

515.E - OCTOBRE 2023

# ÉTUDES ET RECHERCHES

BÉTONS TRÈS BAS CARBONE :  
PERFORMANCES MÉCANIQUES,  
DURABILITÉ ET EXEMPLES  
D'APPLICATIONS

FRANÇOIS JACQUEMOT - GAUTHIER MARTIN

**CERIB**  
Expertise concrète



# Bétons très bas carbone : Performances mécaniques, durabilité et exemples d'applications

515.E

## Avant-propos

Ce rapport est articulé en deux parties :

- la première partie est destinée au lecteur qui souhaite apprécier très rapidement si l'étude évoquée le concerne, et donc si les méthodes proposées ou si les résultats indiqués sont directement utilisables pour son entreprise ;
- la deuxième partie de ce document est plus technique ; on y trouvera donc tout ce qui intéresse directement les techniciens de notre industrie.

© 2018 CERIB – CS 10010 – 28233 Eperon Cedex

ISSN 0249-6224 – EAN 9782857553601

515.E – octobre 2023

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction  
par tous procédés réservés pour tous pays.

*Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de son article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (article L. 122-4).*

*Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon exposant son auteur à des poursuites en dommages et intérêts ainsi qu'aux sanctions pénales prévues à l'article L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle.*

# Sommaire

---

<b>1. Synthèse générale de l'étude</b>	<b>5</b>
1.1. Domaine concerné	5
1.2. Problématique	5
1.3. Apport de l'étude	6
1.4. Intérêt et conséquences	6
<b>2. Dossier de l'étude</b>	<b>7</b>
2.1. Introduction	7
2.1.1. Contexte	7
2.1.2. Produits en bétons bas carbone	8
2.1.3. Objectifs des travaux	9
2.2. Géopolymère à base de laitier activé par du carbonate de sodium et traité thermiquement	10
2.2.1. L'activation alcaline du laitier de haut fourneau	10
2.2.2. Optimisation des performances sur mortier	11
2.2.3. Étude sur béton : propriétés d'usage et durabilité	19
2.2.4. Retours d'expérience	32
2.3. Béton à forte teneur en laitier activé	33
2.3.1. Blocs de maçonnerie	33
2.3.2. Pavés	34
2.3.3. Produits en béton d'ingénierie	36
2.4. Conclusion	46



# 1. Synthèse générale de l'étude

---

## 1.1. Domaine concerné

Le contexte actuel du réchauffement climatique et de ses effets génère une prise de conscience croissante de nos sociétés. Toutes les activités humaines sont concernées par cet objectif, et notamment le domaine de la construction, bâtiment et travaux publics.

Le béton, premier matériau de construction utilisé au monde, est, à l'instar des autres matériaux, concerné par la diminution de son impact environnemental et plus précisément des émissions de gaz à effet de serre. L'enjeu est d'actualité, les émissions de CO<sub>2</sub> sont directement prises en compte dans la réglementation environnementale RE2020 s'appliquant aux bâtiments. L'enjeu carbone se diffuse également dans le secteur des TP.

## 1.2. Problématique

Des solutions innovantes permettant la réalisation de produits en béton bas carbone ont été mises au point précédemment<sup>1,2</sup>. Entre autres, ces solutions mettent en œuvre des bétons à base de liants riches en laitier de haut fourneau en substitution du traditionnel ciment Portland. Elles font également intervenir une activation thermique et/ou chimique.

Ces solutions permettent à des liants à forte teneur en laitier (de 50 % jusqu'à 100 %) d'atteindre une résistance à très jeune âge équivalente à celle d'un ciment Portland CEM I. Deux types de solutions ont été développés :

- accélération d'un mélange de laitier et ciment CEM I par l'ajout en faible quantité d'activateurs chimiques ;
- activation alcaline du laitier par du carbonate de sodium (géopolymère sans ciment CEM I).

Les solutions proposées conduisent à une empreinte environnementale significativement plus faible que la référence à base de ciment Portland (réduction de 50 % à 80 %). L'évaluation économique montre également que les compositions étudiées n'induisent pas de surcoût.

Les conditions de durabilité de la solution d'activation alcaline du laitier seul par du carbonate de sodium (géopolymère sans ciment CEM I) et ses propriétés sont encore mal connues dans la littérature. Le premier objectif de l'étude est de déterminer les conditions nécessaires à la bonne durabilité des formulations de laitier activé développées. Les essais ont permis également de caractériser certaines propriétés d'usage à l'échelle du béton.

Par ailleurs, il est possible de penser qu'une amélioration des performances du laitier activé par du carbonate de sodium est encore possible. Un autre objectif de l'étude consiste à optimiser les performances (très jeune âge et long terme) de cette solution.

Enfin, le système composé de ciment CEM I et d'une forte teneur en laitier de haut fourneau est aujourd'hui bien connu. Cependant, ce type de solution est à ce jour encore peu mise en application dans les usines de préfabrication.

Le dernier objectif de l'étude est de confirmer l'applicabilité de cette solution pour la fabrication de produits en béton : produits à démoulage immédiat, produits en béton d'ingénierie.

---

<sup>1</sup> Accélération du durcissement des liants à base de laitier de haut fourneau pour les produits préfabriqués en béton – François Jacquemot - Thèse de doctorat des Mines de Douai et l'université Lille 1 (2015)

<sup>2</sup> Bétons bas carbone - Focus sur les nouveaux liants - François Jacquemot, Patrick Rougeau, Rapport Cerib 428.E (2020)

### 1.3. Apport de l'étude

Pour les bétons géopolymères à base de laitier activé, les travaux ont permis d'optimiser les performances du matériau (dont les résistances à 5 heures et 8 heures) via un plan d'expériences sur les leviers d'accélération (dosage en activateur, température du traitement thermique).

Leurs performances d'usage et de durabilité ont été étudiées sur béton. Elles sont cohérentes avec la classe de résistance du béton formulé. Les résultats montrent que le béton étudié ne gonfle pas lorsque testé vis-à-vis de la réaction sulfatique interne. En outre, les travaux montrent que la phénoménologie de corrosion des aciers dans les bétons de laitier activé par le carbonate de sodium est similaire à celle connue pour les bétons conventionnels.

Pour ce qui concerne les bétons à fortes teneurs (50 % à 70 %) en laitier activé, il a été confirmé l'applicabilité technique de ces solutions pour la fabrication de produits en béton : produits à démoulage immédiat, produits en béton d'ingénierie.

Les travaux ont permis de mettre en évidence que l'utilisation du laitier activé rend possible la fabrication, même par temps froid, de blocs de maçonnerie de résistance courante dont le liant contient jusqu'à 50 % de laitier activé. Une conservation en étuve durant 24 à 48 heures doit toutefois être maintenue. Les taux de substitution peuvent monter jusqu'à 70 % en été. En sortie d'étuve, si les conditions sont froides, il convient de prolonger le délai de livraison.

De même, des essais ont été réalisés sur pavés. L'utilisation d'une forte teneur en laitier de haut fourneau est possible dans les produits de voirie grâce à l'activation chimique et l'apport de la vibro-compaction, process propre à l'industrie du béton. Ce couple matériau/process constitue une solution bas carbone à la disposition des industriels.

En outre, l'application de la solution de mélange de ciment et laitier activé par voie chimique et thermique a été étudiée sur un béton autoplaçant d'ingénierie destiné à un produit de génie civil. La formulation retenue est celle d'un BHP contenant 60 % de laitier dans le liant. En termes de comportement mécanique et de durabilité, le BAP étudié présente de hautes performances.

### 1.4. Intérêt et conséquences

Des solutions de béton bas carbone sont mises à la disposition des industriels du béton. Ces solutions techniques confèrent à des liants à forte teneur en laitier (de 50 % jusqu'à 100 %) des performances compatibles avec la fabrication de produits en béton : produits à démoulage immédiat, produits en béton d'ingénierie. Des exemples de formulation et une description des performances de ces bétons et produits en béton sont donnés dans ce rapport. Le périmètre de ces conclusions n'est valable que pour les solutions d'activation explicitées dans ce rapport.

La réduction de l'impact carbone est la plus forte pour la solution de béton de géopolymère (réduction de l'empreinte carbone d'environ 70 % à l'échelle du matériau comparativement à une formulation de béton de propriétés similaires à base de CEM I). C'est également la solution la plus innovante.

Il sera pertinent de mettre en application ces solutions sur des cas réels en usine.

## 2. Dossier de l'étude

### 2.1. Introduction

#### 2.1.1. Contexte

Le contexte actuel du réchauffement climatique et de ses effets génère une prise de conscience croissante de nos sociétés. La COP 21 a fixé en 2015 un objectif de maintenir le réchauffement mondial en deçà de 2 °C. Toutes les activités humaines sont concernées par cet objectif, et notamment le domaine de la construction, bâtiment et travaux publics. Le béton, premier matériau de construction utilisé au monde, est, à l'instar des autres matériaux, concerné par la diminution de son impact environnemental et plus précisément des émissions de gaz à effet de serre. L'enjeu est d'actualité, les émissions de CO<sub>2</sub> sont directement prises en compte dans la réglementation environnementale RE2020 s'appliquant aux bâtiments. L'enjeu carbone se diffuse également dans le secteur des TP.

Parmi tous les indicateurs environnementaux, la RE2020 donne la priorité aux émissions de gaz à effet de serre à l'échelle globale du bâtiment. Elle définit un indicateur carbone relatif aux consommations d'énergie en exploitation du bâtiment, et un indicateur carbone relatif à la construction (produits et équipement + chantier). Pour donner un ordre d'idée, l'impact carbone de la construction intégrant les produits de construction et d'équipement représente en moyenne 45 % de l'impact carbone global d'un bâtiment sur une durée conventionnelle d'étude de 50 ans (Figure 1). Aussi, la RE2020 définit une trajectoire carbone jusqu'à 2031 et fixe des seuils sur l'indicateur carbone relatif à la construction.

À l'échelle du produit en béton, les analyses de cycle de vie montrent le plus souvent que l'impact carbone provient principalement des constituants du béton et en premier lieu du ciment. Même si depuis de nombreuses années, des mesures sont mises en place par l'industrie cimentière pour réduire ses émissions<sup>3</sup>, elles représentent environ 2,6 % du total des émissions de CO<sub>2</sub> en France, soit 11,7 % du total des émissions de l'industrie nationale <sup>4</sup>.

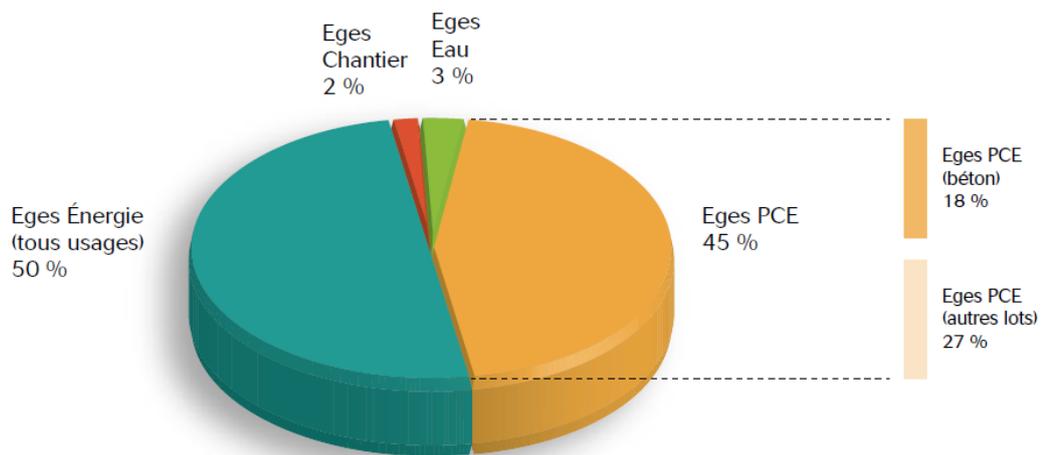


Figure 1 : Part des produits de construction et équipement (PCE) et du béton sur l'impact Eges global du bâtiment (Eges = Émissions de gaz à effet de serre)<sup>5</sup>

<sup>3</sup> L'industrie cimentière française et la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, brochure éditée par le SFIC

<sup>4</sup> Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> : la contribution de l'industrie cimentière, collection Comprendre le ciment, brochure éditée par le SFIC

<sup>5</sup> Bétons et empreinte carbone des bâtiments : Guide de recommandations et d'aide à la prescription à l'attention des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre, Revue Solutions Béton SB146 éditée par Cimbéton (2017)

### 2.1.2. Produits en bétons bas carbone

Dans le cadre des travaux collectifs du Cerib<sup>6,7</sup>, il a été mis au point des solutions innovantes permettant la réalisation de produits en béton bas carbone. Ces solutions mettent en œuvre des bétons à base de liants riches en additions minérales (laitier de haut fourneau) en substitution du traditionnel ciment Portland. Elles font également intervenir une activation thermique et/ou chimique.

Ces solutions permettent à des liants à forte teneur en laitier (50 % et 100 %) d'atteindre une résistance à très jeune âge (8 heures) équivalente à celle d'un ciment Portland CEM I. Deux types de solutions intégrant un traitement thermique ont été développés :

- accélération d'un mélange de laitier et ciment CEM I par l'ajout en faible quantité d'activateurs chimiques ;
- activation alcaline du laitier seul par du carbonate de sodium (géopolymère).

Les solutions proposées conduisent à une empreinte environnementale significativement plus faible que la référence à base de ciment Portland. L'évaluation économique montre également que les compositions étudiées n'induisent pas de surcoût (Figure 2).

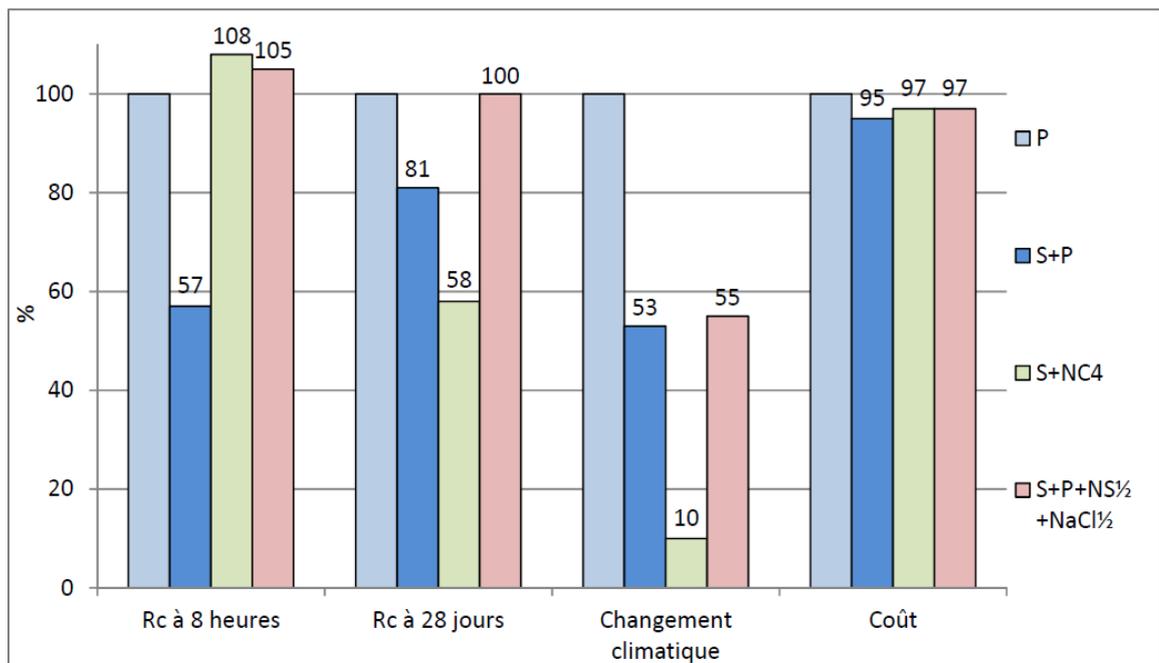


Figure 2 : Synthèse de l'analyse technique, environnementale et économique<sup>4</sup>  
 (P : ciment Portland, S+P : liant 50 % laitier + 50 % Portland,  
 S + NC4 : laitier activé (géopolymère), S + P + NS + NaCl $\frac{1}{2}$  : mélange S + P activé)

<sup>6</sup> Accélération du durcissement des liants à base de laitier de haut fourneau pour les produits préfabriqués en béton – François Jacquemot - Thèse de doctorat des Mines de Douai et l'université Lille 1 (2015)

<sup>7</sup> Bétons à faible impact environnemental pour l'Industrie du Béton : Accélération du durcissement des bétons à base de liants ternaires - Marjorie Petitpain - Thèse de doctorat des Mines de Douai et l'université Lille 1 (2017)

### 2.1.3. Objectifs des travaux

Les conditions de durabilité de la solution d'activation alcaline du laitier seul et ses propriétés sont mal connues en France. Il semble que la microstructure responsable des fortes résistances mécaniques à très court terme évolue dans le temps et en fonction des conditions environnementales. En parallèle, certains retours d'expérience issus de la littérature montrent que ce système peut être tout à fait durable même après 35 ans de service.

Le premier objectif de l'étude est de déterminer les conditions nécessaires à la bonne durabilité des formulations de laitier activé développées. Les essais permettront également de caractériser certaines propriétés d'usage à l'échelle du béton.

