les granulats de mâchefers. De ce fait, une substitution par celles-ci n'amène pas à une teneur en air plus élevée. Cela s'avère correct, tout particulièrement, quand du sable naturel est encore présent afin de compléter la courbe granulométrique.  
Lorsque le sable naturel n'est plus présent, la granulométrie plus grossière du sable grossier de mâchefers se ressent, et des résultats légèrement supérieurs sont observés ;
- ◇ **Interprétation 3 :** La teneur en air étant une propriété physique, le fait de ne pas voir apparaître de pic est tout à fait logique. Il ne s'agit pas ici, d'une réaction chimique qui requiert un seuil maximal/minimal avant d'initier la réaction. Ceci est donc avantageux. En effet, si le béton à utiliser est prescrit avec une teneur en air maximale, il est possible de déterminer directement, le taux de substitution maximal à ne pas dépasser.

## 8.3 Masse volumique

### Résultats

La masse volumique est, comme évoqué, un indicateur sur la bonne réalisation des bétons. La présentation des résultats se fait en deux étapes. Premièrement, l'ensemble des résultats est présenté sous la forme d'un diagramme bâtonnets afin de pouvoir aisément comparer les différents résultats entre eux (FIGURE 8.4).

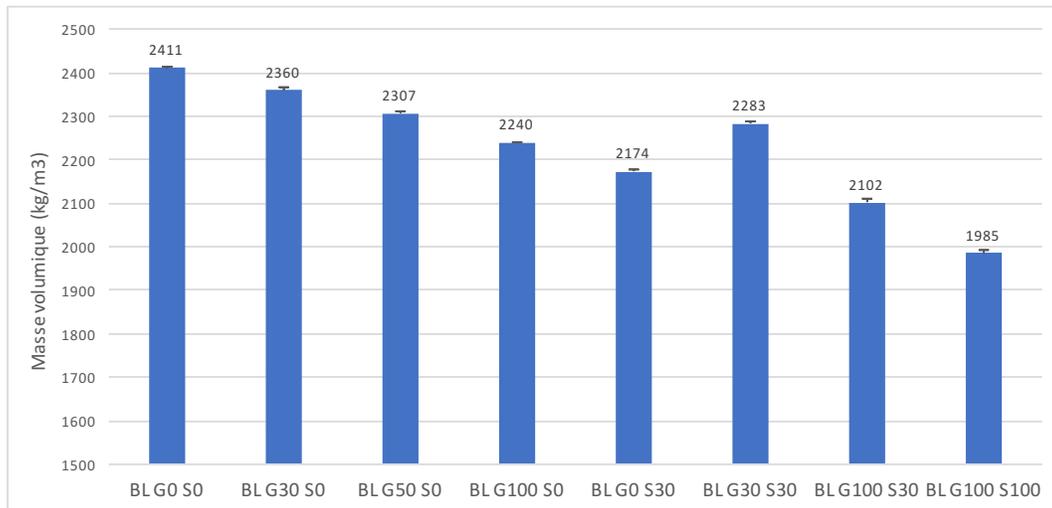


FIGURE 8.4 – Masse volumique et écart-type à l'état frais.

Deuxièmement, une comparaison des résultats obtenus sur des bétons contenant ou non du sable grossier de mâchefers. La représentation de cela a été faite à la FIGURE 8.5. Comme précédemment, une interpolation est réalisée entre les bétons ne contenant pas de sable grossier de mâchefers. Pour les bétons dont le taux en sable grossier de mâchefers est de 30%, l'interpolation n'a pas pu être réalisée car l'une de valeurs est incohérente par rapport aux autres. Dès lors, faire une interpolation entre deux points n'avait que peu d'intérêt.

### Observations

- ◇ **Observation 1** : La masse volumique est d'autant plus faible que la proportion de M.I.O.M est importante comme le témoigne la FIGURE 8.4. Par ailleurs, la différence attendue entre le béton de référence et un autre béton est plus importante que celle qui aurait pu être annoncée au regard des TABLES 6.2 et 6.3 ;
- ◇ **Observation 2** : Le sable grossier de mâchefers a plus d'impact que les granulats de mâchefers sur la masse volumique totale. En effet, pour un même taux en granulats de mâchefers, la différence obtenue entre un béton contenant du sable grossier de mâchefers et le béton de référence, est bien plus importante que la différence entre un béton n'en contenant pas et le même béton de référence.

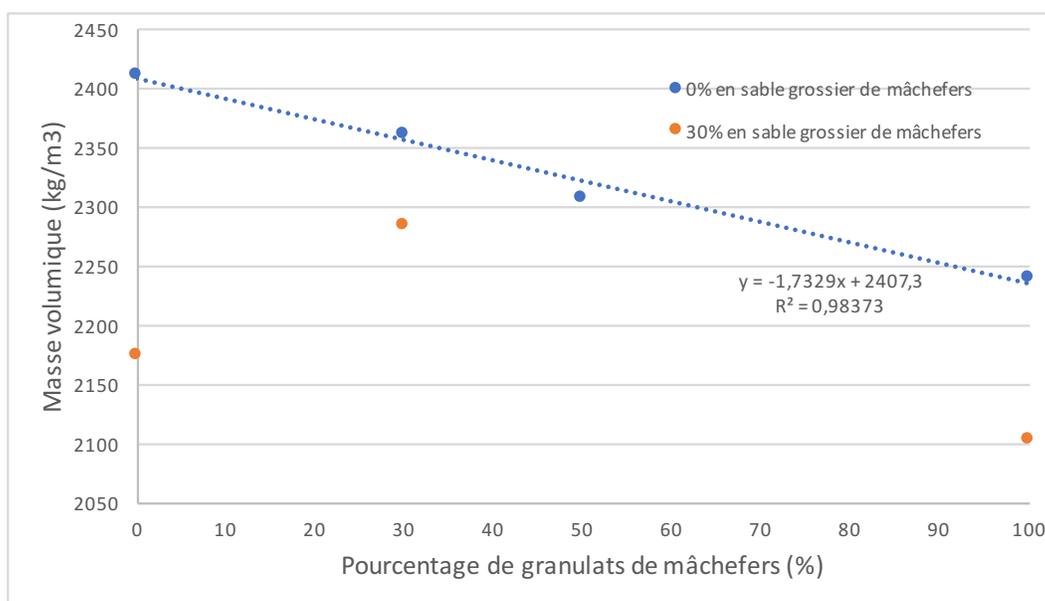


FIGURE 8.5 – Masse volumique et interpolation linéaire pour des bétons sans et avec 30% de sable grossier de mâchefers et dont le taux en granulats de mâchefers varie.

- ◇ **Observation 3 :** La régression linéaire réalisée sur la variation du pourcentage de granulats de mâchefers permet d'obtenir des résultats plus que satisfaisants comme le démontre la FIGURE 8.5. Comme précité, la régression linéaire lorsque un taux de substitution en sable grossier de mâchefers de 30% est appliqué, n'a pas été réalisée. En effet, les résultats obtenus pour le béton BL G0 S30 sont bien en deçà des résultats escomptés, comme il le sera détaillé par la suite, et ne peuvent donc, être pris en compte dans une régression linéaire.

## Analyse

- ◇ **Interprétation 1 :** Bien que les mâchefers aient été pré-saturés, leur masse volumique à l'état humide n'est pas suffisamment grande pour contrecarrer un taux de compactage bien plus faible lors de l'utilisation desdits mâchefers. Une augmentation d'1% de la teneur en air diminue d'environ 25kg la masse volumique du béton. La différence entre le béton de référence et BL G30 S0 devrait être approximativement de 62,5kg<sup>1</sup>, ce qui est bien le cas. Ces mêmes approximations pour les deux autres bétons à base de granulats de mâchefers peuvent également être faites. En effet, bien que les résultats soient un peu en deçà de ceux du béton de référence, il s'en rapprochent fortement ;
- ◇ **Interprétation 2 :** La teneur en air n'étant pas impactée lorsque l'ajout de sable grossier de mâchefers est relativement faible, il faut trouver une autre explication aux différences qui apparaissent. Comme il l'a été mentionné, des réactions d'hydratation se déroulent rapidement entre ciment, eau et sable grossier de mâchefers lorsqu'il est introduit au mélange, ce qui semble avoir pour effet de diminuer le temps de prise [Aggarwal et al., 2007, Aggarwal & Siddique, 2014].  
Entre la mesure de la teneur en air et le remplissage des moules un certain temps s'est écoulé

1. La différence de teneur en air, 2,5%. Il faut donc faire  $2,5 \times 25 = 62,5 \text{kg}$ .

(environ 10 minutes), le temps de vider la bétonneuse, vider l'aéromètre pour éviter que le béton ne prenne à l'intérieur, etc. Dès lors, la teneur en air dans les moules est sans aucun doute, plus importante que ce qu'elle n'a été réellement mesurée. Cela induit donc, une diminution de la masse volumique comme il l'est décrit dans l'analyse 1.



FIGURE 8.6 – Ensemble des échantillons pour la composition BL G100 S100.

Le béton BL G100 S100 en est le parfait exemple. Comme le montre la FIGURE 8.6, la surface est fort lisse pour les cubes, médiocre pour les cylindres et très mauvaise pour les prismes. En réalité, les cubes ont été réalisés en premier. Le béton était alors suffisamment ouvrable que pour se placer correctement dans l'ensemble du moule. Les cylindres et les prismes ont ensuite, été confectionnés, respectivement dans cet ordre. Dès lors, il paraît évident que la teneur en air pour les cubes est bien moindre que celle dans les prismes et, en suivant ce raisonnement, celle dans les cubes est inférieure à celle qui a été mesurée à l'aide de l'aéromètre.

- ◇ **Interprétation 3** : Il est évident que la masse volumique de BL G0 S30 est trop faible par rapport à ce qui était attendu. L'une des raisons principales qui pourrait expliquer ce phénomène est un mauvais remplissage des échantillons accompagné d'une mauvaise vibration. Cette faible valeur est importante car elle pourra expliquer une perte de résistance par exemple, comme il en sera question dans la SECTION 9.1.

Les trois tests décrits précédemment ont maintenant été réalisés et leurs résultats ont été analysés. Il en ressort que les granulats de mâchefers ont une affinité plus forte avec le béton que le sable grossier de mâchefers. En effet, la demande en SP est très conséquente lorsque du sable grossier de mâchefers est introduit, même en faible quantité, ce qui induit un prix de production plus conséquent.

Cependant, en faisant abstraction de ce phénomène, une quantité limitée de mâchefers,  $\leq 30-50\%$ , permet d'acquérir, moyennant une teneur en air plus importante et une masse volumique plus faible, des résultats plus que satisfaisants.

Néanmoins, les propriétés à l'état frais seules ne garantissent pas une bonne pérennité à un béton. Il faut se concentrer dans un premier temps, sur les propriétés mécaniques à l'état durci et, dans un second temps, sur les indicateurs de durabilité et les attaques, potentiellement dommageables sur les bétons (cfr. CHAPITRE 4).

# Chapitre 9

## Tests sur béton à l'état durci

Tous les essais présentés dans la SECTION 7.2 n'ont, malheureusement, au vu de la crise sanitaire, pu être effectués. Les essais qui n'ont pu être réalisés pourront éventuellement, dans un futur plus ou moins proche, l'être puisque tous des échantillons sont disponibles, préparés et stockés dans la chambre d'acclimatation.

Ci-dessous, la liste des essais qui n'ont pu être réalisés :

- ◇ Absorption d'eau par remontée capillaire : Cinq compositions n'ont pu être testées, BL G50 S0 et l'ensemble des bétons contenant du sable grossier de mâchefers de mâchefers ;
- ◇ Carbonatation accélérée : Des mesures prises toutes les semaines ne pouvaient se faire. Sera disponible uniquement l'avancement du front de carbonatation à 28 jours pour l'ensemble des compositions et à 70 jours pour le béton de référence, BL G30 S0 et BL G100 S0 ;
- ◇ Diffusion forcée d'ions chlore : Seul le béton de référence a pu être testé ;
- ◇ Cycle de gel/dégel : Aucun béton n'a pu être testé ;
- ◇ Perméabilité à l'oxygène : Seul le béton de référence a pu être testé.

### 9.1 Compression à 28 jours

#### Résultats

Un premier diagramme en bâtonnets vient présenter les différentes résistances obtenues pour l'ensemble des compositions (cfr. FIGURE 9.1). Il est important de noter qu'il s'agit, ici, des résistances obtenues sur cylindre. Si les essais ont été réalisés sur des cubes, ils ont été, au préalable, pondérés par un facteur de 0,925 comme il l'a été mentionné dans la SECTION 7.2.1.

Comme il le sera détaillé par la suite, certains résultats ne sont pas cohérents. La FIGURE 9.2 permet une meilleure compréhension de ces divergences. Dans celle-ci, la résistance n'est plus représentée en fonction de la composition mais de la masse volumique précédemment calculée. De cette façon, les éventuels problèmes rencontrés lors des mesures des masses volumiques pourront être mis en parallèle des problèmes rencontrés lors des essais de résistance en compression à 28 jours.

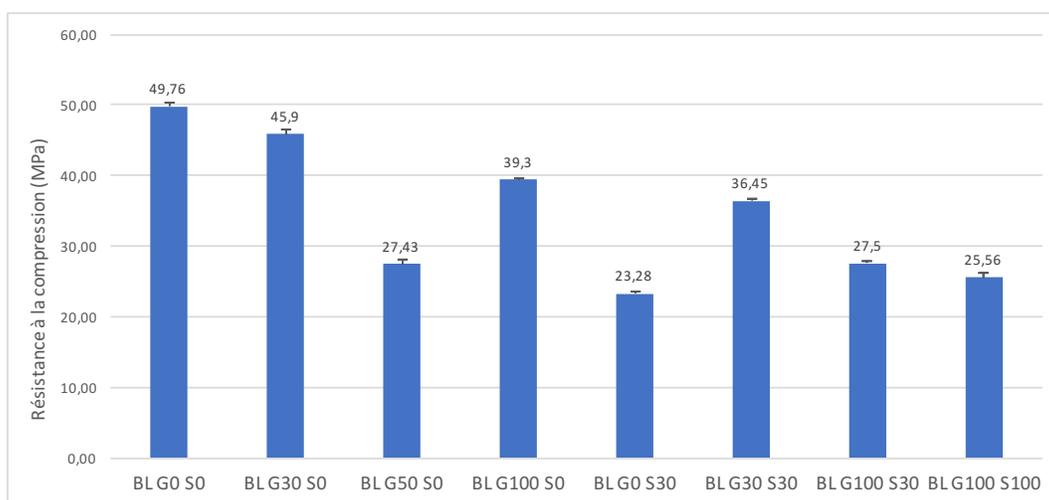


FIGURE 9.1 – Essais de compression à 28 jours.

Pour être tout à fait complet, dans cette FIGURE 9.2, est également représentée une interpolations linéaire entre les bétons ne contenant pas de sable grossier de mâchefers. De cette façon, il sera aisé de visualiser si les résultats s'écartent de ceux attendus.

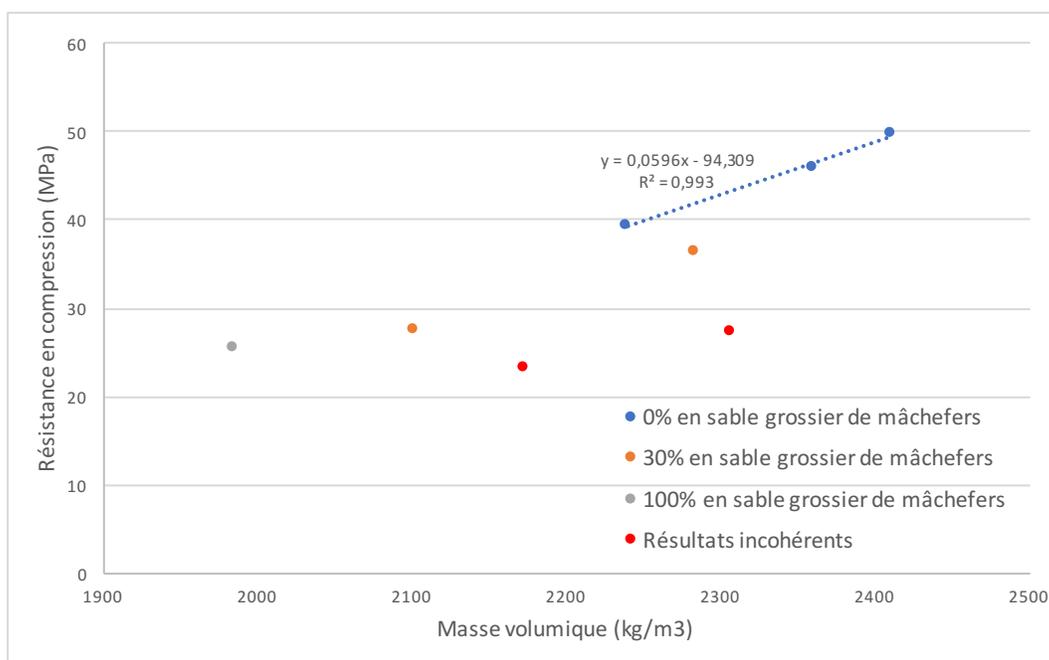


FIGURE 9.2 – Essais de compression à 28 jours en fonction de leur masse volumique.

