

558.E - FÉVRIER 2025

ÉTUDES ET RECHERCHES

BÉTONS À FAIBLE IMPACT
ENVIRONNEMENTAL -
ÉTUDES APPLICATIVES

SUZANNE LE THIERRY

CERIB
Expertise concrète



Bétons à faible impact environnemental Études applicatives

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 9782857553762

558.E – Février 2025

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

1. Synthèse générale de l'étude	5
1.1. Domaine concerné	5
1.2. Problématique	5
1.3. Apports de l'étude	6
1.4. Intérêt et conséquences	6
2. Dossier de l'étude	7
2.1. État de l'art	7
2.1.1. Contexte	7
2.1.2. Résultats antérieurs	9
2.2. Contenu de l'étude	10
2.3. Essais sur mortier sans traitement thermique	11
2.3.1. Programme expérimental	11
2.3.2. Constituants	12
2.3.3. Résultats	12
2.3.4. Commentaires	13
2.4. Application aux blocs	13
2.4.1. Programme expérimental	13
2.4.2. Constituants	14
2.4.3. Étude préliminaire sur éprouvettes	14
2.4.4. Étude sur blocs	17
2.4.5. Efflorescences	20
2.4.6. Commentaires	22
2.4.7. Évaluation environnementale	22
2.5. Application aux pavés	23
2.5.1. Programme expérimental	23
2.5.2. Constituants	24
2.5.3. Résultats	24
2.5.4. Évaluation économique et environnementale	27
2.6. Application aux murs de soutènement	28
2.6.1. Programme expérimental	28
2.6.2. Essais en laboratoire	29
2.6.3. Essais en usine	36
2.6.4. Évaluation économique et environnementale	38
2.7. Application aux escaliers	41
2.7.1. Programme expérimental	41
2.7.2. Constituants	42
2.7.3. Résultats	42
2.7.4. Commentaires	42
2.7.5. Évaluation économique et environnementale	43
2.8. Conclusion	44

Bibliographie	45
Index des figures	47
Index des tableaux	48

1. Synthèse générale de l'étude

1.1. Domaine concerné

Les travaux des précédentes études du CERIB sur l'accélération du durcissement des liants à base de laitier de haut fourneau [1] [2] ont mis en évidence des solutions permettant à des liants à forte teneur en laitier (autour de 50 %) d'atteindre une résistance au démoulage équivalente à celle d'un ciment Portland de type CEM I. Ces solutions de liants binaires ou ternaires font appel à une activation chimique et/ou une activation thermique du laitier.

Les solutions proposées conduisent à une empreinte environnementale significativement plus faible que celle de la référence à base de ciment Portland. L'évaluation économique a montré également que les compositions étudiées n'induisaient pas de surcoût.

Dans le contexte actuel de réduction de l'impact CO₂ des ouvrages de génie civil et de bâtiment, il apparaît nécessaire de mettre en application ces solutions développées pour la fabrication de produits préfabriqués en béton.

1.2. Problématique

Pour l'application des résultats des travaux précédents, deux solutions ont été étudiées :

- utilisation de ciment CEM III avec éventuellement de l'addition calcaire, des activateurs chimiques et, dans la mesure du possible, un traitement thermique ;
- utilisation d'un mélange de ciment CEM I et de laitier avec éventuellement de l'addition calcaire, des activateurs chimiques et, dans la mesure du possible, un traitement thermique.

Quatre applications ont été sélectionnées pour l'étude, en concertation avec les pilotes industriels :

- les blocs de maçonnerie ;
- les pavés ;
- les murs de soutènement ;
- les escaliers.

Ces applications sont variées et représentatives de l'Industrie du Béton. Les blocs et les pavés, produits à démoulage immédiat soumis à des normes autoportantes, représentent un grand volume de la production industrielle. Les deux autres applications concernent des bétons armés formulés suivant la norme NF EN 206 + A2/CN dont l'une est ici soumise à un traitement thermique (les murs de soutènement), l'autre non (les escaliers).

Les essais se sont déroulés pour partie en laboratoire et pour partie en usine.

1.3. Apports de l'étude

Les travaux ont permis de valider techniquement les solutions de liants décarbonés développées lors des travaux précédemment menés au Cerib et de disposer ainsi d'une expérience concrète de mise en application de ces liants pour la fabrication de produits en béton.

Pour les pavés à forte teneur en laitier, des essais complémentaires pourraient être menés afin d'améliorer la résistance au gel avec sels de déverglaçage.

1.4. Intérêt et conséquences

Ces travaux contribuent à la mise à disposition pour l'Industrie du Béton d'exemples de réalisations de produits en béton décarboné qui pourraient être valorisés et étendus à des applications diverses. Les solutions étudiées permettent d'atteindre des réductions des émissions de CO₂ de 20 % à 60 % à l'échelle du béton, avec un maintien des performances mécaniques.

2. Dossier de l'étude

2.1. État de l'art

2.1.1. Contexte

Le secteur de la construction se doit de mettre en place des mesures efficaces qui aideront à atteindre les objectifs nationaux de réduction d'impact environnemental. De tous les secteurs économiques, celui du bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie en France (43 % des consommations énergétiques) et génère 23 % des émissions de GES [3]. La France a promulgué la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte de laquelle a découlé la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), visant la neutralité carbone en 2050. Au 1^{er} janvier 2022, la Réglementation Environnementale 2020 (RE2020), s'inscrivant dans la SNBC, est entrée en application. Elle s'applique aux bâtiments neufs et a pour objectifs principaux de diminuer l'impact carbone des bâtiments sur l'ensemble de leur cycle de vie et de poursuivre l'amélioration de leur performance énergétique tout en limitant l'inconfort estival. Cette réglementation a des objectifs ambitieux de décarbonation des bâtiments : -12 % en 2025, -22 % en 2028 et -35 % dès 2031 [4] [5].

La figure 1 illustre la part des produits de construction et des équipements sur les émissions de gaz à effet de serre d'un bâtiment [6].

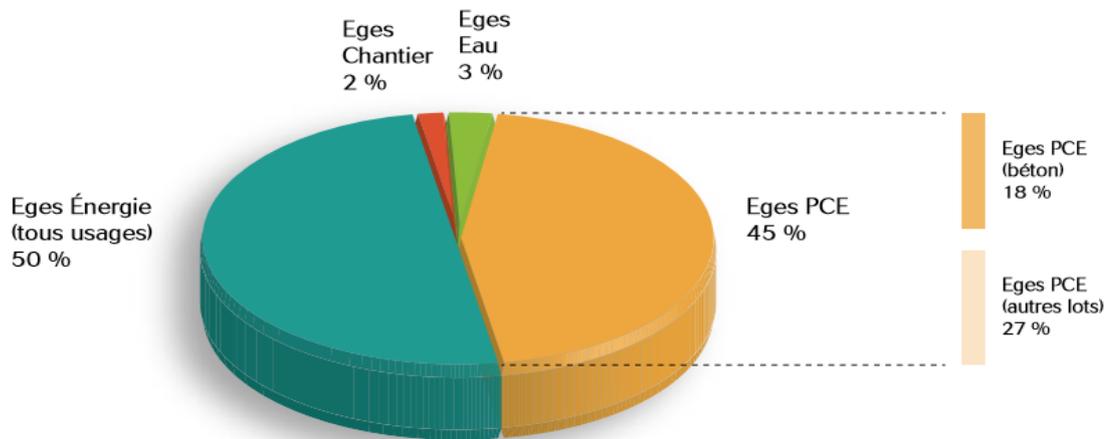


Figure 1 – Part des produits de construction et équipements (PCE) et du béton sur l'indicateur Eges global du bâtiment – Étude menée sur deux bâtiments de logements collectifs R + 4 et R + 7 [6]

Ce diagramme confirme que le matériau béton représente une part importante des émissions de gaz à effet de serre liées au cycle de vie des bâtiments (environ 18 %). De plus, lorsque l'on s'intéresse à la répartition de l'empreinte carbone entre les différents constituants du béton, il apparaît que le liant représente le plus fort impact. À titre d'exemples, les diagrammes des figures 2 et 3 présentent la répartition de l'empreinte carbone pour les blocs de maçonnerie et pour les murs à coffrage intégré (sans remplissage) [7] [8].

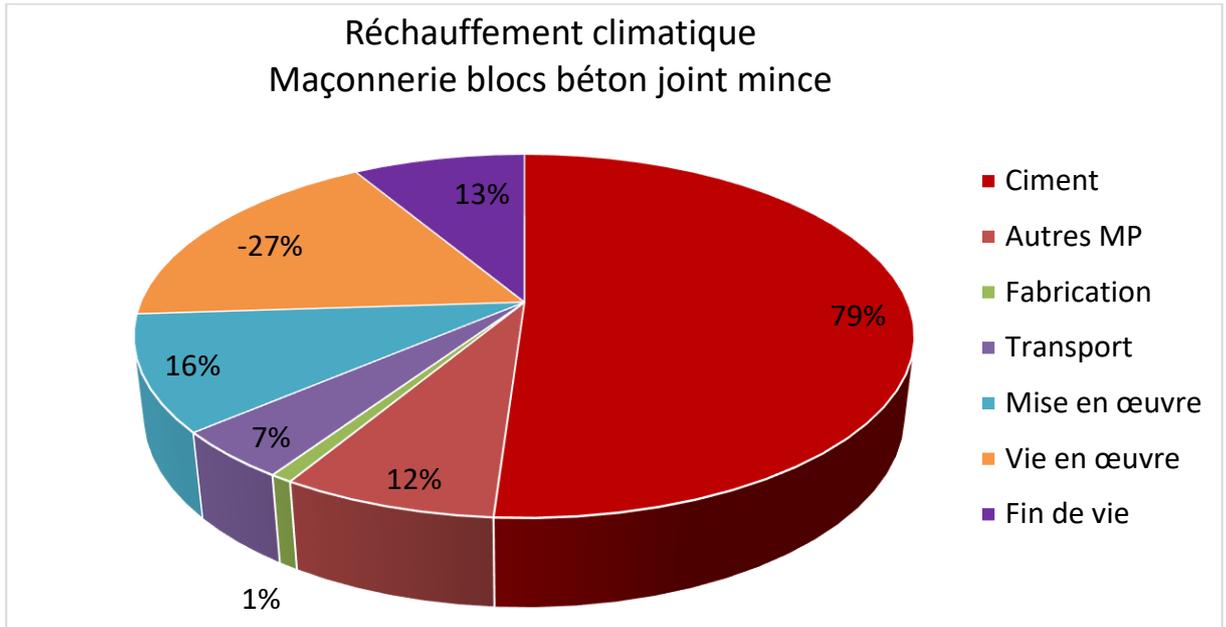


Figure 2 – Indicateur de changement climatique : maçonnerie de blocs en béton, pose à joints minces [7]

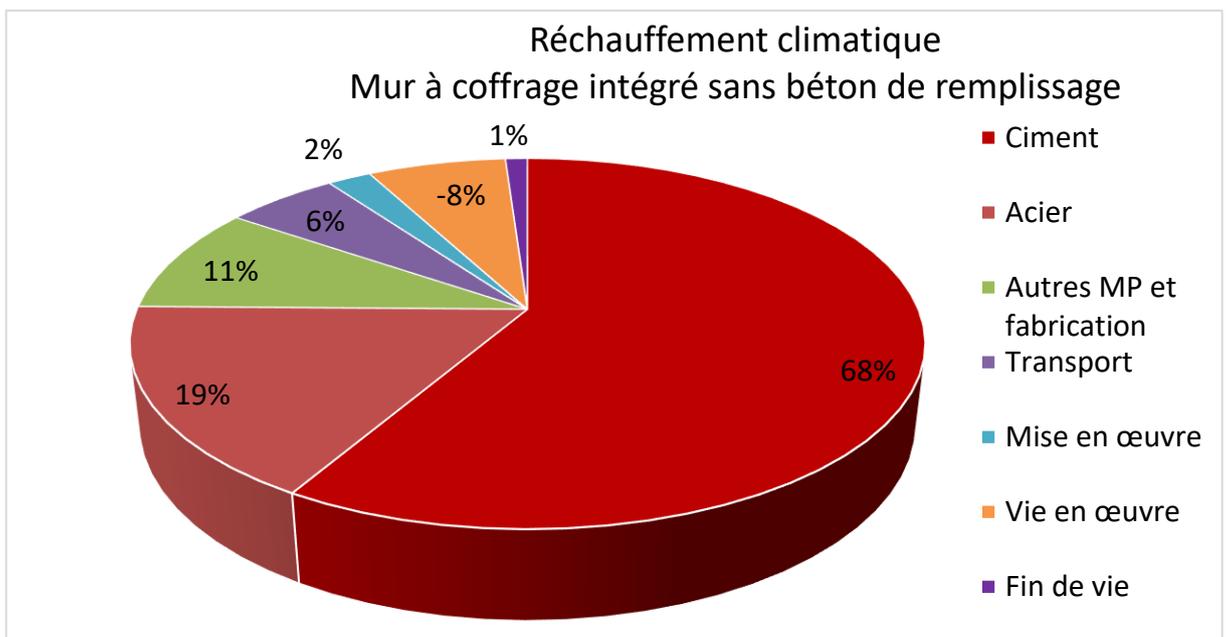


Figure 3 – Indicateur de changement climatique : MCI sans remplissage [8]

C'est à partir de ce constat que de nouvelles formulations de béton, plus respectueuses de l'environnement, ont été développées avec pour ambition de réduire leur empreinte carbone. Ces formulations sont basées sur le remplacement de tout ou d'une partie du ciment Portland par d'autres constituants à plus faible impact environnemental.

Différentes solutions existent ou sont en développement [9] parmi lesquelles les solutions suivantes, relatives aux ciments :

- les liants ternaires à faible teneur en clinker, les CEM VI ;
- les ciments sulfo-alumineux ;
- les ciments sursulfatés ;
- le ciment Solidia® et le procédé associé ;
- les géopolymères.

2.1.2. Résultats antérieurs

Les travaux menés précédemment au Cerib [1] [2] ont porté sur l'accélération du durcissement de liants ternaires à base de ciment CEM I, de laitier de haut-fourneau et d'addition calcaire. Ils visaient à optimiser le trio performance technique/empreinte carbone/coût, avec un gain environnemental significatif, une compatibilité avec les procédés industriels et une proximité avec le contexte normatif existant.

Le tableau et le graphique ci-dessous présentent les performances de deux liants ternaires étudiés dans le cadre de ces travaux, en comparaison avec un liant de référence 100 % CEM I. Les essais ont été menés sur mortier (éprouvettes prismatiques 4 cm x 4 cm x 16 cm). Les liants ternaires activés chimiquement et thermiquement atteignent des performances au démoulage équivalentes, voire supérieures à celles de la référence 100 % CEM I, pour un coût inférieur et des émissions de CO₂ réduites jusqu'à plus de 50 %. Le graphique de la figure 4 souligne l'efficacité du traitement thermique pour l'amélioration des performances du béton au démoulage. D'autre part, ce procédé a un impact quasi négligeable sur les émissions de CO₂.

Liant	Composition	Traitement thermique T °C max/durée	Résistance en compression au démoulage	Coût € (matière et procédé)	Empreinte CO ₂ (matière et procédé)
Référence	100 % CEM I	60 °C/8 h	100 %	100 %	100 %
Liant « 53 activé »	53 % CEM I 35 % laitier 12 % calcaire activateurs chimiques	80 °C/8 h	111 %	95 %	60 %
Liant « 40 activé »	40 % CEM I 45 % laitier 15 % calcaire Activateurs chimiques	80 °C/8 h	103 %	91 %	46 %

Tableau 1 – Description de deux liants ternaires étudiés en comparaison avec un liant de référence 100 % CEM I [2]

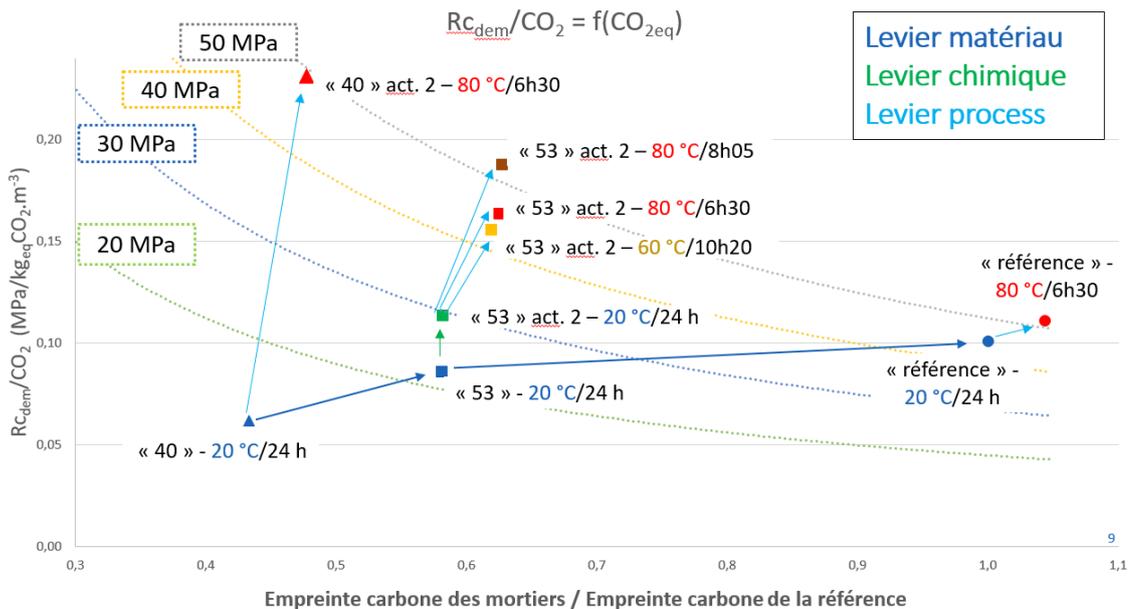


Figure 4 – Évaluation technico-environnemental des solutions étudiées (levier matériau = nature du liant ; levier chimique = activation chimique ; levier process = traitement thermique [2])

On notera que, dans le tableau et le graphique ci-dessus (présentant des résultats de 2018), les estimations des émissions de CO₂ ont été calculées en retenant un scénario sans allocation de la production de la fonte sur l'impact environnemental du laitier. Dans le reste du rapport, une allocation économique entre la fonte et le laitier a été comptabilisé, suivant les recommandations de 2022 de la DHUP.