Par ailleurs, il est possible de penser qu'une amélioration des performances du laitier activé par du carbonate de sodium est encore possible.

Un autre objectif de l'étude consiste à optimiser les performances (très jeune âge et long terme) de cette solution.

Enfin, le système composé de ciment CEM I et d'une forte teneur en laitier de haut fourneau est aujourd'hui bien connu. Cependant, ce type de solution est à ce jour encore peu mise en application dans les usines de préfabrication.

Le dernier objectif de l'étude est de démontrer l'applicabilité technique de cette solution pour la fabrication de produits en béton : produits à démoulage immédiat, produits en béton d'ingénierie.

## 2.2. Géopolymère à base de laitier activé par du carbonate de sodium et traité thermiquement

### 2.2.1. L'activation alcaline du laitier de haut fourneau

#### 2.2.1.1. Historique

La première utilisation d'alcalins dans les matériaux cimentaires date des années 1930, quand Kuhl entreprit des recherches sur la prise de mélanges de laitier moulu et de potasse. Chassevent mesura la réactivité des laitiers en utilisant de la potasse ou de la soude en 1937. Purdon fit la première étude expérimentale significative en 1940 sur des ciments sans clinker constitués de laitier et de soude. Depuis leur découverte, les liants alcali-activés et les bétons associés ont été produits commercialement et utilisés dans une grande variété de projets de construction dans l'ex-Union Soviétique, la Chine et quelques autres pays. Plus de 60 spécifications et normes en lien avec les liants alcali-activés et les bétons associés ont été développés dans l'ex-Union Soviétique. Ces textes couvrent les matières premières, les liants, les bétons, les structures et leur mise en œuvre.

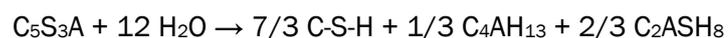
#### 2.2.1.2. Fabrication et hydratation

La capacité de production de laitier granulé moulu de haut fourneau en France est actuellement de l'ordre de 1 500 000 tonnes/an.

Le laitier est un liant à hydraulité latente, il a besoin d'un activateur chimique pour s'hydrater. Il existe différents types d'activations chimiques telles que l'activation calcique, l'activation alcaline, l'activation sulfatique et l'activation par le ciment Portland.

Pour ce qui est de l'activation alcaline, l'activateur alcalin le plus étudié est le silicate de sodium (en mélange avec la soude). Cet activateur alcalin est performant techniquement mais il est peu disponible en France et présente certains inconvénients qui rendent son utilisation industrielle difficile notamment vis-à-vis de la dangerosité de la soude.

La nature de l'activateur a une influence sur les produits d'hydratation. Il a été montré que les C-S-H, C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub> et C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub> sont les produits d'hydratation dans le cas d'une activation par la soude. L'équation de l'hydratation du laitier peut être présentée comme suit :



Les propriétés des laitiers activés sont fonction de nombreux paramètres tels que la nature du laitier et des activateurs, la concentration en activateur, le ratio eau/liant, l'historique de température...

#### 2.2.1.3. Activation par le carbonate de sodium

Le carbonate de sodium est très courant et économique et ne présente pas la même dangerosité que la soude ou le silicate de sodium.

L'activation alcaline du laitier par le carbonate de sodium couplée à une activation thermique permet d'obtenir des résistances à court terme équivalentes à celles obtenues sur des mortiers à base de ciment Portland de type CEM I 52,5 N. Cependant, les performances mécaniques à plus longs termes plafonnent à un niveau inférieur à celui du ciment Portland<sup>8</sup>.

Le développement rapide des résistances mécaniques n'est toutefois pas induit par l'activation du laitier, souvent corrélée au passage en solution d'ions silicate et aluminate mais

---

<sup>8</sup> Accélération du durcissement des liants à base de laitier de haut fourneau pour les produits préfabriqués en béton – François Jacquemot - Thèse de doctorat des Mines de Douai et l'université Lille 1 (2015)

par la précipitation d'un gel probablement à base de carbonate de sodium et/ou calcium qui occupe un volume important conduisant ainsi à une forte réduction de la macroporosité. L'évolution de ce gel, en fonction du temps et des conditions (principalement hydriques) du milieu, est un des paramètres clés quant à l'évolution des propriétés mécaniques, des variations dimensionnelles et même de la durabilité de ces systèmes chimiques complexes. Deux phénomènes ayant des effets antagonistes semblent se produire : d'une part, la déstabilisation ou la transformation du gel tend à augmenter la porosité des mortiers et d'autre part, l'hydratation du laitier sur de longues périodes tend à la diminuer.

## 2.2.2. Optimisation des performances sur mortier

La première partie des travaux consiste à déterminer sur mortier les conditions optimales d'activation chimique et thermique. Pour cela, il a été réalisé un programme expérimental où les variables sont la teneur en activateur alcalin, la durée et la température du traitement thermique tandis que les réponses sont les résistances mécaniques (flexion et compression) à différentes échéances et la maniabilité à l'état frais.

### 2.2.2.1. Constituants

Dans le cadre de cette étude sur mortier, un laitier de haut fourneau conforme à la norme NF EN 15167-1 et de classe A au sens de la norme NF EN 206/CN a été utilisé, ainsi qu'un ciment CEM I 52,5 R conforme à la norme NF EN 197-1. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 1.

De l'eau déminéralisée et un sable normalisé CEN conforme à la norme NF EN 196-1 ont été utilisés. Le carbonate de sodium  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  employé en tant qu'activateur est de qualité analytique et se présente sous forme de poudre anhydre.

Tableau 1 : Caractéristiques des constituants du liant

	Laitier Eocem Fos/mer	Ciment CEM I 52,5 R Lafarge Le Teil
Caractéristique physiques		
Masse volumique ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,90	3,11
Surface spécifique Blaine ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	4 450	4 065
Caractéristique chimiques		
$\text{SiO}_2$ (%)	38,0	22,7
$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	10,8	3,03
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	0,7	2,33
CaO (%)	42,9	67,0
MgO (%)	6,6	0,95
$\text{SO}_3$ (%)	0,1	2,13
$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (%)	0,51	0,21
$\text{S}^{2-}$ (%)	0,7	0,1
$\text{Cl}^-$ (%)	0,01	0,1
PAF (%)	< 1,5	1,33

### 2.2.2.2. Fabrication

La formulation des mortiers est celle donnée par la norme NF EN 196-1 : le ratio eau totale/liant est constant égal à 1/2, le ratio liant/sable est constant égal à 1/3.

Le carbonate de sodium a été ajouté en plus, sous forme de poudre, en même temps que le liant. Son dosage est exprimé en % massique de Na<sub>2</sub>O par rapport au laitier.

Plusieurs teneurs en activateur ont été testées dans les formulations étudiées : 2 %, 4 % et 6 % par rapport à la masse de laitier. Les formulations associées sont nommées : S + NC2, S + NC4 et S + NC6.

Le cycle de malaxage est inspiré de celui de la norme NF EN 196-1. Les éprouvettes fabriquées sont des prismes de dimensions (4 x 4 x 16) cm. La durée de fabrication des différentes éprouvettes est de 45 minutes, à l'issue de laquelle les éprouvettes sont mises en traitement thermique en enceinte climatique dont l'hygrométrie relative est réglée à 95 %.

Les traitements thermiques se caractérisent par un prétraitement, une phase de montée en température, une phase de palier puis une phase de refroidissement.

Trois températures de palier ont été envisagées : 50 °C, 65 °C et 80 °C. Les traitements thermiques associés sont nommés TT50, TT65 et TT80.

Afin de pouvoir tester les mortiers aux échéances de t<sub>0</sub> + 2 h, 5 h et 8 h (t<sub>0</sub> correspondant à l'instant où l'eau est introduite dans le malaxeur), la durée de la phase de palier a été adaptée en conséquence. Le détail des traitements thermiques est présenté au Tableau 2. Les traitements thermiques d'une durée de 6 h 15 sont représentés à la Figure 3.

On notera qu'avec le traitement thermique TT50, seule une fabrication à 6 % de Na<sub>2</sub>O a été réalisée, et avec TT65, seules les fabrications à 4 % et à 6 % de Na<sub>2</sub>O ont été réalisées.

Tableau 2 : Détails des traitements thermiques

Durée du traitement thermique	Prétraitement	Montée en température	Palier	Refroidissement
<b>TT50</b>				
1 h 15	45 °C pendant 30 min	45 à 50 °C à 40 °C/h (7,5 min)	50 °C pendant 37,5 min	Pas de refroidissement
3 h 15			50 °C pendant 2 h 37 min	1 h
6 h 15			50 °C pendant 5 h 37 min	1 h
<b>TT65</b>				
1 h 15	45 °C pendant 30 min	45 à 65 °C à 40 °C/h (30 min)	65 °C pendant 15 min	Pas de refroidissement
3 h 15			65 °C pendant 2 h 15 min	1 h
6 h 15			65 °C pendant 5 h 15 min	1 h
<b>TT80</b>				
1 h 15	45 °C pendant 30 min	45 à 80 °C à 40 °C/h (52,5 min)	Pas de palier	Pas de refroidissement
3 h 15			80 °C pendant 1 h 52 min	1 h
6 h 15			80 °C pendant 4 h 52 min	1 h

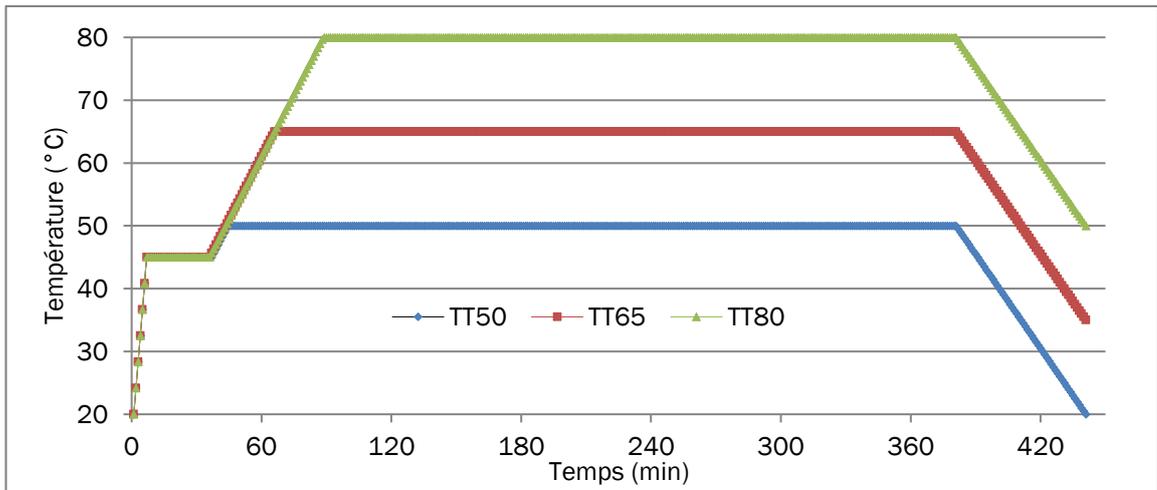


Figure 3 : Représentation graphique des traitements thermiques de 6 h 15 (température de consigne)

### 2.2.2.3. Méthodes d'essai

Les mortiers sont caractérisés à l'état frais et à l'état durci.

L'étalement à la table à secousses est mesuré selon la norme NF EN 1015-3. La valeur d'étalement est mesurée par le diamètre moyen d'un prélèvement de mortier frais, mis en place à l'aide d'un moule tronconique (présentant un diamètre intérieur de 100 mm à la base) sur le plateau d'une table à secousses, et soumis à des secousses verticales.

La masse volumique est mesurée selon NF EN 1015-6 et la teneur en air selon NF EN 1015-7 dans un récipient d'1 litre.

Les essais de résistance à la flexion et à la compression sont réalisés selon la norme NF EN 196-1. Pour chaque traitement thermique, un essai à jeune âge et à 28 jours a été réalisé.

### 2.2.2.4. Résultats

Les propriétés des mortiers de référence P (dont le liant est constitué exclusivement de ciment CEM I) et des mortiers de laitier de haut fourneau activés par du  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (S+NC) sont reportées aux tableaux 3, 4 et 5. La figure 4 illustre les résistances en compression.

On notera qu'aucun mortier n'étant démoulable à l'échéance de T0 + 2 h, cette échéance n'apparaît pas dans le tableau. A contrario, une échéance à T0 + 7 h a été ajoutée pour certaines formulations.

La maniabilité (étalement) des mortiers S + NC est équivalente (voire un peu meilleure pour S + NC6) que les mortiers de référence.

À l'échéance de 5 heures, seul le traitement thermique TT80 permet d'obtenir des performances pour les mortiers S+NC. Ces performances autour de 20 MPa en compression sont équivalentes à celles de la référence à base de ciment CEM I 52,5 R.

À l'échéance de 8 heures, les mortiers S + NC4 et S + NC6 avec TT65 et TT80 présentent des résistances en compression de l'ordre de 25 MPa.

Enfin à 28 jours, ces mêmes mortiers présentent une résistance qui plafonne à une valeur inférieure à celle des références.

Tableau 3 : Propriétés des mortiers de référence P à base de ciment Portland de type CEM I (P pour Portland)

		P TT50			P TT65			P TT80		
Caractérisations à l'état frais										
Étalement table à secousses (mm)		190			203			197		
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )		2 280			2 220			2 200		
Air occlus (%)		3,8			3,7			3,7		
Caractérisations à l'état durci										
Traitement Thermique		TT50			TT65			TT80		
Durée du TT		1 h 15	3 h 15	6 h 15	1 h 15	3 h 15	6 h 15	1 h 15	3 h 15	6 h 15
Résistance en flexion (MPa)	t0 + 5 h		4,1			4,2			4,7	
	t0 + 8 h			4,5			5,3			6,2
	t0 + 28 j	8,1	8,8	8,0	7,7	8,0	8,1	7,9	7,6	7,0
Résistance en compression (MPa)	t0 + 5 h		17,2			19,2			24,9	
	t0 + 8 h			25,3			30,6			36,9
	t0 + 28 j	57,0		57,7	57,2	53,5	61,6	53,7	58,3	57,0

 Tableau 4 : Propriétés des mortiers de laitier activé S + NC aux traitements thermiques TT50 et TT65 (S pour laitier - Slag en anglais -, NC pour carbonate de sodium Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)

		S + NC6 TT50				S + NC4 TT65				S + NC6 TT65			
Caractérisations à l'état frais													
Étalement table à secousses (mm)		230				185				253			
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )		2 270				2 330				2 270			
Air occlus (%)		3,8				3,5				3,8			
Caractérisations à l'état durci													
Traitement Thermique		TT50				TT65				TT65			
Durée du TT		1 h 15	3 h 15	5 h 15	6 h 15	1 h 15	3 h 15	5 h 15	6 h 15	1 h 15	3 h 15	5 h 15	6 h 15
Résistance en flexion (MPa)	t0 + 5 h		0				0						
	t0 + 7 h			0								5,3	
	t0 + 8 h				0				4,7				5,5
	t0 + 28 j	3,1	2,5		3,7	2,4	7,2		6,6	3,3	5		8,3
Résistance en compression (MPa)	t0 + 5 h		0				0						
	t0 + 7 h			0								23,2	
	t0 + 8 h				0				24,2				26,4
	t0 + 28 j	19,7	15,2		20,7	13,4	45,8		38,4	18,5	29,3		47,3

0 : Non démoulable

Tableau 5 : Propriétés des mortiers de laitier activé S + NC au traitement thermique TT80 (S pour laitier - Slag en anglais -, NC pour carbonate de sodium  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

		S + NC2 TT80				S + NC4 TT80				S + NC6 TT80			
Caractérisations à l'état frais													
Étalement table à secousses (mm)		190				193				220			
Masse volumique ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )		2 240				2 250				2 270			
Air occlus (%)		3,7				3,8				3,8			
Caractérisations à l'état durci													
Traitement Thermique		TT80				TT80				TT80			
Durée du TT		1 h 15	3 h 15	5 h 15	6 h 15	1 h 15	3 h 15	5 h 15	6 h 15	1 h 15	3 h 15	5 h 15	6 h 15
Résistance en flexion (MPa)	t0 + 5 h		2,9				4,5				4,8		
	t0 + 7 h											5,3	
	t0 + 8 h				3,8				4,7				5,3
	t0 + 28 j	1,2	3,7		3,8	2,2	7,5		5,7	3,1	8,7		8,5
Résistance en compression (MPa)	t0 + 5 h		10,6				20,4				22,2		
	t0 + 7 h											27,9	
	T0 + 8 h				15,2				25,2				28,1
	t0 + 28 j	5,3	18,0		18,9	12,0	35,8		32,9	16,0	46,8		41,1

0 : Non démoulable

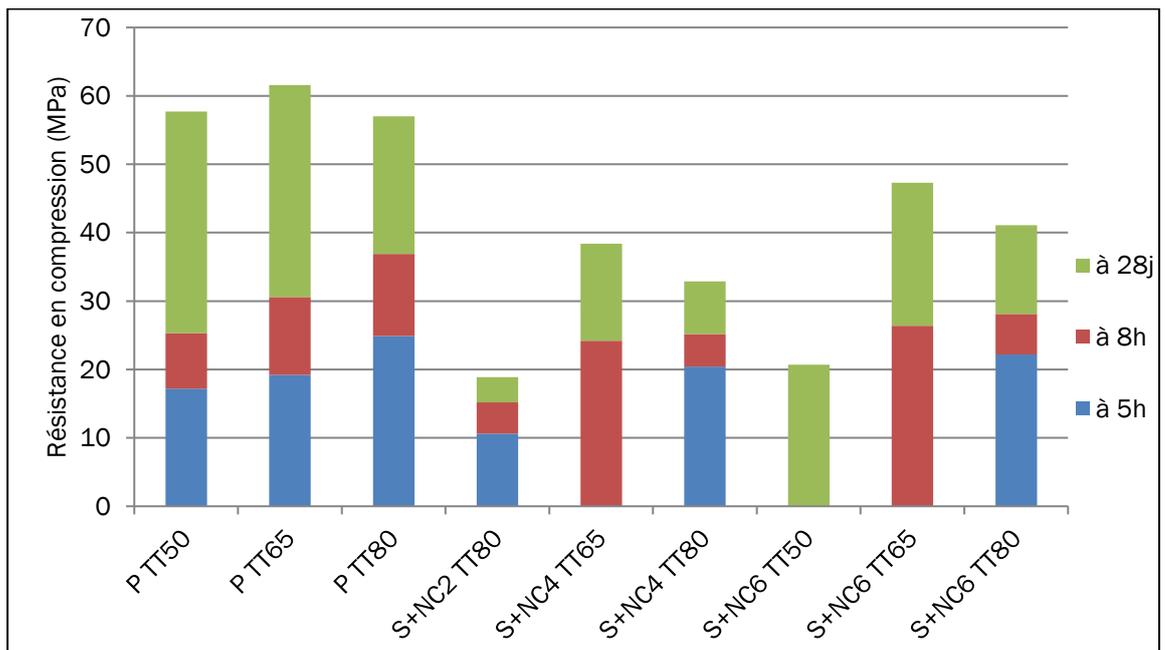


Figure 4 : Comparaison des cinétiques de durcissement entre les mortiers de référence P (P pour ciment Portland) et les mortiers S + NC (S pour laitier, NC pour carbonate de sodium)

Une autre voie d'optimisation repose sur la réduction d'eau. Il s'agit d'un levier très puissant pour augmenter les performances mécaniques à tous les âges. Cependant, elle s'accompagne d'une forte perte de maniabilité.

