

N° D'ORDRE : 42569

IMT LILLE DOUAI



UNIVERSITE DE LILLE



THÈSE

présentée en vue
d'obtenir le grade de

DOCTEUR

en
Sciences pour l'ingénieur

Spécialité : Génie civil

par

Marjorie PETITPAIN

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE
DÉLIVRÉ PAR MINES DOUAI

Titre de la thèse :

**BÉTONS À FAIBLE IMPACT ENVIRONNEMENTAL POUR L'INDUSTRIE DU BÉTON :
ACCÉLÉRATION DU DURCISSEMENT DE BÉTONS À BASE DE LIANTS TERNAIRES**

Soutenue le 11 décembre 2017 devant le jury d'examen :

Président	Pr. Eric GARCIA DIAZ – École des Mines d'Alès
Rapporteur	Dr. HdR Adélaïde FERAILLE, École des Ponts Paris Tech
Rapporteur	Pr. Martin CYR – Université Paul Sabatier Toulouse III
Membre	Pr. Guillaume HABERT – ETH Zürich
Membre	Dr. François JACQUEMOT – CERIB
Directeur de thèse	Denis DAMIDOT – IMT Lille Douai
Invité	Patrick PELTIER – Stradal

Laboratoire d'accueil : EA 4515 - LGCgE – Laboratoire de Génie Civil et
géoEnvironnement, Département Génie Civil & Environnemental de IMT Lille Douai

École Doctorale SMRE 104 (Lille I, Artois, ULCO, UVHC, Centrale Lille, IMT Lille Douai)

BÉTONS À FAIBLE IMPACT ENVIRONNEMENTAL POUR L'INDUSTRIE DU BÉTON : ACCÉLÉRATION DU DURCISSEMENT DE BÉTONS À BASE DE LIANTS TERNAIRES

Résumé

Le contexte actuel du réchauffement climatique et de ses effets génère une prise de conscience croissante de nos sociétés. L'enjeu environnemental est d'actualité, les émissions de CO₂ étant directement prises en compte dans le label E⁺C⁻ intégré dans le projet de nouvelle réglementation s'appliquant aux bâtiments. Ces travaux de thèse s'inscrivent dans le programme d'actions de l'Industrie du Béton en recherchant des solutions innovantes toujours moins impactantes tout en garantissant des performances techniques et économiques au moins équivalentes à celles des bétons traditionnels à base de ciment Portland pour un gain environnemental significativement plus important.

Pour répondre à cet enjeu, l'étude de liants ternaires constitués de ciment Portland CEM I 52,5, laitier de haut fourneau et addition calcaire a été réalisée en optimisant les moyens disponibles en préfabrication : emploi d'un traitement thermique, optimisation de la compacité du mélange et utilisation d'adjuvants (activation chimique).

Les solutions développées en couplant la formulation du liant ternaire et le type de traitement thermique, permettent d'obtenir un bilan économique-environnemental largement meilleur que celui d'un béton témoin composé uniquement de ciment Portland CEM I.

En associant l'activation chimique et l'activation thermique, les performances au démoulage obtenues par des mortiers contenant moins de 55 % de clinker sont améliorées et permettent d'atteindre dans certaines conditions des performances en compression proches de celles du témoin, tandis que celles en flexion sont supérieures. En effet, en présence de sulfate de sodium et de chlorure de sodium à hauteur de 0,5 % de Na₂O_{eq} et soumis à un traitement thermique de palier 80 °C, l'utilisation du liant à base de 40 % de clinker, 45 % de laitier de haut fourneau et 15 % de calcaire permet l'obtention d'une résistance en compression proche de 50 MPa au bout de 6 h 30. Cette solution, non unique, permet donc de répondre aux exigences du cahier des charges défini en collaboration avec les industriels de la préfabrication.

Mots clés

Ciment, laitier de haut fourneau, calcaire, traitement thermique, béton, activateurs chimiques

Abstract

With a production of more than 6 billion m³ per year in the world, concrete is the second used material after water. In France, its production represents around 100 billion tons per year whose around 25 million tons for precast concrete. To optimize the production, the precast industry mostly uses Portland cement. The advantages of CEM I cements are well known, especially their fast hardening effect and resistance to carbonation.

New eco-environmental binders are now used in concrete industry where a significant part of clinker is substituted by one addition (binary binders) or a mix of additions (ternary or quaternary binders) like blast furnace slag, limestone filler or fly ash. Generally, their long term mechanical performances are equivalent to a Portland cement concrete but are limited at short time, increasing the age for concrete demoulding and causing a decrease of precast production.

The purpose of the study is to investigate relevant solutions for these low clinker binders in order to increase mechanical performances and to obtain the same than a Portland cement, without generating too many changes in the precast process. In order to obtain equivalent performances at demoulding age, combinations of chemical and thermal activations are studied, using several chemical activators and different thermal treatments conditions.

Key Words

Cement, Ground-granulated blast furnace slag, Limestone, Heat treatment, Concrete, Chemical activators

Remerciements

Tout au long de cette période de thèse, j'ai eu l'occasion de rencontrer un grand nombre de personnes qui m'ont appris, conseillé, encouragé et même motivé lors de la dernière ligne droite qu'est la rédaction.

Dans un souci d'oubli de certaines de ces personnes, je ne mentionnerai pas de noms et dirai juste qu'elles se reconnaîtront !

Je tiens néanmoins à remercier par leur nom les personnes qui m'ont prêtées main forte pendant ces trois (en réalité quatre) années. Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de thèse Monsieur Denis Damidot. Merci à Florent, Claire, Gauthier, Pauline, Lucie et Josette. Merci également à mes collègues Patrick, François, Philippe, Guillaume, Laurence, Suzanne, Céline, Florian, BLO et Johnatan de m'avoir supporté (pas toujours facile...). Merci aux gens qu'on oublie souvent car dans l'ombre : Chantal, Maryvonne.

Pour finir, merci à ma famille, ma famille chevaline et à mes amis. Promis, je ne recommencerai pas !

Je dédicace ce manuscrit à la personne qui, à l'époque, m'a encouragée à me lancer dans cette voie. Une personne qui n'aura malheureusement pas la chance de devoir prendre du temps pour lire ce manuscrit.

Bonne lecture à tous.

Sommaire

Introduction Générale	11
1. Changement climatique et industrie	11
2. Quelques rappels historiques de la préfabrication en France	13
3. Contexte de l'étude	14
4. Objectifs industriels et scientifiques de l'étude	15
5. Articulation des différentes parties du manuscrit de thèse.....	15
CHAPITRE I : Cahier des charges, matériaux et méthodes	17
1. Cahier des charges.....	17
2. Méthodes et matériaux.....	18
2.1. Protocoles de fabrication	18
2.2. Réponses mesurées.....	18
2.3. Choix des constituants.....	20
2.4. Caractérisation additionnelle des constituants.....	24
CHAPITRE II : Mortiers de référence	27
1. Témoin CEM I 52,5 R de Port-la-Nouvelle	27
2. Autres témoins	29
3. Vérification de la reproductibilité	30
CHAPITRE III : Optimisation de la proportion des constituants du liant ternaire à température ambiante.....	33
1. Définition du plan d'expériences.....	33
2. Propriétés des liants ternaires du plan expérimental	37
3. Discussion	42
3.1. Impact de la composition du liant ternaire sur les propriétés techniques	42
3.2. Détermination des coefficients de contribution	44
3.3. Impact de la composition du liant ternaire sur les critères économiques et environnementaux	49
4. Conclusion partielle	54
CHAPITRE IV : Activation chimique des liants ternaires sélectionnés à température ambiante....	57
1. Choix des accélérateurs.....	57

2.	Propriétés des liants ternaires activés chimiquement	58
2.1.	Influence du chlorure de calcium	59
2.2.	Influence des sels de sodium.....	61
3.	Discussion	68
3.1.	Résultats obtenus	68
3.2.	Impact de la composition du liant ternaire sur les propriétés économiques et environnementales.....	71
4.	Conclusion partielle	76
CHAPITRE V : Optimisation de la compacité à température ambiante		77
1.	Étude de certaines méthodes d'optimisation de la compacité.....	77
1.1.	Optimisation de la porosité de liants binaires ou ternaires	77
1.2.	Optimisation de la quantité d'eau en présence de superplastifiant	78
1.3.	Optimisation de la finesse des additions.....	79
2.	Propriétés des liants ternaires optimisés	80
2.1.	Couplage superplastifiant et rapport E_{eff}/L	80
2.2.	Influence de la finesse des additions.....	83
3.	Discussion et conclusion partielle	85
CHAPITRE VI : Activation thermique des liants ternaires en association avec certains leviers décrits précédemment.....		87
1.	Généralités sur le traitement thermique	87
1.1.	Quel est l'intérêt de la température pour la prise et le durcissement du béton ?	87
1.2.	Définition d'un traitement thermique	88
1.3.	Comment est apportée la chaleur ?	89
2.	Propriétés des mortiers soumis à un traitement thermique	90
2.1.	Essais préliminaires de détermination des « apports de chaleur »	90
2.2.	Approfondissement de l'apport du traitement thermique.....	96
3.	Couplage de la température avec les autres leviers	114
4.	Utilisation de traitements thermiques de type industriel.....	117
5.	Discussion	120
5.1.	Résultats obtenus	120
5.2.	Impact de la composition du liant ternaire sur les propriétés économiques et environnementales.....	123
6.	Conclusion Partielle	134

CHAPITRE VII : Transposition des optimisations obtenues sur les mélanges ternaires au ciment CEM III.....	139
1. Similarités entre ciments au laitier de haut fourneau et liants contenant du laitier de haut fourneau	139
2. Performances obtenues sur les mortiers à base de CEM III.....	140
2.1. Traitements thermiques utilisés.....	140
2.2. Performances mécaniques obtenues.....	140
3. Discussion	145
3.1. Résultats obtenus	145
3.2. Impact de la composition sur les propriétés économiques et environnementales....	147
4. Conclusion partielle	153
CHAPITRE VIII : Passage au béton à l'échelle pré-industrielle	155
1. Essais en usine	155
1.1. Conditions d'essais	155
1.2. Essais préliminaires	156
1.3. Essais en usine	157
2. Évaluation environnementale, économique et normative	159
2.1. Analyse du cycle de vie des systèmes étudiés	160
2.2. Évaluation économique des systèmes étudiés.....	162
2.3. Contexte normatif associé aux solutions développées	163
Conclusion générale.....	165
Perspectives	171
Références bibliographiques	173
Annexes	177

Introduction Générale

1. Changement climatique et industrie

Après la révolution industrielle du XIX^e siècle, durant laquelle on pensait que le progrès technique allait permettre d'assurer une croissance illimitée, la population mondiale a commencé à prendre conscience des effets négatifs que pouvait avoir l'industrialisation sur les milieux naturels, la faune, la flore et les milieux aquatiques [Bihouix, 2010]. Depuis, les gouvernements cherchent à développer leurs industries tout en limitant ces impacts négatifs et en particulier les émissions de gaz à effet de serre.

À partir des années 1970, des études ont été mises en place et des conférences organisées, avec pour objectifs de limiter les impacts engendrés, de préserver les écosystèmes et de réduire les impacts environnementaux comme les émissions de gaz à effet de serre. Ces objectifs de développement durable sont maintenant abordés en incluant simultanément leurs aspects économiques, sociaux et environnementaux. En décembre 2015, la France a accueilli et présidé la Conférence des Parties de la Convention-Cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques (COP 21). Cette conférence avait pour but d'engager pour la première fois tous les pays, dont les plus grands émetteurs de gaz à effet de serre – pays développés et pays en voie de développement – dans un accord universel sur le climat afin de maintenir le réchauffement mondial en deçà de 2 °C. Cet accord doit entrer en vigueur en 2020 et les discussions ont été poursuivies lors de la COP 22 en novembre 2016. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire d'enclencher réellement et de façon pérenne la transition vers des modèles de développement moins émetteurs de gaz à effet de serre (entre autres) que les modèles actuels, notamment par l'utilisation d'énergies renouvelables et la diminution de l'extraction de matières fossiles, ainsi que par le lancement d'actions préventives et le développement de nouvelles filières.

Il est intéressant de noter la découverte de Svante Arrhenius, faite à la fin du XIX^e siècle. En proposant le premier modèle d'effet de serre de jardin pour la Terre, il pensait que le réchauffement de la planète serait d'environ 4 à 5 °C pour un doublement de la proportion de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère. D'après lui, « Cela pourrait se produire dans 3 000 ans » [Weissenberger, 2015]. Il s'avère que les dernières prédictions du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) confirment cette tendance. En prenant comme hypothèse la continuité de l'utilisation des ressources actuellement consommées (pétrole, gaz, charbon), le GIEC fait des projections de doublement du CO₂ dans 100 ans.

L'Industrie du Béton et plus généralement le domaine de la construction, est également concernée par la problématique de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le ciment, matériau constitutif du béton, génère d'importantes quantités de CO₂ lors de sa production (766 kg par tonne de ciment Portland [source : ATILH]), notamment lors de la production du clinker, ce dernier impliquant la décarbonatation du calcaire et une cuisson dans un four à une température voisine de 1 450 °C. En 2016, l'industrie cimentière mondiale émettait à elle seule 5 % de l'ensemble des gaz à effet de serre planétaires rejetés [Reporterre, 2016]. Lors de la COP 21, Madame Ségolène Royal, ministre de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, avait formulé une « stratégie bas carbone » qui devrait permettre à la France de diviser par quatre son empreinte CO₂ d'ici à 2050. Pour y parvenir, un prix du carbone dont le cours augmenterait chaque année, a été instauré : il était de 14,50 € par tonne [€/t] en 2015, passant à 22 €/t en 2016, atteignant les 30,50 €/t en 2017.

Il est ainsi prévu que cette même tonne de gaz carbonique coûtera 56 € en 2020 et 100 € en 2030 [Le prix du carbone, 2016]. Les enjeux environnementaux et économiques sont donc particulièrement importants pour l'ensemble de la filière.

Les solutions mises en œuvre par les cimentiers sont, d'une part, d'augmenter l'utilisation de combustibles alternatifs (valorisation énergétique de déchets) et, d'autre part, de développer l'utilisation de ciments à plus faible teneur en clinker. Ces ciments sont issus d'un co-broyage ou mélange entre le clinker et un ou plusieurs constituant(s) principal(aux) (laitier de haut fourneau, cendres volantes de centrale thermique, calcaire...). Il s'agit des ciments CEM II, du ciment de laitier de haut fourneau CEM III, du ciment pouzzolanique CEM IV et du ciment composé CEM V, tous ces ciments générant moins de gaz à effet de serre qu'un ciment Portland CEM I (tableau 1).

Par ailleurs, un nouveau ciment (ciment CEM VI) à base de clinker, laitier de haut fourneau et calcaire devrait bientôt arriver sur le marché. D'autres ciments bas carbone peuvent également exister tel que le ciment sursulfaté contenant plus de 75 % de laitier et dont l'empreinte CO₂, lors de sa fabrication, seraient de l'ordre de 100 kg/T [Dehaut, 2009], [Le Brun, 2015].

Tableau 1 : Réchauffement climatique entraîné par les ciments CEM I, CEM II et CEM III [source : ATILH]

	CEM I	CEM II /A-L	CEM II/A-S	CEM III/A
Réchauffement climatique mesuré à travers les émissions de gaz à effet de serre [kgeqCO ₂ /T]	765,5	676,7	681,9	400,7

Note : Ces valeurs ne prennent pas en compte les émissions liées aux combustibles « déchets ». En les intégrant, le gap est d'environ 100 kgeqCO₂/T.

Toutefois, dans le domaine de la préfabrication, l'utilisation de ces ciments à plus faible teneur en clinker reste encore limitée du fait de l'augmentation de la durée d'obtention des performances nécessaires au démoulage pour la manipulation et la manutention des pièces en béton.

Il s'avère en parallèle que l'utilisation directe dans le béton d'additions minérales, de type I et de type II (respectivement additions inertes et additions réactives au sens de la norme NF EN 206/CN) également utilisées dans les ciments, est de plus en plus courante. Elles sont intégrées dans le liant équivalent (liants binaires, ternaires...), défini dans la norme NF EN 206/CN et sont introduites directement dans le malaxeur.

La réduction des impacts environnementaux est aujourd'hui incontournable et doit passer par des solutions constructives innovantes, à la fois utilisatrices de matériaux à faible émission et dont les procédés de production restent peu énergivores. Le développement de bétons à base de liant constitué d'autres matières premières que le clinker, telles que du laitier de haut fourneau, du calcaire, des cendres volantes..., associées à un procédé de production optimisé, devraient permettre de répondre à ces objectifs tout en garantissant les performances à court et à long terme, dont une bonne durabilité. Ce travail de thèse sur les bétons à faible impact environnemental pour l'Industrie du béton s'inscrit donc dans cette démarche.

2. Quelques rappels historiques de la préfabrication en France

À partir des années 1950, le secteur de la préfabrication a pris en France de l'importance dans la construction, grâce à divers facteurs sociaux, économiques et techniques. La réalisation de produits en béton en usine à l'aide de procédés industriels a été un facteur de premier ordre pour la construction de l'époque, tant dans le bâtiment que le génie civil [Balency, 1964].

Dès 1956, des études ont permis d'établir des éléments de comparaison entre des constructions, pourtant différentes, en les ramenant à un même modèle. Ceci a conduit à établir des règles de plus en plus précises, remplaçant peu à peu l'imprécision des anciens cahiers des charges en matière de qualité. Grâce aux possibilités ouvertes par le travail en usine, la préfabrication apportait, à prix égal, des prestations généralement supérieures à celles obtenues avec les techniques traditionnelles.

Il existe deux catégories de préfabrication : sur chantier (figures 1 et 2) ou en usine (figures 3 et 4). La préfabrication sur chantier s'appuyait sur des installations réduites, à savoir un poste de bétonnage, des coffrages en bois ou en tôle avec parfois une installation d'étuvage sous bâches, accompagnés par des engins de levage (grues et éventuellement portiques roulants pour la manutention). Cette formule a été adoptée au départ par la plupart des entreprises qui se sont lancées dans la préfabrication.

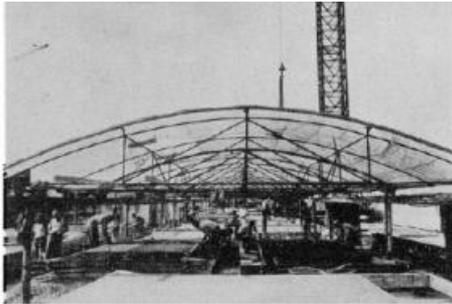


Figure 1 : Préfabrication foraine, desservie par grue [Balency, 1964]



Figure 2 : Préfabrication foraine desservie par portique et grue [Balency, 1964]

À cette époque, la préfabrication en usine a été plus volontiers adoptée par deux catégories de professionnels : les entreprises de construction et les fabricants de matériaux.



Figure 3 : Usine de préfabrication à Aulnoy (1962)

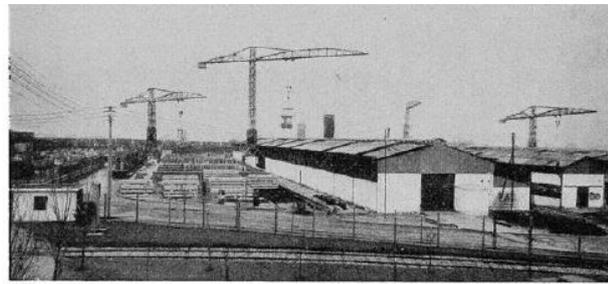


Figure 4 : Usine de préfabrication à Villeneuve le Roi avec des toits ouvrants et desservie par des grues (1957)

Actuellement, l'Industrie du Béton réunit environ 600 entreprises et plus de 800 sites de production, tissant un maillage territorial très dense, qui assure partout en France une proximité de livraison sur les chantiers, une proximité des matières premières et ainsi une économie de transport et d'énergie (une carte de la répartition des différents sites de production est présentée en annexe 1).

En 2016, l'Industrie du Béton représente un chiffre d'affaires de 2,5 milliards d'euros et un volume de 21 millions de tonnes de produits en béton, donnant un emploi à près de 20 000 personnes (la répartition des produits par chiffre d'affaire est donnée en annexe 1) [données de la FIB].

3. Contexte de l'étude

Ce travail de thèse s'inscrit dans le programme d'actions de l'Industrie du Béton qui innove sur plusieurs axes : systèmes constructifs, process industriels, recours aux nouvelles technologies (puces RFID, NFC...), utilisation de bétons à plus faible impact environnemental. Il fait suite aux travaux de François Jacquemot qui visaient à accélérer le durcissement de liants obtenus par le mélange de ciment portland et de laitier de haut fourneau [Jacquemot, 2014]. Ses expérimentations ont montré la possibilité d'obtenir, par une double activation chimique et thermique, des performances intéressantes et prometteuses avec un liant composé de 50 % de ciment Portland et de 50 % de laitier.

La présente recherche repose sur la synergie potentielle entre les laitiers de haut fourneau et les additions calcaires. L'addition calcaire va impacter positivement à la fois la rhéologie du béton mais aussi les réactions d'hydratation notamment par l'apport de sites de nucléation supplémentaires pour les hydrates générés par les réactions d'hydratation. De plus, son prix de vente ainsi que son empreinte carbone, sont nettement inférieurs à ceux du ciment Portland. Quant au laitier, il apporte un gain au niveau des résistances mécaniques à moyen et long terme et améliore généralement la durabilité des bétons placés dans des environnements agressifs. Cette amélioration est due à l'obtention d'une microstructure ayant une distribution porale plus fine induite par les réactions hydrauliques qui modifient la distribution minéralogique de la pâte de ciment.

Les travaux réalisés s'intéressent également à la synergie potentielle entre les additions de laitier de haut fourneau et de calcaire, en présence d'un traitement thermique, piste intéressante dans le contexte spécifique de l'industrie de la préfabrication.

Les solutions bas carbone développées dans ces travaux répondront à la future réglementation énergétique et environnementale qui fait suite à la réglementation thermique (RT 2012). Cette future réglementation prévoit notamment la création de nouvelles exigences de performances en termes d'impact carbone du bâtiment par rapport à la RT 2012. Ainsi, pour les différents types de bâtiment, deux indicateurs (E_{GES} sur toute la durée de vie du bâtiment et $E_{GES\ PCE}$ sur les Produits de Construction et d'Équipement) et deux niveaux (carbone 1 et carbone 2) sont créés (tableau 2) pour une durée de vie de 50 ans (période de référence).

Tableau 2 : Seuils carbone probables du projet de future réglementation « E+ C »

Bilan max [KgeqCO ₂ /m ² _{SDP}]	Maisons Individuelles	Collectif	Bureau	Autres bâtiments RT
Carbone 1 – E_{GES}	≈ 1 350,0	≈ 1 550,0	≈ 1 500,0	≈ 1 625,0
Carbone 1 – $E_{GES\ PCE}$	≈ 700,0	≈ 800,0	≈ 1 050,0	≈ 1 050,0
Carbone 2 – E_{GES}	≈ 800,0	≈ 1 000,0	≈ 980,0	≈ 850,0
Carbone 2 – $E_{GES\ PCE}$	≈ 650,0	≈ 750,0	≈ 900,0	≈ 750,0

« SDP » : Surface de plancher, « RT » : Réglementation thermique ; « E_{GES} » : émissions de gaz à effet de serre sur toute la durée de vie du bâtiment ; « $E_{GES\ PCE}$ » : émissions de gaz à effet de serre sur les Produits de Construction et d'Équipement.

4. Objectifs industriels et scientifiques de l'étude

L'objectif principal de ce travail de thèse est d'obtenir pour l'Industrie du Béton des formulations basées sur un liant ternaire, ciment Portland associé à du laitier de haut fourneau et à des fines calcaires, qui permettraient de réduire l'empreinte environnementale tout en étant compatible avec les process industriels. Les performances recherchées à court terme doivent répondre au cahier des charges des produits préfabriqués ciblés, qui sont les bétons à démoulage différé pour des produits armés et précontraints et dont les résistances en compression sont respectivement 15 MPa au démoulage et 35 MPa au moment du relâchement des torons de précontrainte, sur des cubes de dimensions 15 x 15 x 15 cm³.

Ces performances sont associées à un objectif global d'optimisation du trio performances/coûts/impacts environnementaux. Notre travail a donc été orienté vers une optimisation des procédés actuellement utilisés, étant attendu que l'utilisation future des solutions proposées sera plus facile si les procédés actuels (composition, malaxage, cure) sont peu modifiés et si peu de surcoûts sont engendrés. Cette optimisation repose sur les proportions des constituants traditionnels normalisés du liant utilisé (ciment et additions), les accélérateurs chimiques, la compacité du mélange et sur le procédé, sans faire le choix de recourir à de nouveaux liants non normalisés et encore peu présents sur le marché français comme les ciments sulfo-alumineux par exemple.

Pour répondre à cet objectif industriel, la démarche scientifique a été orientée premièrement sur l'étude de l'effet du calcaire sous forme d'addition dans un liant à base ciment portland et de laitier de haut fourneau en repartant des travaux de Jacquemot [Jacquemot, 2014]. Ceci a conduit à l'identification des moyens adaptés pour accélérer les liants développés afin d'atteindre les performances recherchées, tout en évaluant la synergie entre les différents leviers (matières premières, compacité, activation chimique et activation thermique). L'étude a été réalisée sur des mortiers confectionnés à partir de liants à base de ciment Portland CEM I, laitier de haut fourneau et fines calcaires, mais aussi de liants à base de ciments CEM III. Des essais sur béton ont été réalisés sur site industriel. La démarche expérimentale a permis de préciser les propriétés d'usage recherchées. *In fine*, une analyse a été menée afin de regrouper les différentes informations relatives au trio performances/coûts/impacts environnementaux. Cette base de données permettra aux industriels de choisir les solutions les plus pertinentes en fonction de leurs applications et de leurs procédés industriels.

5. Articulation des différentes parties du manuscrit de thèse

Les parties successives du manuscrit permettent d'explorer de façon progressive l'effet des différents leviers d'optimisation (composition du liant, activation chimique et activation thermique, compacité) sachant que ces derniers ont généralement un couplage complexe.

Le premier chapitre décrit le cahier des charges du béton visé dans le domaine de la préfabrication et détaille les méthodes et les matériaux qui ont été utilisés.

Le chapitre II porte sur l'étude des propriétés d'usage des mortiers qui ont servi de référence.

Le chapitre III traite de l'optimisation de la proportion des constituants dans les liants ternaires (ciment Portland CEM I, laitier de haut fourneau et addition calcaire) par rapport aux performances techniques, économiques et environnementales du mortier de référence formulé avec le ciment Portland CEM I 52,5 R. À l'issue de cette première partie expérimentale, trois compositions ont été sélectionnées pour la suite du travail.

Le chapitre IV concerne l'amélioration des performances techniques des liants ternaires sélectionnés en utilisant l'activation chimique, tandis que le chapitre V rapporte l'effet de l'optimisation de la compacité du mortier et de la réactivité par une augmentation de la surface spécifique des constituants.

Le chapitre VI explore l'activation thermique de certains liants ternaires avec différents cycles thermiques représentatifs de ceux utilisés en préfabrication. Le couplage de l'activation thermique avec les optimisations développées dans les chapitres IV et V a également été étudié.

Sur la base des résultats précédents, le chapitre VII présente la transposition des optimisations testées à des ciments industriels composés CEM III/A.

Enfin le chapitre VIII porte sur l'application de ces résultats sur béton avec une évaluation des différentes solutions développées d'un point de vue technique, économique, environnemental et normatif.

La figure 5 indique les références et les leviers utilisés pour optimiser les liants ternaires pour chacun des chapitres.

Chapitre III	Mortier de référence CEM I	versus	Mortier Ternaire CEM I + Laitier + Calcaire	T° ambiante sans activateurs chimiques
Chapitre IV	Mortier de référence CEM I	versus	Mortier Ternaire CEM I + Laitier + Calcaire	T° ambiante avec activateurs chimiques
Chapitre V	Mortier de référence CEM I	versus	Mortier Ternaire CEM I + Laitier + Calcaire	T° ambiante ; compacité ; finesse
Chapitre VI	Mortier de référence CEM I	versus	Mortier Ternaire CEM I + Laitier + Calcaire	Cycle de T° ; activateurs chimiques
Chapitre VII	Mortier de référence CEM I	versus	CEM III CEM III + Calcaire	Cycle de T° ; activateurs chimiques
Chapitre VIII	Béton de référence CEM I	versus	Béton Ternaire CEM I + Laitier + Calcaire	Cycle de T° ; activateurs chimiques

Figure 5 : Références et leviers utilisés pour optimiser les liants ternaires pour chacun des chapitres

CHAPITRE I : Cahier des charges, matériaux et méthodes

1. Cahier des charges

Afin de placer les solutions développées sur le marché très compétitif des matériaux de construction, nous avons établi le cahier des charges suivant basé sur les critères associés aux objectifs de notre travail :

- **Performances à l'état frais** : recherche d'une ouvrabilité permettant une bonne mise en place et un maintien de la rhéologie suffisant pour un usage en usine de préfabrication ;
- **Performances mécaniques** : recherche de résistances en flexion et en compression se rapprochant de celles de la référence au démoulage (obtention de performances en compression minimum de 20 MPa – produits en béton armé – et 40 MPa – produits en béton précontraint – au démoulage respectivement à 8 heures et 10 heures), de valeurs suffisantes à 28 jours et d'un maintien dans la durée ;
- **Procédé** : utilisation des procédés de fabrication actuels ;
- **Coûts** : recherche d'une diminution voire d'une équivalence avec la référence (matières premières constitutives du béton dont activateurs chimiques avec prise en compte de la taxe carbone associée, traitement thermique) ;
- **Impacts environnementaux** : recherche d'une diminution significative des impacts par rapport à la référence (base ACV : émissions CO₂, impacts sur l'eau, l'air...). Un débat important sur les impacts environnementaux des solutions constructives a lieu actuellement en mettant en compétition le béton face aux autres matériaux ;
- **Durabilité** : recherche d'une bonne résistance à la corrosion des armatures induite par carbonatation ou pénétration d'ions chlorures, stabilité dimensionnelle.

Pour répondre à ce cahier des charges, plusieurs pistes de travail ont été explorées visant à optimiser les méthodes industrielles actuelles (formalisation de la problématique dans le tableau 3).

Tableau 3 : Formalisation de la problématique

Objectif	Optimisation de la composition du béton et du traitement thermique afin d'obtenir des performances équivalentes à un béton constitué d'un liant 100 % ciment Portland (CEM I)
Réponses	Maniabilité, ouvrabilité, mise en place Performances mécaniques au jeune âge Durabilité du matériau Coût de production Impact environnemental
Facteurs	Nature et quantité (% massique) des constituants fins (ciments, additions) Adjuvant (nature et quantité) Dosage en eau (exprimé en « Eau/Liant total ») Nature et quantité (% massique) des activateurs chimiques Procédé industriel (fabrication, cure) Traitement thermique (durée, température, hygrométrie)

Les références suivantes ont été utilisées :

- mortier confectionné avec un ciment CEM I 52,5 R (activé ou non thermiquement) qui représente la référence actuelle ;
- mortiers confectionnés avec du CEM III/A pour tenter de mettre en évidence l'effet de l'addition manquante vis-à-vis du liant ternaire.

2. Méthodes et matériaux

2.1. Protocole de fabrication

Les expérimentations ont principalement été faites sur mortiers en se basant sur la norme NF EN 196-1 [NF EN 196-1]. En fonction des quantités de mortier produites, directement dépendantes des essais de caractérisation, les malaxeurs à rotation planétaire avaient une capacité soit de 10 litres, soit de 20 litres (protocole utilisé présenté en annexe 2). Le respect de ce protocole, utilisé pour l'ensemble des fabrications, a permis de limiter la variabilité des paramètres qui n'étaient pas volontairement modifiés.

La quantité d'eau introduite dans les mortiers est exprimée à partir du rapport massique « $E_{\text{efficace}}/L_{\text{total}}$ » où :

- E_{efficace} = eau totale – eau absorbée par les granulats.

Le sable normalisé absorbant très peu d'eau, l'eau efficace est considérée comme l'eau totale.

- L_{total} = somme des constituants participants au liant.

La masse de liant total est constante et correspond à la somme du ciment, du laitier et de l'addition calcaire.

Par la suite, le terme « $E_{\text{efficace}}/L_{\text{total}}$ » est dénommé « E_{eff}/L ».

2.2. Réponses mesurées

2.2.1. Essais normalisés

Les caractéristiques mesurées à l'état frais et durci sur les mortiers sont les suivantes (voir annexe 3) :

- mesure de masse volumique à l'état frais et de l'air occlus selon la norme NF EN 1015-7 « Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 7 : Détermination de la teneur en air du mortier frais » et mesure de l'étalement à 5 minutes et 40 minutes (pour le maintien de rhéologie) selon la norme NF EN 1015-3 « Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 3 : Détermination de la consistance du mortier frais (à la table à secousses) » ;
- masse volumique à l'état durci, résistances mécaniques à différentes échéances (minimum au démoulage et à 28 jours) principalement sur des éprouvettes de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ selon la norme NF EN 196-1 « Méthodes d'essais des ciments — Partie 1 : Détermination des résistances » ; les résultats peuvent être exprimés en indice d'activité en compression ou flexion (expression donnée en annexe 3).

2.2.2. Définition des critères économiques et environnementaux

Tout au long du travail, les solutions les plus pertinentes ont été sélectionnées en prenant en compte les critères techniques, économiques et environnementaux (mesurés uniquement sur les émissions de CO₂ : « CO_{2eq} » exprimées en kg équivalents de CO₂ [kgeqCO₂]). Le coût ainsi que le changement climatique induit par les mortiers sont calculés par rapport à un mètre cube de mortier ou exprimés en relatif par rapport à la référence.

Le ratio « résistances mécaniques à diverses échéances/Coûts*CO_{2eq} » (noté de façon abrégée « RC² ») a été défini pour les résistances mécaniques en compression (« RC²c ») ou en flexion (« RC²t ») au démoulage et à 28 jours, échéances déterminantes pour les produits préfabriqués en béton (armés et précontraints). Les formules suivantes ont été utilisées pour calculer RC² :

- cas des résistances mécaniques en compression :

$$RC^2c_i = Rc_i / [Coûts \times CO_{2eq}] \quad \text{Équation 1}$$

- cas des résistances mécaniques en flexion :

$$RC^2t_i = Rt_i / [Coûts \times CO_{2eq}] \quad \text{Équation 2}$$

Avec Rc_i les résultats de résistance mécanique en compression au démoulage ou à 28 j [MPa] ;
 Rt_i les résultats de résistance mécanique en flexion au démoulage [MPa].

En parallèle, une évaluation du rendement d'un kilogramme de CO₂, pouvant être émis soit par la matière première (production, transformation...) soit par le procédé (traitement thermique), a été réalisée. Trois représentations du rendement du CO₂ vis-à-vis des propriétés mesurées ont été faites dans le but d'observer ce paramètre pour les deux types de produits préfabriqués (béton armé et béton précontraint) :

- le ratio « résistance mécanique en compression au démoulage/changement climatique des mortiers associés » en fonction de la valeur de changement climatique de chaque mortier ;
- le ratio « résistance mécanique en flexion au démoulage/changement climatique des mortiers associés » en fonction de la valeur de changement climatique de chaque mortier ;
- le ratio « résistance mécanique en compression à 28 jours/changement climatique des mortiers associés en fonction de la valeur de changement climatique de chaque mortier.

2.2.3. Utilisation de la notion d'âge équivalent

Dans le chapitre traitant de l'activation par voie thermique, les représentations des propriétés mécaniques des résistances en flexion et compression sont effectuées en fonction de l'âge équivalent. L'analyse des résultats est ainsi plus aisée notamment lorsque des comparaisons sont réalisées pour différents traitements thermiques. Lorsque la température interne d'un béton est différente de 20 °C, l'âge équivalent t_r est égal à la durée $t_x - t_0$ avec :

- t_0 le moment du contact des matières solides avec l'eau lors du malaxage ;
- t_x le temps théorique permettant d'obtenir un même niveau de maturation du béton dans le cas d'une conservation continue de ce béton à une température interne de référence égale à 20 °C.

Cette notion est généralement utilisée pour prédire la résistance en compression car d'un point de vue global, le niveau de maturation peut être associé au degré d'avancement des réactions d'hydratation. Les réactions d'hydratation des constituants principaux du ciment sont thermo-activées et exothermiques. La chaleur dégagée accélère en retour la dissolution et l'hydratation des constituants anhydres restant du ciment.

L'équation suivante permet d'approximer l'âge équivalent à partir de la loi d'Arrhenius :

$$t_T = \int_{t_{initial}}^{t_{final}} e^{\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T(t)} \right)} \cdot dt \quad \text{Équation 3}$$

Ou

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot e^{\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_i} \right)} \quad \text{Équation 4}$$

avec

- t_T l'âge équivalent du béton (corrigé en fonction de la température) ;
- Δt_i l'intervalle de temps pendant lequel le béton a une température égale à T_i ;
- T_i la température du béton pendant un intervalle de temps Δt_i [K] ;
- E_a l'énergie d'activation [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$] ;
- R la constante des gaz parfaits ($8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

La détermination de l'âge équivalent nécessite de connaître l'énergie d'activation des liants ternaires étudiés à base de clinker, laitier et calcaire. Cette énergie est plus faible en présence de laitier et continue à diminuer avec l'augmentation de sa proportion.

Dans la suite du travail, des hypothèses seront prises vis-à-vis du ratio « E_a/R » à partir d'une valeur de 4 000 K pour le témoin à base de 100 % de ciment Portland CEM I. Cette valeur est issue de la norme NF EN 1992-1-1 pour les bétons traités thermiquement [NF EN 1992-1-1].

2.3. Choix des constituants

Le choix des constituants a été opéré selon les critères suivants :

- **critères techniques** : réactivité au sein du matériau béton, variabilité, nature minéralogique et chimique, finesse ;
- **critères économiques** : prix, disponibilité sur le territoire, distance entre fournisseur et utilisateur ;
- **critères environnementaux** : fabrication, transport.

Le choix des matières premières constitutives du liant s'est arrêté sur des ciments provenant de plusieurs cimenteries et sur deux additions, le laitier de haut fourneau et le calcaire, en accord avec la profession. Le ciment, l'addition calcaire et le laitier de haut fourneau ont des propriétés propres et ont des synergies entre elles, accélérant et/ou améliorant certaines propriétés (rhéologie, performances mécaniques, durabilité) ([Scrivener, 2011], [Scrivener, 2015], [Khalifa, 2012], [Richardson, 2004]).

De plus, l'addition calcaire et le laitier de haut fourneau sont économiquement accessibles et disponibles en quantité sur le territoire français (facilité d'utilisation des solutions développées par l'ensemble de la profession).

2.3.1. *Ciment Portland*

Afin de limiter la variabilité d'un type de ciment à un autre et de conserver les mêmes clinkers, deux cimenteries productrices de plusieurs ciments, régulièrement utilisés par la profession et possédant des minéralogies différentes, ont été sélectionnées :

- la cimenterie de Port-la-Nouvelle de Lafarge productrice d'un clinker utilisé pour la fabrication d'un CEM I 52,5 R, d'un CEM II/A-LL 42,5 R et d'un CEM V (S-V) 42,5 N (cimenterie de Sète utilisatrice du même clinker) ;
- la cimenterie de Couvrot de Calcia productrice d'un clinker utilisé pour la fabrication d'un CEM I 52,5 R, d'un CEM II/A-LL 42,5 R et d'un CEM II/A-S 52,5 N (cimenterie de Rombas utilisatrice du même clinker).

Les ciments testés lors de cette thèse sont les CEM I 52,5 R provenant des deux cimenteries.

De façon complémentaire, deux ciments produits par la cimenterie de Grand Couronne (Eqiom) ont été utilisés afin de tester les solutions d'activation mises au point :

- CEM III/A 42,5 N-LH CE PM-ES-CP1 NF ;
- CEM III/A 42,5 N CE CP1 NF.

2.3.2. *Les additions*

Les additions introduites dans le liant ont une influence sur le comportement du béton à l'état frais et durci. Selon la norme « Béton » [NF EN 206/CN], les additions sont définies comme étant des matériaux minéraux finement divisés utilisés dans le béton afin d'améliorer certaines de ses propriétés, ou pour lui conférer des propriétés particulières, et peuvent être intégrées dans le liant. Deux principaux effets sont associés à la présence d'additions minérales :

- une action sur la rhéologie et la compacité à l'état frais, pouvant influencer le développement et l'intensité du deuxième effet ;
- un effet physico-chimique et microstructural généré par les phénomènes d'interactions entre les particules de l'addition, la capacité de certaines additions à réagir en milieu cimentaire (additions pouzzolaniques et/ou hydrauliques) et d'agir sur le volume et la nature des produits d'hydratation formés, l'évolution des mécanismes d'hydratation du ciment et les modifications microstructurales de la matrice cimentaire.

2.3.2.1. *Laitiers de haut fourneau*

Ce sont des sous-produits de l'industrie sidérurgique lors de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Les laitiers sont formés de constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke. Sa masse volumique apparente en vrac varie entre 800 kg/m³ (non tassé) et 1 200 kg/m³ (tassé), la masse volumique absolue du laitier de haut fourneau étant de l'ordre de 2 900 kg/m³.

Leur composition chimique et leur structure vitreuse obtenue par trempe à l'eau leur confèrent des propriétés hydrauliques latentes. La composition chimique est similaire à celle du ciment Portland mais les teneurs en éléments diffèrent. En effet, les laitiers contiennent plus de silice (SiO₂), d'alumine (Al₂O₃) et de magnésie (MgO) mais moins de chaux (CaO) [Chen, 2006].

Le diagramme de Keil (figure 6), diagramme triangulaire représentant le système ternaire chaux-silice-alumine, permet de situer le laitier de haut-fourneau par rapport à d'autres liants. Ce diagramme montre que les laitiers sont situés dans une partie moins riche en chaux (CaO) que le clinker de ciment Portland, indiquant qu'ils doivent être activés.

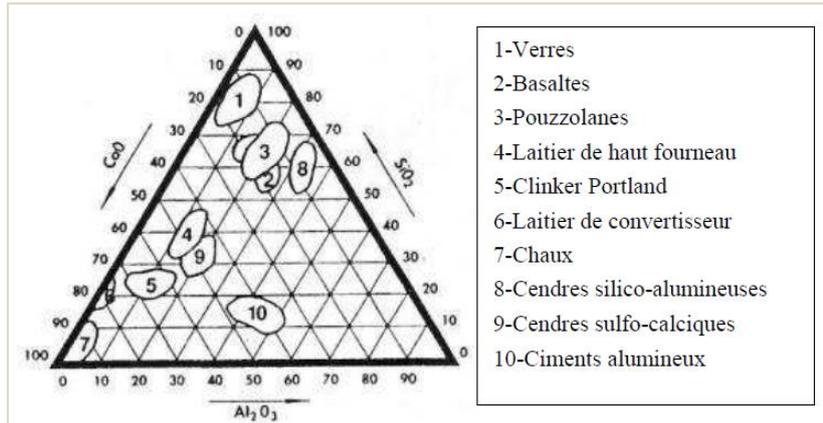


Figure 6 : Diagramme de Keil (système CaO – SiO₂ – Al₂O₃) [Houze, 2013]

Selon la norme [NF EN 15167-1], les caractéristiques exigibles d'un laitier vitrifié moulu sont physiques (surface spécifique, temps de prise et indice d'activité d'un mélange 50 % laitier + 50 % ciment) et chimiques (teneurs en magnésie, sulfure, sulfate, chlorure, perte au feu, rapport $(CaO + MgO)/(SiO_2)$, teneur en eau).

Dans le but d'augmenter la réactivité d'un laitier, associée à son degré de vitrification, plusieurs leviers peuvent être actionnés :

- l'élévation de température lors de la granulation ;
- l'augmentation du module d'hydraulicité (ratio CaO/SiO_2 ou ratio $(CaO + Al_2O_3 + MgO)/SiO_2$) ;
- l'augmentation de la finesse ; le broyage plus poussé du laitier vitrifié (granulé ou bouleté) confère au laitier moulu une surface spécifique plus élevée qui peut ainsi être similaire ou supérieure à celle du ciment (finesse Blaine comprise entre 2 250 et 5 000 cm^2/g) ;
- une activation alcaline.

La production de laitier de haut fourneau moulu en France a avoisiné 700 000 tonnes en 2015. Ces laitiers, sous forme vitrifiée, sont principalement utilisés en tant que deuxième constituant principal associés au clinker lors de la fabrication des ciments CEM II S et CEM III. Leur deuxième utilisation est faite en tant qu'addition hydraulique introduite dans le liant lors de la fabrication du béton et comptée dans le liant équivalent.

Les principaux intérêts de l'ajout de laitier vitrifié moulu sont :

- l'amélioration de la résistance des bétons aux attaques chimiques (comme par exemple les produits agricoles...) [Dieryck, 2004] ;
- la réduction des risques de réaction sulfatique interne [Recommandations pour la RSI, 2017] ;
- l'éclaircissement de la teinte des bétons et une meilleure stabilité de celle-ci ;
- l'amélioration de la maniabilité du béton frais [Jacquemot, 2014] ;
- la réduction de l'impact environnemental. Le laitier étant un sous-produit de la fabrication de la fonte, les émissions de CO_2 liées à leur procédé d'élaboration proviennent de la phase de séchage et de broyage, soit 20 $kgeqCO_2/T$ (source : Cerib). Ce sujet est régulièrement discuté ;
- possiblement la réduction des coûts de liant (fonction de la zone de chalandise).

Son principal inconvénient est sa lenteur d'hydratation en conditions standards (20 °C sans activation chimique) et hivernales.

Le laitier de haut fourneau moulu que nous avons sélectionné est produit à Fos-sur-Mer par Ecocem et répond aux critères de la norme NF EN 15167-1 (anciennement NF P 18-512-1) [NF EN 15167-1]. Un laitier plus fin, également fourni par Ecocem, a également été testé pour évaluer l'influence de la finesse ; surface Blaine de 5 100 cm²/g au lieu de 4 500 cm²/g pour le laitier standard.

2.3.2.2. Additions calcaires

Les additions calcaires utilisées dans les bétons sont des fines de carbonate de calcium naturel provenant de l'exploitation des roches (craie, marbre, travertin...). Du point de vue minéralogique, les carbonates de calcium sont regroupés en trois familles cristallographiques : la calcite (polymorphe stable en conditions ambiantes), l'aragonite (polymorphe stable à haute température et haute pression) et la vaterite (polymorphe instable qui se solubilise assez facilement pour généralement recristalliser en calcite).

Le procédé de production du carbonate de l'addition calcaire se déroule en trois phases :

- extraction et concassage de la roche ;
- séparation des classes granulaires par tamisage ;
- éventuellement, une phase de traitement permettant d'éliminer les minéraux indésirables contenus en tant qu'impuretés dans la roche (argile par exemple).

De par leur influence sur la rhéologie [Bentz, 2016], les additions calcaires sont couramment utilisées dans la formulation des bétons et, en particulier, pour les bétons autoplaçants [Bello, 2014]. Un des principaux paramètres des additions calcaires influençant la maniabilité des bétons est la finesse Blaine. Une finesse trop élevée ou insuffisante peut amener à augmenter le dosage en adjuvant pour atteindre la même maniabilité [Bentz, 2016]. Cette finesse a également un impact direct sur la compacité du béton. Une étude sur mortier, faisant varier finesse et taux de substitution de l'addition calcaire, a montré que les résistances mécaniques les plus élevées étaient obtenues avec des valeurs optimales de taux de substitution compris entre 5 et 15 % et une finesse comprise entre 4 000 g/cm² et 6 000 g/cm² [Dehaut, 2009]. L'empreinte carbone des carbonates de calcium peut être schématisée en utilisant la méthode de l'analyse du cycle de vie (figure 7) :

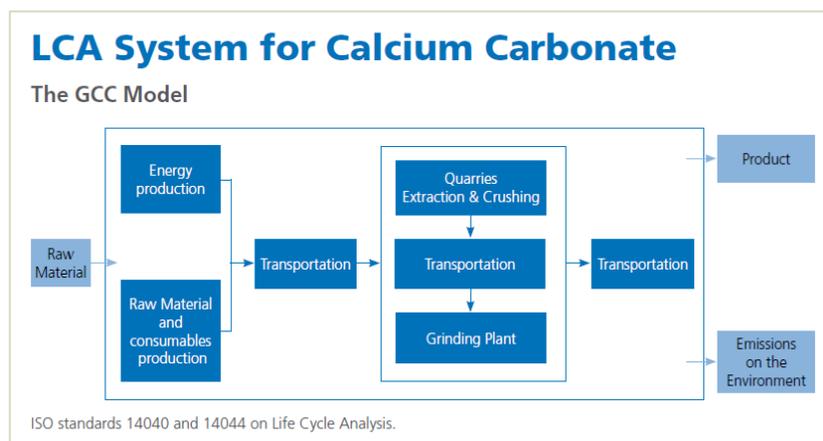


Figure 7 : Analyse du cycle de vie des carbonates de calcium – Émissions (source : Omya)

L'empreinte carbone correspondant aux additions calcaires naturelles obtenues par broyage a été évaluée à 75 kgeqCO₂ pour une tonne produite. L'addition calcaire sélectionnée dans notre étude est le Betocarb HP produite par Omya à Orgon, répondant à la norme NF P 18-508 [NF P 18-508].

Une addition beaucoup plus fine (Omyalite de chez Omya) ainsi qu'un filler plus grossier (Carbosable de chez Omya) ont également été testés pour évaluer l'impact de la finesse.

2.3.3. Adjuvant

L'expérience montre que le superplastifiant MasterGlenium ACE 456 de BASF (famille des polycarboxylates) possède un bon comportement, notamment pour des dosages assez faibles. Nous avons donc sélectionné ce superplastifiant, qui répond à la norme NF EN 934-2/IN1 [NF EN 934-2/IN1]. Ce type de superplastifiant permet une bonne homogénéité des microstructures générées grâce à une bonne dispersion en évitant la formation d'agglomérats entre les différentes particules de ciment et d'additions [Li, 2015].

2.3.4. Granulats

Les travaux sur mortiers ont été réalisés en incorporant du sable normalisé CEN certifié conforme à la norme NF EN 196-1. Le sable utilisé est commercialisé par la Société Nouvelle du Littoral et est réputé pour être très constant. Ce choix permet de ne pas prendre en compte la variabilité du squelette granulaire dans les interprétations.

2.3.5. Eau

L'eau de gâchage utilisée provient du réseau et est conforme à la norme NF EN 1008 [NF EN 1008].

2.4. Caractérisation additionnelle des constituants

2.4.1. Analyses minéralogiques des ciments

Dans le cadre de notre étude, certains ciments ont été analysés par diffractométrie à rayons X (DRX) en utilisant la méthode de Rietveld dans le but de reconstituer leur composition minéralogique de façon plus précise par rapport aux valeurs moyennées des fiches techniques (tableau 4).

Tableau 4 : Composition minéralogique des ciments étudiés

[% Massique]		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Constituants principaux		Autres	Secondaire
						Clinker	Laitier		
Lafarge – Port-la-Nouvelle									
CEM I 52,5 R	DRX Rietveld	68,4	12,0	11,4	2,9	94,7	/	0,4 % (CaSO ₄) + 0,4 % (CaSO ₄ .2H ₂ O)	4,5 % calcite
Calcia – Couvrot/Rombas									
CEM I 52,5 R	DRX Rietveld	67,6	12,8	11,5	4,1	96,0	/	1,6 % (CaSO ₄ .2H ₂ O)	2,4 % calcite
Eqiom – Grand Couronne									
CEM III/A 42,5 N	FTP	60,5	32,8*	7,4	9,8	56	43 %	1 %	/
CEM III/A 42,5 N-LH	FTP	60,5	32,8*	7,4	9,8	37	62 %	1 %	/

« **FTP** » : Fiche Technique Produit ; « **DRX** » : diffractométrie des rayons X ; « **n.c.** » : non communiqué.

* valeur calculée à partir de la formule de Bogue.

2.4.2. Analyses physiques des constituants du liant

Les ciments et les additions ont été analysés en termes de distribution granulométrique (analyse granulométrique par granulomètre laser) et de surface spécifique (analyse par adsorption d'azote en utilisant la théorie Brunauer, Emmett et Teller (BET) et mesure de la surface Blaine) (tableau 5).

Tableau 5 : Caractéristiques physiques des ciments et additions étudiés

	BET [m ² /g]	Blaine [m ² /g]	D ₁₀ [μm]	D ₅₀ [μm]	D ₉₀ [μm]	D ₁₀₀ [μm]
CEM I 52,5 R Port-la-Nouvelle	1,0	4,4	1,1	≈ 10,0	≈ 30,0	≈ 55,0
CEM I 52,5 R Couvrot	1,3	4,5	≈ 0,9	≈ 8,5	≈ 31,0	≈ 60,0
CEM II/A-S 52,5 N Rombas	1,3	5,2	≈ 0,9	≈ 8,0	≈ 30,0	≈ 60,0
CEM III/A 42,5 N	n.d.	4,9	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
CEM III/A 42,5 N-LH	n.d.	5,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Addition calcaire – Betocarb HP	0,83	n.d.	1,0	6,5	≈ 25,0	≈ 70,0
Filler calcaire – Carbosable VL	n.d.	0,3	≈ 5,0	≈ 15,0	≈ 100,0	≈ 500,0
Ultrafine – Omyalite FM	8	n.d.	< 0,3	1,0	≈ 2,0	≈ 3,0
Laitier de haut fourneau	1,0	4,5	1,1	≈ 10,0	≈ 30,0	≈ 55,0
Laitier de haut fourneau fin	n.d.	5,1	< 1	≈ 8,5	< 32,0	n.d.

« n.d. » : non déterminé.

CHAPITRE II : Mortiers de référence

1. Témoin CEM I 52,5 R de Port-la-Nouvelle

La plupart des essais servant de référence pour le CEM I ont été réalisés sur mortiers à base de CEM I 52,5 R de Port-la-Nouvelle (« CEM I 52,5 R PLN » ou « CEM I PLN »). Un premier travail sur ce ciment a permis de **définir le rapport $E_{\text{efficace}}/L_{\text{total}}$ (« E_{eff}/L »)** ainsi que la **quantité d'adjuvant** (% massique par rapport à la masse de liant total) conduisant à l'obtention d'un étalement de minimum 160 mm permettant une mise en place aisée par vibration. Pour rappel, l'eau totale est considérée comme étant égale à l'eau efficace « E_{eff} » (coefficient d'absorption du sable normalisé négligeable). Le liant total « L » se traduit par la quantité de ciment additionnée à la quantité d'additions (C + A). Notre étude s'est principalement focalisée sur les résistances à 24 heures (mortiers non traités thermiquement). La conservation des éprouvettes était effectuée dans un milieu à 20 °C, 100 % d'humidité relative (% HR) (tableau 6).

Tableau 6 : Récapitulatif des résultats d'essais pour les mortiers témoins 100 % CEM I 52,5 R PLN

E_{eff}/L – Adjuvant	0,5-0	0,45-0	0,45-0,25	0,4-0,25	0,4-0,35	0,4-0,45	0,4-0,55	0,35-0,3	0,35-1	
Composition des mortiers										
Ciment [g]	1 350,0									
Sable CEN 0/2 [g]	4 050,0									
E_{eff}/L	0,5	0,45	0,45	0,4	0,4	0,4	0,4	0,35	0,35	
Eau [g]	675,0	607,5	607,5	540,0	540,0	540,0	540,0	472,5	472,5	
SP (%/L)	0	0	0,25	0,25	0,35	0,45	0,55	0,3	1,0	
Adjuvant [g]	0	0	3,4	3,4	4,7	6,1	7,4	4,1	13,5	
Caractéristiques à l'état frais										
Étalement [mm]	5'	170,0	150,0	170,0	160,0	140,0	155,0	165,0	105,0	120,0
	45'	130,0	110,0	120,0	115,0	110,0	110,0	120,0	100,0	100,0
Ressuage [visuel]	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	
Caractéristiques à l'état durci										
Compression [MPa]	24 h	19,8	27,3	36,8	44,9	48,7	52,1	48,3	47,1	57,2
	7 j	58,7	63,4	71,8	70,9	n.d.	n.d.	n.d.	68,2	76,3
	28 j	69,1	70,8	84,0	80,9	n.d.	n.d.	n.d.	70,7	n.d.
Flexion [MPa]	24 h	4,3	4,8	7,2	6,4	7,3	7,3	7,1	7,4	7,1
	7 j	8,4	7,7	9,2	9,9	n.d.	n.d.	n.d.	9,9	9,8
	28 j	8,5	7,3	10,0	10,3	n.d.	n.d.	n.d.	9,4	n.d.

« PLN » : Port-la-Nouvelle ; « n.d. » : non déterminé, « MPa » : Méga Pascal.

L'étalement a été mesuré à 5 et 45 minutes. À 5 minutes, les quantités d'eau et d'adjuvant ont un effet séparé (augmentation avec la quantité d'adjuvant pour un E/L de 0,4 ; augmentation avec la quantité d'eau pour une quantité d'adjuvant de 0,25 %) ou couplé (« E/L = 0,45 et SP = 0,25 % » vs « E/L = 0,4 et SP = 0,35 % »). Un couple « extrême » adjuvant (1 %)/eau (E/L = 0,35) a été étudié afin d'évaluer l'intérêt de mettre beaucoup d'adjuvant. À l'état frais, le mortier possède un étalement faible mais se met en place aisément. En parallèle, la maniabilité des mortiers a été étudiée visuellement lors de la mise en moule : aucune difficulté n'a été identifiée.

Sans la présence de superplastifiant, les résistances mécaniques en compression à 24 heures augmentent (+ 38 %) avec la diminution du rapport E_{eff}/L de 0,05 points, avec des valeurs équivalentes à 28 jours (figure 8). L'ajout de superplastifiant à hauteur de 0,25 % massique par rapport au liant total permet d'augmenter les performances en compression à court (+ 35 %) et moyen terme (+ 19 %). Ces dernières sont encore améliorées en diminuant le rapport E_{eff}/L de 0,05 points (+ 22 % à 24 heures).

On note que l'effet du superplastifiant passe par un optimum pour la résistance mécanique à la compression à 24 heures lors de la série d'essais réalisée avec un rapport E_{eff}/L de 0,4. Il est en effet possible d'atteindre 52 MPa à 24 heures en présence de 0,45 % de superplastifiant. Cette quantité d'adjuvant semble donc correspondre à l'optimum pour le rapport E_{eff}/L de 0,4.

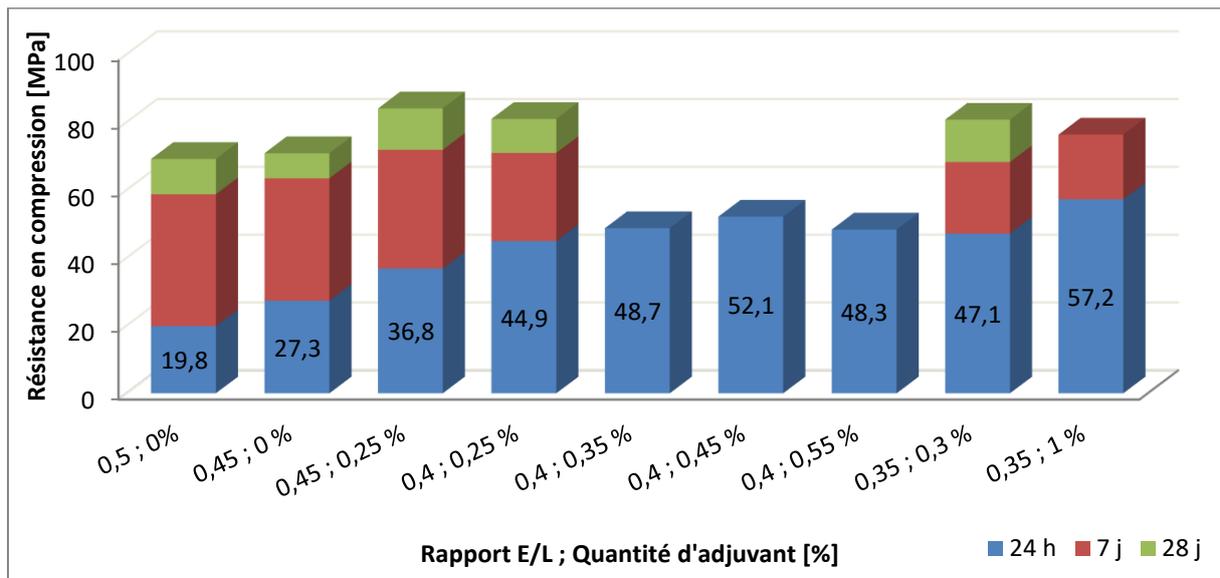


Figure 8 : Influence du rapport E/L et de la quantité d'adjuvant – Résistances en compression au cours du temps à température ambiante

À partir des résultats obtenus sur le témoin CEM I 52,5 R Port-la-Nouvelle, un compromis technico-économique a été considéré pour réaliser les essais sur les autres témoins avec un rapport E/L = 0,4 et une quantité d'adjuvant de 0,25 %. En effet, la quantité optimale d'adjuvant vis-à-vis de la résistance mécanique en compression à 24 heures, 0,45 %, n'a pas été utilisée, car elle impacte trop fortement le coût de la formulation. De plus, la quantité optimale d'adjuvant vis-à-vis de la résistance mécanique en compression à 24 heures varie d'un ciment à l'autre.

2. Autres témoins

Le tableau 7 présente les résultats obtenus pour les autres témoins réalisés sur des ciments industriels et la figure 9 résume les résultats de résistance mécanique en compression. Les résistances en compression des deux mortiers à base de ciment CEM I 52,5 R PLN, issus de deux lots différents de par leur date de prélèvement, sont similaires pour chaque échéance de mesure. Le ciment CEM I 52,5 R de Couvrot donne des résultats comparables à ceux obtenus avec le ciment CEM I 52,5 R PLN.

Ceci est en accord avec les minéralogies très similaires de ces deux ciments.