Ces travaux ont permis de réaliser un classement des différents leviers utilisés [2] :

- le traitement thermique s'avère être le plus efficace d'un point de vue technique, économique et environnemental ; son utilisation améliore de façon notable les performances à court terme pour les liants étudiés ;
- le levier chimique (accélérateurs) permet d'obtenir des améliorations, inférieures cependant à celles du levier thermique ;
- la compacité, améliorée par le rapport E_{eff}/L et l'adjuvantation, est un levier dont les améliorations se manifestent dans tous les cas étudiés ;
- l'utilisation d'additions de finesse plus importante, en particulier le laitier de haut fourneau, semble susciter un intérêt de moindre importance, le bilan technico-économique n'étant pas favorable à son utilisation.

2.2. Contenu de l'étude

Pour l'application des résultats présentés précédemment, plusieurs solutions sont possibles :

- **Utilisation de ciment CEM III** avec éventuellement de l'addition calcaire, des activateurs chimiques et dans la mesure du possible un traitement thermique ;
- **Utilisation d'un mélange de ciment CEM I et de laitier** avec éventuellement de l'addition calcaire, des activateurs chimiques et dans la mesure du possible un traitement thermique.

Les produits soumis à une norme autoportante permettent plus de liberté sur la formulation du liant.

Quatre applications ont été sélectionnées pour l'étude, en concertation avec les pilotes industriels :

- les blocs de maçonnerie ;

- les pavés ;
- les murs de soutènement ;
- les escaliers.

Ces applications sont variées et représentatives de l'Industrie du Béton. Les blocs et les pavés, produits à démoulage immédiat soumis à des normes autoportantes, représentent un grand volume de la production industrielle. Les deux autres applications concernent des bétons armés formulés suivant la norme NF EN 206 + A2/CN dont l'une est ici soumise à un traitement thermique (les murs de soutènement), l'autre non (les escaliers).

Les essais se sont déroulés pour partie en laboratoire et pour partie en usine. Ils sont découpés en cinq phases distinctes :

- **Phase 1 (paragraphe 2.3) : Essais sur mortier sans traitement thermique**

Des essais préliminaires réalisés au Cerib ont porté sur la réalisation de mortiers à base de liant ternaire, sans traitement thermique, avant réalisation d'essais à l'échelle produit. En effet, les travaux de thèse réalisés précédemment ont très majoritairement porté sur des mortiers avec application d'un traitement thermique. Or, parmi les quatre applications sélectionnées pour l'étude, trois ne sont pas soumises à des traitements thermiques : les blocs, les pavés et les escaliers.

- **Phase 2 (paragraphe 2.4) : Application aux blocs**

Des essais sur des compositions de blocs ont été réalisés au Cerib, dans un premier temps sur éprouvettes à démoulage immédiat, puis sur blocs fabriqués sur la presse semi-industrielle du Cerib. Ils ont été menés dans le cadre d'une prestation en collaboration avec la société Ecocem et ont fait l'objet d'une publication [10]. Ces essais ont principalement porté sur le comportement du béton après une conservation à basse température et sur l'influence du laitier sur la formation d'efflorescences.

- **Phase 3 (paragraphe 2.5) : Application aux pavés**

Des essais de fabrication de pavés ont été menés en usine.

- **Phase 4 (paragraphe 2.6) : Application aux murs de soutènement**

Des formulations de murs soutènement ont dans un premier temps été ajustées en laboratoire au Cerib puis des murs ont été fabriqués en usine.

- **Phase 5 (paragraphe 2.7) : Application aux escaliers**

Des formulations d'escalier ont été étudiées en laboratoire d'usine.

L'impact économique et environnemental de chaque solution a été évalué sur la base d'une estimation du coût et des émissions de CO₂ des constituants utilisés dans la formulation et du traitement thermique, en se basant sur les hypothèses en vigueur au moment de la rédaction du rapport.

2.3. Essais sur mortier sans traitement thermique

2.3.1. Programme expérimental

Les essais ont porté sur des mortiers dits « normalisés » à base de liant ternaire (CEM I, laitier et addition calcaire), de sable normalisé, d'eau et d'activateurs chimiques (NaCl et Na₂SO₄).

Les formulations étudiées sont présentées dans le tableau suivant. Pour chaque formulation, différentes quantités d'activateurs (NaCl et Na₂SO₄) ont été testées : sans activateurs (SA), 0,5 % (0,5N) et 1 % (1N) (en pourcentage massique par rapport au laitier). Le rapport eau sur liant total est de 0,5.

Constituants	Référence	70C	53C	35C
Liant (% massique du liant total)				
Ciment	100 %	70 %	53 %	35 %
Laitier	0 %	20 %	35 %	50 %
Addition calcaire	0 %	10 %	12 %	15 %
Activateurs (% massique du laitier)				
NaCl	0 %	0 à 1 %	0 à 1 %	0 à 1 %
Na ₂ SO ₄	0 %	0 à 1 %	0 à 1 %	0 à 1 %

Tableau 2 – Compositions testées au cours de l'étude préliminaire sur mortier

L'étalement du mortier à la table à chocs est mesuré à l'état frais. Les résistances en compression et flexion sont mesurées sur prismes 4 cm x 4 cm x 16 cm à 24 heures, 7, 14 et 28 jours.

2.3.2. Constituants

Le ciment est un CEM I 52,5 N de chez Lafarge (site de St-Pierre La Cour). Le laitier provient de la société Ecocem (site de Fos-sur-Mer). L'addition calcaire est du Betocarb HP de chez Omya. Les activateurs chimiques sont le chlorure de sodium et le sulfate de sodium. Ils sont utilisés sous forme déshydratée.

2.3.3. Résultats

Les résultats des essais sont présentés sur les graphiques suivants.

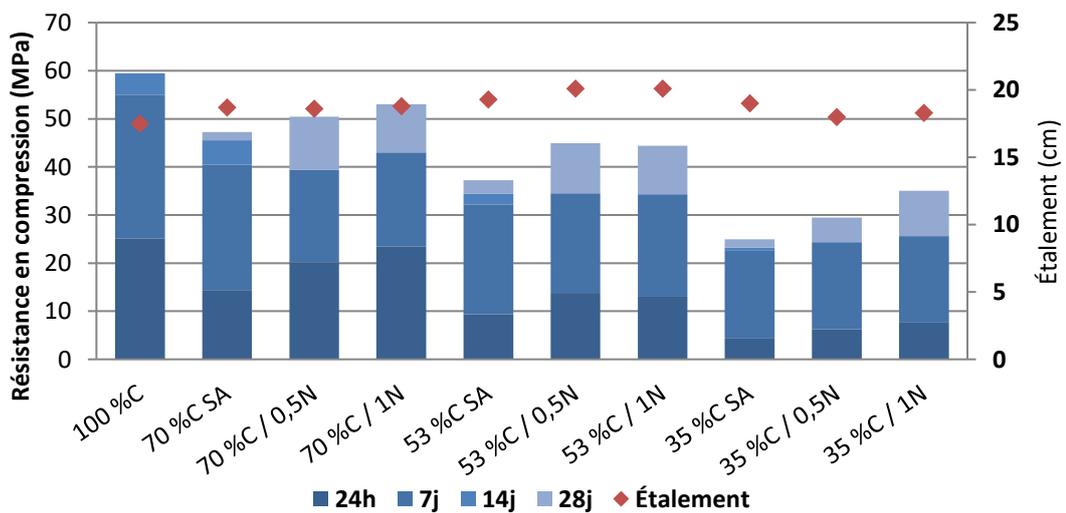


Figure 5 – Résistances en compression et étalements à la table à chocs des mortiers

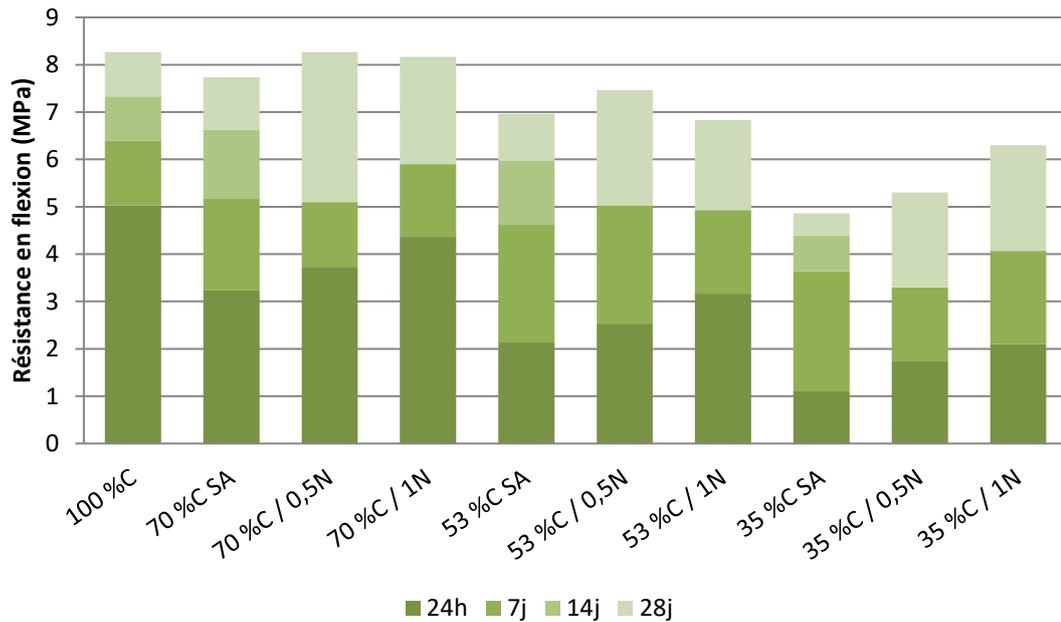


Figure 6 – Résistances en flexion des mortiers

2.3.4. Commentaires

Les valeurs d'étalement obtenues lors de l'essai à la table à chocs sont assez semblables d'une composition à l'autre. Les liants ternaires utilisés ont une rhéologie proche de celle du ciment CEM I, à quantité d'eau totale égale.

La substitution du CEM I par du laitier et de l'addition calcaire entraîne une baisse des performances mécaniques. Celle-ci est d'autant plus importante que le taux de substitution du ciment est élevé. Cette diminution des résistances est en partie compensée par l'utilisation d'activateurs chimiques. Leur effet est cependant surtout visible au jeune âge. Dans le cas de la résistance en flexion, l'activation chimique permet une compensation plus importante de cette diminution. À 28 jours, la composition à 70 % de CEM I avec 0,5 % ou 1 % d'activateurs présente une résistance à la flexion égale à celle de la référence. La composition à 35 % de CEM I et 1 % d'activateurs, quant à elle, permet d'atteindre à 28 jours une résistance à la flexion équivalente à 75 % de celle de la référence. Ce résultat est encourageant notamment pour une application des liants ternaires à la production de pavés, produits pour lesquels la performance mécanique évaluée est la résistance à la traction.

Les réductions des propriétés mécaniques dues à l'utilisation de laitier et d'addition calcaire ne sont pas négligeables. Cependant, l'activation chimique semble ouvrir la voie à l'utilisation de ce type de liants ternaires dans le domaine de la préfabrication, y compris en l'absence de traitement thermique. Elle permet en effet de pallier en partie la problématique apportée par l'utilisation du laitier en tant que liant, à savoir un durcissement plus lent.

2.4. Application aux blocs

2.4.1. Programme expérimental

Afin de développer l'utilisation du laitier dans l'industrie du béton, la société ECOCEM France a mis au point un laitier activé, appelé « Ecocem R+ ». L'objectif des travaux présentés ici est d'étudier l'intérêt de ce laitier activé pour la fabrication de blocs de maçonnerie en béton et de vérifier en particulier le comportement du béton après une cure 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 la presse semi-industrielle du Cerib. Des essais ont également été menés pour étudier la formation d'efflorescence sur les bétons au laitier.

Ces travaux ont fait l'objet d'un article publié dans le magazine CPI en collaboration avec ECOCEM [10].

2.4.2. Constituants

Les ciments utilisés dans l'étude sont de type CEM I 52,5 R conformes à la norme NF EN 197-1. Trois ciments différents ont été utilisés :

- CEM I 52,5 R, Lafarge, Saint-Pierre-La-Cour ;
- CEM I 52,5 R, Lafarge, Le Teil ;
- CEM I 52,5 R, Vicat, Montalieu.

Le laitier « Ecocem R+ » est constitué de laitier conforme à la norme NF EN 15167-1 et de sels de sodium qui jouent le rôle d'activateurs chimiques. L'addition calcaire est conforme aux normes NF EN 12620 et NF P 18-508. Les granulats sont des granulats calcaires concassés de granulométries 0/4 mm et 4/6 mm. Pour les essais préliminaires sur éprouvettes, un adjuvant pour béton accélérateur de prise et de durcissement à base de chlorure de calcium a été utilisé. Pour les essais sur blocs, du chlorure de calcium en solution (extrait sec de 36 %) a été utilisé comme accélérateur.

2.4.3. Étude préliminaire sur éprouvettes

L'étude préliminaire a été menée sur des éprouvettes cubiques de 100 mm de côté. Le béton a été fabriqué dans un malaxeur de laboratoire de 30 litres. Afin d'assurer des conditions de fabrication les plus proches possibles de celles d'un béton de bloc, les éprouvettes ont été vibro-compactées sur une table vibrante avec application d'une masse de 8 kg sur le béton. La vibration est réglée à une fréquence de 3 900 tours/min et une amplitude de 11 185 daN. Les éprouvettes ont été fabriquées dans des moules démontables munis d'une rehausse permettant un démoulage immédiatement après le vibro-compactage. Elles ont ensuite été conservées jusqu'à l'âge de 2 jours en laboratoire à 20 °C et 75 % d'humidité relative puis jusqu'à l'échéance d'essai dans un caisson à 5 °C et 85 % d'humidité relative. La résistance en compression a été mesurée à 1 jour, 2 jours, 7 jours et 14 jours.



Figure 7 – Vibro-compactage d'une éprouvette



Figure 8 – Démoulage d'une éprouvette

Dans cette étude préliminaire, 5 compositions de béton ont été étudiées en substituant une partie du ciment par du laitier, activé ou non, et de l'addition calcaire, avec parfois l'ajout d'un accélérateur de prise. Les substitutions sont données en volume. La composition C1 est une référence dont le liant contient 50 % de laitier non activé et 50 % de ciment de Saint-Pierre-La-Cour. La composition C2 est identique à la composition C1 mais avec le laitier activé à la place du laitier non activé. Les compositions C3 à C5 contiennent un volume de liant égal à 110 % de celui de C1 et C2. La composition C3 est identique à la composition C2 avec 10 % d'addition calcaire en supplément. Le liant des compositions C4 à C5 est composé de 45 % de ciment 1, 45 % de laitier activé et 20 % d'addition calcaire, avec respectivement 0 % et 1 % d'accélérateur chloré par rapport à la masse totale de liant.

Les compositions testées et les résultats des essais sont présentés dans le tableau 3 et la figure 9.