Des essais d'adjuvantation ont été menés mais il a été constaté que l'effet de bon nombre de superplastifiants est assez faible sur ce liant sans ciment Portland.

Le carbonate de sodium semble interagir négativement avec les superplastifiants. L'ajout de l'activateur en fin de malaxage (et après le superplastifiant) permet au superplastifiant de conserver son effet de dispersion des particules. De plus, l'utilisation de fines calcaires en addition permet également d'améliorer la maniabilité du mortier.

### 2.2.2.5. Analyse de la microstructure

Afin de mieux comprendre la prise et le durcissement du laitier activé par le carbonate de sodium, des analyses microstructurales ont été menées sur une pâte de formule S + NC4 TT80.

Des analyses par diffraction des rayons X ont été réalisées toutes les heures de t0 + 2 h à t0 + 7 h ainsi qu'à 28 jours afin de détecter, le cas échéant, les phases cristallines responsables des résistances mécaniques (Figure 5).

La calcite est la phase cristalline majoritaire, elle apparaît à partir de 3 heures.

La vatérite, polymorphe de la calcite, semble exister à 28 jours. Les C-S-H étant sous forme peu organisée, ils n'apparaissent que sous forme d'un halo vitreux (autour de 30° d'angle 2 θ comme le laitier).

Des analyses au microscope électronique à balayage (MEB) ont également été entreprises sur le matériau à très jeune âge, à t0 + 3 h (Figure 6) et t0 + 5 h (Figure 7).

On constate à ces âges que le laitier (grains anguleux de couleur clair) a encore peu réagi car on ne parvient pas à percevoir d'auréole autour des grains. En même temps, on constate que les produits de réaction (en gris sur les images) ont déjà formé une matrice relativement dense, les porosités (en noir) étant peu nombreuses.

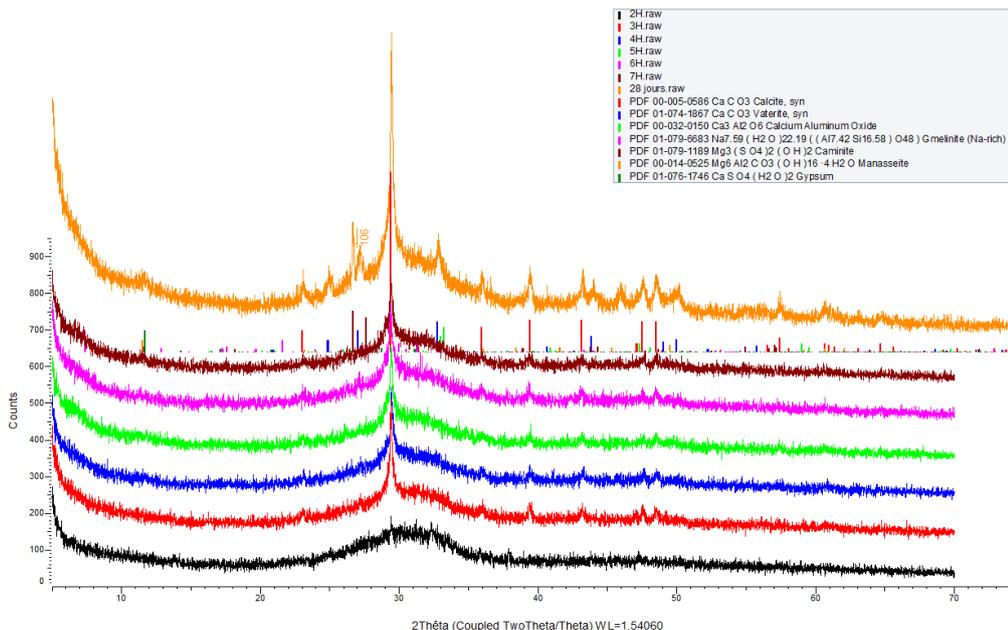


Figure 5 : Diffractogrammes d'une pâte de laitier de haut fourneau activés par du carbonate de sodium à différents âges (en base à T0 + 2 h, en haut à T0 + 28 j)

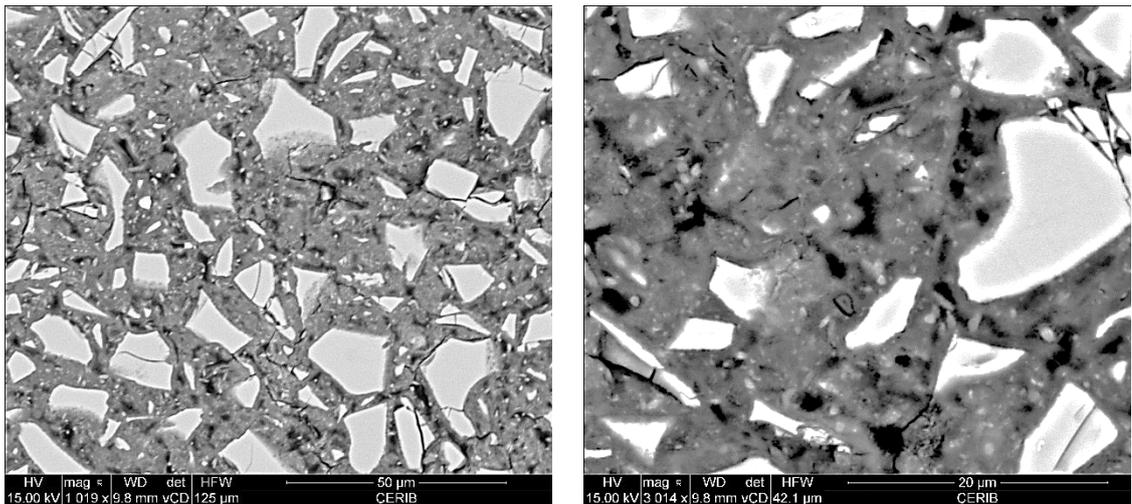


Figure 6 : Images MEB du matériau à l'âge de 3 h (électrons rétrodiffusés)

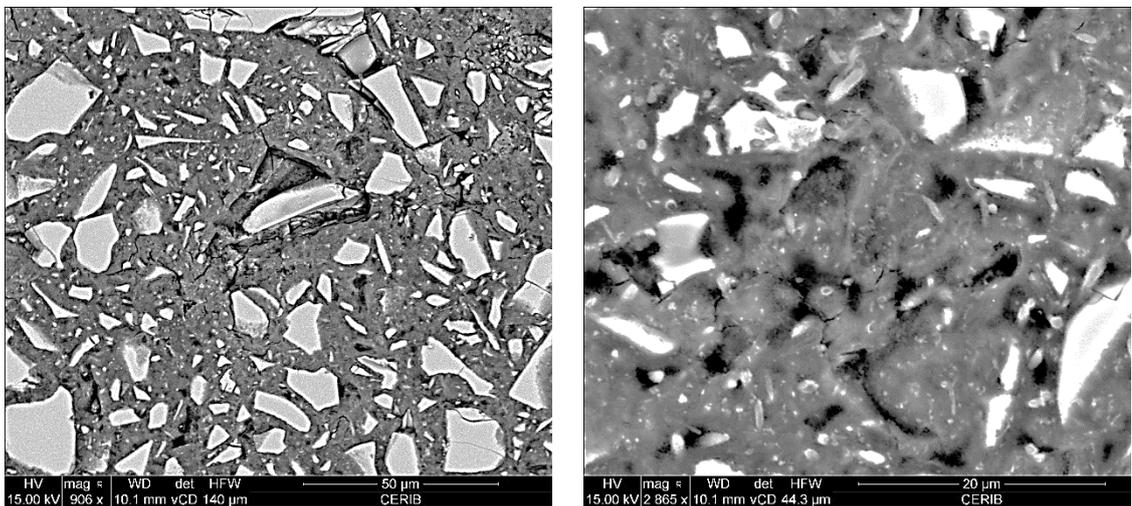


Figure 7 : Images MEB du matériau à l'âge de 5 h (électrons rétrodiffusés)

Les microanalyses élémentaires EDS permettent d'établir une cartographie de la chimie du matériau (Figure 8).

Du calcium, aluminium, silicium, éléments originaires des grains de laitier ont dans une certaine mesure diffusé dans la matrice.

Le magnésium, connu pour être moins mobile, est un bon traceur du laitier. Les positions des grains de laitier sont très similaires entre la cartographie du magnésium et l'image en électrons rétrodiffusés, à l'exception des grains les plus fins qui semblent avoir été dissous.

La matrice est riche en sodium issu de l'activateur. D'après la littérature, cet élément peut entrer dans la composition de carbonates tels que la gaylussite ( $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

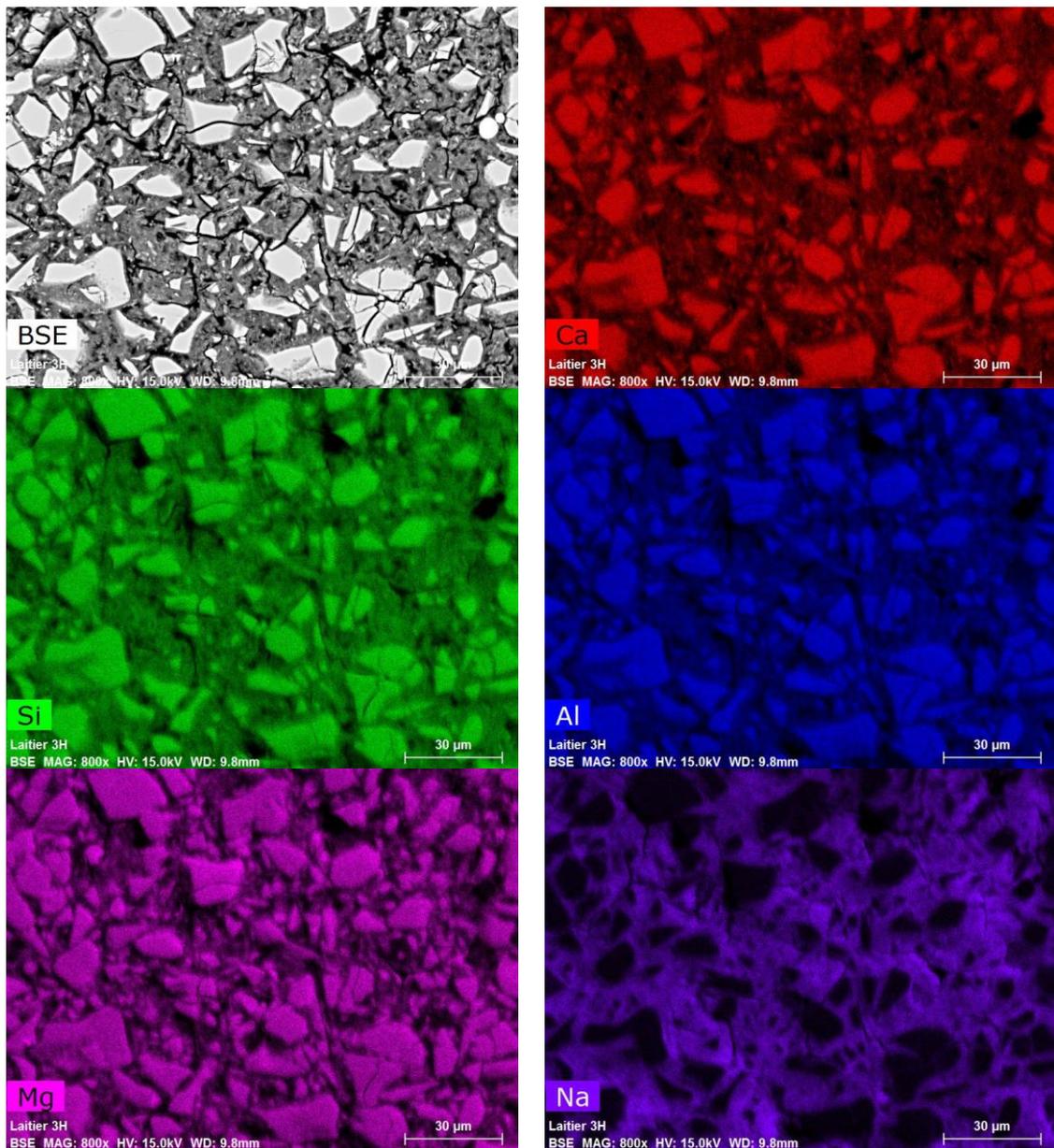


Figure 8 : Cartographie MEB du matériau à l'âge de 3 h (microanalyses élémentaires EDS)

#### 2.2.2.6. Discussion

Les résultats obtenus mettent en évidence que les liants à base de laitier activé par le carbonate de sodium permettent d'égaliser voire de dépasser les performances mécaniques à très jeune âge d'un ciment Portland CEM I 52,5 R traité thermiquement. Comparativement au ciment Portland, cette famille de liants est très sensible à la température, c'est-à-dire que la température influe fortement sur sa cinétique réactionnelle. On notera que le traitement thermique TT80 d'une durée courte permettant un démoulage à 5 heures, conduit généralement aux meilleures résistances à 28 jours.

Par ailleurs, une augmentation du dosage en activateur permet d'améliorer les performances à toutes les échéances mesurées. De plus, l'utilisation de carbonate de sodium en solution semble permettre d'atteindre des performances mécaniques plus tôt.

Les analyses microstructurales laissent à penser qu'en plus des carbonates de calcium voire de sodium, des C-S-H (ou C-A-S-H) sont formés dès le très jeune âge et participent ainsi au durcissement du matériau.

### 2.2.3. Étude sur béton : propriétés d'usage et durabilité

Suite aux travaux préliminaires sur mortier, il a été décidé de poursuivre les travaux sur béton afin de caractériser les performances à une plus grande échelle.

#### 2.2.3.1. Constituants

Dans le cadre de cette étude sur béton, un laitier de haut fourneau conforme à la norme NF EN 15167-1 et de classe A au sens de la norme NF EN 206/CN a été utilisé. Ses caractéristiques sont présentées dans le tableau 1.

Le carbonate de sodium  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  employé en tant qu'activateur est de qualité analytique et se présente sous forme de poudre anhydre.

Les granulats utilisés sont conformes aux normes NF EN 12620+A1 et NF P 18-545. Il s'agit d'un sable calcaire lavé 0/4 mm avec 7 % de fines, et d'un gravillon siliceux 4/8 mm. Leur absorption d'eau est respectivement de 0,42 % et 0,54 %.

Un adjuvant superplastifiant conforme à la norme NF EN 934-2 a été employé également, son extrait sec est de 30 %.

#### 2.2.3.2. Fabrication

Des gâchées de 80 litres ont été réalisées dans un malaxeur à mouvement planétaire.