## Observations

- ◇ **Observation 1** : Au plus la proportion de M.I.O.M est importante, au moins la résistance est grande. En effet, aucun béton n'a une résistance supérieure à celle du béton de référence. Par ailleurs, il peut déjà être noté que l'objectif d'une résistance C30/37 est plus qu'atteint dans le cas du béton de référence. En revanche, dans le cas de BL G100 S30 et BL G100

S100, les résistances obtenues ne sont pas suffisantes pour satisfaire ce critère.

Les cas des bétons BL G50 S0 et BL G0 S30 seront, quant à eux, plus amplement détaillés par la suite ;

- ◇ **Observation 2 :** Combiné avec une substitution par des granulats de mâchefers, une substitution par du sable grossier de mâchefers donne lieu à des résistances plus faibles. Par ailleurs, il semble que passé un certain taux de substitution en sable grossier de mâchefers, la perte de résistance ne se fait plus trop sentir comme en témoigne la différence sur les FIGURES 9.1 et 9.2 entre les bétons BL G100 S30 et BL G100 S100 ;
- ◇ **Observation 3 :** Deux bétons n'ont vraisemblablement pas atteint la résistance attendue. Dans un premier temps, il faut parler du BL G50 S0. Ce dernier devrait avoir une résistance supérieure à BL G100 S0 mais inférieure à BL G30 S0. Dès lors, elle devrait osciller entre 39,3 et 45,9 MPa, or il n'en est rien comme le montre la FIGURE 9.1. Par ailleurs, la masse volumique ne peut être mise en cause ici. En effet, au vu de la FIGURE 8.5, elle est bien comprise entre les deux bétons évoqués, mais la résistance se trouve bien en deçà de l'interpolation réalisée. Dans un second temps, l'attention doit se tourner vers le béton d'appellation BL G0 S30. La résistance de ce dernier est elle aussi inférieure aux attentes. En effet, BL G30 S30 qui possède 30% de granulats de mâchefers en plus, a une résistance de plus de 10MPa supérieure (cfr. FIGURE 8.4) or le phénomène inverse devrait être constaté ! Dans le cas présent, la masse peut être mise en cause comme le démontre la FIGURE 8.5 et la SECTION 8.3.

## Analyse

- ◇ **Interprétation 1 :** La raison qui peut expliquer cette perte de résistance est double. D'une part, il y a une masse volumique inférieure et d'autre part, une teneur en air qui est plus grande lorsque des M.I.O.M sont introduits. Cependant, la perte de résistance n'est que modérée lorsque le taux de M.I.O.M substitués reste suffisamment faible. Celle-ci pourra être compensée à long terme grâce à la redistribution de l'eau. En effet, les M.I.O.M en ont absorbée une certaine quantité et elle pourra être redistribuée de façon à obtenir une réaction d'hydratation complète comme il en a été question dans la SECTION 3.6 ;
- ◇ **Interprétation 2 :** C'est dans le sable grossier de mâchefers que les principaux métaux lourds sont contenus, dont notamment l'aluminium. Ce dernier, au contact du ciment et de l'eau, va entraîner sur le long terme, des réactions qui vont produire de l'hydrogène (cfr. SECTION 2.5), un gaz ayant pour effet de soit, augmenter le pourcentage de vide au sein des bétons, soit induire des pressions internes et donc, indirectement, de diminuer la résistance de ceux-ci [Pera et al., 1997, Rübner, 2006, del Valle-Zermeno et al., 2017, Xuan et al., 2018]. Dans le cas où le béton est perméable, comme c'est le cas pour BL G100 S100, une partie du gaz créé peut directement être relâché au sein de l'atmosphère ce qui n'engendre pas de pression interne et qui permet de maintenir une certaine résistance.
- ◇ **Interprétation 3 :** Le béton BL G0 S30 a une masse volumique trop faible par rapport à celle escomptée, ce qui explique pourquoi la résistance obtenue est en deçà des attentes. Pour le béton BL G50 S0, la masse volumique ne peut être mise en cause, une des raisons qui pourrait expliquer ce manque de résistance est la forme de l'éprouvette testée. En effet, pour

toutes les autres compositions, les essais étaient réalisés sur des cubes tandis que pour le béton BL G50 S0, il a été réalisé sur des cylindres de 160x320mm. Le coefficient d'équivalence entre cylindre et cube doit donc, peut-être être adapté lors de l'utilisation de M.I.O.M. Néanmoins, cette hypothèse n'est que peu probable et c'est pourquoi il faut privilégier l'hypothèse d'une mauvaise réalisation des échantillons.

## 9.2 Absorption d'eau par remontée capillaire

### Résultats

Grâce à l'ÉQUATION 7.2, il est possible de calculer les variations de masse induites suite à l'eau remontée dans les capillaires. Pour comprendre comment évolue ce coefficient, il faut le représenter au fil du temps comme le montre la FIGURE 9.3. Il est important de noter qu'en abscisse, il ne s'agit pas du temps brut mais de la racine carrée du temps. De ce fait, une linéarisation s'opère entre les différents points et il est plus facile de percevoir les éventuelles variations.

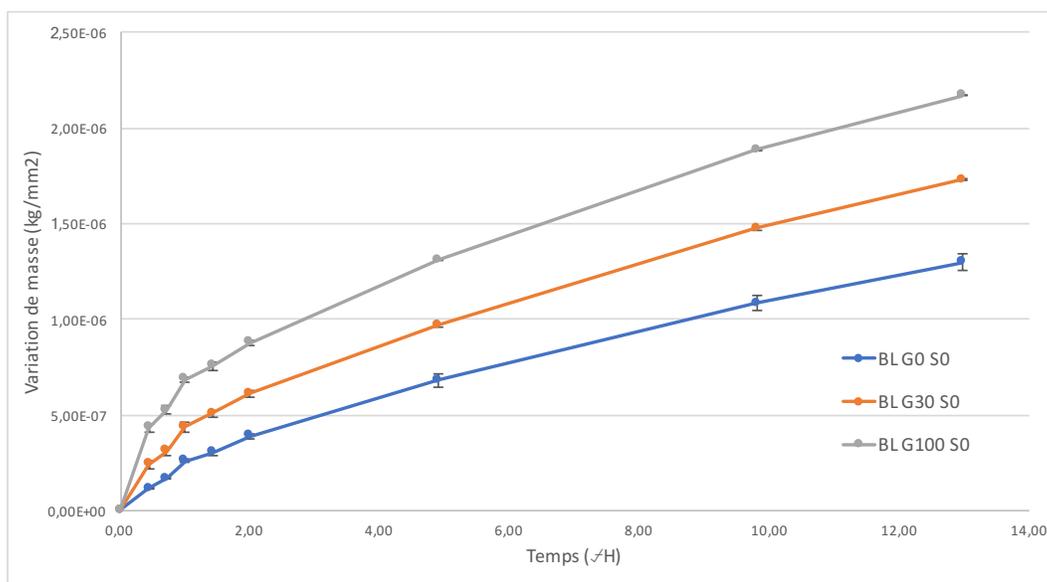


FIGURE 9.3 – Variation de masse suite à des essais d'absorption d'eau par remontée capillaire pour trois compositions et écart-type correspondant.

Sur base des hauteurs d'eau mesurées par remontée capillaire sur les quatre faces de chaque éprouvette, il est possible de calculer une moyenne et de représenter ces résultats au cours du temps. Cela a été fait à la FIGURE 9.4. Les écarts-types n'ont, ici, pas été représentés car ils se seraient superposés les uns les autres. Pour les connaître, il faut se référer à la TABLE 10.1 de l'ANNEXE H.

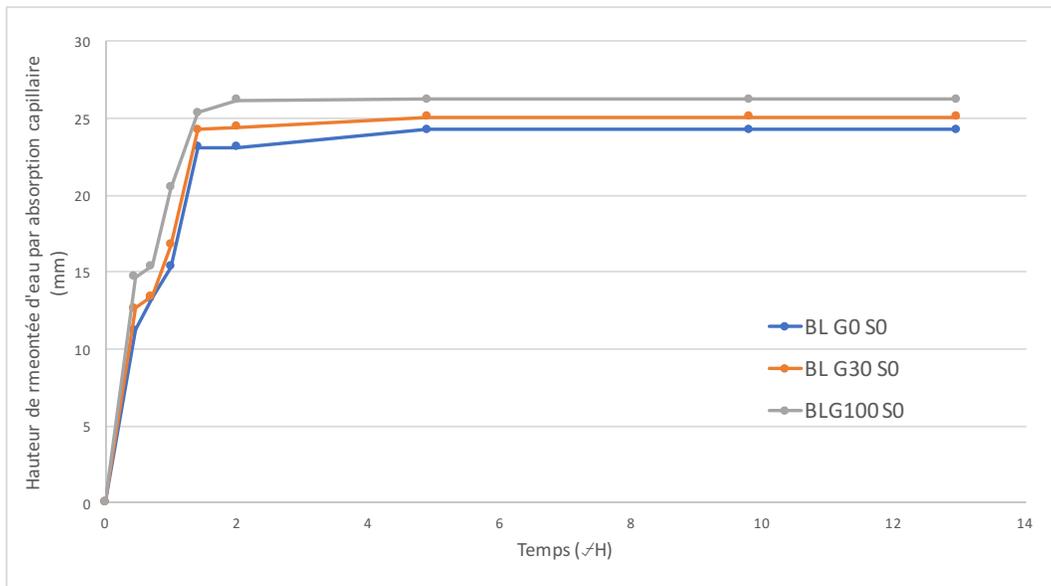


FIGURE 9.4 – Hauteur moyenne de remontée d’eau par absorption capillaire pour trois compositions.

Pour comprendre la dynamique du système, il est possible de calculer un coefficient de sorption sur base de l'ÉQUATION 7.3. En réalité, ce dernier n'est rien d'autre que la pente de l'interpolation linéaire passant par chacune des mesures faites sur une durée de 24 heures. En effet, les valeurs observées permettant d'obtenir un fléchissement du graphique, permettent également de calculer le gradient à partir de la section linéaire initiale conformément à la norme NBN EN 13057-15.

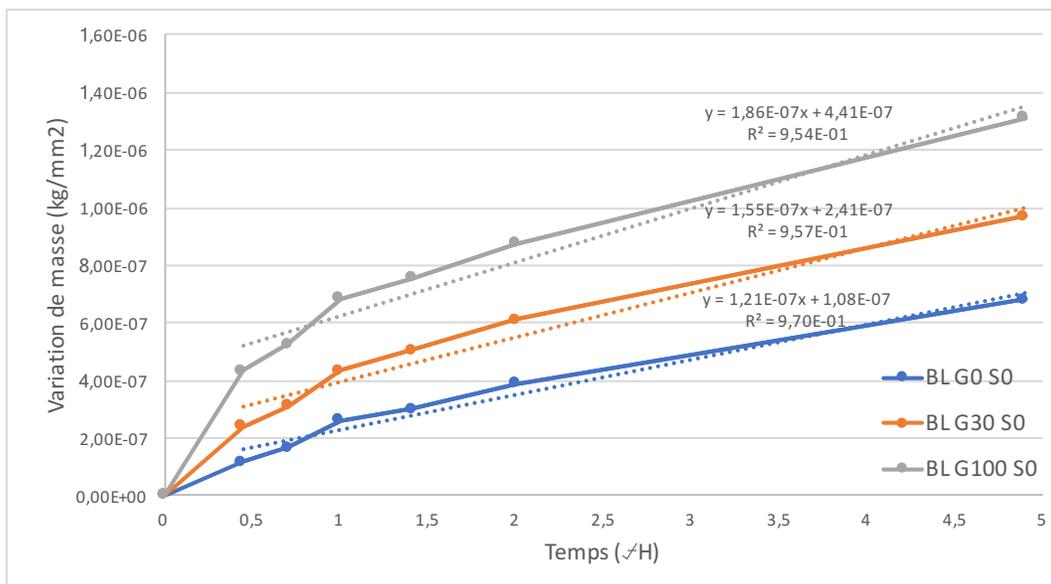


FIGURE 9.5 – Absorption capillaire mesurée sur 24 heures et interpolation linéaire afin de définir le coefficient de sorption de chaque composition.

Pour plus de clarté, les pentes de chaque interpolation sont également reprises dans la TABLE 9.1. De cette façon, il sera bien plus aisé de les comparer.

À noter, pour plus d'informations concernant ces résultats, il faut se rendre dans l'ANNEXE H. Elle reprend l'ensemble des mesures qui ont été prises sous la forme de tableaux (moyennes et écarts-types).

TABLE 9.1 – Pentes calculées sur des interpolations linéaires obtenues pour chacune des compositions.

Type	Pente ( $\text{kg}/(\text{mm}^2 \text{ h}^{0,5})$ )
BL G0 S0	$1,21 \cdot 10^{-7}$
BL G30 S0	$155 \cdot 10^{-7}$
BL G100 S0	$1,86 \cdot 10^{-7}$

## Observations

- ◇ **Observation 1** : Au plus la concentration en M.I.O.M est importante, au plus l'eau absorbée par remontée capillaire l'est aussi comme le montre la FIGURE 9.3. Une autre façon de le dire est la suivante, au plus la proportion de M.I.O.M est importante, au plus le coefficient de sorption capillaire l'est aussi comme le démontre les valeurs de la TABLE 9.1 ;
- ◇ **Observation 2** : L'absorption capillaire est bien plus importante à court terme, qu'à long terme, ce qui se traduit par un des pentes qui décroissent à mesure que le temps avance sur la FIGURE 9.3. Elle montre également la présence d'un semblant de pallier, un taux maximal. En effet, après x jour, la quantité d'eau absorbée est pratiquement égale à 0 ;
- ◇ **Observation 3** : La FIGURE 9.4 montre que la hauteur d'eau mesurée sur les faces atteint très rapidement un plateau. Ensuite, les mesures effectuées sont constantes ; or, une variation de masse se fait toujours ressentir ;

## Analyse

- ◇ **Interprétation 1** : L'introduction de mâchefers au sein d'un béton induit une augmentation de la porosité et du réseau capillaire comme il l'a été mentionné dans la SECTION 3.6. Cette augmentation entraîne irrémédiablement une augmentation de la quantité d'eau pouvant être absorbée comme cela a été observé ;
- ◇ **Interprétation 2** : Dans un premier temps, les pores les plus grossiers se remplissent d'eau, ce qui entraîne une augmentation conséquente de la masse. Par la suite, si la connectivité capillaire le permet, l'eau remonte par les pores. Au fil du temps, ce sont des pores de plus en plus fins qui se remplissent d'eau, ce qui se traduit par une quantité d'eau absorbée de plus en plus faible. Sur le très long terme, cette quantité tend vers une asymptote, donc une valeur maximale comme l'illustre parfaitement la FIGURE 9.3. En effet, tous les pores ouverts sont saturés et aucune eau supplémentaire ne peut être absorbée.  
Il faut noter que ce phénomène, bien que les valeurs soient plus importantes, est observable quelque soit le taux de substitution de mâchefers ;

### 9.3 Absorption d'eau totale par immersion

#### Résultats

Les premiers résultats à présenter sont ceux de l'absorption totale en eau ainsi que ceux de la porosité totale ouverte. Pour calculer ces valeurs, les ÉQUATIONS 7.4 et 7.6 ont été utilisées. Ensuite, les résultats ont été présentés sous la forme d'un diagramme en bâtonnets (cfr. FIGURE 9.6).

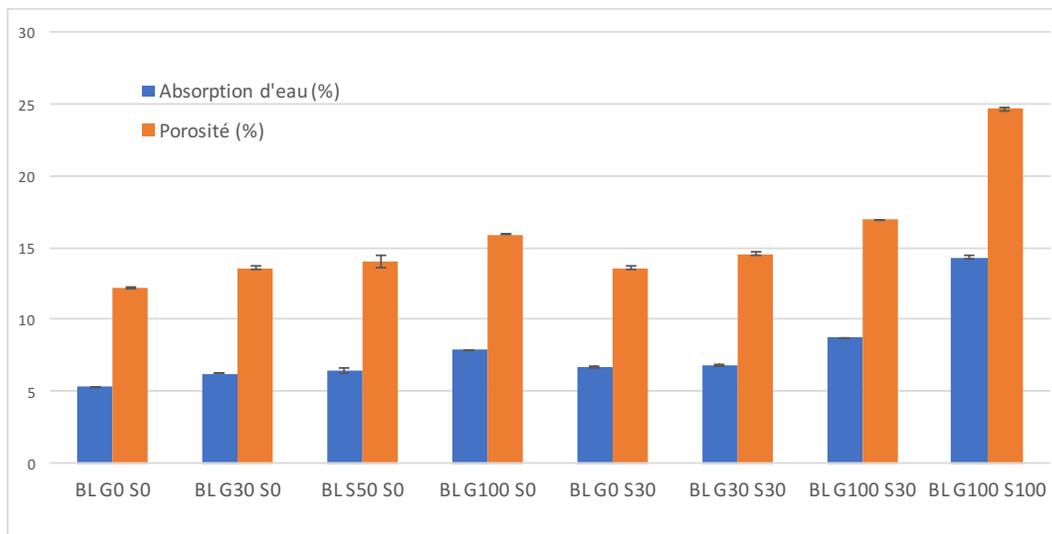


FIGURE 9.6 – Absorption totale d'eau et porosité.