		C1	C2	C3	C4	C5
Constituants secs (kg/m ³)						
CEM I 52,5 R St-Pierre-La-Cour		63	63	63	57	57
Laitier non activé		59	0	0	0	0
Laitier activé		0	59	59	53	53
Addition calcaire		0	0	11	22	22
Sable 0/4		990	989	985	993	996
Gravillons 4/6		990	989	985	993	995
Accélérateur (sec)		0	0	0	0	0,60
Eau totale		109	110	108	110	109
Masse volumique à l'état frais (kg/m ³)		2 212	2 211	2 211	2 227	2 233
Résistance en compression (MPa)	1 jour	5,5	6,1	7,3	4,5	6,0
	2 jours	7,7	9,9	9,2	7,7	7,3
	7 jours	11,6	12,6	13	10,3	10,7
	14 jours	13,8	15,0	14,9	12,3	12,4

Tableau 3 - Composition des bétons et résultats des essais de compression

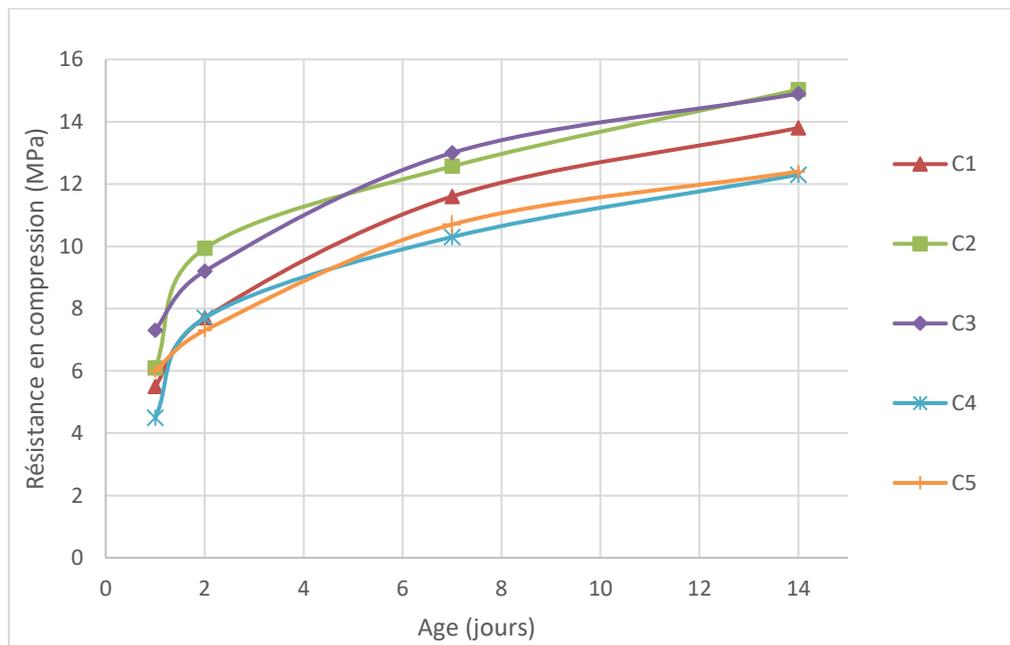


Figure 9 – Évolution de la résistance moyenne en compression des cubes 100 x 100 mm entre 1 et 14 jours

On constate que le laitier activé Ecocem R+ permet d'obtenir une résistance à 2 jours de près de 30 % supérieure à celle obtenue avec le laitier non activé. À 14 jours, la résistance est encore légèrement supérieure.

Les résultats obtenus sur les compositions C2 et C3 sont très proches. Il n'a pas été constaté de réelle augmentation des résistances mécaniques avec l'ajout d'addition calcaire malgré l'augmentation du dosage global en liant. La diminution du dosage en ciment et en laitier sur les compositions C4 à C5 entraîne une réduction des résistances mécaniques.

L'utilisation de l'accélérateur à hauteur de 1 % entraîne une légère augmentation de la résistance mécanique à 1 jour sur la composition C5 par rapport à la composition C4.

2.4.4. Étude sur blocs

La campagne d'essais sur blocs a été menée au Cerib. Le béton a été fabriqué dans la centrale à béton par gâchées de 150 litres. Les blocs ont été fabriqués sur la presse vibrante. Il s'agit de blocs creux à 6 alvéoles non débouchantes.



Figure 10 – Presse vibrante du Cerib



Figure 11 – Blocs creux à 6 alvéoles

Les conditions de conservation testées sont les suivantes :

- cure A : Conservation sous bâche à 20 °C durant 48 heures après fabrication puis à 20 °C et 75 % d'humidité relative ;
- cure B : Conservation sous bâche à 20 °C durant 48 heures après fabrication puis à 5 °C et 75 % d'humidité relative ;
- cure C : Conservation sous bâche à 20 °C jusqu'à 20 heures puis en enceinte climatique à 12 °C et 75 % d'humidité relative jusqu'à l'âge de 2 jours puis dans un caisson à 5 °C et 75 % d'humidité relative.

Les résistances mécaniques ont été mesurées à 2 jours, 7 jours et 14 jours suivant les prescriptions de la norme NF EN 772-1. Les blocs ont été surfacés à l'aide d'un mortier à base de ciment à prise rapide la veille de l'essai. Les variations dimensionnelles ont été mesurées à 7 jours sur les blocs conservés à 20 °C (cure A) suivant les spécifications de la norme NF EN 772-14.

L'objectif de l'étude sur blocs est d'étudier la faisabilité de blocs de maçonnerie avec de forts taux de laitier activé, en les conservant à de faibles températures après fabrication. Cinq formules de béton ont été testées. B1 est la référence, dont le liant est constitué à 100 % de ciment de St-Pierre-La-Cour. Dans les formules B2 à B5, une partie du volume de ciment a été substituée par du laitier activé et de l'addition calcaire. Le liant de la composition B2 contient 50 % de ciment et 50 % de laitier activé. Les compositions B3 et B4 ont un volume total de liant égal à 110 % de celui des compositions B1 et B2. Le liant de la composition B3 est identique à celui de la composition B2 avec 10 % d'addition calcaire en supplément et 1,3 % de solution de chlorure de calcium en masse par rapport au laitier. Le liant de la composition B4 est constitué de 30 % de ciment, 70 % de laitier activé et 10 % d'addition calcaire ainsi que 1,3 % de solution de chlorure de calcium. La composition B5 est identique à la composition B2 mais le ciment du Teil a été utilisé.

Les formulations et les résultats des essais sont présentés dans le tableau 4 et les figures 12 et 13.

			B1	B2	B3	B4	B5
Constituants sec (kg/m ³)							
CEM I 52,5 R St-Pierre-La-Cour			127	64	66	38	-
CEM I 52,5 R le Teil			-	-	-	-	64
Laitier activé R+			-	59	61	83	59
Addition calcaire			-	-	11	11	-
Sable 0/4			994	1 000	1 028	996	1 001
Gravillon 4/6			994	1 000	1 028	996	1 000
Eau totale			106	110	113	103	108
Chlorure de calcium (sec)			-	-	0,3	0,4	-
Masse volumique à l'état frais (kg/m ³)			2 221	2 233	2 308	2 228	2 233
Résistance en compression (MPa)	2 j	Sous bâche à 20 °C	3,1	3,7	2,8	2,6	2,7
	7 j	Cure A	4,5	4,9	4,5	4,7	3,1
		Cure B	4,3	4,4	3,6	4,5	3,2
		Cure C	4,0	5,0	2,9	2,7	2,8
	14 j	Cure B	4,3	5,2	4,5	4,2	3,2
Variations dimensionnelles après 7 jours en cure A (mm/m)	Retrait (1)		-0,28	-0,30	-0,24	-0,38	-0,16
	Gonflement (2)		0,06	0,07	0,04	0,03	0,07
	Variations dimensionnelles (1) + (2)		0,34	0,37	0,28	0,41	0,23
	Perte d'eau mesurée durant l'essai		2,6 %	2,5 %	2,2 %	2,5 %	1,6 %

Tableau 4 - Composition des bétons et résultats de l'étude sur blocs

Le graphique de la figure 12 présente l'évolution entre 2 et 14 jours de la résistance en compression des blocs conservés suivant la cure B (48 heures sous bâche à 20 °C puis à 5 °C).

On constate que la composition B2 contenant le laitier activé présente des résistances en compression plus élevées que celles du témoin B1. De même que dans l'étude préliminaire, l'addition calcaire n'a pas permis d'augmenter les résistances en compression. Il est possible que ce résultat soit lié au fait que le sable utilisé dans l'étude contient déjà une quantité importante de fines calcaires. La composition B5, à base de ciment du Teil, présente les résistances les plus faibles, sans évolution mesurée entre 7 et 14 jours.

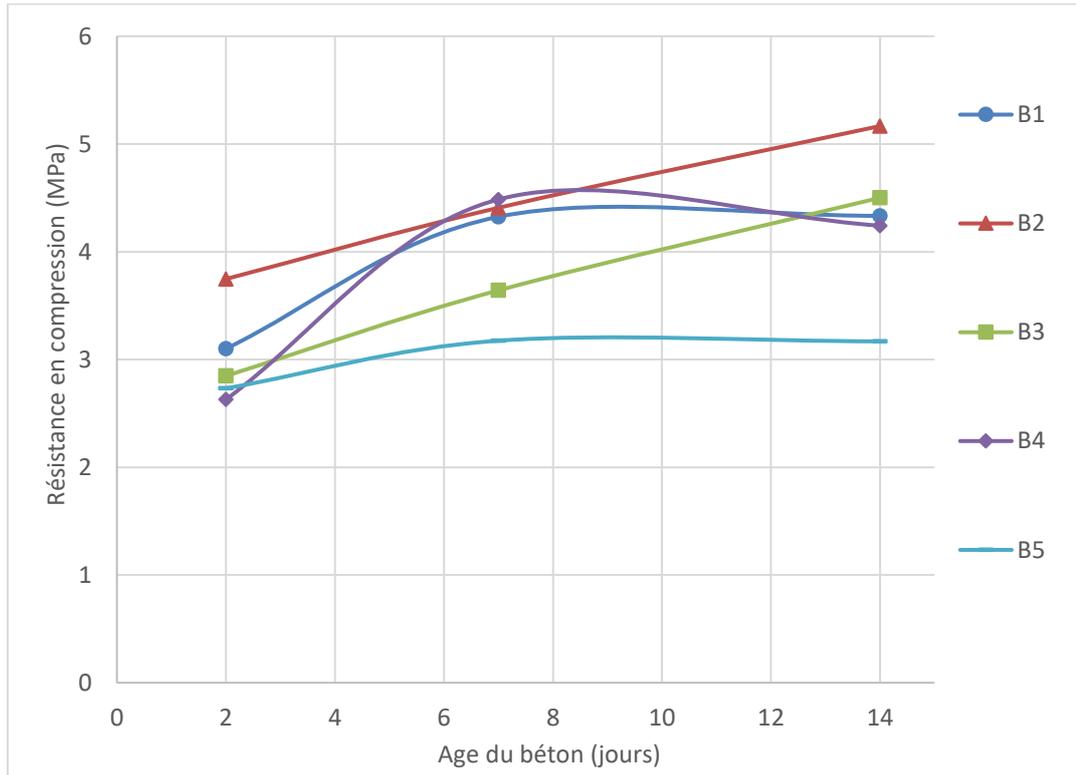


Figure 12 - Évolution de la résistance en compression des blocs conservés à 5 °C entre 2 et 14 jours

Le graphique de la figure 13 présente l'influence du mode de conservation sur la résistance en compression à 7 jours des blocs.

D'une manière générale, plus la température de conservation des blocs est faible, plus la résistance en compression est faible. La résistance mesurée à 7 jours sur la composition B2 en cure C est incertaine car plus élevée que les résistances obtenues en cure A et B pourtant plus favorables.

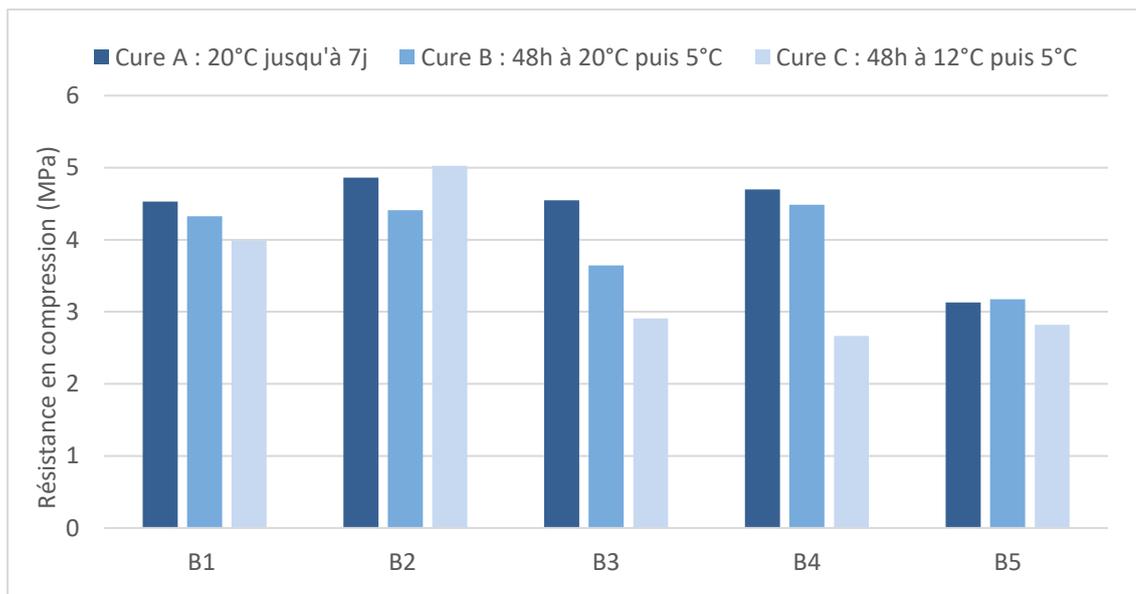


Figure 13 - Influence des conditions de conservation sur la résistance en compression à 7 jours des blocs

2.4.5. Efflorescences

2.4.5.1. Principe de l'essai

Il n'existe pas d'essai standard pour évaluer la sensibilité d'un béton aux efflorescences ¹. Afin d'estimer l'influence du laitier activé sur la formation d'efflorescence, une méthode d'essai a été définie sur la base de l'étude réalisée par Thomas Vickers et Mosongo Moukwab [11]. Dans cette étude, plusieurs méthodes de mise en évidence de la formation d'efflorescences sur des éprouvettes de béton ont été comparées. La méthode qui s'est avérée la plus efficace est un test de capillarité dans lequel l'eau migre à travers l'échantillon par capillarité et entraîne la chaux vers la surface, favorisant ainsi la formation des efflorescences.

Cet essai a été adapté à notre étude. Des éprouvettes cubiques de 100 mm de côté ont été fabriquées suivant le même protocole que pour les essais mécaniques présentés dans le paragraphe 2.4.3. Ces éprouvettes ont subi une cure à 20 °C pendant 2 jours puis à 5 °C jusqu'à 7 jours ou 14 jours.

Les faces latérales des éprouvettes ont ensuite été recouvertes de résine et les cubes ont été plongés dans un bac contenant quelques centimètres d'eau de façon à ce que cette eau puisse remonter dans les éprouvettes par capillarité. Le haut des éprouvettes a été soumis à un séchage à l'aide d'un ventilateur et à une température de 20 °C environ (voir figure ci-dessous).



Figure 14 – Essai de capillarité

L'essai a été poursuivi durant 28 jours. À échéances régulières, les éprouvettes ont été photographiées.

L'essai a été mené pour les deux compositions C8 et C9 détaillées dans le tableau ci-dessous. Pour chaque composition, deux éprouvettes ont été testées après une cure de 7 jours (éprouvettes n° 1 et n° 2) et deux éprouvettes après une cure de 14 jours (éprouvettes n° 3 et n° 4).

¹ Depuis la réalisation de ces essais, le Cerib a réalisé une Étude et Recherche visant à développer un essai performantiel pour l'évaluation des risques de formation d'efflorescence. Cette étude fait l'objet du rapport 499.P (décembre 2020).

Constituants (kg/m ³)	C8	C9
CEM I 52,5 R Montalieu	126	63
Laitier activé Ecocem R+	0	59
Sable 0/4	991	990
Gravillons 4/6	990	989
Eau totale	114	114

Tableau 5 - Composition réelle du liant des compositions étudiées

2.4.5.2. Résultats

L'observation visuelle (voir photographies ci-après) met en évidence la formation d'efflorescences blanches concentrées sur des petites surfaces des éprouvettes de la série C8 (béton ne contenant pas de laitier). Sur les éprouvettes de la série C9 (béton dont le liant est constitué de 50 % de laitier activé), des efflorescences apparaissent également, mais de façon plus diffuse : elles sont moins marquées mais sur des surfaces plus étendues.

La substitution d'une partie du ciment par du laitier activé a donc entraîné une modification du faciès des efflorescences mais n'a pas empêché leur apparition.

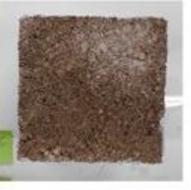
Cure de 7 jours	C8		C9	
	n°1	n°2	n°1	n°2
0 jour				
28 jours				
Cure de 14 jours	n°3	n°4	n°3	n°4
0 day				
28 days				

Tableau 6 - Photographies des éprouvettes avant et après essai

Les efflorescences formées en surface des échantillons ont été analysées par diffraction des rayons X afin de déterminer s'il ne s'agissait pas d'une cristallisation des activateurs chimiques pour la série C9. Il apparaît que les efflorescences sont très majoritairement constituées de calcite. De faibles quantités de thénardite (Na_2SO_4) sont détectées dans l'échantillon d'efflorescence de la série C9.

2.4.6. Commentaires

Les travaux, portant sur la caractérisation d'éprouvettes de béton à démoulage immédiat et de blocs de maçonnerie, ont permis de mettre en évidence que l'utilisation de laitier activé rend possible la fabrication, même par temps froid, de blocs de maçonnerie dont le liant contient jusqu'à 50 % de laitier activé. Une conservation en étuve durant 24 à 48 heures après fabrication 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.