Après caractérisation à l'état frais et remplissage des moules (soit une durée d'environ 45 minutes), les bétons ont reçu un traitement thermique en enceinte climatique dont les caractéristiques sont présentées au Tableau 6 :

Tableau 6 : Caractéristiques du traitement thermique TT80 sur béton

Durée du traitement thermique	Prétraitement	Montée en température	Palier	Refroidissement
TT80				
7 h 15	45 °C pendant 30 min	45 à 80 °C à 40 °C/h (52,5 min)	80 °C pendant 4 h 52 min	1 h

#### 2.2.3.3. Formulation

Deux bétons S + NC6 ont été confectionnés. Leur formule réelle est présentée au Tableau 7. Sauf pour l'eau, le dosage des constituants est exprimé en  $\text{kg}/\text{m}^3$  de matière sèche. Il est considéré que le dosage en liant total est celui du laitier de haut fourneau.

Une analyse environnementale (carbone) et économique est également effectuée. L'impact carbone retenu ici pour le laitier est de 20  $\text{kg}_{\text{eq}} \text{CO}_2/\text{t}$  (scénario sans allocation), celui du carbonate de sodium est de 1 050  $\text{kg}_{\text{eq}} \text{CO}_2/\text{t}$ . L'impact carbone du traitement thermique est estimé à 15  $\text{kg}_{\text{eq}} \text{CO}_2/\text{m}^3$  de béton. Le coût matière du carbonate de sodium est estimé ici à 205 €/t.

Les compositions ne montrent pas de surcoût par rapport à une formulation de béton conventionnelle.

La Figure 9 permet de mettre en évidence la très bonne performance carbone de ces formulations. En effet, l'impact carbone est environ divisé par 4 ou 5 comparativement à une formulation de béton conventionnelle.

NB : Avec un impact carbone pour le laitier de  $100 \text{ kg}_{\text{eq}} \text{ CO}_2/\text{t}$ , l'impact carbone des bétons passerait à  $93 \text{ kg}_{\text{eq}} \text{ CO}_2/\text{m}^3$  pour la formule S + NC6 n° 1 et  $97 \text{ kg}_{\text{eq}} \text{ CO}_2/\text{m}^3$  pour la formule S + NC6 n° 2. La réduction carbone est alors d'environ 70 % comparativement à une formulation de béton conventionnelle C35/45 à base de CEM I.

Tableau 7 : Compositions réelles des bétons S + NC6

	S + NC6 n° 1	S + NC6 n° 2
Composition ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )		
Laitier Ecocem Fos/Mer	335	352
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	34,3	36,1
Sable 0/4 mm Carrières du Boulonnais	906	890
Gravillon 4/8 mm Sablières Palvadeau	907	890
Superplastifiant BASF MasterGlenium ACE 456	2,01	-
Eau totale	193	202
soit Eau efficace	184	193
Bilans analytiques		
$E_{\text{eff}}/L$	0,55	0,55
Bilan des chlorures (% liant)	0,01	0,01
Bilan des sulfates (% liant)	0,53	0,51
Bilan des alcalins ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	21,4	22,5
Analyse environnementale et économique		
Impact carbone matière et traitement thermique ( $\text{kg}_{\text{eq}} \text{ CO}_2/\text{m}^3$ )	62	64

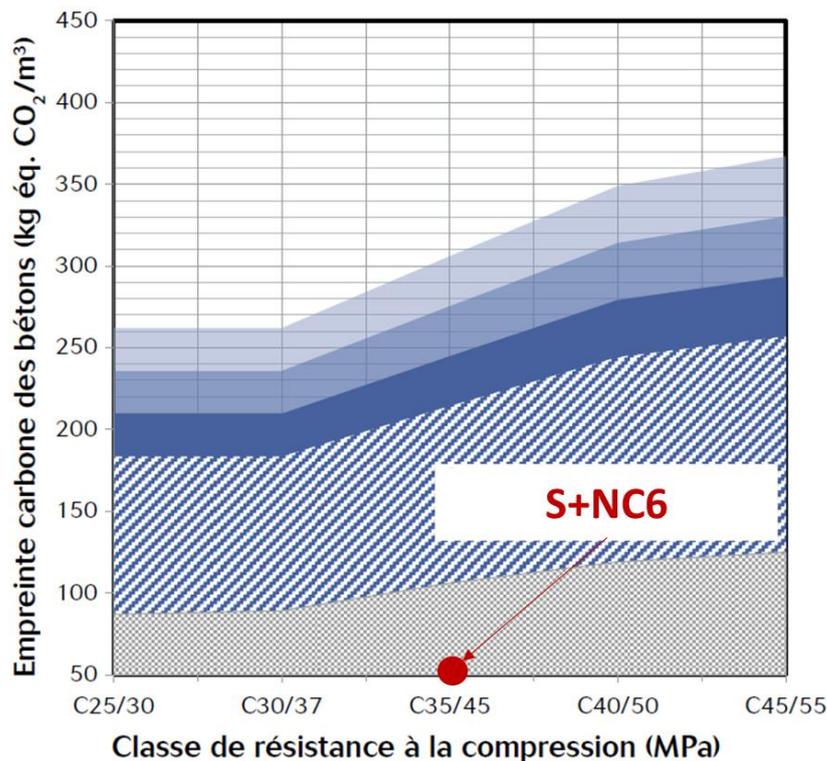


Figure 9 : Empreinte carbone des bétons S + NC6

#### 2.2.3.4. Esthétique

Au jeune âge et en particulier au sortir du traitement thermique, les bétons de laitier activé sont de couleur vert-bleu (Figure 10).

Le phénomène de verdissement des bétons à base de laitier est inhérent à l'utilisation de laitier de haut fourneau. Il s'agit d'une coloration vert-bleu passagère, sans impact sur les qualités d'usage.

La coloration apparait après la mise en place du béton et ce uniquement si le matériau est hydraté et conservé en l'absence d'oxygène (conditions dites anoxiques). C'est ce qui se passe lorsque le béton est mis en œuvre dans un coffrage ou un moule qui le sépare de l'air ambiant, créant ainsi ces conditions anoxiques. Si l'échantillon est hydraté et conservé à l'air libre, la couleur n'apparait pas.

Si le phénomène est observé depuis très longtemps, la compréhension du phénomène est assez récente<sup>9,10</sup>. Il est démontré que le verdissement est dû à des constituants chimiques présents en faible quantité dans le laitier : les ions polysulfures.

Dans le cas des laitiers hydratés, les ions polysulfures sont déstabilisés au contact de l'oxygène de l'air. Ainsi, la coloration disparaît petit à petit de la surface au contact de l'air. Le cœur du matériau est, quant à lui, peu en contact avec l'oxygène de l'air. C'est pourquoi la couleur peut rester présente à cœur.

<sup>9</sup> Verdissement des bétons à base de ciment contenant du laitier de haut-fourneau, L. Izoret et D. Le Cornec, Décryptage n° 5 ATILH, 2017

<sup>10</sup> On the origin of the blue/green color of blast-furnace slag-based materials : Sulfur K-edge XANES investigation, M. Chaouche et al., Journal of the American Ceramic Society 2017 ;1-10



Figure 10 : Éprouvette de béton S + NC6 après traitement thermique

#### 2.2.3.5. Propriétés d'usage

Les caractéristiques à l'état frais et durcis des bétons étudiés sont présentées dans le tableau 8.

L'affaissement est mesuré selon la norme NF EN 12350-2, la masse volumique est mesurée selon NF EN 12350-6, la teneur en air selon NF EN 12350-7.

Les éprouvettes sont ensuite confectionnées puis conservées en ambiance humide jusqu'à 28 jours ( $T = 20 \pm 2$  °C et HR > 90 %).

La résistance à la compression est mesurée sur trois cylindres par échéance selon la norme NF EN 12390-3, la résistance au fendage est mesurée selon NF EN 12390-6, le module d'Young selon NF EN 12390-13, l'absorption d'eau selon NF EN 13369. Enfin la mesure de porosité accessible à l'eau et de la masse volumique du béton durci sont mesurées selon NF P 18-459.

Tableau 8 : Propriétés des bétons S + NC6

		S + NC6 n° 1	S + NC6 n° 2	Exigences XC1	Exigences XC4
Caractérisations à l'état frais					
Affaissement (mm)		20	80		
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )		2 380	2 370		
Teneur en air (%)		1,9	1,6		
Propriétés à l'état durci					
Résistance à la compression sur cylindre 11 x 22 cm (MPa)	à 8 h		26,2	$f_{ck,cyl,28} \geq 25 \text{ MPa}^b$	$f_{ck,cyl,28} \geq 35 \text{ MPa}^b$
	à 9 h	32,0			
	à 28 j	46,2	37,9		
	à 90 j	53,6	42,6		
	à 600 j <sup>a</sup>	58,2			
Résistance à la traction par fendage à 28 j (MPa)		2,66			
Module d'élasticité en compression à 28 j (GPa)		33,2			
Absorption d'eau à 28 j (%)		6,1		$\leq 7 \%^b$	$\leq 6,5 \%^b$
Porosité à 28 j (%)		14,3		$\leq 15,5 \%^c$	$\leq 14,5 \%^c$
Masse volumique à 28 j (kg/m <sup>3</sup> )		2 240			

<sup>a</sup> résistance mesurée sur cubes 7 x 7 x 7 cm

<sup>b</sup> selon NF EN 206/CN NA.F.2

<sup>c</sup> selon fascicule 65 tableau 8.D, durée de vie de 100 ans

### 2.2.3.6. Résistance à la fissuration par retrait

Les bétons de géopolymères sont généralement connus pour être sujet à un retrait important. Cependant, le lien entre le retrait et le risque de fissuration n'est pas direct car la fissuration dépend également d'autres paramètres, tels que le module d'élasticité ou la résistance à la traction du béton.

Ainsi, afin d'évaluer la résistance à la fissuration, un essai de performance a été réalisé sur le béton S + NC6 n° 2.

La caractérisation a été menée via le test de l'essai à l'anneau selon un mode opératoire inspiré de la norme NT Build 433 « Concrete : Cracking tendency - exposure to drying during the first 24 hours ». Ce test consiste à couler du béton entre deux anneaux dotés d'ailettes favorisant la création de fissures. À l'issue de la période de séchage, les fissures générées sont mesurées.

Lorsque l'eau s'évapore du béton frais, des contraintes de traction s'accumulent normalement dans les capillaires. Le béton a alors tendance à se contracter, et étant donné que la contraction est restreinte par les ailettes, des contraintes radiales se développent au sein du

béton. L'étendue de la fissuration dépend à la fois de l'ampleur des forces de traction et de la capacité du béton à se déformer.

Cette méthode peut être utilisée pour évaluer la tendance à la fissuration des différents types de béton exposés au séchage précoce. Cet essai peut également être appliqué dans le but d'évaluer l'effet de divers paramètres, tels que la composition du béton ou l'effet d'un traitement thermique.

La température et l'humidité doivent être contrôlées durant la période de développement des fissures. À l'issue de la période d'étude, une observation visuelle est réalisée afin de localiser d'éventuelles fissures. Le cas échéant, un fissuromètre est utilisé afin de mesurer à 0,02 mm près toutes les fissures. Puis, une mesure de fissure moyenne peut être calculée et arrondie à 0,05 mm près.

Dans cette étude, un traitement thermique TT80 tel que défini précédemment a été réalisé. La composition S + NC6 n° 2 n'a présenté aucune fissure à l'issue de l'étuvage (Figure 11). Après conservation pendant 28 jours en ambiance de laboratoire (environ 20 °C et 50 % d'hygrométrie relative), aucune fissure n'a été décelée visuellement (Figure 12).



Figure 11 : Essai à l'anneau : pas de fissure observée (à gauche : béton frais avant traitement thermique, à droite : à 8 h à l'issue du traitement thermique)



Figure 12 : Essai à l'anneau à 28 jours : pas de fissure observée

#### 2.2.3.7. Performances vis-à-vis des réactions de gonflement interne

Les solutions d'activation du laitier développées dans le présent document font intervenir des solutions alcalines riches en sodium.

Pour éviter d'éventuels risques de gonflement provoqué par la réaction alcali-silice, il paraît nécessaire d'utiliser des granulats non réactifs dans la formule de béton.

Pour ce qui est de la réaction sulfatique interne, un essai de performance d'évaluation de la réactivité du béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne a été réalisé selon la méthode d'essai n° 66 des LPC.

L'essai a pour objectif de d'évaluer l'aptitude d'un béton à résister à une réaction sulfatique d'origine interne due à la formation différée d'ettringite. Il s'applique à des bétons susceptibles de subir une élévation de température importante au jeune âge ( $T > 65\text{ °C}$ ) et d'être exposés à un environnement humide.

La réaction sulfatique interne est mesurée par une mesure de gonflement sur trois éprouvettes de béton prismatiques de dimensions (7 x 7 x 28) cm. Après le traitement thermique TT80, les échantillons subissent deux cycles de séchage ( $T = 38 \pm 2\text{ °C}$  et  $HR < 30\%$ ) et d'humidification (immersion dans de l'eau à  $20 \pm 2\text{ °C}$ ), suivis d'une immersion définitive dans de l'eau à  $20 \pm 2\text{ °C}$  pendant laquelle les mesures de gonflement sont réalisées.

Les résultats d'expansion et de variation de masse sont présentés en Figure 13.

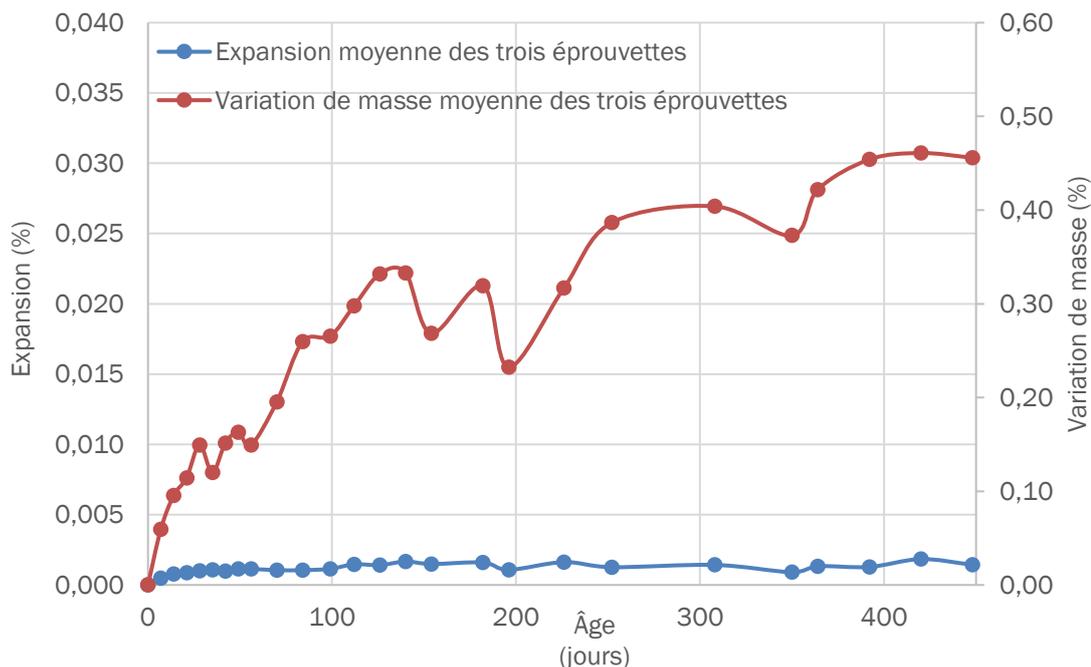


Figure 13 : Performances vis-à-vis de la RSI de la formule S + NC6 n° 1

Les recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne publiées par l'IFSTTAR en 2017 définissent des critères (dont au moins un doit être respecté) permettant de considérer un couple formule de béton/échauffement comme apte à l'emploi. Le premier critère est le suivant : « La déformation longitudinale moyenne de 3 éprouvettes est inférieure à 0,04 % et aucune valeur individuelle ne dépasse 0,06 % à l'échéance de 12 mois. »

Pour notre cas d'étude, le couple S + NC6/TT80 respecte ce critère avec une déformation longitudinale moyenne des trois éprouvettes à l'échéance de 12 mois de 0,0013 %.

#### 2.2.3.8. Résistance à la corrosion des armatures induite par carbonatation

Les règles de l'art actuelles permettent de formuler des bétons courants résistants à la carbonatation. Il s'agit d'un phénomène dans lequel le CO<sub>2</sub> atmosphérique réagit avec certains hydrates cimentaires (portlandite en particulier dans les bétons courants) et provoque une baisse du pH de la solution interstitielle suffisante pour atteindre un état de dépassement des aciers d'armature.

Les liants traditionnels à base de laitier sont connus pour présenter une résistance à la carbonatation moins importante que les liants à base de ciment Portland exclusivement, sans pour autant qu'il y ait nécessairement un risque accru de corrosion des armatures du fait de la contribution des laitiers à la densité de la matrice cimentaire. À la différence du ciment Portland, le laitier ne produit pas de portlandite (Ca(OH)<sub>2</sub>) mais tend à la consommer. Or la portlandite ralentit l'avancement du front de carbonatation et permet de maintenir un pH élevé de la solution interstitielle en présence des cations sodium et potassium.

Concernant l'activation alcaline du laitier, les connaissances relatives à la carbonatation (et même plus généralement vis-à-vis de la corrosion des armatures) sont très limitées.