Grâce à un test d'absorption d'eau par immersion totale, il est également possible d'obtenir d'autres résultats. À l'aide de l'ÉQUATION 7.5, la masse volumique des différents bétons composés se calcule rapidement. Les résultats peuvent, ensuite, être comparés à ceux de la SECTION 8.3, c'est-à-dire, les masses volumiques acquises à l'état frais (cfr. FIGURE 9.7).

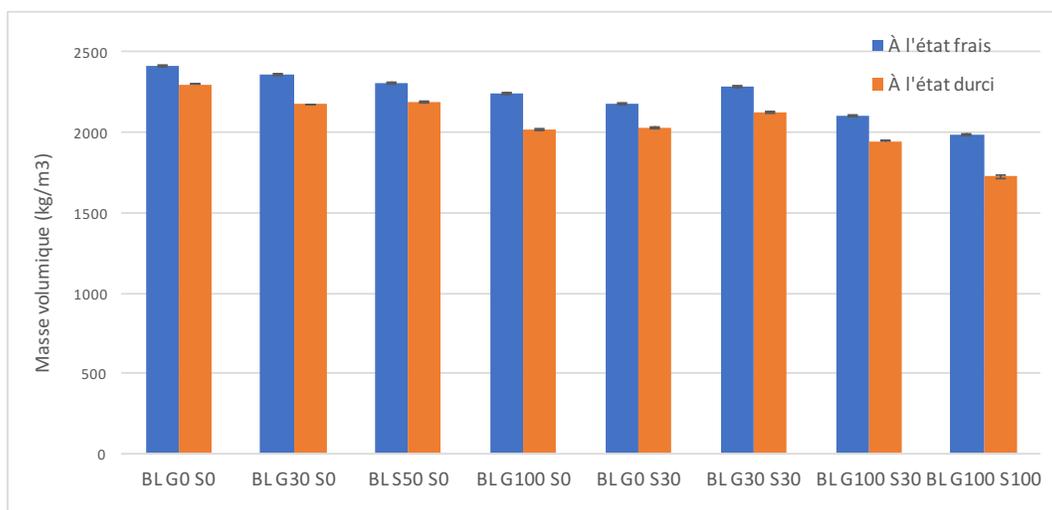


FIGURE 9.7 – Comparaison de la masse volumique obtenue à l'état frais et à l'état durci.

Les FIGURES 9.8 et 9.9 vont de pair. Elles permettent de comparer l'influence qu'une substitution par 30% de sable grossier de mâchefers peut engendrer respectivement sur l'absorption d'eau totale et la porosité par rapport à un béton n'en contenant pas.

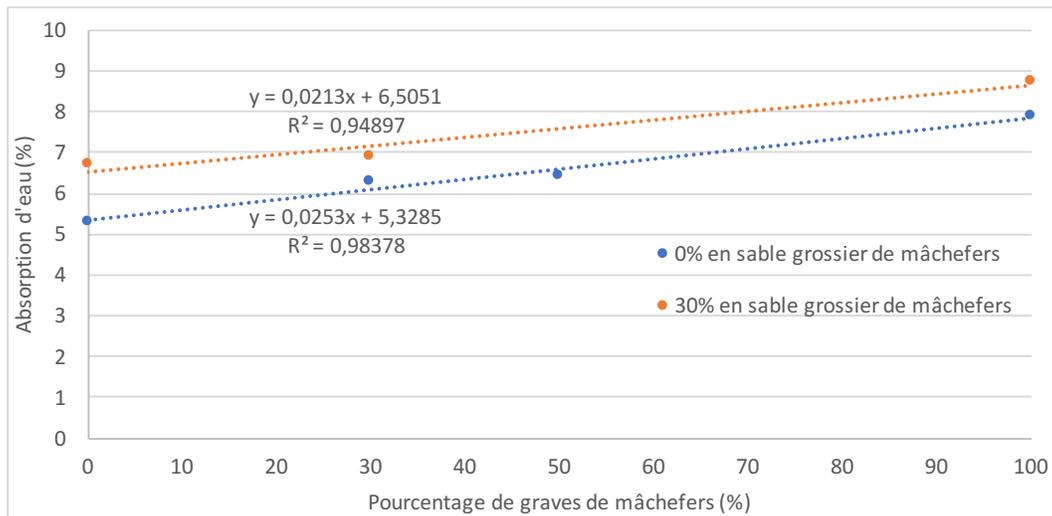


FIGURE 9.8 – Comparaison de l'absorption totale entre des bétons ayant un taux de substitution de 0% et 30% de sable grossier de mâchefers.

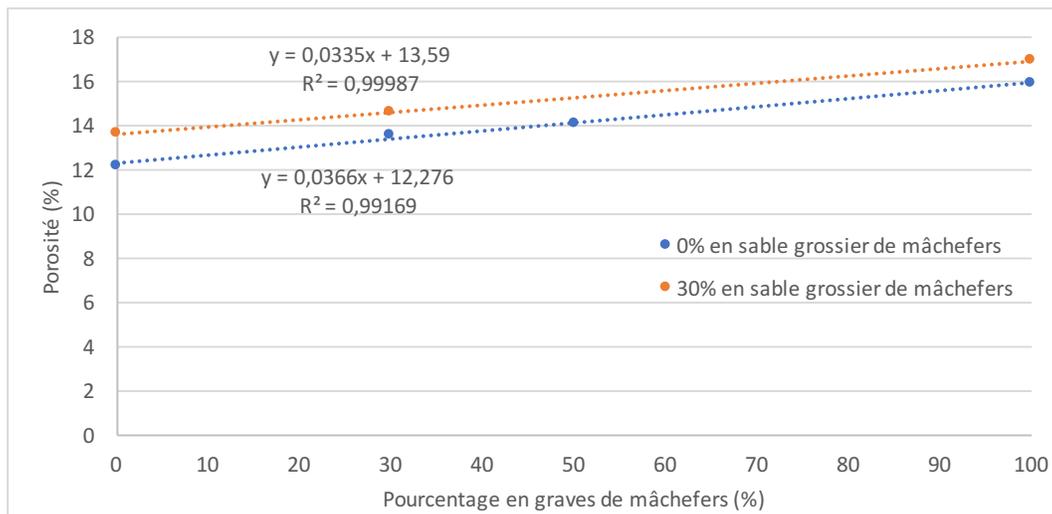


FIGURE 9.9 – Comparaison de la porosité totale ouverte entre des bétons ayant un taux de substitution de 0% et 30% de sable grossier de mâchefers.

## Observations

- ◇ **Observation 1** : Comme le démontre les FIGURES 9.6, 9.8 et 9.9, au plus la concentration en mâchefers est importante, au plus l'absorption d'eau totale et la porosité sont importantes. Les valeurs obtenues restent dans des limites "acceptables" comparées à celles du béton de référence si ce n'est le béton BL G100 S100 ;

- ◇ **Observation 2 :** En utilisant les FIGURES 9.8 et 9.9, il apparaît également quelques divergences entre les bétons contenant du sable grossier de mâchefers et les bétons n'en contenant pas. En effet, dès que du sable grossier de mâchefers est introduit dans les mélanges, l'absorption d'eau totale tout comme la porosité, augmentent de l'ordre de quelques pourcents. Cette différence est pratiquement constante, et ce, quelque soit la teneur en granulats de mâchefers ;
- ◇ **Observation 3 :** Chaque masse volumique calculée est bien du même ordre de grandeur que celle qui avait été calculée à l'état frais comme en témoigne la FIGURE 9.7. Les observations qui avaient été faites dans la SECTION 8.3 sont donc, également valables ici.  
Il faut cependant, noter une légère différence ( $\pm 200\text{kg/m}^3$ ) entre les mesures à l'état frais et celles à l'état durci.

## Analyse

- ◇ **Analyse 1 :** La forme anguleuse des particules de mâchefers et le temps de prise semblent diminuer suite à leur utilisation (cfr. SECTION 8.1) amènent à une porosité bien plus importante lorsque des mâchefers sont utilisés. Cette augmentation de porosité permet également d'expliquer pourquoi l'absorption capillaire totale est plus importante lorsque ces derniers sont incorporés dans les mélanges.  
Le cas de BL G100 S100 est particulier comme le montre la FIGURE 8.6. En effet, ce dernier n'ayant pu être compacté de la meilleure des façons, cela explique de ce fait, pourquoi les résultats obtenus sont si importants. Par transitivité, cette porosité induit également une absorption d'eau totale bien supérieure à celle des autres compositions ;
- ◇ **Analyse 2 :** Le fait que les fines induisent une porosité plus importante et donc, une absorption d'eau totale également plus importante, a déjà été évoqué dans l'analyse 2 de la SECTION 9.1.  
Induire du sable grossier de mâchefers amène également une faible quantité d'aluminium dans le mélange. Ce dernier, mis en présence d'eau et de ciment, va entraîner une réaction libérant de l'hydrogène gazeux et donc, augmenter la quantité de pores et la connectivité capillaire [Pera et al., 1997, Rübner, 2006, del Valle-Zermenon et al., 2017, Xuan et al., 2018].
- ◇ **Analyse 3 :** Il n'est pas nécessaire d'analyser ici, l'ensemble des phénomènes observés puisque cela est l'objet de la SECTION 8.3. La seule analyse qui se doit d'être faite concerne la différence obtenue entre masse volumique à l'état frais et à l'état durci.  
Cette analyse et justification peut être menée de la façon suivante. Lorsque les essais d'absorption d'eau par immersion totale ont été lancés, les échantillons ont été plongés entièrement dans l'eau. Or, de l'air se trouvait encore au sein de chaque éprouvette, ce dernier n'a pu s'échapper et a été emprisonné et compressé. Cette quantité d'air avoisine souvent 1% du volume total, ce qui représente, en terme de masse, environ  $200 \pm 50\text{kg}$  en fonction des compositions. Lors du calcul de la masse volumique à l'état frais, de l'air pourrait également être contenu au sein des vides, mais il n'en est rien ! En effet, à l'état frais, tous les vides sont remplis d'eau de gâchage.  
Afin d'obtenir les mêmes valeurs entre état frais et état durci, il aurait fallu réaliser le test d'absorption par immersion totale sous vide. De cette façon, l'air occlus aurait été retiré de tous les échantillons.

## 9.4 Carbonatation accélérée

### Résultats

Avant de parler des résultats, il est important de préciser que le code couleur utilisé précédemment pour l'absorption capillaire et l'absorption par immersion a été conservé. Chaque composition a donc sa couleur attitrée. Il sera également question de mesures à différentes échelles de temps, c'est pourquoi chaque semaine à également une couleur propre.

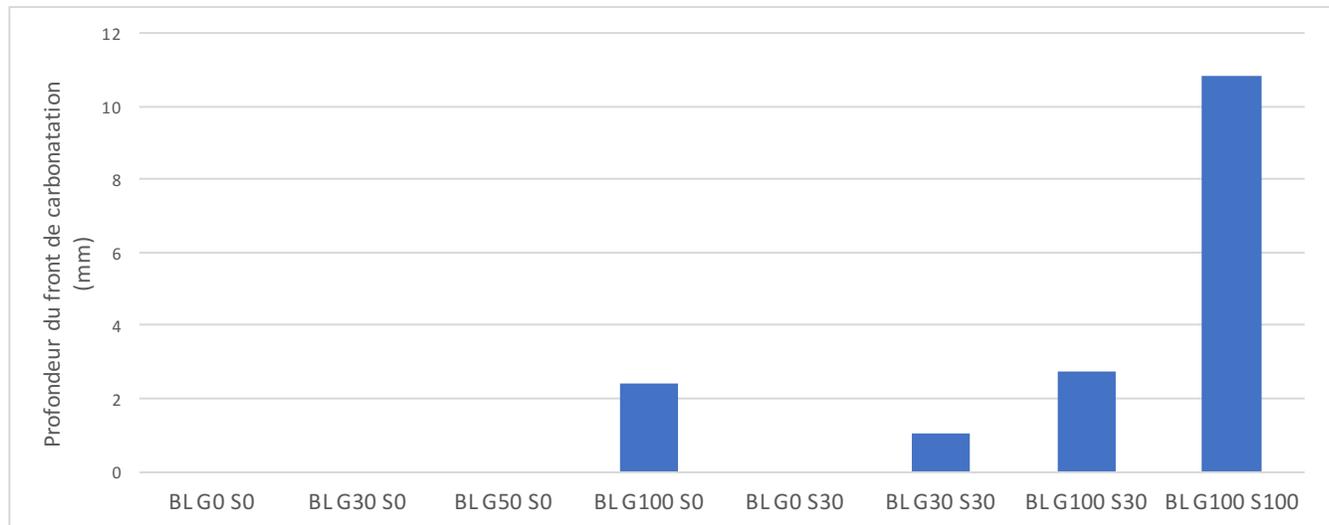


FIGURE 9.10 – Profondeur de carbonatation mesurée après 28 jours en chambre.

La FIGURE 9.10 montre dans un premier temps l'ensemble des compositions après 28 jours en chambre de carbonatation. Le diagramme choisit est, à nouveau, en bâtonnets, car il permet de comparer très rapidement les résultats et de visualiser très clairement les divergences. Les valeurs présentées ici, sont issues d'une moyenne entre l'avancement du front de carbonatation mesuré sur les quatre faces de l'échantillon testé.

Cependant, la FIGURE 9.10 ne donne que très peu d'informations sur la progression du front de carbonatation, elle ne fait que synthétiser l'idée générale. C'est pourquoi d'autres graphiques doivent être réalisés.

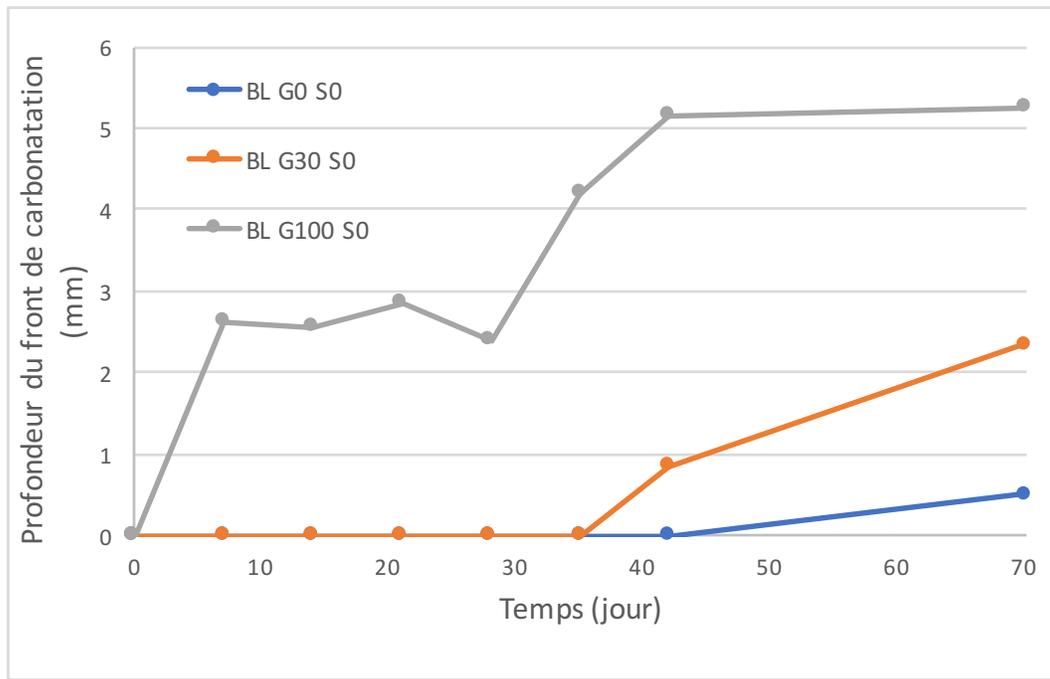


FIGURE 9.11 – Avancement du front de carbonatation pour trois compositions contenant des granulats de mâchefers de 0 à 70 jours.