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

2.4.7. Évaluation environnementale

La part des émissions de gaz à effet de serre liées au liant dans le béton est notablement réduite par l'utilisation du laitier. Le graphique ci-dessous présente le rapport entre la résistance moyenne des blocs à 7 jours en cure A (conservation sous bâche à 20 °C pendant 48 heures après fabrication puis à 20 °C et 75 % d'humidité) et les émissions de CO_2 du béton, en fonction des émissions de CO_2 . Les courbes en pointillés représentent les courbes iso-résistance. Ce graphique met en évidence qu'il est possible de réduire de 40 à 60 % les émissions de CO_2 tout en maintenant la résistance mécanique du béton (excepté pour la composition B5).

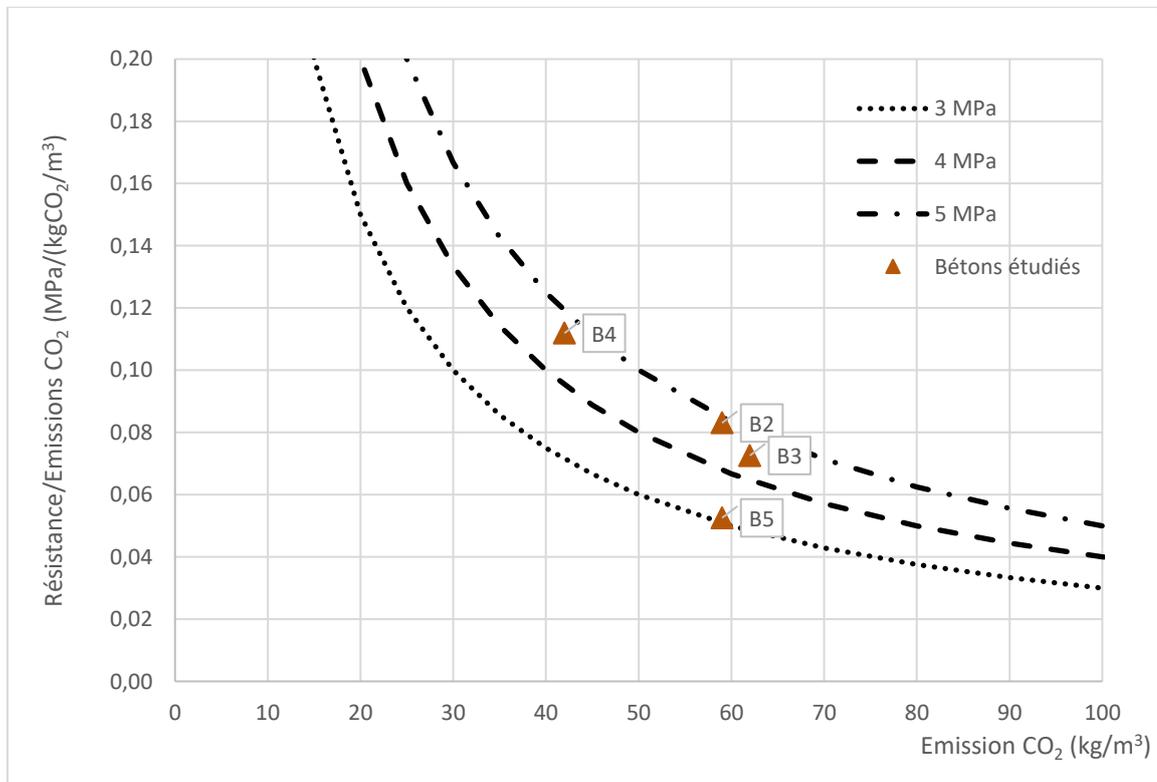


Figure 15 - Rapport entre la résistance moyenne à 7 jours (cure A) et les émissions de CO_2 en fonction des émissions de CO_2

L'indice de réchauffement climatique sur l'ensemble du cycle de vie des blocs de la formule B4 a été comparé aux valeurs de référence des FDES des blocs en béton, pose à joints mince et pose à joints épais.

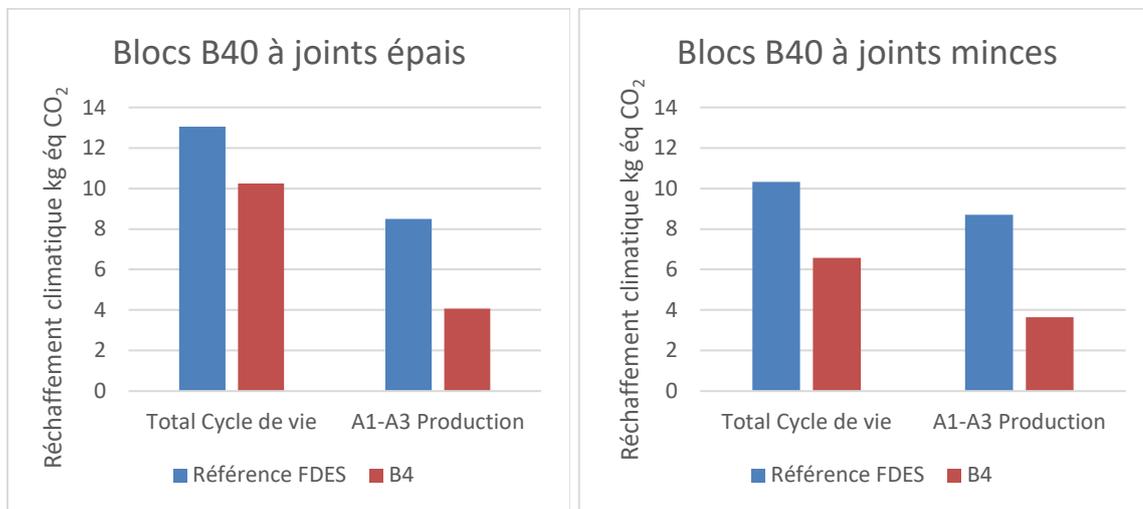


Figure 16 – Comparaison des valeurs d'indice de réchauffement climatique entre les références des FDES collectives et la formule B4 [7][12]

Sur l'étape de production, l'indicateur de réchauffement climatique pour la formule B4 est plus de 50 % plus faible que celui de la FDES collective. Sur le total du cycle de vie, la réduction de l'indicateur est de 22 % pour les blocs à joints épais et de 36 % pour les blocs à joints minces.

2.5. Application aux pavés

2.5.1. Programme expérimental

Des essais ont été menés en usine pour produire des pavés à base de liant ternaire (clinker, laitier, calcaire) activé chimiquement. Les pavés produits sont des pavés drainants bicouches.



Figure 17 – Pavé drainant bicouche fabriqué en usine



Figure 18 – Production des pavés en usine

Cinq séries de pavés ont été produites, sur la base des quatre liants détaillés dans le tableau ci-dessous. Ces liants sont similaires aux liants testés lors des essais sur mortier menés en laboratoire au paragraphe 2.3, avec une teneur en activateurs de 2,4 % en masse, par rapport à la masse du laitier pour le sulfate de sodium et de 1,0 % pour le chlorure de sodium.

Liants	Témoin 100 % ciment	70 % ciment	53 % ciment	35 % ciment
Composition des liants (en % massique)				
Ciment CEM I 52,5 N	100 %	70 %	53 %	35 %
Laitier Ecocem	-	20 %	35 %	50 %
Addition calcaire Omya	-	10 %	12 %	15 %
Activateurs chimique (en % massique du laitier)				
Sulfate de sodium	-	2,4 %	2,4 %	2,4 %
Chlorure de sodium	-	1,0 %	1,0 %	1,0 %

Tableau 7 – Composition des liants

- 1^{re} série (Témoin) : pavés de référence, dont le liant est composé à 100 % de ciment au niveau du parement et de la masse ;
- 2^e série (M70P100) : le béton de parement est identique à la référence (100 % ciment) ; le béton de masse est à base d'un liant ternaire composé de 70 % de ciment CEM I, 20 % de laitier et 10 % d'addition calcaire ;
- 3^e série (M70P70) : le béton de masse et le béton de parement sont à base d'un liant ternaire composé de 70 % de ciment CEM I, 20 % de laitier et 10 % d'addition calcaire ;
- 4^e série (M53P53) : le béton de masse et le béton de parement sont à base d'un liant ternaire composé de 53 % de ciment CEM I, 35 % de laitier et 12 % d'addition calcaire ;
- 5^e série (M35P35) : le béton de masse et le béton de parement sont à base d'un liant ternaire composé de 35 % de ciment CEM I, 50 % de laitier et 15 % d'addition calcaire.

Le liant total est maintenu constant entre les différentes formulations. L'eau d'ajout est ajustée par l'opérateur pour obtenir la consistance nécessaire à la production des pavés.

Les pavés ont été produits sur l'outil industriel de l'usine. Ils ont été placés en étuve jusqu'à l'âge de 5 jours puis stockés sur parc.

2.5.2. Constituants

Les constituants utilisés sont les constituants habituellement utilisés dans l'usine hormis le laitier qui est un laitier Ecocem et les activateurs (sulfate de sodium et chlorure de sodium) qui sont utilisés sous forme déshydratée.

2.5.3. Résultats

La première observation à la suite de la fabrication des pavés est l'influence de la quantité de laitier sur la teinte du produit obtenu. En effet, le ciment a une teinte grise beaucoup plus foncée que celle du laitier tandis que l'addition calcaire est blanche. Ainsi, plus la teneur en ciment est faible, plus les pavés sont de teinte claire.

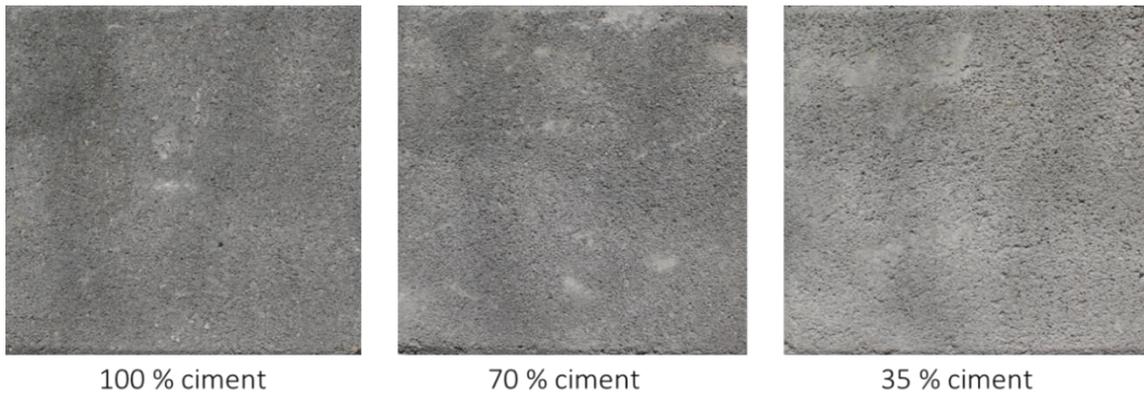


Figure 19 – Évolution de la teinte des pavés en fonction de la quantité de ciment

Les pavés ont été caractérisés par les essais suivants :

- détermination de la résistance au fendage à 7 jours, 14 jours et 28 jours, suivant la méthode de l'annexe F de la norme NF EN 1338 ; seuls deux à trois pavés de chaque série ont été testés à chaque échéance ;
- détermination de l'absorption d'eau à 28 jours suivant la méthode de l'annexe E de la norme NF EN 1338 ;
- détermination de la résistance au gel avec sels de déverglaçage sur les pavés M70P70 et M35P35 suivant la méthode de l'annexe D de la norme NF EN 1338 (28 cycles de 24 heures entre -20 et 20 °C) ; pour des raisons de planning, les essais ont été réalisés à l'âge de 3 mois.

	Témoin	M70P100	M70P70	M53P53	M35P35
	Pavés de référence 100 % ciment	Masse 70 % ciment Parement 100 % ciment	Masse + parement 70 % ciment	Masse + parement 53 % ciment	Masse + parement 35 % ciment
Fendage 7 j (MPa) ^a	4,5 - 3,3	3,7 - 3,7	3,3 - 3,0	3,9 - 4,1	3,6 - 3,4
Fendage 14 j (MPa) ^a	3,7 - 3,7	3,3 - 4,0	3,7 - 3,8	3,9 - 4,3	3,6 - 4,1
Fendage 28 j (MPa) ^a	4,2 - 4,0 - 4,1	4,8 - 4,2 - 4,0	4,7 - 5,3 - 4,2	3,7 - 4,4 - 4,2	4,3 - 3,6 - 3,9
Absorption d'eau (%)	4,5 %	3,2 %	5,1 %	4,7 %	5,5 %
Gel (kg/m ²) ^b	-	-	0,2 (0,3 - <0,1 - 0,2)	-	4,1 (3,6 - 3,0 - 5,7)

Tableau 8 – Résultats des essais

^a Pour les essais de fendage, deux ou trois pavés de chaque série ont été testés à chaque échéance. Les valeurs obtenues pour chaque pavé sont fournies dans le tableau.

^b Pour les essais de résistance au gel, trois pavés sont testés par série. La valeur moyenne (première ligne) doit être inférieure ou égale à 1,0 kg/m² et aucun élément (valeurs entre parenthèses) ne soit être supérieur à 1,5 kg/m².

Le faible nombre de pavés testés par échéance rend délicate l'interprétation des valeurs de résistance au fendage. Il apparaît cependant globalement que les valeurs de résistance au fendage mesurées sont homogènes, d'une série à l'autre et d'une échéance à l'autre. La norme NF EN 1338 recommande que la résistance caractéristique à la rupture en traction par

fendage ne soit pas inférieure à 3,6 MPa et qu’aucun résultat individuel ne soit inférieur à 2,9 MPa.

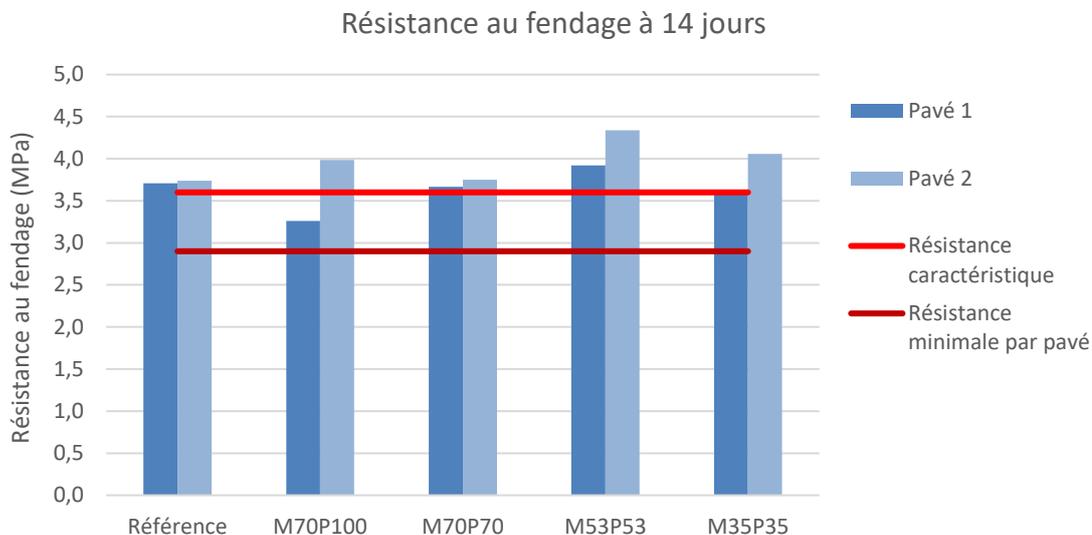


Figure 20 Résistance au fendage des pavés à 14 jours

Tous les pavés présentent une absorption d’eau inférieure à la limite de 6 %.

Deux séries de pavés ont été soumises à un essai de résistance au gel avec sels de déverglaçage : les pavés M70P70 (70 % de ciment) et les pavés M35P35 (35 % de ciment). La série M70P70 présente une bonne résistance au gel avec des pavés très peu dégradés durant l’essai alors que la série M35P35 présente d’importantes dégradations (voir photographies ci-dessous).

La faible résistance au gel avec sels de déverglaçage des bétons composés de grandes quantités de laitier de haut-fourneaux est une problématique récurrente et bien connue [13][14]. Néanmoins, les raisons de l’effet négatif du laitier sur la résistance à l’écaillage ne sont pas parfaitement identifiées. Les laitiers ont une influence sur le taux d’hydratation, sur les hydrates composant la pâte de ciment durcie, sur la porosité et sur l’entraînement de l’air. Tous ces facteurs sont susceptibles, à eux seuls, d’affecter le comportement à l’écaillage en plus d’être influencés par d’autres paramètres tels que le rapport eau/liant, le mûrissement, la température, les conditions de mise en place et la finition de la surface [13].

Afin de préciser l’influence des laitiers sur la résistance au gel des pavés, des essais complémentaires sont réalisés dans le cadre de l’étude du CERIB intitulée « Bétons décarbonés : application aux produits de voirie », en cours au moment de la diffusion du présent rapport.