Tableau 7 : Résultats des mortiers témoins réalisés avec des ciments industriels à température ambiante

		CEM I PLN Lot 2	CEM I - C	CEM III/A - GC	CEM III/A-LH - GC
Proportions massiques [g]					
Ciment		1 350,0			
Sable CEN 0/2		4 050,0			
Eau ($E_{eff}/L = 0,4$)		540,0			
SP (0,25 %/L)		3,4			
Caractéristiques à l'état frais					
Étalement 5' [mm]		140,0	150,0	160,0	205,0
Air occlus [%]		2,5	5,9	6,0	2,6
Ressuage [visuel]		Non	Faible	Faible	Oui
Caractéristiques à l'état durci					
ρ [kg/m ³]		2 240,0	2 250,0	2 205,0	2 225,0
Résistance en compression [MPa]	1 j	44,7	44,0	19,7	15,8
	2 j	58,9	57,4	n.d.	n.d.
	7 j	67,6	65,9	n.d.	n.d.
	28 j	79,1	80,2	74,1	70,8
	90 j	86,1	87,3	n.d.	n.d.
Résistance en flexion [MPa]	1 j	5,9	7,0	3,7	3,5
	2 j	9,2	8,9	n.d.	n.d.
	7 j	10,2	10,6	n.d.	n.d.
	28 j	10,6	10,6	11,0	12,8
	90 j	10,8	10,5	n.d.	n.d.

« **PLN** » : Port-la-Nouvelle ; « **C** » : Couvrot ; « **GC** » : Grand Couronne ; « **n.d.** » : non déterminé ; « **MPa** » : Méga Pascals.

Les résistances mécaniques en compression des mortiers à base de ciment au laitier varient en fonction de la proportion de clinker. Au bout de 24 heures, elles sont inférieures à celles des mortiers Portland (respectivement - 57 % et - 60 % pour les CEM III/A et CEM III/A-LH de Grand Couronne). Leur résistance à 28 jours est également inférieure au témoin CEM I.

Ces résultats ne sont pas cohérents avec la littérature qui indique parfois que le CEM III/A peut dépasser la performance d'un CEM I dès 28 jours (figure 10 - [Bur, 2012]).

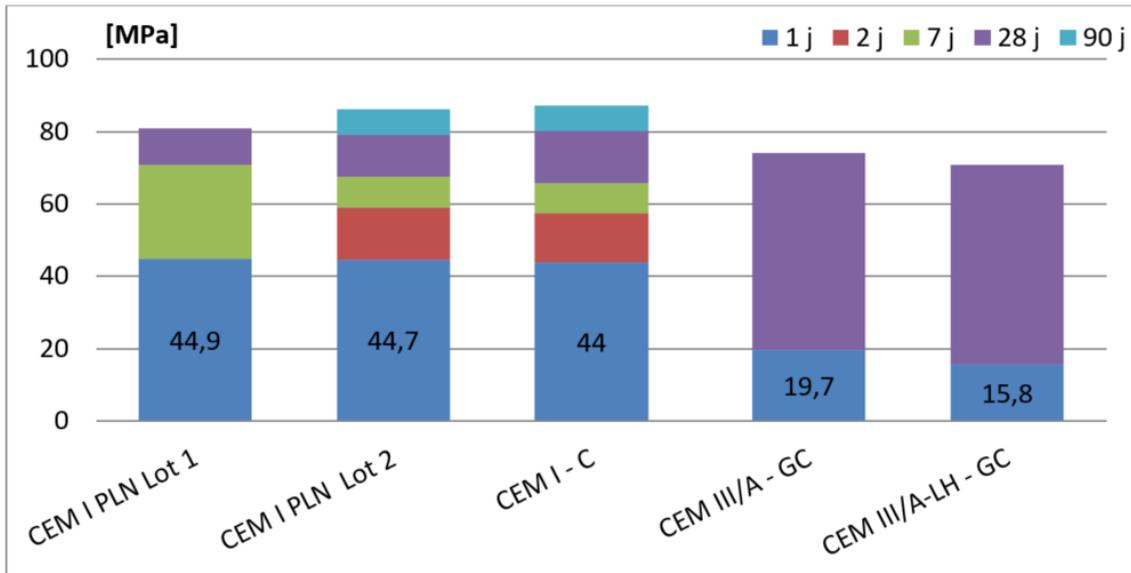


Figure 9 : Résistance en compression des différents mortiers témoins à base de 100 % ciment

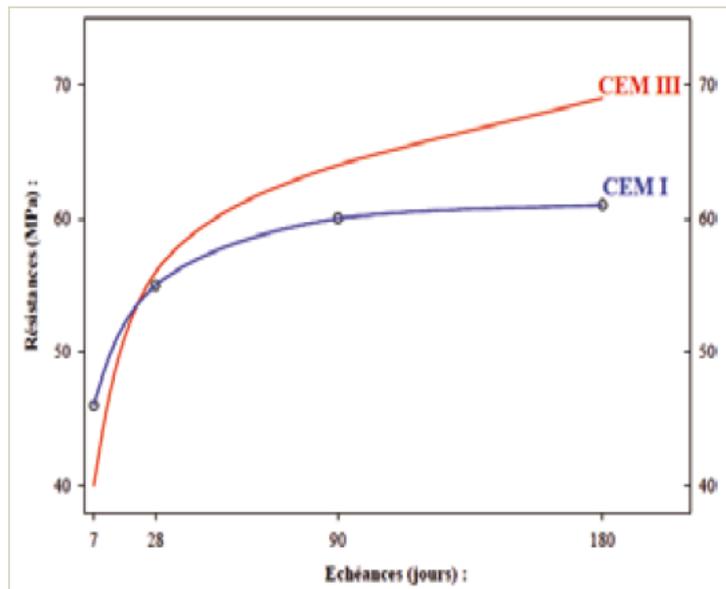


Figure 10 : Évolution des résistances à la compression des ciments CEM I et CEM III au cours de leur hydratation à température ambiante [Bur, 2012]

3. Vérification de la reproductibilité

Dans le but de vérifier la reproductibilité des manipulations réalisées, le témoin, composé de 100 % de ciment Portland CEM I 52,5 R provenant de Port-la-Nouvelle issu du lot 1, d'un rapport E/L de 0,4 et adjuvanté par 0,25 % de superplastifiant par rapport au liant, a été fabriqué à plusieurs reprises. Les mortiers produits ont été testés vis-à-vis de leur résistance en flexion et compression à 24 heures et 28 jours (tableau 8). D'une fabrication à l'autre, les résultats obtenus sont très proches et possèdent des écarts type faibles.

Ces résultats démontrent de la reproductibilité des essais et du protocole de fabrication au cours du temps.

Tableau 8 : Résultats des essais de reproductibilité sur mortiers 100 % ciment Portland

		CEM I PLN 1	CEM I PLN 2	CEM I PLN 3	CEM I PLN 4	Écart type
Proportions massiques [g]						
Ciment		1 350,0				
Sable CEN 0/2		4 050,0				
Eau ($E_{\text{eff}}/L = 0,4$)		540,0				
SP (0,25 %/L)		3,4				
Caractéristiques à l'état durci						
Résistance en compression [MPa]	1 j	44,5	44,2	45,1	44,9	0,40
	28 j	80,4	80,2	81,3	80,6	0,48
Résistance en flexion [MPa]	1 j	6,2	6,8	6,5	6,4	0,25
	28 j	10,8	10,5	10,3	10,7	0,22

« **PLN** » : Port-la-Nouvelle ; « **MPa** » : Méga Pascals.

Les différents résultats obtenus durant ces travaux de thèse sont donc estimés comme représentatifs.

CHAPITRE III : Optimisation de la proportion des constituants du liant ternaire à température ambiante

Après la sélection des constituants, la question suivante était de définir leur quantité respective au sein du liant. L'objectif de ce chapitre est donc de présenter notre démarche et nos résultats d'optimisation des proportions des constituants du liant ternaire à température ambiante, grâce à un plan d'expériences, tout en visant à minimiser la proportion massique du ciment. Cette démarche a pris en compte, en plus des performances techniques, une approche économique et environnementale. Les compositions ainsi définies serviront dans les chapitres suivants à mettre en œuvre d'autres leviers afin d'améliorer leurs performances pour atteindre les objectifs du cahier des charges.

1. Définition du plan d'expériences

Afin de limiter le nombre de fabrications, nous avons eu recours à la méthode des plans d'expériences et en particulier celle des plans de mélanges (logiciel de plans d'expériences Minitab). La méthode des plans de mélanges est utilisée lorsque la somme des proportions est toujours égale à 100 %, le facteur variable étant la quantité des constituants du liant (ciment, laitier de haut fourneau et addition calcaire). Ce type de plan nécessite de fixer des bornes inférieures et supérieures relatives à la composition du mélange.

Le choix des bornes s'est fait par rapport à des éléments bibliographiques et en particulier un modèle dans lequel la résistance mécanique en compression obtenue dépend du ratio volumique hydrates/porosité du béton :

$$f_c(t) = A \cdot x_{fc}^n \quad \text{Équation 5}$$

Où A la résistance intrinsèque du matériau : $A = A_{20} \times e^{-c \times (T-20)}$;
 x_{fc}^n le ratio gel/vide obtenu par l'expression suivante :

$$x_{fc} = \frac{v(T) \cdot (1/\rho) \cdot \alpha C_0 + v_{SG}(T) \cdot (1/\rho_{SG}) \cdot \alpha_{SG} P}{(1/\rho) \cdot \alpha C_0 + (1/\rho_{SG}) \cdot \alpha_{SG} P + W_0} \quad \text{Équation 6}$$

Avec $v(T), v_{SG}(T)$ volume des hydrates provenant du ciment et du laitier en fonction de la température ($v(T) = 2,22 \cdot e^{-28 \times 10^{-6} \times T^2}$ et $v_{SG}(T) = 2,52 \cdot e^{-28 \times 10^{-6} \times T^2}$),
 α, α_{SG} degrés hydratation du ciment et du laitier,
 ρ, ρ_{SG} masses volumiques du ciment et du laitier,
 C_0, P, W_0 masses du ciment, du laitier et de l'eau,
 T température de cure du béton.

CHAPITRE III : OPTIMISATION DE LA PROPORTION DES CONSTITUANTS DU LIANT TERNAIRE À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Dans les recherches de Zhang *et al.* [Zhang, 2016], le modèle est appliqué pour déterminer la quantité optimale de laitier de haut fourneau.

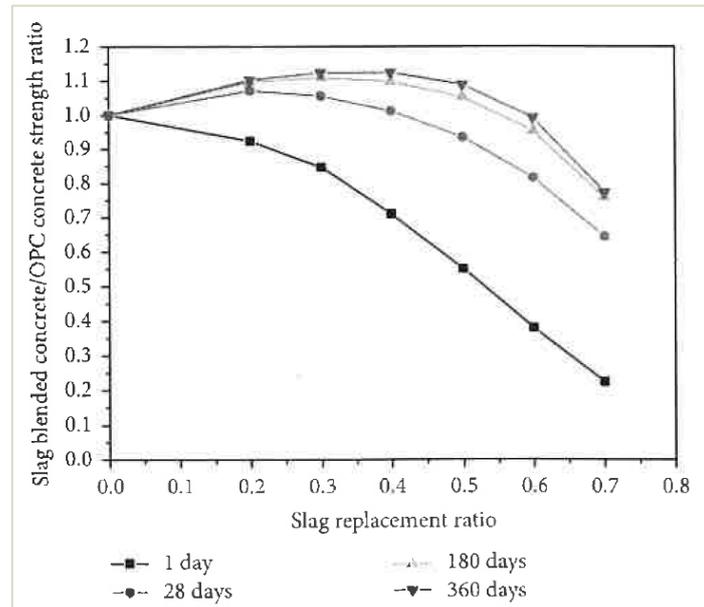


Figure 11 : Représentation du modèle « ratio volumique hydrates/porosité » pour le laitier de haut fourneau

À l'échéance de 24 heures, l'optimum du ratio est obtenu à 0 % de laitier. Par la suite, plus l'échéance est importante et plus la quantité de laitier nécessaire pour l'obtention du ratio optimum est importante. Le laitier peut ainsi être incorporé jusqu'à environ 45 % en substitution de ciment.

En réalisant le même travail sur l'addition calcaire, Bonavetti *et al.* a montré que le ratio volumique hydrates/porosité dépendait également de la quantité d'eau présente dans le béton [Bonavetti, 2003] (figures 12 et 13).

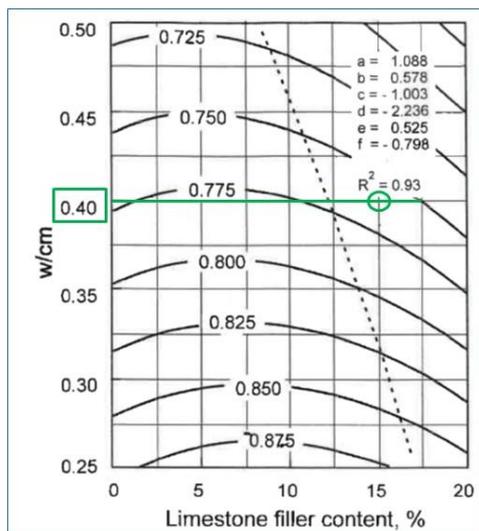


Figure 12 : Représentation du ratio volumique hydrates/porosité par rapport aux quantités d'eau et de filler dans le béton

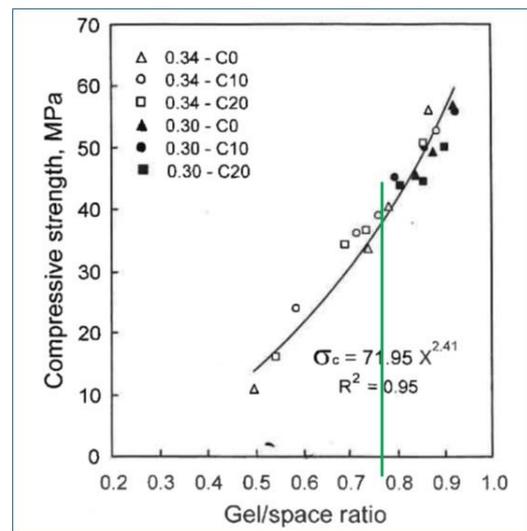


Figure 13 : Résistances mécaniques en compression obtenues en fonction des ratios volumiques hydrates/porosité

CHAPITRE III : OPTIMISATION DE LA PROPORTION DES CONSTITUANTS DU LIANT TERNAIRE À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Le ratio volumique hydrate/porosité augmente avec la diminution de la quantité d'eau (figure 12). Pour un même ratio volumique (iso-courbes, exemple de 0,775), l'augmentation de la quantité de calcaire nécessite dans un premier temps une légère augmentation de la quantité d'eau (jusque 5 % de calcaire). Dès lors que la quantité de calcaire est supérieure à 5 % (pour un ratio de 0,775), il est nécessaire de diminuer la quantité d'eau dépendamment avec l'augmentation du calcaire. Dans ces travaux, le ratio eau/ciment est de 0,4, permettant théoriquement l'obtention d'un ratio volumique hydrates/porosité proche de 0,775. Dès lors, la quantité maximale de calcaire est estimée à 15 %. Pour un tel ratio volumique et dans les conditions expérimentales utilisées, la résistance en compression semble avoisiner 40 MPa (figure 13).

Suite à ces éléments et en se basant sur la composition ciments composés CEM II, le tableau 9 présente les bornes définies et les valeurs des facteurs fixes sont résumées dans le tableau 10.

Tableau 9 : Bornes inférieures et supérieures du plan de mélanges

Variables	Borne inférieure	Borne supérieure
« Clinker + Autres »* (K+A)	50 %	88 % (CEM II/A-LL)
Calcaire (L)	12 % (CEM II/A-LL)	35 % (CEM II/B-L)
Laitier (S)	0 %	35 % (CEM II/B-S)

* La catégorie « clinker + autres » comprend d'une part les sulfates de calcium et d'autre part le calcaire (constituant secondaire). La proportion de ce dernier est prise en compte dans la formulation des mortiers.

Tableau 10 : Facteurs fixes liés au plan de mélanges

Facteurs	Valeurs associées
Nature des constituants secs	Ciment CEM I 52,5 R PLN, laitier moulu de haut fourneau, addition calcaire, sable normalisé
Nature de l'adjuvant	Superplastifiant MasterGlenium ACE 456 BASF
Quantité d'adjuvant	0,25 % en masse de liant total
Dosage en eau (E_{eff}/L)	0,40
Process de fabrication	Basé sur la norme NF EN 196-1, démoulage à 24 heures
Conditions de cure	Basées sur la norme NF EN 196-1 (20 °C ; en eau) [NF EN 196-1]

Le plan de mélanges nous a permis d'étudier expérimentalement seize liants ternaires.

En parallèle, un liant à plus faible teneur en clinker correspondant à la reconstitution d'un futur ciment CEM VI, soit 40 % de clinker, 45 % de laitier et haut fourneau et 15 % de calcaire (appelé liant « VI »), a également été étudié (tableau 11).

**CHAPITRE III : OPTIMISATION DE LA PROPORTION DES CONSTITUANTS DU LIANT TERNAIRE
À TEMPÉRATURE AMBIANTE**

Tableau 11 : Liants ternaires testés

Dénomination des liants étudiés	Proportions des constituants du liant (%)		
	Clinker + Autres (K + A)	Laitier de haut fourneau (S)	Calcaire (L)*
Témoin CEM I PLN	95,5	0	4,5
1	63,1	8,5	28,4
2	74,6	8,5	16,9
3	57,1	26,0	16,9
4	55,6	16,0	28,4
5	50,0	25,0	25,0
6	88,0	0	12,0
7	50,0	15,0	35,0
8	55,6	26,0	18,4
9	76,5	0	23,5
10	53,0	35,0	12,0
11	50,0	35,0	15,0
12	65,0	0	35,0
13	51,5	35,0	13,5
14	70,5	17,5	12,0
15	61,2	17,0	21,8
16	57,5	7,5	35,0
Liant « VI »	40	45	15

* Le calcaire est apporté par l'addition mais également par le ciment.

Le graphique du plan de mélange permet de visualiser les proportions des dix-sept liants testés et du témoin (figure 14). Les quantités de ciment, de laitier et d'addition calcaire introduites dans les mortiers prennent en compte la présence de calcaire dans le ciment (le passage respectif des quantités d'éléments de composition en matières premières est présenté en annexe 4).

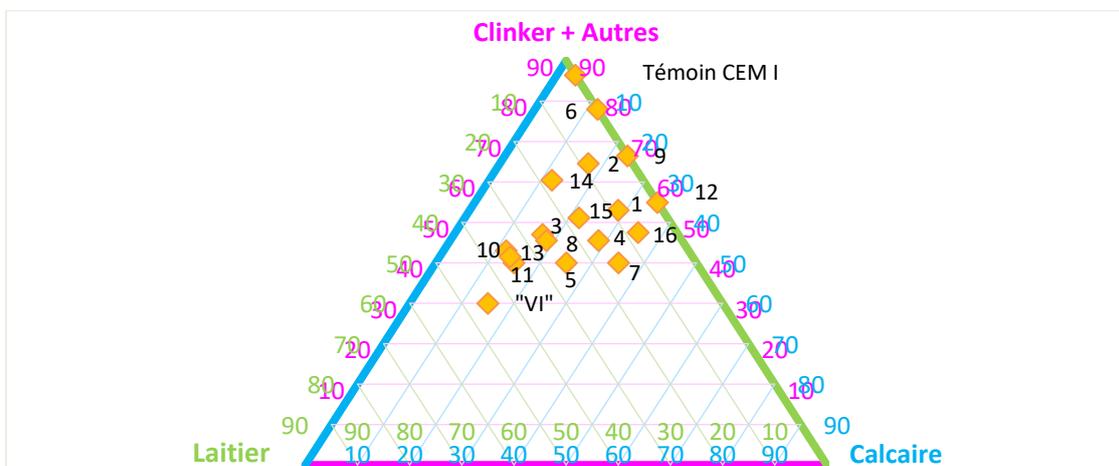


Figure 14 : Positionnement des liants étudiés dans le diagramme ternaire « clinker + autres/laitier/calcaire »

2. Propriétés des liants ternaires du plan expérimental

Les propriétés des liants ternaires à l'état frais et durcis sont regroupées dans les tableaux 12 et 13. Les diagrammes ternaires représentent les propriétés mesurées (figures 15, 17, 18, 19).

Tableau 12 : Résultats des essais sur mortiers frais et durcis pour le témoin et les compositions 1 à 8

		Témoin	1	2	3	4	5	6	7	8
Proportions massiques dans les mortiers [g]										
Ciment		2 250,0	1 487,0	1 757,6	1 345,3	1 309,9	1 178,0	2 073,3	1 178,0	1 309,9
Laitier		0	191,3	191,3	585,0	360,0	562,5	0	337,5	585,0
Addition calcaire		0	572,1	301,2	319,7	580,1	509,5	176,7	734,5	355,1
Sable CEN 0/2		6 750,0								
Eau d'ajout ($E_{eff}/L = 0,4$)		900,0								
SP (0,25 %/L)		5,6								
Caractéristiques à l'état frais										
Étalement [mm]	5'	160,0	250,0	170,0	250,0	215,0	260,0	165,0	275,0	250,0
	45'	115,0	240,0	145,0	245,0	175,0	250,0	130,0	240,0	235,0
ρ [kg/m ³]		2 285,0	2 365,0	2 330,0	2 335,0	2 355,0	2 335,0	2 290,0	2 315,0	2 365,0
Caractéristiques à l'état durci										
ρ [kg/m ³] à 24 heures		2 285,0	2 355,0	2 315,0	2 325,0	2 335,0	2 315,0	2 285,0	2 305,0	2 355,0
Résistance en compression [MPa]	24 h	44,9	32,2	35,3	24,4	23,8	19,6	43,4	19,8	25,8
	7 j	70,9	64,9	74,0	70,5	62,8	59,0	72,0	52,1	66,1
	28 j	81,9	79,3	84,0	90,5	76,8	81,6	81,9	68,2	89,1
Résistance en flexion [MPa]	24 h	6,4	6,3	6,4	5	5,5	4,5	6,9	4,1	5,1
	7 j	9,9	8,4	9,5	10,0	8,9	8,3	9,6	8,0	9,3
	28 j	10,3	9,8	9,8	11,8	9,9	10,1	10,0	9,4	11,4
Caractéristiques économiques et environnementale (mesurées sur 1 m³ de mortier) *										
Coût [€/m ³]		104,2	89,8	96,0	92,5	88,3	88,3	100,4	84,9	91,7
Coût (%/témoin)		100	86,2	92,1	88,8	84,7	84,7	96,4	81,5	88,0
Émissions de CO ₂ [kgeqCO ₂ /m ³]		445,3	309,2	357,4	278,6	275,5	249,3	416,1	252,4	272,3
Émissions de CO ₂ (%/témoin)		100	69,4	80,3	62,6	61,9	56,0	93,4	56,7	61,1

* Les calculs ont été réalisés en utilisant une valeur de masse volumique réelle moyenne : 2 300 kg/m³ (§ 3.3)

**CHAPITRE III : OPTIMISATION DE LA PROPORTION DES CONSTITUANTS DU LIANT TERNAIRE
À TEMPÉRATURE AMBIANTE**

Tableau 13 : Résultats des essais sur mortiers frais et durcis des compositions 9 à « VI »

	9	10	11	12	13	14	15	16	“VI”	
Proportions massiques [g]										
Ciment	1 802,4	1 248,7	1 178,0	1 531,4	1 213,4	1 661,0	1 441,9	1 354,7	942,4	
Laitier	0	787,5	787,5	0	787,5	393,8	382,5	168,8	1 012,5	
Addition calcaire	447,6	213,8	284,5	718,6	249,1	195,3	425,6	726,5	295,1	
Sable CEN 0/2	6 750,0									
Eau d’ajout ($E_{eff}/L = 0,4$)	900,0									
SP (0,25 %/L)	5,6									
Caractéristiques à l’état frais										
Étalement [mm]	5'	220	240	195	200	255	220	230	270	190
	45'	190	230	170	190	230	185	220	260	185
Ressuage [visuel]	Non	Oui	Non	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	
ρ [kg/m ³]	2 315,0	2 325,0	2 400,0	2 360,0	2 360,0	2 325,0	2 345,0	2 370,0	2 350,0	
Caractéristiques à l’état durci										
ρ [kg/m ³] à 24 heures	2 310,0	2 330,0	2 345,0	2 350,0	2 340,0	2 315,0	2 335,0	2 355,0	2 320,0	
Résistance en compression [MPa]	1 j	37,1	22,2	12,5	30,3	20,7	32,6	28,3	24,4	11,9
	7 j	67,8	70,7	58,4	59,3	68,7	74,8	63,8	53,6	n.d.
	28 j	76,9	94,2	89,0	67,3	92,8	90,8	83,1	66,4	74,3
Résistance en flexion [MPa]	1 j	6,4	5,1	4,3	6,0	4,8	6,2	5,6	5,5	2,7
	7 j	8,7	9,9	8,7	8,2	10,2	9,8	9,4	7,9	n.d.
	28 j	9,5	11,0	12,5	8,3	11,6	10,9	9,0	9,1	11,7
Caractéristiques économiques et environnementale (mesurées sur 1 m³ de mortier)										
Coût [€/m ³]	94,1	93,4	91,8	87,9	92,6	96,9	91,6	86,4	88,7	
Coût (%/témoin)	90,3	89,6	88,1	84,4	88,9	93,0	87,9	82,9	85,1	
Émissions de CO ₂ [kgeqCO ₂ /m ³]	368,0	258,6	246,1	319,9	252,4	337,4	298,6	286,1	192,7	
Émissions de CO ₂ (%/témoin)	82,6	58,1	55,3	71,8	56,7	75,8	67,1	64,2	43,3	

« n.d. » : non déterminé.

* Les calculs ont été réalisés en utilisant une valeur de masse volumique réelle moyenne : 2 300 kg/m³ (§ 3.3).

La valeur de l'étalement a été représentée sur le diagramme ternaire de composition au bout de 5 minutes et 45 minutes pour les liants étudiés (figure 15). L'étalement diminue avec le temps et avec la quantité de ciment (K + A), donc de clinker du mélange, avec comme valeurs 160 mm pour le témoin CEM I versus 275 mm pour la composition 7. À l'inverse, l'étalement augmente de façon attendue avec la quantité de calcaire, celui-ci étant connu pour améliorer la rhéologie [Bentz, 2016].

On observe également que pour des compositions de mortier comportant la même quantité « K + A » (par exemple les compositions 11, 5 et 7), l'étalement est d'autant plus important avec la quantité de calcaire, aussi bien à 5 minutes qu'à 45 minutes. Ainsi, globalement, plus il y a de clinker dans le liant, plus le maintien de rhéologie est difficile. Il est néanmoins important de rappeler que l'adjuvantation n'était pas optimisée vis-à-vis de cette propriété. Le liant « VI » (tableau 13) ne suit pas les tendances énoncées sur la figure 15. Selon le modèle, le liant aurait dû théoriquement avoir un étalement supérieur à 230 mm à 5 minutes et supérieur à 205 mm après 45 minutes. Ceci conduit à penser que les couplages entre les constituants ne varient pas de façon monotone notamment quand la quantité de clinker devient inférieure à celle des additions.

CHAPITRE III : OPTIMISATION DE LA PROPORTION DES CONSTITUANTS DU LIANT TERNAIRE À TEMPÉRATURE AMBIANTE

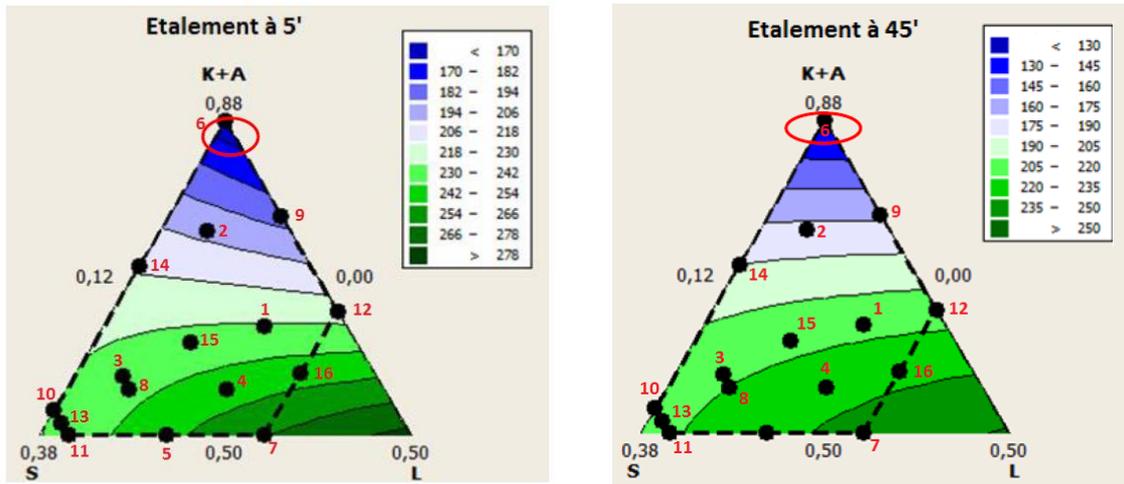


Figure 15 : Représentation graphique de l'étalement des différentes compositions de mortiers à 5 et 45 minutes

Le modèle de Cyr *et al.* [Cyr, 2006] permet de relier la résistance mécanique obtenue à température ambiante à la combinaison de trois effets (figure 16). L'équation suivante présente ces effets :

$$f_p(\text{mélange}) = f_{(\text{dilution})} + \Delta f_{\varphi}(\text{physique}) + \Delta f_{pz}(\text{chimie}) \quad \text{Équation 7}$$

- Avec
- $f_{(\text{dilution})}$ l'effet engendré par la substitution de ciment par matériau inerte
 - $f_{\varphi}(\text{physique})$ l'effet dû à l'effet filler et à la mise à disposition de sites de nucléation
 - $f_{pz}(\text{chimie})$ l'effet physico-chimique : effet pouzzolanique ou autre effet chimique permettant l'accélération ou le retard

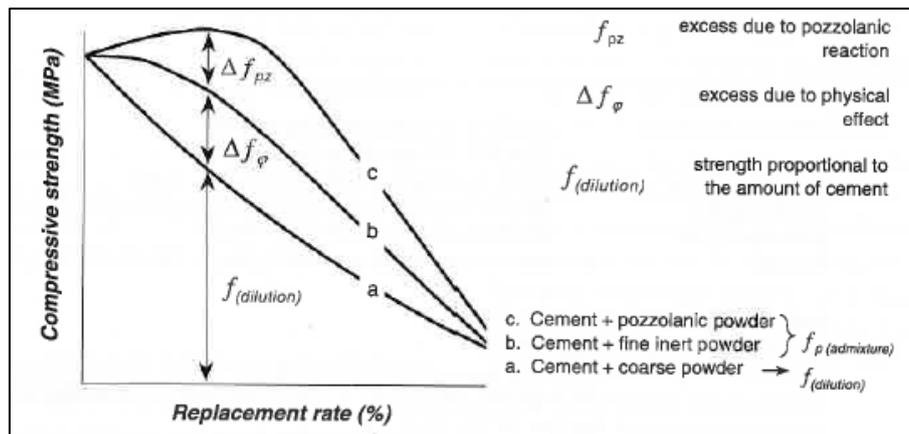


Figure 16 : Représentation de la combinaison des différents effets dans un mélange contenant des additions

La résistance mécanique a été mesurée en flexion et compression aux échéances de 24 heures, 7 jours et 28 jours. Globalement à 24 heures, plus la quantité de clinker est importante, plus la résistance mécanique est importante (figure 17). On observe également qu'aucun mortier réalisé avec les liants ternaires ne possède une résistance mécanique équivalente ou supérieure à la référence contenant 100 % de CEM I 52,5 R : la valeur maximale est de 43,4 MPa pour la composition 6 *versus* 44,9 MPa pour la référence. Le liant « VI » est conforme à cette tendance et possède la résistance mécanique en compression la plus faible avec sa teneur en clinker la plus basse.

CHAPITRE III : OPTIMISATION DE LA PROPORTION DES CONSTITUANTS DU LIANT TERNAIRE À TEMPÉRATURE AMBIANTE

En se basant sur modèle de Cyr et al [Cyr, 2006], l'addition calcaire et le laitier de haut fourneau ont tous les deux principalement un effet de dilution voire un léger effet physique.

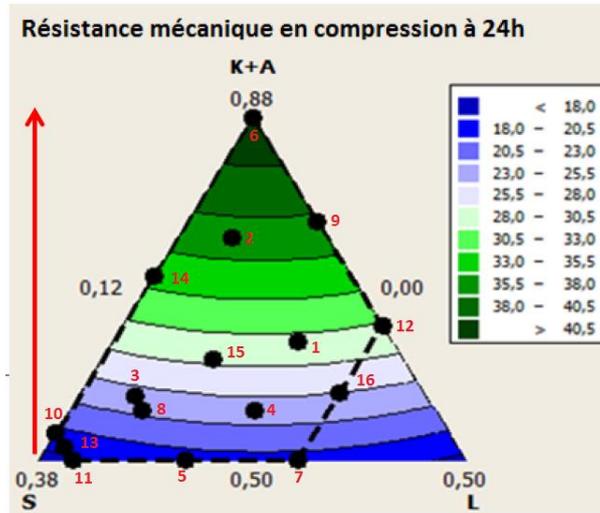


Figure 17 : Représentation graphique de la résistance mécanique en compression à 24 heures

Au bout de 7 jours, la tendance d'évolution de la résistance mécanique en compression diffère de celle à 24 heures. En effet, la résistance n'est plus seulement fonction de la quantité de (K + A) mais elle devient également dépendante des quantités en laitier de haut fourneau et en addition calcaire. La courbe rouge sur la figure 18 représente la résistance mécanique du témoin 100 % ciment CEM I (70,9 MPa), mettant en évidence que plusieurs compositions (2, 3, 6, 10, 14) ont une résistance en compression supérieure au témoin à cette échéance.

On observe que pour ces cinq compositions, les quantités (K + A) et laitier de haut fourneau varient fortement alors que la variation de la quantité d'addition calcaire est plus réduite, entre 12 % et 16,9 %.

En se basant sur modèle de Cyr et al [Cyr, 2006], on observe que l'effet des additions dépend de leurs proportions dans le mélange. L'effet physique semble le plus important, accompagné par l'effet de dilution et l'effet chimique pour le laitier.

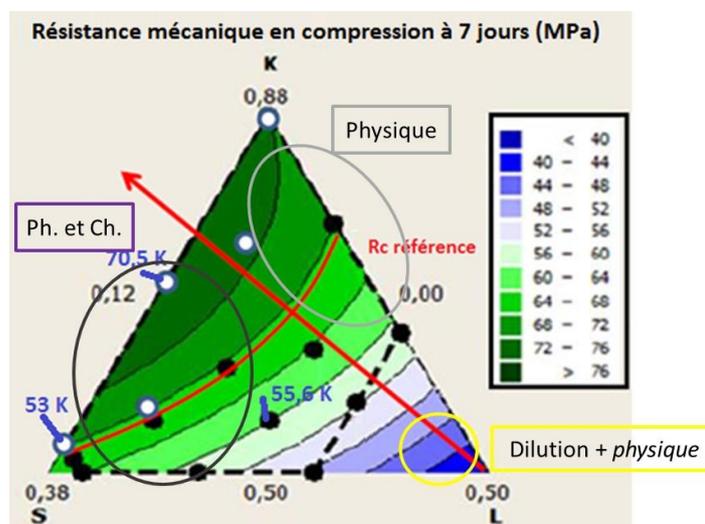


Figure 18 : Représentation graphique de la résistance mécanique en compression à 7 jours

CHAPITRE III : OPTIMISATION DE LA PROPORTION DES CONSTITUANTS DU LIANT TERNAIRE À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Les mêmes tendances sont observées au bout de 28 jours (figure 19). À cette échéance, des compositions supplémentaires (8, 11, 13, 15) possèdent également des résistances mécaniques supérieures à celle du témoin à base de CEM I (81,9 MPa). Ces résultats sont obtenus pour des compositions dont la quantité en calcaire ne dépasse pas 21,8 %. À cette échéance, le liant « VI » suit également la tendance en ayant toutefois une résistance d'environ 75 MPa, soit inférieure à celle du témoin.

En se basant sur modèle de Cyr et al [Cyr, 2006], on observe les mêmes tendances qu'à 7 jours mais accentuées, surtout pour le laitier de haut fourneau. L'effet chimique prédomine les deux autres effets.

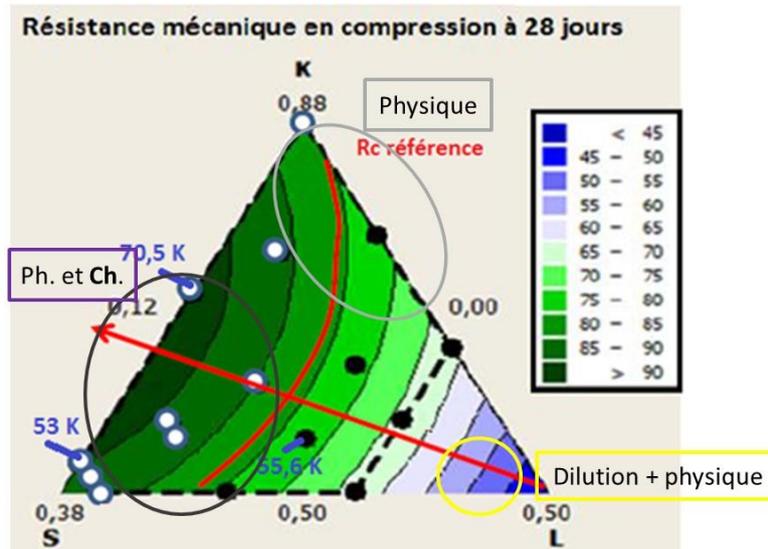


Figure 19 : Représentation graphique de la résistance mécanique en compression à 28 jours

L'évolution de la résistance mécanique en flexion au cours du temps en fonction de la teneur en clinker (figure 20) indique une tendance à l'augmentation avec le temps. La résistance en flexion mesurée à 24 heures est directement dépendante de la teneur en clinker.

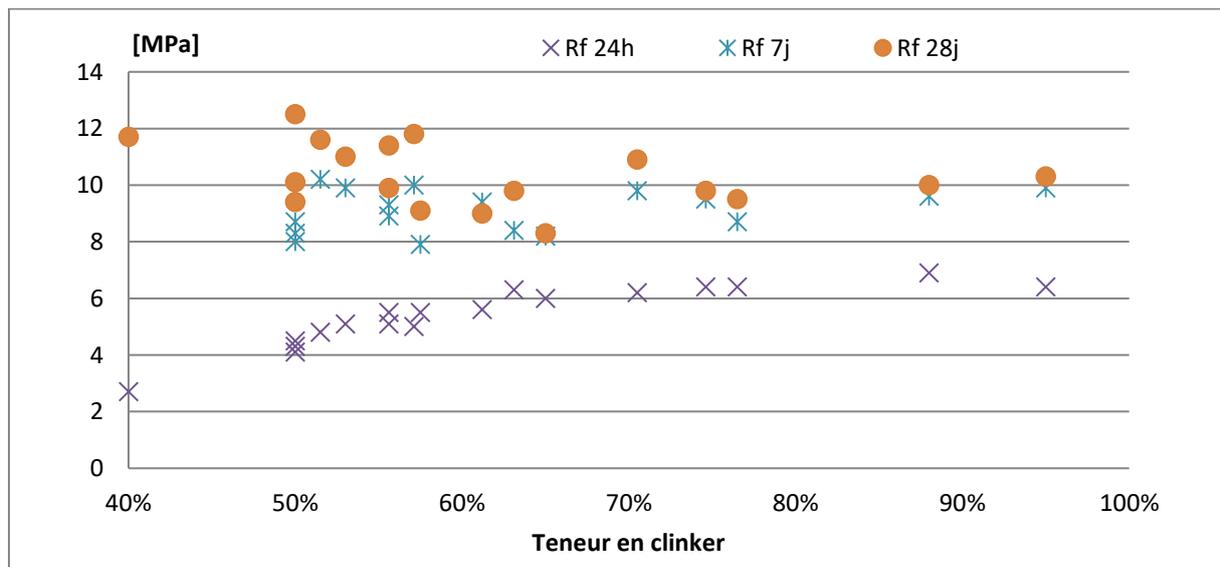


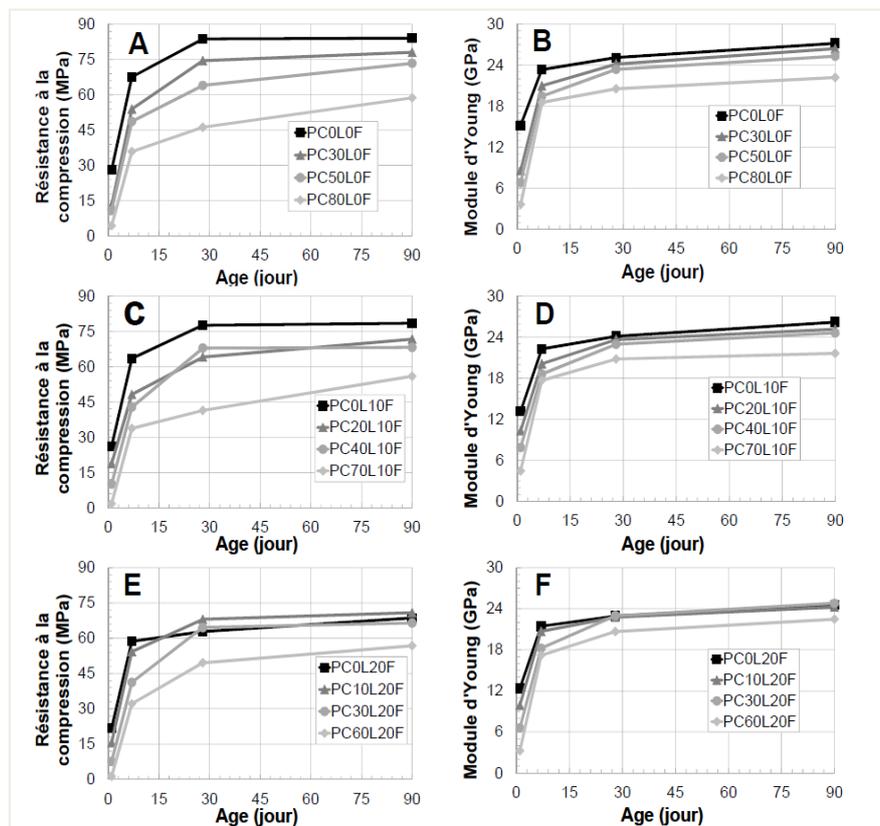
Figure 20 : Évolution de la résistance en flexion en fonction de la teneur en clinker

En revanche, aux échéances plus longues, la résistance en flexion peut être supérieure à celle du témoin pour certains liants mettant ainsi en évidence l'effet bénéfique des additions. Par exemple, les compositions 3, 8, 10, 11, 13, 14 et « VI » dépassent le témoin formulé avec le CEM I 52,5 R au bout de 28 jours voire même à 7 jours pour certaines.

3. Discussion

3.1. Impact de la composition du liant ternaire sur les propriétés techniques

D'après les résultats obtenus et en accord avec les travaux de Berodier *et al.* [Berodier, 2014], les additions minérales ne semblent pas compenser le ciment en termes de réactivité vis-à-vis des performances mécaniques à très court terme (24 heures), en considérant une surface spécifique des additions similaires à celle du ciment. Nos observations sont en accord avec les travaux sur mortiers de Khalifa et Bouasker [Khalifa, 2012] qui portaient sur la dépendance du dosage en filler calcaire et de l'effet combiné de ces « additions » sur l'évolution de la résistance mécanique. On observe en effet qu'il existe une influence non négligeable à 7 jours et encore plus à 28 jours. Les travaux publiés énoncent un « optimum » de dosage de 20 % de calcaire, jusqu'à 30 % de laitier de haut fourneau et 50 % de ciment Portland (figure 21). Pour jouer son rôle d'addition réactive au sein du mortier, le laitier nécessite d'être activé et l'est, dans ce cas précis, par le ciment Portland.



Légende :
 A et B : liants sans addition calcaire ; C et D : liants avec 10 % d'addition calcaire ;
 E et F : liants avec 20 % d'addition calcaire
Exemple de dénomination : PC70L10F : 10 % addition calcaire + 70 % laitier + 20 % Portland

Figure 21 : Évolution de la résistance mécanique à la compression et du module d'Young des liants étudiés en fonction du temps [Khalifa, 2012]

CHAPITRE III : OPTIMISATION DE LA PROPORTION DES CONSTITUANTS DU LIANT TERNAIRE À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Pour un pourcentage de 20 % de Portland, la résistance du béton est médiocre mais est améliorée pour les pourcentages de 50 % et 70 %. À l'âge de 60 jours, une légère augmentation de la résistance est observée [Zeghichi, 2007]. De plus, l'évolution de la résistance est liée au phénomène d'hydratation : plus la quantité de portlandite libérée par le ciment Portland est grande, plus les produits d'hydratation du laitier formés sont denses [Zeghichi, 2007].

En l'absence de calcaire, la présence de 50 % de laitier en mélange avec du ciment Portland conduit, au bout de 24 heures, à des résistances mécaniques en flexion et compression très éloignées du témoin (indice d'activité respectivement de 0,51 et 0,4) [Jacquemot, 2014]. Ces résultats peuvent être comparés à ceux obtenus avec trois de nos liants dont les compositions se rapprochent de celles de Jacquemot [Jacquemot, 2014] : il s'agit des liants 5, 7 et 11 constitués de 52 % de ciment CEM I et de 48 % d'additions minérales.

Ne s'agissant pas du même ciment, les comparaisons sont réalisées sur les indices d'activité (figures 22 et 23).

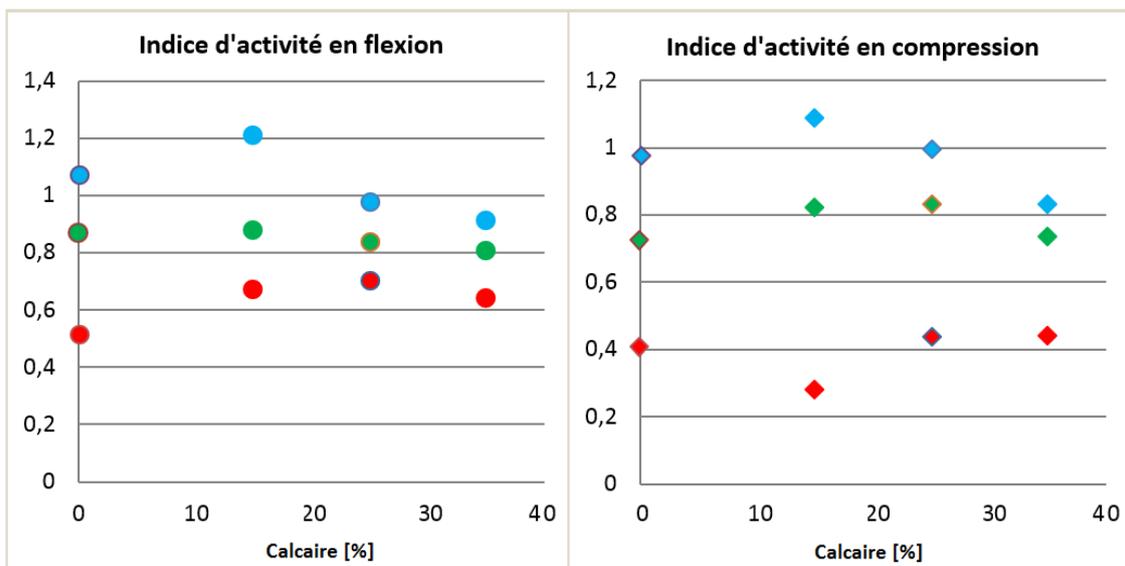


Figure 22 : Indice d'activité en flexion des mortiers incorporant différentes quantités de calcaire

Figure 23 : Indice d'activité en compression des mortiers incorporant différentes quantités de calcaire

Légende commune aux figures 22 et 23 :

Indice d'activité à 24 heures : rouge ;

Indice d'activité à 7 jours : vert ;

Indice d'activité à 28 jours : bleu.

Les tendances observées sur les figures 22 et 23 démontrent que l'impact de la présence de calcaire est similaire en flexion et en compression et plus particulièrement à 28 jours. En flexion, la substitution de laitier par du calcaire semble bénéfique aux trois dosages en filler calcaire, permettant d'obtenir un optimum de résistance à 24 heures en présence de 25 % de calcaire. Cet optimum est également observé pour la résistance à la compression.

À 24 heures, les valeurs d'indice d'activité en compression sont équivalentes avec et sans calcaire, à l'exception du mortier incorporant 15 % de calcaire (35 % de laitier). L'équivalence confirme le caractère « filler » du laitier à très court terme sans activation.

À l'âge de 7 jours, l'indice d'activité en flexion du mortier ne contenant pas de calcaire est très proche de ceux en contenant tandis qu'en compression, il reste plus faible que les deux mortiers incorporant respectivement 15 % et 25 % de calcaire. Dans nos essais, le laitier se comporte comme une addition réactive à l'échéance de 28 jours, en considérant la diminution des indices d'activité en flexion et compression en présence de 35 % de calcaire, voire 25 % (résultats en flexion).

À 28 jours, la présence de 15 % de calcaire pour 35 % de laitier semble être le liant le plus performant, vis-à-vis de la résistance en flexion tout comme pour la résistance en compression.

Par rapport au liant composé de 50 % de laitier, la présence de calcaire pourrait favoriser le développement des hydrates en procurant des sites de nucléation mettant en avant une synergie entre l'addition calcaire et le laitier ([Berodier, 2014], [Khalifa, 2012]) (figure 24).

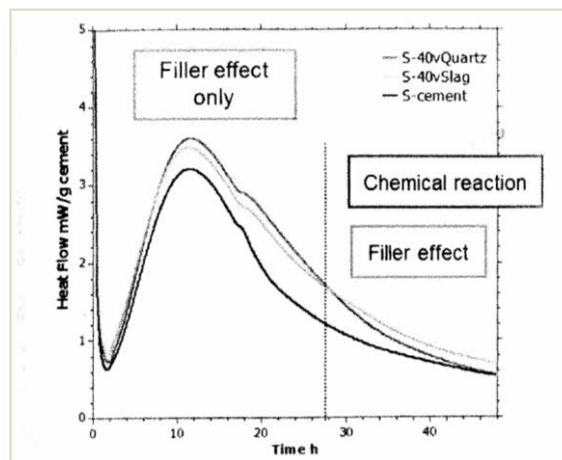


Figure 24 : Vitesse d'hydratation de trois mortiers normalisés à base de ciment Portland (témoin, avec substitution de 40 % de ciment par du laitier et par de l'addition siliceuse)

3.2. Détermination des coefficients de contribution

Chaque propriété d'usage est représentée sur un diagramme ternaire dont les trois sommets sont les trois matières premières constitutives du liant. Ces diagrammes permettent d'étudier et d'évaluer l'influence que chaque matière première a sur chacune des propriétés mesurées. Les matières premières peuvent avoir un effet additif, être en synergie avec une ou les deux autres matières premières ou agir seule. Cet effet peut être mis en avant par l'allure des iso-courbes représentées sur les diagrammes ternaires.

Afin de connaître le « poids » de chaque matière première sur chacune des propriétés d'usage pour une échéance donnée, un système à trois équations est utilisé :

$$V_1 = K \cdot I_K + S \cdot I_S + L \cdot I_L \quad \text{Équation 8}$$

$$V_2 = K' \cdot I_K + S' \cdot I_S + L' \cdot I_L \quad \text{Équation 9}$$

$$V_3 = K'' \cdot I_K + S'' \cdot I_S + L'' \cdot I_L \quad \text{Équation 10}$$

Dans lequel $V_1 ; V_2 ; V_3$ sont les résultats des propriétés mesurées ;
 $K ; S ; L$ sont les proportions respectives de clinker, de laitier et de calcaire ;
 $I_K ; I_S ; I_L$ sont les coefficients de contribution (ou « poids »).

Ces coefficients de contribution sont déterminés en prenant trois liants sur trois iso-courbes différentes. Le choix des points peut être effectué dans l'ensemble du diagramme ternaire ou en fonction de l'allure des courbes, ce qui permet de connaître soit la tendance générale de la contribution $I_K ; I_S ; I_L$ de chaque matière première, soit la tendance dans une zone plus restreinte. Plus le coefficient de contribution est important et plus la matière première concernée a de l'influence.

3.2.1. Propriété à l'état frais : étalement à 5 minutes et 45 minutes

L'étalement à 5 minutes révèle deux tendances d'orientation de courbes (figure 25) tandis que pour l'étalement à 45 minutes, une seule tendance, plus ou moins marquée apparaît en fonction de la quantité de calcaire (figure 26). En parallèle, deux tendances de pente sont observées sur les deux diagrammes ternaires. Ainsi, les coefficients de contribution sont déterminés dans deux zones pour les deux propriétés :

- Zone 1 comportant les points A, B et C du diagramme ternaire représentant l'étalement mesuré au bout de 5 minutes et les points A', B' et C' du diagramme ternaire représentant l'étalement mesuré à 45 minutes ;
- Zone 2 comportant les points D, E et F du diagramme ternaire représentant l'étalement mesuré au bout de 5 minutes et les points D', E' et F' du diagramme ternaire représentant l'étalement mesuré à 45 minutes.

Où A, B, C, D, E, F et A', B', C', D', E', F' sont des liants situés sur des iso-courbes (figures 25 et 26).

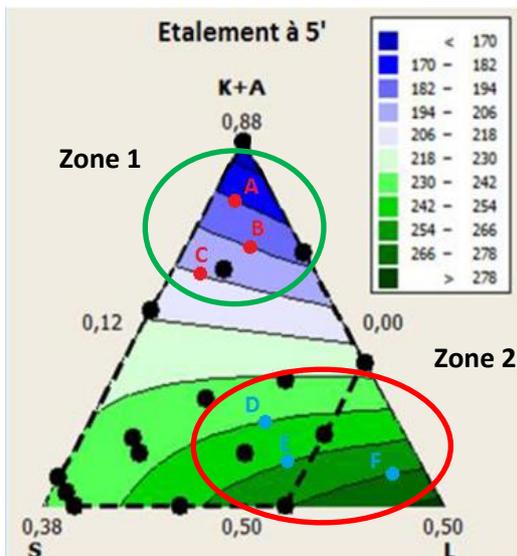


Figure 25 : Détermination des coefficients de contribution vis-à-vis de l'étalement à 5 minutes

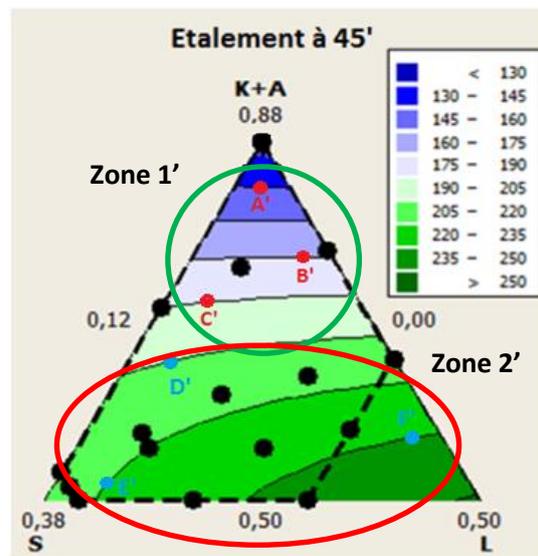


Figure 26 : Détermination des coefficients de contribution vis-à-vis de l'étalement à 45 minutes

Les coefficients correspondant aux différentes zones sont calculés et présentés (tableau 14).

**CHAPITRE III : OPTIMISATION DE LA PROPORTION DES CONSTITUANTS DU LIANT TERNAIRE
À TEMPÉRATURE AMBIANTE**

Tableau 14 : Détermination des coefficients de contribution des trois matières constitutives du liant vis-à-vis de l'étalement mesurée au bout de 5 minutes et 45 minutes à température ambiante

	Valeur de l'iso-courbe [MPa]	Pourcentage massique du liant [%]			Coefficient de contribution			
		Clinker (K + A)	Laitier (S)	Calcaire (L)	I _K	I _S	I _L	
Étalement à 5 minutes								
Zone 1	Liant A	182	82,0	4,3	13,7	2,0	3,8	0,2
	Liant B	194	76,8	5,1	18,1			
	Liant C	206	74,0	15,0	11,0			
Zone 2	Liant D	242	58,8	13,0	28,2	1,5	3,1	4,1
	Liant E	266	53,3	4,0	42,7			
	Liant F	254	54,1	13,3	32,6			
Étalement à 45 minutes								
Zone 1'	Liant A'	145	83,2	2,6	14,3	0,8	3,5	4,9
	Liant B'	175	75,8	2,8	21,4			
	Liant C'	190	70,9	16,8	15,3			
Zone 2'	Liant D'	205	64,5	20,9	14,6	1,6	2,6	3,4
	Liant E'	220	51,9	31,6	16,5			
	Liant F'	235	56,5	2,9	40,6			

On observe que les tendances ne sont pas systématiquement identiques pour une zone donnée entre 5 minutes et 45 minutes. Ainsi dans la zone 1 au bout de 5 minutes, le laitier a une influence non négligeable dès lors qu'il est présent dans le liant principalement composé de ciment, tandis qu'au bout de 45 minutes, la contribution du calcaire est supérieure à celle du laitier et presque trois fois plus importante que celle du ciment (zone 1).

En revanche, les tendances sont similaires dans la zone 2 pour un étalement mesuré à 5 minutes et à 45 minutes. En effet, l'addition calcaire apparaît comme le constituant principal permettant de régir l'ouvrabilité du mortier dès que la proportion de ciment est inférieure à 65 %.

L'étalement à 5 minutes, on observe que le poids du calcaire varie fortement d'une zone à l'autre, alors que ceux du clinker et du laitier sont relativement constant. Ainsi dans la zone 1, l'étalement est indépendant ou presque de la proportion de calcaire (coefficient de contribution de 0,2). Les iso-courbes de la zone 1 de la figure 25 sont perpendiculaires aux droites parallèles à l'axe [S ; K + A]. Dans cette zone, si l'on souhaite augmenter l'étalement, il faut maintenir la proportion de calcaire constante et remplacer une partie du clinker par du laitier (poids du laitier plus élevé que celui du clinker).

Dans le cas de la zone 2, caractérisée par une quantité de clinker plus faible (50 à 60 %), l'influence du calcaire sur l'étalement est beaucoup plus forte (contribution de 4,1). Pour augmenter l'étalement, il faut diminuer la proportion de clinker et augmenter celle du ciment.

Ces différences de poids respectifs observées pour un même constituant, en l'occurrence le calcaire, sont attribuables à l'empilement granulaire dont les caractéristiques (compacité en particulier) dépendent des proportions de chaque constituant.

CHAPITRE III : OPTIMISATION DE LA PROPORTION DES CONSTITUANTS DU LIANT TERNAIRE À TEMPÉRATURE AMBIANTE

3.2.2. Résistances mécaniques en flexion et compression

En fonction du type de produit fabriqué, les propriétés recherchées peuvent varier. Les produits armés doivent posséder, au moment de leur démoulage, une résistance mécanique en flexion suffisante pour être manipulés, tandis que les produits précontraints nécessitent une résistance en compression suffisante évitant au béton de fissurer au moment du relâchement des torons.

Au bout de 28 jours, la résistance en compression est le principal paramètre mesuré sur les deux types de produits.

Les coefficients de contribution ont donc été calculés pour les réponses suivantes :

- résistance mécanique en compression à 24 heures (figure 27) ;
- résistance mécanique en flexion à 24 heures (figure 28) ;
- résistance mécanique en compression à 28 jours (figure 29).

3.2.2.1. Résistances mécaniques à 24 heures

Trois points par zone permettent de calculer les coefficients de contribution (figures 27 et 28).

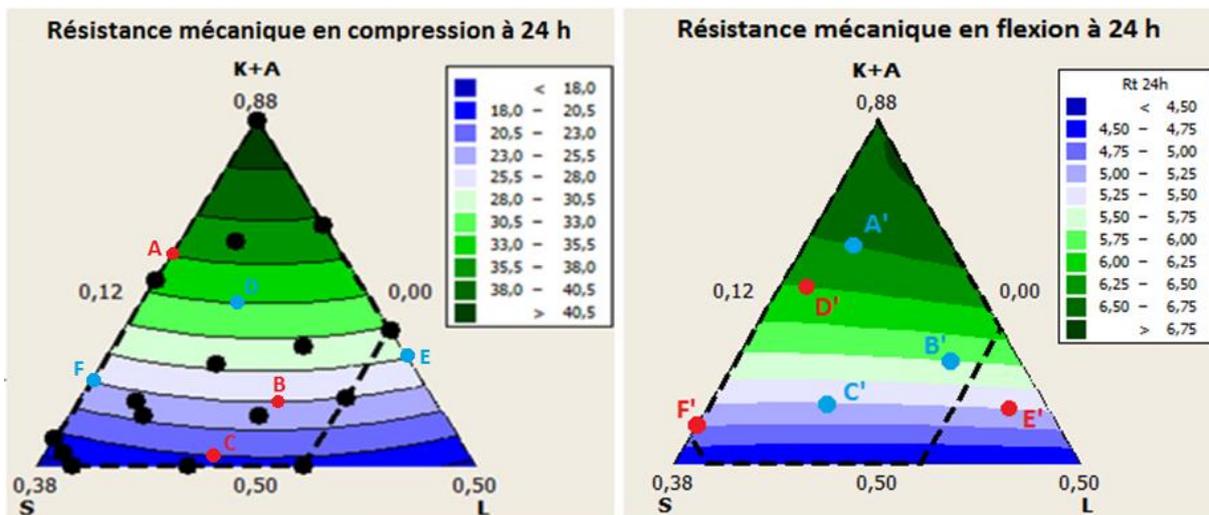


Figure 27 : Résistance mécanique en compression à 24 heures – Représentation de six points pour la détermination des coefficients de contribution

Figure 28 : Résistance en flexion à 24 heures – Représentation de six points pour la détermination des coefficients de contribution

Les coefficients associés aux propriétés mécaniques mesurées à 24 heures sont calculés et présentés (tableau 15).