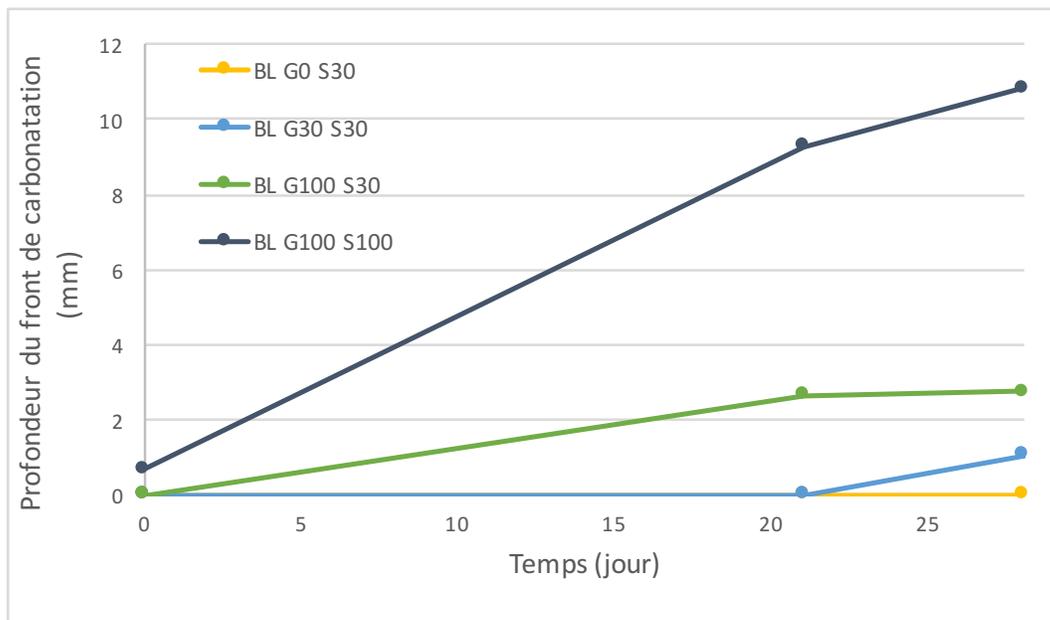


FIGURE 9.12 – Avancement du front de carbonatation pour les quatre compositions contenant du sable grossier de mâchefers de 0 à 28 jours.

Les FIGURES 9.11 et 9.12 permettent de mieux visualiser l'avancement du front de carbonatation. Ces figures sont importantes car elles permettent d'une part, de comparer les différentes compositions et, d'autre part, de mettre en avant la cinétique du phénomène. En effet, au plus la pente de la droite est élevée, au plus la progression du front de carbonatation est rapide.

Il est important de noter que les figures ont été scindées en deux, car pour trois compositions, des mesures ont été réalisées jusqu'à 70 jours alors que pour les quatre autres, celles-ci n'ont été prises que durant 28 jours.

Le béton d'annotation BL G50 S0 est particulier. En effet, les mesures ont été réalisées seulement sur 28 jours. Néanmoins, ne contenant pas de sable grossier de mâchefers, il n'a pas été représenté sur la FIGURE 9.12. Par ailleurs, après 28 jours, la carbonatation n'avait pas encore débuté et, c'est pourquoi, il n'apparaît pas non plus sur la FIGURE 9.11.

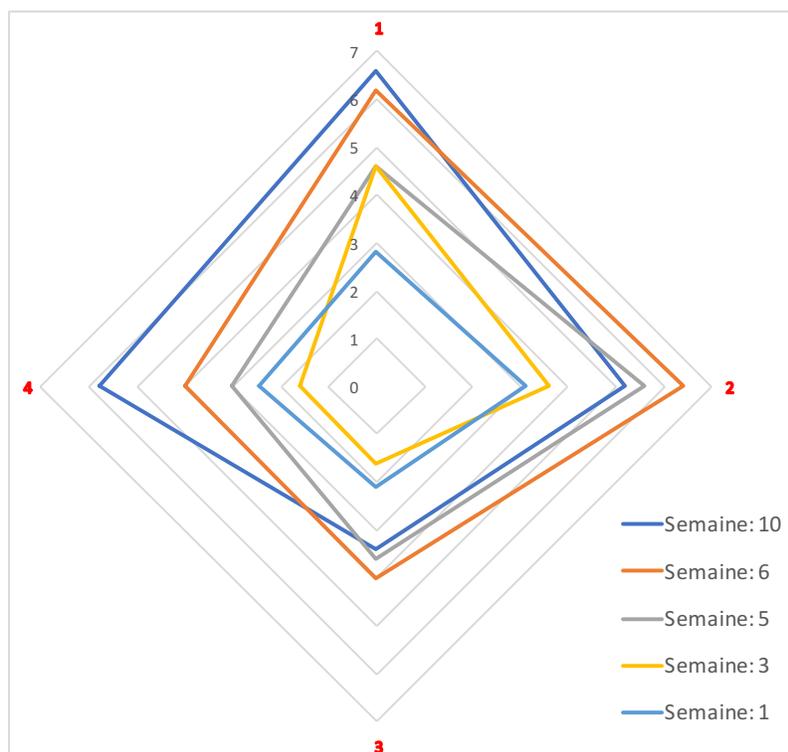


FIGURE 9.13 – Progression de l'avancement du front de carbonatation (mm) pour le béton de composition BL G100 S0, mesure prise de 0 à 70 jours.

Sur les FIGURES 9.11 et 9.12, il a été question de cinétique du phénomène. La FIGURE 9.13 aborde également ce sujet en mettant en évidence l'avancement du front de carbonatation au sein du béton BL G100 S0. Les valeurs évoquées précédemment étaient issues d'une moyenne réalisée entre les quatre surfaces de l'éprouvette or, en pratique, il est important de les distinguer car elles n'ont pas subi le même compactage.

La FIGURE 9.13 met donc en avant, l'avancement de la profondeur de carbonatation au fil des semaines, et ce, en fonction de chaque face selon la numérotation détaillée dans la SECTION 7.2.4. Il est important de préciser que la progression du front de chaque béton ayant carbonaté se trouve dans l'ANNEXE I. Dans cette annexe se trouve également à la FIGURE 10.1, l'ensemble des échantillons découpés au temps  $t_0$  et sur lesquels de la phénolphthaléine a déjà été projetée.

L'ensemble des figures évoquées auparavant ne permet pas de réaliser une comparaison simple et précise entre les bétons contenant du sable grossier de mâchefers et les bétons n'en contenant pas. L'objectif de la FIGURE 9.14 est de mettre avant les disparités qu'il peut y avoir, puisqu'elle compare l'avancement du front de carbonatation entre les bétons possédant ou non 30% de fines

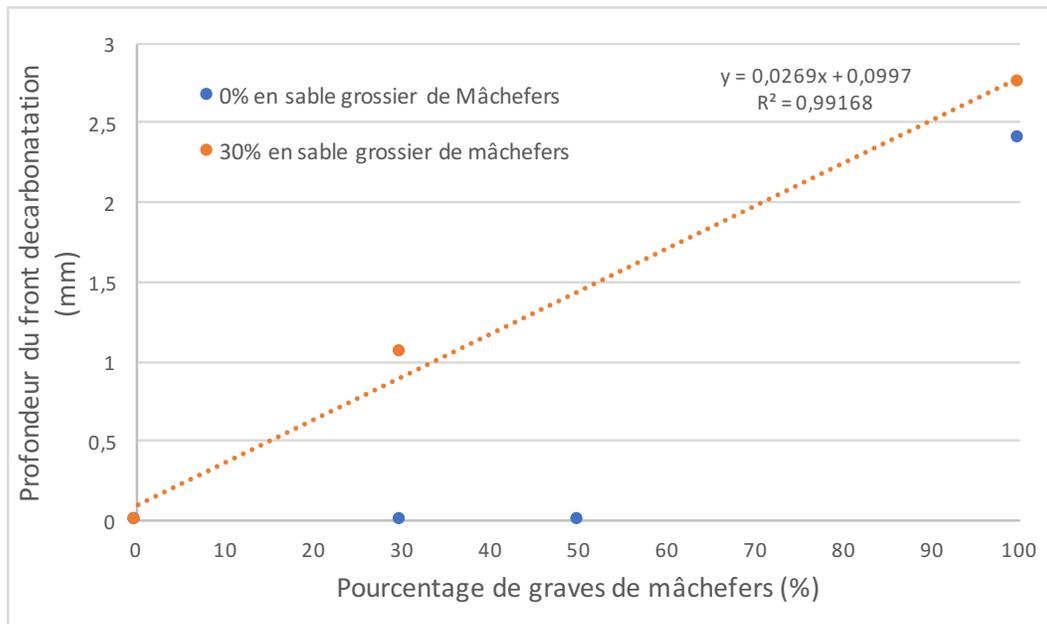


FIGURE 9.14 – Comparaison de l’avancement du front de carbonatation entre des bétons ayant un taux de substitution de 0% et 30% de sable grossier de mâchefers à 28 jours.

de mâchefers en fonction de leur taux de substitution en granulats de mâchefers.

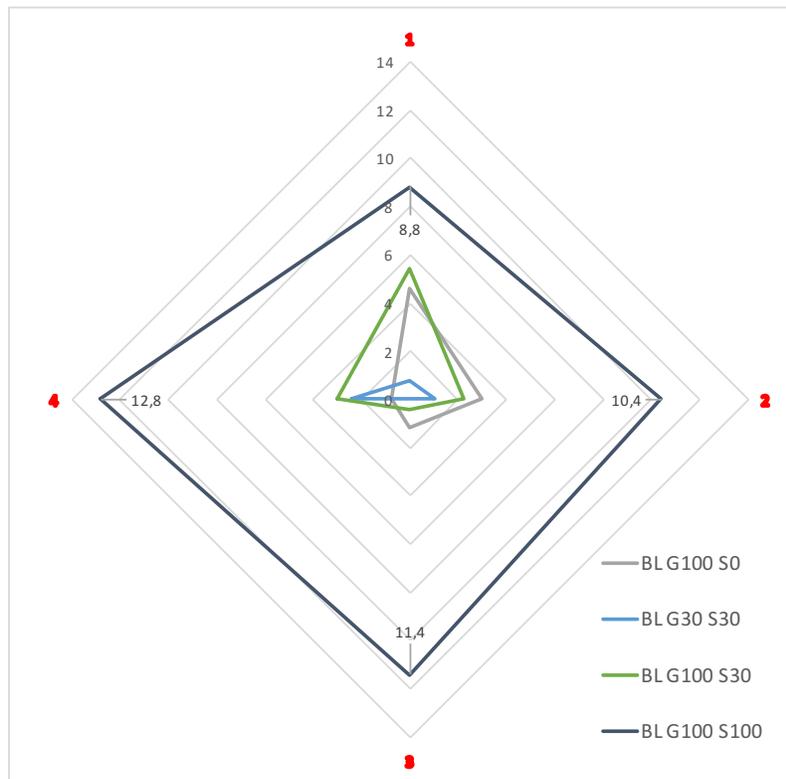


FIGURE 9.15 – Comparaison de l’avancement du front de carbonatation (mm) pour les bétons ayant carbonatés après 28 jours en chambre en fonction de chacune des faces exposées.

Après 28 jours, seulement quatre bétons ont carbonaté. Pour comparer l'avancement du front de carbonatation sur chacune des faces, une figure similaire à la FIGURE 9.14 a été réalisée, il s'agit de la FIGURE 9.15. Sur celle-ci apparaît à nouveau clairement l'avancement du front de carbonatation à 28 jours sur chacune des faces.

Le béton BL G100 S100 subissant une carbonatation très importante, les moyennes mesurées sur chacune des faces ont également été représentées à titre indicatif.

## Observations

- ◇ **Observation 1** : Sans comparer le comportement du sable grossier de mâchefers et des granulats de mâchefers, il peut, dans un premier temps, être constaté qu'une substitution par des mâchefers augmente la progression du front de carbonatation comme en témoigne les FIGURES 9.10, 9.11 et 9.12. Par ailleurs, la progression de ce front est de moins en moins rapide au fur et à mesure que le temps passe. En effet, hormis pour le béton BL G100 S0 où un palier apparaît, les autres ont, une fois que la carbonatation est initiée, une pente qui s'adoucit entre chaque mesure ;
- ◇ **Observation 2** : La FIGURE 9.13 permet certes, de visualiser la progression du front mais aussi de distinguer un comportement distinct entre les différentes faces. Ce comportement est également visible à la FIGURE 9.15. De manière générale, les mesures effectuées sur la face numéro 1, à savoir la face en partie supérieure (cfr. SECTION 7.2.4), sont plus grandes que les trois autres. Les mesures des faces numérotées 2 et 4, représentant les côtés de l'échantillon, ont quant à elles, le même ordre de grandeur. Pour finir, la face inférieure, la numéro 3, a des valeurs d'avancement plus faibles que les trois autres.  
Le cas du béton d'appellation BL G100 S100 est un peu particulier, et c'est pourquoi les constatations réalisées ne peuvent lui être appliquées. Les résultats pour les autres compositions se trouvent dans l'ANNEXE I ;
- ◇ **Observation 3** : À 28 jours, il est possible de comparer la progression du front de carbonatation entre béton à base de sable grossier de mâchefers et béton n'en comportant pas. Il apparaît clairement que, dès que du sable grossier de mâchefers est introduit, la carbonatation est bien plus forte, ce qui se traduit par un avancement bien plus conséquent (cfr. 9.14). Pour appuyer ces propos, il faut mettre en parallèle ces résultats avec ceux de la FIGURE 9.15 qui les présentent de manière différente. Sur celle-ci, un seul béton ne contenant pas de sable grossier de mâchefers apparaît, le BL G100 S0 tandis que les trois autres en incluent.

## Analyse

- ◇ **Interprétation 1** : L'introduction des mâchefers induit une augmentation de la porosité suite à leur forme anguleuse (cfr. SECTIONS 3.6 et 9.3). Au plus la porosité est importante, au plus la diffusion de  $\text{CO}_2$  au sein de l'échantillon est aisée et donc, la carbonatation rapide. L'explication de la diminution de vitesse a déjà été expliquée dans la SECTION 4.2. Très rapidement, la carbonatation produit du carbonate de calcium,  $\text{CaCO}_3$ , plus volumineux que les réactifs de base ce qui a pour effet de boucher ou, au minimum, diminuer la section des pores ;

- ◇ **Interprétation 2 :** Lors de la confection des échantillons, les prismes sont moulés en trois couches successives. Entre chacune des couches, la table vibrante est utilisée afin de réaliser le compactage le plus optimal possible. Dès lors, la couche inférieure a été beaucoup plus compactée que ce que ne l'a été la couche supérieure. À cela peut également s'ajouter un effet gravitaire plus marqué en partie inférieure qu'en partie supérieure.

En terme de propriété physique du béton, ces différences induisent une porosité supérieure plus importante que celle retrouvée dans la partie inférieure. Les faces latérales numérotées 2 et 4 se trouvent entre les deux faces extrêmes, ce qui explique pourquoi les mesures obtenues se situent entre celles des faces numéros 1 et 3.

Le béton BL G100 S100 n'a pu être compacté efficacement comme expliqué dans la SECTION 8.3 et le montre la FIGURE 8.6, car son ouvrabilité était quasiment nulle. Dès lors, la porosité n'est plus dépendante de la face mais de la façon dont le compactage a été réalisé à l'aide de la truelle. En surface, il a pu l'être efficacement, ce qui offre une porosité plus faible. Sur les trois autres côtés cela n'a pu être effectué et explique donc pourquoi les résultats sont plus importants sur ces faces (cfr. FIGURE 9.15 et ANNEXE I) ;

- ◇ **Interprétation 3 :** Le désavantage majeur du sable grossier de mâchefers est qu'il contient des particules d'aluminium comme l'a rappelé la SECTION 9.1, qui risquent d'augmenter la porosité. En se rattachant à l'interprétation 1, cette augmentation entraîne une accélération de la carbonatation ;

## 9.5 Diffusion forcée d'ions chlore

### Résultats

L'intensité mesurée peut être représentée pour chacune des couches en fonction du temps, chose qui a été faite à la FIGURE 9.16. Sur celle-ci apparaît clairement les trois couches.