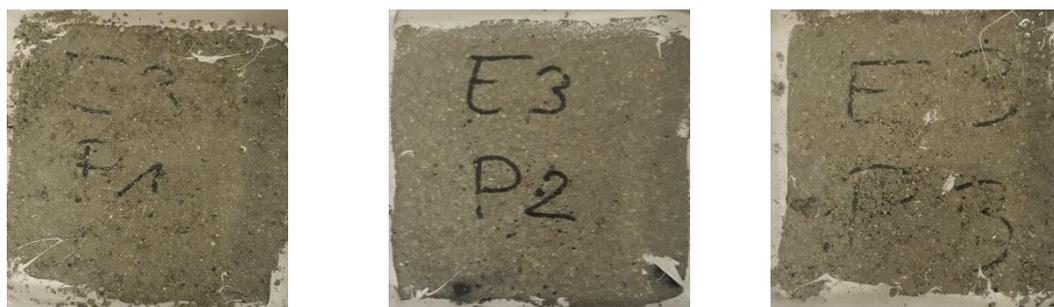


Figure 21 – Pavés de la série M70P70 à l’issue des essais de gel



Figure 22 – Pavés de la série M35P35 à l'issue des essais de gel

Par ailleurs, le référentiel NF relatif aux pavés de voirie est en cours d'évolution afin d'intégrer la possibilité d'utiliser des liants bas carbones non traditionnels. Les formulations testées dans la présente étude relèveraient du cas 3 de la future version du référentiel NF du fait de l'utilisation d'activateurs chimiques. Pour valider leurs utilisations suivant ce référentiel, il serait nécessaire de réaliser des essais complémentaires, en particulier des caractérisations du liant (notamment stabilité des performances sur 12 mois) et des essais sur pavés sans sels de déverglage suivant la norme NF EN 13198.

2.5.4. Évaluation économique et environnementale

Le graphique ci-dessous présente une comparaison du coût de revient estimé des pavés à base de laitier par rapport au coût estimé des pavés de référence. Les calculs ont été réalisés sur la base de tarifs moyens des constituants à l'automne 2023. On note une légère réduction du coût grâce à l'utilisation des liants à base de laitier, jusqu'à 4 % environ pour la formulation contenant 53 % de ciment.

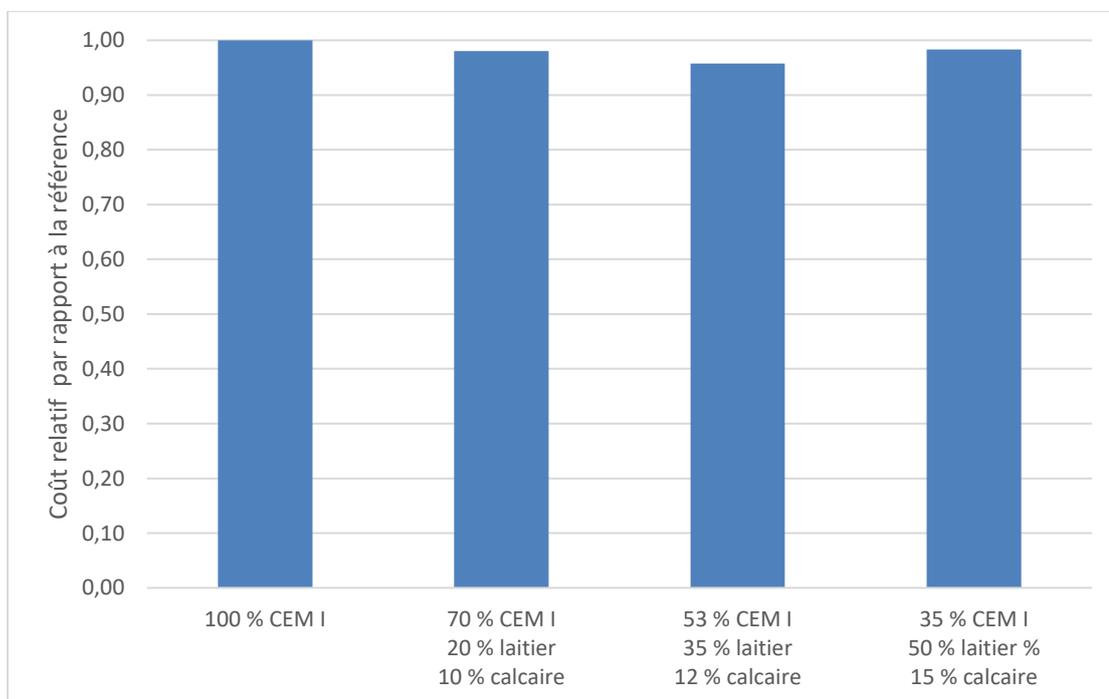


Figure 23 – Comparaison du coût des formulations

Le graphique ci-dessous présente le rapport entre la résistance moyenne au fendage des pavés à 14 jours et les émissions de CO₂ des pavés (partie matériau) relativement à la référence, en fonction des émissions de CO₂. Les courbes en pointillés représentent les courbes iso-résistance. Ces graphiques soulignent l'intérêt des solutions testées ici, tous les points étant plus ou moins situés sur une même courbe de résistance.

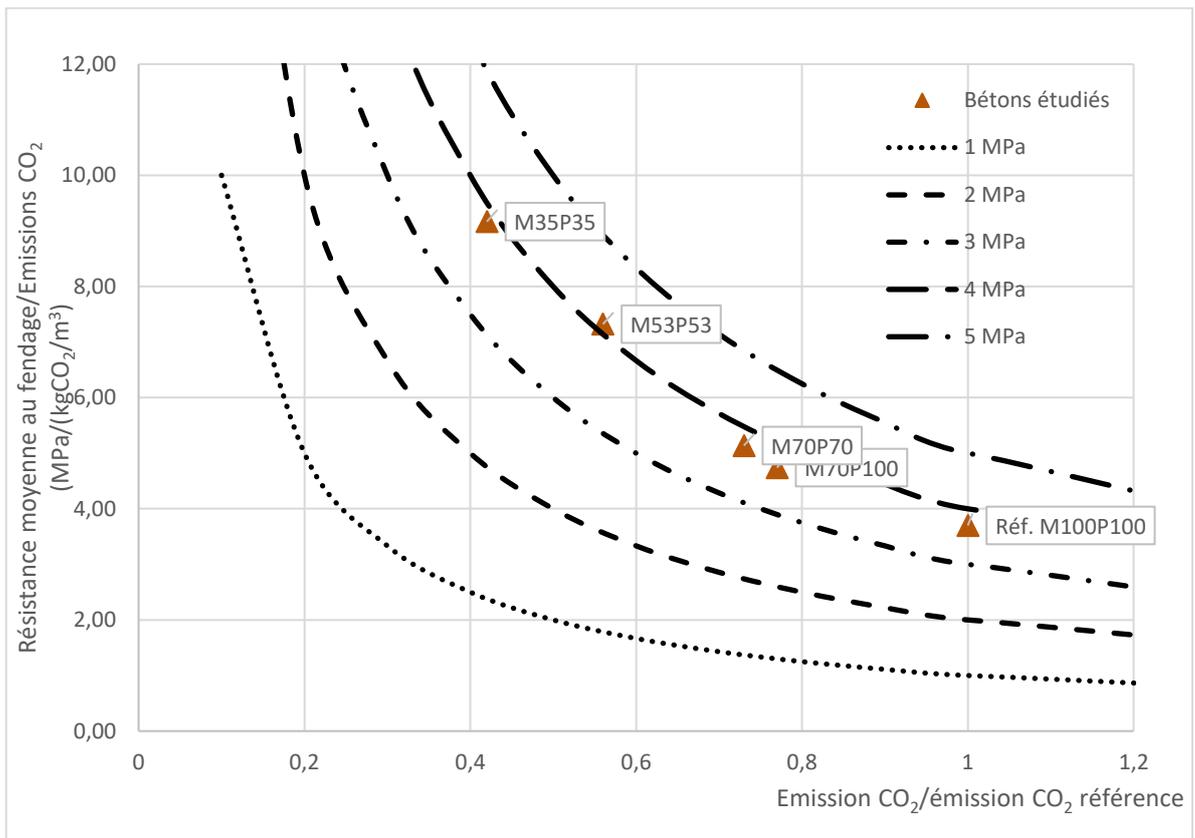


Figure 24 – Rapport entre la résistance moyenne au fendage à 14 jours et les émissions de CO₂ en fonction des émissions de CO₂, exprimées relativement au pavé de référence 100 % ciment

2.6. Application aux murs de soutènement

2.6.1. Programme expérimental

L'objectif est de tester les liants décarbonés pour la production de murs de soutènement en béton autoplaçant, en classe d'exposition XA3 (acide). Les laitiers présentent en effet des qualités reconnues pour l'amélioration de la résistance du béton aux environnements acides. La première étape a consisté à réaliser une campagne d'essais préliminaires en laboratoire afin d'ajuster les formulations et de vérifier les performances obtenues. Des essais en usine ont ensuite été menés au cours desquels des murs de soutènement ont été coulés.

Les caractéristiques exigées par l'usine pour le béton constitutif des murs de soutènement sont les suivantes :

- étalement : 710 mm ± 30 mm ;
- résistance en compression au démoulage : 15 MPa sur cylindre 16 cm x 32 cm ou 18 MPa sur cube 15 cm x 15 cm ;
- parement satisfaisant (bullage maîtrisé et teinte homogène).

On notera que la formule de référence utilisée par l'usine ne répond pas aux exigences de la classe XA3 (l'usine ne propose pas de murs de soutènement en classe XA3). La formule de référence est formulée pour les classes d'exposition suivantes : XF1, XC1 à XC4, XD1 et XD2.

Les performances des trois liants suivants ont été comparées :

- le liant du béton de référence « REF », à base de CEM I et d'addition calcaire ; ce béton n'est pas formulé pour résister en milieu acide ;

- un liant à base de CEM I et de laitier « CEM I + S » ;
- un liant à base de CEM III et d'addition calcaire « CEM III + LL ».

Les recommandations pour la composition des bétons soumis à des environnements chimiquement agressifs sont définis dans le fascicule FD P18-011. Ce document liste les types de liants autorisés pour les différents types de classe XA. Pour une classe XA3 en milieu acide :

- un CEM III ES peut être utilisé, tel que le ciment CEM III/A retenu pour les essais ;
- dans le cas d'un mélange de CEM I et de laitier, la proportion de laitier par rapport au liant total doit être supérieure à 60 %, avec le respect d'un rapport A/(A+C) de 0,5 pour le liant équivalent.

Le tableau suivant récapitule les spécifications normatives de la classe XA3 en milieu acide pour les liants étudiés.

	Liant « CEM I + S »	Liant « CEM III ES + LL »
$E_{eff}/Liant_{eq}$	≤ 0,45 (NA.F.1 - NA.F.3)	
Classe de résistance	C40/50 (NA.F.1 - NA.F.3)	
Proportion de laitier dans le liant total	> 60 %	-
$Liant_{eq}$	≥ 387 kg/m ³ (NA.F.1 - NA.F.3)*	
A/(A + C)	≤ 0,50 (NA.F.3)	-
Teneur en laitier (% C + S)	≥ 60 % (NF P 15-3-19)	
Teneur en additifs (% C + S)	< 1 % (NF P 15-3-19)	
Teneur en chlorures (% (A + C))	≤ 0,2 % (NF EN 206 + A2/CN)	

* $D_{max} = 14 \text{ mm}$

Tableau 9 – Spécifications normatives pour la classe XA3 en milieu acide

Du chlorure de sodium et de sulfate de sodium sous forme anhydre ont été utilisés pour l'activation du laitier lors des essais. Il est important de noter que ces activateurs n'étant pas des adjuvants conformes à la norme NF EN 934-2, la question de leur positionnement vis-à-vis des normes se pose.

2.6.2. Essais en laboratoire

2.6.2.1. Formulations

Les bétons ont été fabriqués en laboratoire avec les constituants envoyés par l'usine et soumis aux essais suivants :

- masse volumique à l'état frais ;
- masse volumique à l'état durci ;
- étalement ;
- résistance en compression au démoulage, à 7 jours et 28 jours ;
- résistance au fendage au démoulage, à 7 jours et 28 jours ;
- porosité à 28 jours ;
- absorption d'eau à 28 jours ;
- retrait ;
- essai de fissuration à l'anneau.

Quatre bétons ont été étudiées :

- **REF** : La référence habituellement utilisée par l'usine pour les murs de soutènement (non XA3), à base de CEM I et d'addition calcaire ;
- **CEM I + S** : La formulation à base de CEM I et de laitier sans traitement thermique ;
- **CEM I + S + TT** : La formulation à base de CEM I et de laitier avec traitement thermique ;
- **CEM III + LL + TT** : La formulation à base de CEM III, avec traitement thermique.

Les compositions réelles obtenues sont les détaillées dans le tableau ci-dessous.

Constituants (kg/m ³)	CEM I + S	CEM I + S + TT	CEM III + LL + TT
CEM I 52,5 R	193	199	
CEM III/A (62 % laitier)	-	-	379
Laitier	289	298	
Addition calcaire			137
Granulats	1 734	1 790	1 675
Accélérateur	-	-	-
Superplastifiant	1,10	1,42	0,93
Sulfate de sodium	3,2	3,4	2,68
Chlorure de sodium	1,4	1,5	1,09
Eau efficace	165	170	170
Liant _{éq}	367	378	379
E _{eff} /Liant _{éq}	0,45	0,45	0,45
Teneur en additif (% C + S)	0,95 %	0,95 %	0,99 %
Teneur en chlorures (% C + A)	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Masse volumique état frais	2 400	2 480	2 480
Étalement	697	695	750

Tableau 10 – Détail des formulations fabriquées en laboratoire

2.6.2.2. Traitement thermique

Le traitement thermique utilisé en laboratoire est présenté sur le graphique ci-dessous. Il a été défini sur la base des résultats des travaux précédents [2], en respectant notamment les recommandations pour éviter les risques de réaction sulfatique interne. Sa durée est de six heures, avec une température maximale de 60 °C.

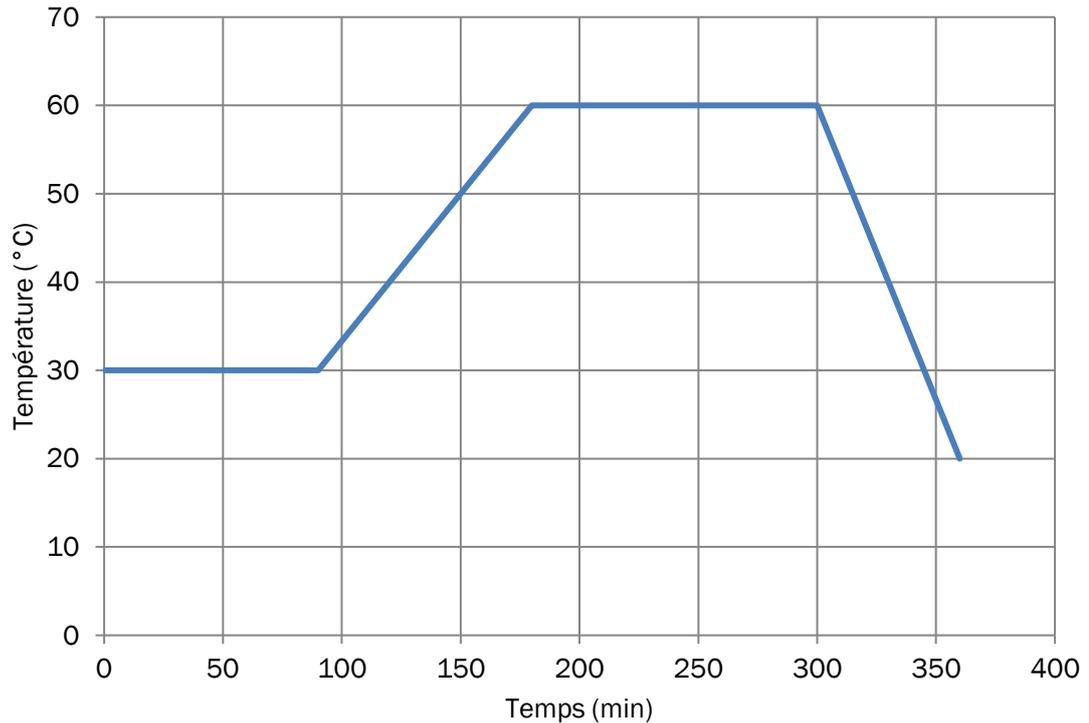


Figure 25 – Traitement thermique utilisé en laboratoire (température de consigne de l’étuve)

Le béton de référence n’a pas été soumis au traitement thermique. Le béton à base de liant « CEM I + S » a été testé avec et sans traitement thermique (TT). Le béton à base de liant « CEM III + LL » a été testé avec traitement thermique uniquement.

2.6.2.3. Résultats des essais mécaniques

La résistance à la compression des bétons a été déterminée suivant la norme NF EN 12390-3 sur cubes de 10 cm de côté au démoulage, à 7 jours et à 28 jours. La résistance à la traction par fendage des bétons a été déterminée suivant la norme NF EN 12390-6 sur cylindres de diamètre 11 cm et de hauteur 22 cm au démoulage, à 7 jours et à 28 jours.

Les échéances de démoulage sont variables en fonction des bétons : 6 heures pour les bétons traités thermiquement, 16 heures pour la référence et 20 heures pour le béton « CEM I + S » non traité thermiquement.