L'objectif de ces travaux est de vérifier dans quelle mesure un essai accéléré de carbonatation, tel que développé pour des bétons à base de ciment Portland, est représentatif pour qualifier un béton activé par du carbonate de sodium. Quel est l'effet de la carbonatation

sur le pH de la solution interstitielle du béton ? Une baisse du pH induit-elle une dépassection de l'acier d'armature puis sa corrosion ?

La cinétique de carbonatation a été étudiée en parallèle de la dépassection des armatures. Pour cela, six éprouvettes prismatiques (7 x 7 x 14) cm dont trois armées ont été confectionnées pour le béton S + NC6 n° 1 (cf. Figure 14).

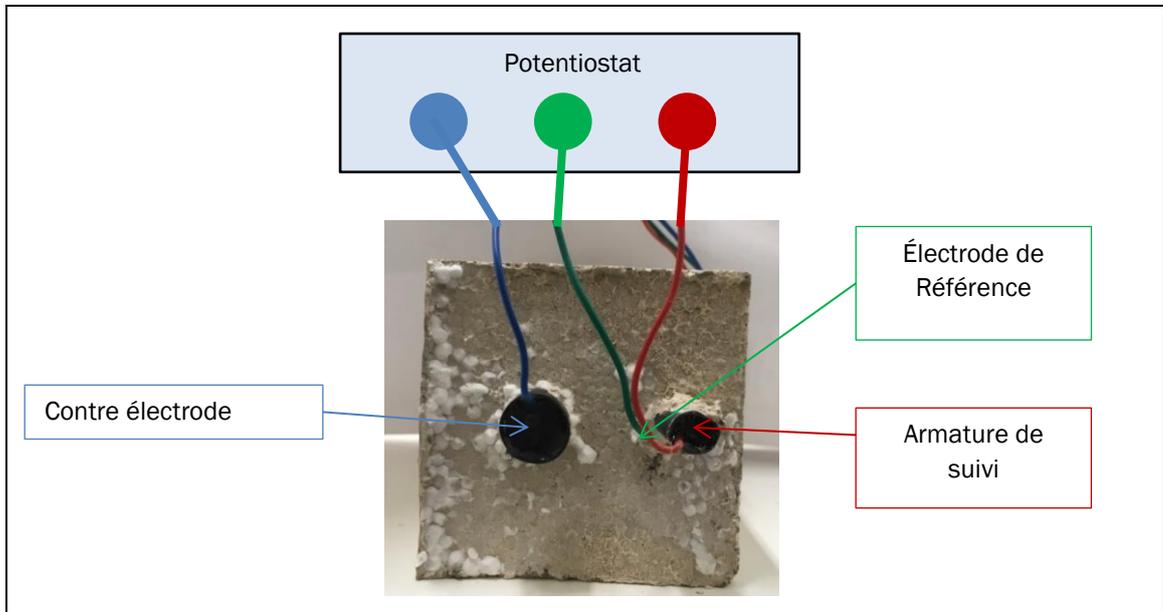


Figure 14 : Éprouvette prismatique (7 x 7 x 14 cm) armée pour le suivi de la corrosion des armatures

Ces six éprouvettes ont subi une cure endogène pendant 3 jours puis une cure sèche (20 °C et 50 % d'humidité relative) pendant 25 jours. À l'issue de cette cure, un pré-conditionnement de 14 jours en cure sèche a été appliqué aux éprouvettes avant de les soumettre à une teneur en CO<sub>2</sub> de 50 %. Lorsque la carbonatation (révélée à la phénolphthaléine) fut totale, les trois éprouvettes armées ont été placées dans des conditions favorables au développement de la corrosion des armatures (20 °C et HR > 80 %).

Trois éprouvettes non armées ont servi au suivi de la cinétique de carbonatation et trois éprouvettes armées ont permis de suivre la cinétique de corrosion.

À partir des profondeurs moyennes de décoloration de la phénolphthaléine obtenues aux différentes échéances (Figure 15), une vitesse de carbonatation, exprimée en mm par jour<sup>1/2</sup>, est déterminée. Cette vitesse est présentée en Figure 16. La vitesse de carbonatation est calculée en considérant la méthodologie préconisée par la norme NF EN 12390-12 : la profondeur moyenne de carbonatation à chaque temps d'exposition a été tracée (axe y) en fonction de la racine carrée du temps d'exposition en jours (axe x) et une régression linéaire a été réalisée à travers les points en imposant a = 0 (en l'absence de mesure initiale) dans la formule suivante :

$$d = a + K_{AC} \cdot t^{1/2}$$

où d représente la profondeur moyenne de carbonatation au temps t en mm ;  
a représente la profondeur carbonatée à t=0 (0 mm si pas de mesure effectuée) ;  
K<sub>AC</sub> représente la vitesse de carbonatation dans les conditions d'essai spécifiées dans le présent rapport en mm/jours<sup>1/2</sup> ;  
t représente le temps d'exposition en jours.

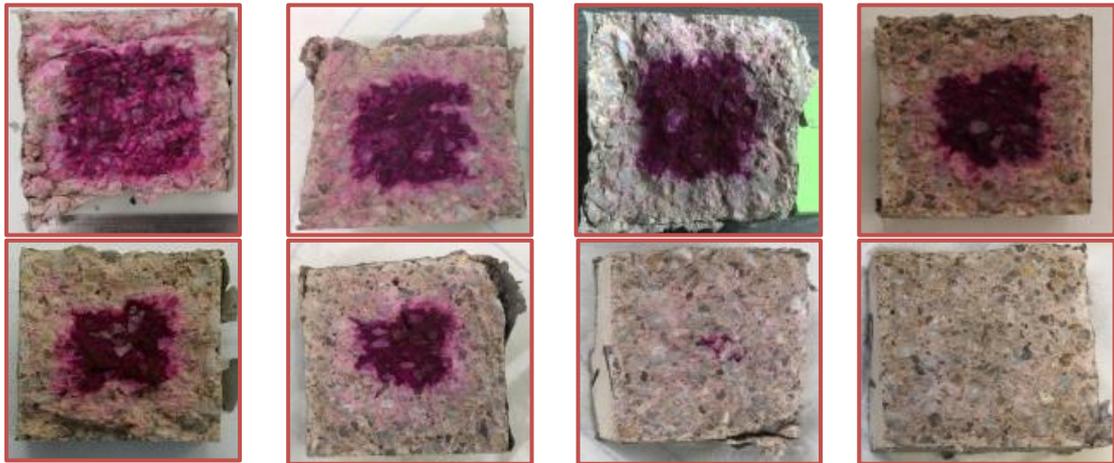


Figure 15 : Profondeurs de décoloration de la phénolphtaléine à différentes échéances d'essai

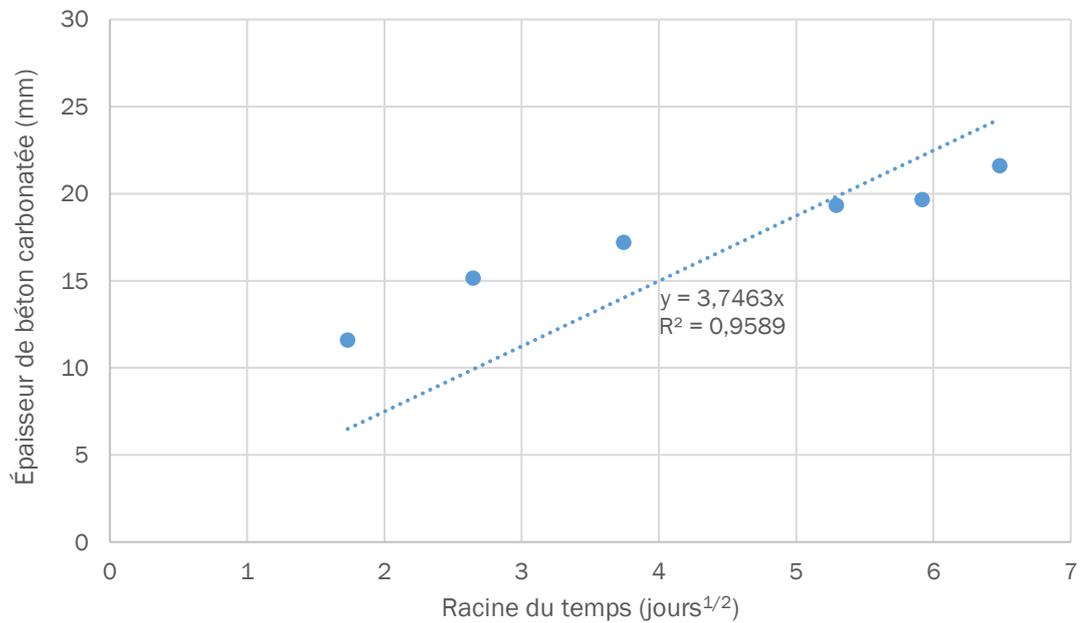


Figure 16 : Cinétique de carbonatation de la formule S + NC6 n° 1

Tableau 9 – Positionnement du béton S + NC6 par rapport à des bétons similaires (sources : autres études Cerib)

Numéro de béton	Durée de la cure (jours)	Type de liant	$E_{eff}/L_{tot}$	Liant total (kg/m <sup>3</sup> )	Porosité accessible à l'eau (%)	Vitesse de carbonatation (mm/j <sup>1/2</sup> )
S + NC6 n° 1	28	100 % laitier	0,55	335	14,3	3,7
2	90	CEM III/A + 15 %L	0,53	330	16,7	3,5
3	90	CEM II/A-L	0,54	335	14,6	7,2
4	90	CEM I + 60 %S	0,55	351	14,7	1,7
5	90	CEM I	0,55	330	13,9	2,0

À titre indicatif, le tableau 9 donne des vitesses de carbonatation de bétons similaires au béton S + NC6 n° 1. Les bétons présentés ont subi une cure sèche similaire au béton de cette étude mais d'une durée de 90 jours (28 jours pour S + NC6 n° 1). Aussi, les bétons ont subi un séchage de 14 jours à 45 °C puis une stabilisation de 7 jours à 20 °C, 65 % HR avant mise en carbonatation (le béton S + NC6 n° 1 n'a pas subi le séchage accéléré).

La vitesse de carbonatation du béton S + NC6 n° 1 est similaire à celle du béton 2 et inférieure à celle du béton 3 ce qui montre que la solution à base de laitier activé présente une résistance à la carbonatation acceptable par rapport à des bétons autorisés aujourd'hui pour les classes XC (cas des bétons 2, 3 et 5 du tableau).

Des études sur la corrosion des bétons contenant du laitier sont disponibles dans la littérature. La plupart de ces résultats concernent la corrosion due aux ions chlorure, la corrosion par carbonatation des bétons au laitier est peu traitée. Toutefois, des tendances se dégagent<sup>11,12,13</sup> et peuvent être transposées aux bétons subissant la carbonatation :

- sur béton sain, le potentiel de corrosion d'un béton contenant du laitier est plus faible que celui d'un béton de CEM I. Il ne faut donc pas interpréter un potentiel de corrosion faible comme une armature dépassivée ;
- la vitesse de corrosion serait plus lente pour des bétons contenant du laitier que pour les CEM I ;
- la surface d'acier corrodée serait moins importante dans le cas de béton contenant du laitier (tous paramètres égaux par ailleurs) ;

Les bétons contenant 100 % de laitier activé chimiquement n'ayant pas fait l'objet de beaucoup d'études, il est important d'étudier dans quelle mesure leur comportement vis-à-vis du phénomène de corrosion peut être comparé à celui d'un CEM I ou CEM I + laitier.

En parallèle du suivi de la cinétique de carbonatation, des mesures de potentiel de corrosion ont été effectuées périodiquement sur trois éprouvettes armées (éprouvettes notées n° 4, n° 5 et n° 6) durant la phase de carbonatation (exposition à un taux de CO<sub>2</sub> de 50 %) jusqu'à carbonatation totale (révélée à la phénolphtaléine) puis en enceinte de corrosion.

L'éprouvette n° 4 dispose d'un acier placé au cœur de l'éprouvette avec un enrobage mesuré à 27 mm. L'enrobage de l'éprouvette n° 5 est mesuré à 26 mm tandis que celui de l'éprouvette n° 6 est de 19 mm.

L'analyse comparative de l'évolution de ces grandeurs électrochimiques permet d'estimer de manière qualitative la probabilité de dépassivation et le départ de la corrosion (Figures 17 et 18).

À partir de la Figure 17, on constate qu'à environ 14 jours de carbonatation, le front de carbonatation atteint l'acier placé à 19 mm d'enrobage de l'éprouvette n° 6. Au même moment, on constate une chute du potentiel de corrosion de l'éprouvette n° 6.

Vers 42 jours de carbonatation, le front de carbonatation atteint les aciers placés à 26 et 27 mm d'enrobage des éprouvettes n° 5 et n° 4 respectivement. On constate vers 42 jours une chute du potentiel de corrosion de ces éprouvettes.

Pour les trois éprouvettes, une première chute du potentiel de corrosion se produit lorsque le béton d'enrobage a été carbonaté. Une dépassivation des armatures se produirait à cet instant.

---

11 Yeau KY, Kim EK, an experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast furnace slag, Cement and Concrete Research 35, 2005

12 Garcia V, François R, Carcasses M, Gegout P, Potentiel measurement to determine the chloride threshold concentration that initiates corrosion of reinforcing steel bar in slag concretes, Materials and Structures 47, 2014

13 Song HW, Sarasvathy V, Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag – An overview, Journal of Hazardous Materials B138, 2006

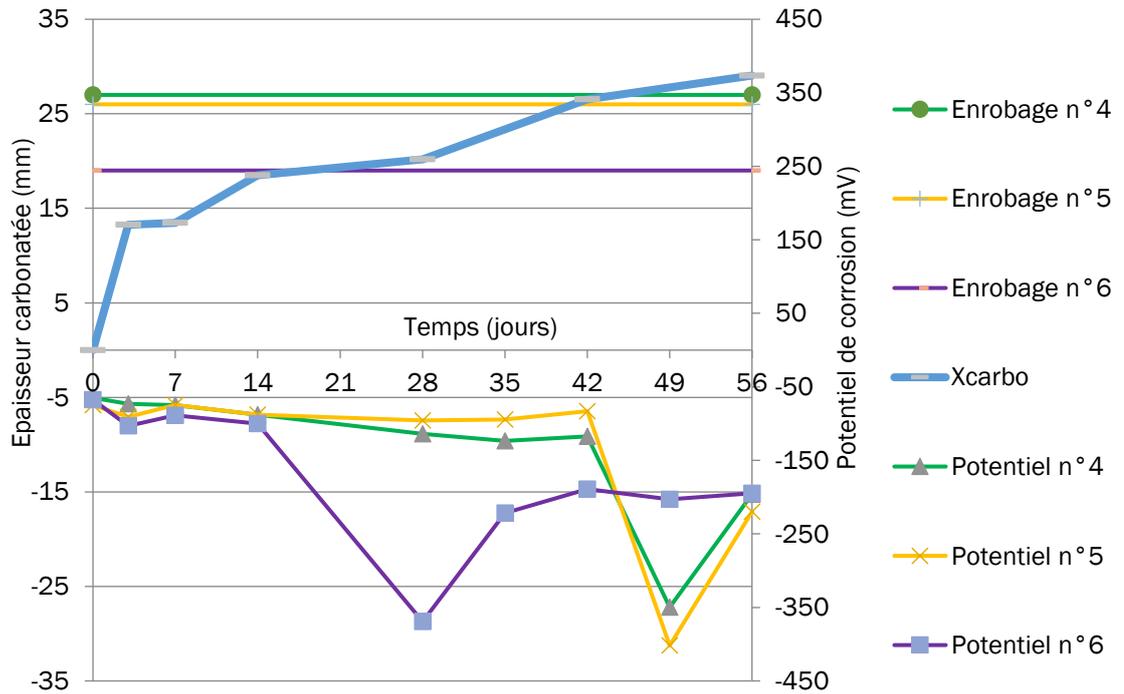


Figure 17 : Mise en corrélation de l'évolution du potentiel de corrosion et de la carbonatation du béton d'enrobage de la formule S + NC6 n° 1

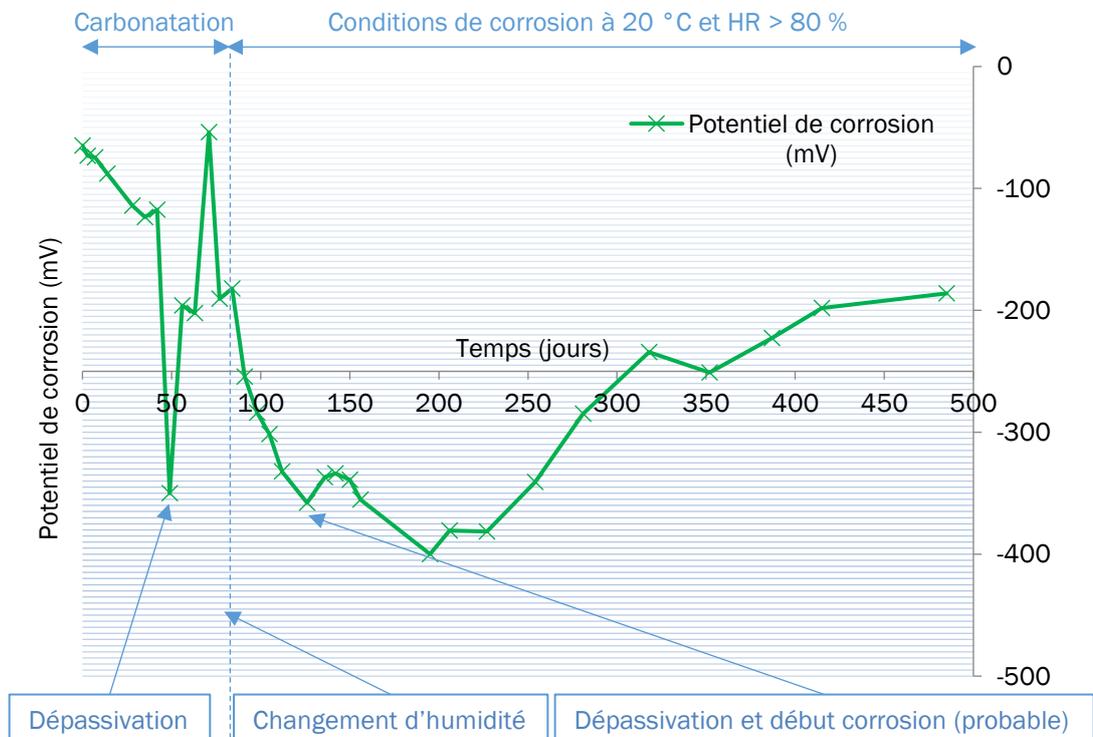


Figure 18 : Suivi électrochimique dans l'éprouvette n° 4 de la formule S + NC6 n° 1

L'évolution du potentiel de corrosion a été suivie pendant plus d'un an (Figure 18). Après la première chute du potentiel liée à la dépassivation de l'acier avec l'arrivée du front de carbonatation sur l'armature et modification du pH, on observe une remontée du potentiel. Elle est probablement due à une réalcalinisation du milieu autour de l'armature. Une deuxième chute est remarquée à partir de l'âge de 80 jours de suivi. Cette chute correspond au changement de condition d'essai : en effet, à ce moment l'éprouvette a été sortie de l'enceinte de carbonatation pour être placée dans une enceinte de corrosion dont l'hygrométrie relative est plus élevée ( $> 80\%$ ). Environ un mois après, on observe que le potentiel s'est stabilisé à un niveau bas. C'est le signe d'une dépassivation avec un début de corrosion. En fin d'essai, l'éprouvette est fendue pour une inspection visuelle de l'armature (Figure 19). Des traces de corrosion sont constatées.