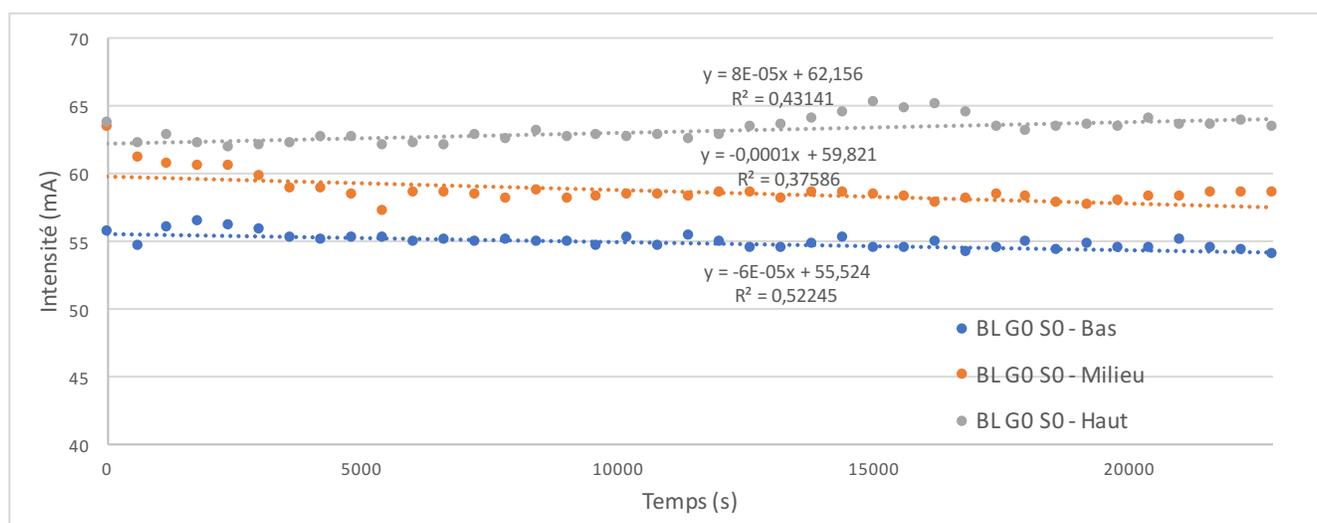


FIGURE 9.16 – Intensité mesurée toutes les 10 minutes après un essai de diffusion forcée d'ions chlore pour les trois couches du béton de référence.

Une autre façon de présenter les résultats est d'utiliser la charge totale passée de courant en coulombs, ce qui peut se faire à l'aide des ÉQUATIONS 7.7 et 7.8.

Initialement, la charge totale de chaque composition devait être comparée avec les autres et analysées sur un graphique. Comme cela n'a pu être réalisé, il n'est donné, ici, que la charge totale pour le béton de référence, celle-ci équivaut au final à 1418 Coulombs.

La TABLE 7.1 donne ensuite une indication sur le taux de perméabilité. Néanmoins, comme il l'a été dit, cette table n'est valable que pour une différence de potentiel de 60V or, ici, seulement 30V sont injectés. En suivant la loi d'Ohm, doubler la différence de potentiel revient à doubler la charge passée également par deux pour une même résistance<sup>1</sup>. Dès lors, la valeur à utiliser n'est plus 1418 Coulombs mais 2836 Coulombs.

## Observations

- ◇ **Observation 1 :** Au regard de la FIGURE 9.16, il peut être dit que le régime stationnaire est obtenu très rapidement. Les interpolations réalisées pour chacune des éprouvettes sont pratiquement horizontales. Bien que les éprouvettes testées soient issues du même béton, il y a tout de même des variations notables entre les différentes couches ;
- ◇ **Observation 2 :** En se référant à la TABLE 7.1, le béton de référence a une charge totale passée correspondant à une pénétration d'ions modérée.

## Analyse

- ◇ **Interprétation 1 :** La préparation des échantillons décrite dans la SECTION 7.2.5 a été correctement réalisée. En effet, la saturation des différentes éprouvettes a été totale ou du moins, pratiquement totale, ce qui a permis d'obtenir, lorsque la différence de potentiel fut appliquée, une intensité constante au cours du temps. Si la saturation n'avait pas été complète, les intensités mesurées et visibles à la FIGURE 9.16, n'auraient pas été constantes, un certain délai aurait été nécessaire afin d'y parvenir et les interpolations n'auraient pas été aussi horizontales qu'elles ne le sont actuellement.

Une distinction doit également être notée entre chacune des couches. Lors du remplissage des cylindres, les couches inférieures ont été beaucoup plus compactées comme la SECTION 9.4 le mentionne. Cela s'accompagne également d'un effet gravitaire plus prononcé en base suite au poids du béton. Ces deux phénomènes entraînent ainsi, une porosité plus faible en partie inférieure. Dès lors, le courant transite plus difficilement et l'intensité mesurée est plus faible. Pour la couche du milieu, il est normal de trouver des résultats compris entre les deux autres éprouvettes, la porosité étant plus grande que la partie inférieure mais plus faible que la partie supérieure ;

- ◇ **Interprétation 2 :** Bien que la valeur obtenue ne puisse paraître élevée pour un béton de référence, il faut rappeler que les bétons ont été confectionnés afin d'acquérir une résistance minimale acceptable et non une porosité minimale. Les autres essais n'ayant pu être réalisés,

---

1. Il faut noter que la résistance dépend directement de la température au travers d'un coefficient  $\alpha$ . En réalité, l'augmentation de température au sein des solutions va induire une augmentation de la résistivité électrique du béton. Cependant, ce phénomène n'est pas pris en compte ici et la loi d'Ohm est utilisée.

aucune conclusion ne peut être tirée de l'expérimentation et il faudra donc se référer à la littérature pour envisager le comportement des chlorures ainsi que leur diffusion au sein de bétons faits de mâchefers (cfr. SECTIONS 3.6 et 4.3).

## 9.6 Perméabilité à l'oxygène

### Résultats

Après avoir calculé les différents débits, les coefficients de perméabilité peuvent se déduire grâce à l'ÉQUATION 7.11. Les résultats sont ensuite présentés à la FIGURE 9.17 pour chaque échantillon du béton de référence.

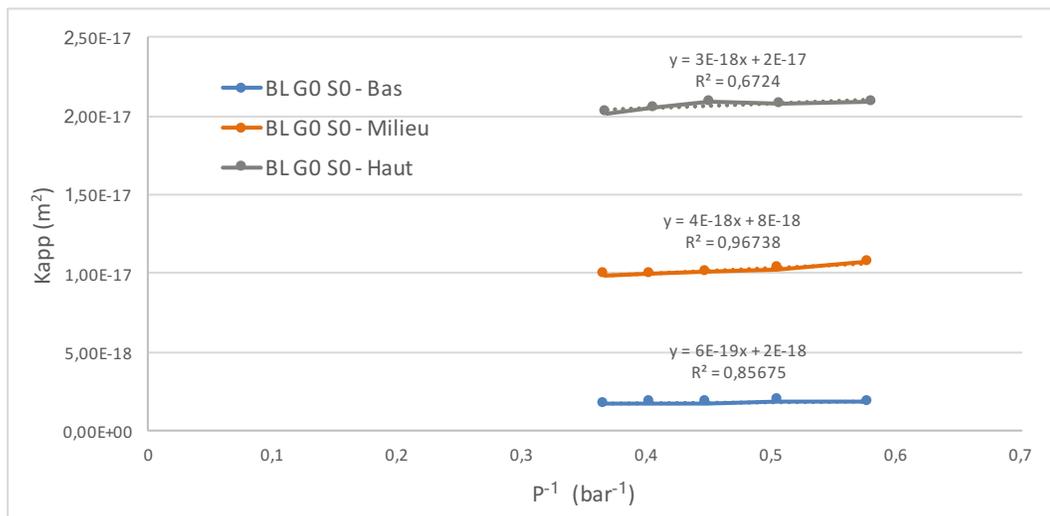


FIGURE 9.17 – Coefficient de perméabilité apparente,  $K_{app}$ , pour les trois couches du béton de référence en fonction d'une pression prédéterminée.

En se référant à l'ANNEXE K, chacune des valeurs est décrite plus amplement. Par ailleurs, il est possible de retrouver les valeurs moyennes du coefficient de perméabilité pour chaque couche testée. En prenant une moyenne sur l'ensemble des résultats présentés dans la FIGURE 9.16, le coefficient de perméabilité apparent moyen, lorsque de l'oxygène est utilisé comme fluide,  $K_{app} = K_{oxygene}$ , vaut  $1,02 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ .

### Observations

- ◇ **Observation 1** : Au regard de la FIGURE 9.17, bien que les éprouvettes testées soient issues du même béton, il y a tout de même des variations notables entre les différentes couches. Par ailleurs, le fait d'augmenter la pression n'engendre pas de fortes variations sur le coefficient de perméabilité, les droites sont pratiquement horizontales et la distribution des points, déterminée par régression linéaire, comme en témoigne le coefficient  $R^2$ , est très bonne puisqu'il se rapproche souvent de la valeur 1.

## Analyse

- ◇ **Interprétation 1** : Ce qui a été dit dans l'interprétation 1 de l'essai de diffusion forcée d'ions chlore est également valable ici. En effet, la distinction entre les trois couches est bien marquée. Dans la partie inférieure, là où le béton a été plus compacté, la perméabilité est plus faible tandis qu'en partie supérieure c'est l'inverse qui est constaté. Par ailleurs, en se référant à la TABLE 4.1, la valeur du coefficient de perméabilité obtenue pour le béton de référence est très faible ce qui permet au béton d'avoir une durabilité potentielle très élevée.

L'ensemble des essais ayant été réalisés, les résultats observés et interprétés, il maintenant temps de conclure ce mémoire. Par ailleurs, il n'est pas nécessaire de synthétiser ici, les grandes lignes observées au travers des différentes expérimentations menées, puisque c'est tout l'objet de la conclusion.

# Chapitre 10

## Conclusion et Perspectives

Le monde traverse actuellement une crise climatique sans précédent, la terre est pillée de ses ressources, la production de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre ne cessent de croître au même titre que la production de déchets. Pour faire mienne l'une des nombreuses citations de John F. Kennedy :

*"Les problèmes du monde ne peuvent être résolus par des sceptiques ou des cyniques dont les horizons se limitent aux réalités évidentes. Nous avons besoin d'hommes capables d'imaginer ce qui n'a jamais existé."*

Sur base de cette citation, le travail effectué dans le cadre de ce mémoire se justifie pleinement puisqu'il étudie la production d'un produit alternatif et son incorporation au sein de l'un des matériaux les plus utilisés au monde.

En effet, après incinération, les ordures ménagères donnent naissance à des mâchefers qui, moyennant des traitements plus ou moins importants afin de stabiliser leur composition et éliminer les particules nocives, peuvent être utilisés comme granulats et sables au sein des bétons.

Ce sujet a déjà été traité dans diverses études qui, associées aux expérimentations menées dans le cadre de ce mémoire, permettent d'amener aux conclusions suivantes :

- ◇ **À l'état frais :** L'utilisation de granulats de mâchefers n'a que peu d'effet sur l'ouvrabilité du béton composé, si ce n'est lorsque sa concentration est très importante. En revanche, le sable grossier de mâchefers impacte de manière beaucoup plus significative l'ouvrabilité suite à son plus grand pouvoir d'absorption. Dès lors, une quantité de superplastifiant importante doit être ajoutée pour conserver la même fluidité, ce qui amène à un coût de production nettement supérieur.

Par ailleurs, le temps de prise diminue de manière radicale lorsque ce dernier est utilisé ;

De manière générale, la teneur en air est augmentée lorsque des granulats de mâchefers sont introduits. Cependant, celle-ci n'est que très peu influencée lorsque du sable grossier de mâchefers est incorporé. La raison provient de la forme anguleuse des granulats de mâchefers, bien plus marquée que celle du sable grossier ;

Il faut également souligner l'impact qu'ont les mâchefers sur la masse volumique. En effet, une substitution par ces derniers, amène à des bétons plus légers. Ceux-ci sont d'autant plus légers que les particules de mâchefers utilisées sont fines. Bien que leur masse volumique par rapport à un sable naturel, à des granulats concassés, etc. soit légèrement inférieure, la différence majeure réside dans leur granulométrie et leur forme. En effet, ces deux derniers

points ne permettent pas d'obtenir un taux de compactage égal à un béton classique de référence ce qui peut diminuer de manière drastique la masse volumique finale.

- ◇ **À l'état durci** : Dans un premier temps, la résistance est atténuée, mais cette atténuation n'est de l'ordre que de quelques MPa si la substitution en mâchefers reste limitée ( $\leq 30\%$ ). Dans un second temps et à plus long terme, les mâchefers ayant absorbé de l'eau la redistribue, la réaction d'hydratation se poursuit. Des essais de compression à 90 et 365 jours permettent de montrer que la résistance ne décroît pas. Au contraire, elle peut même être accentuée si le taux de substitution reste limité.

Dans le cas où ce taux n'est pas limité, la résistance en compression est fortement réduite. D'une part, suite à la réduction marquée de masse volumique. D'autre part, à cause de la formation d'hydrogène qui induit des pressions internes. Cette présence résulte de la réaction entre la chaux du ciment, l'eau et de l'aluminium contenu majoritairement dans le sable grossier de mâchefers. En effet, dans celui-ci, de l'aluminium est encore présent en faible quantité, et ce, malgré les nombreux traitements qui existent et qui sont appliqués ;

La porosité tout comme les coefficients de perméabilité et de diffusion se voient augmenter lorsque des mâchefers sont introduits. Cette augmentation est d'autant plus marquée lorsque du sable grossier de mâchefers est utilisé. La production d'hydrogène n'entraîne pas uniquement des pressions internes, elle augmente également la connectivité du réseau capillaire et la porosité totale.

Les granulats de mâchefers peuvent donc être utilisés dans des concentrations modérées, 30% pour du sable grossier de mâchefers et jusqu'à 50% pour des granulats de mâchefers, pour constituer des bétons sans augmenter de manière significative la porosité et la perméabilité.

Si l'augmentation n'est pas contenue, des attaques potentiellement nocives pour la pérennité du béton peuvent survenir telles que la carbonatation, la pénétration d'ions chlore, etc. Le seul bienfait de cette augmentation est la résistance aux cycles de gel/dégel. Les poches d'air laissées au sein des bétons vont pouvoir jouer le rôle de vase d'expansion et ainsi, éviter au béton d'exploser suite à la dilatation de l'eau.

Les perspectives d'avenir pour les granulats de mâchefers semblent donc, assez prometteuses lorsque le taux de substitution ne dépasse pas les 50%. En effet, dans cette situation, la porosité est suffisamment limitée et la résistance obtenue suffisamment importante, pour utiliser le béton dans des environnements "classiques" (pas d'agent agressif extérieur tel que le sulfate, les acides, etc.). Par exemple, la production de béton routier qui ne requiert pas une résistance en compression trop élevée. De plus, la dilatation de l'eau suite au gel peut être reprise via la porosité. Néanmoins, il faudra rester vigilant quant à l'application de sel de déverglaçage et donc, de chlorures.

Pour ce qui est des bétons à base de sable grossier de mâchefers la situation est un peu différente. En effet, le béton utilisé dans le cadre de ce mémoire possède une classe de consistance S3. Cependant, il a été montré que l'ouvrabilité s'est fortement amenuisée à mesure que la quantité en sable grossier de mâchefers augmentait. Dès lors, il eut été préférable d'utiliser ce type de béton comme un béton sec, très peu fluide de consistance S1. En sus, si le taux de substitution en sable grossier de mâchefers n'est pas contenu en dessous d'une certaine valeur ( $\leq 30\%$ ), le béton ne peut être utilisé qu'à de très rares occasions car il présente une porosité bien trop importante, susceptible à des attaques de se développer rapidement. Si le taux se trouve en dessous de cette valeur limite, le béton peut être utilisé au même titre qu'un béton fait de granulats de mâchefers.