Résistance à la compression (MPa)	REF	CEM I + S	CEM I + S + TT	CEM III + LL + TT
Au démoulage	51,5 (16 h)	26,0 (20 h)	43,6 (6 h)	26,0 (6 h)
À 7 jours	83,9	59,1	65,4	40,5
À 28 jours	85,7	72,9	60,8	78,0

Tableau 11 – Résistance à la compression des bétons

Résistance au fendage (MPa)	REF	CEM I + S	CEM I + S + TT	CEM III + LL + TT
Au démoulage	3,4 (16 h)	2,3 (20 h)	3,1 (6 h)	2,3 (6 h)
À 7 jours	-	-	-	3,6
À 28 jours	4,8	4,8	4,3	5,0

Tableau 12 – Résistance au fendage des bétons

On constate une réduction de la résistance mécanique du béton avec la réduction de la teneur en clinker, notamment au jeune âge. Le béton de référence présente des performances particulièrement élevées, dépassant largement les exigences. L'application du traitement thermique au béton « CEM I + S » permet d'obtenir une amélioration notable de la résistance au démoulage et une légère amélioration à 7 jours. La perte de résistance à 28 jours est surprenante. Le béton « CEM III + LL + TT » présente des performances faibles relativement à la référence malgré l'application du traitement thermique. Ce résultat est lié à sa faible teneur en clinker. Néanmoins, les performances en compression sont supérieures aux exigences (18 MPa au démoulage et classe de résistance à 28 jours C40/50).

La même tendance est observée entre les résultats en compression et les résultats en fendage. La perte de résistance des bétons au laitier est néanmoins plus faible en fendage qu'en compression.

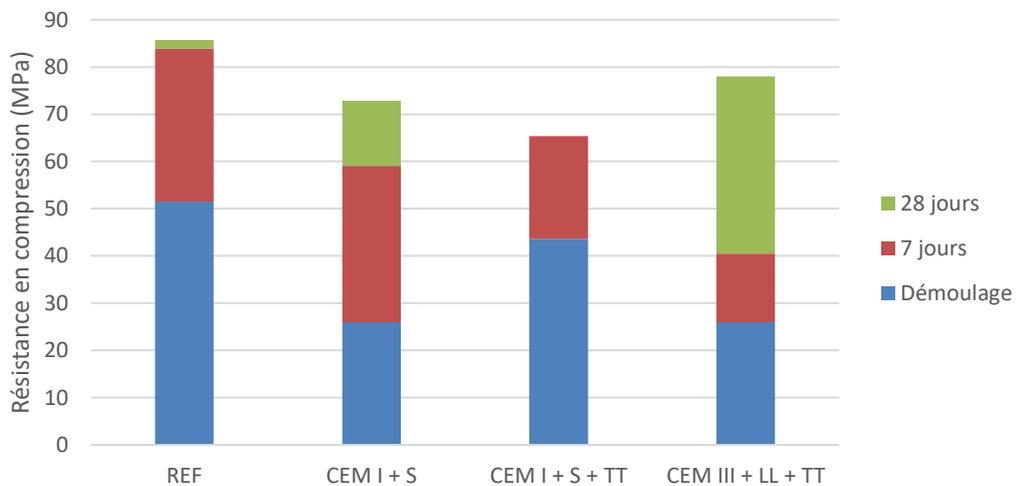


Figure 26 - Résistance en compression des bétons

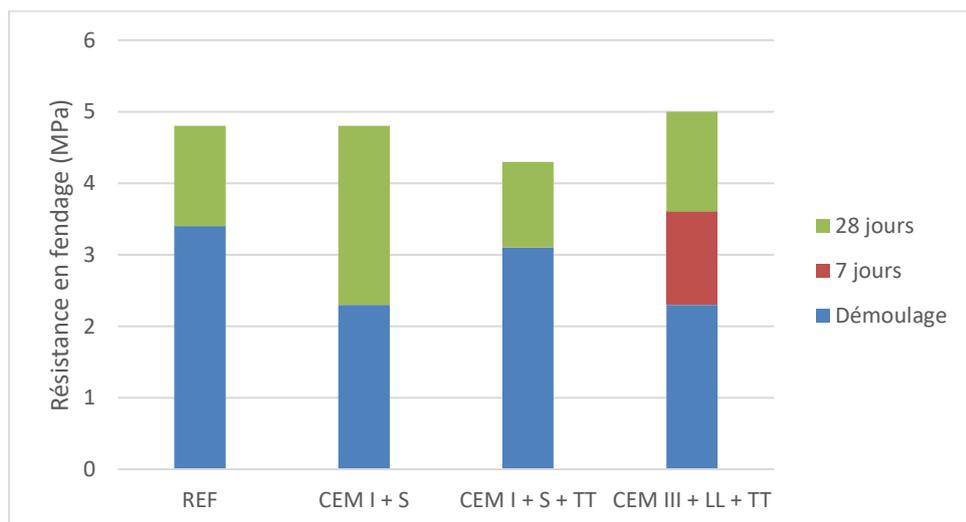


Figure 27 - Résistance en traction par fendage des bétons

2.6.2.4. Masse volumique, porosité et absorption d'eau

La masse volumique apparente et la porosité accessible à l'eau des bétons ont été déterminées suivant la norme NF P 18-459. L'absorption d'eau des bétons a été déterminée suivant l'annexe G de la norme NF EN 13369.

	REF	CEM I + S	CEM I + S + TT	CEM III + LL + TT
Masse volumique apparente (kg/m ³)	2 320	2 280	2 320	2 260
Porosité accessible à l'eau	10,4 %	13,2 %	11,2 %	14,7 %
Absorption d'eau	4,3 %	4,3 %	5,2 %	6,4 %

Tableau 13 – Masse volumique, porosité et absorption d'eau des bétons

2.6.2.5. Évaluation de la sensibilité des bétons au retrait

La sensibilité des bétons au retrait a été évaluée à l'aide de deux essais :

- un essai de retrait sur prismes 7 cm x 7 cm x 28 cm suivant la norme NF P18-427 : cet essai vise principalement à évaluer le retrait de dessiccation du béton ;
- un essai de fissuration à l'anneau inspiré de la méthode NT BUILD 433 (norme norvégienne) : cet essai vise principalement à évaluer la sensibilité à la fissuration du béton vis-à-vis du retrait.

Pour ces essais, les trois formules (REF, CEM I + S et CEM III + LL) ont été testées avec et sans traitement thermique.

2.6.2.5.1. Essai de retrait suivant la norme NF P 18-427

Pour chaque formule de béton, trois prismes 7 cm x 7 cm x 28 cm équipés de plots ont été placés après démoulage dans un laboratoire contrôlé à 20 °C et 50 % d'humidité relative. Le retrait des éprouvettes a été mesuré à différentes échéances, depuis le démoulage (24 heures pour les bétons sans traitement thermique, 6 heures pour les bétons avec traitement thermique), jusqu'à 90 jours. Les résultats sont présentés sur le graphique suivant.

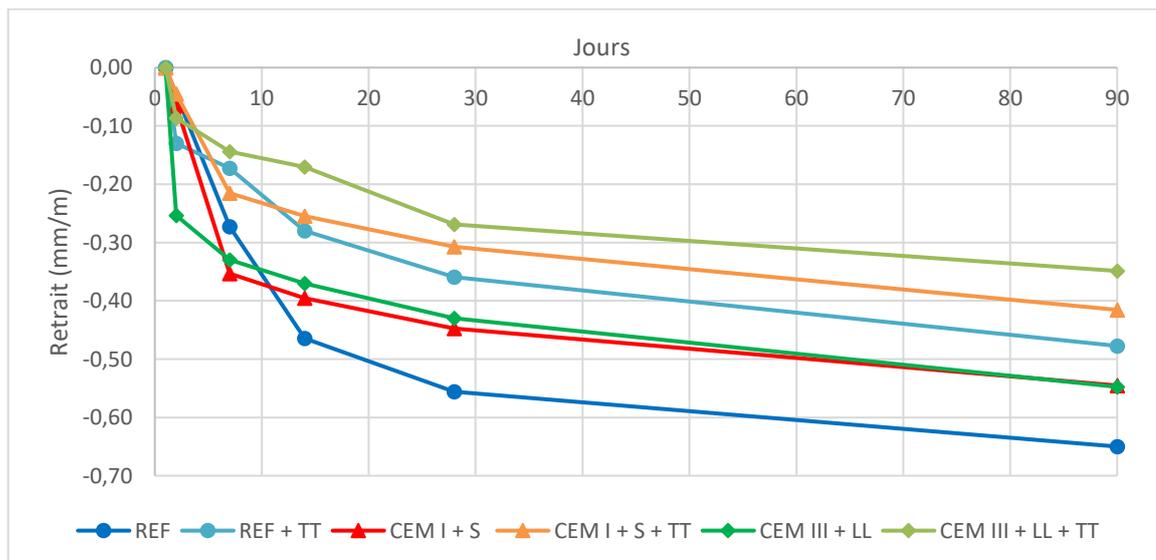


Figure 28 – Résultats des essais de retrait sur prismes

À toutes les échéances, les bétons traités thermiquement présentent un retrait total après démoulage plus faible que les bétons non traités. Au jeune âge, le retrait est plus élevé sur les formules contenant du laitier que sur la référence mais le résultat inverse est obtenu à partir

de 14 jours. Ce résultat est observé aussi bien pour les bétons avec traitement thermique que pour les bétons sans traitement thermique. Le retrait à long terme est ainsi plus élevé pour les bétons de référence. À 90 jours, le retrait du béton de référence, non traité thermiquement, est presque le double du retrait du béton « CEM III + LL + TT ». Toutefois, la part du retrait que l'on ne mesure pas, c'est-à-dire le retrait avant démoulage, est sans doute plus élevée dans le cas des bétons étuvés.

Ces résultats confirment certains résultats que l'on trouve dans la littérature à savoir que le retrait total est plus faible pour les bétons contenant du laitier [15].

Les bétons contenant du laitier de haut fourneau présentent un retrait endogène plus élevé que les bétons à base de ciments Portland [15] [16]. Ce phénomène est à relier à leur porosité. En effet, une fine porosité induit une pression capillaire plus élevée et contribue à une diminution de l'humidité relative ce qui augmente l'auto-dessiccation de la pâte de ciment. De plus, les bétons au laitier de haut fourneau présenteraient un retrait chimique plus élevé que le ciment Portland ce qui peut conduire à un phénomène d'auto-dessiccation plus important et plus rapide [17].

Néanmoins, les bétons contenant du laitier présentent un retrait de séchage inférieur à celui des bétons au ciment Portland [16] [18] ce qui entraîne un retrait total plus faible.

2.6.2.5.2. Essai de retrait à l'anneau

L'essai en anneau est utilisé pour déterminer la tendance à la fissuration du béton au jeune âge, dans des conditions de séchage spécifiques. La méthode est basée sur la norme norvégienne NT BUILD 43.

Le béton frais est coulé dans un moule métallique composé de deux anneaux concentriques présentant des ailettes orientées vers l'intérieur du moule, comme présenté sur les figures suivantes. Le moule rempli de béton frais est conservé durant 24 heures dans un laboratoire contrôlé à 20 °C et 50 % d'humidité relative et soumis à un courant d'air à l'aide d'un ventilateur. L'objectif est de placer les bétons en conditions de retrait plastique et de favoriser la formation de fissures via la présence d'ailettes.

Après 24 heures, les ouvertures des fissures (l_i) traversant les deux cercles représentés sur la figure 29 (section 1, l_1 , et section 2, l_2) sont mesurées. L'indice de fissuration C_i (crack index) est alors déterminé par la formule suivante :

$$C_i = \frac{1}{2} * (\sum l_1 + \sum l_2) \quad \text{Équation 1}$$

Dans le cas des bétons traités thermiquement, la méthode a dû être adaptée. Le béton frais a été coulé dans l'anneau puis celui-ci a été placé dans l'étuve pour toute la durée du traitement thermique (soit 6 heures). L'ouverture des fissures a été mesurée à l'issue du traitement thermique.

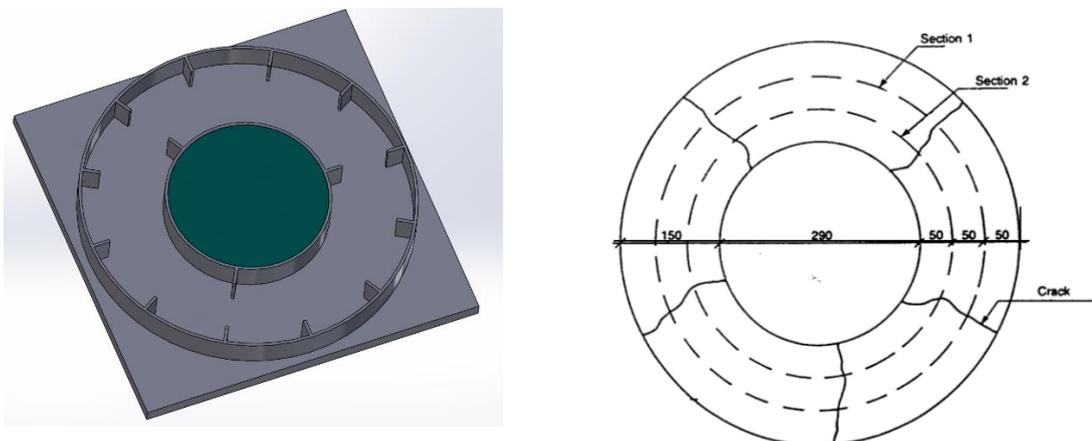


Figure 29 – Représentation de l'anneau



Figure 30 – Montage de l'essai à l'anneau



Figure 31 – Observation des fissures

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant.

	REF	REF + TT	CEM I + S	CEM I + S + TT	CEM III + LL	CEM III + LL + TT
Crack index	2,13	0,52	0,18	0	0,47	0

Tableau 14 – Indice de fissuration mesuré sur les différents bétons

La fissuration est plus importante pour le béton de référence que pour les bétons décarbonés. En outre, la fissuration est plus importante pour les bétons sans traitement thermique que pour les bétons avec traitement thermique. On note d'ailleurs qu'aucune fissure n'est observée sur les bétons « CEM I + S + TT » et « CEM III + LL + TT ».

Néanmoins, la cinétique d'hydratation des laitiers est différente de celle des clinkers et il serait pertinent de poursuivre l'essai sur une durée plus longue afin de confirmer le résultat observé ici.

En effet, les travaux de [16] ont montré que malgré une déformation endogène plus élevée, les bétons formulés à base de ciment au laitier de haut-fourneau fissurent après le béton formulé à base de ciment Portland. Ce comportement est dû à :

- l'impact du laitier sur la réaction d'hydratation du matériau cimentaire ;

- la présence d'une expansion de la matrice cimentaire des bétons formulés à base de ciment au laitier de haut-fourneau au jeune âge qui retarde l'apparition des contraintes de traction au sein du matériau ;
- la plus grande capacité de ces matériaux cimentaires à relaxer les contraintes de traction.

2.6.3. Essais en usine

2.6.3.1. Déroulement des essais

Lors des essais en usine, deux gâchées de béton ont pu être réalisées :

- une première gâchée de béton avec le liant à base de CEM I et de laitier ;
- une seconde gâchée avec le liant à base de CEM III et d'addition calcaire.

Les bétons ont été fabriqués avec l'outil industriel, hormis la pesée manuelle des constituants non courants dans l'usine (laitier, CEM III et activateurs). Les activateurs sont utilisés sous forme anhydre. L'étalement et la masse volumique du béton frais ont été mesurés en sortie de malaxeur puis les murs de soutènement ont été coulés (un mur par gâchée) ainsi que des éprouvettes cubiques.

Les moules utilisés pour la fabrication des murs sont des moules métalliques chauffants. Ils sont recouverts d'un capot isotherme en PSE après coulage. Les éprouvettes ont pu être stockées à l'intérieur des moules de murs jusqu'au démoulage. La température à l'intérieur du moule est d'environ 35 °C.

Les moules et les éprouvettes ont été démoulés après 15 heures de durcissement. La résistance en compression du béton a été mesurée au démoulage et à 28 jours sur cubes de 10 cm de côté.

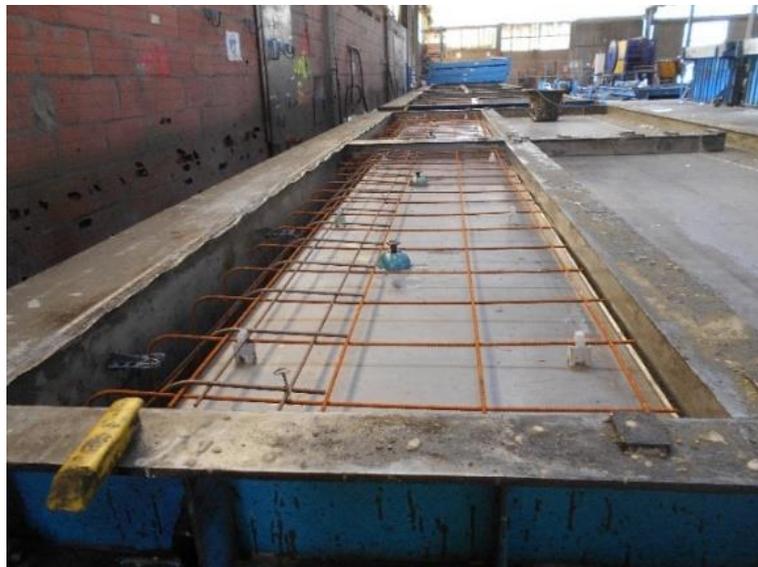


Figure 32 – Coulage des murs en usine

2.6.3.2. Résultats

Les formulations réelles des bétons et les résultats sont présentés dans le tableau suivant. Dans la formulation « CEM I + S », le rapport E_{eff}/L_{eq} est supérieure à la spécification (0,45) en raison d'un ajout d'eau lors de la fabrication.