Tableau 15 : Détermination des coefficients de contribution des trois matières constitutives du liant vis-à-vis des résistances en compression et en flexion mesurées à 24 heures à température ambiante

	Valeur de l'iso-courbe [MPa]	Pourcentage massique du liant [%]			Coefficient de contribution		
		Clinker (K + A)	Laitier (S)	Calcaire (L)	I_K	I_S	I_L
Résistance mécanique en compression à 24 heures							
Zone 1	Liant A	35,5	72,5	15,5	0,61	-0,5	-0,1
	Liant B	25,5	57,0	29,5			
	Liant C	18,0	51,2	27,0			

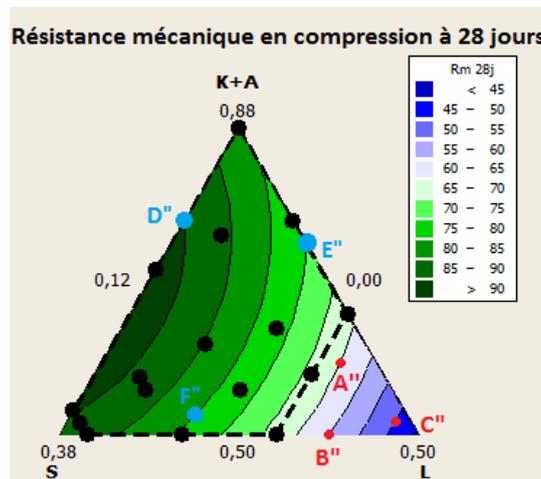
**CHAPITRE III : OPTIMISATION DE LA PROPORTION DES CONSTITUANTS DU LIANT TERNAIRE
À TEMPÉRATURE AMBIANTE**

	Valeur de l'iso-courbe [MPa]	Pourcentage massique du liant [%]			Coefficient de contribution			
		Clinker (K + A)	Laitier (S)	Calcaire (L)	I _K	I _S	I _L	
Résistance mécanique en compression à 24 heures								
Zone 2	Liant D	33	67,9	11,8	20,3	0,6	-0,3	-0,3
	Liant E	28	62,0	0	38,0			
	Liant F	25,5	59,4	28,6	12			
Résistance mécanique en flexion à 24 heures								
Zone 1'	Liant A'	6,5	74,6	8,7	16,7	0,08	0,006	0,02
	Liant B'	5,75	61,3	6,4	32,3			
	Liant C'	5,25	56,8	20,4	22,8			
Zone 2'	Liant D'	6,25	69,5	15,9	14,6	0,09	0,004	0,008
	Liant E'	5,25	56,1	4,0	39,9			
	Liant F'	5,0	54,7	33,3	12,0			

À 24 heures, la résistance en compression dépend essentiellement de la quantité de ciment (zone 1 et zone 2) : poids de 0,5 et iso-courbes quasi parallèles à l'axe [S ; L]. Cela confirme l'effet dominant de dilution. En flexion, l'effet de dilution des additions est observé lorsque ces dernières sont incorporées à forte proportion. Les coefficients semblent mettre en avant un effet physique plus important qu'en compression, en particulier lorsque les additions sont intégrées à faibles proportions.

3.2.2.1. Résistances mécaniques à 28 jours

Les coefficients associés à la résistance en compression à 28 jours sont calculés et présentés (tableau 16).



**Figure 29 : Résistance mécanique en compression à 28 jours –
Représentation de six points pour la détermination des coefficients de contribution**

À 28 jours, les iso-courbes révèlent des tendances différentes en fonction de la proportion de chaque constituant. Le clinker et le laitier ont un poids équivalent. Les résistances sont d'autant plus élevées que la proportion du laitier dans le liant est grande (effet chimique prédominant). L'addition calcaire a principalement un effet de dilution ainsi qu'un effet physique (effet filler).

**CHAPITRE III : OPTIMISATION DE LA PROPORTION DES CONSTITUANTS DU LIANT TERNAIRE
À TEMPÉRATURE AMBIANTE**

Tableau 16 : Détermination des coefficients de contribution des trois matières constitutives du liant vis-à-vis de la résistance mécanique en compression mesurée à 28 jours à température ambiante

	Valeur de l'iso-courbe [MPa]	Pourcentage massique du liant [%]			Coefficient de contribution			
		Clinker (K+A)	Laitier (S)	Calcaire (L)	I _K	I _S	I _L	
Résistance mécanique en compression à 28 jours								
Zone 1''	Liant A''	56	59,1	3,7	37,2	1,2	1,2	-0,4
	Liant B''	60	50,0	9,7	40,3			
	Liant C''	50	51,7	1,7	46,6			
Zone 2''	Liant D''	90	76,6	11,4	12,0	1,0	1,2	0,1
	Liant E''	75	73,7	0	26,3			
	Liant F''	80	52,3	22,7	25,0			

3.3. Impact de la composition du liant ternaire sur les critères économiques et environnementaux

Dans notre approche globale, des critères additionnels ont été définis pour appréhender l'impact de la composition du liant ternaire en termes de coût et d'environnement. L'empreinte CO₂ des différentes matières premières englobe les étapes de production, traitement(s) et transport.

En utilisant les hypothèses formulées dans le tableau 17, le changement climatique ainsi que le coût sont calculés pour chaque mortier par mètre cube de produit (utilisation d'une valeur de masse volumique réelle moyenne issue des résultats du plan de mélange, soit 2 300 kg/m³).

Tableau 17 : Hypothèses prises pour le coût et l'empreinte CO₂ des matières premières utilisées

	Hypothèses	
	Coûts [€/T] (sans transport)	Empreinte CO ₂ [kgeqCO ₂ /T]
Ciment CEM I PLN	120 ¹⁾	766 ²⁾
Laitier de haut fourneau	90 ¹⁾	20 ³⁾
Addition calcaire	30 ¹⁾	75 ³⁾
Sable	20 ⁴⁾	2,8 ⁵⁾
Eau	3 ⁶⁾	0,3 ⁷⁾

¹⁾ Moyenne estimée à partir de plusieurs sources

²⁾ Donnée ATILH

³⁾ Données fournisseurs

⁴⁾ Sable classique de bonne qualité

⁵⁾ donnée pour des granulats de roches meubles/massives UNPG 2010

⁶⁾ Donnée issue de l'Association pour le Contrat Mondial de l'Eau

⁷⁾ Source : Logiciel ACV, base de données Ecoinvent

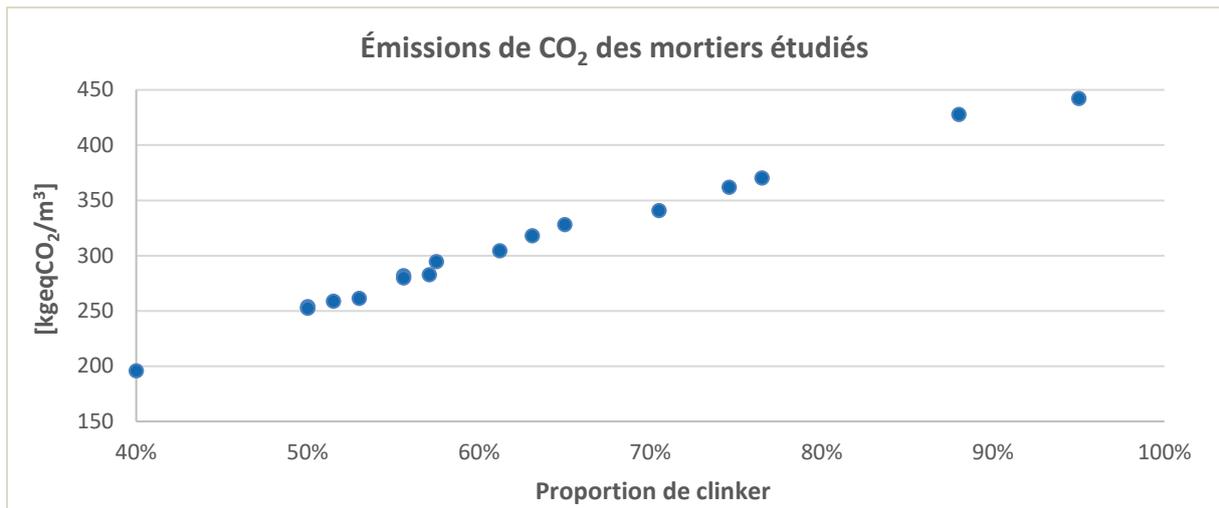


Figure 30 : Représentation du changement climatique (émissions de CO₂) engendré par les mortiers en fonction de la proportion de clinker

Le changement climatique, engendré par la production des mortiers en termes d'émissions de CO₂, mesurées en kgeqCO₂/m³ de mortier produit, est proportionnel avec la quantité de ciment (figure 30).

L'utilisation du liant « VI » (substitution de 60 % du clinker) permet de diviser par environ 2,3 les émissions de CO₂ par rapport au témoin CEM I. Les émissions de CO₂ restent inférieures à 350 kgeqCO₂/m³ pour des proportions de clinker inférieures à 70 %.

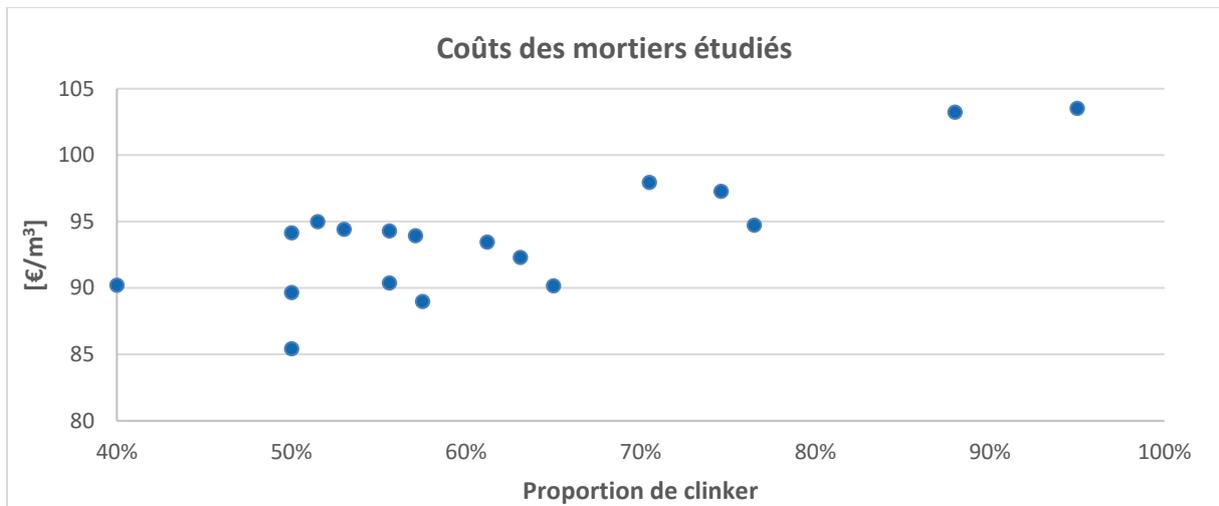


Figure 31 : Représentation du coût des différents mortiers en fonction de la proportion de clinker

L'évolution du coût des mortiers démontre que ce dernier n'est pas lié uniquement au ciment mais également aux autres matières premières constitutives du liant, en particulier le laitier de haut fourneau (figure 31).

Le mortier le plus économique est composé de 50 % de clinker, 15 % de laitier de haut fourneau et 35 % de calcaire pour une émission d'environ 255 kgeqCO₂/m³.

L'utilisation des critères économiques et environnementaux définis précédemment (équations 1 et 2 présentées dans le chapitre I (paragraphe « Méthodes ») complète cette approche. Les figures 32 et 33 présentent les variations RC^{2t} - RC^{2c} à 24 heures et RC^{2c} à 28 jours en fonction de la quantité de clinker présente dans les différents mortiers.

CHAPITRE III : OPTIMISATION DE LA PROPORTION DES CONSTITUANTS DU LIANT TERNAIRE À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Au démoulage, le ratio en compression est compris entre 0,5 et 1,1 $\text{MPa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{k}\epsilon^{-1}\cdot\text{kgeqCO}_2^{-1}$ (figure 32) tandis que celui en flexion est compris entre 0,14 et 0,21 $\text{MPa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{k}\epsilon^{-1}\cdot\text{kgeqCO}_2^{-1}$. Le liant 1 (63 % clinker, 9 % laitier et 28 % calcaire) possède les meilleurs ratios en flexion et compression, respectivement de 0,22 et 1,1 $\text{MPa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{k}\epsilon^{-1}\cdot\text{kgeqCO}_2^{-1}$.

En compression, la tendance de l'évolution des ratios est proche de celle du coût des mortiers. Le ratio augmente jusqu'à une proportion de clinker d'environ 60 % puis il se stabilise autour de 1 $\text{MPa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{k}\epsilon^{-1}\cdot\text{kgeqCO}_2^{-1}$. Vis-à-vis du ratio en flexion, les valeurs maximales se trouvent pour une proportion de clinker inférieure à 80 %, le témoin possédant le ratio minimal.

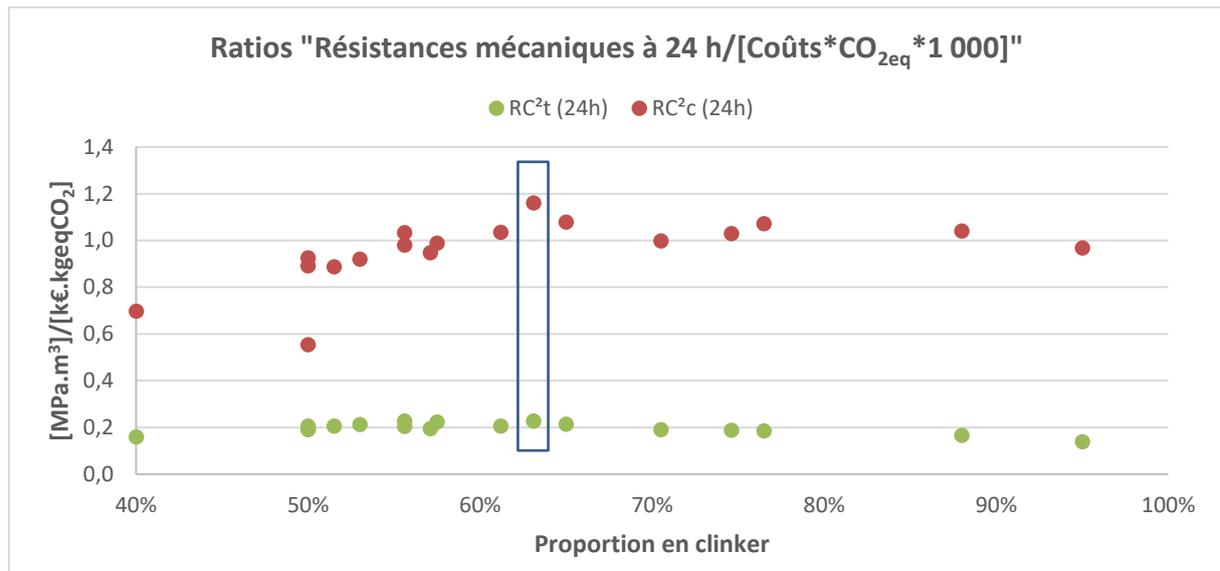


Figure 32 : Représentation des ratios en flexion et compression à 24 heures à température ambiante en fonction de la proportion de clinker

Concernant la résistance mécanique en compression et de façon analogue à la résistance mécanique en flexion à 24 heures, l'optimum des ratios RC^{2c} et RC^{2t} est obtenue pour le mortier émetteur de 309 kg équivalents de CO₂ qui correspond au mortier incorporant 63 % de clinker, 0,09 % de laitier de haut fourneau et 25 % de calcaire.

À 28 jours, les ratios en compression sont compris entre 1,7 et 4,2 $\text{MPa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{k}\epsilon^{-1}\cdot\text{kgeqCO}_2^{-1}$, correspondant respectivement à la référence 100 % CEM I et au liant « VI » (figure 33). La diminution du ratio est principalement reliée à la quantité de clinker. Lorsque cette dernière est la même (exemple de 50 %), le ratio dépend alors de la proportion de laitier de haut fourneau. De plus, les valeurs de certains ratios sont très proches pour des teneurs en clinker différentes. En effet, malgré la tendance inversée, les paliers identifiés précédemment dans la figure 31 liée au critère « Coût » sont également retrouvés dans la figure 33.

CHAPITRE III : OPTIMISATION DE LA PROPORTION DES CONSTITUANTS DU LIANT TERNAIRE À TEMPÉRATURE AMBIANTE

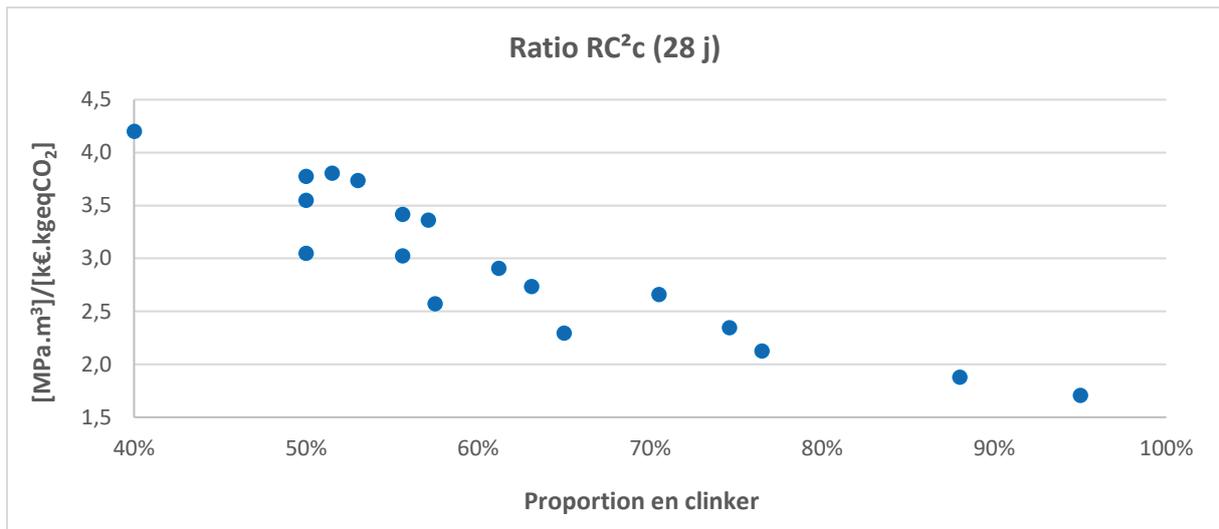


Figure 33 : Représentation du ratio en compression à 28 jours à température ambiante en fonction de la proportion de clinker

Les figures 34 et 35 représentent le rendement du CO₂ vis-à-vis des performances mécaniques en compression et flexion à 24 heures et 28 jours. Ce rendement est représenté en fonction de l'émission de CO₂, calculé pour chaque mortier.

Les iso-courbes de résistance mécanique sont également représentées.

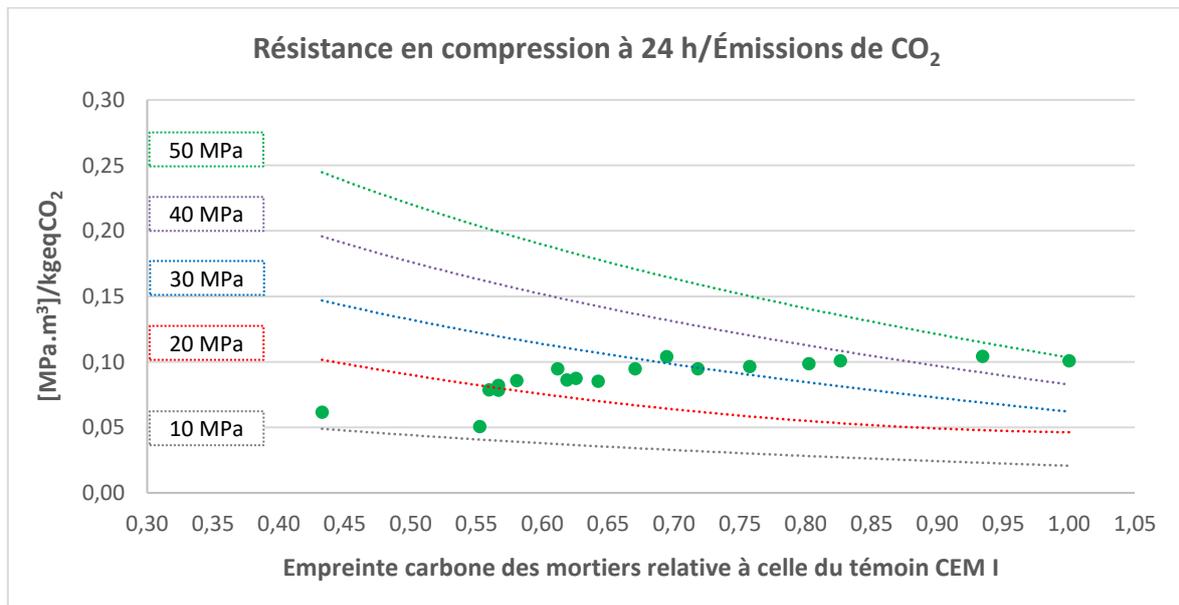


Figure 34 : Représentation du rendement de CO₂ vis-à-vis des résistances en compression à 24 heures à température ambiante

À 24 heures, sans prendre en compte le point [245 ; 0,05] dont la résistance avoisine 10 MPa, l'augmentation du ratio « Résistance en compression à 24 h/Émissions de CO₂ » possède deux tendances (figure 34). En effet, entre 250 et 300 kgeqCO₂, le ratio est compris entre 0,08 et 0,1 MPa.m³.kgeqCO₂⁻¹ et les mortiers associés possèdent des résistances en compression comprises entre 20 et 30 MPa.

CHAPITRE III : OPTIMISATION DE LA PROPORTION DES CONSTITUANTS DU LIANT TERNAIRE À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Au-delà de $300 \text{ kgeqCO}_2/\text{m}^3$, le ratio semble stable autour de $0,1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{kgeqCO}_2^{-1}$. Les résistances mécaniques des mortiers associés voient leur résistance en compression augmenter de manière proportionnelle avec leur quantité de CO_2 émise.

Dans ces conditions, il est donc nécessaire d'émettre environ $400 \text{ kgeqCO}_2/\text{m}^3$ pour atteindre une résistance mécanique supérieure à 40 MPa au bout de 24 heures tandis qu'une émission voisine de $310 \text{ kgeqCO}_2/\text{m}^3$ (point [310 ; 0,104]) permet d'atteindre 30 MPa (figure 34).

À 24 heures, le ratio « Résistance en flexion à 24 h/Émissions de CO_2 » est compris entre $0,014$ et $0,02 \text{ MPa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{kgeqCO}_2^{-1}$, la courbe rappelant celle d'une parabole tournée vers le bas (figure 35). Les valeurs extrêmes correspondent au liant « VI » (point [192 ; 0,013]) et au témoin 100 % ciment CEM I (point [445 ; 0,014]). Ces dernières sont faibles à cause de la résistance mécanique en flexion et de la quantité de CO_2 émise respectivement. Entre ces deux points, le ratio se situe entre $0,015$ et $0,020 \text{ MPa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{kgeqCO}_2^{-1}$ avec un optimum au point [310 ; 0,021]. Pour une émission de CO_2 inférieure à 300 kgeqCO_2 , la résistance en flexion des mortiers associés est globalement comprise entre 4 et $5,5 \text{ MPa}$.

Au-delà de $300 \text{ kgeqCO}_2/\text{m}^3$ émis, la résistance en flexion est supérieure à $5,5 \text{ MPa}$ voire à $6,5 \text{ MPa}$ en émettant plus de $400 \text{ kgeqCO}_2/\text{m}^3$.

Dans ces conditions, il est donc nécessaire d'émettre plus de 400 kgeqCO_2 pour atteindre une résistance mécanique en flexion supérieure à $6,5 \text{ MPa}$ au bout de 24 heures tandis qu'une émission voisine de 300 kgeqCO_2 permet d'atteindre $5,5 \text{ MPa}$.

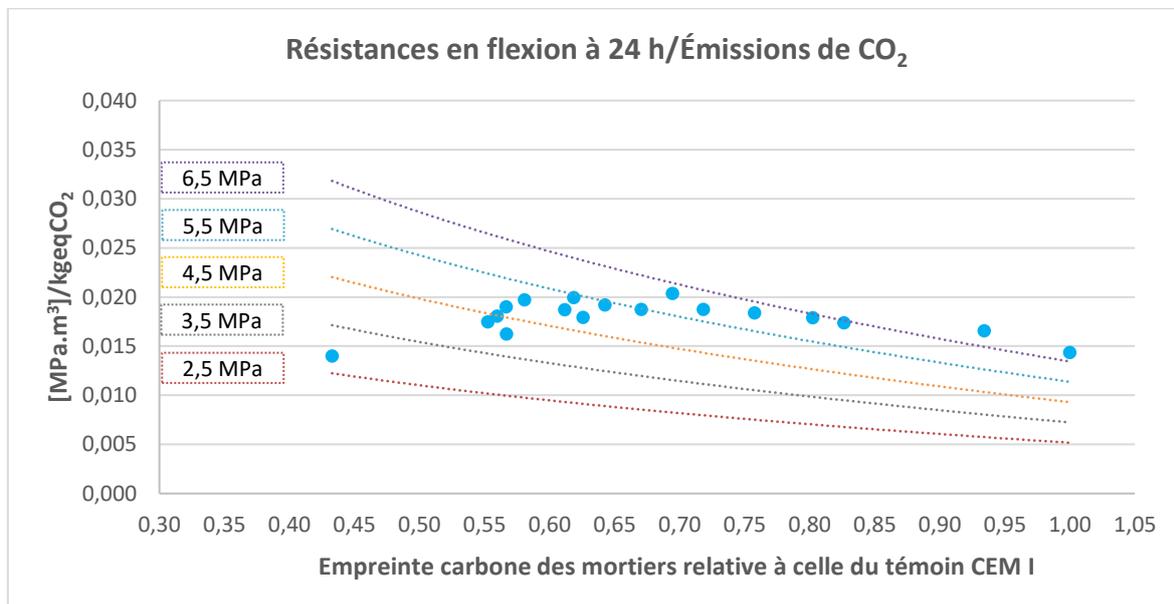


Figure 35 : Représentation du rendement du CO_2 vis-à-vis des résistances en flexion à 24 heures à température ambiante

À 28 jours, les différents ratios obtenus semblent voir leur valeur diminuer avec l'augmentation de la quantité de CO_2 émise (figure 36). Les ratios sont compris entre $0,18$ et $0,39 \text{ MPa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{kgeqCO}_2^{-1}$; le minimum correspond au témoin CEM I et le maximum au mortier qui contient le liant « VI ». Pour des valeurs d'émissions très proches, les ratios obtenus peuvent varier fortement (zones 1 et 2).

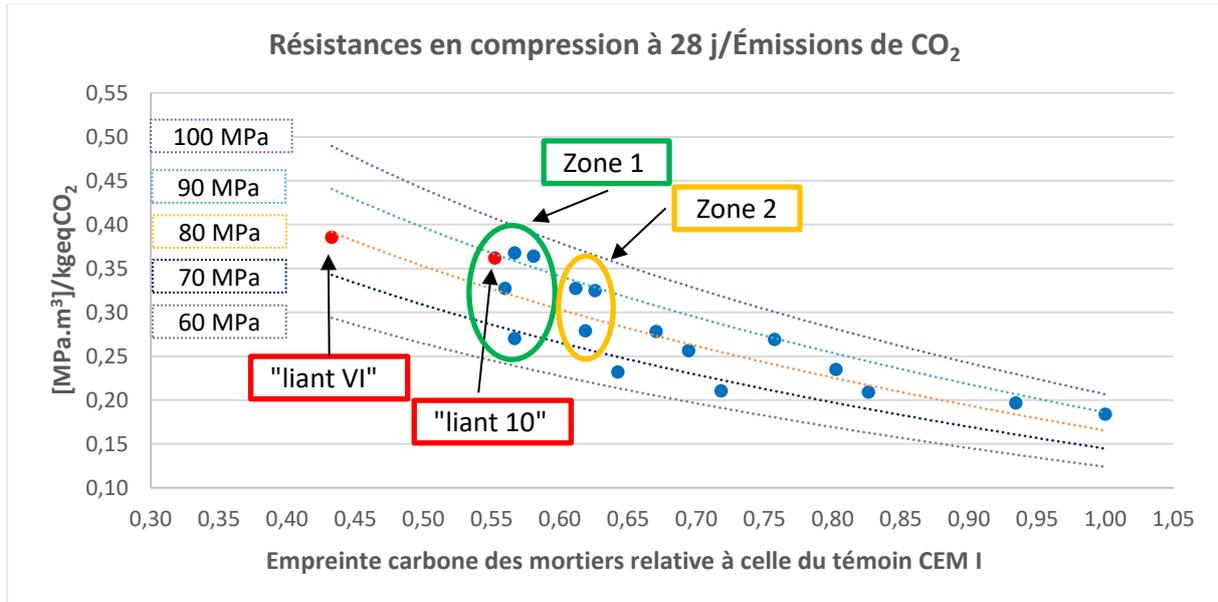


Figure 36 : Représentation du rendement du CO₂ vis-à-vis des résistances en compression à 28 jours à température ambiante

La zone 1 comprend cinq mortiers dont les ratios sont compris entre 0,27 et 0,37 MPa.m³.kgeqCO₂⁻¹ pour des émissions allant de 250 à 260 kgeqCO₂. De même dans la zone 2, les trois mortiers possèdent des ratios compris entre 0,29 et 0,33 MPa.m³.kgeqCO₂⁻¹ pour des émissions allant de 270 à 280 kgeqCO₂/m³. Au-delà de 280 kgeqCO₂/m³, les ratios sont plus dispersés et sont compris entre 0,17 et 0,27 MPa.m³.kgeqCO₂⁻¹. Les ratios associés aux mortiers possédant des résistances en compression maximales tout en émettant le moins de CO₂ se situent dans les zones 1 et 2. Ils sont suivis par le mortier incorporant le liant VI qui émet moins de 200 kg équivalent de CO₂ par m³ de mortier.

À 28 jours, les mortiers qui permettent d'associer résistance mécanique en compression élevée et faible émission de CO₂ par mètre cube de mortier sont les ceux incorporant d'une part le liant 40 % de clinker, 45 % de laitier et 15 % de calcaire (« liant VI ») et d'autre part le liant 53 % de clinker, 35 % de laitier et 12 % de calcaire (« liant 10 »).

4. Conclusion partielle

En considérant les critères techniques, économiques et environnementaux, certains liants ternaires ont ainsi été sélectionnés pour poursuivre leur optimisation en jouant sur d'autres leviers.

Uniquement en termes de performances mécaniques, le **liant « 14 »** à base de 70,5 % de clinker, 17,5 % de laitier de haut fourneau et 12 % de calcaire, était optimal à 7 jours et à 28 jours (indice d'activité en compression I_c respectivement de 1,06 et 1,12).

En associant les performances mécaniques et environnementales, le **liant « 10 »**, à base de 53 % de clinker, 35 % de laitier et 12 % de calcaire, ressortait comme étant l'optimum, avec un indice d'activité à 28 jours de 1,15, tout en permettant l'obtention de résistances équivalentes au témoin à 7 jours ($I_c = 0,997$). Ainsi le liant « 10 » a été sélectionné pour la suite du travail.

Techniquement, le liant « VI » ne permet pas l'obtention de résistances mécaniques intéressantes à court terme, en raison de la faible proportion de ciment. Cela a conduit notamment à une moins bonne activation du laitier. Néanmoins, au bout de 28 jours, sa résistance mécanique en flexion était supérieure à celle du témoin et celle en compression en était proche ($f_c = 0,91$). L'intérêt du liant « VI », en raison d'une future introduction des ciments CEM VI sur le marché, nous a conduit à poursuivre également son optimisation.

Ainsi, les deux liants ternaires utilisés dans les chapitres suivants sont :

- Liant « 10 » : 53 % « K + A » ; 35 % S ; 12 % L, dénommé par la suite « **53 K ; 35 S ; 12 L** » ou « **53** » ;
- Liant « VI » : 40 % « K + A » ; 45 % S ; 15 % L, dénommé par la suite « **40 K ; 45 S ; 15 L** » ou « **40** ».

Ces deux liants ternaires ne possèdent pas de résistances mécaniques à court terme très élevées lorsqu'ils durcissent à température ambiante. La poursuite de l'optimisation vise donc à améliorer ce critère, tout en garantissant des résistances mécaniques à plus long terme conformes aux attentes du cahier des charges.

Par ailleurs, afin d'estimer la sensibilité des solutions proposées, certains essais d'activation chimique ont également été réalisés sur le liant « **14** » (70,5 % « K + A » ; 17,5 % S ; 12 % L), dénommé par la suite « 70,5 K ; 17,5 S ; 12 L » ou « 70,5 » et sur le liant « **3** » dénommé par la suite « 57,1 K ; 26 S ; 16,9 L » ou « 57,1 ».

CHAPITRE IV : Activation chimique des liants ternaires sélectionnés à température ambiante

Les liants ternaires sélectionnés possèdent des performances mécaniques proches de celles obtenues en présence de 100 % de ciment Portland CEM I (80 MPa à 28 jours) au bout de 28 jours. Mais à plus court terme, particulièrement au démoulage (dans des conditions classiques issues de la norme [NF EN 196-1]), leurs résistances mécaniques est nettement plus faible que la référence. En effet, celle-ci est fortement impactée par la réduction de la quantité de clinker en présence de laitier et calcaire puisque l'hydratation du clinker est prépondérante vis-à-vis de la résistance mécanique à court terme.

Ce chapitre est consacré aux essais effectués dans le but d'accélérer le durcissement des liants ternaires sélectionnés en utilisant des activateurs chimiques. L'objectif visé, en termes de performances mécaniques, consiste à se rapprocher des résistances en flexion et compression du mortier témoin, soit respectivement 6,5 MPa et 45 MPa au démoulage. D'un point de vue industriel, certaines pièces, notamment produites en béton armé, nécessitent une résistance mécanique à la compression minimale de 15 MPa (mesurée sur cube 15 x 15 x 15 cm³) au démoulage, sans avoir été soumises à un traitement thermique. Cette partie de notre étude peut donc directement les concerner.

1. Choix des accélérateurs

Le laitier de haut fourneau est une addition hydraulique latente, nécessitant une activation qui peut être chimique. L'efficacité des activateurs chimiques minéraux est reliée aux cations et anions qui les constituent. Kantro a réalisé un classement des ions en fonction de leur efficacité [Taylor, 1997] :

Cations : $Ca^{2+} > Sr^{2+} > Ba^{2+} > Li^+ > K^+ > Na^+ > Cs^+ > Rb^+$
Anions : $Br^- = Cl^- > SCN^- > I^- > NO_3^- > ClO_4^-$

L'effet de ces anions et cations dépend de leur charge et de leur taille (l'ion Ca^{2+} est considéré comme étant le plus efficace). Au-dessus d'une certaine concentration, l'effet accélérateur n'est plus observé, les ions pouvant même devenir des retardateurs [Taylor, 1997].

D'autres éléments chimiques sont susceptibles d'avoir un effet sur la vitesse de prise du ciment car favorisant la précipitation de certains minéraux : les hydroxydes ou les sels basiques de magnésium, de zinc, de plomb ou des sels de calcium tels que des fluorures, borates, sulfates, phosphates, carbonates [Taylor, 1997]. Plusieurs de ces activateurs chimiques peuvent être difficiles à utiliser en usine de par leur dangerosité ou leur coût.

L'activation chimique du mélange ciment + laitier de haut fourneau a fait l'objet de nombreux travaux de recherches ([Gruyaert, 2011], [Jacquemot, 2014], [Gebregziabihier, 2015]), de même que l'activation seule du laitier de haut fourneau. Globalement, le laitier s'active par un agent qui peut être soit alcalin, soit sulfatique, soit une combinaison des deux types d'agent. Les activateurs agissent sur le laitier de haut fourneau mais également sur le clinker.

CHAPITRE IV : ACTIVATION CHIMIQUE DES LIANTS TERNAIRES SÉLECTIONNÉS À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Il s'avère que les activateurs efficaces en présence de laitier seul ne sont pas les mêmes dès lors que le laitier est mis en présence de ciment Portland [Jacquemot, 2014] ; par exemple, le carbonate de sodium permet l'accélération du durcissement du laitier seul, alors que son efficacité est réduite pour un mélange ciment + laitier. Cet impact négatif de la présence de clinker se retrouve dans l'étude de Marciano où le ciment « A », contenant 58 % de laitier, 5 % de calcaire et 37 % de clinker, conduit à de meilleures performances que le ciment « B » (44 % de laitier et 56 % de clinker) en présence de 1 % de Na_2CO_3 (tableau 18) [Marciano, 1997]. En revanche, l'utilisation de Na_2SO_4 à la place de Na_2CO_3 conduit aux meilleures performances initiales pour les ciments A et B. Ceci est en accord avec les travaux de Jacquemot qui indiquaient que pour un mélange CEM I + laitier, une adjuvantation mixte Na_2SO_4 et NaCl était intéressante [Jacquemot, 2014].

Tableau 18 : Détails des résultats en compression en fonction de l'activation des deux ciments [Marciano, 1997]

Ciment (99 %)	Activateurs (1 %)	Résistances en compression [MPa]			
		1 jour	3 jours	7 jours	28 jours
A (37 % K ; 58 % S ; 5 % L)	Référence	5,1	17,4	35,3	59,1
	K_2SO_4	8,1	21,2	35,2	49,8
	NaOH	7,2	15,7	23,0	33,8
	Na_2CO_3	6,9	17,3	26,7	37,4
	Na_2SO_4	8,6	21,0	32,7	47,1
B (56 % K ; 44 % S)	Référence	4,3	13,1	20,0	32,8
	K_2SO_4	7,2	15,7	22,4	34,7
	NaOH	6,5	14,1	19,1	29,5
	Na_2CO_3	5,6	14,1	18,7	30,6
	Na_2SO_4	7,6	16,1	22,5	33,8

Ces éléments bibliographiques, associés aux critères économiques, techniques et logistiques (facilité d'utilisation, présence dans le commerce) de notre cahier des charges, ont permis de sélectionner quatre activateurs :

- chlorure de sodium NaCl ;
- chlorure de calcium CaCl_2 ;
- sulfate de sodium Na_2SO_4 ;
- nitrate de sodium NaNO_3 .

Les activateurs ont été testés seuls et en couple. Les activateurs dont le cation est le sodium (NaCl , Na_2SO_4 , NaNO_3) ont été dosés en fonction de la proportion en alcalins équivalents par rapport au laitier ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ relatif au laitier), tandis que le chlorure de calcium a été dosé par rapport au liant total.

2. Propriétés des liants ternaires activés chimiquement

En se basant sur les résultats de thèse de Jacquemot [Jacquemot, 2014] ainsi que sur la littérature, plusieurs dosages ont été testés (nomenclature : « **dosage activateur** »). Les activateurs chimiques utilisés étaient sous forme de poudre, le sulfate de sodium, le nitrate de sodium et le chlorure de sodium étant sous forme anhydre. Cette fois, l'eau structurale du sel de chlorure utilisé ($\text{CaCl}_2, 2\text{H}_2\text{O}$) était prise en compte dans le dosage de l'eau totale afin de rester à un rapport E_{eff}/L de 0,4.

**CHAPITRE IV : ACTIVATION CHIMIQUE DES LIANTS TERNAIRES SÉLECTIONNÉS
À TEMPÉRATURE AMBIANTE**

Pour chaque essai, l'activateur en poudre était préalablement dissout dans une partie de l'eau de gâchage, garantissant ainsi l'homogénéité du mélange.

2.1. Influence du chlorure de calcium

Le chlorure de calcium est connu pour être un activateur puissant de l'hydratation du ciment Portland. Dans la norme NF EN 206/CN, sa présence est exclue pour la production de béton utilisé pour des structures armées. Il peut néanmoins être utilisé dans tous les autres produits non armés. L'activateur a été introduit à hauteur de trois pourcentages massiques par rapport à la quantité de liant total (0,5 %, 1 % et 2 %). Il a été utilisé avec les liants « 53 » et « 57,1 » (tableau 19).

Tableau 19 : Influence de la présence de chlorure de calcium

	Témoïn PLN	« 53 » + 0,5 CC	« 53 » + 2 CC	« 57,1 » + 0,5 CC	« 57,1 » + 2 CC
Proportions massiques [g]					
Ciment	900,0	499,5		538,1	
Laitier	0	315,0		234,0	
Addition calcaire	0	85,5		127,9	
CaCl ₂ , 2H ₂ O (« CC »)	0	4,5	18,0	4,5	18,0
Sable CEN 0/2	2 700,0	2 700,0		2 700,0	
Eau d'ajout (E _{eff} /L=0,4)	360,0	359,3	357,0	359,5	258,0
SP (0,25 %/L)	2,3	2,3		2,3	
Caractéristiques à l'état frais					
Étalement à 5' [mm]	160,0	182,5	160,0	187,5	165,0
Ressuage [visuel]	Non	Faible	Non	Faible	Non
ρ [kg/m ³]	2 285,0	2 330,0	2 180,0	2 290,0	2 290,0
Air occlus [%]	3,5	1,25	4,65	2,5	4,2
Caractéristiques à l'état durci au démoulage (24 h)					
ρ [kg/m ³]	2 285,0	2 320,0	2 170,0	2 280,0	2 290,0
R. en compression [MPa]	44,9	25,2	25,3	28,2	28,2
R. en flexion [MPa]	6,4	4,9	4,4	5,3	4,6

« CC » : chlorure de calcium CaCl₂, « 53 » : 53 % CEM I + 35 % laitier + 12 % addition calcaire, « 57,1 » : 57,1 % CEM I + 26 % laitier + 16,9 % addition calcaire ; « PLN » : Port-la-Nouvelle.

Les travaux de Jacquemot ont montré que le chlorure de calcium n'influait pas particulièrement la maniabilité du mortier [Jacquemot, 2014]. L'effet principal du chlorure de calcium serait de modifier la morphologie des silicates de calcium hydratés (C-S-H) (croissance radiale plus prononcée autour des grains de clinker) qui précipitent à la surface des grains de ciment [Begarín, 2012]. Ce mécanisme permettrait à la fois :

- de connecter les particules de solide entre elles plus rapidement et donc d'abaisser l'avancement réactionnel critique nécessaire pour avoir la percolation des particules de solide, d'où de meilleures performances constatées à court terme ;
- de repousser la formation d'une barrière diffusionnelle d'hydrates autour des grains de ciment anhydres à des avancements réactionnels plus élevés, d'où de meilleures performances observées à court et moyen terme.

CHAPITRE IV : ACTIVATION CHIMIQUE DES LIANTS TERNAIRES SÉLECTIONNÉS À TEMPÉRATURE AMBIANTE

L'introduction du chlorure de calcium dans le béton entrainerait également une élévation de la température, provoquant ainsi l'accélération des réactions d'hydratation [Taylor, 1997].

Les résultats obtenus en présence des liants ternaires « 53 » et « 57,1 » indiquent que l'augmentation de la quantité de chlorure de calcium (passage de 0,5 % à 2 %) engendre une diminution de l'étalement des mortiers à l'état frais mesurée au bout de 5 minutes (comparativement à l'étalement du mortier témoin) (tableau 20). Cette diminution de l'étalement se traduit bien par une accélération de l'hydratation, conduisant à une augmentation de la résistance mécanique pour un dosage de 0,5 % : résistances en compression (+ 13 %) et en flexion (+ 20 %) pour le liant « 53 ». L'amélioration des performances n'est toutefois pas proportionnelle à la quantité d'activateur, ce dernier pouvant même devenir néfaste ; la performance en flexion diminue de 10 % pour le liant « 53 » et de 14 % pour le liant « 57,1 » en présence de 2 % de chlorure de calcium. Toutefois, même avec 0,5 % de CaCl_2 , les résistances mécaniques en flexion et compression obtenues avec ces deux liants ternaires sont systématiquement inférieures aux résistances du témoin à 24 heures (figures 37 et 38).

Ces résultats ne sont donc pas en accord avec ceux de Taylor réalisés sur mortiers à base de ciment Portland CEM I. En effet, l'activation d'une pâte de ciment par 2 % de CaCl_2 par rapport au ciment (pour un rapport E/C = 0,5), permettrait de doubler les performances mécaniques en compression, expliqué par l'action sur l'alite qui diminuerait le temps de prise en passant de 3 heures à 1 heure [Taylor, 1997].

Ainsi, le CaCl_2 agirait principalement sur le clinker dans nos mélanges ternaires et l'effet resterait modeste par rapport à un CEM I en raison de la plus faible quantité de CEM I dans nos deux mélanges étudiés. C'est la raison pour laquelle le liant « 40 » correspondant au liant « VI » n'a pas été étudié en présence de CaCl_2 .

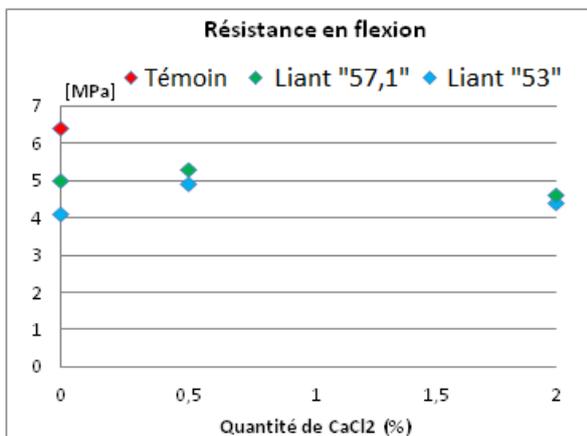


Figure 37 : Résistances en flexion en fonction du taux de CaCl_2 des mortiers étudiés à 24 heures à température ambiante

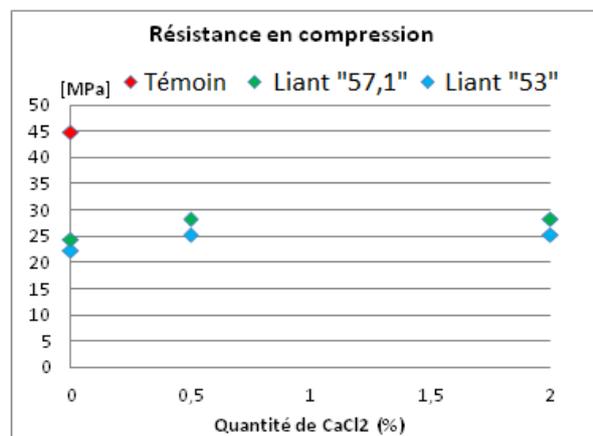


Figure 38 : Résistance en compression en fonction du taux de CaCl_2 des mortiers étudiés à 24 heures à température ambiante

2.2. Influence des sels de sodium

Dans cette partie, trois sels de sodium ont été étudiés, soit seuls, soit couplés. Les anions testés étaient l'anion sulfate « SO_4^{2-} », l'anion nitrate « NO_3^- » et l'anion chlorure « Cl^- ». D'un point de vue technique, l'ajout de sulfate peut avoir une influence quant au phénomène de réaction sulfatique interne, dès lors que la température dépasse 65 °C pendant plus de 4 heures au cœur du béton (extrait des [Recommandations pour la RSI, 2017]). Concernant les ions nitrates, le contexte normatif ne présente aucune restriction contrairement au cas des chlorures comme explicité dans le paragraphe précédent.

2.2.1. Activation par du sulfate de sodium

Le sulfate de sodium a été introduit à six pourcentages différents dans le liant ternaire « 40 ». Le sulfate de sodium étant sous forme anhydre, l'eau d'ajout était égale à l'eau totale ; le rapport E_{eff}/L a été maintenu à 0,4 avec une quantité de superplastifiant de 0,25 % par rapport au liant total.

Tableau 20 : Résultats d'essais des mortiers activés par du sulfate de sodium

	« 40 »	« 40 » + 0,5 NS	« 40 » + 1 NS	« 40 » + 2 NS	« 40 » + 3 NS	« 40 » + 4 NS	« 40 » + 5 NS	
Proportions massiques [g]								
Ciment	942,4							
Laitier	1 012,5							
Addition calcaire	295,1							
Na₂SO₄ (« NS »)	0	11,5	23,0	46,0	69,0	92,0	115,0	
Sable CEN 0/2	6 750,0							
Eau d'ajout ($E_{\text{eff}}/L = 0,4$)	900,0							
SP (0,25 %/L)	5,6							
Caractéristiques à l'état frais								
Étalement à 5' [mm]	190,0	200,0	170,0	150,0	120,0	110,0	120,0	
Ressuage [visuel]	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	
ρ [kg/m ³]	2 285,0	2 315,0	2 260,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
Air occlus [%]	2,8	2,0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
Caractéristiques à l'état durci								
ρ [kg/m ³]	1j	2 240,0	2 295,0	2 260,0	2 295,0	2 255,0	2 255,0	2 265,0
Résist. en compression [MPa]	1j	11,9	16,7	18,4	19,6	14,7	13,8	17,1
	28j	74,3	69,4	66,0	58,0	51,7	53,0	53,6
	90j	80,4	76,7	69,9	65,4	n.d.	n.d.	60,1
Résist. en flexion [MPa]	1j	2,7	4,0	4,0	4,6	3,2	3,2	3,9
	28j	11,7	12,3	13,1	11,7	10,2	10,6	11,8
	90j	11,6	11,6	11,5	11,9	n.d.	n.d.	9,5
Caractéristiques économiques et environnementales (mesurées sur 1 m³ de mortier) *								
Coût [€/m ³]	88,7	90,3	91,9	95,1	98,3	101,5	104,7	
Coût (%/témoin CEM I)	85,1	86,7	88,2	91,3	94,3	97,4	100,5	
Émissions CO ₂ [kgeqCO ₂ /m ³]	192,7	193,0	193,3	193,9	194,6	195,2	195,8	
Émissions CO ₂ (%/témoin CEM I)	43,3	43,3	43,4	43,5	43,7	43,8	44,0	

« n.d. » : non déterminé ; « 40 » : 40 % CEM I + 45 % laitier + 15 % calcaire ; « Na₂SO₄ (« NS ») » : sulfate de sodium.

* Les calculs ont été réalisés en utilisant une valeur de masse volumique réelle moyenne : 2 300 kg/m³(§ 3.2).

CHAPITRE IV : ACTIVATION CHIMIQUE DES LIANTS TERNAIRES SÉLECTIONNÉS À TEMPÉRATURE AMBIANTE

À l'état frais, l'ajout de 0,5 % de sulfate de sodium améliore l'étalement. Au-delà, cette propriété diminue jusqu'à obtenir devenir nulle pour un mortier contenant 4 % de sulfate de sodium. Cette tendance n'avait pas été observée dans des mortiers à base de 50 % de laitier + 50 % de ciment n'utilisant pas de superplastifiant [Jacquemot, 2014].

L'ajout de sulfate de sodium en tant qu'activateur semble intéressant sur le liant « 40 » principalement pour les résistances mécaniques à 24 heures (figures 39 et 40). En effet, à hauteur de 2 %, il permet de quasiment doubler les résistances en compression et en flexion. Cependant, cette activation ne se retrouve pas pour la résistance en compression aux échéances de 28 et 90 jours puisque le liant « 40 » non activé obtient les meilleurs résultats. D'une façon générale, on note à ces échéances une diminution de la résistance en compression avec une quantité croissante de sulfate de sodium.

L'impact d'une quantité croissante de sulfate de sodium diffère pour la résistance en flexion. L'ajout de sulfate de sodium jusqu'à 2 % permet de maintenir voire d'améliorer les performances en flexion à toutes les échéances. De plus fortes concentrations conduisent à une diminution de la performance par rapport au liant « 40 » non activé. Néanmoins, la résistance en flexion pour le liant « 40 » activé ou non reste globalement supérieure à celle du témoin CEM I à 28 ou 90 jours. À noter en revanche, que le témoin CEM I reste bien meilleur à l'échéance de 24 heures.

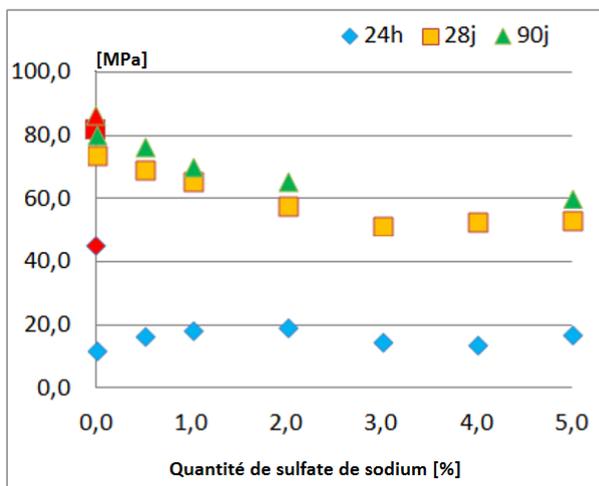


Figure 39 : Liant « 40 » activé au sulfate de sodium à température ambiante - Résistances en compression

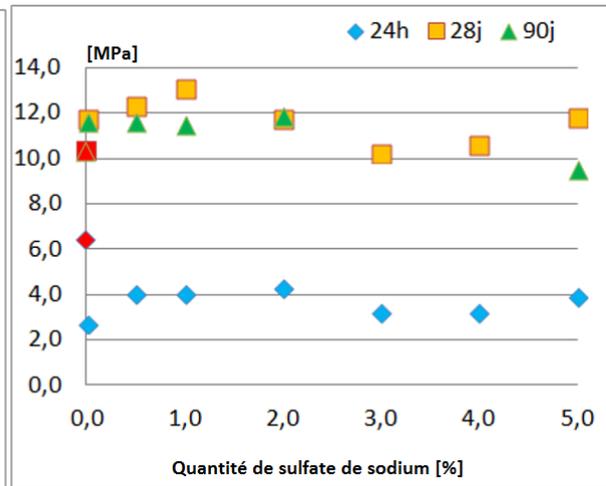


Figure 40 : Liant « 40 » activé au sulfate de sodium à température ambiante - Résistances en flexion

Légende commune aux figures 39 et 40 : les signes en rouge sont les résistances du mortier témoin 100 % CEM I.

Nos résultats relatifs à la résistance en compression sont en accord avec les travaux de Marciano qui démontrent que la substitution de 1 % de ciment par du sulfate de sodium améliore les performances à 24 heures, cette amélioration étant directement reliée à la teneur en activateur. Cette tendance est observée jusque l'âge de 3 jours, puis au-delà, les résistances du ciment A (37 % clinker + 58 % laitier + 5 % calcaire) diminuent fortement avec la teneur en sulfate de sodium (68 % par rapport au témoin pour une teneur en Na_2SO_4 de 2 %).

CHAPITRE IV : ACTIVATION CHIMIQUE DES LIANTS TERNAIRES SÉLECTIONNÉS À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Les valeurs tendent à se stabiliser pour le ciment B (56 % clinker + 44 % laitier) activé (90 % par rapport au témoin pour une teneur de 1 %) (figure 41) [Marciano, 1997].

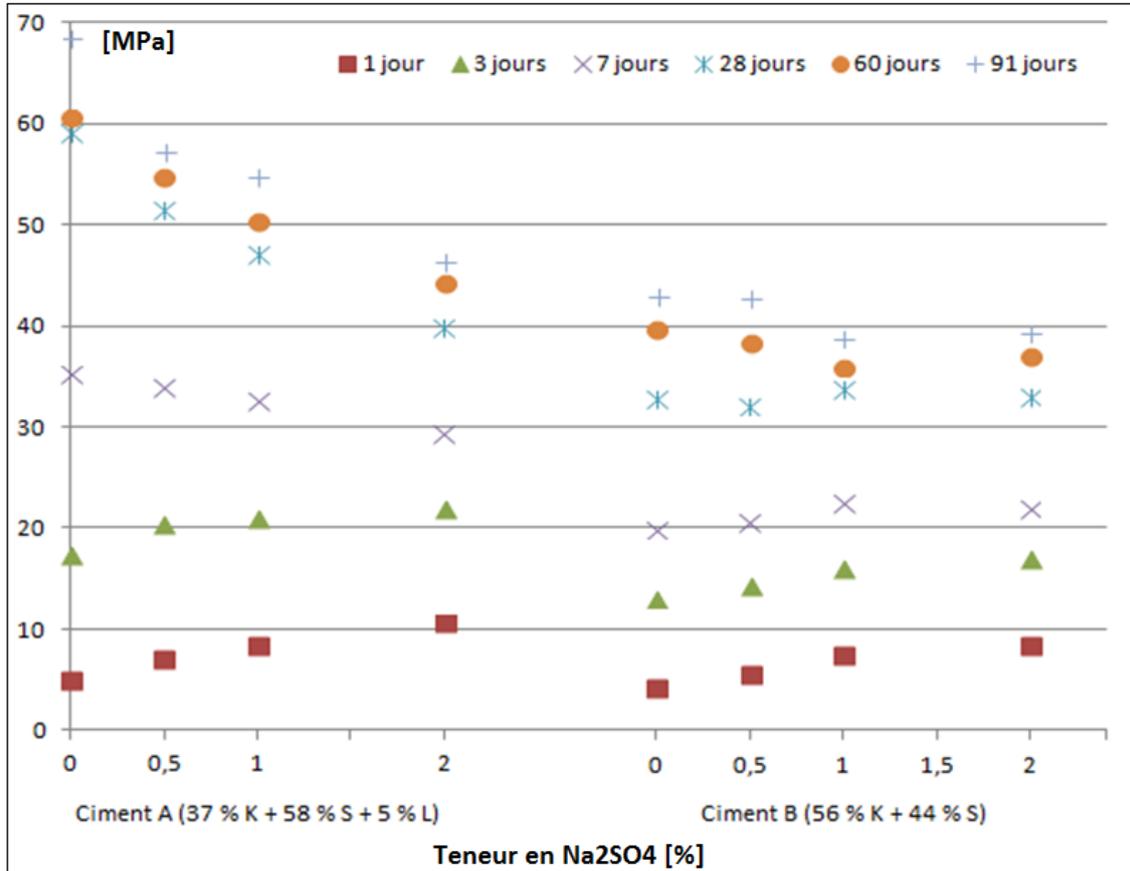


Figure 41 : Représentation des résistances mécaniques en compression en fonction de la teneur en sulfate de sodium à température ambiante [Marciano, 1997]

L'activation par du sulfate de sodium semble donc bénéfique pour les performances en flexion aux trois échéances mesurées jusqu'à 2 % d'incorporation et en compression à 24 heures. En revanche, elle peut être pénalisante pour les performances en compression à plus long terme, tout en restant à des valeurs supérieures à 50 MPa au bout de 28 jours.

2.2.2. Activation par du nitrate de sodium

Le nitrate de sodium a été introduit dans le liant « 40 » à quatre pourcentages différents (tableau 21). Le nitrate de sodium étant sous forme anhydre, l'eau d'ajout était égale à l'eau totale (rapport $E_{\text{eff}}/L = 0,4$) (tableau 21).

À l'état frais, l'ajout de nitrate de sodium augmente la maniabilité des mortiers et la quantité ne semble pas avoir d'influence. En revanche, à partir de 2 %, la présence de nitrate augmente l'air occlus, ce qui diminue la masse volumique (- 1 %), par rapport au mortier non activé.

Les figures 42 et 43 représentent les résultats de résistances en flexion et compression des mortiers activés au nitrate de sodium. À 24 heures, l'ajout de nitrate de sodium permet l'amélioration des performances en flexion et compression par rapport au mortier non activé, tout en restant plus faibles que le témoin 100 % ciment.

**CHAPITRE IV : ACTIVATION CHIMIQUE DES LIANTS TERNAIRES SÉLECTIONNÉS
À TEMPÉRATURE AMBIANTE**

Tableau 21 : Résultats d'essais des mortiers activés par du nitrate de sodium

	« 40 »	« 40 » + 0,5 NN	« 40 » + 1 NN	« 40 » + 2 NN	« 40 » + 5 NN	
Proportions massiques [g]						
Ciment	942,4					
Laitier	1 012,5					
Addition calcaire	295,1					
NaNO ₃ (« NN »)	0	6,9	13,8	27,5	68,8	
Sable CEN 0/2	6 750,0					
Eau d'ajout (E _{eff} /L = 0,4)	900,0					
SP (0,25 %/L)	5,6					
Caractéristiques à l'état frais						
Étalement à 5' [mm]	190,0	225,0	220,0	230,0	210,0	
Ressuage [visuel]	Oui	Beaucoup	Oui	Oui	Beaucoup	
Masse volumique [kg/m ³]	2 285,0	2 290,0	2 295,0	2 265,0	2 255,0	
Air occlus [%]	2,8	2,1	2,5	3,8	3,5	
Caractéristiques à l'état durci						
ρ [kg/m ³]	1 j	2 240,0	2 265,0	2 260,0	2 245,0	2 250,0
Résistance en compression [MPa]	1 j	11,9	14,5	16,4	13,8	13,9
	28 j	74,3	75,8	73,4	67,9	57,6
	90 j	80,4	83,7	79,8	69,4	62,5
Résistance en flexion [MPa]	1 j	2,7	3,8	4,0	3,4	3,7
	28 j	11,7	12,4	12,4	12,1	12,2
	90 j	11,6	11,7	11,4	11,2	11,2
Caractéristiques économiques et environnementales (mesurées sur 1 m³ de mortier) *						
Coût [€/m ³]	88,7	96,5	105,8	120,9	168,7	
Coût (%/témoin CEM I)	85,1	92,6	101,5	116,0	161,9	
Émissions CO ₂ [kgeqCO ₂ /m ³]	192,7	201,2	210,2	227,7	279,7	
Émissions CO ₂ (%/témoin CEM I)	43,3	45,2	47,2	51,1	62,8	

« NaNO₃ (« NN ») » : Nitrate de sodium.

* Les calculs ont été réalisés en utilisant une valeur de masse volumique réelle moyenne : 2 300 kg/m³(§ 3.2).

L'ajout de 1 %, estimé comme optimal, permet de multiplier par environ 1,4 les performances en compression et par environ 1,5 les performances en flexion à 24 heures.

À l'échéance de 28 jours, les résistances en compression du mortier « 40 » non activé sont proches de celles du témoin 100 % ciment (- 8 %). L'ajout de 0,5 % de nitrate de sodium permet d'atteindre 75,8 MPa, soit + 2 % par rapport au mortier non activé, ainsi qu'une équivalence de résistance à 90 jours est similaire par rapport au témoin.

À partir de 28 jours, les performances en flexion du mortier non activé dépassent celles du témoin (+ 13 %) et atteignent + 20 % en ajoutant 0,5 % ou 1 % de nitrate de sodium. Les performances en flexion entre 28 jours et 90 jours diminuent (moyenne de - 1 MPa).

CHAPITRE IV : ACTIVATION CHIMIQUE DES LIANTS TERNAIRES SÉLECTIONNÉS À TEMPÉRATURE AMBIANTE

En augmentant encore la quantité d'activateur, un palier est observé. De façon opposée, un ajout supplémentaire d'activateur engendre une diminution non négligeable des performances en compression (- 22 % par rapport au mortier non activé).