Quatrième partie

Normes et annexes

## A Normes

### Caractérisation des matériaux :

1. Granulométrie : NBN EN 933-1, décembre 1997 & NBN EN 933-2, mai 1996
2. Micro-Deval : NBN EN 1097-1, novembre 1996
3. Absorption : NBN EN 1097-6, juin 2001

### Formulation des bétons :

4. Formulation des bétons : NBN EN 206-1

### Essais sur béton frais :

5. Superplastifiant : MasterGlenium ACE 30 con 20%, novembre 2014
6. Affaissement : NBN EN 12350-2, décembre 1999
7. Teneur en air : NBN EN 12350-7, mars 2001
8. Masse volumique : NBN EN 12350-6, décembre 1999

### Essais sur béton durci :

9. Absorption capillaire : NBN EN 13057-15, aout 2002
10. Absorption d'eau par immersion totale : NBN EN B15-215
11. Carbonatation : NBN EN 12390-12, 2019 & RILEM CPC-18
12. Compression à 28 jours : NBN EN 12390-3 & 4
13. Diffusion forcée d'ions chlore : ASTM C 1202-05, 2005
14. Gel/Dégel : NBN EN 1338, 2003 & CEN/TS 12390-9, may 2006
15. Perméabilité O<sub>2</sub> : Materials and Structures, 22 : 225-230, 1989

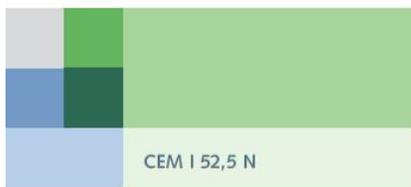
## B Classes d'exposition

CLASSE D'EXPOSITION	DESCRIPTION DE L'ENVIRONNEMENT	BETON CONCERNE
<b>X0</b>	<b>Aucun risque de corrosion ou d'attaque</b>	<b>Béton non armé ou béton armé en environnement très sec</b>
<b>XC</b>	<b>Corrosion induite par carbonatation</b>	<b>Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées exposé à l'air et à l'humidité</b>
XC1	Sec ou humide en permanence	
XC2	Humide, rarement sec	
XC3	Humidité modérée	
XC4	Alternance d'humidité et de séchage	
<b>XD</b>	<b>Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine</b>	<b>Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées soumis au contact d'une eau ayant une origine autre que marine contenant des chlorures, y compris des sels de déverglaçage</b>
XD1	Humidité modérée	
XD2	Humide, rarement sec	
XD3	Alternance d'humidité et de séchage	
<b>XS</b>	<b>Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer</b>	<b>Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées soumis au contact des chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin</b>
XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin mais pas en contact direct avec l'eau de mer	
XS2	Immergé en permanence	
XS3	Zone de marnage, zone soumise à des projections ou des embruns	
<b>XF</b>	<b>Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage</b>	<b>Béton soumis à une attaque significative due à des cycles gel/dégel alors qu'il est mouillé</b>
XF1	Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage	
XF2	Saturation modérée en eau avec agent de déverglaçage	
XF3	Forte saturation en eau sans agent de déverglaçage	
XF4	Forte saturation en eau avec agent de déverglaçage	
<b>XA</b>	<b>Attaques chimiques</b>	<b>Béton exposé aux attaques chimiques se produisant dans les sols naturels, les eaux de surface et / les eaux souterraines</b>
XA1	Environnement à faible agressivité chimique	
XA2	Environnement d'agressivité chimique modérée	
XA3	Environnement à forte agressivité chimique	

# C Fiche technique, ciment CEM I 52,5 N

## Ciment Portland

CEM I 52,5 N



CEM I 52,5 N

Cimenteries CBR  
Service Ingénieurs Conseil  
Chaussée de La Hulpe 185  
1170 Bruxelles  
Tél: 02 678 35 10  
Fax: 02 675 23 91  
communication@cbr.be  
www.cbr.be

ENCI  
Assistance Technique  
PB 3 233  
5203 DE 's-Hertogenbosch  
Tél: 073 640 12 20  
Fax: 073 640 12 18  
tv@enci.nl  
www.enci.nl

### 1. Normes et certificats

Type de ciment	Certificat	Norme	
CEM I 52,5 N (2)	CE	EN 197-1	0965-CPR-C00318
CEM I 52,5 N (2)	BENOR	NBN B12	14/02/318
CEM I 52,5 N (2)	KOMO	NEN 3550	1118-14-1059
CEM I 52,5 N	NF	NF 002	11-12

### 2. Composition déclarée

	Unités	Valeurs moyennes	Exigences	
			min.	max.
<i>Constituants en % de la somme des constituants principaux et secondaires</i>				
Clinker (K)	%	99	95	100
Filler	%	1	–	5
<i>Ajouts en % du ciment fini</i>				
Régulateur de prise	%	6,0	–	–
Agent de mouture	%	< 0,2	–	1,0
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

Les caractéristiques chimiques sont déterminées selon EN 196-2.

	Unités	Valeurs moyennes	Exigences	
			min.	max.
CaO	%	64	–	–
SiO <sub>2</sub>	%	20,8	–	–
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4,9	–	–
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	3,6	–	–
C <sub>2</sub> A	%	7,1	–	–
Sulfate SO <sub>3</sub>	%	2,9	–	4,0
Résidu insoluble	%	0,5	–	5,0
Perte au feu	%	1,3	–	5,0
Chlorures	%	0,07	–	0,10
Chrome (VI)*	%	< 0,0002	–	0,0002
Na <sub>2</sub> O équivalent	%	0,83**	–	–

\* Conformément au Règlement CE 1907/2006 (Reach), la teneur en chrome (VI) soluble est limitée à 0,0002 % maximum. La teneur en chrome (VI) est déterminée selon EN 196-10.

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



#### 4. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques sont déterminées selon les méthodes d'essai normalisées, mentionnées dans la 2<sup>e</sup> colonne.

	Méthode d'essai	Unités	Valeurs moyennes	Exigences	
				min.	max.
Eau de consistance normale	EN 196-3	%	26,8	–	–
Début de prise	EN 196-3	minutes	120	60	–
Fin de prise	EN 196-3	heures	2:40	–	12:00
Stabilité	EN 196-3	mm	1,0	–	10
Surface spécifique (Blaine)	EN 196-6	cm <sup>2</sup> /g	4400	–	–
Refus au tamis de 200 µm	EN 196-6	%	0	–	3,0
Chaleur d'hydratation à 7 jours	–	J/g	–	–	–
Masse volumique					
Absolue	–	kg/m <sup>3</sup>	3100	–	–
Apparente	–	kg/m <sup>3</sup>	1000	–	–

#### 5. Caractéristiques mécaniques

La résistance à la compression du ciment, mesurée sur éprouvettes de mortier normalisé, est déterminée selon EN 196-1.

Résistance à la compression	Unités	Valeurs moyennes	Exigences	
			min.	max.
A 1 jour	MPa	21	–	–
A 2 jours	MPa	34	20,0	–
A 7 jours	MPa	51	–	–
A 28 jours	MPa	64	52,5	–
Rapport R2d / R28d		0,53		

#### 6. Production et conditionnement

Ce ciment est produit dans la cimenterie de CBR Lixhe et est disponible dans les conditionnements suivants:

Vrac bateau	Vrac camion	Sac
x	x	–

#### 7. Le système de management de l'usine est certifié

#### 8. Déclaration de performance conforme à CPR(EU) n° 305/2011

Identification : 0965-CPR-C00318

Site internet : [www.cbr.be](http://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.

Lixhe CEM 152,5 N (2) - Mars 2014

# D Fiche technique, sable naturel 0-4mm

productspecificatieblad Kwartzsand 0-4 (18-25) Rotterdam 55

d.d. januari 2015

kwartzsand 0/4  
conform NEN-EN 12620 voor toepassing in beton  
conform NEN-EN 13139 voor toepassing in beton



Dekker Grondstoffen  
Postbus 6073  
4000 HB Tiel  
Wingebied Midden Maas  
Winlocatie: ODM



12620

4.3 Korrelgradering

zeef volgens ISO 565:1990 R 20	grenswaarden voor doorval			90% van de bepalingen voldoen aan onderstaande grenswaarden voor de doorval
	algemeen	gemiddelde	grens tov gemiddelde	
8	100	100	100	100
5,6	95 - 100	97	95 - 100	95 - 100
4	85 - 99	95	90 - 99	90 - 99
2		86	80 - 95	80 - 95
1		78	70 - 85	70 - 85
0,5		45	20 - 80	20 - 80
0,25		10	0 - 20	0 - 20
0,125		1	0 - 15	0 - 15
0,063		0,2	0 - 3	0 - 3

4.3	Categorie <sup>*</sup>	G <sub>85</sub>
4.6	Hoeveelheid fijne deeltjes < 63 µm	f <sub>3</sub> / categorie 1
5.5	Dichtheid <sup>*</sup>	ρ <sub>a</sub> 2,64 ± 0,05 Mg/m <sup>3</sup> ρ <sub>rd</sub> 2,63 ± 0,05 Mg/m <sup>3</sup> ρ <sub>ssd</sub> 2,63 ± 0,05 Mg/m <sup>3</sup>
5.5	Waterabsorptie <sup>*</sup>	0,2 % +/- 0,2%
	Aanwezigheid Organische Stoffen <sup>*</sup>	Negatief
5.7.2	Volume stabiliteit	NPD
5.7.3	ASR Gevoelig cur89 2002	Niet reactief
6.2	Chloridegehalte	<0,001
6.3.1	In zuur oplosbaar sulfaat	As <sub>0,2</sub>
6.3.2	Totaal zwavelgehalte	Voldoet
6.4.1	Bindings – en verhardingsvertraging	Voldoet
6.5	Carbonaatgehalte	NPD

Aard	Korrelverdeling	Fijnheid	Verandelijk- heid	Gehalte fijn	Kwaliteit fijn	Bijkomend	Aanduiding
Rond zand	0/4	CF	A	f <sub>3</sub>	a	---	18-25

\*Benor-kenmerken niet opgenomen in de aanduiding volgens PTV 411

## EG conformiteitsverklaring

Ondergetekende, verklaart op grond van artikel 9 van de Richtlijn Bouwproducten (89/106/EEG) namens **Dekker grondstoffen bv.**, gevestigd: waalbandijk 1 4053 JB IJzendoorn dat het in dit product specificatieblad genoemde product, afkomstig van de productie-eenheid Rotterdam 55, voldoet aan de eisen in NEN-EN 12620 voor de eigenschappen genoemd in tabel ZA.1a van bijlage ZA van deze normen.

Het FPC systeem is door de certificatie-instelling BMC beoordeeld en het FPC certificaat met nummer:

**0956-CPR-0879**

werd per 17 mei 2004 toegekend

IJzendoorn, januari 2015

getekend:

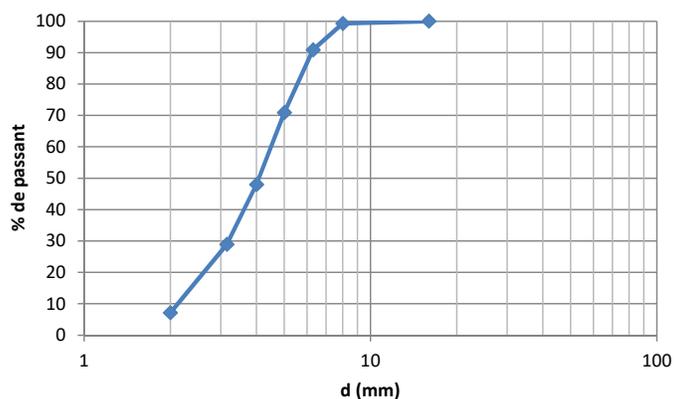
J. van der Bent  
Kwaliteitsverantwoordelijke

## E Fiche technique, granulats concassés 2-7 et 7-14mm

### Granulats naturels

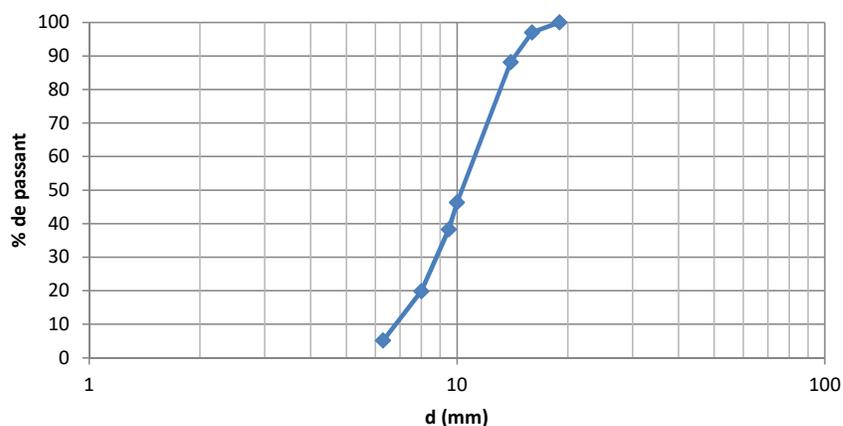
Dénomination	Type	Masse vol. apparente (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol. réelle (kg/m <sup>3</sup> )	Teneur en eau (%)	Absorption d'eau (%)
S22	Sable de Rhin 0/2	1580	2600	0,13	0,22
G40	Concassé calcaire 2/7	1330	2590	0,16	1,24
G41	Concassé calcaire 7/14	1370	2630	0,08	1,11
G39	Concassé calcaire 14/20	1555	2730	< 1 %	< 1 %

#### G40 : Concassé calcaire 2/7



diamètre (mm)	16	8	6,3	5	4	3,15	2
% passant	100	99,3	90,9	70,9	48,0	28,9	7,1

#### G41 : Concassé calcaire 7/14



diamètre (mm)	20	16	14	10	9,5	8	6,3
% passant	100	97,0	88,2	46,3	38,3	19,8	5,1

## F Compacité des granulats concassés

Consistance	Vibration	Coefficient de compacité						
		D=5	D=10	D=12.5	D=20	D=31.5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	Faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815	0.820	0.825
	Normale	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
Plastique	Piquage	0.730	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	Faible	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
	Normale	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.840
	Puissante	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
Ferme	Faible	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
	Normale	0.780	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0.850
	Puissante	0.785	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0.855
Valeurs convenables pour des granulats roulés sinon, apporter les corrections suivantes :								
- sable roulé et gravillon concassé = -0.01								
- sable et gravillon concassé = -0.03								

G Coffrages réalisés pour les tests de Gel/Dégel pour trois compositions



## H Absorption d'eau par remontée capillaire

TABLE 10.1 – Variation de masse moyenne suite à un essai de remontée d'eau par absorption capillaire pour trois compositions et écart-type correspondant.

<b>Composition →</b> <b>Temps de remontée ↓</b>	<b>BL G0 S0</b> <b>(kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>EC</b>	<b>BL G30 S0</b> <b>(kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>EC</b>	<b>BL G100 S0</b> <b>(kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>EC</b>
12 minutes	1,17.10 <sup>-7</sup>	1,42.10 <sup>-8</sup>	2,41.10 <sup>-7</sup>	4,00.10 <sup>-8</sup>	4,33.10 <sup>-7</sup>	4,47.10 <sup>-8</sup>
30 minutes	1,68.10 <sup>-7</sup>	1,26.10 <sup>-8</sup>	3,10.10 <sup>-7</sup>	5,54.10 <sup>-8</sup>	5,26.10 <sup>-7</sup>	4,07.10 <sup>-8</sup>
1 heure	2,61.10 <sup>-7</sup>	2,02.10 <sup>-8</sup>	4,36.10 <sup>-7</sup>	5,52.10 <sup>-8</sup>	6,85.10 <sup>-7</sup>	3,00.10 <sup>-8</sup>
2 heures	3,01.10 <sup>-7</sup>	2,10.10 <sup>-8</sup>	5,05.10 <sup>-7</sup>	3,74.10 <sup>-8</sup>	7,56.10 <sup>-7</sup>	4,16.10 <sup>-8</sup>
4 heures	3,88.10 <sup>-7</sup>	2,88.10 <sup>-8</sup>	6,10.10 <sup>-7</sup>	3,76.10 <sup>-8</sup>	8,76 .10 <sup>-7</sup>	2,41.10 <sup>-8</sup>
1 jour	6,81.10 <sup>-7</sup>	7,05.10 <sup>-8</sup>	9,70.10 <sup>-7</sup>	1,34.10 <sup>-8</sup>	1,31.10 <sup>-6</sup>	5,35.10 <sup>-9</sup>
4 jours	1,09.10 <sup>-6</sup>	8,00.10 <sup>-8</sup>	1,48.10 <sup>-6</sup>	2,24.10 <sup>-8</sup>	1,88.10 <sup>-6</sup>	3,98.10 <sup>-10</sup>
7 jours	1,30.10 <sup>-6</sup>	8,51.10 <sup>-8</sup>	1,73.10 <sup>-6</sup>	1,15.10 <sup>-8</sup>	2,17.10 <sup>-6</sup>	4,15.10 <sup>-9</sup>

TABLE 10.2 – Hauteur de remontée d'eau par absorption capillaire moyenne pour trois compositions et écart-type correspondant.