Les résultats obtenus lors du suivi de la corrosion post carbonatation montrent un potentiel de corrosion relativement faible par rapport à ceux des bétons classiques. Toutefois, malgré ces résultats, l'armature ne présente pas une réduction de section significative ni une corrosion totale. Ceci est en accord avec les résultats de Yeau et al. qui ont mis en avant une plus faible surface corrodée dans le cas des bétons au laitier malgré des résultats électrochimiques indiquant une corrosion active.

Les présents travaux montrent que la phénoménologie de corrosion des aciers dans les bétons de laitier activé par le carbonate de sodium présente des similarités avec celle connue pour les bétons conventionnels. En effet, la corrosion peut s'initier dans des conditions de forte humidité et après que les aciers ont été dépassivés. Cette dépassivation est induite par la carbonatation du béton. Ainsi, l'essai de carbonatation accélérée s'avère représentatif et peut être utilisé pour qualifier la performance des bétons de laitier activé par le carbonate de sodium.



Figure 19 : Inspection visuelle de la corrosion de l'armature de suivi

#### 2.2.4. Retours d'expérience

La plupart des études sur l'activation alcaline du laitier ont été réalisées en laboratoire sur des durées relativement courtes. Même si depuis les années 1950, de nombreuses applications en béton de laitier activé par des alcalins ont été réalisées, surtout dans les pays de l'ancienne Union Soviétique et en Chine, très peu de rapports d'expertise ont été publiés en anglais, rendant ces études de cas assez méconnues en Europe. Certains retours d'expérience ont toutefois pu être répertoriés.

En 1974, un entrepôt a été construit en Pologne en utilisant un béton armé à base de laitier activé par du carbonate de sodium pour des éléments de plancher et de mur. Le béton des produits était constitué de 300 kg/m<sup>3</sup> de laitier de haut fourneau, 18 kg/m<sup>3</sup> de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (soit environ 3,5 % de Na<sub>2</sub>O par rapport au laitier), 1 841 kg/m<sup>3</sup> de granulats et 140 kg/m<sup>3</sup> d'eau. D'après les informations rapportées<sup>14</sup>, le bâtiment a été suivi pendant plusieurs années ; des résistances en compression et des profondeurs de carbonatation ont été mesurées sur des échantillons prélevés dans l'ouvrage. Après 27 ans, la résistance en compression était en moyenne de 43,2 MPa (contre 22,6 MPa à 28 jours) et l'épaisseur carbonatée était en moyenne de 11 mm. Il n'a pas été observé de microfissure, ni de signe de corrosion des armatures.

Un autre retour d'expérience sur l'activation du laitier par du carbonate de sodium est donné dans la littérature<sup>15</sup>. L'étude porte sur des bétons de laitier ukrainiens datant d'entre 1964 et 1982. L'activateur alcalin du laitier est le carbonate de sodium ou un mélange à base de 85 % de carbonate de sodium et 15 % de soude ou carbonate de potassium. Une expertise a été réalisée en 2000 sur des prélèvements issus d'un système de drainage souterrain, d'une dalle préfabriquée et des faces externes d'un bâtiment résidentiel de 15 étages et d'un silo. L'inspection visuelle n'a montré ni fissure visible, ni écaillage ou défaut, ni signe de réaction alcali-granulats. Les profondeurs de carbonatation n'atteignent pas plus de 8 mm. Tous les échantillons étudiés montrent une résistance en compression significativement plus élevée que la résistance de conception et une excellente durabilité après jusqu'à 35 ans de service dans des conditions agressives.

---

<sup>14</sup> Alkali-Activated Cements and Concretes - C. Shi, P.V. Krivenko, D. Roy - Edition Taylor & Francis (2006)

<sup>15</sup> Characterization of aged slag concretes - H. Xu, J.L. Provis, J.S.J. van Deventer, P. Krivenko - ACI Materials Journal V. 105 No. 2 March-April 2008

## 2.3. Béton à forte teneur en laitier activé

Les liants composés de ciment CEM I et d'une forte teneur en laitier de haut fourneau sont aujourd'hui bien connus. Ils représentent une solution de liant bas carbone opérationnelle actuellement, au même titre que les ciments CEM III par exemple. Afin d'accélérer leur durcissement, des voies d'activation chimique et éventuellement thermique ont été développées<sup>16,17</sup>.

L'objectif de cette partie de l'étude est de démontrer l'applicabilité technique de cette solution pour la fabrication de produits en béton : produits à démoulage immédiat, produits en béton d'ingénierie.

### 2.3.1. Blocs de maçonnerie

L'influence du laitier activé sur les performances des blocs de maçonnerie en béton a été investiguée<sup>18</sup>. L'objectif des travaux réalisés par le Cerib a été d'étudier l'intérêt du laitier activé pour la fabrication de blocs de maçonnerie en béton (pas de traitement thermique) et de vérifier en particulier le comportement du béton à basse température.

Les travaux ont démarré par une étude préliminaire menée sur éprouvettes puis ont été poursuivis par une campagne d'essais sur des blocs de maçonnerie fabriqués sur une presse industrielle. Des essais ont également été menés pour étudier la tendance des bétons au laitier activé à former des efflorescences.

Dans le cadre de cette étude, le laitier utilisé était constitué de laitier conforme à la norme NF EN 15167-1 activé chimiquement par des sels de sodium. De plus, du chlorure de calcium en solution a été employé en tant qu'accélérateur.

Les travaux ont permis de mettre en évidence que l'utilisation du laitier activé rend possible la fabrication, même par temps froid, de blocs de maçonnerie de résistance courante dont le liant contient jusqu'à 50 % de laitier activé. Une conservation en étuve durant 24 à 48 heures doit toutefois être maintenue. Les taux de substitution peuvent monter jusqu'à 70 % en été. En sortie d'étuve, si les conditions sont froides, il convient de prolonger le délai de livraison.



Figure 20 : Cube de béton démoulé immédiatement



Figure 21 : Blocs à six alvéoles frais fabriqués sur presse au Cerib

<sup>16</sup> Accélération du durcissement des liants à base de laitier de haut fourneau pour les produits préfabriqués en béton - François Jacquemot - Thèse de doctorat des Mines de Douai et l'université Lille 1 (2015)

<sup>17</sup> Bétons à faible impact environnemental pour l'Industrie du Béton : Accélération du durcissement des bétons à base de liants ternaires - Marjorie Petitpain - Thèse de doctorat des Mines de Douai et l'université Lille 1 (2017)

<sup>18</sup> Étude de l'influence d'un laitier activé sur les performances des blocs de maçonnerie en béton - Suzanne Le Thierry, François Jacquemot, Nicolas Musikas, Laurent Frouin et Diane Achard - Magazine Préfa Béton International PBI/CPI 3, 2018 (2018)

La part des émissions de gaz à effet de serre liées au liant dans le béton est notablement réduite par l'utilisation du laitier.

L'analyse réalisée sur la formation des efflorescences n'a pas mis clairement en évidence l'influence du laitier sur la quantité d'efflorescences mais plutôt sur leur aspect qui semble plus diffus.

Cette étude ouvre des pistes pour favoriser l'utilisation du laitier pour la fabrication de blocs de maçonnerie et réduire encore leur impact environnemental.

## 2.3.2. Pavés

Les pavés en béton sont des produits non armés, fabriqués par démoulage immédiat et destinés au revêtement de sols. La norme NF EN 1338 définit les prescriptions et méthodes d'essais applicables aux pavés.

Dans le cadre des travaux relatés dans le présent rapport, des pavés ont été fabriqués sur la base d'une formulation de béton à forte teneur en laitier. Ils ont ensuite été caractérisés.

### 2.3.2.1. Constituants

Dans le cadre de cette étude sur pavés, un laitier de haut fourneau conforme à la norme NF EN 15167-1 a été utilisé. De plus un ciment Portland de type CEM I 52,5 R conforme à la norme NF EN 197-1 a été employé. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 10. Les granulats utilisés sont conformes aux normes NF EN 12620 et NF P 18-545. Il s'agit d'un sable calcaire lavé 0/4 mm avec 7 % de fines, et d'un gravillon calcaire 4/6 mm. Leur absorption d'eau est respectivement de 0,42 % et 0,64 %.

Un adjuvant plastifiant réducteur d'eau conforme à la norme NF EN 934-2 a été employé également, son extrait sec est de 38 %.

Du sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et du chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ) sont employés en tant qu'activateurs du laitier. Ils se présentent sous forme de poudre anhydre et sont de qualité analytique.

Tableau 10 : Caractéristiques des constituants du liant

	Laitier Ecocem Fos/mer	Ciment CEM I 52,5 R Saint Pierre La Cour
Caractéristique physiques		
Masse volumique ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,90	3,14
Surface spécifique Blaine ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	4 450	4 770
Caractéristique chimiques		
$\text{SiO}_2$ (%)	38,0	19,9
$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	10,8	4,03
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	0,7	2,28
$\text{CaO}$ (%)	42,9	63,3
$\text{MgO}$ (%)	6,6	3,89
$\text{SO}_3$ (%)	0,1	3,52
$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (%)	0,51	0,59
$\text{S}^{2-}$ (%)	0,7	0,02
$\text{Cl}^-$ (%)	0,01	0,01
PAF (%)	< 1,5	1,75

### 2.3.2.2. Fabrication et formulation

Un béton de pavé dont le liant est composé d'un mélange de 50 % de laitier activé et 50 % de ciment Portland a été étudié. Les activateurs sont incorporés directement dans l'eau de gâchage.

La formule du béton réelle est présentée au Tableau 11. Le dosage des constituants est exprimé soit en kg de matière sèche (sauf l'eau) par m<sup>3</sup> de béton, soit en % de la masse totale des constituants secs.

La teneur en liant total est plutôt élevée pour ce type de produit.

La masse volumique à l'état frais du béton est de 2 555 kg/m<sup>3</sup> (estimée sur la base d'une pesée d'un pavé et de la mesure de ses dimensions).

Les pavés fabriqués sur la presse du Cerib sont de dimensions nominales (198 x 98 x 60) mm et sont curés par auto-étuvage (20 °C) pendant 24 h.

Tableau 11 : Composition réelle du béton de pavé

Composition	Béton de pavé	
	kg/m <sup>3</sup>	%
Laitier Ecocem Fos/Mer	215	9,0
Ciment CEM I 52,5 R St Pierre La Cour	215	9,0
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,47	0,104
NaCl	2,02	0,085
Sable 0/4 mm Carrières du Boulonnais	1 431	60,0
Gravillon 4/6 mm Carrières du Boulonnais	520	21,8
Plastifiant BASF MasterCast 725	1,96	0,082
Eau totale	167	7,0
soit Eau efficace (E <sub>eff</sub> /Liant total)	157 (0,37)	6,6

### 2.3.2.3. Caractérisations

Les propriétés suivantes ont été mesurées sur les pavés selon les méthodes d'essai de la norme NF EN 1338 :

- résistance à la rupture en traction par fendage selon l'annexe F ;
- absorption d'eau selon l'annexe E ;
- résistance au gel/dégel avec sels de déverglaçage selon l'annexe D ;
- résistance à l'abrasion selon l'annexe G ;
- résistance à la glissance ou au dérapage selon l'annexe I.

Les résultats des caractérisations sont présentés au tableau 12.

Tableau 12 : Résultats des caractérisations sur pavés

	Échéance d'essai	Résultats sur pavés	Exigences NF072 Marque NF
Résistance à la rupture en traction par fendage (MPa)	24 h	1,8 (min = 1,5)	Résistance caractéristique $\geq 3,6$ min $\geq 2,9$
	7 j	4,3 (min = 3,9)	
	14 j	4,4 (min = 3,8)	
	28 j	5,1 (min = 4,2)	
Absorption d'eau (%)	28 j	4,9	moy $\leq 6,0$
Perte de masse après l'essai de gel/dégel (kg/m <sup>2</sup> )	72 j	0,1 (max = 0,2)	moy $\leq 1,0^a$ et max $\leq 1,5^a$
Abrasion - Longueur d'empreinte (mm)	28 j	23,5 (max = 24,5)	max $\leq 23$
Résistance à la glissance au pendule SRT	28 j	67	moy $\geq 35^b$

<sup>a</sup> à 28 jours

<sup>b</sup> selon la norme NF P 98-335 – Chaussées urbaines – Mise en œuvre des pavés et dalles en béton, des pavés en terre cuite et des pavés et dalles en pierre naturelle »

Les performances obtenues sur les pavés fabriqués sont élevées, en particulier on remarque une bonne résistance mécanique dès l'âge de 7 jours.

L'utilisation d'une forte teneur en laitier de haut fourneau est donc tout à fait possible dans les produits de voirie grâce à l'activation chimique et l'apport de la vibro-compaction, process propre à l'industrie du béton. Ce couple matériau/process constitue une solution bas carbone à la disposition des industriels.

### 2.3.3. Produits en béton d'ingénierie

Les solutions développées dans le cadre des présents travaux peuvent faire appel, dans certains cas, à la notion de béton d'ingénierie.

#### 2.3.3.1. Contexte normatif

Un grand nombre de produits en béton préfabriqués dans les conditions d'une usine relève de la norme NF EN 13369<sup>19</sup> « Règles communes pour les produits préfabriqués en béton ». Cette norme définit des prescriptions communes générales et sert de norme de référence pour les produits structurels afin de permettre une approche homogène dans la normalisation des produits préfabriqués en béton.

<sup>19</sup> NF EN 13369 : Règles communes pour les produits préfabriqués en béton

La norme NF EN 13369 renvoie elle-même à la norme NF EN 206/CN<sup>20</sup> lorsque cela est nécessaire, en particulier pour les exigences relatives aux constituants (§ 5.1 de NF EN 206/CN), les exigences relatives à la composition du béton (§ 5.2) et les exigences liées aux classes d'exposition (§ 5.3).

Pour les produits en béton disposant de normes contenant en elles-mêmes toutes les spécifications nécessaires (c'est le cas par exemple des blocs et des pavés), il conviendra de se référer à la norme du produit en béton concernée.

#### 2.3.3.1.1. Béton d'ingénierie

Les bétons d'ingénierie sont définis dans la norme NF EN 206/CN. Ils peuvent être utilisés entre autres pour les bétons intégrant du laitier en tant qu'addition à des teneurs supérieures à 30 %. En effet, les tableaux NA.F.3 et NA.F.4 définissant les valeurs limites pour la composition des bétons d'ingénierie prennent en compte des teneurs en laitier jusqu'à 50 %. Les bétons d'ingénierie peuvent également être formulés en associant deux ciments, par exemple un ciment CEM I et un ciment CEM III.

Un béton d'ingénierie doit faire l'objet d'une étude préliminaire (selon § NA.A.6).

#### 2.3.3.1.2. Utilisation du laitier en tant qu'addition dans le béton

La norme NF EN 15167-1<sup>21</sup> définit le laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton. La norme n'autorise aucun additif au laitier à l'exception des adjuvants de broyage.