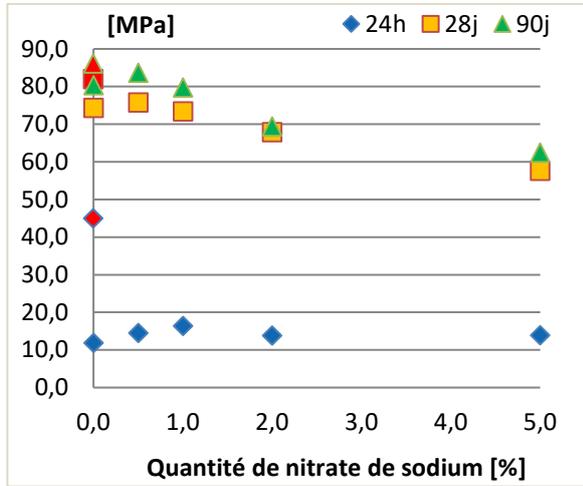


Figure 42 : Liant « 40 » activé au nitrate de sodium à température ambiante - Résistances en compression

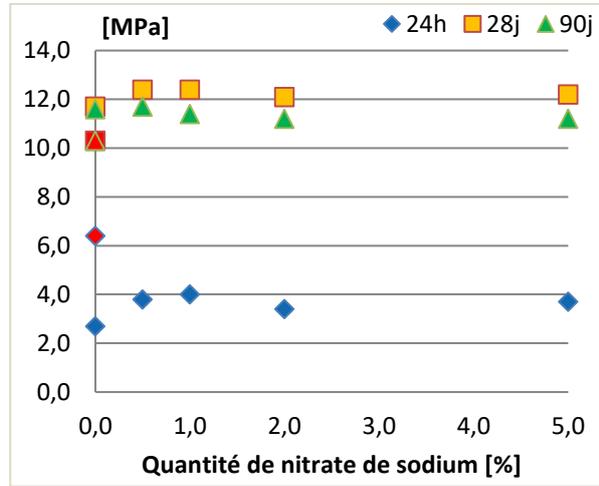


Figure 43 : Liant « 40 » activé au nitrate de sodium à température ambiante - Résistances en flexion

Légende commune aux figures 42 et 43 : les signes en rouge sont les résistances du mortier témoin 100 % CEM I.

L'ajout de nitrate de sodium semble donc pertinent à hauteur de 0,5 % afin d'assurer une amélioration des performances mécaniques en flexion et compression aux trois échéances mesurées. La durabilité de ce système activé devrait néanmoins être étudiée (résistances mesurées à plus long terme que 90 jours) afin de s'assurer que les performances en flexion se stabilisent.

2.2.3. Couplage du sulfate de sodium et du nitrate de sodium

Le liant activé est le liant « 40 ». Le couplage des deux activateurs étudiés précédemment avait pour objectif d'évaluer une synergie potentielle entre eux. Les teneurs utilisées pour chaque activateur ont été choisies en se basant sur les résultats obtenus pour les activations seules (paragraphes 2.2.1 et 2.2.2).

Tableau 22 : Résultats d'essais des mortiers activés par du sulfate de sodium et du nitrate de sodium

	Témoin PLN	« 40 »	« 40 » + 1 NN + 1 NS	« 40 » + 1 NN + 2 NS	« 40 » + 1 NN + 5 NS
Proportions massiques [g]					
Ciment	900,0	942,4			
Laitier	0	1 012,5			
Addition calcaire	0	295,1			
Na ₂ SO ₄ (« NS »)	0	0	23,0	46,0	115,0
NaNO ₃ (« NN »)	0	0	13,8	13,8	13,8
Sable CEN 0/2	2 700,0	6 750,0			
Eau d'ajout (E _{eff} /L = 0,4)	360,0	900,0			
SP (0,25 %/L)	2,3	5,6			

**CHAPITRE IV : ACTIVATION CHIMIQUE DES LIANTS TERNAIRES SÉLECTIONNÉS
À TEMPÉRATURE AMBIANTE**

	Témoin PLN	« 40 »	« 40 » + 1 NN + 1 NS	« 40 » + 1 NN + 2 NS	« 40 » + 1 NN + 5 NS
Caractéristiques à l'état frais					
Étalement à 5' [mm]	160,0	190,0	150,0	150,0	150,0
Ressuage [visuel]	Non	Oui	Non	Non	Non
Caractéristiques à l'état durci					
ρ [kg/m ³]	1 j	2 285,0	n.d.	n.d.	n.d.
Résistance en compression [MPa]	1 j	44,9	11,9	16,2	16,9
	28 j	81,9	74,3	55,2	59,1
Résistance en flexion [MPa]	1 j	6,4	2,7	3,5	4,1
	28 j	10,3	11,7	11,9	12,3
Caractéristiques économiques et environnementales (mesurées sur 1 m³ de mortier) *					
Coût [€/m ³]		104,2	88,7	108,0	111,2
Coût (%/témoin CEM I)		100,0	85,1	103,6	106,7
Émissions CO ₂ [kgeqCO ₂ /m ³]		445,4	192,7	210,8	211,5
Émissions CO ₂ (%/témoin CEM I)		100,0	43,3	47,3	47,5

« n.d. » : non déterminé ; « Na₂SO₄ (« NS ») » : sulfate de sodium ; « NaNO₃ (« NN ») » : nitrate de sodium ; « PLN » : Port-la-Nouvelle.

* Les calculs ont été réalisés en utilisant une valeur de masse volumique réelle moyenne : 2 300 kg/m³ (§ 3.2).

Les figures 44 et 45 représentent les résultats de résistances en flexion et compression des mortiers activés au nitrate de sodium et sulfate de sodium.

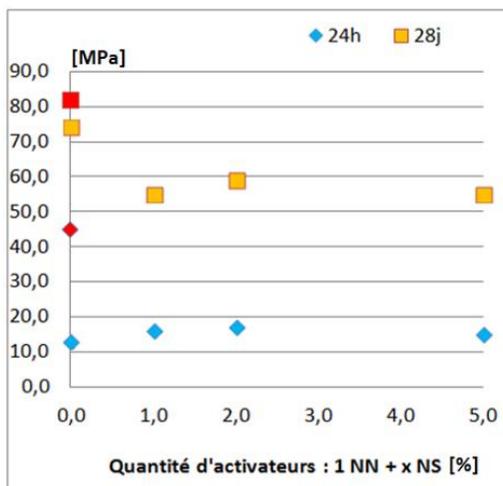


Figure 44 : Liant « 40 » activé au nitrate de sodium et au sulfate de sodium à température ambiante - Résistances en compression

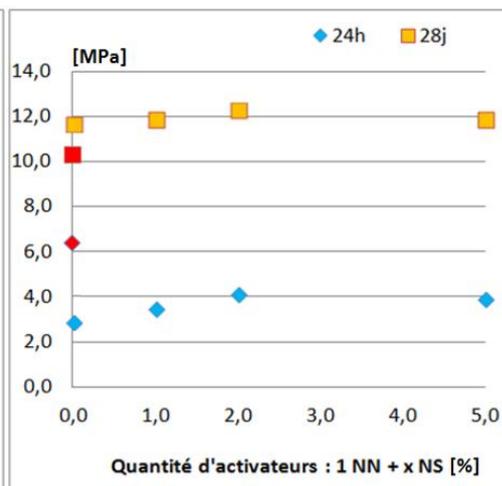


Figure 45 : Liant « 40 » activé au nitrate de sodium et au sulfate de sodium à température ambiante - Résistances en flexion

Légende commune aux figures 44 et 45 : les signes en rouge sont les résistances du mortier témoin 100 % CEM I.

Le couplage des deux activateurs à hauteur de 1 % de nitrate et 2 % de sulfate permet d'augmenter les performances à 24 heures en flexion (+ 50 %) et en compression (+ 40 %). Les mesures réalisées à 28 jours mettent en évidence une chute des résistances mécaniques en compression des mortiers activés tandis que les performances en flexion sont similaires à celles obtenues avec le mortier non activé.

**CHAPITRE IV : ACTIVATION CHIMIQUE DES LIANTS TERNAIRES SÉLECTIONNÉS
À TEMPÉRATURE AMBIANTE**

2.2.4. Activation couplée avec du sulfate de sodium et du chlorure de sodium

Dans cette partie, le liant « 53 » a été activé en présence de sulfate de sodium auquel du chlorure de sodium a été ajouté. La quantité maximale a été fixée à 1 %. On peut également noter que la quantité de superplastifiant a été modifiée afin d'obtenir un étalement qui reste voisin à celui du témoin (mortier « 53 » + 0,5 NC + 1 NS) (tableau 23).

À l'état frais, l'ajout des activateurs entraîne une forte diminution de l'étalement, s'accroissant en augmentant la quantité d'activateurs.

En parallèle, la nature de l'activateur ne semble pas influencer la maniabilité du mortier.

Tableau 23 : Influence du dosage en activateurs dans les mortiers à base du liant « 53 »

	Témoin PLN	« 53 »	« 53 » + 0,5 NC + 0,5 NS	« 53 » + 1 NC + 0,5 NS	« 53 » + 0,5 NC + 1 NS
Proportions massiques [g]					
Ciment	900,0	1 248,7			
Laitier	0	787,5			
Addition calcaire	0	213,8			
NaCl (« NC »)	0	0	3,7	7,4	3,7
Na ₂ SO ₄ (« NS »)	0	0	9,0	9,0	18
Sable CEN 0/2	2 700,0	6 750,0			
Eau d'ajout (E _{eff} /L = 0,4)	360,0	900,0			
SP (%/L)	2,3 (0,25 %)	5,6 (0,25 %)			6,3 (0,28 %)
Caractéristiques à l'état frais					
Étalement à 5' [mm]	160,0	240,0	170,0	170,0	155,0
Ressuage [visuel]	Non	Oui	Non	Non	Non
Masse volumique [kg/m ³]	2 285,0	2 325,0	2 310,0	2 280,0	2 290,0
Air occlus [%]	3,5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Caractéristiques à l'état durci à 24 h					
Masse volumique [kg/m ³]	2 285,0	2 330,0	2 305,0	2 270,0	2 285,0
R. en compression [MPa]	44,9	22,2	29,4	24,7	24,4
R. en flexion [MPa]	6,4	5,1	5,6	5,2	5,3
Caractéristiques économiques et environnementales (mesurées sur 1 m³ de mortier) *					
Coût [€/m ³]	104,2	93,4	94,8	95,0	96,1
Coût (%/témoin CEM I)	100,0	89,6	91,0	91,2	92,2
Émissions CO ₂ [kgeqCO ₂ /m ³]	445,4	258,6	258,9	259,0	259,2
Émissions CO ₂ (%/témoin CEM I)	100,0	58,1	58,1	58,2	58,2

« n.d. » : non déterminé ; « NaCl (« NC ») » : chlorure de sodium ; « Na₂SO₄ (« NS ») » : sulfate de sodium.

* Les calculs ont été réalisés en utilisant une valeur de masse volumique réelle moyenne : 2 300 kg/m³ (§ 3.2).

Les figures 46 et 47 présentent les résultats de la résistance en compression. L'ajout d'activateurs permet d'améliorer les performances des mortiers à 24 heures, en flexion et en compression. Le fait de doubler la quantité de sulfate de sodium en conservant la même quantité de chlorure de sodium (0,5 %) n'améliore pas les performances et semble même avoir un léger impact négatif sur la compression (diminution d'environ 17 %).

CHAPITRE IV : ACTIVATION CHIMIQUE DES LIANTS TERNAIRES SÉLECTIONNÉS À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Cette tendance est également observée lorsque la quantité de chlorure de sodium est doublée, toujours en présence de 1 % de sulfate de sodium (perte de 8 % en flexion et de 16 %).

Les résistances en flexion et compression sont donc maximales pour des teneurs en sulfate de sodium et chlorure de sodium de 0,5 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ relatives à la quantité de laitier.

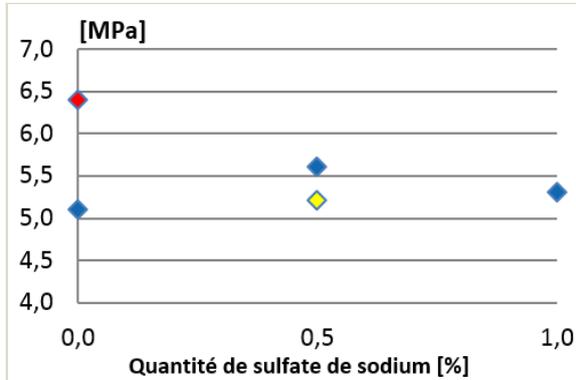


Figure 46 : Liant « 53 » activé au chlorure de sodium et au sulfate de sodium à température ambiante - Résistances en compression à 24 heures

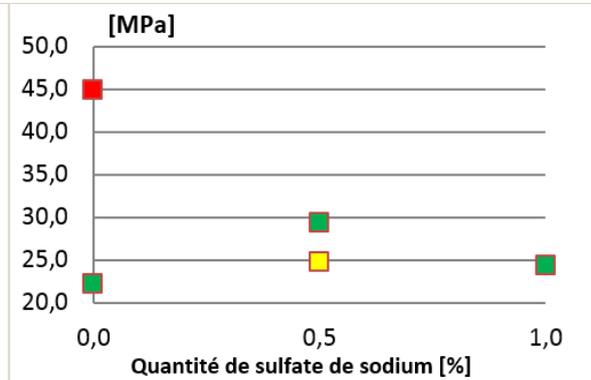


Figure 47 : Liant « 53 » activé au chlorure de sodium et au sulfate de sodium à température ambiante - Résistances en flexion à 24 heures

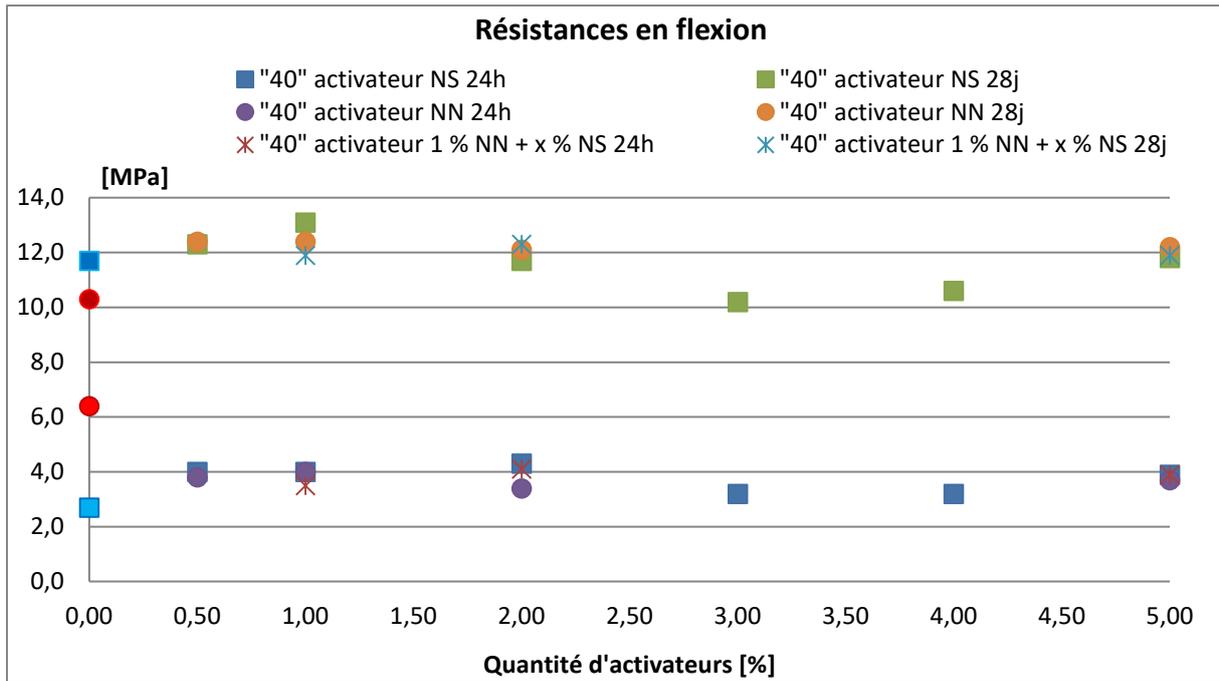
Légende commune aux figures 46 et 47 : Témoin CEM I PLN : en rouge ;
Présence de 0,5 % de chlorure de sodium : en bleu/vert ;
Présence de 1 % de chlorure de sodium : en jaune.

3. Discussion

3.1. Résultats obtenus

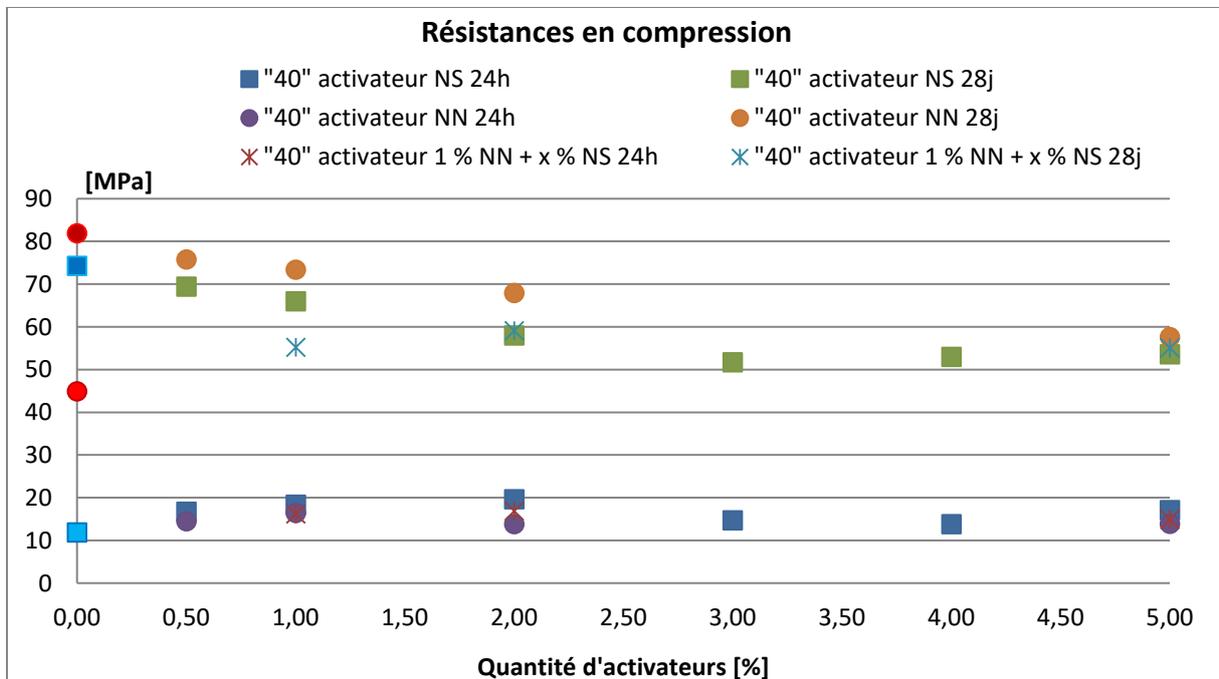
Une comparaison des résultats obtenus avec le liant « 40 » a été réalisée afin d'évaluer l'intérêt de la nature de(s) l'activateur(s) et sa (leur) quantité(s) d'incorporation. Globalement, l'activation chimique permet l'amélioration des performances au démoulage à 24 heures, que ce soit en flexion (+ 48 % maximum) comme en compression (+ 65 % maximum) mais ces dernières restent éloignées du témoin (figures 48 et 49). L'évolution des performances n'est pas proportionnelle à la quantité d'activateurs. L'optimum semble atteint pour des mortiers incorporant 2 % de sulfate de sodium, suivis des mortiers intégrant 1 % de sulfate de sodium ou de nitrate de sodium. Au-delà, les performances n'évoluent plus et restent inférieures au mortier non activé.

**CHAPITRE IV : ACTIVATION CHIMIQUE DES LIANTS TERNAIRES SÉLECTIONNÉS
À TEMPÉRATURE AMBIANTE**



Légende : en rouge le mortier témoin 100 % CEM I PLN à 24 heures et 28 jours ($x = 0$) ;
en bleu le mortier témoin « 40 » non activé à 24 heures et 28 jours ($x = 0$) ;
« NS » : sulfate de sodium ; « NN » : nitrate de sodium.

Figure 48 : Résistances mécaniques en flexion obtenues pour des mortiers à base de liant « 40 » activés avec du sulfate de sodium (NS), nitrate de sodium (NN) ou les deux (1 % NN + x % NS)



Légende : en rouge le mortier témoin 100 % CEM I PLN à 24 heures et 28 jours ($x = 0$) ;
en bleu le mortier témoin « 40 » non activé à 24 heures et 28 jours ($x = 0$) ;
« NS » : sulfate de sodium ; « NN » : nitrate de sodium.

Figure 49 : Résistances mécaniques en compression obtenues pour des mortiers à base de liant « 40 » activés avec du sulfate de sodium (NS), nitrate de sodium (NN) ou les deux (1 % NN + x % NS)

CHAPITRE IV : ACTIVATION CHIMIQUE DES LIANTS TERNAIRES SÉLECTIONNÉS À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Au bout de 28 jours, les mortiers à base du liant « 40 », activés ou non, possèdent tous des performances mécaniques en flexion supérieures au témoin. Un optimum est observé pour les mortiers incorporant 1 % de sulfate de sodium (+ 3 MPa par rapport au témoin) (figure 48). Ces tendances ne sont pas retrouvées en compression à 28 jours où les mortiers à base du liant « 40 » n'atteignent pas la valeur de résistance du mortier témoin et tendent à diminuer avec la proportion d'activateur(s) (figure 49). La présence de nitrate de sodium à hauteur de 1 % améliore de 1 MPa la résistance en compression par rapport au mortier non activé.

Globalement, la présence de sulfate de sodium améliore la flexion (+ 52 %) et la compression (+ 65 %) au démoulage tandis que la présence de nitrate de sodium ne semble pas avoir une influence positive à 28 jours.

Le mélange du sulfate de sodium et du nitrate de sodium ne paraît donc pas efficace pour l'amélioration des performances.

En comparant les résultats de notre travail (mortiers à base de clinker, laitier de haut fourneau et addition calcaire et activés par des sels de sodium) et ceux de Marciano [Marciano, 1997] (mortiers à base de ciments composés de clinker et laitier de haut fourneau), l'activation sulfatique paraît plus efficace dès lors que le liant est composé de calcaire et, plus particulièrement, à court terme.

Le couplage de l'activation chlorée et sulfatique est également efficace à court terme en permettant d'augmenter les performances mécaniques et, plus particulièrement, en compression (+ 7 MPa). Le mortier à base liant « 53 » se rapproche alors de 30 MPa à 24 heures, soit + 36 % par rapport au liant « 53 » non activé (figures 50 et 51).

Tout comme l'activation sulfatique seule ou couplée avec des nitrates, l'augmentation de la teneur en chlorures ne semble pas améliorer les performances pour les liants ternaires étudiés. À température ambiante, la présence des différents activateurs étudiés génère des résultats assez similaires entre eux à 24 heures. Il est délicat de se positionner sur l'action de(s) l'activateur(s) : activation unique du ciment ou co-activation du ciment et du laitier ?

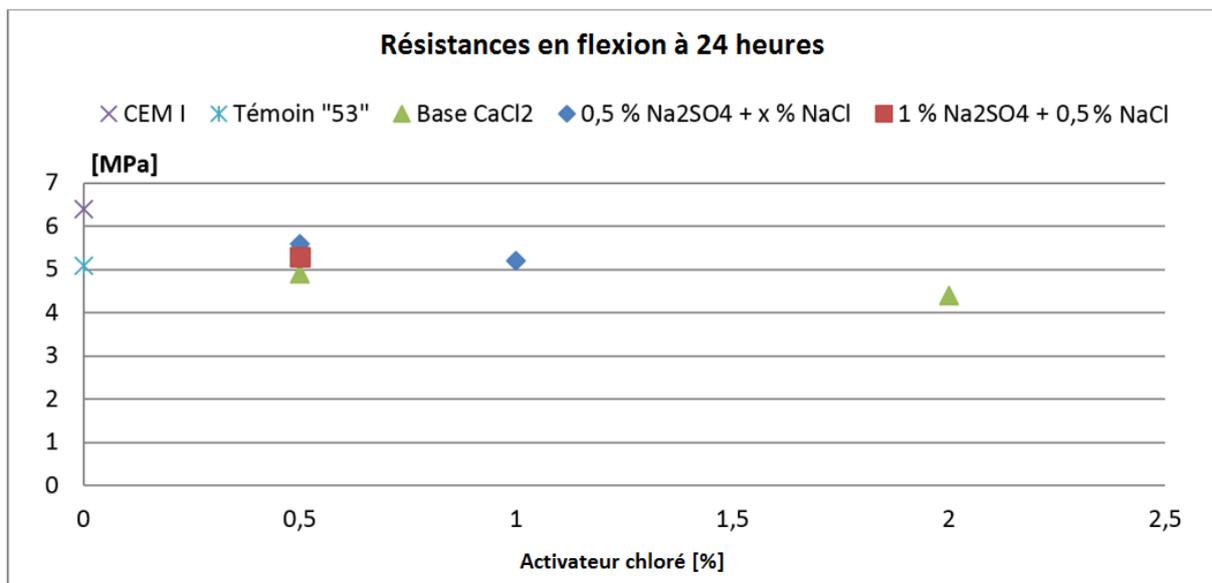


Figure 50 : Résistances mécaniques en flexion obtenues à 24 heures pour des mortiers à base de liant « 53 » activés avec des chlorures

**CHAPITRE IV : ACTIVATION CHIMIQUE DES LIANTS TERNAIRES SÉLECTIONNÉS
À TEMPÉRATURE AMBIANTE**

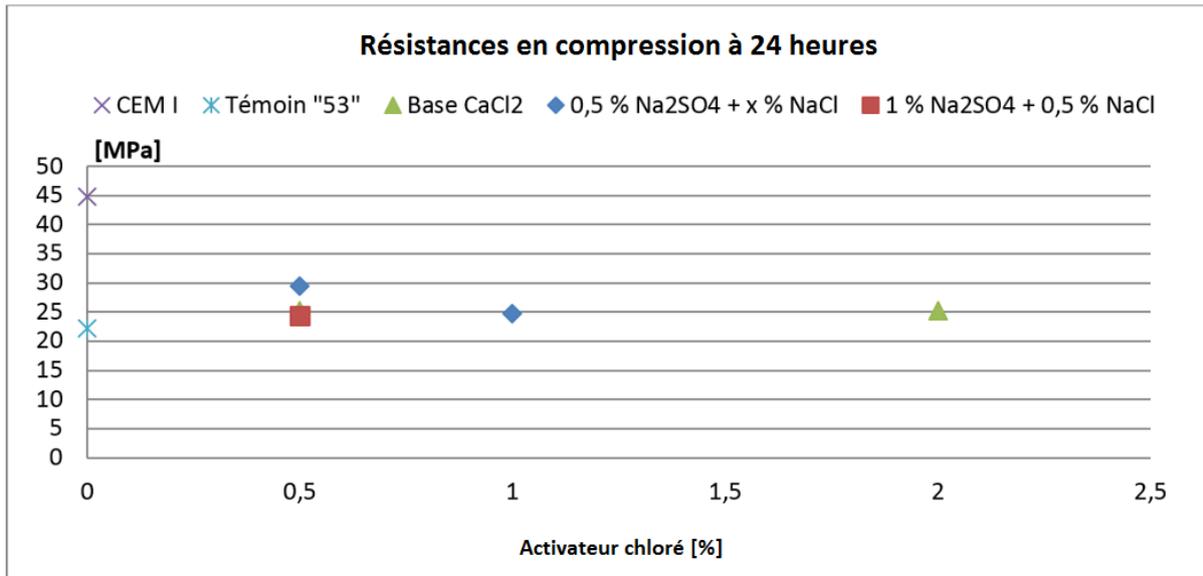


Figure 51 : Résistances mécaniques en compression obtenues à 24 heures pour des mortiers à base de liant « 53 » activés avec des chlorures

3.2. Impact de la composition du liant ternaire sur les propriétés économiques et environnementales

Pour chaque liant étudié, l'évolution du coût et des émissions de CO₂, en fonction des quantités d'activateurs, ont été estimées par mètre cube de mortier (hypothèses de calcul dans le tableau 24). Le calcul a été réalisé en utilisant une valeur de masse volumique réelle moyenne issue des résultats, soit 2 300 kg/m³).

Tableau 24 : Hypothèses prises pour le coût et l'empreinte CO₂ des matières premières utilisées

	Hypothèses	
	Coûts [€/T] (sans transport)	Empreinte CO ₂ [kgCO _{2eq} /T]
Ciment CEM I PLN	120 ¹⁾	766 ²⁾
Laitier de haut fourneau	90 ¹⁾	20 ³⁾
Addition calcaire	30 ¹⁾	75 ³⁾
Sable	20 ⁴⁾	2,8 ⁵⁾
Eau	3 ⁷⁾	0,3 ⁶⁾
Sulfate de sodium	105 ¹⁾	552 ⁸⁾
Chlorure de sodium	75 ¹⁾	200 ⁸⁾
Nitrate de sodium	5 000 ¹⁾	4 600 ⁸⁾

¹⁾ Moyenne estimée à partir de plusieurs sources

²⁾ Données ATILH

³⁾ Données fournisseurs

⁴⁾ Sable classique de bonne qualité

⁵⁾ Granulats de roches meubles/massives UNPG 2010

⁶⁾ Source : Logiciel ACV, base de données Ecoinvent

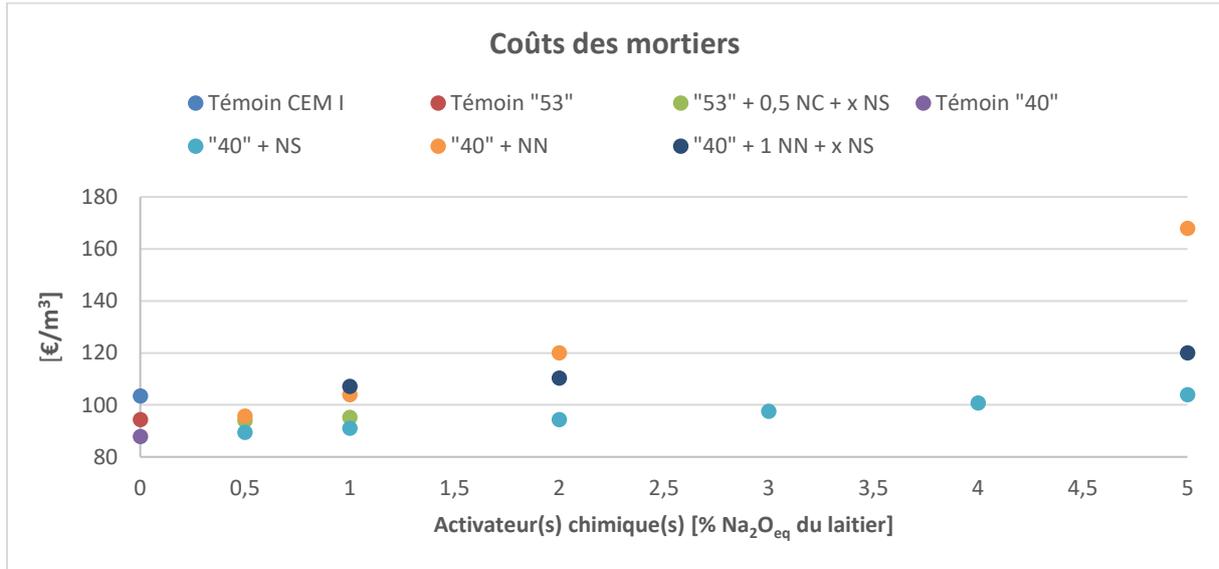
⁷⁾ Donnée issue de l'Association pour le Contrat Mondial de l'Eau

⁸⁾ Données Cerib

CHAPITRE IV : ACTIVATION CHIMIQUE DES LIANTS TERNAIRES SÉLECTIONNÉS À TEMPÉRATURE AMBIANTE

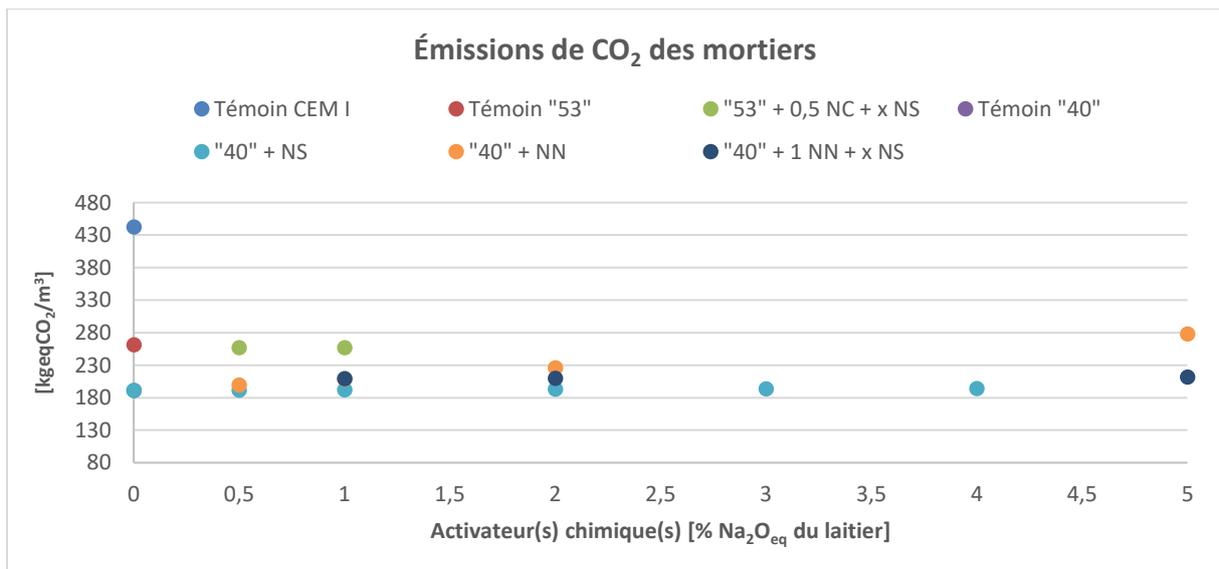
En fonction de la nature de l'activateur chimique, le coût du mortier qui l'incorpore augmente plus ou moins avec la quantité (figure 52). La présence de sulfate de sodium seul ou couplé avec du chlorure de sodium permet au coût de rester plus faible que le témoin CEM I pour des quantités inférieures à 5 %. La présence de nitrate de sodium engendre très rapidement un surcoût de près de 60 € à hauteur de 5 % avec les hypothèses prises en compte.

En parallèle, les émissions de CO₂ engendrées par les mortiers activés restent bien inférieures à celles du témoin CEM I (figure 53). Le sulfate de sodium ainsi que le chlorure de sodium sont non significatifs sur la quantité d'émissions émises (environ 2,3 fois moins pour les mortiers à base du liant « 40 » activés par du sulfate de sodium par rapport au témoin CEM I).



Légende : « NS » : sulfate de sodium ; « NC » : chlorure de sodium ; « NN » : nitrate de sodium.

Figure 52 : Représentation du coût des mortiers activés en fonction de la quantité d'activateur(s) chimique(s)



Légende : « NS » : sulfate de sodium ; « NC » : chlorure de sodium ; « NN » : nitrate de sodium.

Figure 53 : Représentation de la quantité de CO₂ émise par les mortiers activés en fonction de la quantité d'activateur(s) chimique(s)

CHAPITRE IV : ACTIVATION CHIMIQUE DES LIANTS TERNAIRES SÉLECTIONNÉS À TEMPÉRATURE AMBIANTE

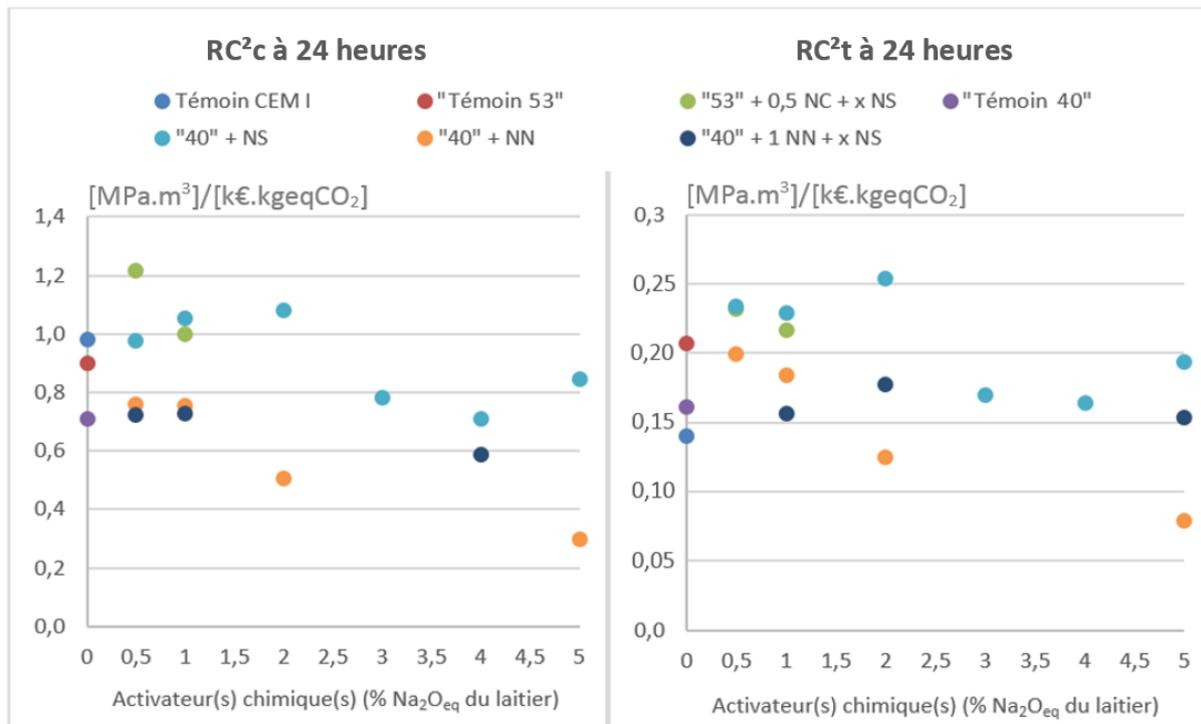
La figure 54 présente les variations RC^{2c} - RC^{2t} à 24 heures en fonction de la quantité d'activateur(s) présent(s) dans les mortiers à base des liants « 40 » et « 53 ». Les tendances observées diffèrent entre RC^{2c} et RC^{2t} .

Les tendances observées pour la résistance à la compression démontrent que seuls quelques mortiers testés obtiennent un ratio RC^{2c} supérieur au témoin CEM I. L'optimum correspond au liant « 53 » contenant 0,5 % de sulfate de sodium et 0,5 % de chlorure de sodium (+ 30 % par rapport au témoin CEM I) suivi du mortier « 40 + 2 NS ». Les mortiers contenant des nitrates (seuls ou en couplés) ainsi que des sulfates à plus de 2 % possèdent des ratios inférieurs au témoin CEM I.

La plupart des mortiers testés possèdent un RC^{2t} à 24 heures supérieur au témoin 100 % ciment CEM I. L'optimum, obtenu pour le liant « 40 » contenant 2 % de sulfate de sodium, correspond au double de la valeur obtenue par le témoin ciment CEM I (+ 75 % par rapport au liant « 40 » non activé). Il est suivi par ce même liant incorporant 1 % et 0,5 % de sulfate de sodium (+ 71 % par rapport au témoin CEM I et + 50 % par rapport au liant « 40 » non activé). Les autres mortiers testés à base de liant « 40 » contenant soit du nitrate de sodium (entre 0,5 % et 1 %), soit le couplage du nitrate de sodium et sulfate de sodium, soit une teneur en sulfate de sodium supérieure à 2 %, engendrent des ratio RC^{2t} globalement inférieurs à $0,17 \text{ MPa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{K}\epsilon^{-1}\cdot\text{kgeqCO}_2^{-1}$ et $0,10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{K}\epsilon^{-1}\cdot\text{kgeqCO}_2^{-1}$.

Concernant le liant « 53 », la présence des activateurs testés n'influence pas de manière significative le ratio RC^{2t} .

La présence importante de nitrate de sodium (2 % et 5 %) engendre une chute des ratios en flexion et en compression.



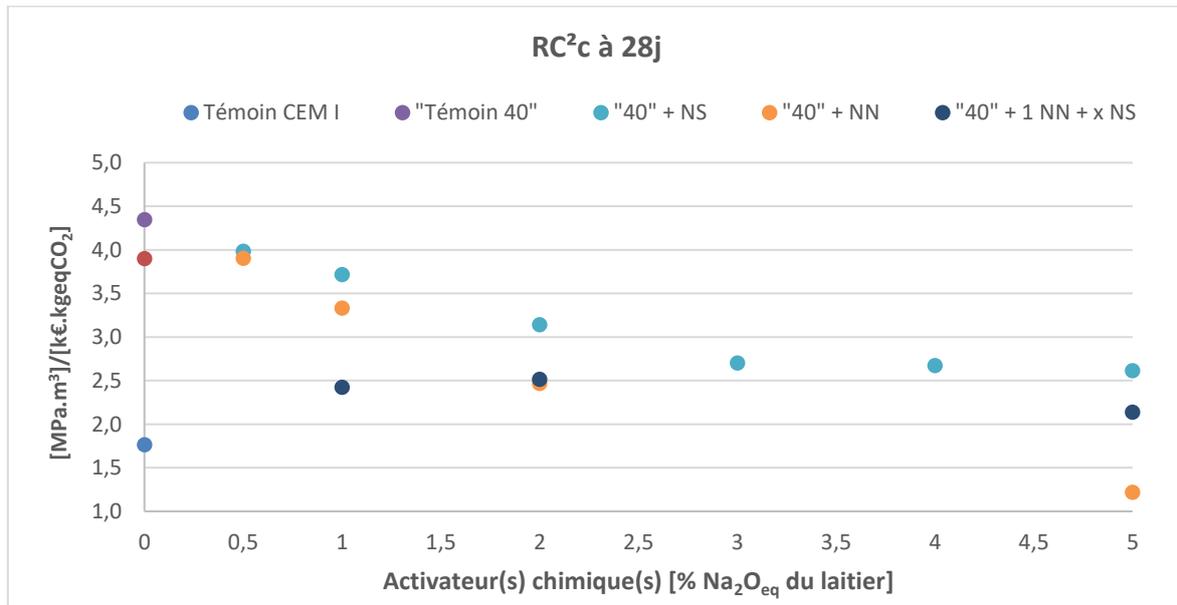
Légende : « 53 » : 53 % clinker + 35 % laitier + 12 % calcaire ; « 40 » : 40 % clinker + 45 % laitier + 15 % calcaire ; « NN » : nitrate de sodium ; « NS » : sulfate de sodium.

Figure 54 : Représentation des ratios en compression (RC^{2c}) et flexion (RC^{2t}) à 24 heures en fonction de la quantité d'activateurs

CHAPITRE IV : ACTIVATION CHIMIQUE DES LIANTS TERNAIRES SÉLECTIONNÉS À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Le calcul du ratio RC^2c à 28 jours démontre que l'ajout d'activateur(s) au sein des mortiers à base des liants « 40 » et « 53 » permet d'obtenir majoritairement des résultats supérieurs au témoin CEM I (figure 55). Les ratios se trouvent néanmoins en dessous des valeurs des témoins non activés.

L'augmentation de la quantité de sulfate de sodium dans le mortier à base du liant « 40 » engendre une diminution non négligeable du ratio (- 32,5 % entre 0,5 % et 3 % de sulfate de sodium). La présence de nitrate de sodium au-dessus de 2 % fait chuter le ratio notamment à cause du tarif de ce dernier.



Légende : « 53 » : 53 % clinker + 35 % laitier + 12 % calcaire ; « 40 » : 40 % clinker + 45 % laitier + 15 % calcaire ; « NN » : nitrate de sodium ; « NS » : sulfate de sodium.

Figure 55 : Représentation des ratios en compression (RC^2c) à 28 jours en fonction de la quantité d'activateurs

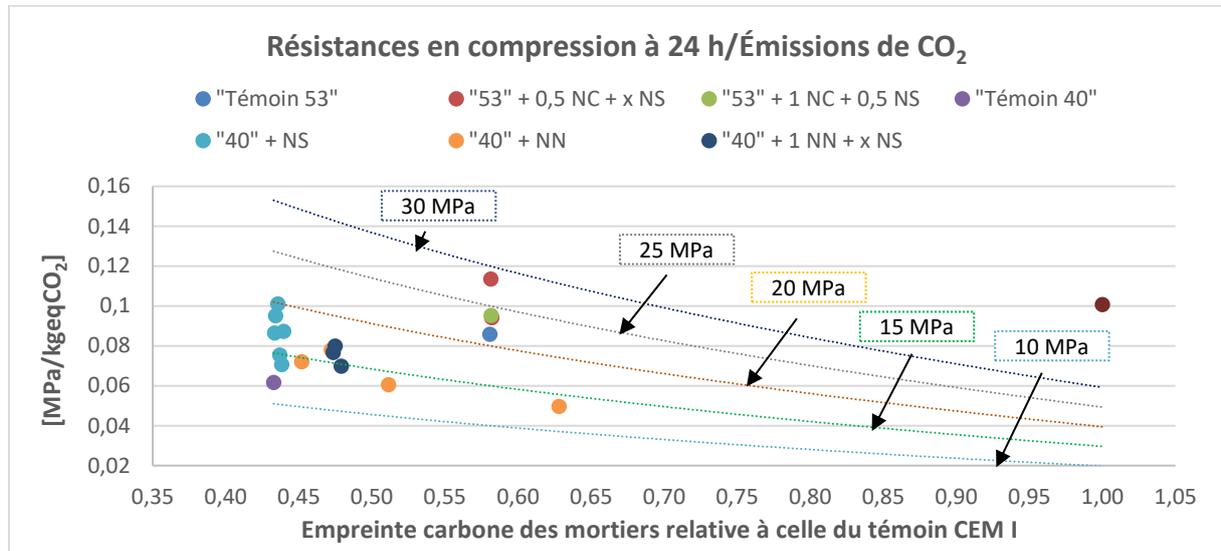
Les figures 56 et 57 représentent le rendement de CO_2 vis-à-vis de la résistance en compression et en flexion à 24 heures.

À 24 heures, les tendances en compression sont similaires à celles en flexion.

En compression, uniquement deux ratios sont supérieurs à celui du témoin CEM I et sont obtenus en émettant nettement moins de CO_2 (réduction de 57 % pour les mortiers à base de liant « 40 » activés par du sulfate de sodium) (figure 56). De plus, les ratios calculés démontrent que pour une émission de CO_2 équivalente avoisinant 190 kgeq CO_2 par m^3 de mortier, les valeurs obtenues avec les mortiers à base de liant « 40 » activés au sulfate de sodium sont comprises entre 0,07 et 0,1 MPa/kgeq CO_2 . En fonction de la nature de l'activateur, l'augmentation de la quantité émise de CO_2 est plus ou moins importante, voire négligeable dans le cas du couplage du sulfate de sodium et du chlorure de sodium dans les mortiers à base de liant « 53 » et dans le cas du sulfate de sodium seul dans les mortiers à base de liant « 40 ».

CHAPITRE IV : ACTIVATION CHIMIQUE DES LIANTS TERNAIRES SÉLECTIONNÉS À TEMPÉRATURE AMBIANTE

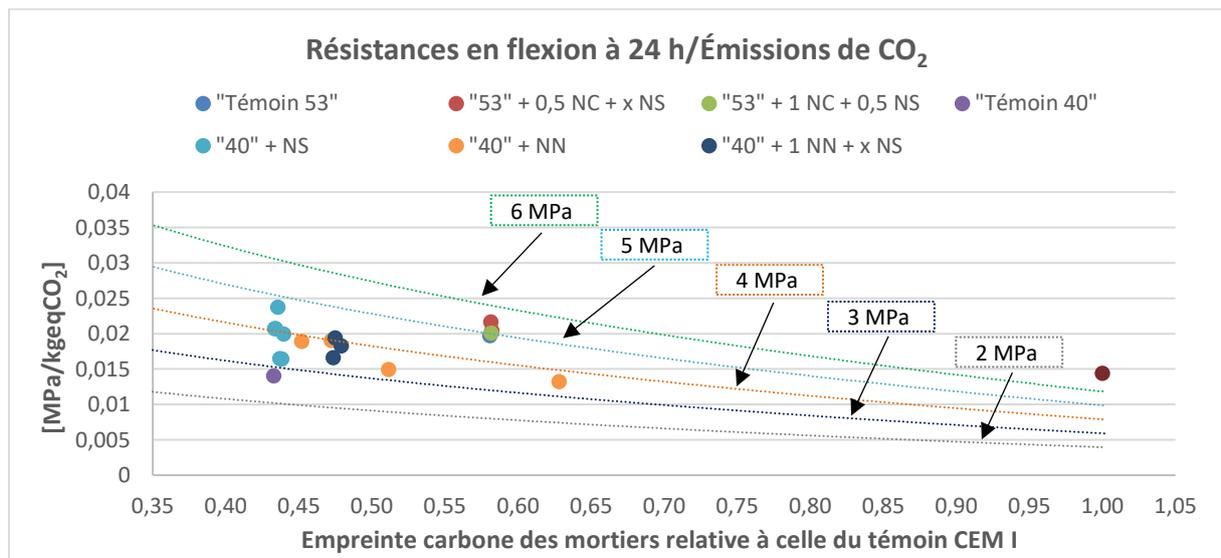
La présence de nitrate de sodium génère une diminution du ratio et une importante augmentation des émissions de CO₂.



Légende : « 53 » : 53 % clinker + 35 % laitier + 12 % calcaire ; « 40 » : 40 % clinker + 45 % laitier + 15 % calcaire ;
« NN » : nitrate de sodium ; « NS » : sulfate de sodium.

Figure 56 : Représentation du rendement de CO₂ vis-à-vis des résistances en compression à 24 heures à température ambiante

En flexion, la plupart des ratios calculés sont supérieurs à celui du témoin CEM I tout en émettant moins de CO₂ au mètre cube de mortier (figure 57). La présence de sulfate seul au sein des mortiers à base de liant « 40 » permet l'obtention d'un optimum proche de 0,025 MPa/kgeqCO₂ pour une émission d'environ 190 kgeqCO₂. L'activation du liant « 53 » par du chlorure de sodium et du sulfate de sodium génère des ratios en flexion très proches. Tout comme en compression, les ratios obtenus avec du nitrate de sodium conduisent à ne pas sélectionner cet activateur chimique.

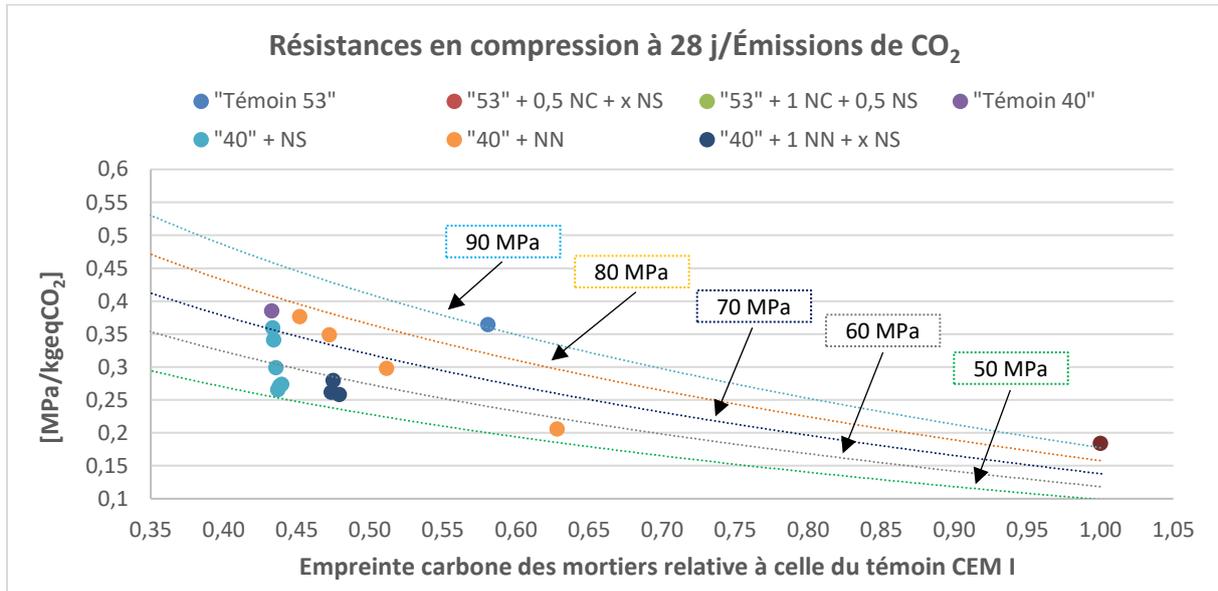


Légende : « 53 » : 53 % clinker + 35 % laitier + 12 % calcaire ; « 40 » : 40 % clinker + 45 % laitier + 15 % calcaire ;
« NN » : nitrate de sodium ; « NS » : sulfate de sodium.

Figure 57 : Représentation du rendement de CO₂ vis-à-vis des résistances en flexion à 24 heures à température ambiante

CHAPITRE IV : ACTIVATION CHIMIQUE DES LIANTS TERNAIRES SÉLECTIONNÉS À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Au bout de 28 jours, les ratios obtenus, uniquement calculés avec les mortiers à base de liant « 40 », sont tous inférieurs à celui du mortier « témoin 40 » (figure 58).



Légende : « 53 » : 53 % clinker + 35 % laitier + 12 % calcaire ; « 40 » : 40 % clinker + 45 % laitier + 15 % calcaire ; « NN » : nitrate de sodium ; « NS » : sulfate de sodium.

Figure 58 : Représentation du rendement de CO₂ vis-à-vis des résistances en compression à 28 jours à température ambiante

4. Conclusion partielle

L'étude d'incorporation de différents activateurs chimiques, à des teneurs comprises en 0,5 % et 5 % de Na₂O_{eq} par rapport à la quantité de laitier, a permis d'évaluer leur intérêt dans les liants « 53 » et « 40 ». D'un point de vue purement technique, tous les activateurs testés ne permettent pas d'obtenir des performances mécaniques en flexion et compression à court terme équivalentes au témoin CEM I. À partir de 28 jours, la synergie entre la réaction d'hydratation du laitier avec les activateurs permet l'obtention de résistances en flexion supérieures au témoin et au mortier sans activateur. Cette tendance n'était toutefois pas retrouvée pour la résistance en compression.

En prenant également en compte les critères économiques et environnementaux, la présence de sulfate de sodium et chlorure de sodium n'engendre pas d'augmentation significative du coût et de la quantité émise de CO₂ par rapport aux mortiers témoins à base de liant « 40 » et « 53 » et conduit à réduire fortement les émissions par rapport au témoin CEM I.

Les formulations de mortiers les plus prometteuses à travers ces critères technico-économico-environnementaux sont donc le mortier à base de liant « 40 » et contenant 2 % de sulfate de sodium (noté « 40 + 2 % NS ») et le mortier utilisant le liant « 53 » en présence de 0,5 % de sulfate de sodium et 0,5 % de chlorure de sodium (noté « 53 + 0,5 NC + 0,5 NS »).

Afin de se rapprocher encore de l'objectif technique, qui est l'obtention de performances minimum de 20 MPa et 40 MPa au démoulage à 8 heures et 10 heures respectivement, une des étapes a été de combiner l'activation chimique à d'autres leviers.

CHAPITRE V : Optimisation de la compacité à température ambiante

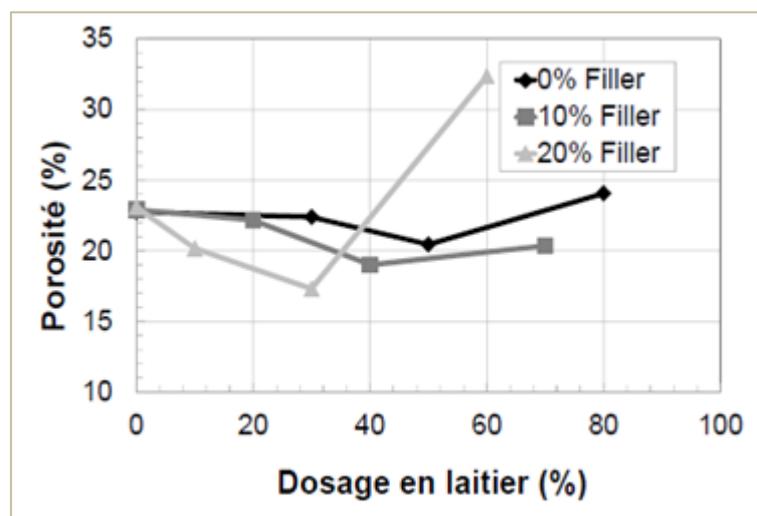
L'accélération des liants à plus faible teneur en clinker est recherchée par l'utilisation de méthodes compatibles avec les procédés actuels de production. Nous avons donc entrepris d'optimiser la compacité de nos mortiers à base des liants ternaires. Pour explorer cette piste, des mortiers ont été produits en faisant varier la granulométrie des additions constitutives du liant, le rapport E_{eff}/L ainsi que la quantité de superplastifiant ($\%/L_{total}$). Notre objectif était d'évaluer l'intérêt de l'optimisation de la compacité, identifiable sur les propriétés d'usage telles que l'ouvrabilité et les performances mécaniques.

1. Étude de certaines méthodes d'optimisation de la compacité

Les bétons hautes performances obtenus par optimisation du squelette granulaire sont un bon exemple de cette démarche et la littérature apporte des informations concernant la corrélation entre la performance mécanique et la compacité [De Larrard, 1999]. Dans cette thèse, le travail a été réalisé sur le liant et non pas sur le squelette granulaire, dont l'optimisation de son empiement est également importante pour la compacité du béton.

1.1. Optimisation de la porosité de liants binaires ou ternaires

Des travaux sur la porosité de liants binaires et ternaires, reposant sur des mesures de porosité au mercure, sont disponibles [Khalifa, 2012]. Leurs objectifs étaient d'analyser l'effet des ajouts sur la distribution porale et la porosité totale des liants étudiés ainsi que d'évaluer leur influence sur les résistances mécaniques.



Légende : « Filler » : filler calcaire.

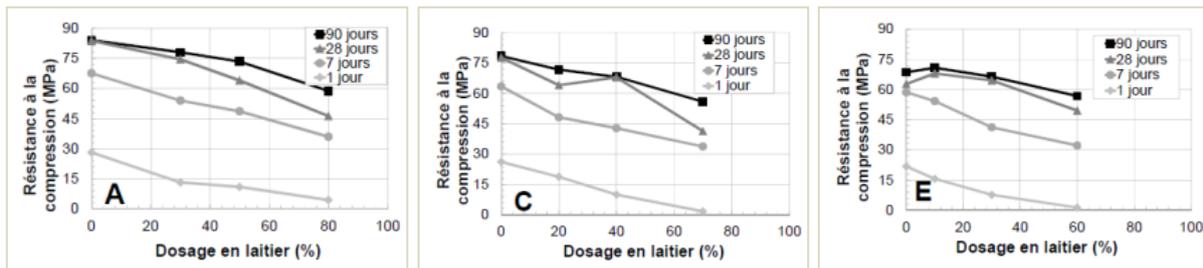
Figure 59 : Effet des ajouts sur la distribution porale - Porosité totale des pâtes de liants [Khalifa, 2012]

Ainsi pour 50 % d'additions (laitier + filler), il a été observé que la porosité minimale diminue avec le taux de filler. Concernant la porosité totale, les pâtes à 20 % de filler calcaire avec des dosages en laitier allant jusqu'à 30 % ont une porosité nettement inférieure à celle de la pâte de référence.

Dans ces travaux, la porosité totale atteint son minimum (- 26 % par rapport à la porosité de la pâte de référence) à 30 % de dosage en laitier à 28 jours.

Le lien entre les résultats en compression à 28 jours et la porosité des mortiers n'est pas toujours explicite (figures 59 et 60). Globalement à 28 jours, la résistance mécanique en compression est maximale sans laitier dans des mortiers dont la porosité n'est pas minimale.

Sans filler, la porosité est minimale pour 50 % de laitier (porosité de 20 %) et la résistance avoisine 60 MPa, soit environ 25 % de moins que le mortier sans laitier dont la porosité est d'environ 23 %. En présence de 10 % et de 20 % de filler, les porosités minimales sont respectivement de 40 % et 30 %. Ainsi, cette étude permet de montrer que d'autres facteurs sont à associer à la porosité pour obtenir une corrélation, telle que la réactivité du laitier.



Légende : « A » : 0 % de filler calcaire ; « C » : 10 % de filler calcaire ; « E » : 20 % de filler calcaire.

Figure 60 : Résistances à la compression des liants étudiés en fonction de la quantité de laitier [Khalifa, 2012]

1.2. Optimisation de la quantité d'eau en présence de superplastifiant

Des études ont été menées dans le cadre d'une recherche de l'optimisation des quantités d'eau et de superplastifiant en présence de liant contenant des additions minérales. Il s'avère que la granulométrie des additions et, plus particulièrement, leur finesse, influe sur la quantité de superplastifiant nécessaire [Bessa-Badreddine, 2004]. Pour des additions qualifiées de « fines » et de nature calcaire ou quartzique (dimension micronique), la quantité de superplastifiant diminue avec l'augmentation de la proportion d'addition(s) tandis qu'en présence d'additions dites « ultrafines » et de nature calcaire (dimension submicronique), la quantité de superplastifiant augmente.

La diminution de la quantité de superplastifiant peut être expliquée par l'optimisation de l'arrangement spatial des particules dans le mélange et/ou une réduction des frictions interparticulaires, qui favorise la dispersion dans les vides du squelette granulaire. En parallèle, l'augmentation de la quantité de superplastifiant peut être due au phénomène de floculation, générant un effet granulaire défavorable [Ferraris, 2001].

Les travaux de Bessa-Badreddine indiquent que le classement des additions vis-à-vis de la demande en superplastifiant s'établit dans le sens d'une finesse croissante, quel que soit le type de ciment et sans préciser le rôle de la morphologie des particules [Bessa-Badreddine, 2004].