<b>Composition →</b> <b>Temps de remontée ↓</b>	<b>BL G0 S0</b> <b>(mm)</b>	<b>EC</b>	<b>BL G30 S0</b> <b>(mm)</b>	<b>EC</b>	<b>BL G100 S0</b> <b>(mm)</b>	<b>EC</b>
12 minutes	11,3	0,07	12,7	0,19	14,7	0,14
30 minutes	13,3	0,08	13,4	0,16	15,4	0,13
1 heure	15,3	0,10	16,8	0,20	20,5	0,19
2 heures	23,1	0,41	24,3	0,22	25,3	0,32
4 heures	23,1	0,40	24,4	0,21	26,2	0,28
1 jour	24,3	0,30	25,1	0,22	26,3	0,35
4 jours	24,3	0,30	25,1	0,22	26,3	0,35
7 jours	24,3	0,30	25,1	0,22	26,3	0,35

# I Carbonatation accélérée

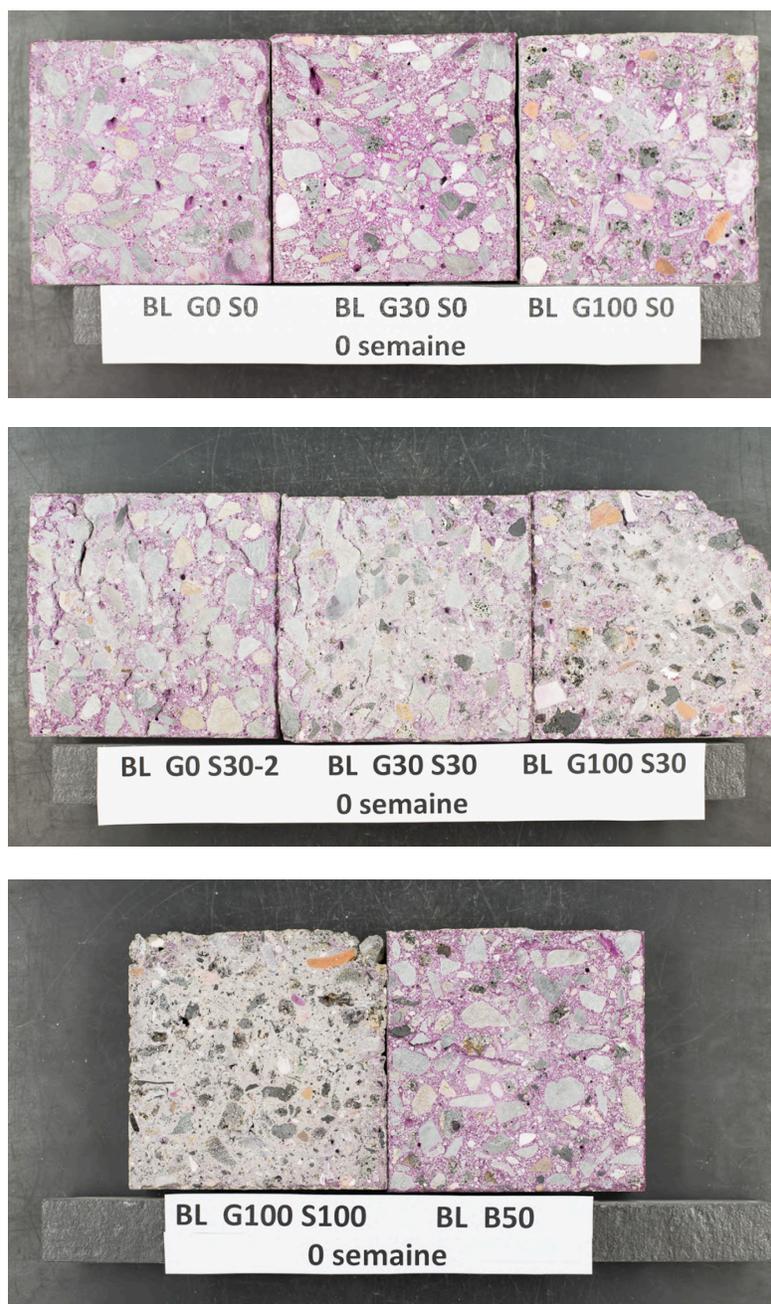


FIGURE 10.1 – Photo représentant le front de carbonatation de chacun des bétons composés au temps  $t_0$ .

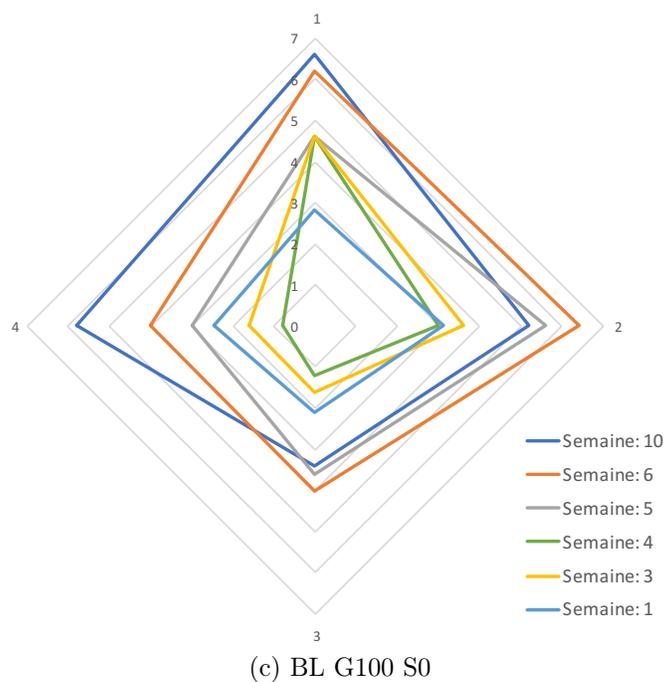
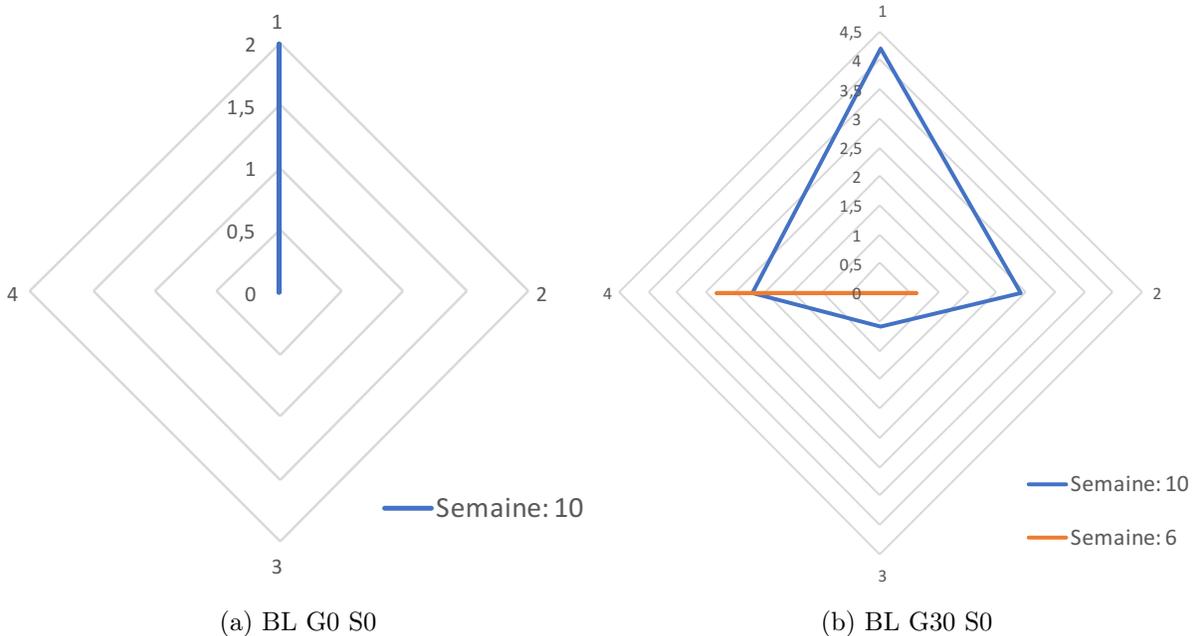


FIGURE 10.2 – Résultats par semaine, une fois que la carbonatation a débuté, de l'avancement du front de carbonatation (mm) pour 3 compositions de béton à base de granulats de M.I.O.M ayant carbonaté lors des essais.

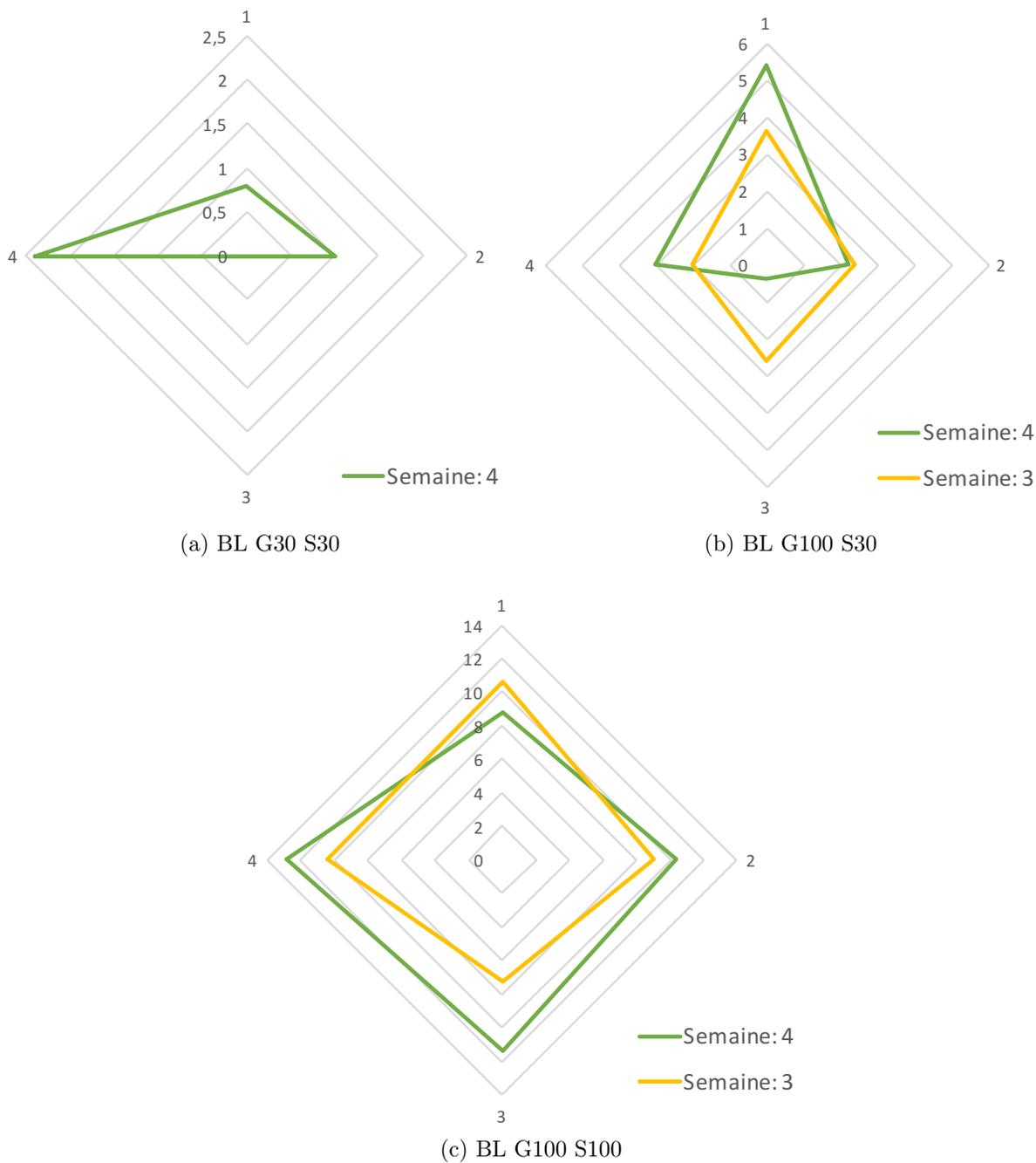


FIGURE 10.3 – Résultats par semaine, une fois que la carbonatation a débuté, de l'avancement du front de carbonatation (mm) pour 3 compositions de béton à base de sable grossier de mâchefers ayant carbonaté lors des essais.

## J Diffusion forcée d'ions chlore

TABLE 10.3 – Charge passée en Coulombs en fonction du temps pour le béton de référence pour chacune des éprouvettes, moyenne, écart-type et intégration

Temps (s)	Charge passée			Moyenne	Écart-type
	Haut	Milieu	Bas		
0	55,7	63,7	63,3	60,9	4,5
600	54,6	62,1	61,1	59,3	4,1
1200	55,9	62,7	60,7	59,8	3,5
1800	56,4	62,1	60,4	59,6	3,0
2400	56,1	61,9	60,5	59,5	3,0
3000	55,7	62,0	59,7	59,1	3,2
3600	55,1	62,1	58,9	58,7	3,5
4200	55,0	62,6	58,8	58,8	3,8
4800	55,2	62,6	58,3	58,7	3,7
5400	55,1	62,0	57,2	58,1	3,5
6000	54,9	62,1	58,6	58,5	3,6
6600	55,0	62,1	58,5	58,5	3,5
7200	54,9	62,8	58,4	58,7	4,0
7800	55,1	62,4	58,1	58,5	3,7
8400	54,9	63,1	58,7	58,9	4,0
9000	54,8	62,5	58,0	58,4	3,9
9600	54,6	62,7	58,2	58,5	4,1
10200	55,2	62,5	58,4	58,7	3,7
10800	54,5	62,8	58,4	58,5	4,1
11400	55,4	62,4	58,2	58,7	3,5
12000	54,9	62,8	58,6	58,7	4,0
12600	54,4	63,3	58,4	58,7	4,5
13200	54,4	63,5	58,1	58,6	4,6
13800	54,7	64,0	58,5	59,1	4,7
14400	55,2	64,3	58,5	59,3	4,6
15000	54,5	65,1	58,3	59,3	5,4
15600	54,4	64,7	58,2	59,1	5,2
16200	54,9	64,9	57,8	59,2	5,2
16800	54,1	64,4	58,1	58,9	5,2
17400	54,4	63,4	58,3	58,7	4,5
18000	54,8	63,1	58,1	58,7	4,1
18600	54,2	63,3	57,8	58,4	4,6
19200	54,7	63,5	57,6	58,6	4,6
19800	54,5	63,4	57,9	58,6	4,5
20400	54,4	64,0	58,2	58,9	4,9
21000	55,0	63,5	58,2	58,9	4,3
21600	54,5	63,5	58,6	58,8	4,5
22200	54,3	63,8	58,5	58,9	4,8
22800	54,0	63,4	58,4	58,6	4,7
Intégration (ÉQ : 7.7)	1464	1683	1566	1571	110
Correction (ÉQ : 7.8)	1321	1519	1413	1418	99

## K Perméabilité à l'oxygène

TABLE 10.4 – Perméabilité mesurée lors des essais de perméabilité à l'oxygène pour le béton de référence ainsi que les débits, moyenne et écart-type.

P injectée (Bars)	Débit (cm <sup>3</sup> /s)		Perméabilité K <sub>oxy</sub> (m <sup>2</sup> )			Moyenne	Écart-type	
	Haut	Milieu	Bas	Haut	Milieu			Bas
1,5	0,0938	0,0476	0,0082	2,09.10 <sup>-17</sup>	1,07.10 <sup>-17</sup>	1,85.10 <sup>-18</sup>	1,11.10 <sup>-17</sup>	9,51.10 <sup>-18</sup>
2,0	0,1426	0,0700	0,0126	2,08.10 <sup>-17</sup>	1,03.10 <sup>-17</sup>	1,85.10 <sup>-18</sup>	1,10.10 <sup>-17</sup>	9,47.10 <sup>-18</sup>
2,5	0,2016	0,0962	0,0171	2,08.10 <sup>-17</sup>	1,01.10 <sup>-17</sup>	1,79.10 <sup>-18</sup>	1,09.10 <sup>-17</sup>	9,55.10 <sup>-18</sup>
3,0	0,2650	0,1270	0,0227	2,05.10 <sup>-17</sup>	9,94.10 <sup>-18</sup>	1,78.10 <sup>-18</sup>	1,07.10 <sup>-17</sup>	9,39.10 <sup>-18</sup>
3,5	0,3346	0,1618	0,0283	2,02.10 <sup>-17</sup>	9,86.10 <sup>-18</sup>	1,72.10 <sup>-18</sup>	1,06.10 <sup>-17</sup>	9,24.10 <sup>-18</sup>
Moyenne	-	-	-	2,06.10 <sup>-17</sup>	1,02.10 <sup>-17</sup>	1,80.10 <sup>-18</sup>	1,09.10 <sup>-17</sup>	9,43.10 <sup>-18</sup>

# Bibliographie

- [AFGC, 2004] AFGC (2004). *Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages*. Association Française de Génie Civil.
- [Aggarwal et al., 2007] Aggarwal, P., Aggarwal, Y., & Gupta, S. (2007). Effect of bottom ash as replacement of fine aggregates in concrete. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and housing)*, 8(1), 49–62.
- [Aggarwal & Siddique, 2014] Aggarwal, Y. & Siddique, R. (2014). Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates. *Construction and Building Materials*, 54, 210–223.
- [Alizadeh, 2009] Alizadeh, A. (2009). *Nanostructure and Engineering Properties of Basic and Modified Calcium-Silicate-Hydrate Systems*. PhD thesis.
- [Andrade et al., 2007] Andrade, L., Rocha, J., & Cheriaf, M. (2007). Evaluation of concrete incorporating bottom ash as natural aggregates replacement. *Waste Management*, 27, 1190–1199.
- [Auverlot, 2015] Auverlot, D. (2015). La tragédie du réchauffement climatique : Du cinquième rapport du GIEC à la conférence Paris-Climat 2015. *Annales des mines - Responsabilité et environnement*, 77, 14–20.
- [Avdeev et al., 2011] Avdeev, A., Eremenko, T., Festy, P., Gaymu, J., Bouteille, N., & Springer, S. (2011). Populations et tendances démographiques des pays européens (1980-2010). *Population*, 66, 9 à 133.
- [Bassirou & Souleymane, 2019] Bassirou, D. M. & Souleymane, S. M. (2019). *Etat de l'art sur les bétons à base de recyclat : Perspectives pour l'Algérie*. PhD thesis, Université 8 Mair 1945 Guelma.
- [Bavelard & Beinish, 2006] Bavelard, G. & Beinish, H. (2006). *Guide de bonnes pratiques des essais de compression sur éprouvettes*. CERIB - Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton.
- [Beltran et al., 2014] Beltran, M. G., Agrela, F., Barbudo, A., Ayuso, J., & Ramirez, A. (2014). Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 72, 231–238.
- [Berg & Neal, 1998] Berg, E. & Neal, J. (1998). Municipal solid waste bottom ash as portland cement concrete ingredient. *J. Mater. Civ. Eng.*, 10, 168–173.
- [Bilir, 2012] Bilir, T. (2012). Effects of non-ground slag and bottom ash as fine aggregate on concrete permeability properties. *Construction and Building Materials*, 26, 730–734.
- [Bkanchard & All., 1989] Bkanchard, J. & All. (1989). Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères. *Revue T.S.M. - L'eau*.