La norme NF EN 206/CN définit la notion de liant équivalent ( $C + k.A$ ) et le concept de coefficient  $k$ . Le laitier de classe A détient un coefficient  $k$  de 0,90. La teneur en laitier  $A$  prise en compte dans le liant équivalent est limitée par le rapport  $A/(A + C)$  précisé dans les tableaux de l'annexe NA.F pour les différentes classes d'exposition. A titre d'exemple le rapport  $A/(A + C)$  maximal donné dans les tableaux NA.F.3 et NA.F.4 est de 0,50 pour la classe d'exposition XC1, 0,40 pour XC4 et 0,50 pour XA3.

Pour les classes d'expositions XA, la norme renvoie au fascicule FD P 18-011<sup>22</sup> pour le choix du ciment et des additions.

#### 2.3.3.1.3. Utilisation du laitier dans le ciment

La norme NF EN 197-1<sup>23</sup> définit les ciments, y compris ceux intégrant du laitier tels que les ciments de type CEM III.

Le CEM III/A contient entre 36 % et 65 % de laitier en tant que constituant principal. Le ciment CEM III/B contient entre 66 % et 80 % de laitier. Le ciment CEM III/C contient entre 81 % et 95 % de laitier.

Les ciments de haut fourneau résistants aux sulfates (SR) sont les CEM III/B et CEM III/C.

Par ailleurs, les normes NF P 15-317<sup>24</sup> et NF P 15-319<sup>25</sup> définissent les caractéristiques PM et ES respectivement. Plusieurs conditions doivent être réunies pour qu'un ciment CEM III/A soit PM ES, parmi lesquelles :

- la proportion de laitier granulé de haut-fourneau doit être égale ou supérieure à 60 %, en masse ;
- la quantité totale des additifs doit être inférieure ou égale à 1,0 % en masse du ciment.

*NB* : on notera que la norme NF EN 197-1 autorise l'utilisation d'additifs (moins de 1 % du ciment en masse) et que le référentiel de certification de la marque NF liants hydrauliques autorise l'incorporation de sels chlorés dans les ciments CEM III en tant qu'additif.

<sup>20</sup> NF EN 206/CN : Béton — Spécification, performance, production et conformité — Complément national à la norme NF EN 206

<sup>21</sup> NF EN 15167-1 : Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis — Partie 1 : Définitions, exigences et critères de conformité

<sup>22</sup> FD P 18-011 : Béton — Définition et classification des environnements chimiquement agressifs — Recommandations pour la formulation des bétons

<sup>23</sup> NF EN 197-1 : Ciment — Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants

<sup>24</sup> NF P 15-317 : Liants hydrauliques — Ciments pour travaux à la mer

<sup>25</sup> NF P 15-319 : Liants hydrauliques — Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates

#### 2.3.3.1.4. Utilisation d'un activateur dans le béton

Il existe différents composés qui ont une action spécifique sur l'hydratation du laitier.

Il est possible de trouver des accélérateurs sous forme d'adjuvants conformes à la norme NF EN 934-2<sup>26</sup>. Dans ce cas, la question de la conformité du béton à la norme NF EN 206/CN ne se pose pas.

Lorsque les activateurs du laitier ne sont pas des adjuvants conformes à la norme NF EN 934-2, tels que les sels alcalins, la question de leur positionnement vis-à-vis des normes se pose. Dans le cas de la norme NF EN 206/CN, le fascicule FD P 18-480 permettant de justifier la durabilité d'un béton selon une approche performantielle restreint la notion d'ajouts aux fibres et agents de viscosité, ce qui exclut de fait des activateurs tels que les sels alcalins.

En lien avec la résistance aux réactions alcali-silice, il convient d'appliquer le fascicule FD P 18-464<sup>27</sup>. En particulier, il convient que les granulats soient non réactifs ou de faire un bilan des alcalins.

En lien avec la résistance à la corrosion des armatures induite par les chlorures, la norme NF EN 206/CN définit de teneurs maximales en chlorures rapportées à la masse de ciment. En France, la classe Cl 0,65 existe pour les bétons formulés avec des ciments de type CEM III. On notera également que la norme NF EN 206/CN n'autorise pas l'ajout de chlorure de calcium ni les adjuvants à base de chlorures.

En lien avec la prévention des réactions de gonflement induites par les sulfates, les recommandations RSI<sup>28</sup> sont d'application. La norme NF EN 206/CN n'explicite pas de valeur limite particulière quant à un bilan des sulfates dans le béton. Des valeurs maximales sur les sulfates existent cependant pour les constituants du béton : 4 % pour les ciments, 2,5 % pour le laitier, 0,2 % pour les granulats naturels (Code A). Pour les adjuvants, les sulfates figurent dans la liste des substances actives approuvées.

#### 2.3.3.2. Application sur un béton auto-plaçant pour produit de génie civil

L'application de la solution de mélange de ciment et laitier activé par voie chimique et thermique a été étudiée sur un béton auto-plaçant. Ce BAP est destiné à un produit de génie civil, il a vocation à résister à une attaque acide telle que décrite dans la classe d'exposition XA3.

##### 2.3.3.2.1. Constituants

Dans le cadre de cette étude sur BAP, un laitier de haut fourneau conforme à la norme NF EN 15167-1 et de classe A au sens de la norme NF EN 206/CN a été utilisé. De plus un ciment Portland de type CEM I 52,5 R conforme à la norme NF EN 197-1 a été employé. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 10.

Les granulats utilisés sont conformes aux normes NF EN 12620 et NF P 18-545. Il s'agit d'un sable calcaire lavé 0/4 mm avec 7 % de fines, d'un gravillon calcaire 4/12 mm et d'un gravillon calcaire 12/20 mm. Leur absorption d'eau est respectivement de 0,42 %, 0,57 % et 0,57 %. Ils sont non réactifs vis-à-vis de l'alcali-réaction.

Un adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau conforme à la norme NF EN 934-2 a été employé également, son extrait sec est de 33 %.

Du sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et du chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ) sont employés en tant qu'activateurs du laitier. Ils se présentent sous forme de poudre anhydre et sont de qualité analytique.

##### 2.3.3.2.2. Fabrication

Une gâchée de 80 litres ont été réalisée dans un malaxeur à mouvement planétaire. Les activateurs chimiques sont incorporés dans l'eau de gâchage.

<sup>26</sup> NF EN 934-2 : Adjuvants pour béton, mortier et coulis — Partie 2 : Adjuvants pour bétons — Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage

<sup>27</sup> FD P 18-464 : Béton — Dispositions pour prévenir les phénomènes d'alcali-réaction

<sup>28</sup> Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne, IFSTTAR, 2017

Après caractérisation à l'état frais et remplissage des moules (soit une durée d'environ 45 minutes), les bétons ont reçu un traitement thermique en enceinte climatique dont les caractéristiques sont présentées à la Figure 22.

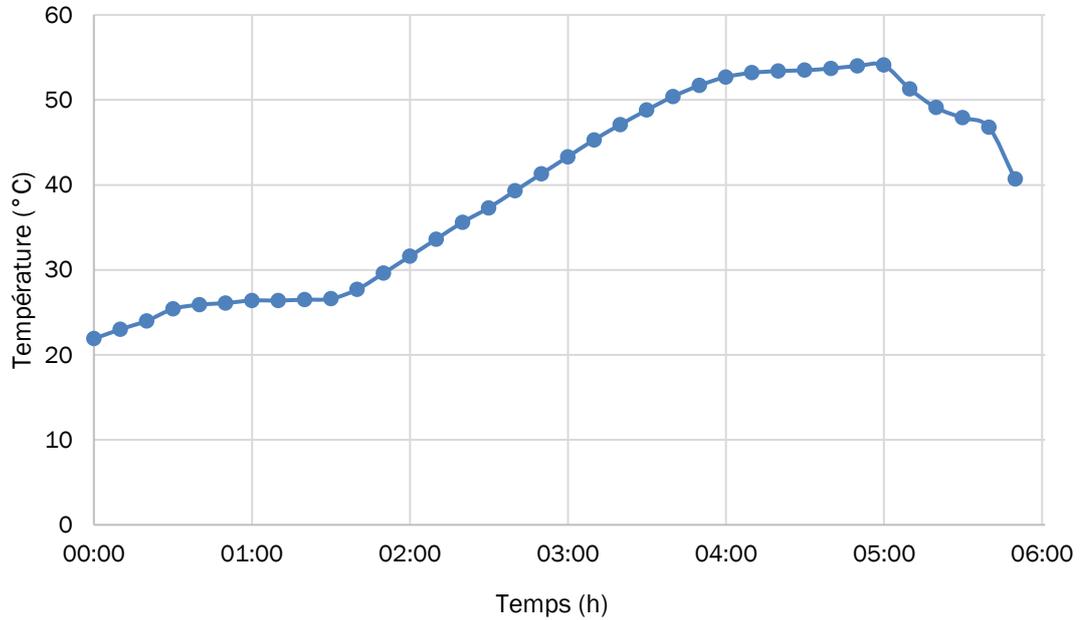


Figure 22 : Températures mesurées lors du traitement thermique du BAP

### 2.3.3.2.3. Formulation

La formule réelle du BAP est présentée au Tableau 13. Les critères pour les classes d'exposition XA3 et XC4 du tableau NA.F.3 de la norme NF EN 206/CN sont pris en considération.

Sauf pour l'eau, le dosage des constituants est exprimé en kg/m<sup>3</sup> de matière sèche.

Tableau 13 : Composition réelle du BAP

	BAP	Exigences
Composition (kg/m <sup>3</sup> )		
Laitier Ecocem Fos/Mer	290	
Ciment CEM I 52,5 R St Pierre La Cour	193	
Sable 0/4 mm Carrières du Boulonnais	788	
Gravillon 4/12 mm Carrières du Boulonnais	358	
Gravillon 12/20 mm Carrières du Boulonnais	644	
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,65	
NaCl	2,18	
Superplastifiant BASF MasterGlenium ACE 590	1,58	
Eau totale	178	
soit Eau efficace E <sub>eff</sub>	167	
Bilans analytiques		
Liant total L <sub>tot</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	483	
E <sub>eff</sub> /L <sub>tot</sub>	0,35	
Liant équivalent L <sub>eq</sub> si A/A+C = 0,50 (kg/m <sup>3</sup> )	367	≥ 360 (XA3) <sup>a</sup>
E <sub>eff</sub> /L <sub>eq</sub> si A/A+C = 0,50	0,45	≤ 0,45 (XA3) <sup>a</sup>
Liant équivalent L <sub>eq</sub> si A/A+C = 0,40 (kg/m <sup>3</sup> )	309	≥ 280 (XC4) <sup>a</sup>
E <sub>eff</sub> /L <sub>eq</sub> si A/A+C = 0,40	0,54	≤ 0,55 (XC4) <sup>a</sup>
Teneur en laitier dans le liant (% L <sub>tot</sub> )	60	b
Teneur en activateurs/additifs (% L <sub>tot</sub> )	1,0	c
Bilan des chlorures (% L <sub>tot</sub> )	0,30	≤ 0,40 (Cl 0,4) <sup>d</sup>
Bilan des sulfates (% L <sub>tot</sub> )	2,26	
Bilan des alcalins (kg/m <sup>3</sup> )	5,1	

<sup>a</sup> selon NA.F.3 de NF EN 206/CN

<sup>b</sup> les ciments PM ES doivent contenir au moins 60 % de laitier

<sup>c</sup> les ciments PM ES doivent contenir au plus 1,0 % d'additif

<sup>d</sup> la classe de teneur en chlorures Cl 0,40 convient pour les bétons contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées selon NF EN 206/CN

#### 2.3.3.2.4. Performance environnementale et économique

Une analyse environnementale (carbone) et économique est également effectuée sur la formule pour 1 m<sup>3</sup> de béton (Tableau 14).

L'impact carbone retenu ici pour le laitier est de 20 kg<sub>eq</sub> CO<sub>2</sub>/t (scénario sans allocation), celui du sulfate de sodium est de 1 050 kg<sub>eq</sub> CO<sub>2</sub>/t et celui du chlorure de sodium est de 1 010 kg<sub>eq</sub> CO<sub>2</sub>/t. L'impact carbone du traitement thermique est estimé à 15 kg<sub>eq</sub> CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de béton.

Les coûts considérés des constituants traditionnels (ciment CEM I, laitier, granulats) sont des coûts moyens du marché français. Le coût matière du sulfate de sodium est estimé ici à 105 €/t et celui du chlorure de sodium à 75 €/t.

Tableau 14 : Analyse environnementale du BAP

	BAP
Analyse environnementale	
Impact carbone matière et t. thermique (kg <sub>eq</sub> CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	178

La Figure 23 permet de mettre en évidence la très bonne performance carbone de la formulation de BAP. En effet, l'impact carbone est divisé par 2 comparativement à une formulation de béton conventionnel à base de ciment CEM I.

NB : Avec un impact carbone pour le laitier de 100 kg<sub>eq</sub> CO<sub>2</sub>/t, l'impact carbone du béton passerait à 202 kg<sub>eq</sub> CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>. La réduction carbone est alors d'environ 30 % comparativement à une formulation de BAP conventionnelle C45/55 à base de CEM I.

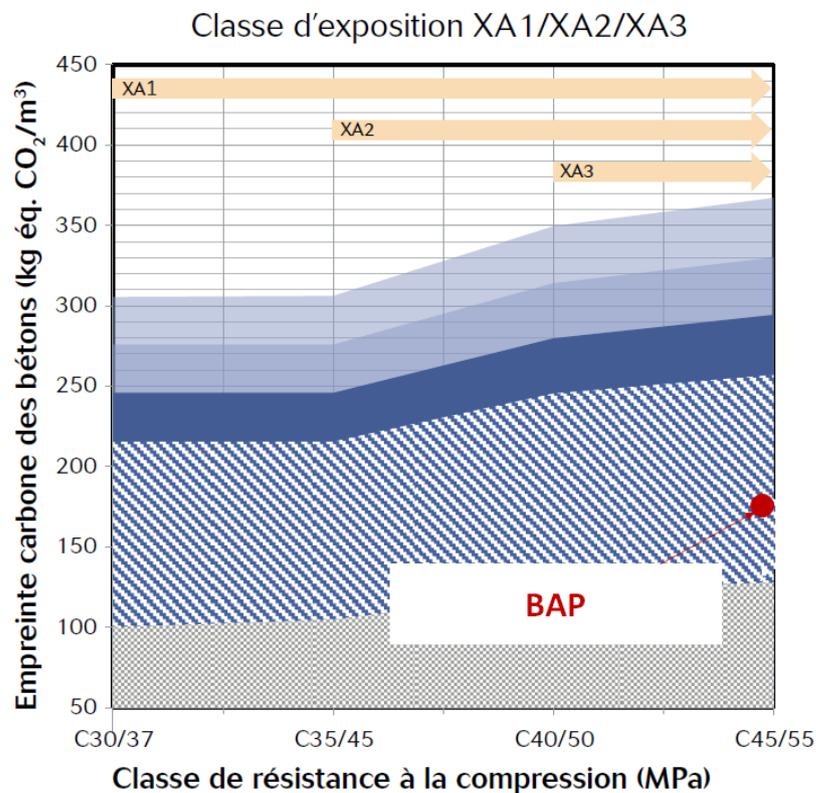


Figure 23 : Empreinte carbone du BAP

Par ailleurs, la composition d'intérêt ne montre pas de surcoût par rapport à une formulation de BAP conventionnelle.

#### 2.3.3.2.5. Propriétés à l'état frais, performances mécaniques et indicateurs de durabilité

Les propriétés d'usage du BAP ont été mesurées.

La masse volumique est mesurée selon la norme NF EN 12350-6, la teneur en air selon NF EN 12350-7. L'étalement du BAP est mesuré selon la norme NF EN 12350-8, la stabilité au tamis est mesurée selon NF EN 12350-11.

Les éprouvettes sont ensuite confectionnées et après traitement thermique et démoulage, elles sont conservées en ambiance humide jusqu'à l'échéance d'essai (T = 20 ± 2 °C et HR > 95 %).

La résistance à la compression est mesurée sur trois cubes 10 x 10 x 10 cm par échéance selon la norme NF EN 12390-3, la résistance au fendage est mesurée selon NF EN 12390-6.

L'absorption d'eau est mesurée selon la norme NF EN 13369. L'absorption d'eau par capillarité est mesurée selon le mode opératoire du Projet National PERFDUB dérivé de la norme NF EN 13057 et du mode opératoire AFREM. La mesure de porosité accessible à l'eau et de la masse volumique du béton durci sont mesurées selon NF P 18-459. Enfin, le coefficient de diffusion apparent des chlorures est mesuré selon la norme XP P 18-462 et la perméabilité au gaz est mesuré selon la norme XP P 18-463.

Les résultats sont présentés au tableau 15.

Le béton montre de bonnes performances mécaniques dès le très jeune âge. En effet, il a été mesuré près de 25 MPa sur cube à l'âge de 8 heures (on considère souvent que 15 MPa permettent le démoulage des produits). La résistance à 28 jours mesurée à 84 MPa permet de considérer le béton comme un BHP (Béton à Hautes Performances). Ces résistances élevées peuvent s'expliquer par un rapport eau efficace sur liant total faible de 0,35 et par l'emploi de granulats performants.