La quantité d'eau nécessaire à l'obtention de bonnes propriétés rhéologiques semble également dépendre de la granulométrie et la quantité des additions minérales introduites, avec les mêmes tendances que celles obtenues en présence de superplastifiant ([Bessa-Badreddine, 2004] et [Ferraris, 2001]).

1.3. Optimisation de la finesse des additions

L'augmentation de la finesse des additions, conduit à une plus grande surface spécifique et permet l'amélioration de certaines propriétés.

1.3.1. Le laitier de haut fourneau

La réactivité du laitier dépend grandement de sa surface spécifique en relation avec sa vitesse de dissolution. L'effet est significatif uniquement dans les trois premiers jours : plus la finesse du laitier est grande, plus la résistance à la compression augmente rapidement ([Fernandez-Jimenez, 1999], [Wang, 1994]). Avec un taux de gâchage égal (sable/laitier = 2) et une maniabilité suffisante pour les différents laitiers testés et activés par du silicate de sodium (teneur équivalente en Na_2O = 5,5 %), les résistances à 28 jours sont présentées sur la figure 61. L'optimum de finesse est alors compris entre 4 500 et 6 500 cm^2/g pour les laitiers acides ou neutres et entre 4 000 et 5 500 cm^2/g pour les laitiers basiques.

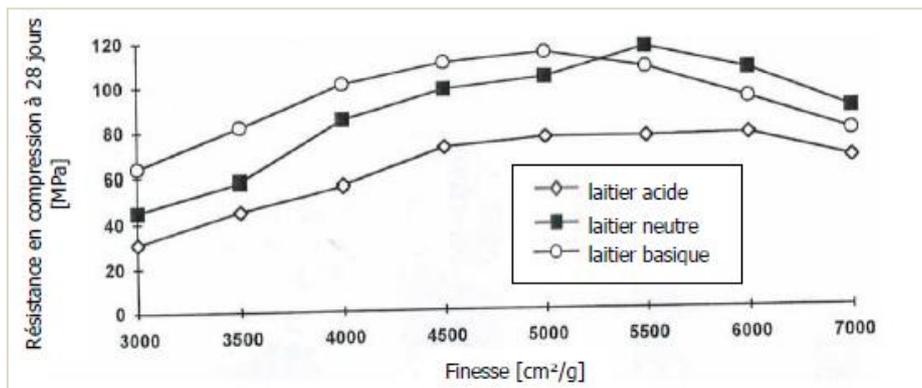


Figure 61 : Résistances en compression à 28 jours en fonction de la finesse du laitier (activé avec du silicate de sodium : Na_2O = 5,5 %, $\text{MS} = 1$; sable/laitier = 2) [Wang, 1994]

D'autre part, Malhotra et Metha précisent l'impact du diamètre particulaire sur la réactivité : les particules de laitier de diamètre inférieur à 10 μm contribuent au développement des résistances avant 28 jours, celles dont le diamètre est compris entre 10 et 45 μm contribuent aux résistances ultérieures, tandis que les particules dont le diamètre est supérieur à 45 μm présentent une faible réactivité. Néanmoins, même si une plus grande finesse améliore la réactivité, elle entraîne également une plus grande consommation d'eau (pour obtenir une plasticité équivalente) si un superplastifiant n'est pas utilisé, faisant ainsi chuter les résistances finales [Malhotra, 1996].

Enfin, l'efficacité du paramètre finesse sur les résistances mécaniques varierait en fonction de la nature de l'activateur alcalin [Fernandez-Jimenez, 1999].

Sur le plan économique, il est nécessaire de changer de matériel de broyage en fonction de la finesse recherchée, avec passage d'un broyeur vertical à un broyeur à boulets pour des finesesses supérieures à 5 000 cm^2/g et de jouer sur le temps de broyage. Ainsi, un laitier ultrafin peut alors coûter plusieurs centaines d'euros contre une centaine d'euros pour un laitier classique ayant une finesse standard. La détermination d'un équilibre technico-économique, basé sur l'application, est donc nécessaire pour favoriser l'utilisation d'un laitier plus fin (source : Ecocem).

1.3.2. L'addition calcaire

Plusieurs études visant à étudier l'influence de la granulométrie du calcaire au sein de mortiers et bétons sont disponibles, notamment concernant l'influence, sur les propriétés courantes de bétons auto-plaçants, de trois additions calcaires de granulométrie différentes ($D_{80} = 5 \mu\text{m}$; $D_{80} = 10 \mu\text{m}$ et $D_{80} = 20 \mu\text{m}$), introduites à hauteur de 10 % et 20 % du liant ([Boudra, 2015] et [Bentz, 2016]).

Boudra *et al.* montre qu'à l'état frais, les fillers calcaires étudiés ont une influence sur la structure du squelette granulaire et améliorent la capacité d'empilement (figure 62 – gauche). À l'état durci, plus le calcaire est fin, plus la résistance en compression est importante. De même, pour une même finesse, la résistance est meilleure en présence de 10 % de calcaire par rapport à 20 % (figure 62 – droite).

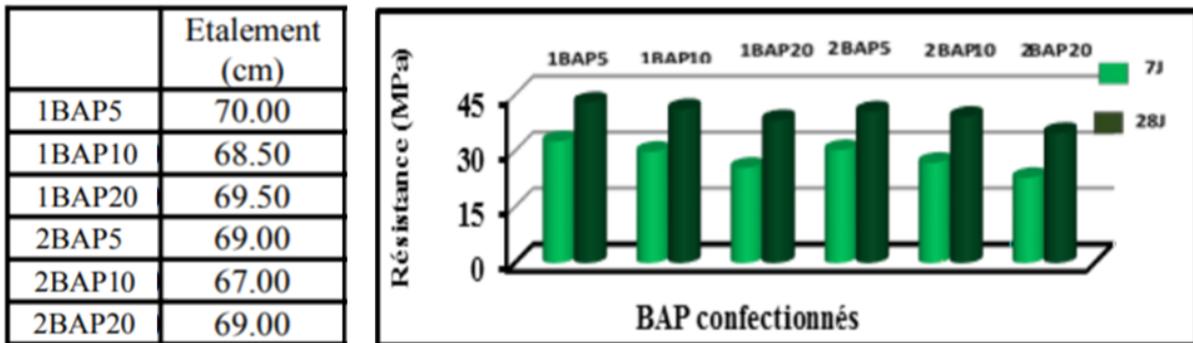


Figure 62 : Étalement (gauche) et évolution de la résistance en compression des bétons auto-plaçants confectionnés [Boudra, 2015]

Il est important de noter que les différentes études citées sont réalisées sur des mortiers dont les liants sont constitués de ciment et d'additions en substitution massive de ce dernier, conformément au contexte normatif. De par la différence de masse volumique absolue entre le ciment, le laitier de haut fourneau et l'addition calcaire et une potentielle variation de la quantité d'eau (influence des additions sur la rhéologie), les études ne peuvent être parfaitement comparables que pour une substitution volumique [Bessa-Badreddine, 2004].

2. Propriétés des liants ternaires optimisés

Notre partie expérimentale se divise en deux parties :

- étude du couplage « superplastifiant » – « rapport E_{eff}/L » ;
- étude de l'influence de la finesse des additions.

2.1. Couplage superplastifiant et rapport E_{eff}/L

Nos travaux portaient sur la recherche d'un rapport « quantité d'adjuvant/quantité d'eau » permettant l'obtention d'une mise en place équivalente au témoin 100 % CEM I, associée à une teneur en air occlus faible. La quantité de superplastifiant introduite était également évaluée selon un critère économique.

Pour répondre à cet objectif, les liants « 53 » (53 % CEM I ; 35 % laitier ; 12 % addition calcaire) et « 70,5 » (70,5 % CEM I ; 17,5 % laitier ; 12 % addition calcaire), ont été étudiés et comparés à la référence obtenue avec le CEM I. Plusieurs pourcentages d'incorporation de superplastifiant (en pourcentage massique par rapport au liant total) ont été testés en association avec plusieurs rapports E_{eff}/L .

L'influence de ces deux variables était observée sur les propriétés d'usage des mortiers, à l'état frais et durci (tableau 25). La nomenclature suivante a été utilisée pour désigner les différents essais : « quantité de clinker du liant / E_{eff}/L - % massique par rapport au liant total de superplastifiant ». La compacité a été calculée pour chaque mortier à partir de la masse volumique réelle à l'état frais à additionnant les volumes de chaque constituant sec.

Tableau 25 : Évaluation de l'influence du rapport E_{eff}/L et de la quantité de superplastifiant sur les propriétés d'usage des mortiers étudiés

	Témoin/ 0,4-0,25	« 53 »/ 0,4-0,25	« 53 »/ 0,35-0,25	« 53 »/ 0,35-0,35	« 70,5 »/ 0,4-0,25	« 70,5 »/ 0,35-0,3	« 70,5 »/ 0,35-0,35	
Composition des mortiers								
Ciment PLN [g]	1 350,0	715,5			951,8			
Laitier [g]	0	472,5			236,2			
Addition calcaire [g]	0	162,0			162,0			
Sable CEN 0/2 mm [g]	4 050,0	4 050,0			4 050,0			
Eau [g]	540	540,0	472,5	472,5	540,0	472,5	472,5	
E_{eff}/L	0,4	0,4	0,35	0,35	0,4	0,35	0,35	
Superplastifiant [g]	3,4	3,4	3,4	4,7	3,4	4,1	4,7	
%/L	0,25	0,25	0,25	0,35	0,25	0,30	0,35	
Caractéristiques à l'état frais								
Étalement [mm]	160,0	180,0	105,0	155,0	165,0	115,0	130,0	
ρ [kg/m ³]	2 285,0	2 260,0	2 260,0	2 310,0	2 340,0	2 300,0	2 330,0	
Compacité [%]	75,5	75,4	76,2	77,9	77,8	77,4	75,4	
Air occlus [%]	n.d.	3,85	n.d.	3,9	3,9	n.d.	4,0	
Ressuage [visuel]	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	
Caractéristiques à l'état durci								
Résistance en compression [MPa]	24 h	44,9	26,4	24,2	32,3	36,6	39,8	43,7
	7 j	70,9	66,6	63,8	75,2	68,6	71	77,5
	28 j	80,9	89,8	81,7	n.d.	84,1	85,6	n.d.
	90 j	n.d.	95,2	84,9	n.d.	88,5	n.d.	n.d.
Résistance en flexion [MPa]	24 h	6,4	5,7	4,8	6,3	6,0	6,2	6,9
	7 j	9,9	9,9	8,8	11,2	9,8	10	10,6
	28 j	10,3	12,4	10,8	n.d.	10,4	11,4	n.d.
	90 j	n.d.	12,0	10,7	n.d.	10,8	n.d.	n.d.

« n.d. » : non déterminé ; « « 53 »/0,4-0,25 » : liant « 53 » + $E_{eff}/L = 0,4 + 0,25$ % de superplastifiant/liant total.

Le calcul de la compacité montre que les mortiers composés des liants « 53 » et « 70,5 » ont des valeurs proches du témoin. Globalement, la réduction du rapport E_{eff}/L augmente légèrement la compacité (« 53 »/0,4-0,25 versus « 53 »/0,35-0,25) accentué en augmentant le superplastifiant de 0,1 point (« 53 »/0,35-0,25 versus « 53 »/0,35-0,35). Cette tendance n'est pas observée en présence du liant « 70,5 » qui voit son optimum de compacité en présence 0,25 % de superplastifiant et un rapport E_{eff}/L de 0,25. Ces résultats confirment l'intérêt d'optimiser l'adjuvantation ainsi que la quantité d'eau en fonction du liant.

Les résultats démontrent que la compacité et l'étalement ne sont pas reliés. La diminution du rapport E_{eff}/L engendre une importante diminution de l'étalement non contrecarrée par l'augmentation de l'adjuvant de 0,1 point. Malgré un étalement faible, les mortiers « 53 »/0,35-0,25 et « 70,5 »/0,35-0,30 ont été mis en place facilement dans les moules.

En accord avec la littérature et comparativement aux résultats du mortier témoin à base de CEM I, la diminution de la quantité d'eau jusqu'à un E/L de 0,35, associée à une augmentation de la quantité de superplastifiant permettait l'obtention de meilleures résistances mécaniques en flexion et en compression surtout à partir de 7 jours.

Pour un rapport E/L de 0,4 et une quantité d'adjuvant de 0,25 %/liant, les résultats de résistances mécaniques à 24 heures dépendent principalement de la quantité de clinker ; la différence entre le liant « 53 » et le témoin CEM I étant d'environ 60 %.

Par contre, la synergie entre les constituants du liant et l'association « superplastifiant-rapport E_{eff}/L » a permis d'obtenir des résultats à 7 jours équivalents pour les deux liants ternaires et le témoin. Aux échéances plus longues, la contribution du laitier et du calcaire devient de plus en plus importante, conduisant à un dépassement du témoin à 28 jours (figure 63).

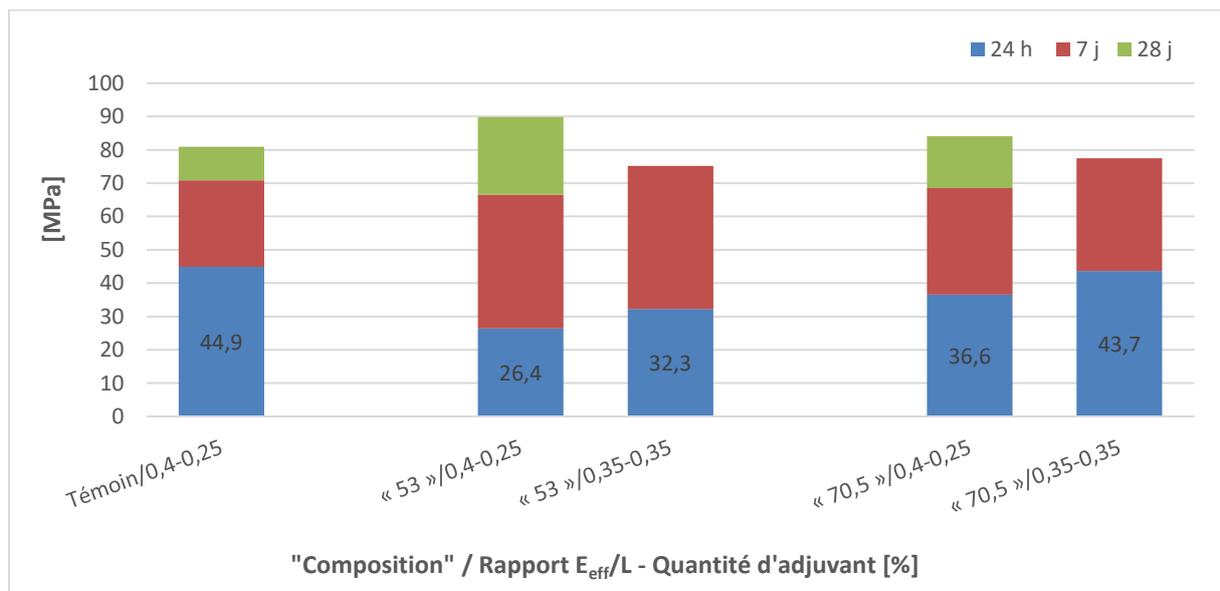


Figure 63 : Résistances mécaniques en compression des trois mortiers de composition différentes dont les variables sont la quantité de superplastifiant (%) et le rapport E_{eff}/L

La diminution du rapport E_{eff}/L , associée à une augmentation de la quantité de superplastifiant de 0,1 point, en passant de 0,25 à 0,35 % par rapport au liant total, permet d'améliorer les résistances en compression à 24 heures pour le liant « 70,5 » (+ 13 MPa) ainsi que pour le liant « 53 » (+ 6 MPa). De même à 28 jours, les résistances sont améliorées en moyenne de 10 MPa par rapport à l'association « 0,4-0,25 ».

2.2. Influence de la finesse des additions

Les additions calcaires sont commercialisées sous différentes granulométries.

Une des pistes pour augmenter la compacité est de combler le vide engendré par un assemblage de matières premières dont les granulométries sont, soit très fines (ciment, laitier de haut fourneau et autres additions pouzzolaniques), soit plus grossières (sable 0/0,315 et plus). L'ajout de calcaire sous forme de filler devrait permettre de jouer ce rôle, sans pour autant avoir d'influence trop importante sur la rhéologie du mélange.

Afin d'évaluer cette hypothèse, des essais sur mortier ont été effectués avec le liant « 40 » qui contient le plus d'addition calcaire. Deux additions calcaires, Omyalite et Carbosable, ont été testées en substitution partielle de l'addition calcaire Betocarb. Un laitier plus fin (finesse Blaine = 5 100 cm²/g) a également été testé en substitution partielle du laitier standard (finesse Blaine = 4 500 cm²/g). Il est à noter que le témoin 100 % ciment Portland CEM I provenait ici de l'usine de Couvrot. Afin de faciliter la lecture, les matières premières ont été nommées de la façon suivante dans ce paragraphe (tableau 26).

Tableau 26 : Dénomination des différentes matières premières utilisées dans le paragraphe V-2.2

Matières premières	Désignation
Ciment Couvrot	K
Laitier classique (finesse Blaine = 4 500 cm ² /g)	S _{4 500}
Laitier plus fin (finesse Blaine = 5 100 cm ² /g)	S _{5 100}
Addition calcaire Betocarb	L _B
Addition calcaire Carbosable	L _C
Addition calcaire Omyalite	L _O

La dénomination des compositions comprend les pourcentages respectifs en clinker, laitier et calcaire (le calcaire apporté par le ciment étant pris en compte) (tableau 27).

Tableau 27 : Compositions des mortiers – Évaluation de l’influence de la finesse des additions sur les propriétés d’usage à l’état frais et durci des mortiers testés

Dénomination	CEM I	40 K/ 45 S _{4 500} / 15 L _B	40 K/45 S _{4 500} /...		40 K/ 40 S _{4 500} / 5 S _{5 100} / 15 L _B
			10 L _B / 5 L _O	5 L _B / 5 L _O / 5 L _C	
Compositions des mortiers					
Ciment Couvrot [g]	1 350,0	553,5 (41 %)	553,5 (41 %)		553,5 (41 %)
Laitier classique (« S _{4 500} ») [g]		607,5 (45 %)	607,5 (45 %)		540,0 (40 %)
Laitier plus fin (« S _{5 100} ») [g]					67,5 (5 %)
Betocarb (« L _B ») [g]		189,0 (14 %)	125,6 (9,34 %)	62,8 (4,66 %)	189,0 (14 %)
Omyalite (« L _O ») [g]			62,8 (4,66 %)	62,8 (4,66 %)	
Carbosable (« L _C ») [g]				62,8 (4,66 %)	
Sable 0/2 mm [g]	4 050,0	4 050,0	4 050,0	4 050,0	4 050,0
Eau [g]	540,0	540,0	472,5	472,5	472,5
E _{eff} /L	0,4	0,4	0,35	0,35	0,35
Superplastifiant [g]	3,4	3,4	3,4	4,7	4,7
%/L	0,25	0,25	0,25	0,35	0,35
Caractéristiques à l’état frais					
Étalement [mm]	130,0	150,0	140,0	130,0	160,0
Compacité [%]	75,0	76,7	76,4	75,9	78,4
ρ [kg/m ³]	2 270,0	2 295,0	2 260,0	2 245,0	2 320,0
Ressuage [visuel]	Non	Non	Non	Non	Non
Caractéristiques à l’état durci					
ρ [kg/m ³]	2 245,0	2 275,0	2 220,0	2 215,0	2 280,0
Compression [MPa]	24 h	37,0	10,9	10,9	11,8
	28 j	73,3	77,0	71,7	78,7
Flexion [MPa]	24 h	6,1	2,7	2,5	2,8
	28 j	9,6	11,9	11,6	11,7

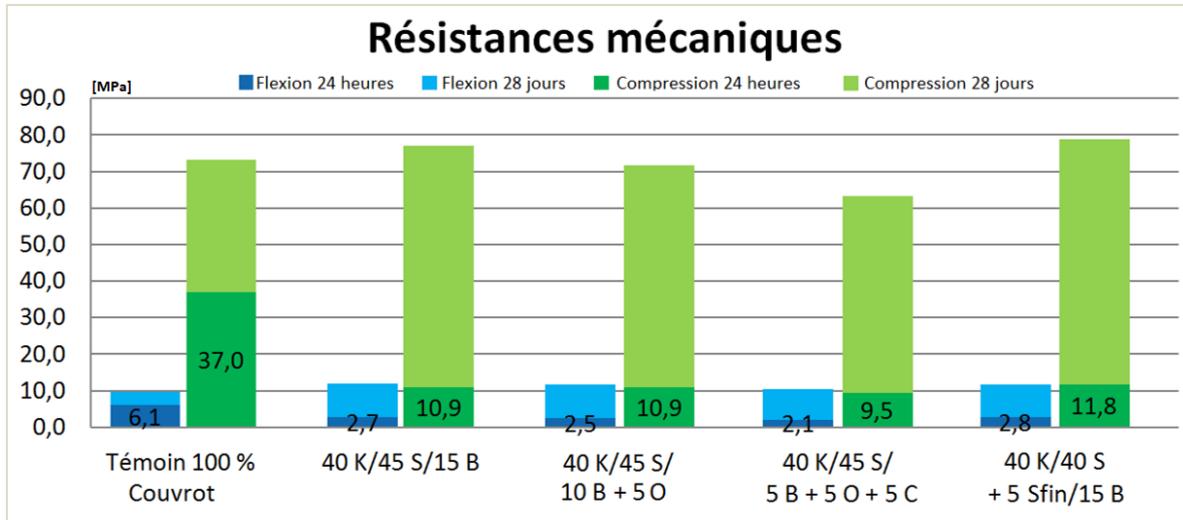
« K » : clinker ; « S_{4 500} » : laitier classique ; « S_{5 100} » : laitier plus fin ; « L_B » : addition calcaire Betocarb ; « L_O » : addition calcaire Omyalite ; « L_C » : addition calcaire Carbosable.

La substitution du Betocarb par de l’Omyalite et du Carbosable n’engendre pas de variation importante de la compacité dans ces conditions d’essai.

À l’état frais, la substitution partielle de Betocarb, d’une part, par de l’Omyalite (5 % massique) et d’autre part, du Carbosable (5 % massique), génère à la fois une diminution de l’étalement et de la masse volumique des mortiers. Ces diminutions sont proportionnelles avec le taux de substitution.

Ces observations ne sont pas en accord avec la littérature selon laquelle le mélange de ciment avec des additions microniques (cas de l’Omyalite) permettraient la réduction de l’eau et adjuvant tout en gardant des propriétés rhéologiques équivalentes à un témoin [Bessa-Badreddine, 2004].

Ainsi il a été nécessaire d'optimiser les quantités d'eau et de superplastifiant pour ces formulations de mortiers.



Légende : « K » : clinker ; « S » : laitier classique de Blaine 4 500 cm²/g ; « Sfin » : laitier de Blaine 5 100 cm²/g ; « B » : Betocarb ; « O » : Omyalite.

Figure 64 : Résultats des résistances mécaniques en flexion (bleu) et en compression (vert) des mortiers testés - Influence de la finesse des constituants du liant

À l'état durci, les tendances à 24 heures sont les mêmes pour les résistances en flexion et en compression. Les mortiers testés obtiennent des résistances éloignées du témoin et la substitution partielle de l'addition calcaire Betocarb par des additions calcaires plus fines ne semble pas être pertinente pour nos compositions.

En revanche, la substitution de 5 % du laitier standard par du laitier plus fin semble permettre d'améliorer les performances en compression de près de 10 %. Les mesures à 28 jours effectuées sur le mortier incorporant 5 % de laitier plus fin confirme un léger gain (+ 2 %). L'effet négatif de l'utilisation d'additions calcaires plus fines est également conforté avec moins 7 % en présence d'Omyalite et moins 35 % en présence d'Omyalite et de Carbosable.

La substitution complète du laitier standard par du laitier plus fin pourrait donc être une possibilité d'amélioration des performances mécaniques à court (meilleure compacité du mélange) et long termes (réactivité plus élevée du laitier due à sa finesse). Un travail sur béton reste toutefois nécessaire pour une optimisation du squelette granulaire dans son ensemble.

3. Discussion et conclusion partielle

Les différentes expérimentations réalisées dans cette partie visaient à explorer des nouveaux leviers pour améliorer les performances des mortiers et, en particulier, les résistances mécaniques à court terme.

L'optimisation des quantités d'eau et de superplastifiant représente un levier qui permet de gagner en performances mécaniques à court terme. Toutefois ce levier est sensible à utiliser car directement relié à la compatibilité avec les proportions des matières constitutives du liant ternaire.

L'utilisation d'additions calcaires de granulométries différentes pour optimiser la compacité des mortiers, n'a pas donné de résultats concluant sur mortiers dans nos conditions d'essai. Néanmoins, l'utilisation d'un laitier plus fin couplé à l'utilisation d'une quantité optimisée de superplastifiant semble permettre de se rapprocher un peu plus de l'objectif initial d'équivalence des performances par rapport au témoin à base de CEM I.

Par manque d'informations relatives au broyage des additions calcaires et du laitier de haut fourneau, une analyse technico-économique n'a pu être effectuée pour cette partie. De plus, l'optimisation de la compacité, par l'intermédiaire de l'utilisation de matières premières de différentes granulométries, engendre la nécessité de posséder plusieurs systèmes de stockage, ce qui est pénalisant pour la profession. Il semble donc plus pertinent d'explorer un autre levier potentiellement puissant, qui consiste cette fois à soumettre les liants étudiés à un traitement thermique.

CHAPITRE VI : Activation thermique des liants ternaires en association avec certains leviers décrits précédemment

En préfabrication, le traitement thermique est utilisé de manière très courante avec de nombreuses variantes. Pour les produits à démoulage immédiat, la cure du béton se produit dans des chambres isolées en général sans apport de chaleur externe permettant le maintien de la température et de l'humidité.

En fonction des produits visés, le traitement thermique varie en température, en durée mais également en termes de procédés (résistances électriques, vapeur d'eau, eau chaude...). Pour les produits à démoulage différés, le béton nécessite d'avoir des résistances suffisantes au moment du démoulage. Le traitement thermique est une solution très efficace pour obtenir ces résistances en un minimum de temps.

Le traitement thermique fait donc partie des moyens d'activation qui pourraient permettre l'obtention des résistances nécessaires pour l'utilisation régulière de bétons bas carbone. La norme NF EN 13369 « Règles communes pour les produits préfabriqués en béton » et les recommandations de l'IFSTTAR pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne [Recommandations pour la RSI, 2017] présentent des prescriptions pour une utilisation optimale des cycles de traitement thermique.

Beaucoup de produits en béton à démoulage différé sont soumis à un cycle thermique afin d'améliorer la productivité. Entre autres, les produits en béton armé et précontraint nécessitent une résistance minimum en compression (mesurée sur cube $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$) avoisinant respectivement 15 MPa (manutention) et 35 MPa (relâchement des torons de précontrainte). Notre cahier des charges fixe des résistances en compression minimum de 20 MPa et 40 MPa au démoulage respectivement à 8 heures et 10 heures. Le travail développé dans ce chapitre peut alors concerner directement les industriels utilisateurs ou souhaitant utiliser l'effet de la température comme levier.

Les liants testés dans ce chapitre sont ceux sélectionnés en chapitre III qui ont également servi à tester d'autres leviers d'optimisation mais à température ambiante (chapitres IV et V). Ces liants ternaires possèdent à 28 jours des performances mécaniques proches de celles obtenues en présence de 100 % de ciment Portland CEM I (80 MPa). À plus court terme et particulièrement au démoulage (dans des conditions classiques issues de la norme [NF EN 196-1]), les résistances mécaniques en flexion et compression restent cependant éloignées de celles demandées dans le cahier des charges.

Cette partie du manuscrit est donc dédiée à évaluer l'intérêt d'un traitement thermique. Ce dernier a été dans un premier temps étudié seul puis il a été couplé aux méthodes d'optimisation étudiées dans les chapitres IV (activation chimique) et V (compacité).

1. Généralités sur le traitement thermique

1.1. *Quel est l'intérêt de la température pour la prise et le durcissement du béton ?*

La température conduit à une accélération de la vitesse d'hydratation du ciment, conduisant à un plus grand avancement réactionnel à court terme et donc à des performances mécaniques du béton plus élevées à court terme.

Le matériau cimentaire est d'autant plus sensible que son énergie d'activation est élevée. En présence de laitier, l'énergie d'activation du liant augmente ; il est donc d'autant plus judicieux d'appliquer un traitement thermique [Jacquemot, 2014].

Ce procédé est souvent géré de manière empirique avec des paramètres qui varient en fonction du type de pièce et surtout en fonction du béton utilisé. Or, une température importante ne garantit pas systématiquement des performances techniques élevées. Il est donc avisé de trouver l'optimum en fonction du liant mais également en fonction du type de pièce et notamment de sa géométrie. De plus, dès que la température appliquée au béton est supérieure à la température ambiante, il est important de ne pas négliger les moyens de protection contre la dessiccation (génératrice de problèmes microstructuraux, fissuration et perte de durabilité) ainsi que les déperditions pouvant générer un gradient de température entre le centre et l'extérieur du béton.

1.2. Définition d'un traitement thermique

L'évolution de la température dans le béton est liée aux réactions d'hydratations exothermiques et à l'apport de chaleur. Elle peut être schématisée en 4 périodes (figure 65) : un prétraitement, une période de montée en température, un palier de température puis une période de descente en température. En fonction du type et de la dimension de la pièce, chaque période varie en termes de durée et de température conduisant à des vitesses de montée ou de descente en température variable. Le document relatif aux recommandations pour la RSI [Recommandations pour la RSI, 2017] prescrit, en fonction de la dimension maximale de la pièce en béton, une vitesse de montée en température ainsi que la température maximale, directement reliée à l'usage du béton.

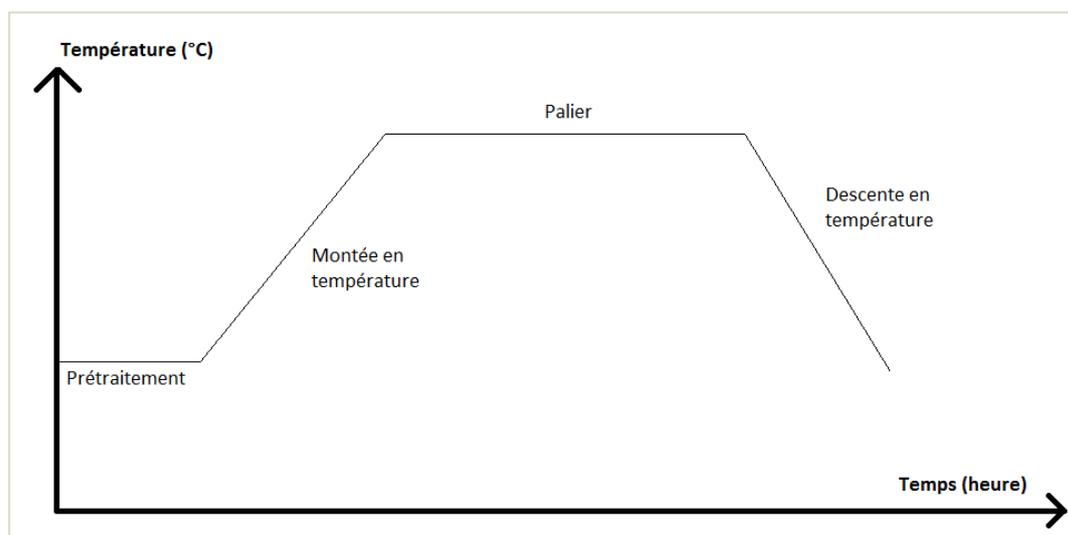


Figure 65 : Schéma d'un cycle de traitement thermique

1.3. *Comment est apportée la chaleur ?*

Dans l'industrie, l'apport de chaleur peut se faire de manière soit externe, soit interne. La première méthode est la plus couramment utilisée.

1.3.1. *Apport de chaleur externe*

Cet apport peut se faire par conduction (directe ou indirecte) par les parois des moules ou des supports (plus rare), par convection via l'air ou la vapeur en contact direct avec le béton ou par rayonnement au moyen d'émetteurs à infrarouge (haute ou basse température) agissant sur le béton ou les moules. Très souvent, ces modes de chauffage sont combinés dans des systèmes plus ou moins répandus selon leurs avantages ou inconvénients (voir exemples en annexe 5).

Le choix du système de chauffage externe dépend de nombreux paramètres :

- les dimensions et natures des moules ;
- l'organisation de la production : moules fixes – mobiles, cellules ou tunnel de durcissement, durées disponibles pour le chauffage ;
- le type d'énergie disponible, les puissances disponibles, les coûts en fonction des plages horaires (électricité en particulier) ;
- les possibilités ou facilités de régulation, les coûts d'investissement ;
- les contraintes de maintenance, de sécurité et d'environnement.

1.3.2. *Apport de chaleur interne*

Après la mise en place et le compactage du béton dans les moules, il est possible de le chauffer par un processus générant par diffusion de la chaleur au cœur même de celui-ci. Cela présente l'intérêt de pouvoir élever très rapidement la température à cœur et donc d'éliminer les problèmes liés à la lenteur des transferts de chaleur de la surface vers le cœur du béton.

En effet dès que l'on veut pratiquer un cycle de durcissement court à température élevée (supérieure à 50 °C) les écarts de températures entre les faces chauffées et le cœur dépassent souvent les valeurs admissibles (20 °C). Cela impose alors de respecter des gradients limités pour la montée en température (par exemple 20 °C/h pour une distance de 20 cm du cœur à la face chauffée). Les apports de chaleur à cœur d'un béton en place peuvent se faire par effet joule dans le béton, dans les armatures ou dans des résistances électriques noyées dans le béton. Ils peuvent aussi être réalisés par un champ de micro-ondes transmis au cœur du béton.

Dans tous les cas, même si la technique paraît simple, sa mise en œuvre industrielle nécessite des procédés optimisés pour maîtriser l'homogénéité des températures au sein du béton et leur reproductibilité.

Une autre méthode consiste à chauffer le béton avant sa mise en place, en réalisant un préchauffage du béton ou de ses constituants (eau, granulats) pour pouvoir ensuite mettre à profit cette élévation de température. Cela suppose que la mise en place du béton soit réalisée rapidement dans des moules isolés ou chauds pour que la température du béton ne chute pas rapidement avant ou pendant sa mise en place. Ceci implique aussi de pouvoir utiliser le béton chaud sans délai d'attente, car la perte de maniabilité augmente d'autant plus rapidement que sa température est élevée. Dans la pratique, on ne dépasse pas 30 °C en sortie de malaxeur, ou 40 °C en sortie de benne chauffante.

2. Propriétés des mortiers soumis à un traitement thermique

Les mortiers ont été soumis à des traitements thermiques dans lesquels les paramètres du cycle thermique (montée en température, durée et température du palier...) variaient. Le but de cette première partie a été de définir trois cycles thermiques conduisant à trois « apports de chaleur » différents. Dans une seconde partie, les paramètres « durée » et « température » de palier ont été explorés de manière plus approfondie. Les synergies entre l'activation thermique et l'activation chimique (chapitre IV) ainsi que l'optimisation granulaire (chapitre V) ont également été recherchées.

Durant ce chapitre, les graphiques représentent la température de consigne de l'étuve. Afin d'observer le gradient potentiel entre la consigne et la température au cœur du béton, les éprouvettes de mortier étaient munies de thermocouples (exemple de relevé en annexe 6). Pour les calculs réalisés (consommations, temps équivalent...), on prend comme hypothèse que la température du béton est la température de consigne. En parallèle, les propriétés à l'état frais ne sont pas présentées car les mortiers sont les mêmes que ceux des chapitres précédents.

2.1. Essais préliminaires de détermination des « apports de chaleur »

2.1.1. Choix des cycles de température

Afin d'étudier des cycles de traitement thermique différents, une première série d'essais a été réalisée en faisant varier les paramètres des quatre phases du traitement thermique. Ces traitements thermiques sont décrits schématiquement (figure 66) et de façon plus précise dans le tableau 28.

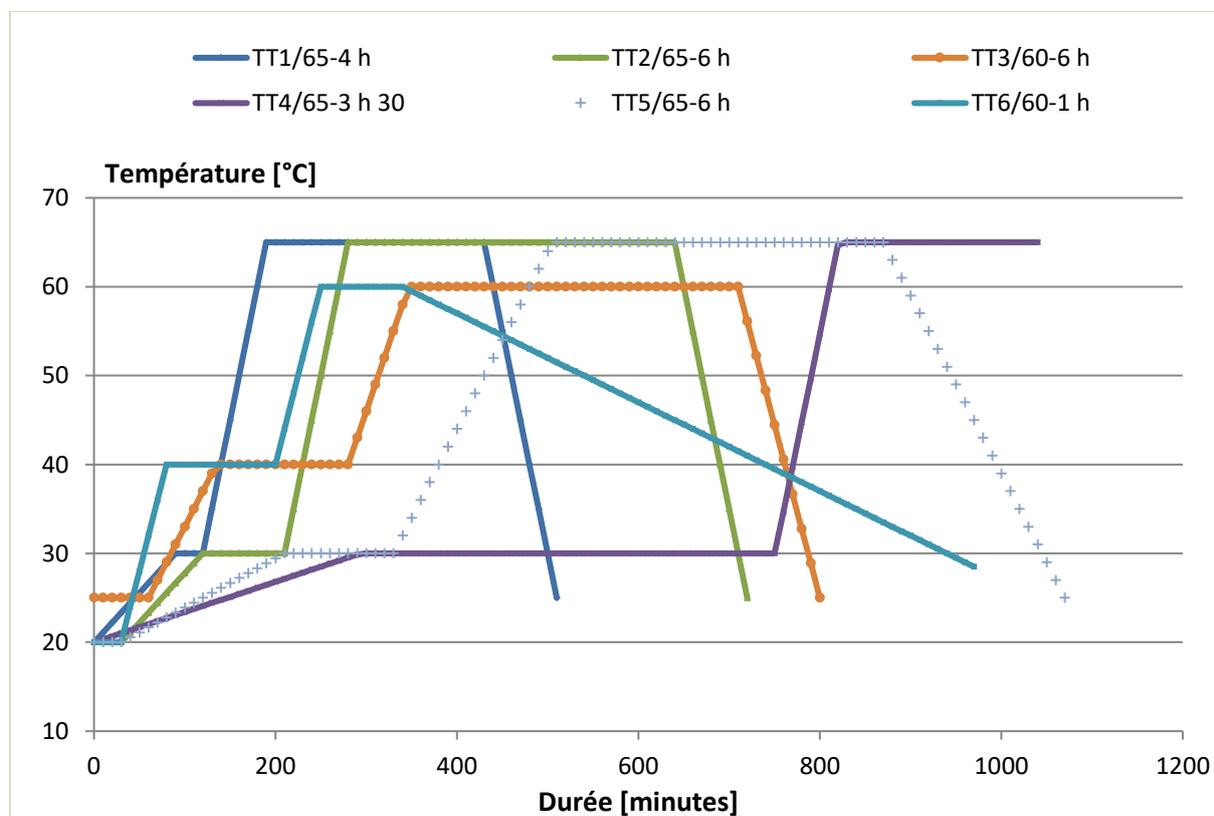


Figure 66 : Traitements thermiques étudiés lors du premier plan expérimental
(nomenclature présentée dans le tableau 29)

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**

De l'énergie est apportée pour chacune des phases des traitements thermiques. Lors des montées en température, l'énergie apportée est plus importante que lors des paliers (maintien nécessaire à cause des déperditions de l'enceinte) ou des descentes.

À partir de données industrielles réunies par le Cerib, une moyenne de consommation a été calculée, soit 0,18 MJ par kilogramme de béton. Cette valeur s'affranchi des paramètres matériaux et matériels, nous permettant de l'utiliser dans nos travaux réalisés sur mortiers.

À partir de cette valeur et des hypothèses de consommation qui en découlent (tableau 28), la consommation énergétique de chaque traitement thermique a été calculée (tableau 29). Elle est exprimée en kilowatt par mètre cube de béton à chauffer [kWh/m³].

En parallèle, l'aire sous la courbe (nommée « $\int_0^t A(T)$ » et exprimée en « degré Celsius × minutes ») a également été calculée (tableau 29).

Tableau 28 : Hypothèses pour le calcul de la consommation énergétique des traitements thermiques

Température	Consommation énergétique associée [MJ/kg]	Consommation énergétique associée [kWh/m ³]
45 °C	0,13	83,1
40 °C	0,12	76,7
30 °C	0,10	63,9
Montée de 40 °C à 64 °C	0,15	95,8
Montée de 30 °C à 60 °C	0,135	86,3

Afin de faciliter la lecture, une nomenclature de traitements thermiques est utilisée dans le texte et reprend la température et la durée de palier (tableau 29).

Tableau 29 : Détails des différents traitements thermiques

Nom.	Prétr.	Montée en T.	Palier	Montée en T.	Palier	Descente en T.	Durée totale	Conso. En. [kWh/m ³]	$\int_0^t A(T)$ [°C.min]
TT1 : TT1/65-4 h		20 °C à 30 °C 6,6 °C/h	30 °C 30'	30 °C à 65 °C 30 °C/h	65 °C 4 h	65 °C à 25 °C 30 °C/h	8 h 30	104,9	22 700
TT2 : TT2/65-6 h	20 °C 30'	20 °C à 30 °C 6,6 °C/h	30 °C 90'	30 °C à 65 °C 30 °C/h	65 °C 6 h	65 °C à 25 °C 30 °C/h	12 h	104,0	32 900
TT3 : TT3/60-6 h	25 °C 60'	25 °C à 40 °C 12 °C/h	40 °C 150'	40 °C à 60 °C 18 °C/h	60 °C 6 h	60 °C à 25 °C 23 °C/h	13 h 20	103,3	35 450
TT4 : TT4/ 65-3 h 30		20 °C à 30 °C 2,2 °C/h	30 °C 7 h 30	30 °C à 65 °C 28 °C/h	65 °C 3 h 30	Non contrôlée	17 h 30	110,2	38 960
TT5 : TT5/65-6 h	20 °C 30'	20 °C à 30 °C 3,3 °C/h	30 °C 120'	30 °C à 65 °C 12 °C/h	65 °C 6 h	65 °C à 25 °C 12 °C/h	17 h 45	98,2	41 375
TT6 : TT6/60-1 h	20 °C 30'	20 °C à 40 °C 24 °C/h	40 °C 120'	40 °C à 60 °C 30 °C/h	60 °C 1 h	60 °C à 25 °C 3,2 °C/h	16 h 10	90,1	42 820

« **Nom.** » : Nomenclature ; « **Prétr.** » : prétraitement ; « **T.** » : température ; « **Conso. En** » : Consommation Énergétique ; « $\int_0^t A(T)$ » : Aire sous la courbe
Exemple de nomenclature : « **TTA/65-4 h** » : palier de 4 heures à 65 °C

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**

2.1.2. Résultats

Dans un premier temps, l'impact du traitement thermique a été évalué sur le mortier témoin composé de ciment Portland CEM I de Port-la-Nouvelle par l'intermédiaire des traitements intitulés « TT2/65-6 h », « TT4/65-3 h 30 », « TT5/65-6 h » et « TT6/60-1 h » (tableau 30).

Dans un deuxième temps, les traitements thermiques « TT1/65-4 h », « TT2/65-6 h », « TT3/60-6 h », « TT4/65-3 h 30 », « TT5/65-6 h » et « TT6/60-1 h » ont été appliqués à la composition de mortier à base du liant « 53 » activée par 0,5 % de chlorure de sodium et 0,5 % de sulfate de sodium (noté « 53.0,5 »). Un deuxième dosage contenant une double quantité en activateur chimique (1 % en NaCl et 1 % en Na₂SO₄ et noté « 53.1 ») a également été testé pour un seul traitement thermique (TTA) (tableau 31).

Tableau 30 : Influence du traitement thermique – Composition à base de ciment Portland CEM I PLN

Composition PLN		Témoin PLN	PLN- TT2/65-6 h	PLN- TT4/65-3 h 30	PLN- TT5/65-6 h	PLN- TT6/60-1 h
Proportions massiques [g]						
Ciment		2 250,0				
Laitier		0				
Addition calcaire		0				
Sable CEN 0/2		6 750,0				
Eau d'ajout ($E_{eff}/L = 0,4$)		900,0				
Superplastifiant (0,25 %/L)		5,6				
Conso. Énergétique de l'étuvage [kWh/m³]		0	104	110,2	98,2	90,1
Échéance de démoulage		24 h	12 h	17 h 30	17 h 45	16 h 10
ρ [kg/m ³]	Dem	2 285,0	2 305,0	2 270,0	2 330,0	2 285,0
Résistance en compression [MPa]	Dem	44,9	49,0	49,4	56,0	53,8
	28 j	81,9	62,9	72,2	72,1	72,9
	90 j	86,1	69,7	75,2	n.d.	80,4
Résistance en flexion [MPa]	Dem	6,4	6,6	6,3	6,2	7,3
	28 j	10,3	9,0	9,1	8,5	8,8
	90 j	10,8	10,1	9,2	n.d.	9,3

« n.d. » : non déterminé ; « Conso. » : Consommation ; « TT2/65-6 h » : traitement thermique de palier 6 h à 65 °C.

L'application d'un traitement thermique au mortier témoin est bénéfique pour les résistances en compression. Les résistances évoluent positivement jusqu'à atteindre 56 MPa (TT5/65-6 h), soit + 25 % par rapport au témoin non chauffé. Les résistances mécaniques en flexion au démoulage des mortiers chauffés sont similaires et restent proches de celle du témoin non chauffé.

L'apport de chaleur maximal délivré par le traitement thermique TT4/65-3 h 30 ne permet pas d'obtenir la plus importante résistance en compression et en flexion au démoulage.

L'obtention de résistances mécaniques ne semble donc pas dépendre uniquement de la consommation énergétique mais également de la façon dont est apportée la chaleur : une chaleur apportée de manière progressive avec application d'un palier à 65 °C pendant 6 heures (TT5/65-6 h) semble pertinente pour l'obtention d'une bonne résistance en compression.

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**

En parallèle, un traitement apportant rapidement la température et possédant une longue et progressive descente en température jusqu'à l'ambiante (TT6/60-1 h) semble permettre l'obtention d'une bonne résistance en flexion. Cela peut être expliqué par une moindre fissuration de la matrice cimentaire lorsque la descente est plus progressive. À plus long terme, l'évolution des résistances en compression est plus faible dès lors qu'un traitement thermique est appliqué et plus particulièrement après le traitement thermique TT2/65-6 h (tableau 31).

Tableau 31 : Influence du traitement thermique et activation chimique – Composition à base liant « 53 »

	53. 0,5	53.0,5- TT1/65- 4 h	53.1- TT1/65- 4 h	53.0,5- TT2/65- 6 h	53.0,5- TT3/60- 6 h	53.0,5- TT4/65- 3 h 30	53.0,5- TT5/65- 6 h	53.0,5- TT6/60- 1 h	
Proportions massiques [g]									
Ciment	1 248,7								
Laitier	787,5								
Addition calcaire	213,8								
NaCl	3,7	7,4	3,7						
Na ₂ SO ₄	9,0	18	9,0						
Sable CEN 0/2	6 750,0								
Eau d'ajout (E _{eff} /L = 0,4)	900,0								
SP (0,25 %/ L)	5,6	6,8	5,6						
Conso. Énergétique de l'étuvage [kWh/m³]	0	104,9	104,9	104,0	103,3	110,2	98,2	90,1	
Échéance démoulage	24 h	8 h 30	8 h 30	12 h	13 h 20	17 h 30	17 h 45	16 h 10	
ρ [kg/m ³]	Dem	2 305,0	2 305,0	2 275,0	2 280,0	2 230,0	2 275,0	2 285,0	2 270,0
Résistance en compression [MPa]	Dem	29,4	38,5	36,6	48,1	46,2	43,9	50,2	47,5
	28 j	n.d.	n.d.	n.d.	69,0	68,5	73,3	72,7	67,4
	90 j	n.d.	n.d.	n.d.	70,7	74,4	79,4	n.d.	70,7
Résistance en flexion [MPa]	Dem	5,6	5,6	5,8	6,7	6,3	6,7	7,2	6,8
	28 j	n.d.	n.d.	n.d.	10,5	10,2	11,4	10,2	10,8
	90 j	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	9,1	11,1	n.d.	10,8

« n.d. » : non déterminé ; « TT2/65-6h » : traitement thermique de palier 6 heures à 65 °C ; « NaCl » : chlorure de sodium ; « Na₂SO₄ » : sulfate de sodium ; « Conso. » : Consommation.

L'application d'un traitement thermique à des mortiers intégrant le liant « 53 » permet également une augmentation non négligeable des résistances mécaniques au démoulage (en sortie d'étuve), en flexion et en compression (tableau 31). Tout comme les mortiers témoin (tableau 31), les optimums de résistances sont obtenus avec le traitement thermique TT5/65-6 h : + 70 % en compression et + 29 % en flexion par rapport au liant « 53 » non chauffé.

Le traitement thermique TT2/65-6 h permet également d'obtenir des résistances en compression et en flexion importantes. L'augmentation du dosage en activateurs chimiques (passage de 0,5 % à 1 %) ne semble pas pertinente avec les traitements thermiques étudiés.

Comparaison des résultats obtenus avec le liant « 53 » et le liant témoin CEM I

Dans un premier temps, nous avons comparé les résistances mécaniques entre le témoin et le liant « 53 » activé chimiquement pour un même traitement thermique. Comme attendu, les résistances en compression et en flexion augmentent continuellement avec le temps.

L'apport de température permet d'augmenter la résistance en compression à très jeune âge de manière non négligeable, surtout pour le mortier à base du liant « 53 » activé chimiquement par rapport au témoin. En effet, l'écart entre le « 53 » et « PLN », observé à 24 heures se réduit grâce au traitement thermique : 15 MPa sans traitement thermique et en moyenne 5 MPa avec traitement thermique. Toujours au démoulage, le cycle thermique TTB/65-6 h dont l'apport d'énergie est élevé (104 kWh/m³) permet la quasi équivalence des résistances obtenues entre les mortiers témoin et ceux confectionnés avec le liant « 53 » activé chimiquement.

À 28 jours et 90 jours, le mortier « 53 » possède de meilleures résistances que le témoin pour les traitements thermiques dont la consommation énergétique est supérieure ou égale à 98 kWh/m³, ce qui correspond à tous les traitements à l'exception de TT6/60-1 h (90 kWh/m³).

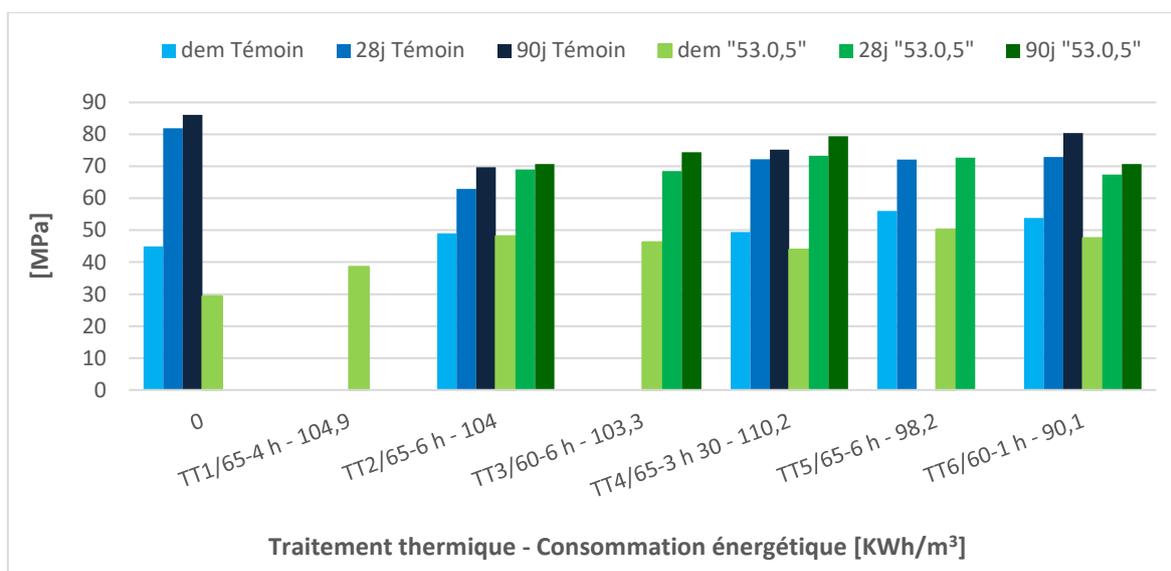


Figure 67 : Résistances mécaniques en compression des mortiers témoins et des mortiers « 53 » activés et soumis ou non à un traitement thermique

Si on compare les résistances mécaniques obtenues avec le liant « 53 » activé chimiquement et l'objectif fixé dans le cahier des charges, à savoir au minimum 20 MPa et 40 MPa au démoulage respectivement à 8 heures et 10 heures, on constate que la synergie entre activateur chimique et traitement thermique permet d'atteindre l'objectif.

Les résistances obtenues sont toutefois plus faibles que le témoin aux échéances plus longues. Ceci semble toutefois cohérent avec la diminution des performances mécaniques du témoin CEM I avec un traitement thermique de plus en plus énergétique. Il est bien connu qu'une accélération de la cinétique d'hydratation du ciment Portland conduit à accélérer le durcissement mais aussi à réduire les performances mécaniques à long terme.

La synergie entre l'activation chimique et le traitement thermique varie cependant en fonction des paramètres du traitement thermique.

CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT

Globalement, les résistances des mortiers témoin augmentent avec le temps, ce qui n'est pas systématiquement le cas entre 28 et 90 jours pour la résistance en flexion avec les mortiers à base de liant « 53 » activé chimiquement (figure 68).

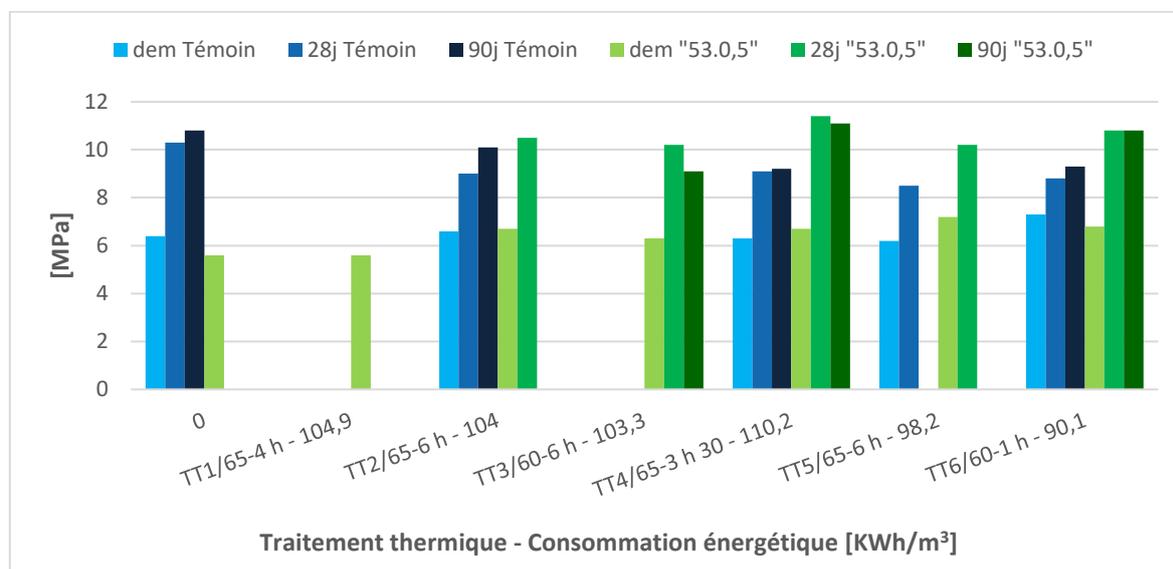


Figure 68 : Résistances mécaniques en flexion des mortiers témoins et des mortiers « 53 » activés et soumis ou non à un traitement thermique

Que ce soit en compression ou en flexion, les performances semblent être optimales dès lors que le mortier à base de liant « 53 » est activé chimiquement et traité thermiquement avec le cycle thermique TT5/65-6 h. Ce traitement dure au total 17 h 45 et présente une montée en température jusqu'à 65 °C réalisée en 8 h 30, découpée en deux étapes avec un palier intermédiaire de 2 heures à 30 °C pour un palier final de 6 heures. Ce type de liant ternaire activé semble donc mieux se comporter dès lors que l'apport de température n'est pas trop brusque. Par contre, le doublement de la quantité d'activateurs (1 % de sulfate de sodium + 1 % de chlorure de sodium) ne semble pas améliorer les performances en compression (- 2 MPa) dans le cas du traitement thermique TTA ; un résultat différent aurait peut-être été obtenu avec le traitement thermique TT5/65-6 h.

À ce stade, il reste difficile d'avancer plus d'éléments sur l'effet des paramètres gouvernant l'apport de chaleur (prétraitement ou non, vitesse de montée en température...). Afin d'approfondir, le choix s'est tourné sur l'étude de l'utilisation de traitements thermiques de températures de palier différentes. Même en utilisant toujours la même étuve, la consommation énergétique réelle est un paramètre délicat à fixer mais simple à mesurer. Il a donc été choisi de travailler à aires sous la courbe équivalentes. Trois valeurs, sélectionnées d'après les tendances observées dans ce paragraphe, ont été sélectionnées : 25 000, 35 000 et 40 000 °C.minutes.

2.2. Approfondissement de l'apport du traitement thermique

Les mortiers ont subi des traitements thermiques ayant des températures et durées de palier différentes, dans l'objectif d'étudier l'impact de la manière dont est apportée la chaleur aux mortiers. Les caractéristiques des traitements thermiques sont indiquées dans le tableau 32 et schématisées sur la figure 69. Les consommations énergétiques sont calculées en utilisant une valeur moyenne de masse volumique de 2 300 kg/m³.

Tableau 32 : Description des traitements thermiques

Traitement thermique	Prét.	Montée en T.	Durée du palier	T. du palier	Durée totale	Aire $\int_0^t A(T)$ [°C.minutes]	Conso. En. [KWh/m ³]
A	20 °C ; 30'	24 °C/h	3 h 30	80 °C	6 h 30	25 000	113,0
A'			5 h 05		8 h 05	35 000	117,5
A''			6 h 40		9 h 40	40 000	120,6
B		16 °C/h	60 °C	5 h 20	8 h 20	25 000	94,5
B'				7 h 20	10 h 20	35 000	97,0
B''				9 h 25	12 h 25	40 000	98,8
C		8 °C/h	40 °C	8 h 20	11 h 20	25 000	72,6
C'				11 h 25	14 h 25	35 000	73,7
C''				14 h 30	17 h 30	40 000	74,3

« Prét. » : prétraitement ; « T. » : température ; « Conso. En. » : Consommation Énergétique.

Pour une même aire sous la courbe, la consommation énergétique est d'autant plus importante que la température de palier est élevée (moyenne de 20 KWh/m³ pour un écart de 20 °C).

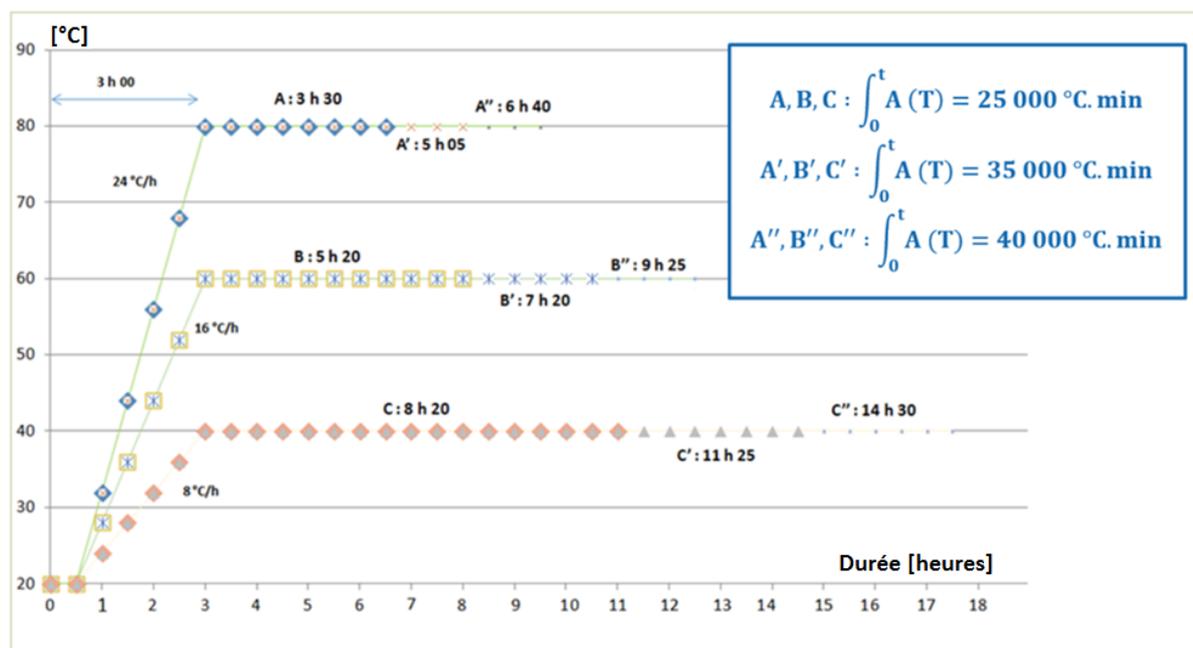


Figure 69 : Traitements thermiques étudiés

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**

2.2.1. Mortiers activés chimiquement par du chlorure de sodium et du sulfate de sodium

Comme dans le chapitre précédent, le liant « 53 » activé par du chlorure de sodium et du sulfate de sodium avec une quantité correspondant à 0,5 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ par rapport au laitier (noté « 53.0,5 ») a été utilisé pour ces essais. Des essais complémentaires ont été réalisés sur le liant « 40 » avec la même activation chimique. Ainsi la quantité de chlorure de sodium et de sulfate de sodium est plus importante pour le liant « 40.0,5 » puisque la teneur en laitier du liant « 40 » est supérieure à celle du liant « 53 ». La référence est confectionnée avec le CEM I de l'usine de Port-la-Nouvelle (CEM I 52,5 R).