- [Boisseau, 2001] Boisseau, P. (2001). Le gisement des miom en france : le parc d'usines, les grandes tendances, incinération, résidus produits, résidus valorisés. In *In : Quel avenir pour les MIOM ?* (pp. 1–5). : Orléans : BRGM.
- [Born & Brecht, 2014] Born, D. J. & Brecht, D. E. A. V. (2014). Recycling potentials of mswi bottom ash. volume 7 Brussels.
- [Calderon & Horgnies, 2013] Calderon, V. & Horgnies, M. (2013). Utilisation de polymères recyclés dans les mortiers et bétons/use of recycled polymers in mortars and concretes. *Techniques de l'Ingénieur*.
- [Canteneur, ] Canteneur, B. Guide du béton - résistances du béton. <http://www.guidebeton.com/resistances-beton>, Accès : 16/04/2020.
- [Carsana et al., 2016] Carsana, M., Gastaldi, M., & F. Lollini, E. R. (2016). Improving durability of reinforced concrete structures by recycling wet-ground mswi bottom ash. *Materials and Corrosion*, 67.
- [Colleparidi et al., ] Colleparidi, M., Colleparidi, S., Ongaro, D., Curzio, A. Q., & Sammartino5, M. Concrete with bottom ash from municipal solid wastes incinerators.
- [Courard, 2017] Courard, L. (2017). *Matériaux de construction*. Université de Liège.
- [Courard, 2018] Courard, L. (2018). *Technologie des bétons et matériaux nouveaux*. Université de Liège.
- [Courard, 2019] Courard, L. (2019). *Maintenance, repair and reinforcement of constructions*. Université de Liège.
- [Courard et al., 2002] Courard, L., Degeimbre, R., Darimont, A., Laval, A.-L., Dupont, L., & Bertrand, L. (2002). Utilisation des mâchefers d'incinérateur d'ordures ménagères dans la fabrication de pavés en béton. *Matériaux et Constructions*, 35, 365–372.
- [de Thysebaert, 2017] de Thysebaert, D. (2017). Rapport sur l'état de l'environnement wallon 2017. Service Public de Wallonie.
- [del Valle-Zermeno et al., 2017] del Valle-Zermeno, R., Gomez-Manrique, J., Giro-Paloma, J., Formosa, J., & Chimenos, J. (2017). Material characterization of the mswi bottom ash as a function of particle size. effects of glass recycling over time. *Science of the Total Environment*.
- [Delbar, 2018] Delbar, G. (2018). Centre de valorisation des déchets de thumaide. [www.ipalle.be](http://www.ipalle.be), Accès : 25/04/2020.
- [Delville, 2003] Delville, N. (2003). *Étude minéralogique et physico-chimique des mâchefers d'incinération des ordures ménagères (MIOM) en vue d'une utilisation en technique routière*. PhD thesis, Université Blaise Pascal.
- [Dosho, 2007] Dosho, Y. (2007). Development of a sustainable concrete waste recycling system ) application of recycled aggregate concrete produced by aggregate replacing method-. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(1), 27–42.

- [Dou et al., 2017] Dou, X., Ren, F., Nguyen, M., Ahamed, A., Yin, K., Chan, W., & Chang, V. (2017). Review of mswi bottom ash utilization from perspectives of collective characterization, treatment and existing application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 24–38.
- [Edenhofer et al., 2014] Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Minx, J., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., & Zwickel, T. (2014). Climate change 2014 : Mitigation of climate change. contribution of working group iii to the fifth assessment climate change 2014 : Mitigation of climate change. contribution of working group iii to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *IPCC*.
- [Eurostat, 2019] Eurostat (2019). Eurostat - statistiques sur les déchets. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics/fr](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics/fr), Accès : 11/02/2020.
- [Fanara, 2020] Fanara, A. (2020). *Modelling of drying phenomena in concrete with recycled aggregates*. PhD thesis, Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées.
- [Filipponi et al., 2015] Filipponi, P., Polettine, A., Pomi, R., & Sirini, P. (2015). Physical and mechanical properties of cement-based products containing incineration bottom ash. *Waste Management*, 96, 76–85.
- [GBB, 2018] GBB (2018). *Technologie du béton*. Groupement belge du béton.
- [Gérard, 1999] Gérard, M. (1999). Recyclage et valorisation des déchets ménagers. *Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*, 415.
- [Ginés et al., 2009] Ginés, O., Chimenos, J., Vizcarro, A., Formosa, J., & Rosell, J. (2009). Combined use of mswi bottom ash and fly ash as aggregate in concrete formulation : Environmental and mechanical considerations. *Journal of Hazardous Materials*, 169, 643–650.
- [Gress & All., 1991] Gress, D. & All. (1991). Municipal solid waste combustion ash as an aggregate substitute in asphaltic concrete. *Waste materials in construction*, Elsevier, (pp. 161–175).
- [Hoorweg & Bhada-Tata, 2012] Hoorweg, D. & Bhada-Tata, P. (2012). A global review of solid waste management. *World Bank*.
- [Hung, 2011] Hung, L. N. (2011). *Contribution à la modélisation du comportement mécanique d'un matériau hétérophasé rematérialisé issu d'un mâchefer d'incinération d'ordures ménagères : Valorisation en Génie Civil*. PhD thesis, Université d'Artois.
- [Joseph et al., 2018] Joseph, A., den Heede, R. S. P. V., Matthys, S., & Belie, N. D. (2018). The use of municipal solid waste incineration ash in various building materials : A belgian point view. *Materials*, 11(141).
- [Juric et al., 2006] Juric, B., Hanzic, L., Ilic, R., & Samec, N. (2006). Utilization of municipal solid waste bottom ash and recycled aggregate in concrete. *Waste Management*, 26, 1436–1442.
- [Kaibouchi, 2004] Kaibouchi, S. (2004). *Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères : contribution à l'étude des mécanismes de stabilisation par carbonatation et influence de la collecte sélective*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

- [Kasemchaisiri & Tangtermsirikul, 2008] Kasemchaisiri, R. & Tangtermsirikul, S. (2008). Properties of self-compacting concrete in incorporating bottom ash as a partial replacement of fine aggregate. *Science Asia*, 34, 87–95.
- [Keulen et al., 2016] Keulen, A., van Zomeren, A., Harpe, P., Aarnink, W., Simons, H., & Brouwers, H. (2016). High performance of treated and washed mswi bottom ash granulates as natural aggregate replacement within earth-moist concrete. *Waste Management*, 49, 83–95.
- [Li et al., 2012] Li, X.-G., Lv, Y., Ma, B.-G., Yin, Q.-B. C. X.-B., & Jian, S.-W. (2012). Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash in blended cement. *Journal of Cleaner Production*, 32, 96–100.
- [Lin & Lin, 2006] Lin, K. & Lin, D. (2006). Hydratation characteristics of municipal solid waste incinerator bottom ash slag as a pozzolanic material for use in cement. *Cement and Concrete Composites*, 28, 817–823.
- [Lynn et al., 2016] Lynn, C., Dhir, R., & Ghataora, G. (2016). Municipal incinerated bottom ash characteristics and potential for use as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 127, 504–517.
- [Mai-Nhu, 2013] Mai-Nhu, J. (2013). *Corrosion des armatures du béton : couplage carbonatation/chlorures en présence de cycles hydriques*. PhD thesis, Université de Toulouse III - Paul Sabatier.
- [Martin et al., 2003] Martin, C., Bajon, F., & Freitas, J. D. (2003). Impact de la collecte sélective sur le gisement de déchets non-recyclables. *Déchets Sciences et Techniques*, 31, 22–24.
- [Mayer, ] Mayer, N. Définition : Déchet ménager. <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-dechet-menager-16950/>, Accès : 12/02/2020.
- [McLeod et al., 2010] McLeod, E., Poulter, B., Hinkel, J., Reyes, E., & Salm, R. (2010). Sea-level rise impact models and environmental conservation : A review of models and their applications. *Ocean and Coastal Management*, 53, 507–517.
- [Mihaylov, 2018] Mihaylov, B. (2018). *Reinforced concrete*. Université de Liège.
- [MTES, 2019] MTES (2019). L'économie circulaire. Ministère de la Transition écologique et solidaire.
- [N-U, 2019] N-U (2019). Population mondiale. Le Fonds des Nations Unies pour la population.
- [Noin, 1999] Noin, D. (1999). La population des littoraux du monde. *L'information géographique*, 63, 65–73.
- [Ollivier & Torrenti, 2008] Ollivier, J.-M. & Torrenti, J.-P. (2008). *La structure poreuse des bétons et les propriétés des transferts*. Technical report.
- [Park et al., 2016] Park, S.-H., Lee, J.-B., & Kim, S.-S. (2016). The durability of the concrete using bottom ash as fine aggregate. *the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 4(4), 349–355.

- [Pera et al., 1997] Pera, J., Coutaz, L., Ambroise, J., & Chababbet, M. (1997). Use of incinerator bottom ash in concrete. *Cement and Concrete Research*, 27, 1–5.
- [Piantone et al., 2000] Piantone, P., Blanc, P., & Bodéman, F. (2000). Les mâchefers d’incinération d’ordures ménagères. un état de l’art. *BRGM/RP-50589-FR*, (pp. 113).
- [Picron et al., 2019] Picron, L., L. Courard, A. L., Zhao, Z., & Grigoletto, S. (2019). Interview laurent picron : Traitement des mâchefers en vue de leur future utilisation. MOOC ulg, Construi-Recycler - Module 2.3.
- [Pigeon, 1989] Pigeon, M. (1989). La durabilité au gel du béton. *Materials and Structures/ Matériaux et Constructions*, 22, 3–14.
- [Planèteoscope, 2017] Planèteoscope (2017). Production de déchets dans le monde.
- [Ployaert, 2012] Ployaert, I. C. (2012). *Concevoir des ouvrages en béton résistant au gel-dégel et aux sels de déverglaçage*. FEBELCEM, Bld du Souverain 68 -1170 Bruxelles.
- [Ramstein et al., 2004] Ramstein, G., Donnadiou, Y., & Godderis, Y. (2004). Les glaciations du protérozoïque. *Compte Rendus-Geosciences*, 336, 639–646.
- [Rendek, 2006] Rendek, E. (2006). *Influence des procédés de la filière traitement thermique sur les caractéristiques et les évolutions bio-physico-chimiques des mâchefers d’incinération d’ordures ménagères (MIOM)*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [Rens, 2016] Rens, I. L. (2016). *Le béton coloré*. FEBELCEM, Bld du Souverain 68 -1170 Bruxelles.
- [Rübner, 2006] Rübner, K. (2006). The microstructure of concrete made with municipal waste incinerator bottom ash as an aggregate component. *Cement and Concrete Research*, 36, 1434–1443.
- [Safiuddin et al., 2010] Safiuddin, M., Jumaat, M. Z., Salam, M. A., Islam, M. S., & Hashim, R. (2010). Utilization of solid waste in construction materials. *International journal of physical sciences*.
- [Saika et al., 2015] Saika, N., Mertens, G., Balen, K. V., Elsen, J., Gerven, T. V., & Vandecasteele, C. (2015). Pre-treatment of municipal solid waste incineration (mswi) bottom ash for utilisation in cement mortar. *Construction and Building Materials*, 96, 76–85.
- [Savadogo et al., 2015] Savadogo, N., Messan, A., Hannawi, K., Tsobnang, F., & Agbodjan, W. P. (2015). Durabilité d’un ciment composé à base de mâchefer de tefereyre (niger) : absorption capillaire, porosité accessibles à l’eau et attaque acide. *Journal of Materials and Engineering Structures*, 2, 213–223.
- [Siddique et al., 2012] Siddique, R., Aggarwal, P., & Aggarwal, Y. (2012). Mechanical and durability properties of self-compacting concrete containing fly ash and bottom ash. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 1(3), 67–82.
- [Sinan et al., 2009] Sinan, M., Boussetta, M., & Rherai, A. E. (2009). Le dessalement des eaux. In *Une opportunité pour les régions en pénurie d’eau ?* (pp. 12–21).

- [Singh & Siddique, 2015] Singh, M. & Siddique, R. (2015). Properties of concrete containing high volumes of coal bottom ash as fine aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 91, 269–278.
- [SMICTOM, ] SMICTOM. Que deviennent les déchets? <https://www.smictom-fougeres.fr/la-collecte/que-deviennent-les-dechets/3-traitement.html>, Accès : 10/02/2020.
- [SPW, 2018] SPW (2018). Plan wallon des déchets. Agriculture, ressources naturelles et environnement : Département du sol et des déchets.
- [SPW, 2019] SPW (2019). Déchets ménagers et tri. Agriculture, ressources naturelles et environnement : Département du sol et des déchets.
- [Tang et al., 2016] Tang, P., Florea, M. V. A., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2016). Application of thermally activated municipal solid waste incineration (mswi) bottom ash fines as binder substitue. *Cement and Concrete Composites*, 70, 194–205.
- [Targan et al., 2003] Targan, S., Olgun, A., Erdogan, Y., & Sevinc, V. (2003). Influence of natural pozzolan, colemanite ore waste, bottom ash, and fly ash on the properties of portland cement. *Cement and Concrete Research*, 23, 1175–1182.
- [Tegelbeckers et al., 2015] Tegelbeckers, P., Aubert, A., Jouvenet, A., Moulin, I., Tran, L., & S.Elhamzaoui (2015). Qualité et devenir des mâchefers d’incinération de déchets non dangereux, états des lieux et perspectives.
- [TOMRA, ] TOMRA. Recyclage des mâchefers. <https://www.tomra.com/fr-fr/sorting/recycling/ash>, Accès : 18/05/2020.
- [UEPG, ] UEPG. Eu + efta trend in production in billions of total tonnes. Union Européenne des Producteurs de Ganulats.
- [van der Wegen et al., 2013] van der Wegen, G., Hofstra, U., & Speerstra, J. (2013). Upgraded mswi bottom ash as aggregate in concrete. *Waste Biomass Valor*, 4, 737–743.
- [Verbinnen et al., 2017] Verbinnen, B., Billen, P., Caneghem, J. V., & Vandecasteele, C. (2017). Recycling of mswi bottom ash : A review of chemical barriers, engineering applications and treatment technologies. *Waste Biomass Valor*, 8, 1453–1466.
- [Wedig, 2020] Wedig, M. (2020). Matières premières : sécurité d’approvisionnement et technologies d’avenir. *L’Europe et le monde en 2020*, (pp. 85–102).
- [Wintgens, 2019] Wintgens, M. (2019). Durabilité des liants fabriqués à partir de fines provenant du recyclage de brique. Master’s thesis, Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées.
- [Wong et al., 2011] Wong, H., Pappas, A., Zimmerman, R., & Buenfeld, N. (2011). Effect of entrained air voids on the microstructure and mass transport properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 41, 1067–1077.
- [Xuan et al., 2018] Xuan, D., Tang, P., & Poon, C. S. (2018). Limitations and quality upgrading techniques for utilization of msw incineration bottom ash in engineering applications. *Construction and Building Materials*, 190, 1091–1102.

- [Younsi, 2011] Younsi, A. (2011). *Carbonatation de bétons à forts taux de substitution du ciment par des additions minérales*. PhD thesis, Université de La Rochelle, NNT : 2011LAROS342. tel-00717844.
- [Yüksel et al., 2007] Yüksel, I., Bilir, T., & Özkan, Ö. (2007). Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate. *Building and Environment*, 42, 2651–2659.
- [Zhang & Zhao, 2014] Zhang, T. & Zhao, Z. (2014). Optimal use of mswi bottom ash in concrete. *Concrete Structures and Materials*, 8(2), 173–182.