Les propriétés de durabilité sont cohérentes avec celles d'un BHP : les résultats d'essais pour les indicateurs de durabilité permettraient d'atteindre les seuils du Fascicule 65 et même d'envisager des réductions d'enrobage.

Tableau 15 : Propriétés du BAP

	Échéance d'essai	Résultats sur BAP	Exigences
<b>Caractérisations à l'état frais</b>			
Étalement (mm)	à 5 min	590	$550 \leq SF1 \leq 650$
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )		2 460	
Teneur en air (%)		0,2	
Pourcentage de laitance (%)		0	SR2 ≤ 15
<b>Propriétés mécaniques</b>			
Résistance à la compression sur cube 10 x 10 cm (MPa)	à 8 h	24,8	$f_{ck,cube,28} \geq 50$ MPa (XA3 <sup>a</sup> )
	à 7 j	71,7	
	à 28 j	84,4	
	à 90 j	90,2	
Résistance à la traction par fendage (MPa)	à 8 h	2,85	
	à 28 j	4,65	
<b>Indicateurs de durabilité</b>			
Absorption d'eau (%)	à 90 j	4,1	≤ 5 (XA3 <sup>b</sup> )
Capillarité (g/m <sup>2</sup> )	à 90 j	1027	
Porosité accessible à l'eau (%)	à 90 j	9,7	≤ 14,5 (XC4 <sup>c</sup> )
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	à 90 j	2390	
Coefficient de diffusion des ions chlorure (10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s)	à 90 j	0,9	≤ 3,5 (XS3 <sup>c</sup> )
Perméabilité au gaz à l'état sec (10 <sup>-18</sup> m <sup>2</sup> )	à 90 j	101	≤ 200 (XC4 <sup>c</sup> )

<sup>a</sup> selon NA.F.3 de NF EN 206/CN

<sup>b</sup> selon NA.F.4 de NF EN 206/CN

<sup>c</sup> selon le tableau 8.D du Fascicule 65

### 2.3.3.2.6. Résistance à la carbonatation

Un essai accéléré de résistance à la carbonatation selon le mode opératoire V2 du Projet National PERFDUB dérivé de la norme XP P 18-458 a été réalisé afin d'étudier la cinétique de carbonatation sur éprouvettes cylindriques 11 x 11 cm.

Ces éprouvettes ont subi une cure humide durant 90 jours et un séchage de 14 jours à 45 °C. À l'issue de cette étape de séchage, elles sont conservées à (20 ± 3) °C et (65 ± 5) % d'humidité relative pendant 7 jours avant de les soumettre à une teneur en CO<sub>2</sub> de 50 %.

À partir des épaisseurs moyennes obtenues aux différentes échéances, une vitesse de carbonatation, exprimée en mm par jour<sup>1/2</sup>, est déterminée comme la pente de la droite de régression linéaire en considérant la profondeur initiale et les profondeurs mesurées pendant l'essai. Cette vitesse est présentée sur la figure 24.

La résistance à la carbonatation du BAP, exprimée sous forme de vitesse de carbonatation (en mm/jour<sup>1/2</sup>), est positionnée parmi les résultats de carbonatation des 42 bétons fabriqués et caractérisés dans le cadre du Projet National PERFDUB (cf. Figure 25). Le rapport  $E_{eff}/L_{eq}$  retenu pour cette formule est de 0,54 (classe d'exposition XC4 et tableau NA.F.3 de la norme NF EN 206/CN).

A  $E_{eff}/L_{eq}$  proche ou similaire, la formule de BAP étudiée, à base d'un mélange de ciment et laitier activé, présente une bonne résistance à la carbonatation.

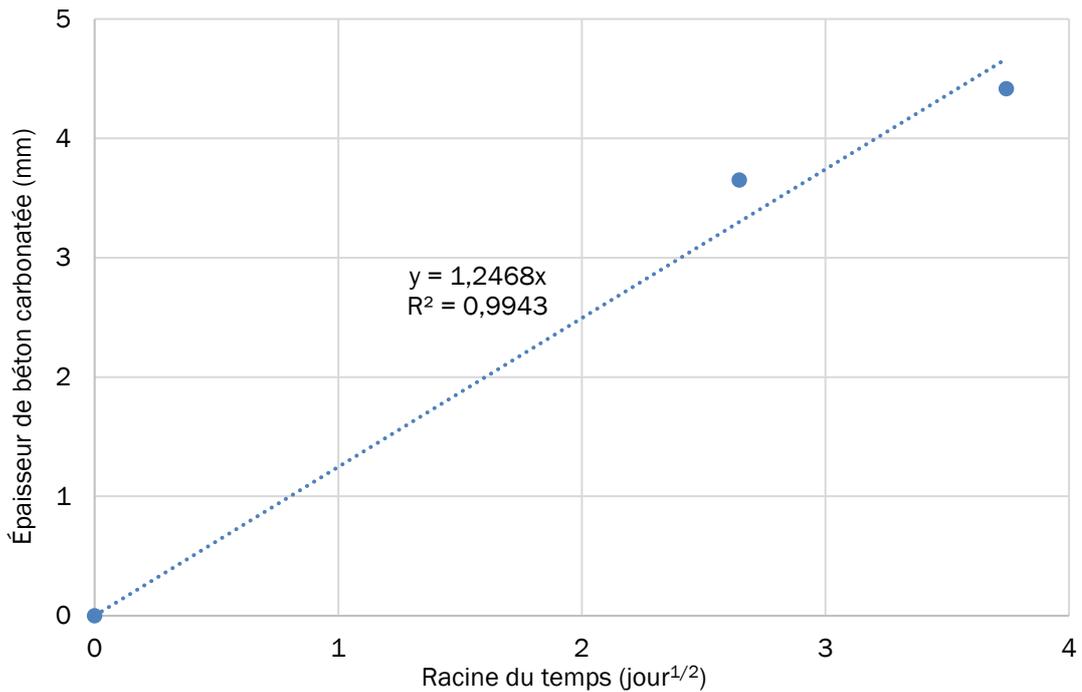


Figure 24 : Cinétique de carbonatation de la formule de BAP

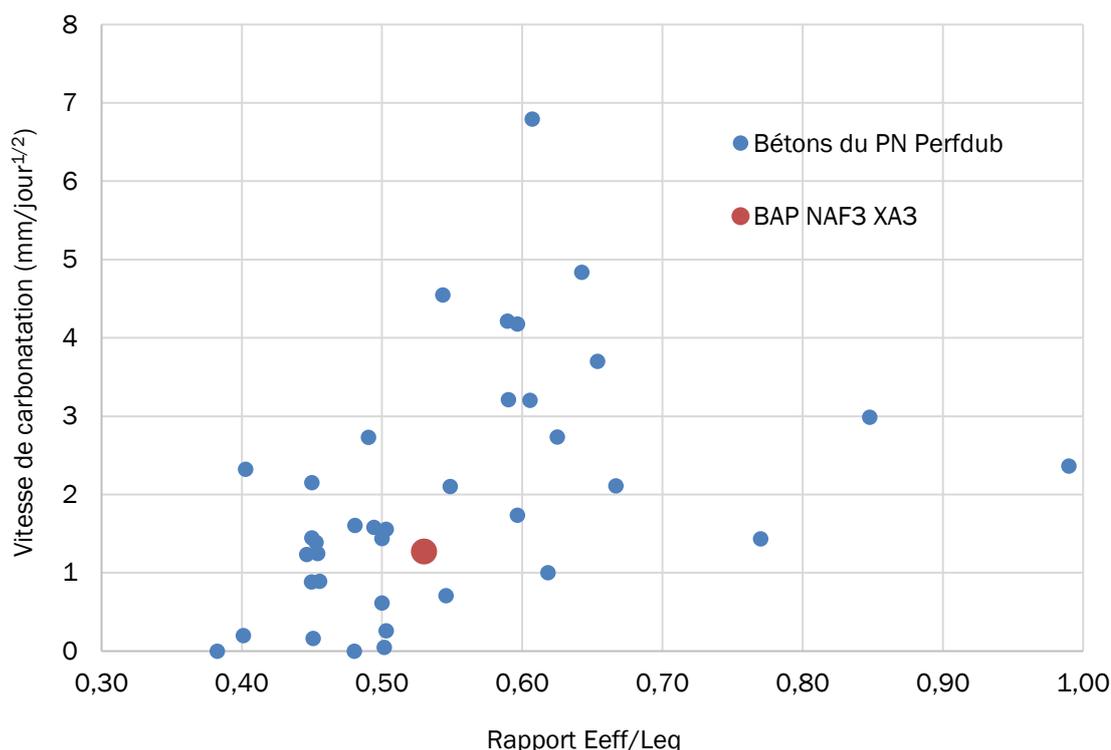


Figure 25 : Positionnement de la résistance à la carbonatation de la formule de BAP par rapport aux 42 bétons du PN Perfdub

### 2.3.3.2.7. Résistance aux attaques acides

Un essai de lixiviation à pH constant selon le mode opératoire du Projet National PERFDUB a été réalisé.

Cet essai permet de caractériser le comportement de bétons et de mortiers vis-à-vis d'attaques chimiques associées à la présence d'acides formant des sels de calcium solubles ou d'eaux faiblement minéralisées telles que définies dans la norme NF EN 206/CN et dans le fascicule de documentation FD P 18-011.

L'essai consiste à immerger des corps d'épreuve en béton dans une solution chimiquement agressive et à mesurer sa dégradation en fin d'essai. Les corps d'épreuve en béton, latéralement recouverts d'un mastic époxy, sont immergés dans une solution d'eau déminéralisée et d'acide nitrique. Le pH de la solution est fixé à  $4,0 \pm 0,1$  pour étudier une exposition de type XA3 et la température est maintenue constante à  $(30 \pm 1)$  °C durant les 60 jours d'essai.

Les ions calcium et hydroxyde, provenant des hydrates de la matrice cimentaire et des granulats, sont lixiviés, ce qui entraîne une augmentation de la valeur du pH de la solution. La valeur du pH est maintenue constante par des ajouts répétés d'acide nitrique de concentration 0,25 mol/l. La solution d'essai est renouvelée périodiquement afin de limiter l'accumulation d'ions calcium en solution, et maintenir les conditions agressives.

L'épaisseur dégradée est mesurée à partir de la quantité de calcium lixiviée. L'indicateur  $I_{Ca}$ , exprimé en mm, est quantifié :

$$I_{Ca} = 1000 \times Ca_{lixivié} / Ca_{initial}$$

où :

- $Ca_{lixivié}$ , exprimée en mol/m<sup>2</sup>, est la quantité totale d'ions calcium lixiviés pendant l'essai, rapportée à la surface exposée de béton
- $Ca_{initial}$ , exprimée en mol/m<sup>3</sup>, est la quantité de calcium initialement présente dans les corps d'épreuve en béton.

Les bétons ont été testés à un âge d'au moins 90 jours.

Les résultats des essais sont présentés au Tableau 16. La performance du BAP peut être comparée à celle de deux formules nommées B36 et B37. Ces bétons (non BAP) sont formulés pour une classe d'exposition XA3 avec du ciment CEM V/A PM ES (370 kg/m<sup>3</sup>) et des granulats calcaires (même carrière pour le BAP et B37). Le rapport  $E_{eff}/L_{eq}$  des bétons B36 et B37 est de 0,45.

Tableau 16 : Résistance à la lixiviation du BAP

	<b>BAP</b>	<b>Formule B36</b>	<b>Formule B37</b>
$I_{ca}$ (mm)	0,42	0,47	0,47

La valeur de  $I_{ca}$  est plus faible pour le BAP que pour les bétons B36 et B37 ce qui indique une bonne performance du BAP de l'étude vis-à-vis de la résistance aux attaques acides.

## 2.4. Conclusion

Les travaux réalisés ont permis la mise au point de solutions innovantes permettant la réalisation de produits en béton bas carbone. Ces solutions mettent en œuvre des bétons à base de liants riches en laitier de haut fourneau en substitution du traditionnel ciment Portland. Elles font également intervenir une activation thermique et/ou chimique.

Ces solutions permettent à des liants à forte teneur en laitier (de 50 % jusqu'à 100 %) d'atteindre une résistance à très jeune âge équivalente à celle d'un ciment Portland CEM I. Deux types de solutions ont été développés :

- accélération d'un mélange de laitier et ciment CEM I par l'ajout en faible quantité d'activateurs chimiques ;
- activation alcaline du laitier seul par du carbonate de sodium (géopolymère).

Les solutions proposées conduisent à une empreinte environnementale significativement plus faible que la référence à base de ciment Portland. La réduction d'empreinte carbone des bétons développés est comprise entre 30 % et 70 % à l'échelle du m<sup>3</sup>. L'évaluation économique montre également que les compositions étudiées n'induisent pas de surcoût matière.

Pour les bétons géopolymères à base de laitier activé, les travaux ont permis d'optimiser les performances du matériau via un plan d'expériences sur les leviers d'accélération (dosage en activateur, température du traitement thermique).

Leurs performances d'usage et de durabilité (XC) ont été étudiées sur béton. Elles sont cohérentes avec la classe de résistance du béton formulé, c'est-à-dire du même niveau que celles de bétons traditionnels de résistance à la compression comparable. Les résultats montrent que le béton étudié ne gonfle pas lorsque testé vis-à-vis de la réaction sulfatique interne. En outre, les travaux montrent que la phénoménologie de corrosion des aciers dans les bétons de laitier activé par le carbonate de sodium est similaire à celle connue pour les bétons conventionnels.

La réduction de l'impact carbone est la plus forte pour la solution de béton de géopolymère. C'est également la solution la plus innovante.

Pour ce qui concerne les bétons à fortes teneurs en laitier activé, il a été démontré l'applicabilité technique de ces solutions pour la fabrication de produits en béton : produits à démoulage immédiat, produits en béton d'ingénierie.

Les travaux ont permis de mettre en évidence que l'utilisation du laitier activé rend possible la fabrication, même par temps froid, de blocs de maçonnerie de résistance courante dont le liant contient jusqu'à 50 % de laitier activé. Une conservation en étuve durant 24 à 48 heures doit toutefois être maintenue. Les taux de substitution peuvent monter jusqu'à 70 % en été. En sortie d'étuve, si les conditions sont froides, il convient de prolonger le délai de livraison.

De même, des essais ont été réalisés sur pavés. L'utilisation d'une forte teneur en laitier de haut fourneau est possible dans les produits de voirie grâce à l'activation chimique et l'apport de la vibro-compaction, process propre à l'industrie du béton. Ce couple matériau/process constitue une solution bas carbone à la disposition des industriels.

En outre, l'application de la solution de mélange de ciment et laitier activé par voie chimique et thermique a été étudiée sur un béton autoplaçant d'ingénierie destiné à un produit de génie civil. La formulation retenue est celle d'un BHP contenant 60 % de laitier dans le liant. En termes de comportement mécanique et de durabilité, le BAP étudié présente de hautes performances.

Des solutions de béton très bas carbone sont mises à la disposition des industriels du béton. Dans un avenir proche, il sera pertinent de les mettre en application sur des cas réels en usine.

RAPPORT

## ÉTUDES ET RECHERCHES

DÉVELOPPEMENT  
DURABLE  
BÉTONS VERTS

FRANÇOIS JACQUEMOT  
GAUTHIER MARTIN



/ Cerib - CS 10010  
28233 Épernon cedex

/ 02 37 18 48 00  
cerib@cerib.com

## BÉTONS TRÈS BAS CARBONE : PERFORMANCES MÉCANIQUES, DURABILITÉ ET EXEMPLES D'APPLICATIONS

Les enjeux liés au réchauffement climatique et de ses effets sont aujourd'hui connus de tous. En France, les émissions de CO2 sont directement prises en compte dans la réglementation RE2020 s'appliquant aux bâtiments. L'enjeu carbone se diffuse également dans le secteur des TP.

Des solutions innovantes permettant la réalisation de produits en béton bas carbone ont été mises au point. Ces solutions mettent en œuvre des bétons à base de liants riches en laitier de haut fourneau en substitution du traditionnel ciment Portland (de 50 % jusqu'à 100 %). Elles font également intervenir une activation thermique et/ou chimique.

Pour les bétons géopolymères à base de laitier activé, les travaux ont permis d'optimiser les caractéristiques du matériau et d'évaluer leurs propriétés d'usage et de durabilité.

Pour ce qui concerne les bétons à fortes teneurs en laitier activé (et faible teneur en ciment portland), la performance de ces solutions innovantes a pu être illustrée pour la fabrication de produits en béton : produits à démoulage immédiat, produits en béton d'ingénierie.

## VERY LOW-CARBON CONCRETES : MECHANICAL PERFORMANCES, DURABILITY AND EXAMPLES OF APPLICATION

The issues linked to global warming and its effects are now known to everyone. In France, CO2 emissions are directly taken into account in the RE2020 regulation applying to buildings. The carbon issue is also spreading in the public works sector.

Innovative solutions allowing the production of low-carbon concrete products have been developed. These solutions use concrete based on binders rich in blast furnace slag to replace traditional Portland cement (from 50% to 100%). They also involve thermal and/or chemical activation.

For geopolymer concretes based on activated slag, the work made it possible to optimize the characteristics of the material and evaluate their usage and durability performance.

Concerning concretes with high contents of activated slag (and low content of portland cement), the performance of these innovative solutions could be illustrated for the manufacture of concrete products: immediate release products, engineer concrete products.