Les essais de résistances mécaniques en flexion et compression ont été réalisés en sortie d'étuve (en fin de palier ; la température des éprouvettes était proche de 80 °C/60 °C/40 °C), à 28 jours et à 90 jours (les éprouvettes ont été stockées dans l'eau à 20 °C ; au moment du contact avec l'eau, leur température était de 20 °C). Le choix de mesurer la résistance en sortie d'étuve s'est fait par analogie avec la réalité en usine. Les résultats sont présentés par température de palier, soit 80 °C, 60 °C et 40 °C.

2.2.1.1. Température de palier de 80 °C

La réalisation d'un traitement thermique dont la température de palier est de 80 °C permet l'obtention au démoulage de résistances mécaniques en compression équivalentes au témoin non traité thermiquement pour les trois durées de palier et donc les trois quantités de chaleur apportée, aussi bien pour le liant « 53.0,5 » que le liant « 40.0,5 » (tableau 33, figures 70 et 71).

Tableau 33 : Résultats des mortiers soumis à un traitement thermique de 80 °C

	« PLN »			« 53.0,5 »			« 40.0,5 »			
	TTA	TTA'	TTA''	TTA	TTA'	TTA''	TTA	TTA'	TTA''	
Proportions massiques [g]										
CEM I 52,5 R PLN	2 250,0			1 248,7			942,4			
Laitier	0			787,5			1 012,5			
Addition calcaire	0			213,8			295,1			
NaCl	0			3,7			4,7			
Na ₂ SO ₄	0			9,0			11,5			
Sable CEN 0/2	6 750,0			6 750,0			6 750,0			
Eau (E _{eff} /L = 0,4)	900,0			900,0			900,0			
SP (0,25 %/ L)	5,6			5,6			5,6			
Conso. En. [KWh/m³]	113,0	117,5	120,6	113,0	117,5	120,6	113,0	117,5	120,6	
Caractéristiques à l'état durci										
Échéance de démoulage	6 h 30	8 h 05	9 h 40	6 h 30	8 h 05	9 h 40	6 h 30	8 h 05	9 h 40	
Résistance en compression [MPa]	Dem	51,7	n.d.	n.d.	45,6	52,4	52,3	49,1	48,2	50,6
	28 j	72,4	n.d.	n.d.	71,6	n.d.	69,8	73,5	n.d.	66,8
	90 j	78,4	n.d.	n.d.	73,6	n.d.	74,7	79,8	n.d.	71,5
	365 j	n.d.	n.d.	n.d.	78,9	n.d.	n.d.	86,9	n.d.	n.d.
Résistance en flexion [MPa]	Dem	6,1	n.d.	n.d.	6,2	6,0	4,8	6,5	5,4	5,3
	28 j	7,4	n.d.	n.d.	8,8	n.d.	9,1	10,4	n.d.	10,1
	90 j	8,8	n.d.	n.d.	9,6	n.d.	10,0	11,1	n.d.	10,5
	365 j	n.d.	n.d.	n.d.	10,5	n.d.	n.d.	11,3	n.d.	n.d.

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**

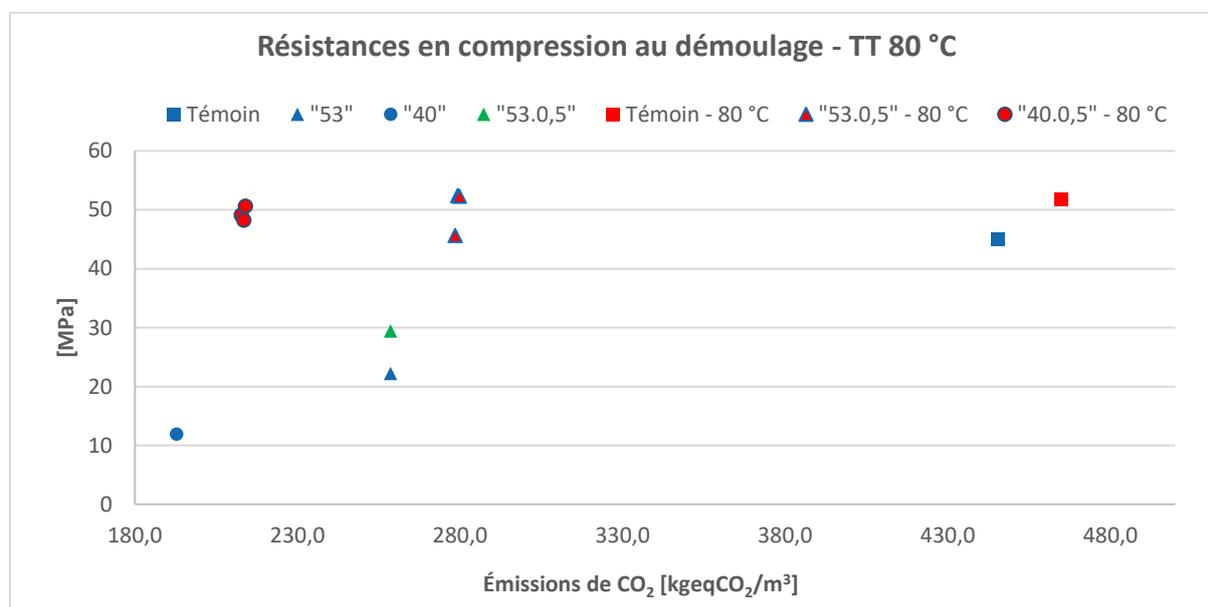
	« PLN »			« 53.0,5 »			« 40.0,5 »		
	TTA	TTA'	TTA''	TTA	TTA'	TTA''	TTA	TTA'	TTA''
Caractéristiques économiques et environnementales (mesurées sur 1 m³ de mortier) *									
Coût [€/m ³]	120,6	121,2	121,7	111,2	111,9	112,3	106,9	107,5	108,0
Coût (%/témoin « CEM I »)	115,7	116,3	116,8	106,7	107,4	107,8	102,6	103,2	103,6
Émissions de CO ₂ (dont procédé) [kgeqCO ₂ /m ³]	464,9 (19,5)	465,7 (20,3)	466,2 (20,8)	278,4 (19,5)	279,2 (20,3)	279,8 (20,8)	212,6 (19,5)	213,4 (20,3)	213,9 (20,8)
Émissions de CO ₂ (%/témoin « CEM I »)	104,4	104,6	104,7	62,5	62,7	62,8	47,7	47,9	48,0

« n.d. » : non déterminé ; « Conso. En. » : Consommation Énergétique ; « NaCl » : chlorure de sodium ; « Na₂SO₄ » : sulfate de sodium ; le témoin « CEM I » est non traité thermiquement.

* Les calculs ont été réalisés en utilisant une valeur de masse volumique réelle moyenne : 2 300 kg/m³ (§ 5.2).

L'application d'un traitement thermique engendre une légère augmentation de la quantité émise de CO₂ (en moyenne 20 kgeqCO₂/m³ de mortier). En parallèle, l'augmentation de la durée de palier, passant de 3 h 30 (TTA) à 5 h 05 (TTA') et 6 h 40 (TTA'') ne génère pas d'augmentation significative de la quantité de CO₂ émise.

La résistance en compression au démoulage du mortier à base de liant « 40 » est équivalente pour les trois durées de palier tandis qu'une augmentation de 2 heures de la durée par rapport à la durée la plus faible (TTA/80-3 h 30) permet au mortier à base de liant « 53 » de dépasser 50 MPa au bout de 8 h (figure 70).



Légende :

Formes : carrés : « témoin » ; triangles : liant « 53 » ; ronds : liant « 40 ».

Couleurs : bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; rouge : activé et traité th.

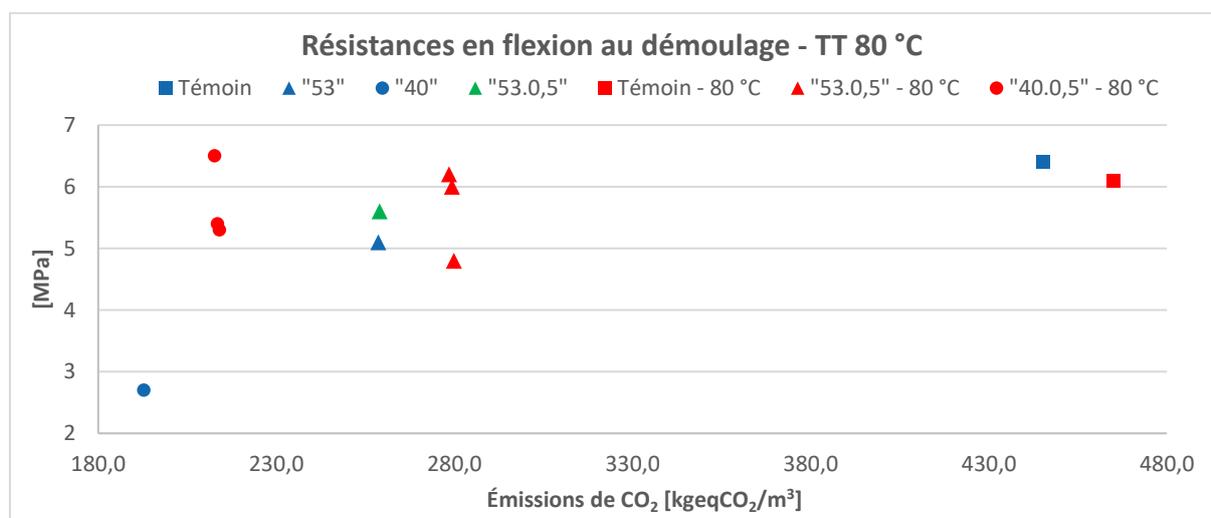
Figure 70 : Résistances mécaniques en compression des mortiers traités thermiquement à 80 °C

CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT

Les mortiers à base de liants à plus faible teneur en clinker, activés chimiquement et traités thermiquement à 80 °C, permettent l'obtention de résistances en compression au démoulage équivalentes au mortier témoin (figure 70) :

- une durée de traitement de 6 h 30 (TTA) permet au mortier « 53.0,5 » d'être équivalent au témoin non traité, tout en réduisant les émissions de CO₂ de 170 kgeqCO₂/m³ ;
- une durée de traitement de 9 h 40 (TTA'') permet au mortier « 40.0,5 » d'être équivalent au témoin traité thermiquement pendant 6 h 30 (TTA) en émettant plus de deux fois moins de CO₂ (réduction de 250 kgeqCO₂/m³) ;
- une durée de traitement d'environ 8 h (TTA') permet au mortier « 53.0,5 » d'être équivalent au témoin traité thermiquement pendant 6 h 30 (TTA) tout en réduisant les émissions de CO₂ de 185 kgeqCO₂/m³.

La résistance en flexion diminue avec l'augmentation de la durée de palier, tout en restant supérieure à celle des mortiers similaires non traités thermiquement (notamment pour le liant « 40 ») (figure 71). Elle est également inférieure au témoin CEM I non traité thermiquement. L'application du traitement thermique TTA/80-3 h 30 permet au mortier « 40 » activé d'obtenir une résistance en flexion équivalente au témoin non traité thermiquement, tout en réduisant fortement la quantité émise de CO₂ (environ 230 kgeqCO₂/m³). Cette importante diminution pourrait être liée à l'apport trop rapide de la chaleur dans le mortier, conduisant à créer des microfissures.



Légende :

Formes : carrés : « témoin » ; triangles : liant « 53 » ; ronds : liant « 40 ».

Couleurs : bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; rouge : activé et traité th.

Figure 71 : Résistances mécaniques en flexion des mortiers traités thermiquement à 80 °C

À plus long terme (tableau 33), les performances évoluent pour obtenir des résistances en compression qui augmentent avec le temps : elles sont supérieures à 60 MPa à 28 jours et 70 MPa à 90 jours. Les deux essais réalisés après 1 an, confirment l'amélioration des résistances avec le temps.

À 28 ou 90 jours, une durée du palier plus importante, conduit plus systématiquement à une moindre résistance en compression contrairement au démoulage. Mis à part pour le liant « 40.0,5 » soumis au traitement thermique TTA/80-6 h 30, la résistance mécanique en compression des liants ternaires traités thermiquement reste inférieure à celle des mortiers CEM I ayant subi le même traitement thermique, tout en restant élevée.

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**

Concernant la résistance en flexion à 28 ou 90 jours, les mortiers à base de liants ternaires activés possèdent systématiquement des résistances supérieures au témoin CEM I ayant subi le même traitement thermique. Néanmoins, seul le liant « 40.0,5 » soumis au traitement thermique TTA/80-6 h 30 possède une résistance à la flexion légèrement supérieure au témoin CEM I non traité thermiquement.

2.2.1.2. Température de palier de 60 °C

Les résultats obtenus pour les traitements thermiques ayant une température de palier de 60 °C sont regroupés dans le tableau 34 et représentés sur les figures 72 et 73.

Tableau 34 : Résultats des mortiers soumis à un traitement thermique de palier 60 °C

	« PLN »			« 53.0,5 »			« 40.0,5 »			
	TTB	TTB'	TTB''	TTB	TTB'	TTB''	TTB	TTB'	TTB''	
Proportions massiques [g]										
CEM I 52,5 R PLN	2 250,0		2 250,0	1 248,7			942,4		942,4	
Laitier	0		0	787,5			1 012,5		1 012,5	
Addition calcaire	0		0	213,8			295,1		295,1	
NaCl	0		0	3,7			4,7		4,7	
Na ₂ SO ₄	0		0	9,0			11,5		11,5	
Sable CEN 0/2	6 750,0		6 750,0	6 750,0			6 750,0		6 750,0	
Eau (E _{eff} /L = 0,4)	900,0		900,0	900,0			900,0		900,0	
SP (0,25 %/ L)	5,6		5,6	5,6			5,6		5,6	
Conso. En. [KWh/m³]	94,5	97,0	98,8	94,5	97,0	98,8	94,5	97,0	98,8	
Caractéristiques à l'état durci										
Échéance de démoulage	8 h 20	10 h 20	12 h 25	8 h 20	10 h 20	12 h 25	8 h 20	10 h 20	12 h 25	
Résistance en compression [MPa]	Dem	46,9	n.d.	55,2	35,4	42,9	41,7	34,9	n.d.	50,6
	28 j	74,5	n.d.	67,2	65,3	67,7	76,3	63,0	n.d.	63,3
	90 j	76,7	n.d.	71,9	66,6	n.d.	n.d.	68,8	n.d.	67,6
	365 j	n.d.	n.d.	n.d.	77,6	n.d.	n.d.	70,8	n.d.	78,6
Résistance en flexion [MPa]	Dem	6,4	n.d.	5,8	5,6	5,7	5,4	5,4	n.d.	7,0
	28 j	8,3	n.d.	7,9	8,9	11,0	11,2	10,3	n.d.	7,6
	90 j	9,6	n.d.	9,4	9,9	n.d.	n.d.	10,6	n.d.	10,4
	365 j	n.d.	n.d.	n.d.	9,8	n.d.	n.d.	11,1	n.d.	10,8
Caractéristiques économiques et environnementales (mesurées sur 1 m³ de mortier) *										
Coût [€/m ³]	117,9	118,2	118,5	108,5	108,9	109,2	104,2	104,6	104,8	
Coût (%/témoin « CEM I »)	113,1	113,4	113,7	104,1	104,5	104,8	100,0	100,4	100,6	
Émissions de CO ₂ (dont procédé) [kgeqCO ₂ /m ³]	461,7 (16,3)	462,1 (16,8)	462,4 (17,1)	275,3 (16,3)	275,7 (16,8)	276,0 (17,1)	209,4 (16,3)	209,9 (16,8)	210,2 (17,1)	
Émissions de CO ₂ (%/témoin « CEM I »)	103,7	103,8	103,8	61,8	61,9	62,0	47,0	47,1	47,2	

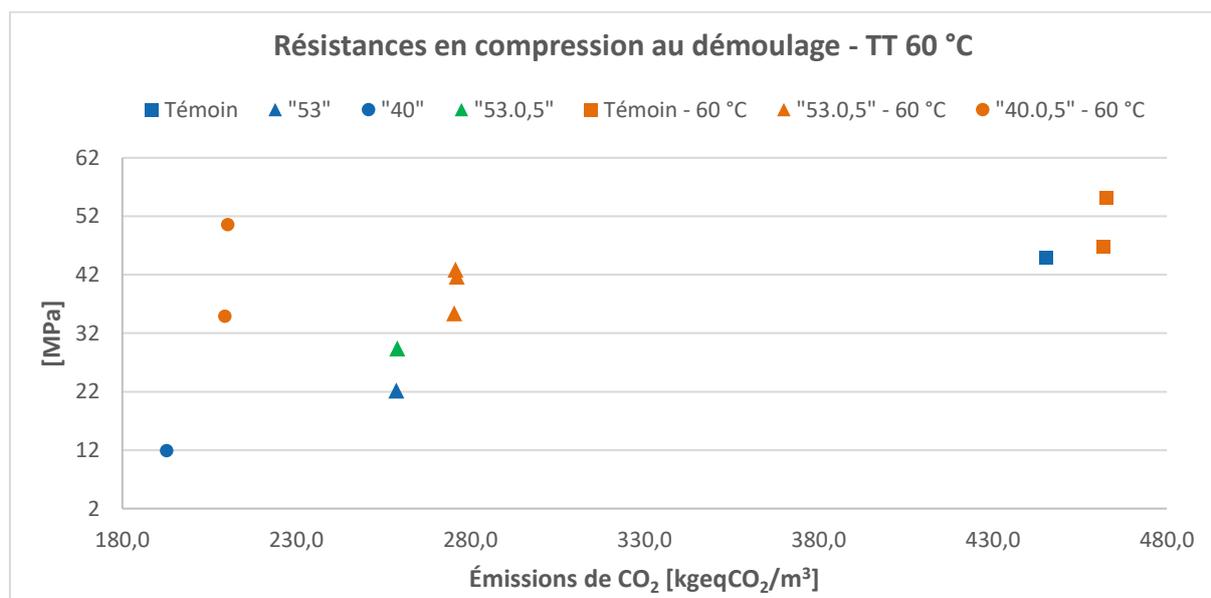
« n.d. » : non déterminé ; « Conso. En. » : Consommation Énergétique ; « NaCl » : chlorure de sodium ; « Na₂SO₄ » : sulfate de sodium ; le témoin « CEM I » est non traité thermiquement.

* Les calculs ont été réalisés en utilisant une valeur de masse volumique réelle moyenne : 2 300 kg/m³ (§ 5.2).

CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT

Pour chaque durée de palier, les mortiers à base de liants « 40.0,5 » et « 53.0,5 » n'atteignent pas l'équivalence en compression au démoulage avec le témoin CEM I traité thermiquement, à l'exception du liant « 40.0,5/TTB'' » par rapport au témoin « PLN/TTB'' ». Toutefois, l'utilisation d'un tel traitement thermique sur le liant « 40.0,5 » permet une augmentation importante des performances en flexion et compression, encore améliorées avec des paliers de durées plus longues. Après 12 h 25 de traitement (TTB''), le liant « 40.0,5 » obtient une résistance en compression de 50 MPa, soit 11 % de plus que celle du témoin non traité thermiquement et + 6 % par rapport au témoin CEM I traité thermiquement. Pour la même durée de palier, la résistance en flexion obtenue est 10 % supérieure au témoin CEM I non traité mais également traité à 60 °C pendant 8 h 20 (TTB), tout en permettant de réduire fortement les émissions de CO₂ (250 kgeqCO₂/m³).

Un traitement thermique à 60 °C pendant 8 h 20 (TTB) appliqué au liant « 53.0,5 » permet une augmentation de 57 % de la résistance en compression au démoulage vis-à-vis du même mortier non traité. En augmentant le temps de palier de 2 heures supplémentaires, la résistance augmente encore de 21 %. Vis-à-vis de la résistance en flexion, l'application de ce traitement thermique n'apporte pas d'amélioration aussi significative (+ 11 %). Un apport encore plus important de chaleur ne semble pas être pertinent vis-à-vis des performances mécaniques en flexion et en compression pour le liant « 53.0,5 ».



Légende :

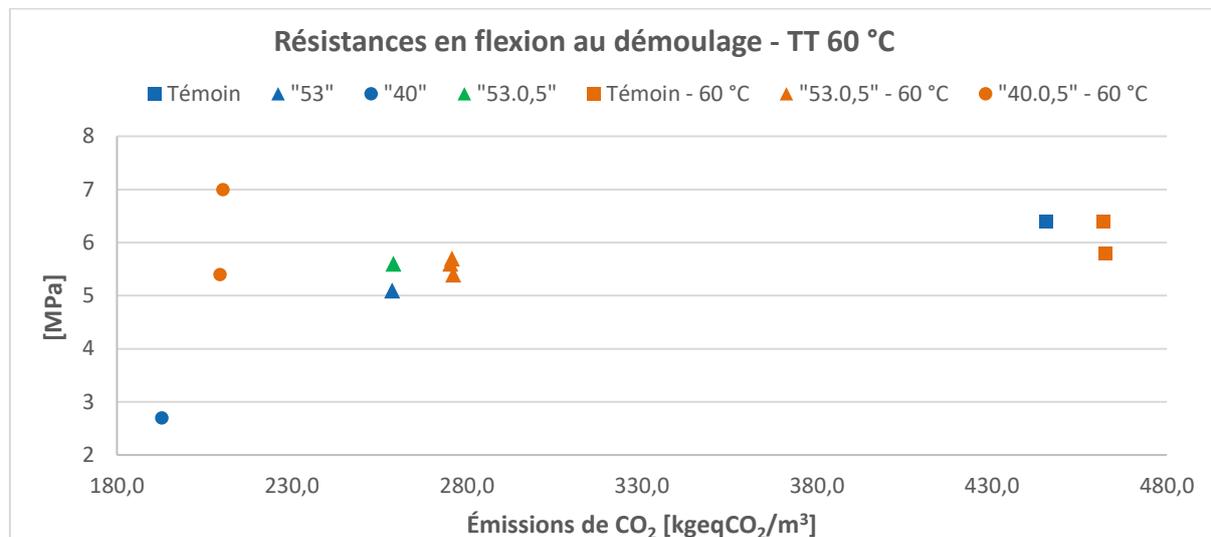
Formes : carrés : « témoin » ; triangles : liant « 53 » ; ronds : liant « 40 ».

Couleurs : bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; orange : activé et traité th.

Figure 72 : Résistances mécaniques en compression des mortiers traités thermiquement à 60 °C

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**

Contrairement à la température de 80 °C, la résistance en flexion ne diminue pas avec l'augmentation de la durée du traitement.



Légende :

Formes : carrés : « témoin » ; triangles : liant « 53 » ; ronds : liant « 40 ».

Couleurs : bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; orange : activé et traité th.

Figure 73 : Résistances mécaniques en flexion des mortiers traités thermiquement à 60 °C

À plus long terme (tableau 34), les performances évoluent pour obtenir des résistances en compression supérieures à 60 MPa à 28 jours et 65 MPa à 90 jours. Plus le temps de palier est important et moins le gain de performance est élevé. De plus, les résistances mécaniques en compression restent inférieures aux témoins CEM I soumis à un traitement thermique similaire. Vis-à-vis des résistances mécaniques en flexion, les mortiers ternaires activés possèdent systématiquement des résistances supérieures au témoin à partir de 28 jours (minimum + 3 % pour le mortier « 53/TTB » et maximum + 10 % pour le mortier « 40/TTB »).

2.2.1.3. Température de palier de 40 °C

Les résultats obtenus en abaissant la température du palier à 40 °C sont reportés dans le tableau 35 et représentés sur les figures 74 et 75.

Tableau 35 : Résultats des mortiers soumis à un traitement thermique de 40 °C

	PLN			« 53.0,5 »			« 40.0,5 »		
	TTC	TTC'	TTC''	TTC	TTC'	TTC''	TTC	TTC'	TTC''
Proportions massiques [g]									
CEM I 52,5 R PLN	2 250,0			1 248,7			942,4		
Laitier	0			787,5			1 012,5		
Addition calcaire	0			213,8			295,1		
NaCl	0			3,7			4,7		
Na ₂ SO ₄	0			9,0			11,5		
Sable CEN 0/2	6 750,0			6 750,0			6 750,0		
Eau (E _{eff} /L = 0,4)	900,0			900,0			900,0		
SP (0,25 %/ liant)	5,6			5,6			5,6		

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**

	PLN			« 53,0,5 »			« 40,0,5 »			
	TTC	TTC'	TTC''	TTC	TTC'	TTC''	TTC	TTC'	TTC''	
Conso. En. [KWh/m³]	72,6	73,7	74,3	72,6	73,7	74,3	72,6	73,7	74,3	
Caractéristiques à l'état durci										
Échéance de démoulage	11 h 20	14 h 25	17 h 30	11 h 20	14 h 25	17 h 30	11 h 20	14 h 25	17 h 30	
R. en compression [MPa]	Dem	50,1	n.d.	n.d.	23,5	36,9	46,4	31,2	31,6	41,2
	28 j	73,8	n.d.	n.d.	37,3	70,1	68,5	63,4	64,4	64,5
	90 j	78,6	n.d.	n.d.	38,4	n.d.	72,3	68,3	n.d.	69,6
Résistance en flexion [MPa]	Dem	6,7	n.d.	n.d.	4,4	6,2	6,7	5,6	5,6	6,5
	28 j	8,7	n.d.	n.d.	6,2	12,7	11,6	10,7	13,2	12,5
	90 j	9,9	n.d.	n.d.	6,6	n.d.	11,6	10,6	n.d.	11,3
Caractéristiques économiques et environnementales (mesurées sur 1 m³ de mortier) *										
Coût [€/m ³]	114,7	114,9	115,0	105,4	105,5	105,6	101,0	101,2	101,3	
Coût (%/témoin « CEM I »)	110,1	110,3	110,4	101,2	101,2	101,3	96,9	97,1	97,2	
Émissions de CO ₂ (dont procédé) [kgeqCO ₂ /m ³]	457,9 (12,6)	458,1 (12,8)	458,2 (12,9)	271,5 (12,6)	271,7 (12,8)	271,8 (12,9)	205,7 (12,6)	205,9 (12,8)	206,0 (12,9)	
Émissions de CO ₂ (%/témoin « CEM I »)	102,8	102,9	102,9	61,0	61,0	61,0	46,2	46,2	46,3	

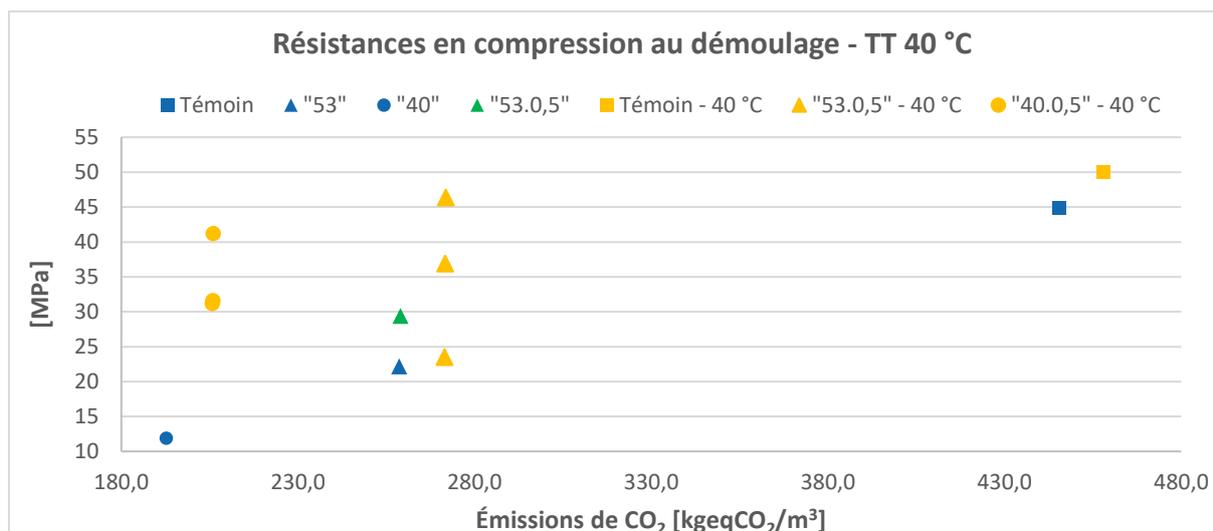
« n.d. » : non déterminé ; « Conso. En. » : Consommation Énergétique ; « NaCl » : chlorure de sodium ; « Na₂SO₄ » : sulfate de sodium ; le témoin « CEM I » est non traité thermiquement.

* Les calculs ont été réalisés en utilisant une valeur de masse volumique réelle moyenne : 2 300 kg/m³ (§ 5.2).

L'impact de ce traitement thermique sur les résistances mécaniques des mortiers confectionnés avec les liants « 40,0,5 » et « 53,0,5 » conduit à des différences plus notables par rapport aux mêmes essais réalisés avec les traitements thermiques ayant les températures de palier à 60 °C et de façon encore plus marquée à 80 °C. Pour les mortiers à base du liant « 53,0,5 », le traitement thermique devient efficace pour une durée de palier supérieure à 8 h 20 (TTC). En effet, pour une durée de palier de 11 h 25, les performances en compression sont supérieures au mortier « 53,0,5 » non soumis à un traitement thermique (+ 66 %) tout en restant inférieur au témoin CEM I (- 18 %). En parallèle, ce même traitement thermique permet d'atteindre l'équivalence avec le témoin non traité thermiquement en termes de résistance en flexion au bout de 14 h 25. En augmentant encore le temps de palier à 14 h 30, les résistances en compression et flexion dépassent légèrement le témoin CEM I non traité thermiquement et sont équivalentes au témoin CEM I soumis au traitement thermique C (palier de 8 h 20), tout en réduisant très fortement les émissions de CO₂ associées (260 kgeqCO₂/m³).

Concernant les mortiers à base du liant « 40,0,5 », les résistances obtenues après traitement sont équivalentes pour les durées de palier de 8 h 20 et de 11 h 25, tout en étant supérieures au mortier « 40,0,5 » non traité thermiquement (+ 83 % en compression et + 115 % en flexion). En augmentant encore le temps de palier, la résistance en compression obtenue dépasse 40 MPa et celle en flexion est équivalente au témoin CEM I non traité thermiquement et au mortier « 53,0,5 » soumis aux mêmes conditions expérimentales.

CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT

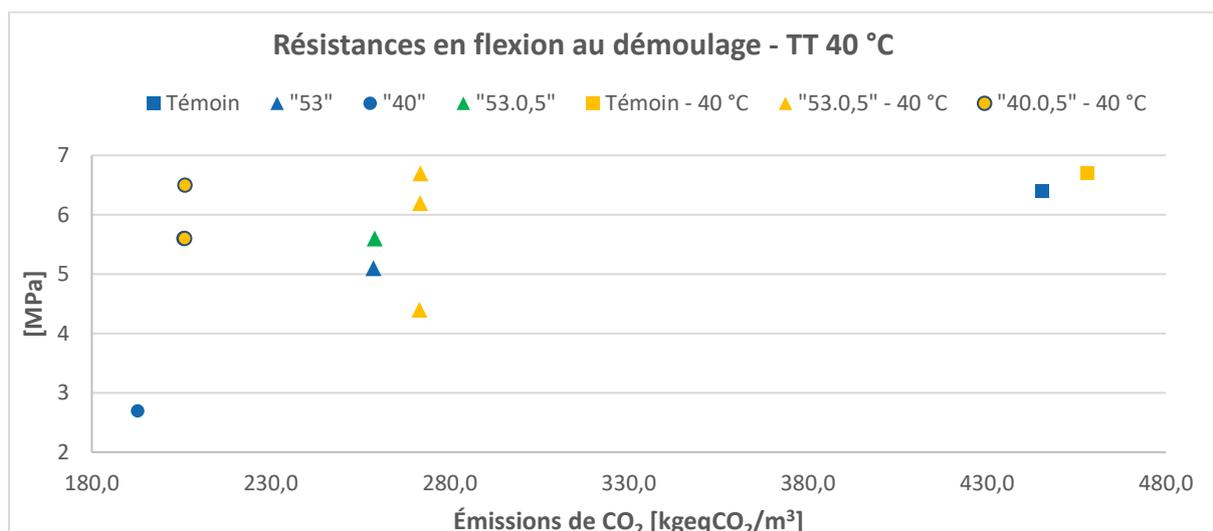


Légende :

Formes : carrés : « témoin » ; triangles : liant « 53 » ; ronds : liant « 40 ».

Couleurs : bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; jaune : activé et traité th.

Figure 74 : Résistances mécaniques en compression des mortiers traités thermiquement à 40 °C



Légende :

Formes : carrés : « témoin » ; triangles : liant « 53 » ; ronds : liant « 40 ».

Couleurs : bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; jaune : activé et traité th.

Figure 75 : Résistances mécaniques en flexion des mortiers traités thermiquement à 40 °C

À plus long terme (tableau 35), les performances évoluent pour obtenir des résistances en compression supérieures à 60 MPa à 28 jours et 65 MPa à 90 jours. Plus le temps de palier est important et moins le gain en résistance mécanique est élevé.

De plus, les résistances mécaniques des liants ternaires restent inférieures à celles du témoin CEM I traité thermiquement dans les mêmes conditions. Vis-à-vis des résistances en flexion des mortiers ternaires testés, le traitement thermique conduit à une évolution positive de ces dernières.

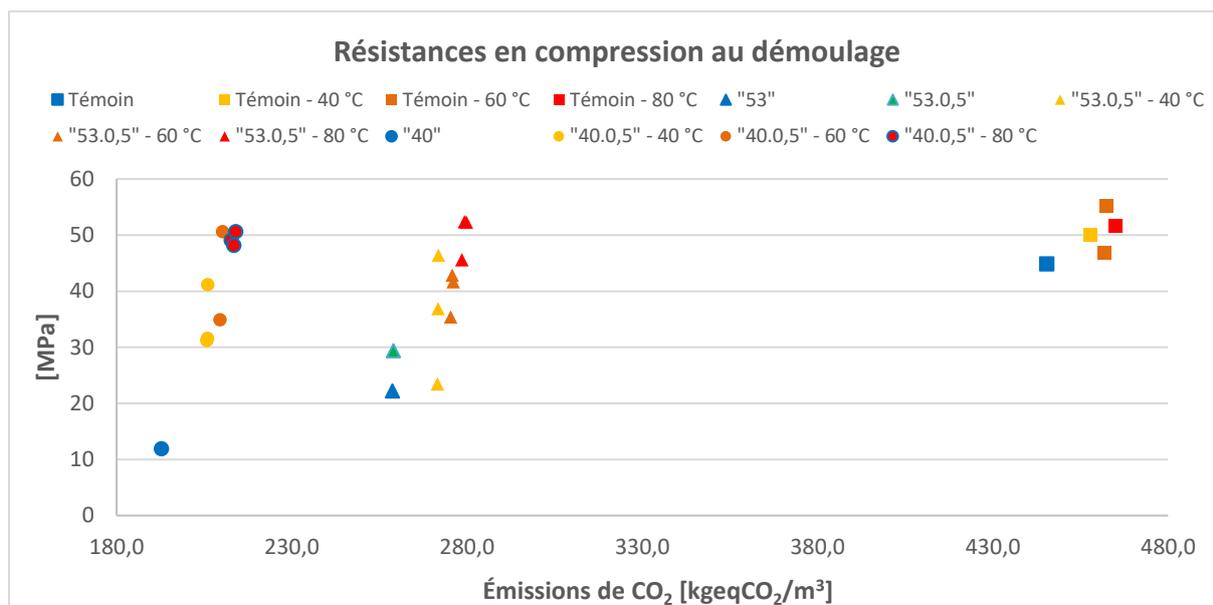
2.2.1.4. Discussion

Globalement, l'application d'un traitement thermique permet l'amélioration des performances à court terme, et dans une moindre mesure à long terme, des mortiers à base des liants « 40.0,5 » et « 53.0,5 » activés par du chlorure de sodium et du sulfate de sodium par rapport aux mêmes mortiers réalisés à température ambiante.

Toutefois et même si les résistances mécaniques du témoin CEM I n'ont pas été mesurées pour chaque traitement thermique, ce dernier possède une résistance maximale de 55 MPa pour une durée maximale de palier de 9 h 25 à 60 °C (durée totale du cycle de 12 h 25 [TTC']). Cette valeur n'a pas été atteinte avec les mortiers ternaires testés (figure 76). Le liant « 53.0,5 » permet aux mortiers qui l'incorpore d'obtenir une résistance en compression au démoulage d'environ 53 MPa dans des conditions qui semblent être les meilleures pour ce liant (apport de chaleur avec un palier de température à 80 °C pendant une durée de palier de 6 h 40 [TTA']). La durée du palier, en relation avec la quantité de chaleur apportée, doit être optimisée pour chaque liant. La même tendance est observée pour une température de 60 °C (maximum à 43 MPa au bout de 10 h 20 de traitement [TTB']). Pour une température de palier de 40 °C, l'augmentation de la résistance en compression est directement dépendante du temps de palier, permettant d'obtenir une résistance équivalente au témoin CEM I non traité thermiquement au bout de 17 h 30 [TTC']). Il est observé qu'un traitement thermique trop court à 40 °C, durée de palier de 8 h 20 [TTC], ne permet pas tout à fait l'équivalence de résistance en compression par rapport au même mortier non traité thermiquement (mesure à 24 heures).

Concernant le liant « 40.0,5 », les tendances diffèrent de celles observées avec le liant « 53.0,5 ». En effet, l'optimum de performance mécanique en compression au démoulage, qui est d'environ 50 MPa, est obtenu en utilisant plusieurs traitements thermiques avec différents apports de chaleur : les trois apports de chaleur à 80 °C et l'apport de chaleur le plus important à 60 °C [TTB'] (figure 76). Il semblerait donc qu'une plus grande quantité de laitier dans le liant ternaire requière des températures de palier plus importantes mais aussi une durée de palier courte. Néanmoins, l'optimisation du traitement thermique pour un liant donné restera le plus souvent nécessaire. En effet, pour des mortiers constitués d'un mélange de 50 % de Portland et 50 % de laitier et chauffés à 65 °C, la présence de 0,5 % de sulfate de sodium + 0,5 % de chlorure de sodium a permis de donner le meilleur compromis par rapport à la référence non activée [Jacquemot, 2014].

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**



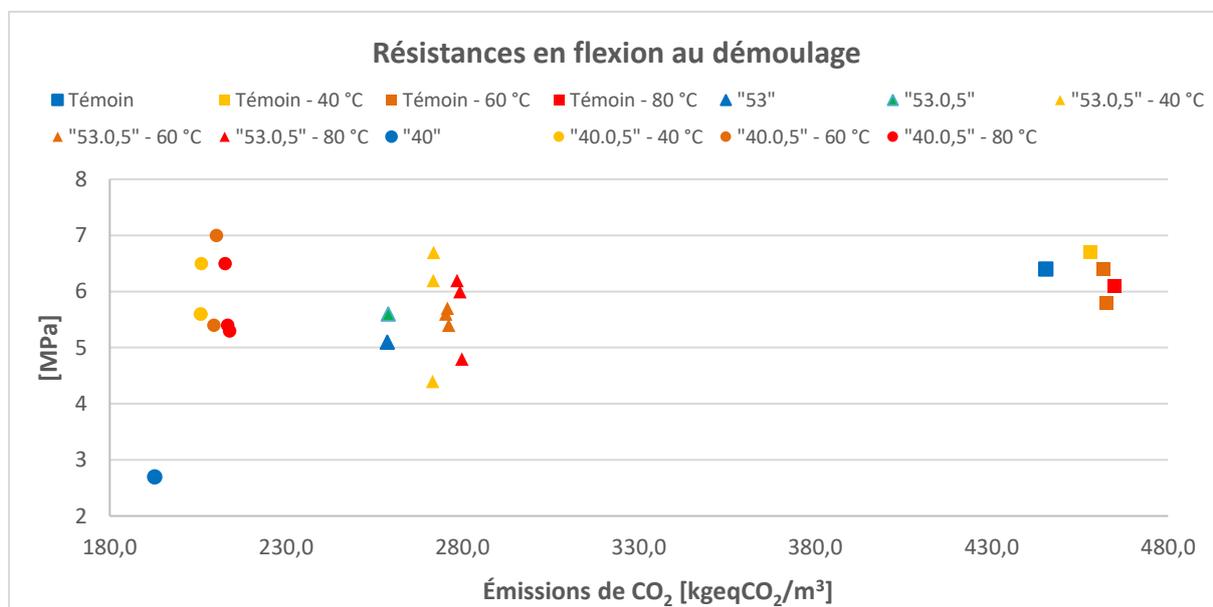
Légende :

Formes : carrés : « témoin » ; triangles : liant « 53 » ; ronds : liant « 40 ».

Couleurs : bleu : non activé/non traité thermiquement ; vert : activé/non traité thermiquement ; rouge/orange/jaune : activé et traité thermiquement.

Figure 76 : Représentation des résistances en compression pour chaque mortier traité thermiquement

Les tendances observées pour la résistance en flexion diffèrent de celles observées pour la résistance en compression (figure 77). En effet, pour certains traitements thermiques, la résistance en flexion est supérieure à celle du témoin CEM I, traité thermiquement ou non.



Légende :

Formes : carrés : « témoin » ; triangles : liant « 53 » ; ronds : liant « 40 ».

Couleurs : bleu : non activé/non traité thermiquement ; vert : activé/non traité thermiquement ; rouge/orange/jaune : activé et traité thermiquement.

Figure 77 : Représentation des résistances en flexion pour chaque mortier traité thermiquement

CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT

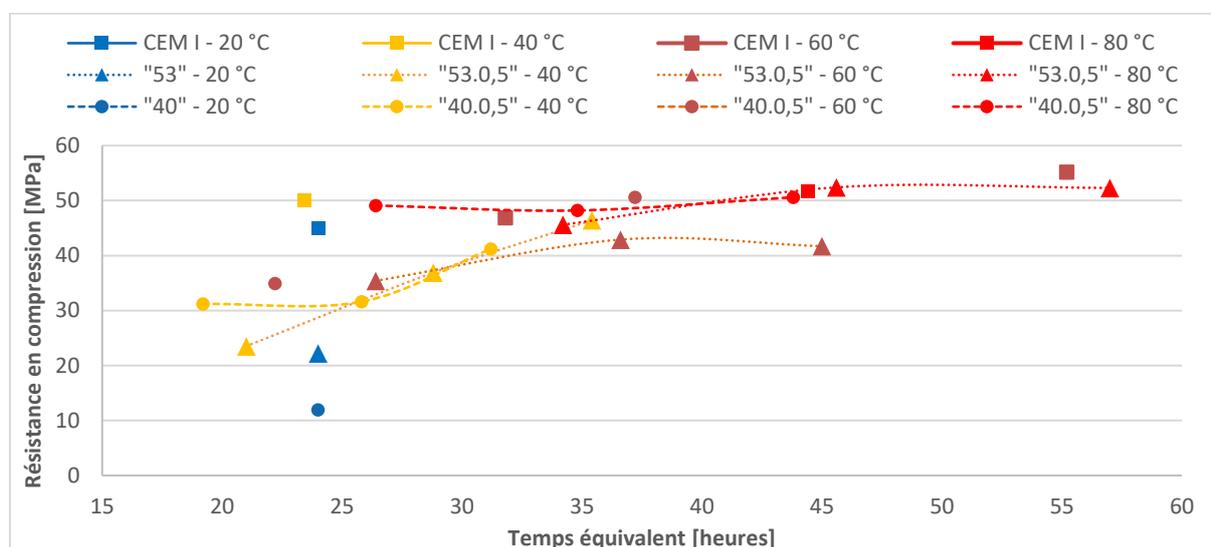
Contrairement aux résultats en compression, l'application d'un traitement sur les mortiers contenant le liant « 53.0,5 » ne permet pas de dépasser de façon systématique la valeur obtenue à température ambiante (figure 77).

Une température trop élevée, notamment 80 °C, appliquée pendant une durée supérieure à 3 h 30 semble avoir un impact négatif sur l'obtention de bonnes résistances mécaniques en flexion ([TTA'] et [TTA'']) : perte de 23 % pour les mortiers « 53.0,5 » et de 19 % pour les mortiers « 40.0,5 ». De façon opposée, l'utilisation d'une température de palier inférieure à 80 °C avec une durée longue semble être bénéfique pour l'obtention de résistances en flexion proches voire supérieures à celles du témoin CEM I chauffé ou non. En effet, le liant « 40.0,5 » permet d'atteindre 7 MPa au bout d'environ 12 h 30 de traitement thermique avec une température de palier de 60 °C ([TTB'']) : + 10 % par rapport au témoin CEM I et + 220 % par rapport au même liant non activé à température ambiante.

Les résistances sont également représentées en fonction du temps équivalent, calculé à partir de la loi d'Arrhenius (équation 4). Des hypothèses ont été prises quant au ratio « Énergie d'activation/R » des trois types de liant. En effet, l'énergie est plus importante pour le liant à base de 100 % de CEM I que pour le liant à base de 40 % de clinker (tableau 36). Afin de faciliter les calculs, les activateurs chimiques ne sont pas pris en compte, et ceci malgré leur influence (figure 78).

Tableau 36 : Hypothèses sur les ratio « Ea/R » des systèmes étudiés

	« Ea/R »
Mortier « Témoin » (100 % CEM I)	4 000 K
Mortier « 53 »	3 500 K
Mortier « 40 »	3 000 K



Légende :

Formes : carrés : « témoin » ; triangles : liant « 53 » ; ronds : liant « 40 ».
Couleurs : bleue : non activé/non traité th. ; rouge/orange/jaune : activé et traité th.

Figure 78 : Résistances mécaniques en compression en fonction du temps équivalent

Les résultats de résistance en compression représentés en fonction du temps équivalent mettent en avant la pertinence de l'utilisation de liant à faible teneur en clinker en présence d'un traitement thermique.

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**

L'application d'un traitement de 80 °C permet d'atteindre en 6 h 30 [TTA] des résistances en compression de 45 MPa pour le liant « 53 » et de quasi 50 MPa pour le liant « 40 » obtenues respectivement en âge équivalent de 34 heures et 26 heures.

2.2.2. Activation thermique associée à une activation non chlorée : sulfate de sodium et ou nitrate de sodium

L'ajout de chlorures dans le béton reste industriellement délicat même si la performance de ces derniers est intéressante. Ainsi, la synergie potentielle du traitement thermique sur les activateurs non chlorés étudiés dans le chapitre IV, a été recherchée dans cette partie. Des mortiers à base du liant « 40 » activés avec le nitrate de sodium et/ou le sulfate de sodium ont été traités thermiquement à deux températures de palier (80 °C et 60 °C) et deux aires sous la courbes différentes ($\int_0^t A(T) = 25\ 000\ ^\circ\text{C}\cdot\text{min}$ et $40\ 000\ ^\circ\text{C}\cdot\text{min}$). Les caractéristiques des traitements thermiques sont indiquées dans le tableau 37 et schématisées sur la figure 79. Les consommations énergétiques sont calculées en utilisant une valeur moyenne de masse volumique de $2\ 300\ \text{kg}/\text{m}^3$.

Tableau 37 : Description des traitements thermiques

Traitement thermique	Prét.	Montée en T.	Durée du palier	T. palier	Durée totale	Aire $\int_0^t A(T)$ [$^\circ\text{C}\cdot\text{minutes}$]	Conso. En. [KWh/m^3]
A	20 °C ; 30'	24 °C/h	3 h 30	80 °C	6 h 30	25 000	113,0
A''			6 h 40		9 h 40	40 000	120,6
B	20 °C ; 30'	16 °C/h	5 h 20	60 °C	8 h 20	25 000	94,5
B''			9 h 25		12 h 25	40 000	98,8

« Prét. » : prétraitement ; « T. » : température ; « Conso. En. » : Consommation Énergétique.

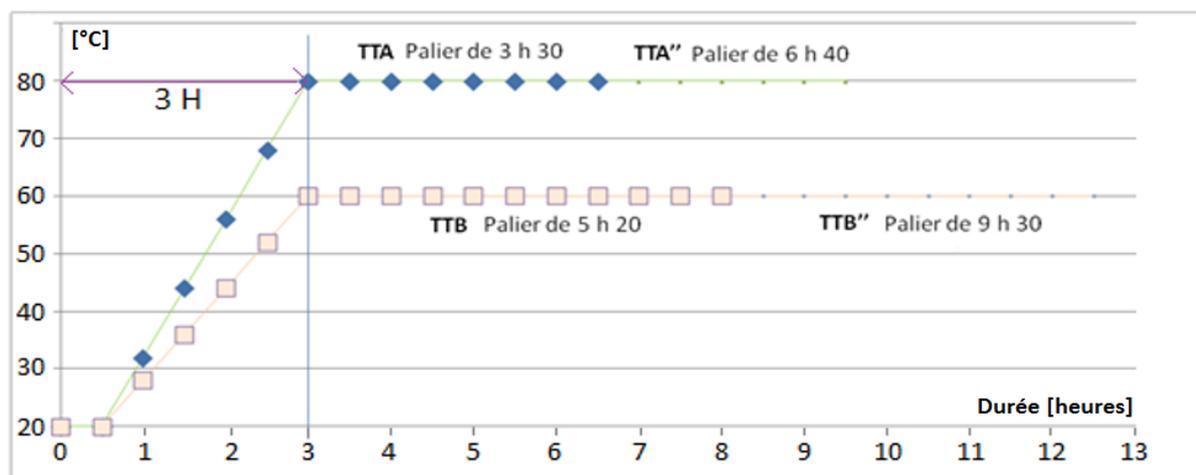


Figure 79 : Traitements thermiques choisis pour tester les mortiers activés par les activateurs non chlorés sélectionnés

Les dosages en sulfate de sodium et nitrate de sodium, seuls ou couplés, en présence du liant « 40 » sont repris des meilleurs résultats obtenus dans le chapitre IV. En parallèle, un mortier témoin à base de ciment Portland CEM I (utilisation du lot 2 de ciment de Port-la-Nouvelle qui diffère du lot 1) a également été fabriqué afin de comparer les résultats.

Les résultats sont présentés dans les tableaux 38 et 39.

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**

Tableau 38 : Résultats des mortiers activés par du sulfate de sodium et du nitrate de sodium – traitements thermiques à 80 °C avec deux aires sous la courbe différentes

	PLN lot 2	« 40 »	« 40 » 1 NN	« 40 » 2 NS	« 40 » 5 NS	« 40 » 1 NN 1 NS	« 40 » 1 NN 2 NS	« 40 » 1 NN 5 NS	
Proportions massiques [g]									
CEM I 52,5 R PLN	2 700,0	2 450,3	2 450,3	2 450,3	2 450,3	1 130,9	2 450,3	2 450,3	
Laitier	0	2 632,5	2 632,5	2 632,5	2 632,5	1 215,0	2 632,5	2 632,5	
Addition calcaire	0	767,2	767,2	767,2	767,2	354,1	767,2	767,2	
NaNO ₃ (« NN »)	0	0	35,8	0	0	16,5	35,8	35,8	
Na ₂ SO ₄ (« NS »)	0	0	0	119,6	299,1	27,6	119,6	299,1	
Sable CEN 0/2	8 100,0	17 550,0	17 550,0	17 550,0	17 550,0	8 100,0	17 550,0	17 550,0	
Eau d'ajout (E _{eff} /L = 0,4)	1 080,0	2 340,0	2 340,0	2 340,0	2 340,0	1 080,0	2 340,0	2 340,0	
SP (0,25 %/L)	6,8	14,6	14,6	14,6	14,6	6,8	14,6	14,6	
Conso. En.	TTA : 113,0 kWh/m³								
Caractéristiques à l'état durci									
Échéance démoulage	6 h 30								
ρ [kg/m ³]	2 250,0	2 240,0	2 200,0	2 220,0	2 235,0	2 250,0	2 260,0	2 205,0	
Compression [MPa]	Dem	51,6	32,8	27,6	30,3	31,8	34,7	27,8	24,0
	28 j	68,3	65,5	55,8	44,9	41,6	52,4	44,8	36,0
Flexion [MPa]	Dem	5,4	4,3	4,0	4,1	4,9	4,5	3,8	4,3
	28 j	8,4	10,5	8,9	7,9	9,8	9,6	9,1	8,9
Caractéristiques économiques et environnementales (mesurées sur 1 m³ de mortier) *									
Coût [€/m ³]	120,6	106,9	121,1	111,5	121,3	124,4	127,6	137,4	
Coût (%/témoin « CEM I »)	115,7	102,6	116,2	107,0	116,4	119,4	122,5	131,9	
Émissions de CO ₂ (dont procédé) [kgeqCO ₂ /m ³]	464,9 (19,5)	212,6 (19,5)	229,7 (19,5)	213,5 (19,5)	215,3 (19,5)	230,4 (19,5)	231,0 (19,5)	232,8 (19,5)	
Émissions de CO ₂ (%/témoin « CEM I »)	104,4	47,7	51,6	47,9	48,3	51,7	51,9	52,3	
Conso. En.	TTA'' : 120,6 kWh/m³								
Caractéristiques à l'état durci									
Échéance démoulage	9 h 40								
ρ [kg/m ³]	2 250,0	2 265,0	2 180,0	2 230,0	2 205,0	2 235,0	2 170,0	2 235,0	
Compression [MPa]	Dem	51,6	34,4	40,9	32,4	35,0	39,1	28,5	27,8
	28 j	68,3	55,8	61,1	46,4	45,4	61,7	42,7	38,7
Flexion [MPa]	Dem	5,4	3,8	4,6	4,4	4,7	4,5	4,1	4,9
	28 j	8,4	9,6	10,3	8,0	9,3	10,4	7,1	7,9
Caractéristiques économiques et environnementales (mesurées sur 1 m³ de mortier) *									
Coût [€/m ³]	121,7	108,0	122,2	112,6	122,4	125,5	128,7	138,5	
Coût (%/ « CEM I »)	116,8	103,6	117,3	108,1	117,5	120,4	123,5	132,9	
Émissions de CO ₂ (dont procédé) [kgeqCO ₂ /m ³]	466,2 (20,8)	213,9 (20,8)	231,1 (20,8)	214,8 (20,8)	216,6 (20,8)	231,7 (20,8)	232,3 (20,8)	234,1 (20,8)	
Émissions de CO ₂ (%/ « CEM I »)	104,7	48,0	51,9	48,2	48,6	52,0	52,2	52,6	

« n.d. » : non déterminé ; « NaNO₃ (« NN ») » : nitrate de sodium ; « Na₂SO₄ (« NS ») » : sulfate de sodium ; « Conso. En. » : Consommation énergétique ; le témoin « CEM I » est non traité thermiquement.

* Les calculs ont été réalisés en utilisant une valeur de masse volumique réelle moyenne : 2 300 kg/m³ (§ 5.2).

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**

Tableau 39 : Résultats des mortiers activés par du sulfate de sodium et du nitrate de sodium – traitements thermiques à 60 °C avec deux aires sous la courbe différentes

	PLN lot 2	« 40 »	« 40 » 1 NN	« 40 » 2 NS	« 40 » 5 NS	« 40 » 1 NN 1 NS	« 40 » 1 NN 2 NS	« 40 » 1 NN 5 NS	
Proportions massiques [g]									
CEM I 52,5 R PLN	2 700,0	2 450,3	2 450,3	2 450,3	2 450,3	1 130,9	2 450,3	2 450,3	
Laitier	0	2 632,5	2 632,5	2 632,5	2 632,5	1 215,0	2 632,5	2 632,5	
Addition calcaire	0	767,2	767,2	767,2	767,2	354,1	767,2	767,2	
NaNO ₃ (« NN »)	0	0	35,8	0	0	16,5	35,8	35,8	
Na ₂ SO ₄ (« NS »)	0	0	0	119,6	299,1	27,6	119,6	299,1	
Sable CEN 0/2	8 100,0	17 550,0	17 550,0	17 550,0	17 550,0	8 100,0	17 550,0	17 550,0	
Eau d'ajout (E _{eff} /L = 0,4)	1 080,0	2 340,0	2 340,0	2 340,0	2 340,0	1 080,0	2 340,0	2 340,0	
SP (0,25 %/L)	6,8	14,6	14,6	14,6	14,6	6,8	14,6	14,6	
Conso. En.	TTB : 94,5 kWh/m³								
Caractéristiques à l'état durci									
Échéance démoulage		8 h 20							
ρ [kg/m ³]		2 225,0	2 190,0	2 270,0	2 265,0	2 265,0	n.d.	n.d.	n.d.
Compression [MPa]	Dem	43,8	24,7	25,0	25,7	23,2	n.d.	25,4	21,9
	28 j	66,4	65,9	69,5	42,8	42,7	n.d.	43,3	42,5
Flexion [MPa]	Dem	5,3	4,0	4,5	4,5	4,3	n.d.	4,9	3,9
	28 j	9,1	11,0	11,1	8,9	8,4	n.d.	8,7	10,2
Caractéristiques économiques et environnementales (mesurées sur 1 m³ de mortier) *									
Coût [€/m ³]		117,9	104,2	118,5	108,9	118,6	121,7	125,0	134,7
Coût (%/témoin « CEM I »)		113,1	100,0	113,7	104,5	113,8	116,8	120,0	129,3
Émissions de CO ₂ (dont procédé) [kgeqCO ₂ /m ³]		461,7 (16,3)	209,4 (16,3)	226,6 (16,3)	210,3 (16,3)	212,1 (16,3)	227,2 (16,3)	227,8 (16,3)	229,6 (16,3)
Émissions de CO ₂ (%/témoin « CEM I »)		103,7	47,0	50,9	47,2	47,6	51,0	51,2	51,6
Conso. En.	TTB'' : 98,8 kWh/m³								
Caractéristiques à l'état durci									
Échéance démoulage		12 h 25							
ρ [kg/m ³]		2 330,0	2 305,0	2 270,0	2 280,0	n.d.	n.d.	2 340,0	n.d.
Compression [MPa]	Dem	51,2	40,0	33,2	28,4	n.d.	n.d.	33,7	n.d.
	28 j	65,6	61,3	55,5	40,6	n.d.	n.d.	45,6	n.d.
Flexion [MPa]	Dem	6,0	5,4	4,6	6,4	n.d.	n.d.	6,1	n.d.
	28 j	9,5	10,4	9,0	10,7	n.d.	n.d.	11,3	n.d.
Caractéristiques économiques et environnementales (mesurées sur 1 m³ de mortier) *									
Coût [€/m ³]		118,5	104,8	119,1	109,5	119,2	122,3	125,6	135,3
Coût (%/ « CEM I »)		113,7	100,6	114,3	105,1	114,4	117,4	120,5	129,8
Émissions de CO ₂ (dont procédé) [kgeqCO ₂ /m ³]		462,4 (17,1)	210,2 (17,1)	227,3 (17,1)	211,0 (17,1)	212,9 (17,1)	227,9 (17,1)	228,5 (17,1)	230,4 (17,1)
Émissions de CO ₂ (%/ « CEM I »)		103,8	47,2	51,0	47,4	47,8	51,2	51,3	51,7

« n.d. » : non déterminé ; « NaNO₃ (« NN ») » : nitrate de sodium ; « Na₂SO₄ (« NS ») » : sulfate de sodium ; « Conso. En. » : Consommation énergétique ; le témoin « CEM I » est non traité thermiquement.

* Les calculs ont été réalisés en utilisant une valeur de masse volumique réelle moyenne : 2 300 kg/m³ (§ 5.2).

L'application d'un traitement thermique permet l'augmentation systématique des résistances en compression des mortiers testés à base de liant « 40 » (figure 80). Toutefois, activés ou non, les performances des mortiers testés restent inférieures à celles du témoin CEM I ayant subi ou non le traitement thermique, tout en permettant de réduire fortement les émissions de CO₂ associées (réduction supérieure à 200 kgeqCO₂/m³).

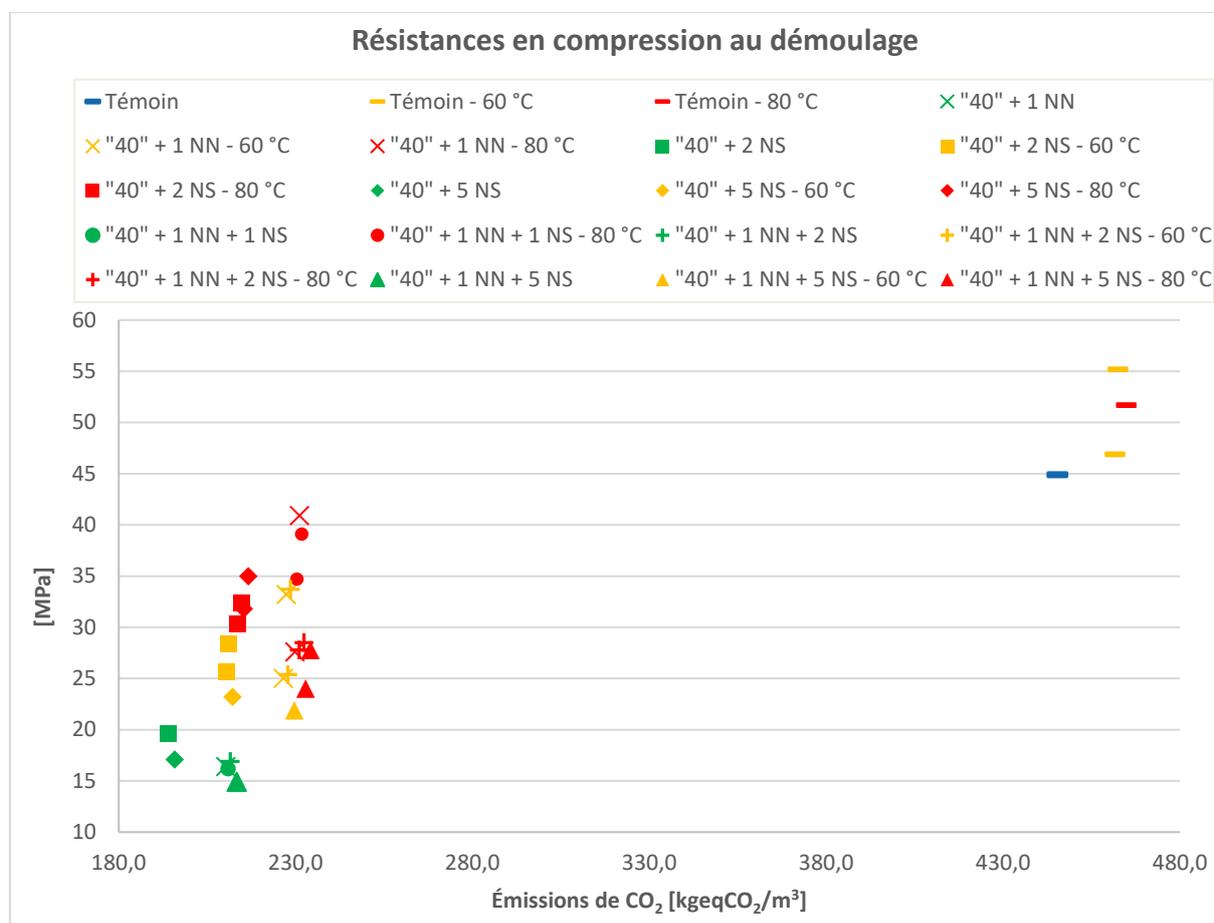
Les tendances observées sont proches pour tous les couples, activateur/dosage, étudiés. En effet, un apport de chaleur important avec une température de palier élevée semble être plus favorable à l'obtention de résistances en compression élevées, particulièrement en présence de 1 % de nitrate de sodium seul ou en couplage avec 1 % de sulfate de sodium.