	CEM I + S + TT	CEM III + LL + TT
Ciment CEM I 52,5N (kg/m ³)	198	-
Ciment CEM III/A (kg/m ³)	-	373
Laitier (kg/m ³)	296	-
Addition calcaire (kg/m ³)	-	135
Granulats (kg/m ³)	1 649	1 622
Sable 0/4 (kg/m ³)	789	785
Gravier 4/6 (kg/m ³)	397	386
Gravier 10/14 (kg/m ³)	463	451
Superplastifiant (kg/m ³)	3,3	2,7
Na ₂ SO ₄ (kg/m ³)	3,4	2,6
NaCl (kg/m ³)	1,40	1,1
Eau efficace (kg/m ³)	193	166
Liant équivalent (kg/m ³)**	375	373
E _{eff} /L _{eq}	0,51	0,44
Masse vol. état frais (kg/m ³)	2 350	2 310
Étalement (mm)	74,5	72,5
Compression démoulage (MPa)*	17,5	18,4
Compression 28j (MPa)*	58,7	53,2

* Compression sur cubes de 10 cm de côté

** Calculé avec $A/(A+C)$ inférieur ou égal à 0,5 (NA.F.3 en XA3)

Tableau 15 - Compositions réelles des bétons fabriqués en usine et résultats des essais mécaniques

2.6.3.3. Commentaires

Les bétons fabriqués présentent des performances mécaniques proches des exigences (résistance en compression au démoulage de 18 MPa sur cube ; classe de résistance à 28 jours C40/50).

Néanmoins, pour la composition CEM I + S, la quantité d'eau ajoutée dans la gâchée était trop élevée et a été à l'origine de phénomènes de ressuage. La teneur en eau devrait être réduite afin de respecter la spécification du rapport E_{eff}/L_{eq} (0,45), augmenter les performances mécaniques, améliorer l'aspect et respecter la spécification de l'usine concernant l'étalement (710 mm ± 30 mm). Les performances de la formulation CEM III + LL pourraient également être augmentées par une réduction d'eau, sous réserve d'une éventuelle augmentation du dosage en superplastifiant. En outre, le traitement thermique appliqué ici est modéré, une

température plus élevée serait un levier efficace pour l'amélioration des performances au démoulage.



Figure 33 – Photographies des murs coulés avec les bétons décarbonés – Phénomènes de ressuges observés sur le mur fabriqué avec le liant CEM I + S

2.6.4. Évaluation économique et environnementale

Le graphique ci-dessous présente une comparaison du coût du matériau (incluant le coût des constituants et celui du traitement thermique) par rapport au coût de la référence. Les calculs ont été réalisés sur la base de tarifs moyens des constituants à l'automne 2023. Le coût de la formule à base de CEM III et d'addition calcaire est du même ordre de grandeur que le coût de la formule de base. Par contre, la formule à base de CEM I et de laitier a un coût environ 15 % plus élevé que celui de la formule de référence.

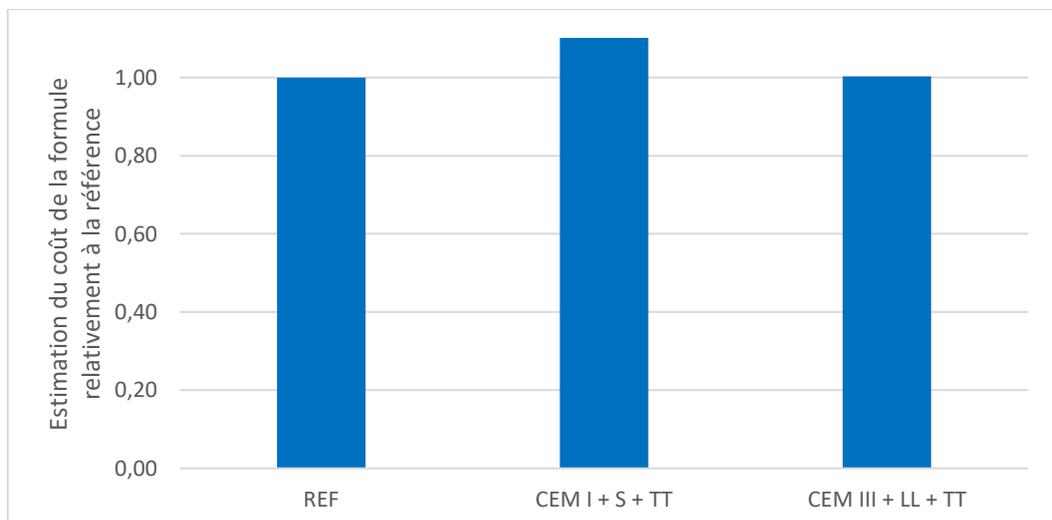


Figure 34 – Comparaison du coût des formulations

Les graphiques suivants présentent le rapport entre la résistance moyenne en compression et les émissions de CO₂, en fonction des émissions de CO₂. Les courbes en pointillés représentent les courbes iso-résistance. Sur ces graphiques sont positionnées les formules fabriquées en laboratoire et en usine, ainsi que la formulation « CEM I + S + TT + réduction eau » qui n'a pas été testée, extrapolée de la formulation « CEM I + S + TT » fabriquée en usine, grâce à la formule de Féret modifiée (équation 2), avec une réduction d'eau (afin de respecter l'exigence de E_{eff}/L_{eq} de 0,45).

$$f_{cm} = K \cdot R_c \frac{1}{\left(1 + M_{vc} \frac{E + a}{C + k \cdot A}\right)^2} \quad \text{Équation 2}$$

Avec :

f_{cm} , résistance en compression du béton

K , coefficient granulaire

R_c , classe de résistance du ciment

E , dosage en eau du béton (L/m³)

C , dosage en ciment (kg/m³)

a , quantité d'air dans le béton (L/m³)

A , dosage en addition (kg/m³)

k , facteur de conversion des additions en ciment équivalent (en fonction de la nature de l'addition)

M_{vc} , masse volumique du ciment (kg/m³)

Ces graphiques mettent en évidence la possibilité de réduire de plus de 50 % les émissions de CO₂ grâce à l'utilisation des liants décarbonés. La résistance en compression du béton est réduite, en particulier au démoulage mais les formulations pourraient être optimisées par une réduction d'eau.

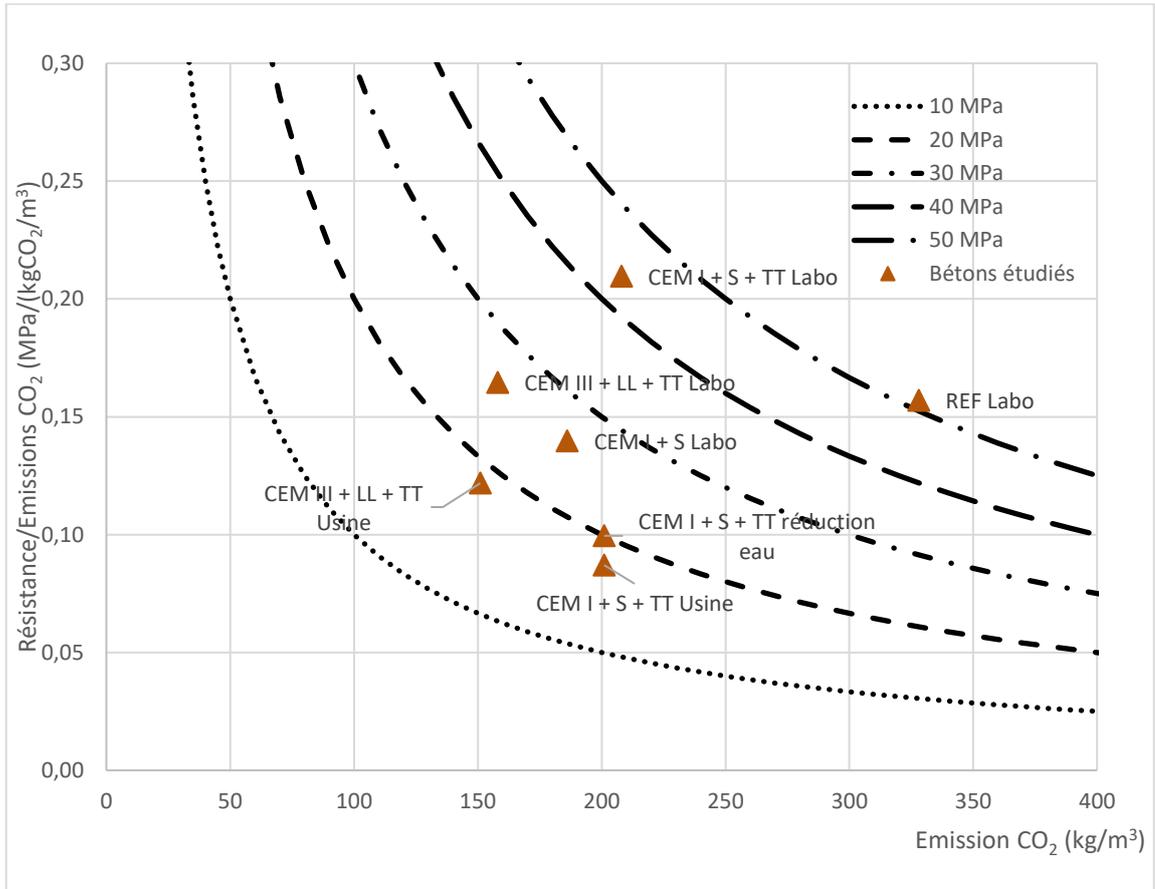


Figure 35 - Rapport entre la résistance moyenne à la compression au démoulage et les émissions de CO₂ en fonction des émissions de CO₂ (bétons fabriqués en laboratoire)

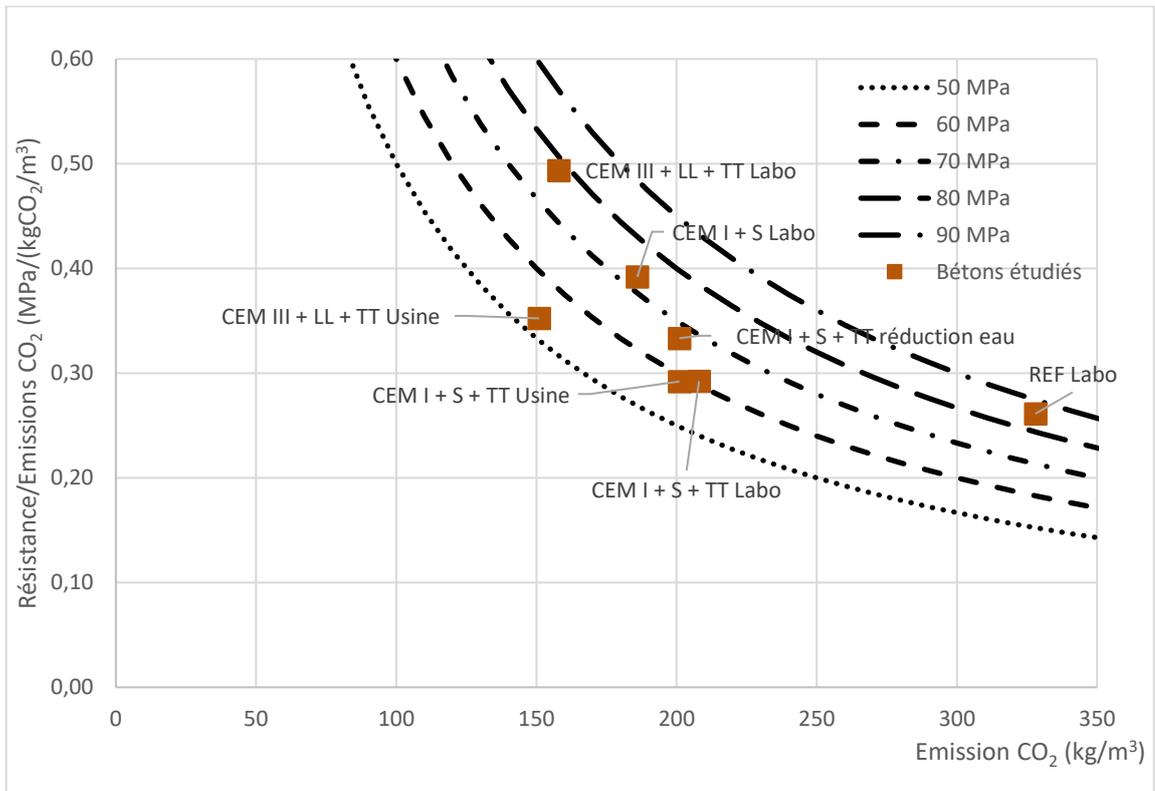


Figure 36 - Rapport entre la résistance moyenne à la compression à 28 jours et les émissions de CO₂ en fonction des émissions de CO₂

2.7. Application aux escaliers

2.7.1. Programme expérimental

Pour cette application, seuls des essais au laboratoire d'une usine ont été réalisés. Ils ont porté sur deux bétons différents :

- un béton vibré, destiné à la fabrication d'escaliers monoblocs à volée droite ;
- un béton autoplaçant destiné à la fabrication d'escaliers hélicoïdaux.

Ces bétons ne sont pas traités thermiquement.

Les exigences de l'usine relatives à ces bétons sont les suivantes :

- classes d'exposition XC1 et XF1 ;
- béton vibré : affaissement S4 (160 à 210 mm) ; béton autoplaçant : étalement SF2 (660 à 750 mm) ;
- démoulage à 24 heures, sans traitement thermique ;
- résistance au démoulage 20 MPa sur cubes 15 cm x 15 cm.

Les spécifications normatives liées aux classes d'exposition XC1 et XF1 sont rappelées dans le tableau suivant.

	Béton autoplaçant BAP	Béton vibré BV
E_{eff}/L_{eq}	$\leq 0,60$ (NA.F.1)	
Classe de résistance	C25/30 (NA.F.1)	
L_{eq}	$\geq 308 \text{ kg/m}^3$ (NA.F.1)*	$\geq 294 \text{ kg/m}^3$ (NA.F.1)**
$A/(A + C)$ (laitier)	$\leq 0,30$ (NA.F.1)	
Teneur en chlorures (% C+A)	$\leq 0,4 \%$ (NF EN 206 + A2/CN)	

* $D_{max} = 8 \text{ mm}$

** $D_{max} = 16 \text{ mm}$

Tableau 16 – Spécifications normatives pour la classe XF1 suivant la norme NF EN 206 + A2/CN

Les formulations ont été définies en accord avec l'industriel en visant une réduction de l'impact environnemental sans augmentation du coût de la formule. Le liant total a été maintenu constant par rapport aux bétons de référence. Les formulations de références (formulations courantes de l'usine) ont un liant composé de ciment et d'addition calcaire. Les compositions de béton décarboné ont un liant composé de ciment, d'addition calcaire et de laitier, avec une activation chimique (NaCl et Na₂SO₄) et aucun traitement thermique. Pour la formule de béton vibré, une formulation alternative a été testée avec le liant décarboné, en substituant les activateurs chimiques par un accélérateur de durcissement plus conventionnel, disponible dans le commerce.

Du chlorure de sodium et du sulfate de sodium sous forme anhydre ont été utilisés pour l'activation du laitier lors des essais. Il est important de noter que ces activateurs n'étant pas des adjuvants conformes à la norme NF EN 934-2, la question de leur positionnement vis-à-vis des normes se pose.

Les bétons ont été fabriqués dans un malaxeur de 60 litres puis soumis aux essais suivants :

- masse volumique à l'état frais ;
- étalement/affaissement à 5 minutes et 30 minutes ;
- teneur en eau du béton frais à la poêle ;
- résistance à la compression sur cubes de 10 cm de côté au démoulage (24 heures).

2.7.2. Constituants

Les constituants utilisés sont les constituants courants de l'usine, hormis le laitier et les activateurs chimiques (utilisés sous forme anhydre).

2.7.3. Résultats

Les compositions réelles des bétons ainsi que les résultats des caractérisations sont présentés dans le tableau suivant. On note des masses volumiques plus élevées dans le cas des liants ternaires qui pourraient être liées à l'effet du troisième constituant sur la compacité de la matrice cimentaire.