Le traitement thermique TTA''/80-6 h 40, dont la quantité de CO₂ émise est de 20,8 kgeqCO₂/m³, conduit à de meilleures performances (figure 80).

Le traitement thermique réalisé avec une température de palier à 60 °C appliquée pendant la plus courte durée [TTB/60-5 h 20], permet d'augmenter la performance mécanique en compression par rapport aux mortiers similairement activés mais non chauffés. Cependant, la résistance mécanique en compression reste inférieure à 30 MPa. À cette même température, les activateurs ne semblent pas être efficaces, voire même délétères dans certains cas : mortier incorporant 5 % de sulfate de sodium. La tendance observée par Jacquemot sur des mortiers binaires incorporant 50 % de ciment et 50 % de laitier et traités thermiquement à 65 °C était pourtant différente [Jacquemot, 2014]. Le couplage du traitement thermique et d'une activation chimique avec du sulfate de sodium semble présenter un optimum pour des dosages de 0,5 % et 1 % (massique de Na₂O_{eq} par rapport au laitier). En effet, un dosage jusqu'à 1 % permettrait d'augmenter significativement la résistance mécanique en compression au démoulage (+ 49 % par rapport à la référence traitée thermiquement mais non activée chimiquement) [Jacquemot, 2014].

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**

Pour un dosage à 2 %, les performances sont augmentées de 45 %, ce qui est éloigné des résultats obtenus dans ce présent travail de thèse ; à 60 °C, la présence de sulfate de sodium n'apporte pas d'amélioration par rapport au liant « 40 » sans activateur chimique (figure 80).



Légende :

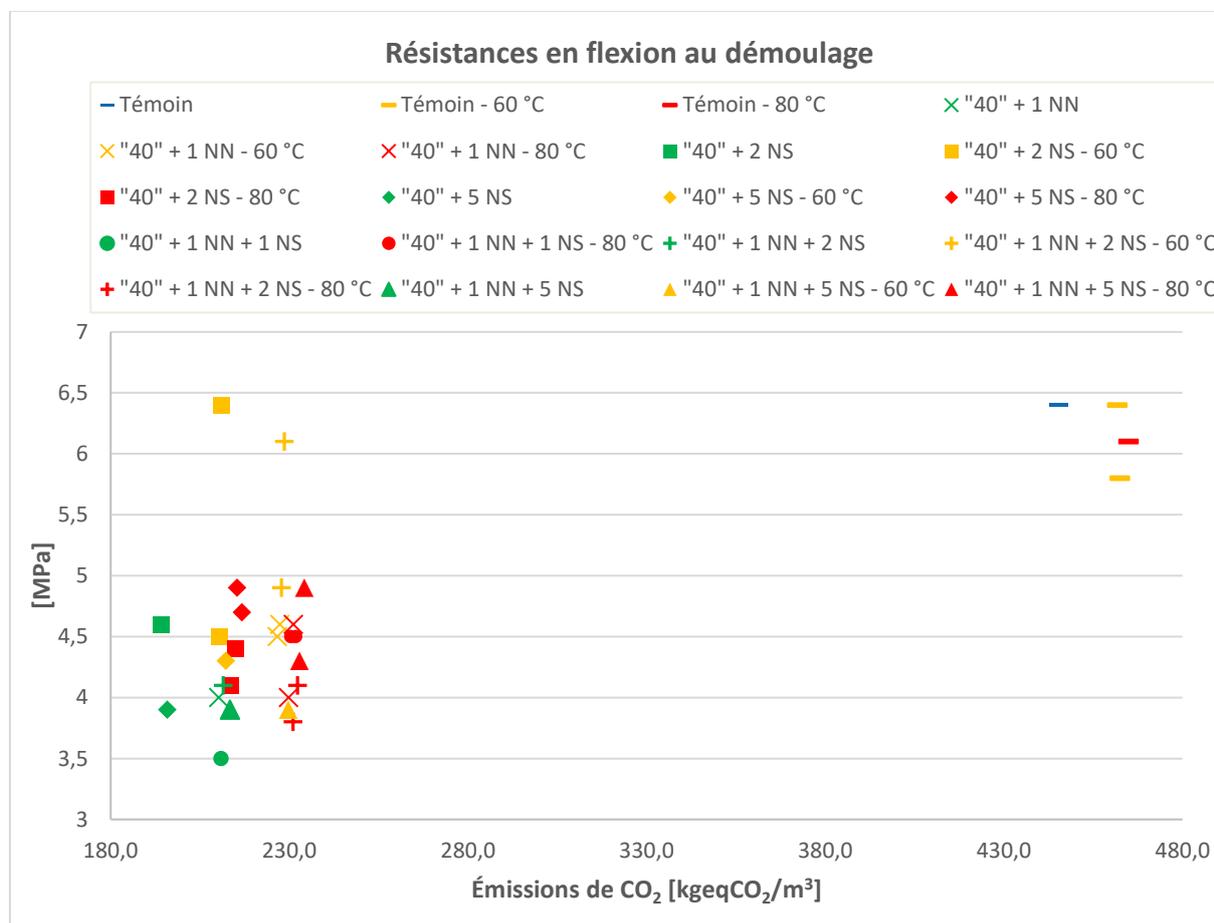
Couleurs : bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; rouge/orange : activé et traité th.

Figure 80 : Résistances mécaniques en compression des mortiers à base de liant « 40 » activé de différentes façons et traités thermiquement en fonction des émissions de CO₂ émises par ces derniers

L'application d'un traitement thermique engendre une diminution des performances en flexion du témoin CEM I, contrairement aux mortiers ternaires testés (figure 81). L'utilisation d'une température de palier de 80 °C semble être pertinente pour certaines associations activateur/dosage de l'activateur comme avec 5 % de sulfate de sodium.

CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT

Une température de 60 °C semble être adaptée pour l'obtention de performances mécaniques optimales en flexion avec de préférence le palier le plus long : le traitement thermique TTB''/60-9 h 25 conduit à 6,4 MPa et 6,1 MPa pour les mortiers incorporant respectivement 2 % de sulfate de sodium et 1 % de nitrate de sodium + 2 % de sulfate de sodium.



Légende :

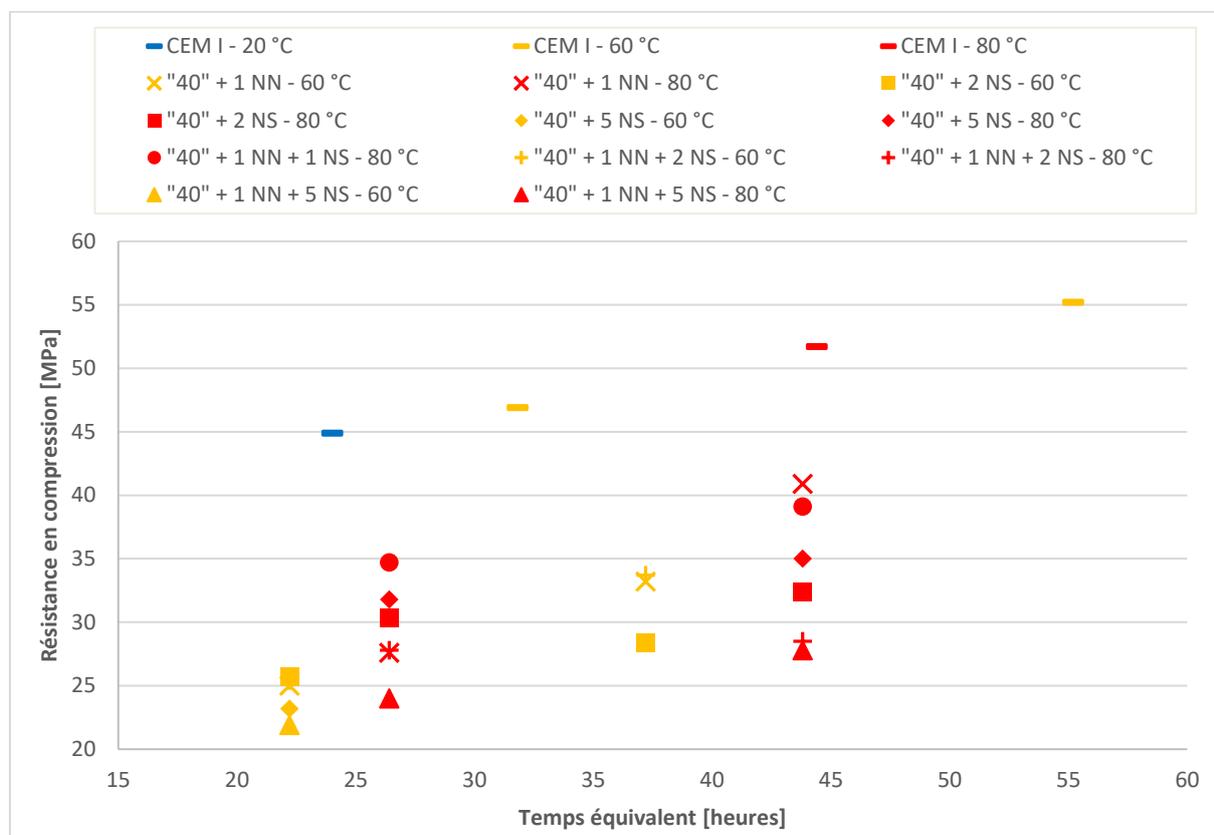
Couleurs : *bleu* : non activé/non traité th. ; *vert* : activé/non traité th. ; *rouge/orange* : activé et traité th.

Figure 81 : Résistances mécaniques en compression des mortiers à base de liant « 40 » activé de différentes façons et traités thermiquement en fonction des émissions de CO₂ émises par ces derniers

En couplant l'activation chimique à l'activation thermique, le nitrate de sodium semble donc être efficace pour obtenir de bonnes résistances en compression à condition d'utiliser une température de palier de 80 °C. Le sulfate de sodium conduit également au développement de bonnes résistances en flexion lors d'un traitement thermique avec un palier de température de 60 °C.

CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT

Le couplage d'un traitement thermique et d'activateur(s) chimique(s) est nécessaire afin d'obtenir des performances mécaniques en flexion et compression acceptables pour le liant « 40 » comme démontré avec l'application du traitement thermique TTB''/60-9 h 30.



Légende :

Couleurs : *bleu* : non activé/non traité th. ; *rouge/orange* : activé et traité th.

Figure 82 : Résistances mécaniques en compression en fonction du temps équivalent

3. Couplage de la température avec les autres leviers

Afin d'évaluer si l'influence des leviers s'additionnent, l'influence du traitement thermique a également été étudiée sur les mortiers contenant des additions de granulométries plus fines (laitier et Omyalite) (Chapitre V – paragraphe 2.3) traités chimiquement ou non. Les mortiers sélectionnés ont subi le traitement thermique ayant une température de palier à 80 °C [TTA/80-3 h 30] (tableau 40).

Des mortiers contenant le liant « 40 » incorporant du ciment CEM I 52,5 R de Couvrot (qui diffère donc du CEM I 52,5 R de Port-la-Nouvelle) ont été fabriqués.

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**

L'activation chimique est à base de sulfate de sodium et de chlorure de sodium, tous les deux à hauteur de 0,5 % en masse de Na₂O_{eq} par rapport au laitier.

Tableau 40 : Évaluation de l'influence des autres leviers couplés avec le traitement thermique TTA/80-3 h 30 sur les propriétés d'usage à l'état frais et durci des mortiers testés

Dénomination	CEM I	40 K/ 45 S _{4 500} / 15 L _B		40 K/45 S _{4 500} / 10 L _B / 5 L _O		40 K/40 S _{4 500} /5 S _{5 100} /...	
					15 L _B	10 L _B / 5 L _O	10 L _B / 5 L _O + 0,5 NS + 0,5 NC
Proportions massiques [g]							
Ciment Couvrot	3 600,0	1 476,0 (41 %)	1 476,0 (41 %)	1 476,0 (41 %)			
Laitier classique	0	1 620,0 (45 %)	1 620,0 (45 %)	1 440,0 (40 %)			
Laitier plus fin	0	0	0	180,0 (5 %)			
Betocarb	0	504,0 (14 %)	336,2 (9,34 %)	504,0 (14 %)	336,2 (9,34 %)		
Omyalite	0	0	167,8 (4,66 %)	0	167,8 (4,66 %)		
NaCl	0	0	0	0	0	15,3	
Na ₂ SO ₄	0	0	0	0	0	18,6	
Sable 0/2 mm	10 800,0						
Eau (E _{eff} /L = 0,4)	1 440,0						
Adjuvant (0,25 %/L)	9,0						
Conso. Énerg.	TTA : 113 kWh/m³						
Échéance démoulage	6 h 30						
ρ [kg/m ³]	2 260,0	2 250,0	2 200,0	2 230,0	2 210,0	2 215,0	
Compression [MPa]	Dem	50,6	31,2	32,0	40,6	40,7	41,1
	24 h	55,1	37,5	39,4	50,5	45,2	43,1
	28 j	68,3	63,0	58,5	68,1	63,8	54,3
Flexion [MPa]	Dem	6,4	5,3	5,1	5,3	5,2	5,2
	24 h	7,7	6,7	6,9	8,6	7,5	6,9
	28 j	8,0	10,4	10,1	11,3	10,0	9,4

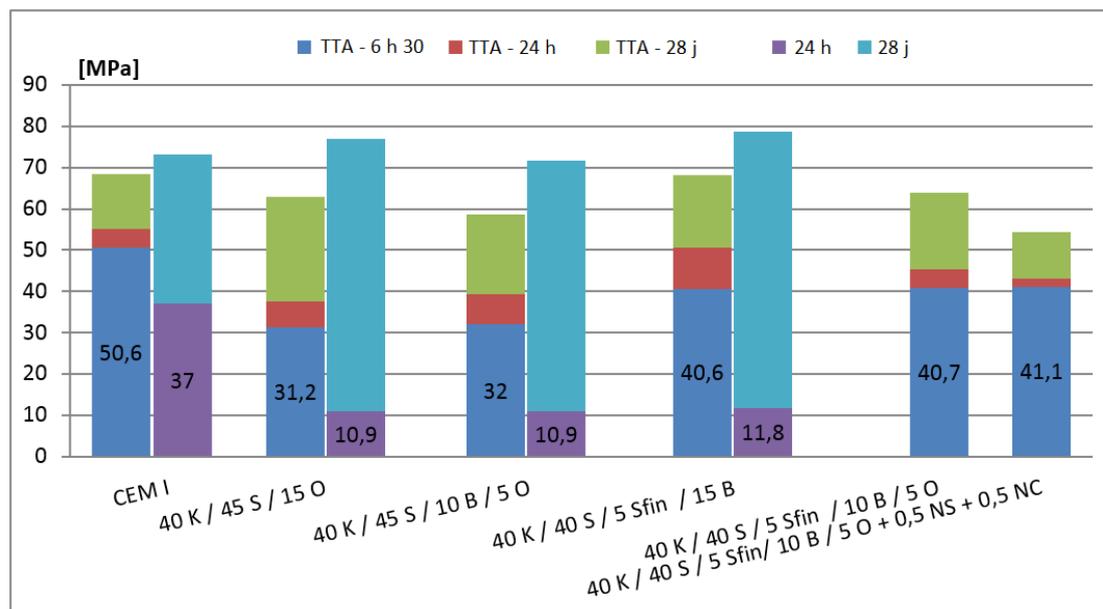
« n.d. » : non déterminé ; « K » : clinker ; « S_{4 500} » : laitier classique ; « S_{5 100} » : laitier plus fin ; « L_B » : addition calcaire Betocarb ; « L_O » : addition calcaire Omyalite ; « NS » : sulfate de sodium ; « NC » : chlorure de sodium ; « Conso. Énerg. » : Consommation Énergétique.

La réalisation d'un traitement thermique de palier 80 °C [TTA/80-3 h 30] permet de presque tripler les performances en compression du mortier « 40 ». L'influence de la substitution de 5 % de Betocarb par de l'Omyalite est négligeable après réalisation du traitement thermique. La substitution de 5 % du laitier classique par du laitier plus fin permet d'améliorer de 1 MPa les performances en compression en démoulage, amélioration d'autant plus importante en couplant le levier de la finesse avec celui de la température (+ 30 %) (figure 83).

La tendance observée en substituant 5 % de Betocarb par de l'Omyalite est également retrouvée dans le mortier incorporant 5 % de laitier fin. En présence d'activateurs chimiques, la performance en compression varie également très peu.

CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT

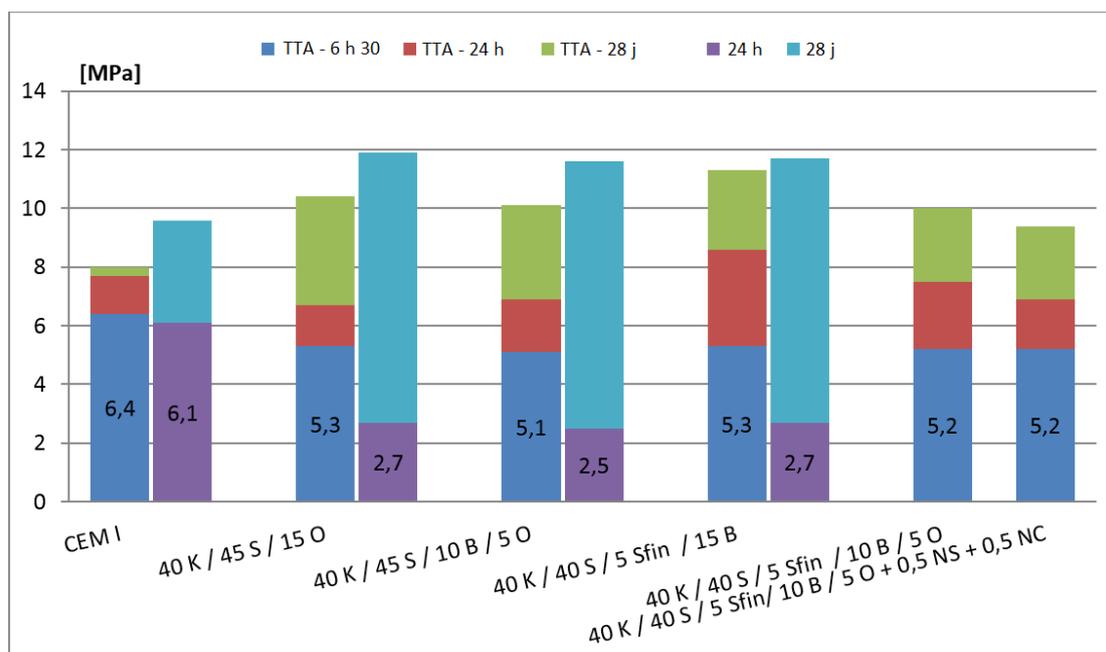
L'application d'un traitement thermique génère une diminution des performances à 28 jours comprise entre 20 % (mortier « 40 K / 45 S / 10 B / 5 O ») et 40 % (mortier « 40 K / 45 S / 15 B »).



Légende : « K » : clinker ; « S » : laitier classique de finesse Blaine 4 500 m²/kg ; « Sfin » : laitier de finesse Blaine 5 100 m²/kg ; « B » : Betocarb ; « O » : Omyalite ; « NS » : sulfate de sodium ; « NC » : chlorure de sodium.

Figure 83 : Évolution des résistances en compression des mortiers soumis aux différents leviers pouvant permettre d'accélérer leur durcissement

Les tendances observées en compression sont les mêmes en flexion (figure 84).



Légende : « K » : clinker ; « S » : laitier classique de finesse Blaine 4 500 m²/kg ; « Sfin » : laitier de finesse Blaine 5 100 m²/kg ; « B » : Betocarb ; « O » : Omyalite ; « NS » : sulfate de sodium ; « NC » : chlorure de sodium.

Figure 84 : Évolution des résistances en flexion des mortiers soumis aux différents leviers pouvant permettre d'accélérer leur durcissement

La réalisation d'un traitement thermique permet globalement de doubler les performances en flexion. L'association des autres leviers (utilisation d'additions plus fines, activation chimique) ne semble pas être pertinente à court terme. Or, la présence de 5 % de laitier plus fin évite un écart trop important entre le mortier traité thermiquement et celui non traité (0,3 MPa).

Les leviers permettant au mortier à base du liant « 40 » de répondre au cahier des charges (résistance en compression de 40 MPa au bout de 10 heures) sont donc le couplage du traitement thermique et l'utilisation d'un laitier plus fin en permettant l'obtention de performance en compression supérieure à 40 MPa au bout de 6 h 30 [TTA/80-3 h 30].

4. Utilisation de traitements thermiques de type industriel

La synergie entre l'activation chimique et le traitement thermique, utilisée afin d'améliorer les performances mécaniques des liants ternaires étudiés, varie en fonction de la température du palier et de la chaleur apportée, qui est également fortement dépendante à la durée du palier de température. Ainsi, il est difficile d'anticiper l'effet de la modification des paramètres du traitement thermique et des changements de concentrations de l'activateur chimique. Donc, l'intérêt du couplage entre les activateurs chimiques sélectionnés dans ce travail de thèse et des traitements thermiques similaires à ceux utilisés pour certains produits en béton a été étudié dans cette partie. Trois types de traitement thermique, correspondant respectivement à la préfabrication de prémur, de chambre télécom et de prédalle précontrainte, ont été sélectionnés (tableau 41 et figure 85). Ces derniers procurent un apport de chaleur moindre ou légèrement supérieur au traitement thermique A (TTA/80-3 h 30) qui était le moins énergétique de ceux étudiés dans les paragraphes précédents. Le mortier « 53.0,5 » utilisant le liant « 53 » activé par 0,5 % de sulfate de sodium et 0,5 % de chlorure de sodium a été utilisé dans cette partie (tableau 42) sachant que le témoin correspond aux mortiers réalisés avec le ciment Portland CEM I de Port-la-Nouvelle.

Tableau 41 : Détail des traitements thermiques appliqués

TT	Conso. En. [kWh/m ³]	Prét.	Montée en T.	Palier	Durée totale	Type de pièce
D	121	/	/	40 °C ; 6 h	6 h	Prémur
E	121	/	20 °C à 60 °C en 6 h (6,7 °C/h)	/	6 h	Chambre télécom
F	179,3	50 °C ; 2 h 30	50 °C à 75 °C 1 h 15 (20 °C/h)	75 °C ; 4 h	7 h 45	Prédalle précontrainte

« Conso. En. » : Consommation Énergétique ; « Prét. » : prétraitement ; « T. » : Température.

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**

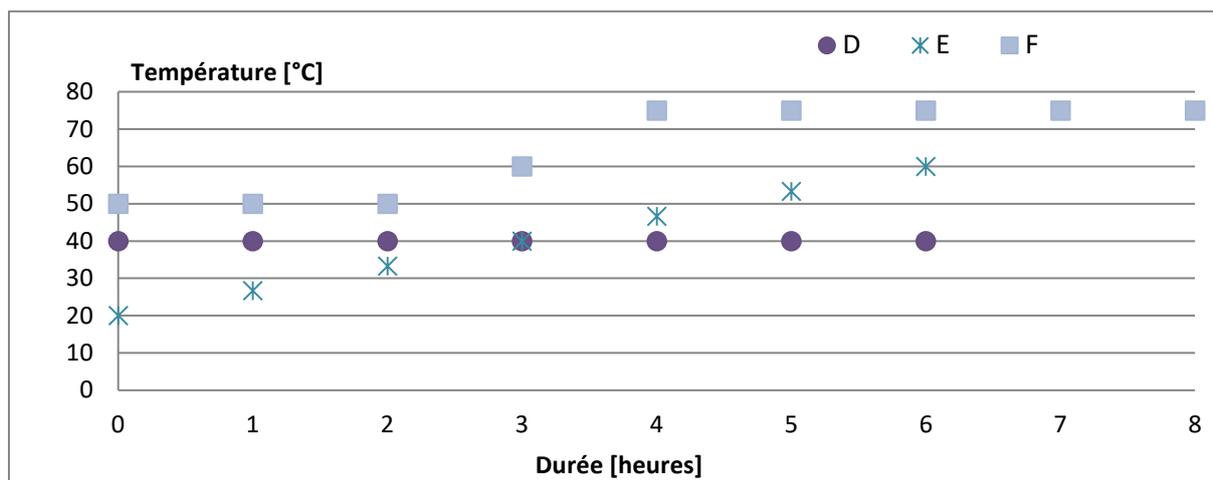


Figure 85 : Traitements thermiques appliqués de type industriel

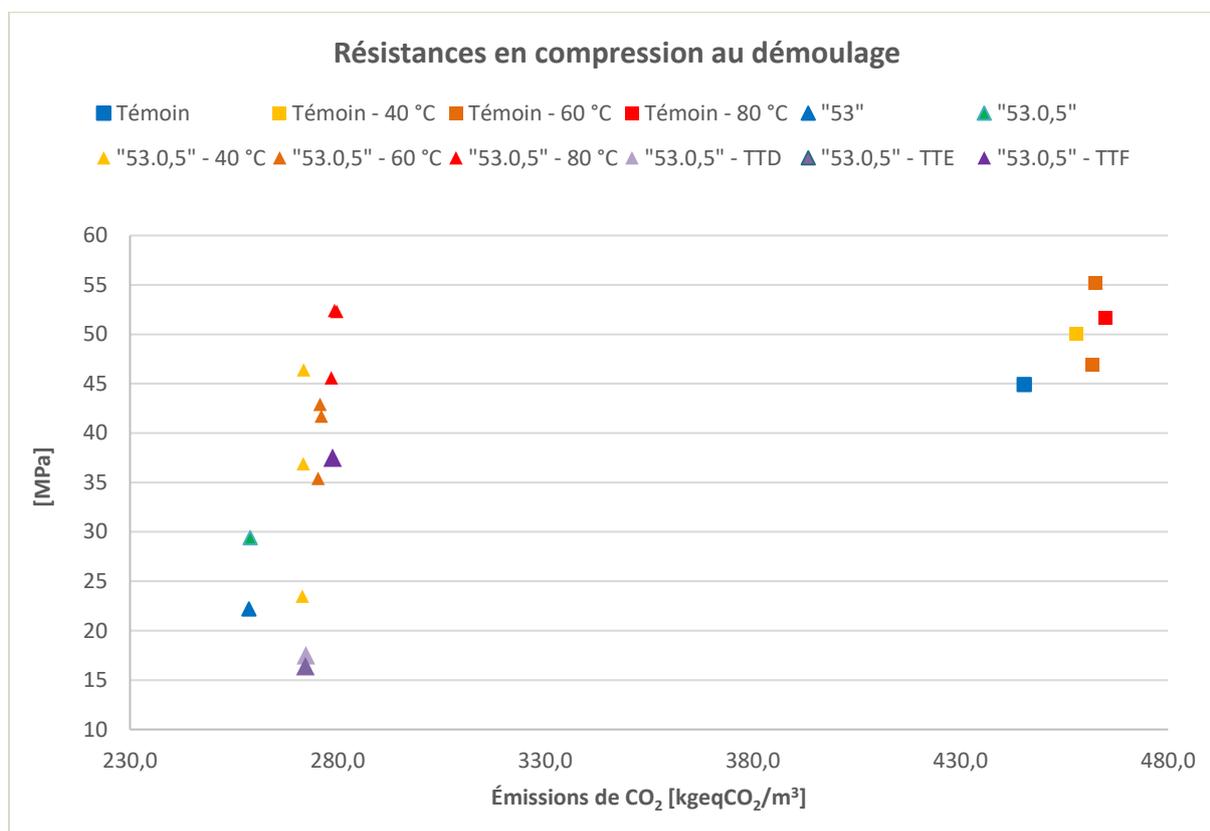
Tableau 42 : Résultats des mortiers activés par du sulfate de sodium et du nitrate de sodium – traitements thermiques industriels

	Témoïn PLN	« 53 »	« 53 » + 0,5 NC + 0,5 NS				
			pas de TT	TTD/40-6 h	TTE/6,7 °C/h-6 h	TTF/75-4 h	
Proportions massiques [g]							
CEM I 52,5 R PLN	2 250,0		1 248,7				
Laitier	0		787,5				
Addition calcaire	0		213,8				
NaCl (« NC »)	0	0	3,7				
Na ₂ SO ₄ (« NS »)	0	0	9,0				
Sable CEN 0/2			6 750,0				
Eau (E _{eff} /L = 0,4)			900,0				
SP (0,25 %/ liant)			5,6				
Conso. En. [kWh/m³]	0	0	0	121	121	179,3	
Échéance au démoulage	24 h	24 h	24 h	6 h	6 h	7 h 45	
R. en compression [MPa]	fin de TT	n.d.	n.d.	n.d.	17,5	16,4	37,5
	24 h	44,9	22,2	29,4	29,1	30,5	n.d.
	28 j	81,9	94,2	n.d.	65,7	64,0	61,5
Résistance en flexion [MPa]	fin de TT	n.d.	n.d.	n.d.	3,8	3,5	4,7
	24 h	6,4	5,1	5,6	4,6	5,2	n.d.
	28 j	10,3	11,0	n.d.	11,3	11,1	8,9

« n.d. » : non déterminé ; « Conso. En. » : Consommation Énergétique ; « NaCl (« NC ») » : chlorure de sodium ; « Na₂SO₄ (« NS ») » : sulfate de sodium.

L'application des deux traitements thermiques les moins calorifiques (TTD40-6 h et TTE/6,7 °C/h-6 h) ne permet pas d'obtenir des résistances en compression équivalentes au témoin Portland en dépit de l'activation chimique. Ainsi, la façon dont est apportée la chaleur ainsi que sa quantité, ne semblent pas être suffisantes pour augmenter significativement les résistances en compression à court terme et à 28 jours (figure 86 et tableau 42).

L'utilisation du traitement thermique F [TTF/75-4 h] conduisant à un apport de chaleur plus conséquent en utilisant une température de palier de 75 °C, sans pour autant augmenter de manière significative la quantité de CO₂ émise, permet de se rapprocher de l'objectif en obtenant une résistance à la compression de 37,5 MPa au bout de 7 h 45. Après 28 jours, la résistance à la compression est supérieure à 60 MPa, ce qui correspond à un gain moyen de 30 MPa vis-à-vis du mortier « 53 » non activé chimiquement et non soumis au traitement thermique TTF/75-4 h.



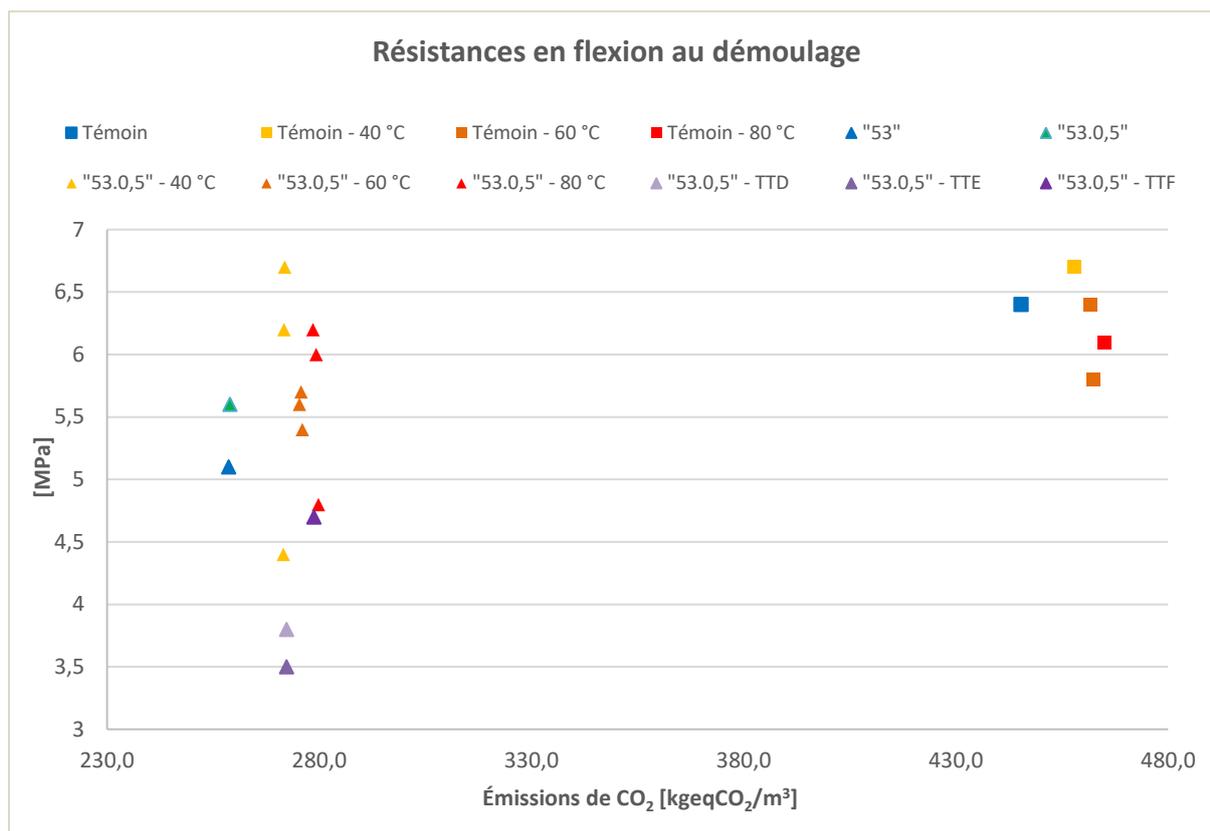
Légende :

Formes : carrés : « témoin » ; triangles : liant « 53 ».
Couleurs : bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; rouge/orange/jaune : activé et traité th. ; nuancier de violet : traitements thermiques de type industriel.

Figure 86 : Représentation des résistances en compression de chaque mortier traité thermiquement

Les tendances observées pour les résistances en flexion sont similaires à celles en compression à court terme. L'application d'un traitement thermique de faible apport de chaleur (TTD40-6 h et TTE/6,7 °C/h-6 h) n'influence pas l'évolution des résistances en flexion, à court terme et à 28 jours par rapport aux mortiers non traités (figure 87).

Le traitement TTF qui est plus calorifique, améliore la résistance au démoulage du mortier « 53.0,5 » : cette dernière est quasiment équivalente à celle du mortier « 53 » non activé à température ambiante à 24 heures. Cependant à 28 jours, ce traitement thermique engendre un écart plus important avec les autres mortiers ; - 25 % entre le témoin Portland CEM I et le mortier « 53.0,5 » soumis au traitement thermique TTF/75-4 h.



Légende :

Formes : carrés : « témoin » ; triangles : liant « 53 ».

Couleurs : bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; rouge/orange/jaune : activé et traité th. ; nuancier de violet : traitements thermiques de type industriel.

Figure 87 : Représentation des résistances en flexion de chaque mortier traité thermiquement

5. Discussion

5.1. Résultats obtenus

Les essais réalisés dans ce chapitre avaient pour objectif d'évaluer l'efficacité du traitement thermique seul puis couplé avec l'activation chimique étudiée précédemment (chapitre IV), dans le but de répondre à l'objectif technique qui est d'atteindre des résistances au démoulage proches de celles du témoin (45 MPa en compression et 6,4 MPa en flexion).

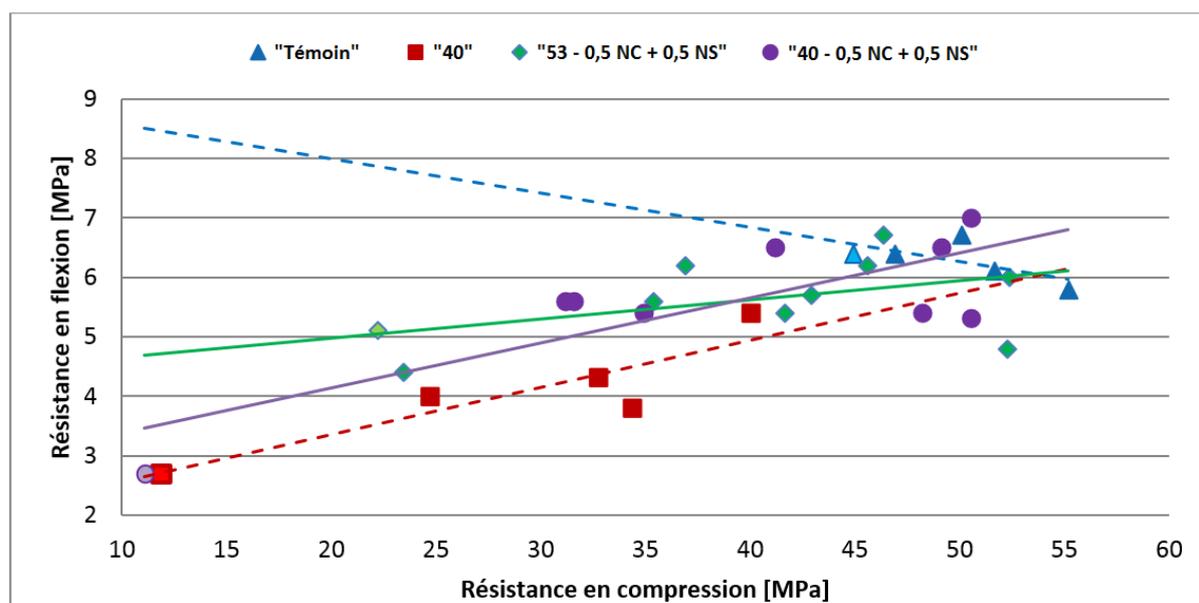
Un premier résultat important concerne les tendances opposées entre le témoin CEM I et les liants ternaires sur la relation entre les résistances mécaniques en flexion et compression qui sont induites par le traitement thermique. La courbe de tendance du témoin CEM I a une allure descendante indiquant une diminution de la résistance mécanique en flexion lors de l'augmentation de la résistance mécanique en compression. Elle semble également montrer que les résistances en flexion ne varient que très peu avec l'augmentation de la résistance en compression lors de l'application d'un traitement thermique. De façon opposée, la tendance pour les mortiers incorporant les liants « 53 » et « 40 » est ascendante (figure 88).

CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT

Une activation chimique de mortiers à base des liants « 53 » et « 40 » par 0,5 % de chlorure de sodium et 0,5 % de sulfate de sodium (% de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ par rapport à la quantité de laitier contenue dans le liant) associée à un traitement thermique optimisé, conduit à conserver l'allure de la tendance de l'évolution entre les résistances mécaniques en flexion et compression par rapport aux mortiers utilisant le liant « 40 » non activé soumis au même traitement thermique ; la courbe du mortier « 40.0,5 » traité thermiquement est parallèle avec celle du mortier « 40 » également soumis au même cycle thermique. Ainsi, pour une même résistance mécanique en compression, la résistance en flexion est plus élevée de 20 % en moyenne. La courbe de tendance du mortier « 53.0,5 » soumis à un cycle thermique semble posséder un début de courbe dont la valeur d'ordonnée est supérieure au mortier « 40.0,5 » traité thermiquement jusqu'à une valeur de résistance en compression proche de 40 MPa.

De plus, en se plaçant à iso-compression, plusieurs valeurs de résistance en flexion ressortent ; ces dernières correspondent aux mortiers obtenus avec des traitements thermiques différents. Par exemple à 50 MPa, les résistances en flexion varient de 5,3 MPa à presque 7 MPa respectivement avec les traitements thermiques TTA''/80-6 h 40 et TTB''/60-9 h 25.

Les applications en béton armé nécessitent une résistance mécanique en flexion suffisante afin de pouvoir manutentionner la pièce. Cette propriété est donc plus importante que la résistance en compression. Ainsi, l'utilisation d'un traitement thermique sur les liants ternaires activés chimiquement, et plus particulièrement sur le liant « 40.0,5 », serait pertinente pour ce type d'application.



Légende : les points plus clairs correspondent aux mortiers non traités thermiquement.
« NC » : chlorure de sodium ; « NS » : sulfate de sodium.

Figure 88 : Relation entre les résistances mécaniques en flexion et compression en fonction des traitements thermiques appliqués

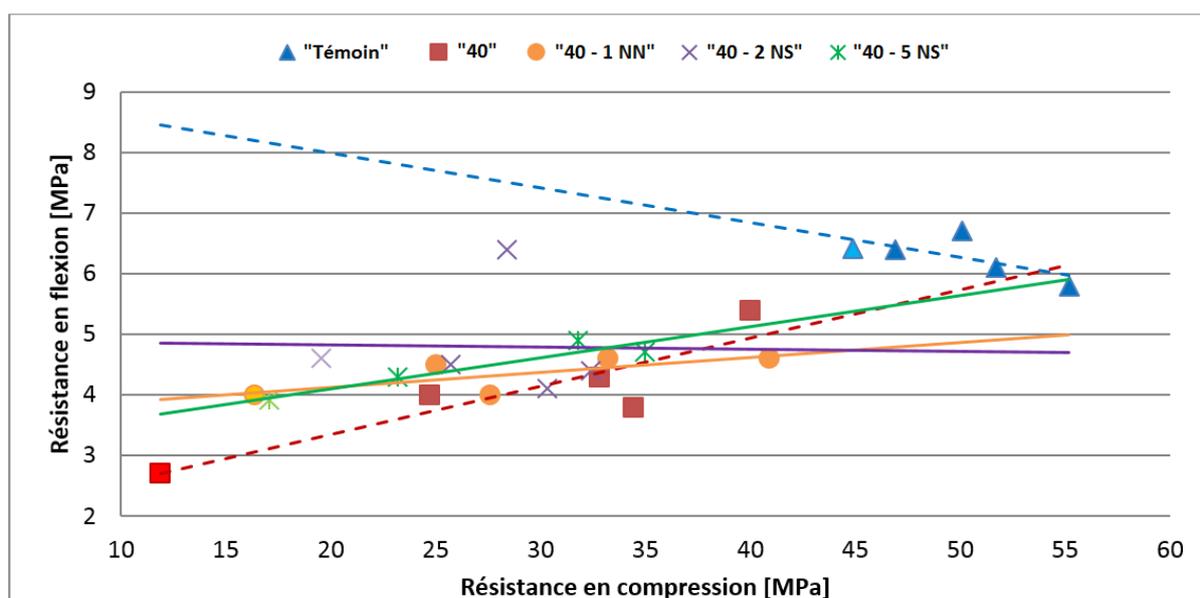
Les courbes de tendance obtenues dans le cas d'une activation chimique par du sulfate de sodium seul diffèrent en fonction de la quantité d'activateur chimique (figure 89). À hauteur de 2 % (« 40-2 NS »), la courbe est quasi horizontale (pente légèrement négative), mettant en avant que les résistances en flexion n'évoluent pas par rapport aux résistances en compression quel que soit le traitement thermique appliqué. Or, un point est fortement éloigné des trois autres.

Il s'agit du cas de l'application du traitement thermique TTB''/60-9 h 25, conduisant à libérer 211 kgeqCO₂/m³ pour une température de palier de 60 °C. L'importante durée du palier associée à une température de palier intermédiaire semble donc être favorable au développement de résistance en flexion équivalente au témoin CEM I non chauffé à 24 heures, en présence de 2 % de sulfate de sodium. Cette solution d'activation chimique/traitement thermique pourrait donc être utilisée pour des applications où la température ne doit pas dépasser 60 °C au sein du béton et qui nécessitent davantage de résistance en flexion.

La courbe obtenue pour le mortier activé par 5 % de sulfate de sodium (figure 89 – « 40-5 NS ») possède une pente qui se rapproche de celle du mortier « 40 », tout en restant inférieure. Les différents points sont plus homogènes dans leur évolution : l'augmentation de la résistance en compression génère l'augmentation de la résistance en flexion avec une préférence pour une température de palier de 80 °C. Cette solution pourrait donc concerner les produits qui peuvent atteindre une température importante et dont la résistance en compression doit dépasser 30 MPa au démoulage, tout en émettant seulement environ 215 kgeqCO₂/m³.

La courbe associée au mortier activé par 1 % de nitrate de sodium (figure 89 – « 40-1 NN ») possède également une pente faiblement croissante. La résistance en flexion ne dépasse pas 4,6 MPa quel que soit les caractéristiques du traitement thermique. Ce type d'activation semble être plus favorable au développement des résistances en compression (supérieure à 40 MPa) dès lors que la température de palier est importante et que la durée du palier est longue (TTA''/80-6 h 40 pour une émission d'environ 230 kgeqCO₂/m³).

Pour une iso-résistance en flexion d'environ 4,5 MPa, la résistance en compression est comprise entre 20 MPa et 40 MPa. Il est donc possible d'adapter l'activation chimique ainsi que le traitement thermique en fonction de l'application visée.

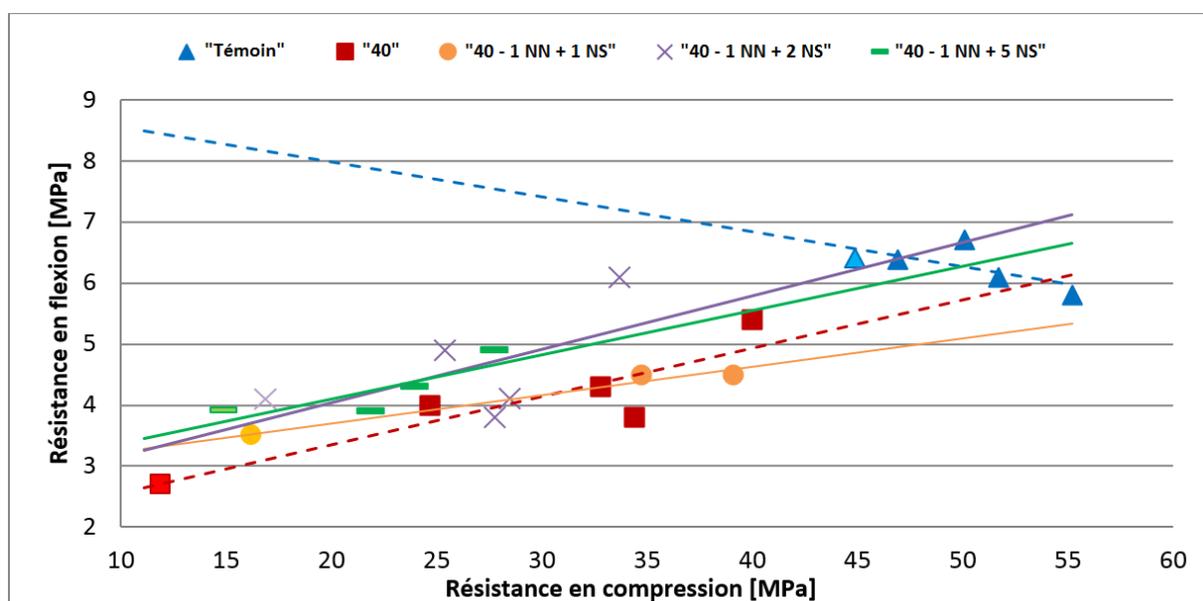


Légende : les points plus clairs correspondent aux mortiers non traités thermiquement.
« NN » : nitrate de sodium ; « NS » : sulfate de sodium.

Figure 89 : Relation entre les résistances mécaniques en flexion et compression en fonction des traitements thermiques appliqués

Le couplage entre une activation mixte à base de sulfate de sodium et de nitrate de sodium et le traitement thermique permet l'obtention de courbes dont les pentes sont proches voire supérieures à celle du mortier « 40 » non activé chimiquement et non soumis à un traitement thermique. La courbe du mortier « 40 + 1 NN + 2 NS » semble posséder la pente la plus forte (figure 90). Une température de 60 °C semble être plus adaptée à l'obtention de bonnes résistances en flexion, tout en obtenant une résistance en compression supérieure à 25 MPa.

L'augmentation de la quantité de sulfate (mortier « 40 + 1 NN + 5 NS ») engendre une moins grande dispersion des résistances mécaniques : résistances en compression comprises entre 15 et 27 MPa et des résistances en flexion comprises entre 3,9 et 4,9 MPa. La courbe obtenue est parallèle à celle du témoin « 40 » non activé et à température ambiante avec toutefois une résistance en flexion supérieure.



Légende : les points plus clairs correspondent aux mortiers non traités thermiquement.
« NN » : nitrate de sodium ; « NS » : sulfate de sodium.

Figure 90 : Relation entre les résistances mécaniques en flexion et compression en fonction des traitements thermiques appliqués

5.2. Impact de la composition du liant ternaire sur les propriétés économiques et environnementales

Pour chaque liant étudié, l'évolution du coût est représentée en fonction de la quantité émise de CO₂ par mètre cube de mortier (hypothèses de calcul dans le tableau 43). Le calcul a été réalisé en utilisant une valeur de masse volumique réelle moyenne issue des résultats, soit 2 300 kg/m³.

Concernant le traitement thermique, son coût dépend de son mode d'alimentation. En France, on estime que l'Industrie du Béton utilise 60 % d'électricité, 27 % de gaz naturel et 13 % de fioul léger (source : Cerib).

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**

Tableau 43 : Hypothèses prises pour le coût et l’empreinte CO₂ des matières premières utilisées

	Hypothèses	
	Coûts [€/T] (sans transport)	Empreinte CO ₂ [kgCO _{2eq} /T]
Ciment CEM I PLN	120 ¹⁾	766 ²⁾
Laitier de haut fourneau	90 ¹⁾	20 ³⁾
Addition calcaire	30 ¹⁾	75 ³⁾
Sable	20 ⁴⁾	2,8 ⁵⁾
Eau	3 ⁷⁾	0,3 ⁶⁾
Sulfate de sodium	105 ¹⁾	552 ⁸⁾
Chlorure de sodium	75 ¹⁾	200 ⁸⁾
Nitrate de sodium	5 000 ¹⁾	4 600 ⁸⁾
Traitement thermique	Fonction du traitement thermique ⁹⁾	

¹⁾ Moyenne estimée à partir de plusieurs sources

²⁾ Donnée ATILH

³⁾ Données fournisseurs

⁴⁾ Sable classique de bonne qualité

⁵⁾ Granulats de roches meubles/massives UNPG 2010

⁶⁾ Source : Logiciel ACV, base de données Ecoinvent

⁷⁾ Donnée issue de l'Association pour le Contrat Mondial de l'Eau

⁸⁾ Données Cerib

⁹⁾ Tarif électricité EDF 2017 : 0,1449 € TTC/kWh ; hypothèse de consommation 0,173 kgeqCO₂/kWh

Les traitements thermiques possèdent une consommation énergétique spécifique due à la différence de leurs paramètres (tableau 44) (source « Ecoinvent v3.2 »).

Tableau 44 : Informations liées aux différents traitements thermiques appliqués

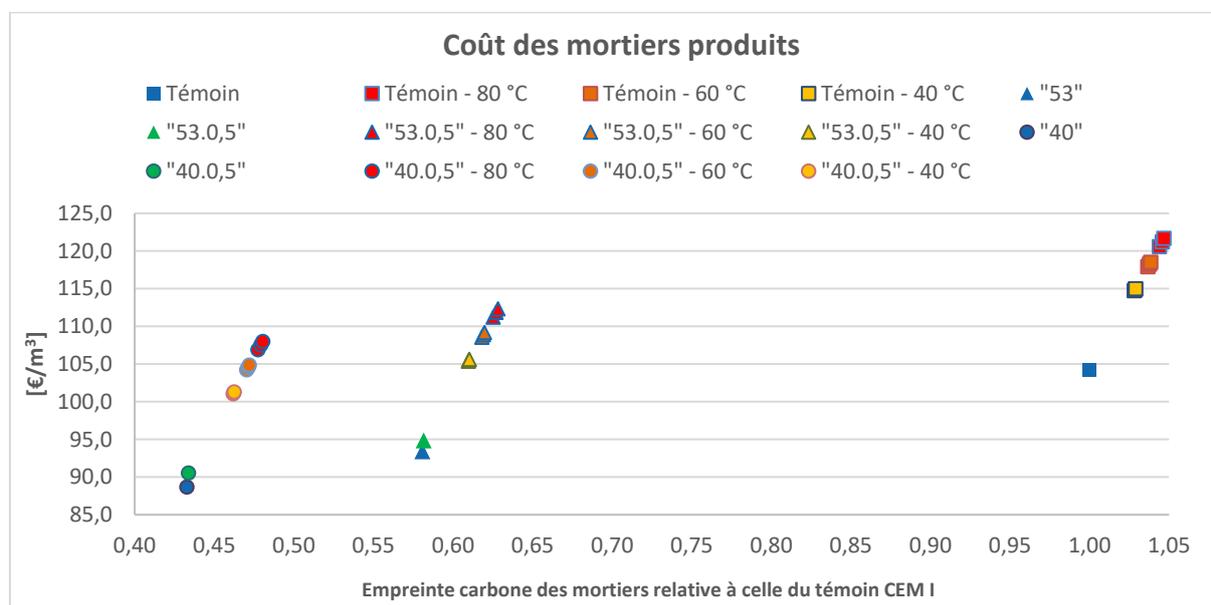
Traitement thermique	Palier	Durée totale	Conso. En. [kWh/m ³]	Émissions CO ₂ [kgeqCO ₂ /m ³]	Coût associé [€/m ³]
A	3 h 30 ; 80 °C	6 h 30	113,0	19,5	16,4
A'	5 h 05 ; 80 °C	8 h 05	117,5	20,3	17,0
A''	6 h 40 ; 80 °C	9 h 40	120,6	20,8	17,5
B	5 h 20 ; 60 °C	8 h 20	94,5	16,3	13,7
B'	7 h 20 ; 60 °C	10 h 20	97,0	16,8	14,1
B''	9 h 25 ; 60 °C	12 h 25	98,8	17,1	14,3
C	8 h 20 ; 40 °C	11 h 20	72,6	12,6	10,5
C'	11 h 25 ; 40 °C	14 h 25	73,7	12,7	10,7
C''	14 h 30 ; 40 °C	17 h 30	74,3	12,8	10,8
D	6 h ; 40 °C	6 h	121	13,4	11,2
E	20 °C à 60 °C en 6 h (6,7 °C/h)	6 h	121	13,4	11,2
F	4 h ; 75 °C	7 h 45	179,3	19,8	16,6

« Conso. En. » : Consommation Énergétique.

5.2.1. Couplage entre activation chimique utilisant des chlorures et traitement thermique

L'application d'un traitement thermique augmente légèrement le coût de fabrication (maximum 15 €/t de liant pour le témoin) (figure 91). Couplé à l'activation chimique, le surcoût peut atteindre 12 % du coût initial : cas du mortier « 40.0,5 – TTA'' » par rapport au mortier « 40 ». Néanmoins, ce coût reste très inférieur au coût du mortier témoin : écart moyen de 15 et 10 €/t entre le témoin CEM I et les mortiers à base de liant « 40 » et liant « 53 » respectivement. En augmentant la quantité d'énergie apportée, en passant par exemple du traitement thermique TTA/80-3 h 30 à TTA''/80-6 h 40, le surcoût engendré est négligeable (maximum 1 €).

Les tendances observées vis-à-vis de l'impact environnemental, mesuré avec le CO_{2eq}, sont très similaires (figure 91). L'application d'un traitement thermique n'engendre pas une importante augmentation d'émission de CO₂ et ce, quel que soit la température et le temps de palier.



Légende :

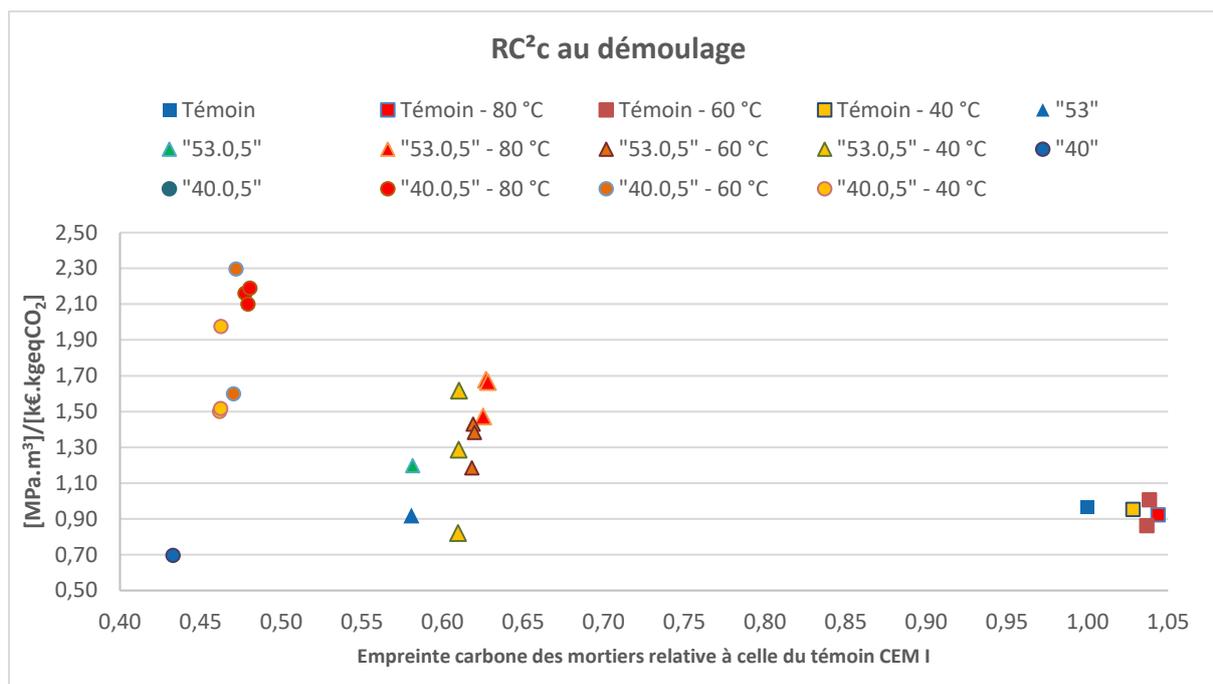
Formes : carrés : « témoin » ; triangles : liant « 53 » ; ronds : liant « 40 ».
Couleurs : bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; rouge/orange/jaune : activé et traité th.

Figure 91 : Représentation du coût en fonction de la quantité de CO₂ émise pour chaque mortier (activé et traité thermiquement) étudié

Les figures 92 et 93 présentent respectivement les variations RC^{2c} - RC^{2t} au démoulage en fonction de l'empreinte carbone des mortiers relative à celle de la référence. Les valeurs de RC^{2c} montrent une évolution croissante avec la quantité de chaleur apportée. De plus, les ratios de nombreuses formulations rapportées dans cette étude sont supérieurs à ceux du témoin CEM I à température ambiante ou traité thermiquement.

Vis-à-vis de la résistance en compression, les mortiers possédant le ratio le plus important sont à base du liant « 40 » activé par 0,5 % de sulfate de sodium et 0,5 % de sulfate de sodium. Ces ratios semblent être maximaux pour un apport de chaleur de 112 kWh/m³ à 60 °C [TTB''/60-9 h 25] ainsi que pour un apport de chaleur de 136 kWh/m³ à 80 °C [TTA''/80-6 h 40] (ratios supérieurs à 2). Les ratios concernant les mortiers à base du liant « 53 » sont inférieurs à la plupart des ratios à base du liant « 40 ».

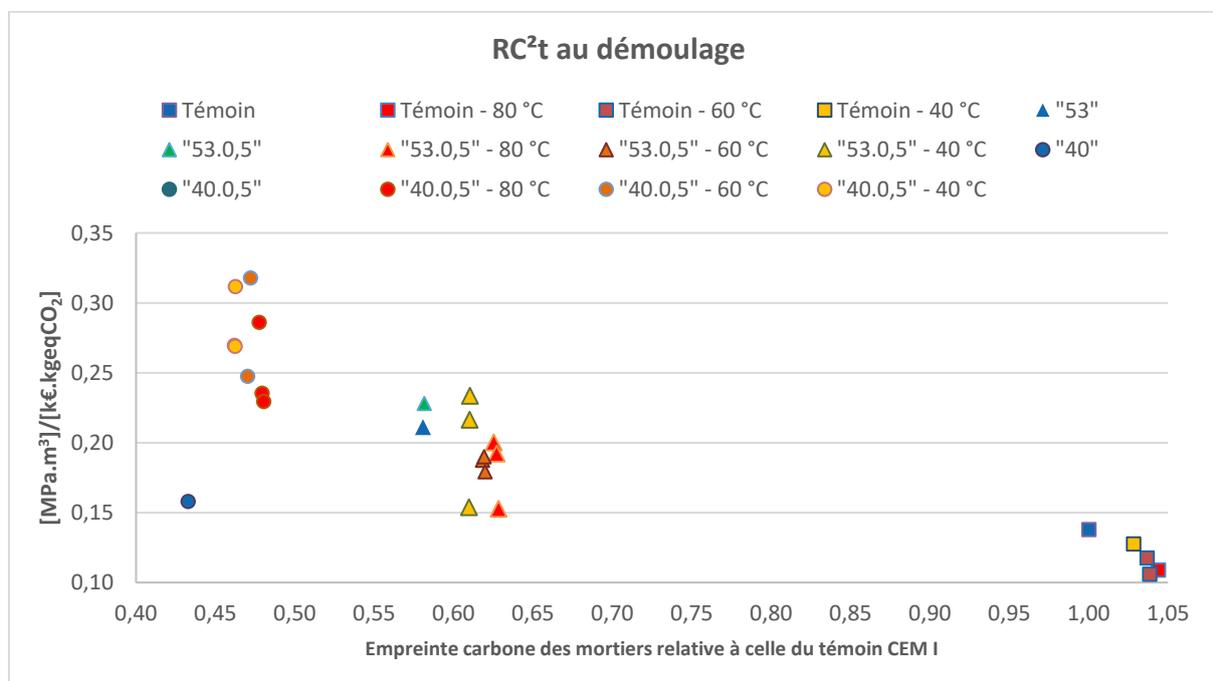
**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**



Légende :

Formes : carrés : « témoin » ; triangles : liant « 53 » ; ronds : liant « 40 ».
 Couleurs : bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; rouge/orange/jaune : activé et traité th.