Constituants (kg/m ³)	Réf. BAP	BAP 70 % C	Réf. BV	BV 70 % C	BV 70 % C + acc.
Ciment CEM I 52,5 N	334	248	330	243	245
Laitier	0	115	0	94	94
Addition calcaire	172	134	37	37	38
Granulats	1 611	1 678	1 650	1 685	1 698
Superplastifiant	3,5	5	0	0	0
Plastifiant	0	0	1,8	2,1	1,9
Accélérateur de durcissement	0	0	0	0	4,1
Na ₂ SO ₄	0	2,6	0	2,1	0
NaCl	0	1,1	0	0,9	0
Eau efficace	186	179	173	163	169
Masse vol. état frais kg/m ³	2 320	2 380	2 210	2 250	2 270
L _{eq}	370	344	339	328	330
E _{eff} /L _{eq}	0,50	0,52	0,51	0,50	0,51
Teneur en chlorures (% C+A)	0,12 %	0,25 %	0,13 %	0,27 %	0,13 %
Étalement 5 min (cm)	68	73,5	-	-	-
Étalement 30 min (cm)	51	73,5	-	-	-
Affaissement 5 min (cm)	-	-	17,5	22	21
Affaissement 30 min (cm)	-	-	15,5	20	18
Compression démoulage 24 h (MPa)	21,2	21,2	12,5	11,1	10,1

Tableau 17 – Compositions réelles des bétons et caractérisations

2.7.4. Commentaires

Pour les bétons autoplaçants, la résistance au démoulage du béton au laitier est égale à celle du béton de référence. Pour les bétons vibrés, les résistances au démoulage des bétons au laitier sont un peu inférieures à celle du béton de référence (réduite de 10 % pour le béton avec activateurs, réduite de 20 % pour le béton avec accélérateur conventionnel).

2.7.5. Évaluation économique et environnementale

Les graphiques ci-dessous présentent une comparaison du coût du matériau par rapport au coût de la référence. Les calculs ont été réalisés sur la base de tarifs moyens des constituants à l'automne 2023. Les formules à base de laitier ont un coût 6 à 12 % plus élevé que les formules de référence.

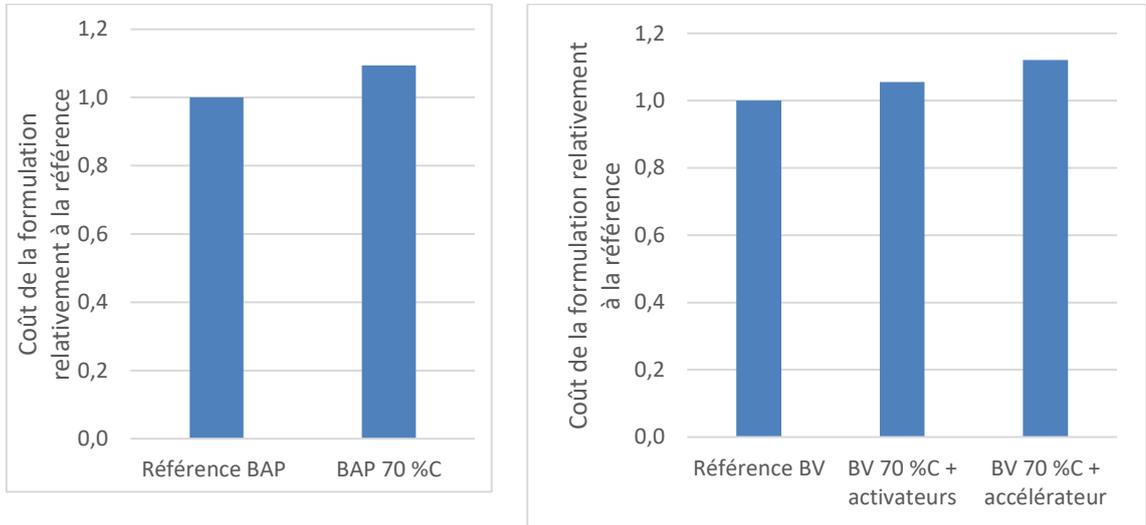


Figure 37 – Comparaison du coût estimé des formulations avec celui des bétons de référence

Le graphique suivant présente le rapport entre la résistance moyenne en compression au démoulage et les émissions de CO₂, en fonction des émissions de CO₂. Les courbes en pointillés représentent les courbes iso-résistance.

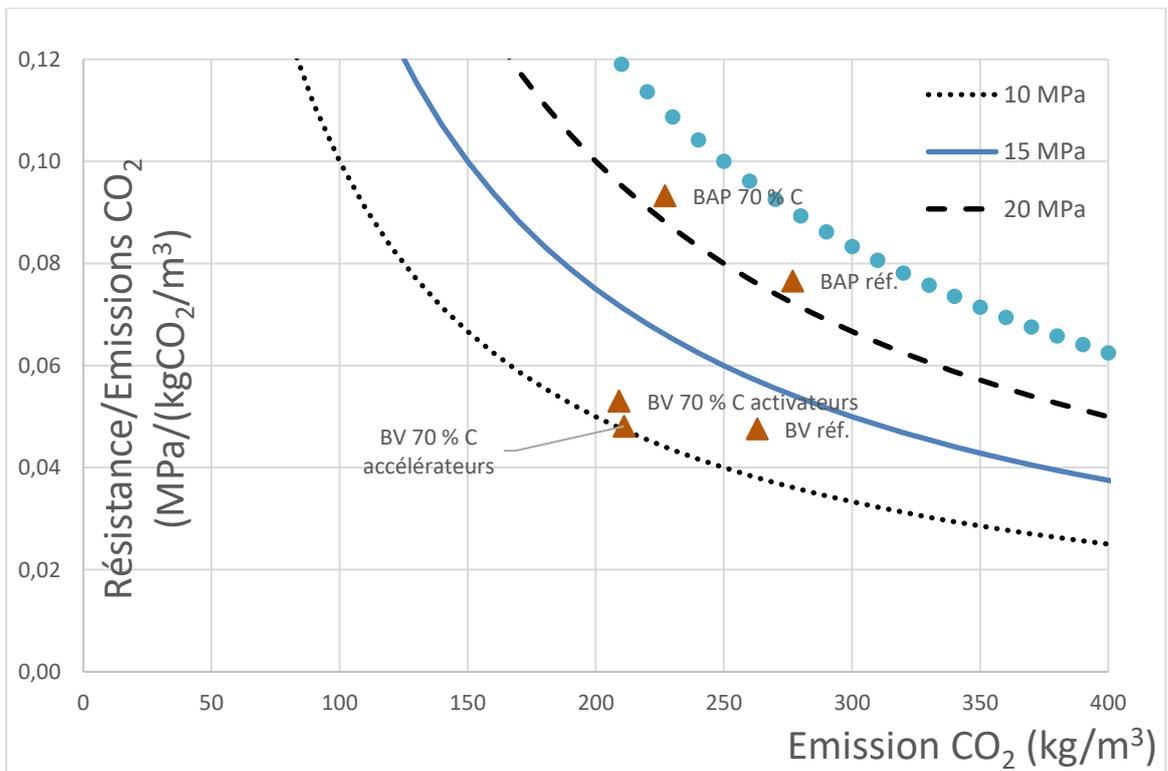


Figure 38 - Rapport entre la résistance moyenne à la compression au démoulage et les émissions de CO₂ en fonction des émissions de CO₂

Pour les bétons autoplaçants, un même niveau de résistance est atteint pour une diminution de l'empreinte carbone de 18 %.

Pour les bétons vibrés, la réduction des émissions de CO₂ est de 20 %, mais avec une diminution de la résistance mécanique. Celle-ci pourrait être compensée par une réduction de la quantité d'eau en optimisant l'adjuvantation.

2.8. Conclusion

Les travaux ont porté sur l'utilisation de liants décarbonés composés de clinker, de laitier et d'addition calcaire, activés chimiquement et parfois thermiquement. Ces liants ont été utilisés pour la fabrication :

- de blocs de maçonnerie ;
- de pavés drainants ;
- de murs de soutènement en béton armé traités thermiquement ;
- d'escalier.

Il a été montré pour tous les produits qu'il était possible de produire des bétons répondant aux exigences techniques avec une réduction des émissions de CO₂ de 20 % jusqu'à 60 %.

La réduction du rapport E_{eff}/L est un levier d'action de premier ordre pour ajuster les performances des bétons. La maîtrise de la teneur en eau, l'optimisation de l'adjuvantation et le traitement thermique apparaissent déterminants pour utiliser pleinement le potentiel des liants décarbonés en usine.

Bibliographie

- [1] **Jacquemot, François**
Accélération du durcissement des liants à base de laitier de haut fourneau pour les produits en béton.
Épernon, Cerib, 2015
- [2] **Petitpain, Marjorie**
Béton à faible impact environnemental pour l'Industrie du Béton : accélération du durcissement de bétons à base de liants ternaires.
Épernon, Cerib, 2018
- [3] **Ministère de la transition écologique**
Construction et performance environnementale du bâtiment.
[En ligne] 28 septembre 2020. <https://www.ecologie.gouv.fr/construction-et-performance-environnementale-du-batiment>
- [4] RE2020 Concevoir les logements avec des solutions en béton
Solutions béton, 2021.
- [5] **Ministère de la transition écologique**
Réglementation environnementale RE2020.
[En ligne] 27 novembre 2020. <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-environnementale-re2020>
- [6] Nouvelles réglementation environnementale des bâtiments : quels objectifs ?
Solutions béton. 2017, Vol. 1.
- [7] Fiche de déclaration environnementale et sanitaire, Blocs en béton, Pose à joints minces.
Rapport 565.E, mai 2023
- [8] Fiche de déclaration environnementale et sanitaire, MCI – Murs à coffrage intégré (sans béton de remplissage).
Rapport 436.E_v2, novembre 2020
- [9] **Jacquemot François**
Béton bas carbone
Focus sur les nouveaux liants, Rapport 428.E, mars 2020
- [10] **Le Thierry S., Jacquemot F., Musikas N., Frouin L., Achard D.**
Étude de l'influence d'un laitier activé sur les performances des blocs de maçonnerie en béton.
PBI Préfa Béton International – mars 2018
- [11] **Vickers, T; Moukwa, M**
Evaluation of test methods and environmental conditions to promote efflorescence formation under laboratory conditions.
1995
- [12] Fiche de déclaration environnementale et sanitaire, Blocs en béton, Pose à joints épais.
Rapport 564.E, mai 2023

- [13] **Tremblay, Marie-Hélène.**
Écaillage des bétons contenant des ajouts cimentaires.
Université Laval, Québec, 2009
- [14] **Çopuroglu. O**
Frost Salt Scaling of Cement-Based Materials with a High Slag Content, Technische
Universiteit.
Delft, 2006
- [15] **Saric-Coric M. and Aïtcin P.C.**
Influence of curing conditions on shrinkage of blended cements containing various
amounts of slag.
ACI Materials Journal 100, pp 477-484
- [16] **Darquennes A.**
Comportement au jeune âge de bétons formulés à base de ciment au laitier de haut
fourneau en condition de déformations libre et restreinte.
Thèse de doctorat, 2009
- [17] **Lura P.**
Autogenous deformation and internal curing.
Thèse de doctorat, 2003
- [18] **Yuan J., Lindquist W., Darwin D., and Browning J.**
Effect of Slag Cement on Drying Shrinkage of Concrete.
ACI Materials Journal 112, pp 267-276, 2015

Index des figures

Figure 1 – Part des produits de construction et équipements (PCE) et du béton sur l'indicateur Eges global du bâtiment – Étude menée sur deux bâtiments de logements collectifs R + 4 et R + 7[4]	7
Figure 2 – Indicateur de changement climatique : maçonnerie de blocs en béton, pose à joints minces [5]	8
Figure 3 – indicateur de changement climatique : MCI sans remplissage [7]	8
Figure 4 – Évaluation technico-environnemental des solutions étudiées (levier matériau = nature du liant ; levier chimique = activation chimique ; levier process = traitement thermique [10]	10
Figure 5 – Résistances en compression et étalements à la table à chocs des mortiers.....	12
Figure 6 – Résistances en flexion des mortiers.....	13
Figure 7 – Vibro-compactage d'une éprouvette	15
Figure 8 – Démoulage d'une éprouvette	15
Figure 9 – Évolution de la résistance moyenne en compression des cubes 100 x 100 mm entre 1 et 14 jours.....	16
Figure 10 – Presse vibrante du Cerib.....	17
Figure 11 – Blocs creux à 6 alvéoles	17
Figure 12 – Évolution de la résistance en compression des blocs conservés à 5 °C entre 2 et 14 jours	19
Figure 13 - Influence des conditions de conservation sur la résistance en compression à 7 jours des blocs.....	19
Figure 14 – Essai de capillarité	20
Figure 15 - Rapport entre la résistance moyenne à 7 jours (cure A) et les émissions de CO ₂ en fonction des émissions de CO ₂	22
Figure 17 – Comparaison des valeurs d'indice de réchauffement climatique entre les références des FDES et la formule B4 [5][6]	23
Figure 19 – Pavé drainant bicouche fabriqué en usine	23
Figure 20 – Production des pavés en usine	23
Figure 21 – Évolution de la teinte des pavés en fonction de la quantité de ciment	25
Figure 22 – Pavés de la série M70P70 à l'issue des essais de gel	26
Figure 23 – Pavés de la série M35P35 à l'issue des essais de gel	27
Figure 24 – Comparaison du coût des formulations.....	27
Figure 25 – Rapport entre la résistance moyenne au fendage à 14 jours et les émissions de CO ₂ en fonction des émissions de CO ₂ , exprimées relativement au pavé de référence 100 % ciment	28
Figure 27 – Traitement thermique utilisé en laboratoire (température de consigne de l'étuve)	31
Figure 28 – Résistance en compression des bétons	32
Figure 29 – Résistance en traction par fendage des bétons.....	32
Figure 30 – Résultats des essais de retrait sur prismes	33
Figure 31 – Coulage des murs en usine	36
Figure 32 – Photographies des murs coulés avec les bétons décarbonés – Phénomènes de ressuyages observés sur le mur fabriqué avec le liant CEM I + S	38
Figure 33 – Comparaison du coût des formulations.....	38
Figure 34 - Rapport entre la résistance moyenne à la compression au démoulage et les émissions de CO ₂ en fonction des émissions de CO ₂ (bétons fabriqués en laboratoire)	40
Figure 35 - Rapport entre la résistance moyenne à la compression à 28 jours et les émissions de CO ₂ en fonction des émissions de CO ₂	40
Figure 38 – Comparaison du coût estimé des formulations avec celui des bétons de référence	43
Figure 39 - Rapport entre la résistance moyenne à la compression au démoulage et les émissions de CO ₂ en fonction des émissions de CO ₂	43

Index des tableaux

Tableau 1 – Description de deux liants ternaires étudiés en comparaison avec un liant de référence 100 % CEM I [7]	9
Tableau 2 – Compositions testées au cours de l'étude préliminaire sur mortier	12
Tableau 3 - Composition des bétons et résultats des essais de compression	16
Tableau 4 - Composition des bétons et résultats de l'étude sur blocs	18
Tableau 5 - Composition théorique du liant des compositions étudiées	21
Tableau 6 - Photographies des éprouvettes avant et après essai.....	21
Tableau 7 – Composition des liants	24
Tableau 8 – Résultats des essais.....	25
Tableau 9 – Résistance au fendage des pavés à 14 jours.....	26
Tableau 10 – Spécifications normatives pour la classe XA3 en milieu acide	29
Tableau 11 – Détail des formulations fabriquées en laboratoire	30
Tableau 12 – Résistance à la compression des bétons	31
Tableau 13 – Résistance au fendage des bétons.....	31
Tableau 14 – Masse volumique, porosité et absorption d'eau des bétons.....	33
Tableau 15 – Indice de fissuration mesuré sur les différents bétons	35
Tableau 16 – Compositions réelles des bétons fabriqués en usine et résultats des essais mécaniques	37
Tableau 17 – Spécifications normatives pour la classe XF1 suivant la norme NF EN 206/CN	41
Tableau 18 – Compositions réelles des bétons et caractérisations	42

RAPPORT

ÉTUDES ET RECHERCHES

DÉVELOPPEMENT
DURABLE
BÉTONS VERTS

SUZANNE LE THIERRY



/ Cerib - CS 10010
28233 Épernon cedex

/ 02 37 18 48 00
cerib@cerib.com

BÉTONS À FAIBLE IMPACT ENVIRONNEMENTAL – ÉTUDES APPLICATIVES

Les travaux ont porté sur l'utilisation de liants décarbonés composés de clinker, de laitier et d'addition calcaire, activés chimiquement et parfois thermiquement. Ces liants ont été utilisés pour la fabrication :

- de blocs de maçonnerie ;
- de pavés drainants ;
- de murs de soutènement en béton armé traités thermiquement ;
- d'escalier.

Il a été montré pour tous les produits qu'il était possible de produire des bétons répondant aux exigences techniques avec une réduction des émissions de CO₂ de 20 % jusqu'à 60 %.

La réduction du rapport E_{eff}/L est un levier d'action de premier ordre pour ajuster les performances des bétons. La maîtrise de la teneur en eau, l'optimisation de l'adjuvantation et le traitement thermique apparaissent déterminants pour utiliser pleinement le potentiel des liants décarbonés en usine.

LOW-CARBON CONCRETES - APPLICATION STUDIES

This study focused on the used of low-carbon binders composed of clinker, slag and limestone addition with chemical activation and in some cases thermal activation. These binders were used for the production of:

- Masonry blocks
- Draining pavers
- Reinforced concrete retaining walls with heat treatment
- Stairs

For all the concrete elements the results show that it is possible to produce concretes that meet the technical requirements with CO₂ emissions reduced by 20% to 60%.

Reduction of the water to binder ratio is a first-rate way to adapt concrete performances. Controlling water content, optimizing the use of admixtures and heat treatment appear to be decisive factors in making full use of the potential of decarbonated binders in the precast concrete industry.