Figure 92 : Représentation du ratio en compression (RC²c) au démoulage en fonction de l’empreinte CO₂ des mortiers, relative à celle du témoin CEM I



Légende :

Formes : carrés : « témoin » ; triangles : liant « 53 » ; ronds : liant « 40 ».
 Couleurs : bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; rouge/orange/jaune : activé et traité th.

Figure 93 : Représentation du ratio en flexion (RC²t) en fonction de l’empreinte CO₂ des mortiers, relative à celle du témoin CEM I

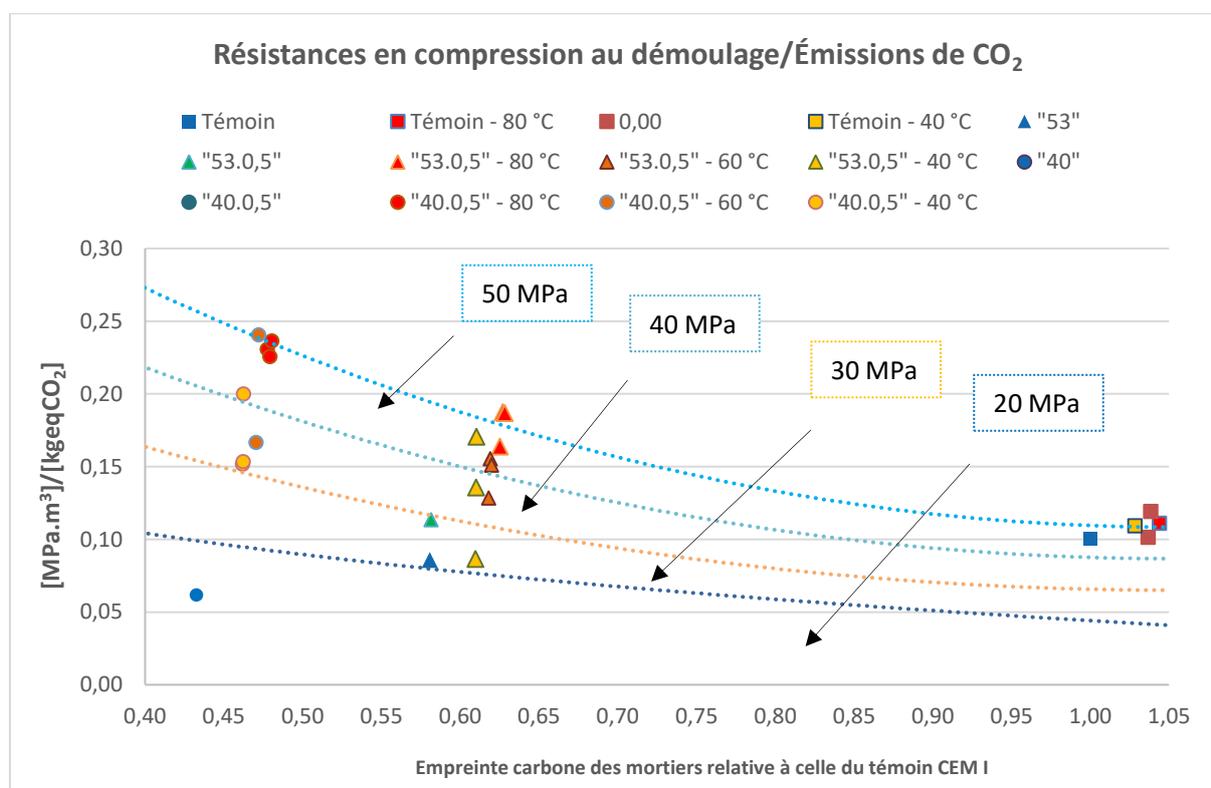
CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT

Les tendances observées en flexion sont similaires à celles obtenues en compression. Les ratios sont compris entre 0,1 et 0,33 MPa.m³.k€⁻¹.kgeqCO₂⁻¹. Tous les ratios à base de liants ternaires activés sont supérieurs à ceux des témoins, traités thermiquement ou non. Tout comme en compression, les ratios les plus importants sont à base de liant « 40 » activé et chauffé à 60 °C [TTB''] et à 40 °C [TTC''].

L'augmentation du temps de palier permet une forte augmentation des ratios sans pour autant augmenter de manière significative l'empreinte carbone.

Concernant les mortiers à base de liant « 53 », les ratios maximums sont obtenus pour une température de 60 °C appliquée pendant environ 9 h 30 [TTB''] (figure 93).

Les figures 94 et 95 représentent les ratios permettant d'évaluer le rendement du CO₂ pour la production des mortiers vis-à-vis des performances mécaniques au démoulage.



Légende :

- Formes : carrés : « témoin » ; triangles : liant « 53 » ; ronds : liant « 40 ».
- Couleurs : bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; rouge/orange/jaune : activé et traité th.
- Courbes : iso-résistances en compression.

Figure 94 : Représentation du rendement du CO₂ vis-à-vis de la résistance en compression au démoulage en fonction de leur empreinte carbone

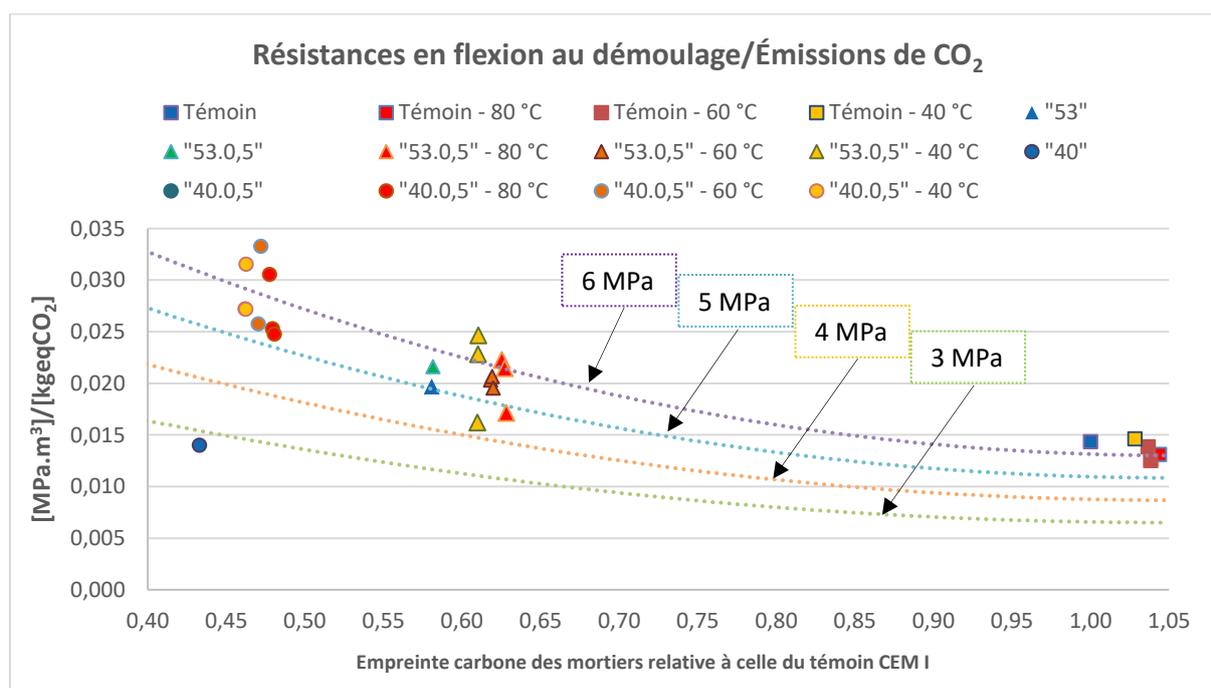
Les valeurs en compression sont comprises entre 0,06 et 0,25 MPa.m³.kgeqCO₂⁻¹. La valeur la plus élevée correspondant au mortier « 40 + 0,5 NC + 0,5 NS – 60 °C » qui possède une résistance mécanique de 50 MPa au démoulage (figure 94). Ce mortier permet donc d'être équivalent en termes de résistance en compression au bout de 12 h 30 de traitement [TTB''/60-9 h 25] par rapport au témoin, tout en émettant 2,5 fois moins de CO₂. En augmentant la température jusqu'à 80 °C, ce même mortier atteint également une résistance en compression de 50 MPa au bout de 9 h 40 [TTA''/80-6 h 40] ou proche de 50 MPa au bout de 6 h 30 [TTA].

CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT

Cette augmentation de température ne génère pas d'augmentation significative d'émission de CO₂ (quelques kgeqCO₂/m³). L'utilisation d'un traitement thermique de 40 °C permet d'atteindre une résistance supérieure à 40 MPa au bout de 17 h 30 [TTC''/40-14 h 30]. Cette même valeur de résistance est obtenue pour les mortiers à base de liant « 53 » ayant subi un traitement thermique soit à 60 °C [TTB'/60-7 h 20] soit à 80 °C [TTA/80-3 h 30], tout en émettant environ 60 % de CO₂ par rapport au témoin CEM I.

Les ratios en flexion sont compris entre 0,015 et 0,035 MPa.m³.kgeqCO₂⁻¹ (figure 95). L'optimum correspond, tout comme en compression, au mortier à base du liant « 40 » activé par 0,5 % de sulfate de sodium et 0,5 % de chlorure de sodium traité thermiquement à 60 °C pendant la durée de palier la plus longue [TTB''/60-9 h 25] (ratio de 0,034 MPa.m³.kgeqCO₂⁻¹), suivi du même mortier chauffé à 40 °C [TTC''/40-14 h 30] (ratio de 0,032 MPa.m³.kgeqCO₂⁻¹), soit quasiment deux fois le ratio du témoin CEM I pour une émission plus faible de CO₂ 2,25 fois. Ce même ratio est obtenu avec un traitement thermique à 80 °C mais avec la durée de palier la plus courte [TTA/80-3 h 30].

Les ratios obtenus avec les mortiers à base du liant « 53 » sont compris entre 0,015 et 0,025 MPa.m³.kgeqCO₂⁻¹ et semblent devenir plus important dès lors que l'apport de chaleur est élevé avec une température de palier de 40 °C.



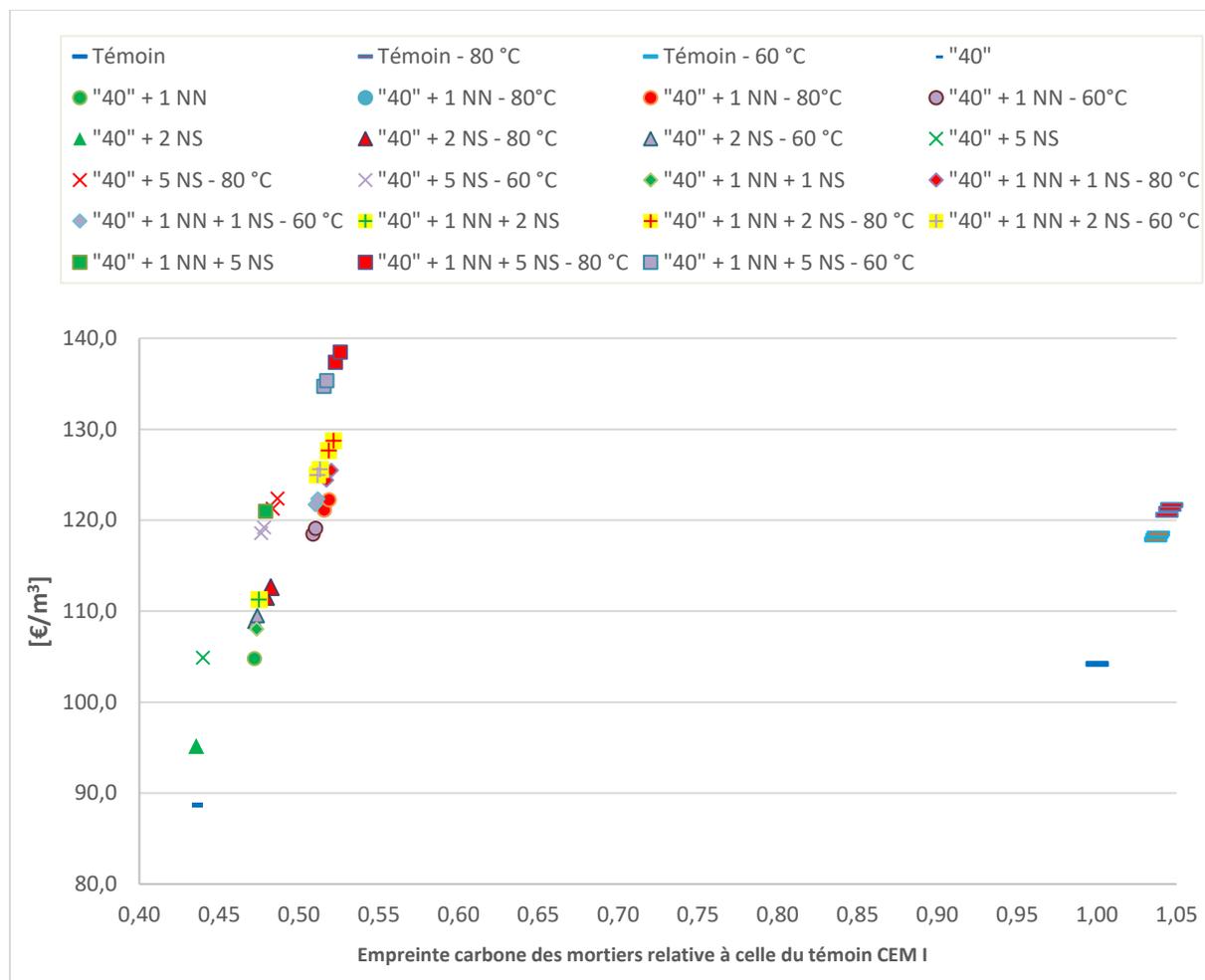
Légende :

- Formes : carrés : « témoin » ; triangles : liant « 53 » ; ronds : liant « 40 ».
- Couleurs : bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; rouge/orange/jaune : activé et traité th.
- Courbes : iso-résistances en flexion.

Figure 95 : Représentation du rendement du CO₂ vis-à-vis de la résistance en flexion au démoulage en fonction de leur empreinte carbone

5.2.2. Couplage entre activation chimique sans chlorures et traitement thermique

L'utilisation de sulfate de sodium seul dans des mortiers à base de liant « 40 » traités thermiquement engendre des coûts de production ainsi qu'une empreinte carbone qui reste proches des valeurs déterminées précédemment. En incorporant du nitrate de sodium, ces deux propriétés augmentent rapidement ; notamment, le coût dépasse celui des témoins (figure 96).



Légende :

Formes : type de liant et d'activation :

traits longs : « témoin » ; trait court : liant « 40 » ; ronds : « 40 + 1 NN » ; croix obliques : « 40 + 5 NS » ; losanges : « 40 + 1 NN + 1 NS » ; croix droites : « 40 + 1 NN + 2 NS » ; carrés : « 40 + 1 NN + 5 NS » ; triangles : « 40 + 2 NS ».

Couleurs : traitement thermique ou non :

bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; violet/rouge : activé et traité th.

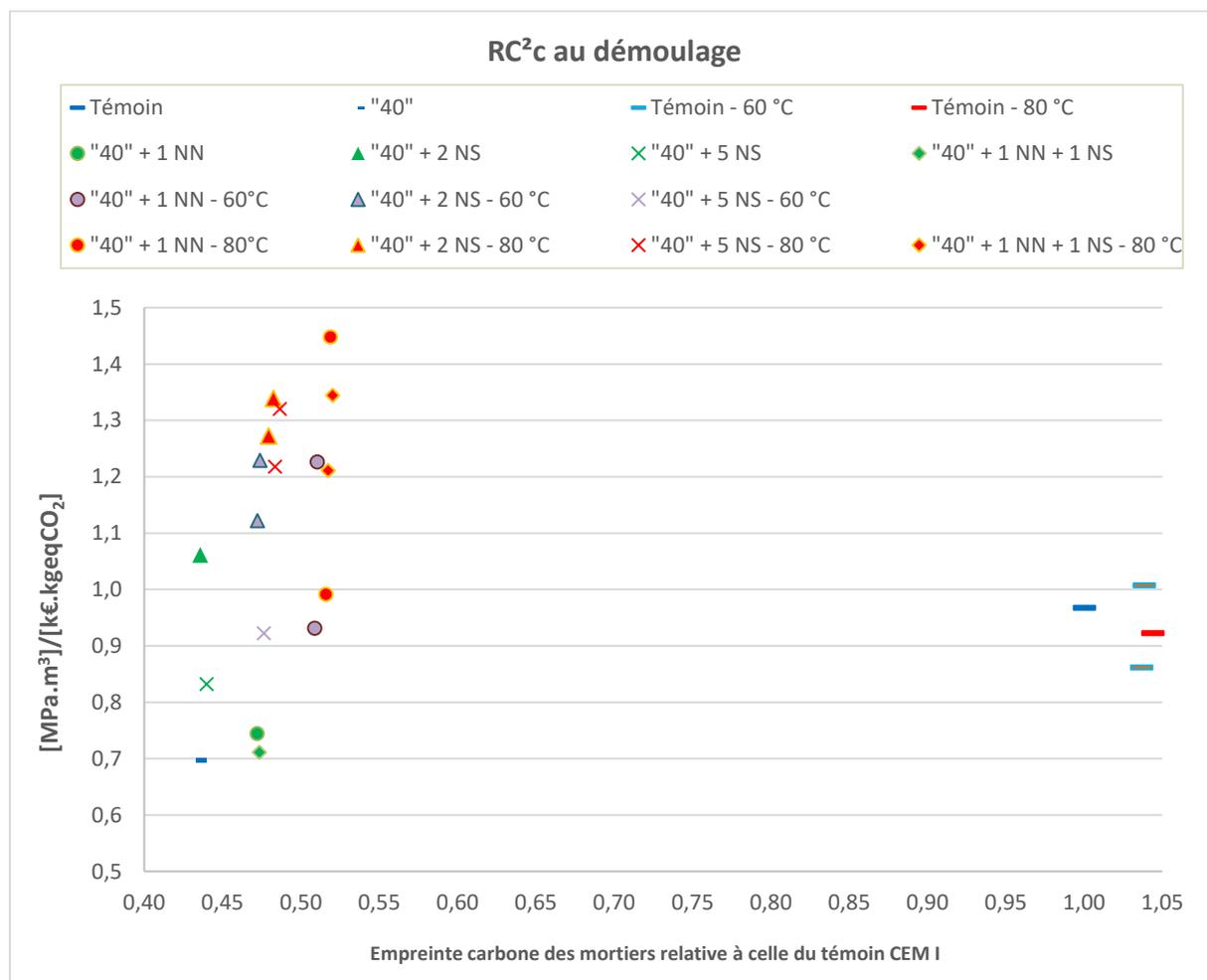
Figure 96 : Représentation du coût de chaque mortier activé et traité thermiquement en fonction de leur empreinte carbone

Les figures 97 et 98 présentent respectivement les variations $Rc^{2c} - Rc^{2t}$ au démoulage en fonction de la quantité émise de CO_2 par mètre cube de mortier. Les mortiers incorporant du nitrate de sodium ainsi que du sulfate de sodium à plus de 1 % ne sont pas représentés.

Les valeurs de RC^{2c} montrent une évolution croissante avec la quantité de chaleur apportée. De plus, plusieurs ratios de formulations rapportées dans cette étude sont supérieurs à ceux du témoin CEM I à température ambiante ou traité thermiquement.

CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT

Vis-à-vis de la résistance en compression, le mortier possédant le ratio le plus important est à base du liant « 40 » activé par 1 % de nitrate de sodium et subi un traitement thermique de 80 °C [TTA''/80-6 h 40], soit un apport de chaleur de 120,6 kWh/m³ (ratios supérieurs à 1,4 MPa.m³.k€⁻¹.kgeqCO₂⁻¹). D'autres mortiers chauffés ont également un ratio important en compression : les mortiers « 40 + 1 NN + 1 NS » et « 40 + 5 NS » chauffés à 80 °C [TTA''/80-6 h 40] permettent l'obtention d'un ratio avoisinant 1,35 MPa.m³.k€⁻¹.kgeqCO₂⁻¹, tout en consommant respectivement 231 kgeqCO₂/m³ et 215 kgeqCO₂/m³. Non chauffés, la plupart des mortiers activés possèdent des ratios proches voire inférieurs aux témoins (figure 97).



Légende :

Formes : type de liant et d'activation :

traits longs : « témoin » ; trait court : liant « 40 » ; ronds : « 40 + 1 NN » ; croix obliques : « 40 + 5 NS » ; losanges : « 40 + 1 NN + 1 NS » ; croix droites : « 40 + 1 NN + 2 NS » ; carrés : « 40 + 1 NN + 5 NS » ; triangles : « 40 + 2 NS ».

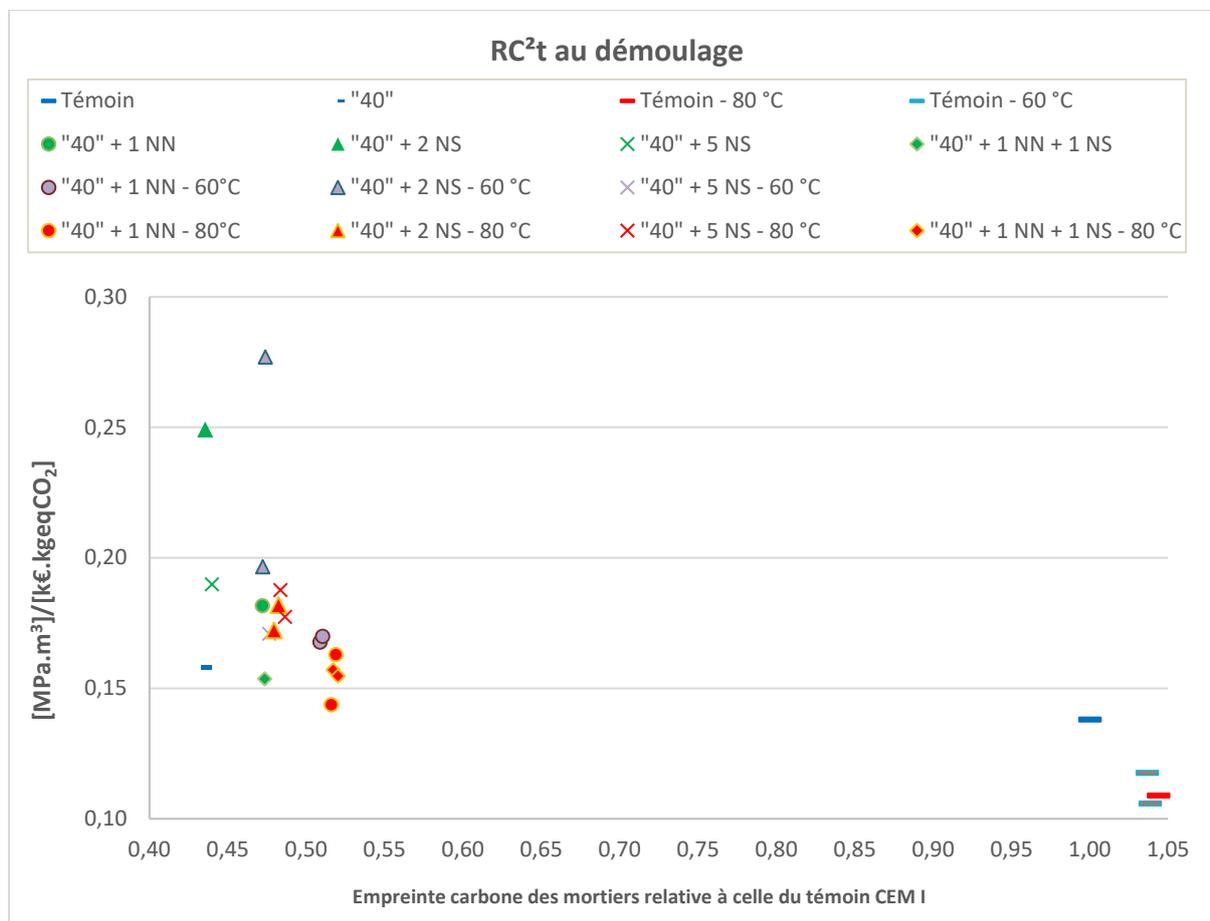
Couleurs : traitement thermique ou non :

bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; violet/rouge : activé et traité th.

Figure 97 : Ratio en compression RC²c au démoulage des mortiers chauffés et activés par du sulfate de sodium, du nitrate de sodium ou les deux, en fonction de leur empreinte carbone

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**

En flexion, les ratios des mortiers sont systématiquement supérieurs à ceux des témoins, chauffés ou non. Ils sont compris entre 0,14 et 0,28 MPa.m³.k€⁻¹.kgeqCO₂⁻¹. Les ratios les plus importants sont à base de liant « 40 » activé pas 2 % de sulfate de sodium, chauffé à 60 °C [TTB''/60-9 h 25] ou non chauffé. En effet, le mortier « 40 + 2 NS » non chauffé permet l'obtention d'un ratio proche de 0,25 MPa.m³.k€⁻¹.kgeqCO₂⁻¹, l'apport de chaleur (empreinte carbone relative passant de 0,44 à 0,47) permettant son augmentation de 0,03 points.



Légende :

Formes : type de liant et d'activation :

traits longs : « témoin » ; trait court : liant « 40 » ; ronds : « 40 + 1 NN » ; croix obliques : « 40 + 5 NS » ; losanges : « 40 + 1 NN + 1 NS » ; triangles : « 40 + 2 NS ».

Couleurs : traitement thermique ou non :

bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; violet/rouge : activé et traité th.

Figure 98 : Ratio en flexion RC²t au démoulage des mortiers chauffés et activés par du sulfate de sodium, du nitrate de sodium ou les deux, en fonction de leur empreinte carbone

L'utilisation d'activateur sulfatique permet l'obtention de ratios en flexion importants tandis que la présence de nitrate de sodium a plutôt un effet bénéfique sur les ratios en compression.

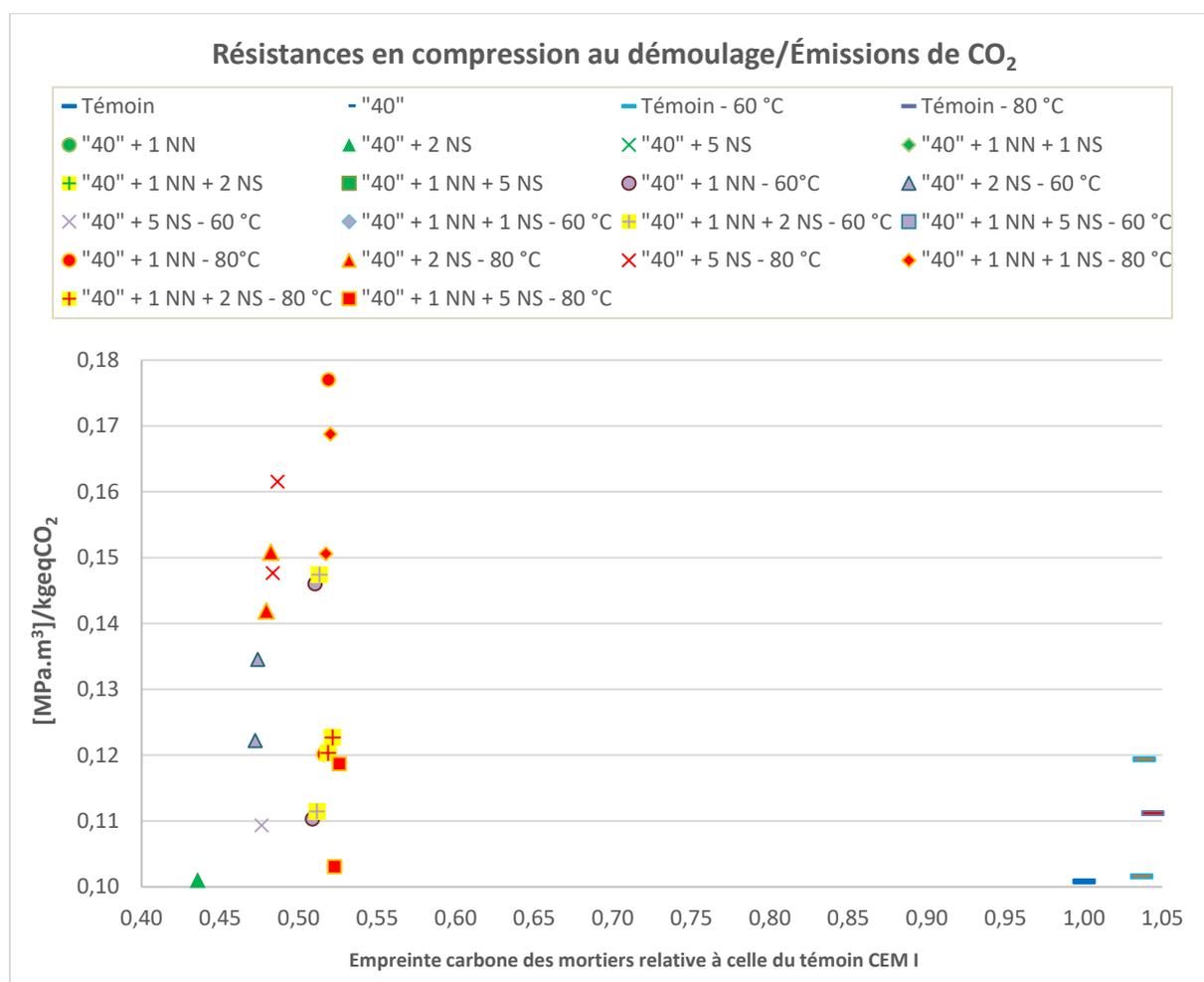
Les figures 99 et 100 représentent les ratios permettant d'évaluer le rendement du CO₂ pour la production des mortiers vis-à-vis des performances mécaniques au démoulage, en fonction de leur empreinte carbone.

CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT

Les ratios en compression des mortiers « 40 » activés par du nitrate de sodium ou un couplage de nitrate de sodium et sulfate de sodium semblent être maximum pour le traitement thermique apportant le plus grand apport de chaleur soit 120 kWh/m³ (ratios proches de 0,17 et 0,18 MPa.m³.kgeqCO₂⁻¹) à 80 °C.

Plus généralement, l'application d'un traitement thermique de 80 °C permet l'obtention de ratios supérieurs à 0,14 MPa.m³.kgeqCO₂⁻¹ pour une empreinte carbone émission de CO₂ inférieure à 55 % de celle du témoin.

Ainsi, grâce à l'application d'un traitement thermique, dont la température est de 80 °C ou 60 °C, beaucoup de ratios obtenus avec les liants ternaires activés chimiquement sont supérieurs à ceux des témoins également traités thermiquement (figure 99). On observe en parallèle que les mortiers non chauffés ont également des ratios en compression équivalents à ceux des témoins.



Légende :

Formes : type de liant et d'activation :

traits longs : « témoin » ; trait court : liant « 40 » ; ronds : « 40 + 1 NN » ; croix obliques : « 40 + 5 NS » ; losanges : « 40 + 1 NN + 1 NS » ; croix droites : « 40 + 1 NN + 2 NS » ; carrés : « 40 + 1 NN + 5 NS » ; triangles : « 40 + 2 NS ».

Couleurs : traitement thermique ou non :

bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; violet/rouge : activé et traité th.

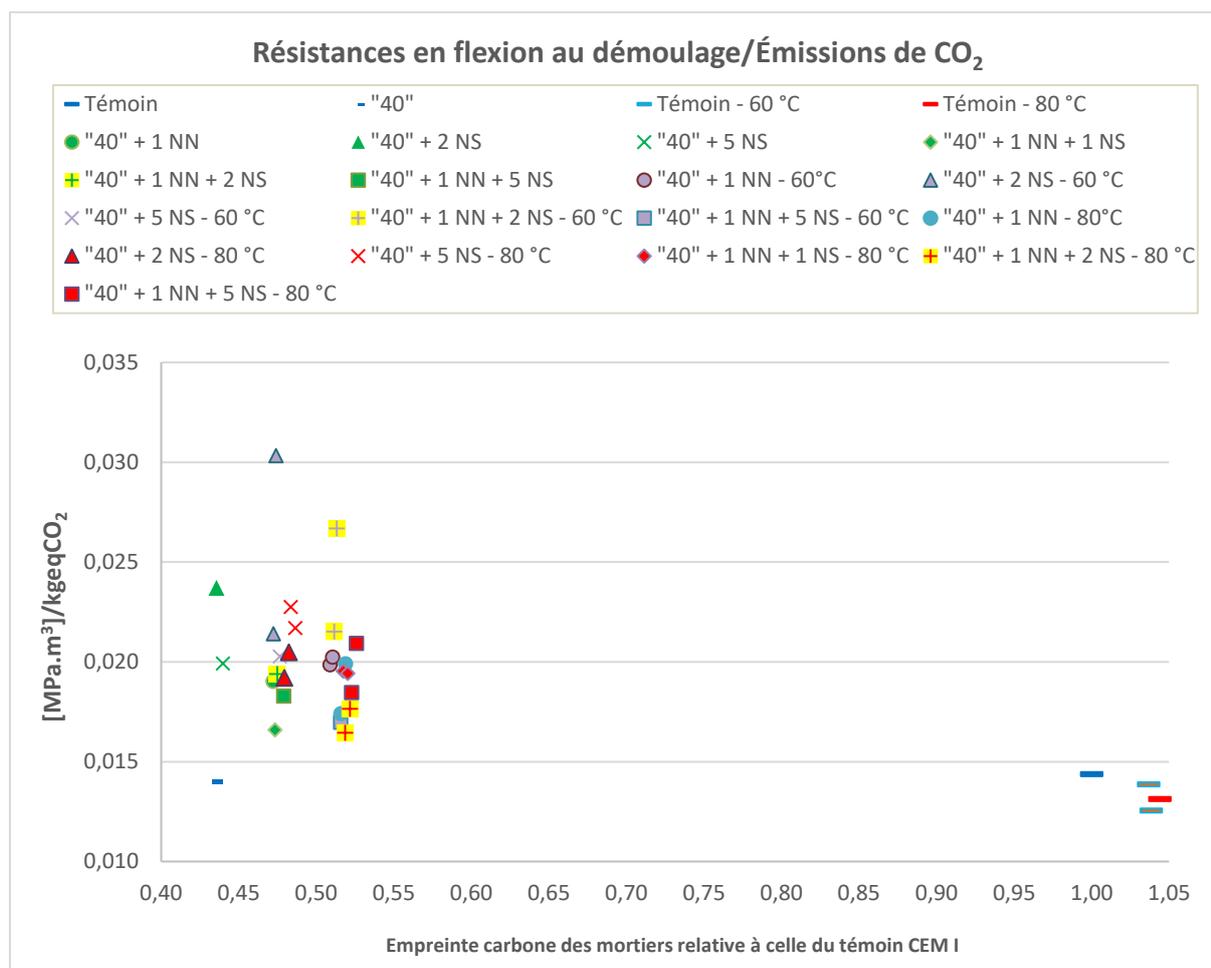
Figure 99 : Représentation du rendement du CO₂ vis-à-vis de la résistance en compression au démoulage des mortiers chauffés et activés par du sulfate de sodium, du nitrate de sodium ou les deux, en fonction de leur empreinte carbone

CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT

Les ratios obtenus en flexion sont systématiquement supérieurs à ceux des témoins et sont compris entre 0,014 et 0,030 MPa.m³.kgeqCO₂⁻¹.

À 60 °C, le mortier « 40 + 2 NS » possède un ratio deux fois plus élevé que celui du témoin non traité thermiquement tout en émettant plus de deux fois moins de CO₂ par mètre cube de mortier produit. La majorité des ratios se situe entre 0,17 et 0,24 MPa.m³.kgeqCO₂⁻¹ pour une empreinte carbone comprise entre 0,43 et 0,53 (figure 100).

Pour un même ratio, il est alors possible de sélectionner le « meilleur » couple « activateur – traitement thermique » émettant le moins de CO₂.



Légende :

Formes : type de liant et d'activation :

traits longs : « témoin » ; trait court : liant « 40 » ; ronds : « 40 + 1 NN » ; croix obliques : « 40 + 5 NS » ; losanges : « 40 + 1 NN + 1 NS » ; croix droites : « 40 + 1 NN + 2 NS » ; carrés : « 40 + 1 NN + 5 NS » ; triangles : « 40 + 2 NS ».

Couleurs : traitement thermique ou non :

bleu : non activé/non traité th. ; vert : activé/non traité th. ; violet/rouge : activé et traité th.

Figure 100 : Représentation du rendement du CO₂ vis-à-vis de la résistance en flexion au démoulage des mortiers chauffés et activés par du sulfate de sodium, du nitrate de sodium ou les deux

En comparant les résultats obtenus avec et sans chlorure de sodium, la présence de ce dernier permet globalement l'obtention de valeurs en flexion et compression plus élevées.

6. Conclusion Partielle

Ce chapitre a démontré l'intérêt d'un couplage entre une activation chimique des liants ternaires et un traitement thermique de ces derniers dans le but de se rapprocher des performances techniques du mortier témoin et de répondre à l'objectif technique de la thèse.

Cette amélioration est principalement due à l'application d'un traitement thermique. Ce levier est extrêmement puissant en présence de laitier de haut fourneau. En effet, dans certaines conditions expérimentales, les performances en compression au démoulage obtenues par les mortiers à base de liant « 40 » et « 53 » sont proches de celles du témoin, tandis que celles en flexion semblent pouvoir être supérieures. De plus, les résistances mécaniques mesurées à plus long terme montrent globalement que les mortiers ternaires obtiennent des performances en compression supérieures à 60 MPa. Ainsi, l'effet du traitement thermique sur le CEM I conduisant à accroître la résistance à la compression à court terme au détriment de la résistance à la compression à long terme n'est plus observée pour les liants ternaires activés chimiquement ou non ; pour les liants ternaires étudiés, la résistance à la compression augmente à court et long termes grâce au traitement thermique. Toutefois, il peut exister un effet optimum ou pessimum en fonction de la concentration en activateur chimique.

De plus, en utilisant la même activation chimique et le même traitement thermique, les performances mécaniques en flexion et compression diffèrent en fonction du liant.

La température de 80 °C semble permettre l'obtention de performances en compression supérieures à 45 MPa au bout de 3 h 30 [TTA/80-3 h 30] voire supérieures à 50 MPa au bout de 5 heures de palier [TTA'/80-5 h 05] pour le liant « 53.0,5 » (0,5 % de sulfate de sodium et 0,5 % de sulfate de sodium).

Pour des températures de palier inférieures, le liant « 40.0,5 » activé semble plus performant à 60 °C (optimum à 50 MPa au bout de 9 h 30 de palier [TTB''/60-9 h 25]) qu'à 40 °C (40 MPa au bout de 14 h 30 [TTC''/40-14 h 30]) tandis que le liant « 53.0,5 » génère à 40 °C (palier de durée importante) une résistance en compression supérieure à 45 MPa. Pour une même aire sous la courbe ($\int_0^t A(T) = 40\,000 \text{ °C}\cdot\text{minutes}$), la température de 40 °C semble plus efficace que celle de 60 °C.

Vis-à-vis de la résistance en flexion, la température joue également un rôle important. Il semble que 80 °C ne soit pas favorable au bon développement des résistances, accentué avec l'augmentation de la durée de palier.

La température de 60 °C semble permettre d'atteindre l'optimum en flexion pour le liant « 40.0,5 » tandis que l'optimum du liant « 53.0,5 » est observée à 40 °C au bout de 14 h 30 de palier [TTC''/40-14 h 30]).

Vis-à-vis des ratios de performances RC^{2c} et RC^{2t} , la présence de chlorure de sodium permet l'obtention de ratios intéressants. Si l'on considère les mortiers à base de liant « 40 » activé par 0,5 % de sulfate de sodium et 0,5 % de chlorure de sodium, les performances et donc leurs utilisations sont directement reliées au type de traitement thermique appliqué. Dans ce cas, un traitement thermique avec une température de palier de 60 °C et une longue durée de palier [TTB''/60-9 h 25], conduisant à un apport en chaleur de 98,8 kWh/m³, engendre l'optimum des ratios RC^{2c} et RC^{2t} .

L'utilisation d'activateurs non chlorés permet également d'obtenir des performances en compression équivalentes à celles du cahier des charges. Le couplage « 1 NN - TTA'' » permet l'obtention de résistance en compression de 40 MPa au bout de 6 h 40 de palier à 80 °C [TTA''/80-6 h 40] tandis que le couplage « 2 NS - TTB'' » permet d'atteindre 6,4 MPa en flexion au bout de 9 h 25 de palier à 60 °C [TTB''/60-9 h 25].

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**

Ainsi, il semble important pour les liants ternaires activés chimiquement d'optimiser les paramètres du cycle thermique au lieu d'utiliser de plus fortes concentrations en activateur chimique ou des mélanges d'activateurs.

De plus, les liants ternaires permettent de plus facilement avoir une approche produits basées sur la modification des paramètres du traitement thermique avec le même type de liant. En effet, certains paramètres comme la température de palier sont potentiellement exploitables sur une plus large gamme de valeurs notamment vis-à-vis des problèmes latents de durabilité induits par une température supérieure à 60 °C avec un CEM I.

Il apparaît d'autant plus pertinent d'optimiser les paramètres du traitement thermiques car ce dernier a un faible poids dans les critères économiques et environnementaux. En effet, toutes les solutions développées en couplant la formulation du liant ternaire et le type de traitement thermique, émettent très nettement moins de CO₂. De plus, la plupart de ces solutions coûtent également moins chères que le mortier témoin CEM I non soumis à un traitement thermique. Ainsi, un mortier à base du liant « 40 » activé chimiquement et traité thermiquement conduit à une réduction de plus de 250 kgeqCO₂/m³ pour une économie d'environ 20 €/m³.

L'objectif général fixé par le cahier des charges en termes de performances mécaniques au démoulage (résistance en compression de 40 MPa et 20 MPa correspondant respectivement aux résistances en compression recherchées pour un béton armé au bout de 8 heures et un béton précontraint au bout de 10 heures) semble être atteint pour plusieurs solutions développées (tableau 45).

Tableau 45 : Solutions répondant au cahier des charges en termes de résistances mécaniques en compression

Liant	Activateurs chimiques	Traitement thermique	Béton armé	Béton précontraint
« 53 »	0,5 % NS + 0,5 % NC	TTA (80 °C ; 6 h 30)		Rc = 45,6 MPa ; Rt = 6,2 MPa
« 53 »	0,5 % NS + 0,5 % NC	TTA' (80 °C ; 8 h 05)		Rc = 52,4 MPa ; Rt = 6,0 MPa
« 53 »	0,5 % NS + 0,5 % NC	TTB (60 °C ; 8 h 20)	Rc = 35,4 MPa ; Rt = 5,6 MPa	
« 53 »	0,5 % NS + 0,5 % NC	TTB' (60 °C ; 10 h 20)		Rc = 42,9 MPa ; Rt = 5,7 MPa
« 40 »	0,5 % NS + 0,5 % NC	TTB (60 °C ; 8 h 20)	Rc = 34,9 MPa ; Rt = 5,4 MPa	
« 40 »	0,5 % NS + 0,5 % NC	TTA (80 °C ; 6 h 30)		Rc = 49,1 MPa ; Rt = 6,5 MPa
« 40 »	1 % NN	TTA'' (80 °C ; 9 h 40)		Rc = 40,9 MPa ; Rt = 4,6 MPa
« 40 »	1 % NN	TTB (60 °C ; 8 h 20)	Rc = 25,0 MPa ; Rt = 4,5 MPa	
« 40 »	2 % NS	TTB (60 °C ; 8 h 20)	Rc = 25,7 MPa ; Rt = 4,5 MPa	
« 40 »	5 % Sfin	TTA (80 °C ; 6 h 30)		Rc = 40,6 MPa ; Rt = 5,3 MPa

« NS » : sulfate de sodium ; « NC » : chlorure de sodium ; « NN » : nitrate de sodium ; « Sfin » : laitier de finesse Blaine = 5 100 cm²/g ; « Rc » : résistance en compression ; « Rt » : résistance en flexion.

**CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES
EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT**

Ce tableau est accompagné de deux graphiques résumant ces solutions (figures 101 et 102).

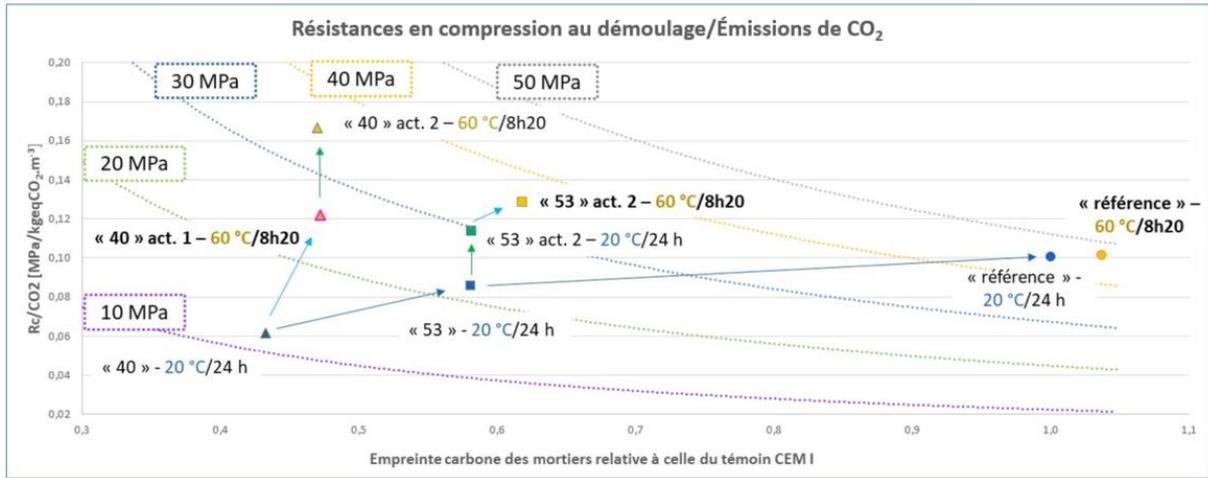


Figure 101 : Représentation des solutions répondant au cahier des charges pour une application en béton armé, en fonction de l'empreinte carbone relative au témoin CEM I

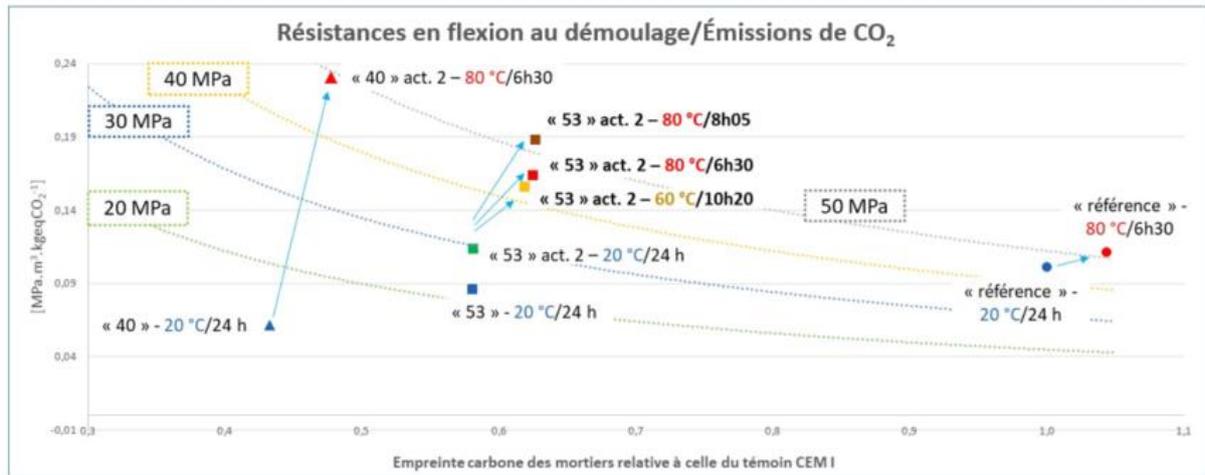


Figure 102 : Représentation des solutions répondant au cahier des charges pour une application en béton précontraint, en fonction de l'empreinte carbone relative au témoin CEM I

CHAPITRE VI : ACTIVATION THERMIQUE DES LIANTS TERNAIRES EN ASSOCIATION AVEC CERTAINS LEVIERS DÉCRITS PRÉCÉDEMMENT

Certaines applications nécessitent des températures de palier de 40 °C. Dès lors que la durée du palier est augmentée, des solutions développées dans cette thèse peuvent répondre à cette problématique (tableau 46).

Tableau 46 : Solutions répondant au cahier des charges vis-à-vis des performances mécaniques en augmentant le temps de palier

Liant	Activateur chimique	Traitement thermique	Béton armé	Béton précontraint
« 53 »	0,5 % NS + 0,5 % NC	TTC (40 °C ; 11 h 20)	Rc = 23,5 MPa ; Rt = 4,4 MPa	
« 53 »	0,5 % NS + 0,5 % NC	TTC'' (40 °C ; 17 h 30)		Rc = 46,4 MPa ; Rt = 6,7 MPa
« 40 »	0,5 % NS + 0,5 % NC	TTC (40 °C ; 11 h 20)	Rc = 31,2 MPa ; Rt = 5,6 MPa	
« 40 »	0,5 % NS + 0,5 % NC	TTC'' (40 °C ; 17 h 30)		Rc = 41,2 MPa ; Rt = 6,5 MPa

« **NS** » : sulfate de sodium ; « **NC** » : chlorure de sodium ; « **Rc** » : résistance en compression ;
« **Rt** » : résistance en flexion.

La solution à base du liant « 40 » activée par 0,5 % de chlorure de sodium et 0,5 % de sulfate de sodium et traité thermiquement à 60 °C pendant 12 h 25 permet d'atteindre une résistance en flexion de 7 MPa (Rc = 50,6 MPa). Cette propriété peut être un atout et permettre l'utilisation de cette solution pour certaines applications fortement sollicitées en flexion au démoulage.

CHAPITRE VII : Transposition des optimisations obtenues sur les mélanges ternaires au ciment CEM III

L'industrie cimentière est très sensibilisée à l'enjeu environnemental et développe des ciments ayant une empreinte carbone toujours plus basse. Ces ciments contiennent des additions minérales (réactives ou non) en substitution du clinker ; ciment au laitier CEM III, ciment composé CEM V... Toutefois, ces ciments restent peu utilisés par l'Industrie du Béton notamment à cause de la lenteur du développement des résistances mécaniques à court terme.

Les travaux réalisés au cours de cette thèse sur des liants ternaires constitués de ciment Portland CEM I, de laitier de haut fourneau et d'addition calcaire ont permis d'améliorer les résistances en compression et en flexion à court terme en utilisant l'activation chimique couplée à l'application d'un traitement thermique.

Ce chapitre a pour but d'évaluer la pertinence de cette optimisation sur le ciment CEM III/A contenant uniquement du laitier de haut fourneau en plus grande quantité et potentiellement des activateurs chimiques dont la nature est ici connue.

1. Similarités entre ciments au laitier de haut fourneau et liants contenant du laitier de haut fourneau

Le développement du ciment Portland au laitier est dû à certains avantages spécifiques qu'il procure : une faible chaleur d'hydratation, une durabilité importante dans certains environnements agressifs comme les sulfates, une couleur claire et un plus faible impact environnemental. De par leur faible résistance au très jeune âge, les liants à base de CEM III sont encore peu utilisés en préfabrication.

La réactivité de ce type de ciment, et donc ses performances mécaniques, varient suivant de nombreux paramètres (composition chimique, mode de production, composition du ciment, surface spécifique). Tout comme dans les liants ternaires étudiés dans les chapitres précédents, le laitier de haut fourneau présent dans le ciment CEM III a besoin d'être activé. L'activation d'un CEM III est réalisée d'une part par l'hydratation du clinker, et d'autre part, par des activateurs chimiques ajoutés par les cimentiers.

Comme il peut exister des synergies entre plusieurs activateurs chimiques, ceux ayant donnés de bons résultats sur les liants ternaires étudiés auparavant ont été directement utilisés sur un CEM III traité thermiquement, la température étant également un activateur puissant du laitier. En parallèle, cette double activation chimique et thermique a été appliquée à un liant à base de CEM III et d'addition calcaire afin d'évaluer l'effet de cette addition.

2. Performances obtenues sur les mortiers à base de CEM III

Afin d'évaluer la sensibilité de la double activation chimique et thermique, les ciments étudiés sont deux ciments CEM III/A. Néanmoins, des activations chimiques différentes ont été mises en œuvre pour les deux ciments CEM III/A utilisés.

2.1. Traitements thermiques utilisés

Le traitement thermique A (TTA) a été utilisé et conduit au plus faible apport de chaleur tout en possédant la température de palier la plus élevée (3 h 30 à 80 °C [TTA/80/3 h 30]). Ce type de traitement peut être utilisé pour la production de prédalles. Un second traitement thermique représentatif de la réalisation de prémurs et possédant une température intermédiaire (55 °C) a également été appliqué (TTG). Les paramètres de ces traitements thermiques sont décrits dans le tableau 47 et la figure 103.

Tableau 47 : Description des traitements thermiques appliqués

TT	Conso. Energ. (kWh/m ³)	Aire $\int_0^t A(T)$ (°C.min)	Prét.	Montée en température	Palier	Durée totale
A	113,0	25 000	20 °C ; 30'	20 ° à 80 °C ; 2 h 30	80 °C ; 3 h 30	6 h 30
G	99,7	23 100	/	/	55 °C ; 7 h	7 h

« Conso. Energ. » : Consommation Énergétique ; « Prét. » : Prétraitement.

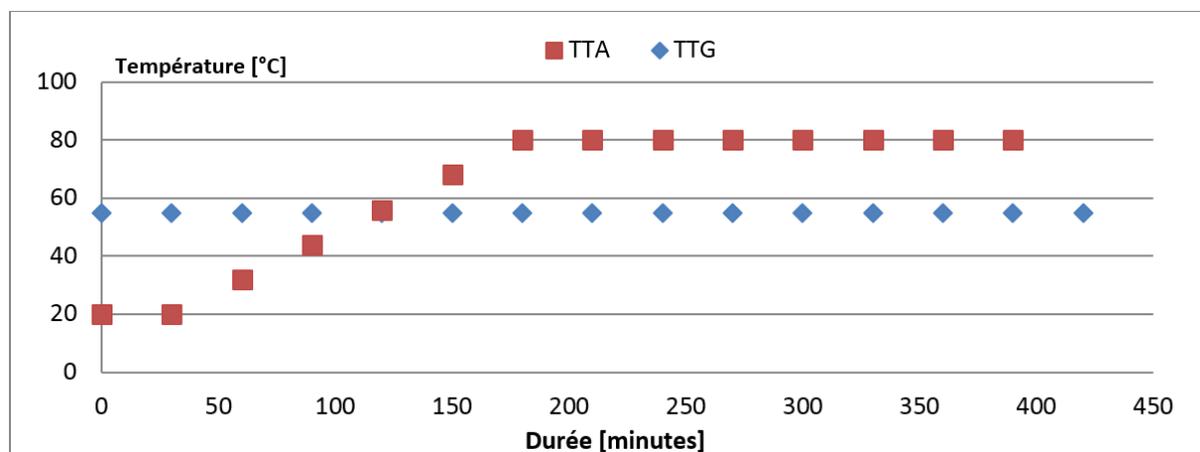


Figure 103 : Traitements thermiques appliqués

2.2. Performances mécaniques obtenues

Le ciment CEM III/A 42,5 N (« CEM III/A ») a été activé par 0,5 % de sulfate de sodium et 0,5 % de chlorure de sodium, soit 0,27 % de moins que le ciment CEM III/A 42,5 N-LH (« CEM III/A-LH »).

Le ciment CEM III/A-LH contient déjà du chlorure de sodium dans sa composition à hauteur de 0,45 % pour une quantité de laitier correspondant à 62 %. En prenant l'hypothèse que le laitier initialement introduit a une teneur en alcalins équivalents de 0,46 % (valeur de la FTP du laitier moulu de haut fourneau d'Ecocem), le chlorure de sodium est présent à hauteur d'environ 0,77 % massique de Na₂O équivalent par rapport au laitier. Ainsi, l'activateur chimique ajouté au ciment CEM III/A-LH a été uniquement le sulfate de sodium à hauteur de 0,5 %.

**CHAPITRE VII : TRANPOSITION DES OPTIMISATIONS OBTENUES
SUR LES MÉLANGES TERNAIRES AU CIMENT CEM III**

Les mortiers contenant les liants activés chimiquement ont été comparés aux mortiers témoins non activés soumis ou non au même traitement thermique (tableaux 48 et 49 pour les liants à base de CEM III/A et CEM III/A-LH respectivement).

Tableau 48 : Détail des propriétés d'usage obtenues par les mortiers à base de ciments CEM III/A 42,5 N

		100 % CEM III/A	100 % CEM III/A + 0,5 % NS + 0,5 % NC	85 % CEM III/A + 15 % L + 0,5 % NS + 0,5 % NC
Proportions massiques [g]				
Ciment CEM III/A 42,5 N (« CEM III/A »)		1 350,0	1 350,0	1 350,0
Addition calcaire		0	0	202,5
Na ₂ SO ₄ (« NS »)		0	6,6	5,6
NaCl (« NC »)		0	2,1	1,7
Sable 0/2 mm		4 050,0	4 050,0	4 050,0
Eau (E _{eff} /L = 0,4)		540,0	540,0	540,0
Adjuvant (0,25 %/L)		3,4	3,4	3,4
Caractéristiques à l'état frais				
Étalement [mm]		160,0	170,0	175,0
ρ [kg/m ³]		2 210,0	2 270,0	2 195,0
Air occlus [%]		6,0	4,1	4,5
Ressuage [visuel]		Faible	Faible	Faible
Caractéristiques à l'état durci				
Traitement thermique		Pas de traitement thermique		
Compression [MPa]	24 h	19,7	23,5	n.d.
	28 j	74,1	71,1	n.d.
Flexion [MPa]	24 h	3,7	4,7	n.d.
	28 j	11,0	11,7	n.d.
Traitement thermique		TTA (consommation énergétique : 113,0 kWh/m³)		
Compression [MPa]	fin de TT (6 h 30)	32,6	41,7	33,8
	24 h	35,1	44,5	37,9
	28 j	58,8	65,1	64,6
Flexion [MPa]	fin de TT	3,8	4,7	4,4
	24 h	5,2	6,1	5,5
	28 j	9,0	9,9	8,9
Traitement thermique		TTG (consommation énergétique : 99,7 kWh/m³)		
Compression [MPa]	fin de TT (7 h)	n.d.	27,5	n.d.
	24 h	n.d.	32,3	n.d.
	28 j	n.d.	53,9	n.d.
Flexion [MPa]	fin de TT	n.d.	4,9	n.d.
	24 h	n.d.	7,5	n.d.
	28 j	n.d.	10,6	n.d.

n.d. : non déterminé ; « CEM III/A » : CEM III/A 42,5 N ; « L » : addition calcaire ; « NS » : sulfate de sodium ; « NC » : chlorure de sodium.

**CHAPITRE VII : TRANPOSITION DES OPTIMISATIONS OBTENUES
SUR LES MÉLANGES TERNAIRES AU CIMENT CEM III**

Tableau 49 : Détail des propriétés d'usage obtenues par les mortiers à base de ciments CEM III/A 42,5 N-LH

		100 % CEM III/A -LH	100 % CEM III/A-LH + 0,5 % NS	85 % CEM III/A-LH + 15 % L + 0,5 % NS
Proportions massiques [g]				
Ciment CEM III/A 42,5 N-LH (« CEM III/A-LH »)		1 350,0	1 350,0	1 147,5
Addition calcaire				202,5
Na ₂ SO ₄ (« NS »)			9,5	8,1
Sable 0/2 mm		4 050,0	4 050,0	4 050,0
Eau (E _{eff} /L = 0,4)		540,0	540,0	540,0
Adjuvant (0,25 %/L)		3,4	3,4	3,4
Caractéristiques à l'état frais				
Étalement [mm]		205,0	175,0	205,0
ρ [kg/m ³]		2 305,0	2 260,0	2 265,0
Air occlus [%]		2,6	4,0	4,0
Ressuage [visuel]		Oui	Faible	Oui
Caractéristiques à l'état durci				
Traitement thermique		Pas de traitement thermique		
Compression [MPa]	24 h	15,8	14,1	n.d.
	28 j	70,8	68,6	n.d.
Flexion [MPa]	24 h	3,5	3,1	n.d.
	28 j	12,8	12,2	n.d.
Traitement thermique		TTA (consommation énergétique : 113,0 kWh/m³)		
Compression [MPa]	fin de TT (6 h 30)	40,6	42,5	36,9
	24 h	46,7	48,4	41,0
	28 j	67,7	66,2	64,1
Flexion [MPa]	fin de TT	5,5	6,0	5,8
	24 h	8,4	8,7	7,4
	28 j	12,3	12,3	11,8
Traitement thermique		TTG (consommation énergétique : 99,7 kWh/m³)		
Compression [MPa]	fin de TT (7 h)	n.d.	24,3	n.d.
	24 h	n.d.	33,1	n.d.
	28 j	n.d.	57,0	n.d.
Flexion [MPa]	fin de TT	n.d.	4,7	n.d.
	24 h	n.d.	8,1	n.d.
	28 j	n.d.	11,7	n.d.

« n.d. » : non déterminé ; « CEM III/A-LH » : CEM III/A 42,5 N ; « L » : addition calcaire ; « NS » : sulfate de sodium.

À l'état frais, l'activation du mortier à base de CEM III/A n'a pas d'impact sur la maniabilité (tableau 48) tandis que l'ajout de sulfate dans le mortier à base de CEM III/A-LH a une influence sur cette même propriété (diminution de 15 %) (tableau 49).

CHAPITRE VII : TRANSDITION DES OPTIMISATIONS OBTENUES SUR LES MÉLANGES TERNAIRES AU CIMENT CEM III

Les ciments CEM III non activés soumis au traitement thermique A (TTA/80-3 h 30) présentent une forte augmentation de leur résistance en compression au démoulage : + 65 % pour le ciment CEM III/A et + 156 % pour le ciment CEM III/A-LH (figure 104).

L'activation chimique non couplée à un traitement thermique du ciment CEM III/A permet une amélioration de 20 % de la résistance en compression au démoulage (24 heures). Le couplage de l'activation chimique avec le traitement thermique permet des gains de résistance en compression encore plus important : + 40 % avec le traitement thermique TTG/55-7 h et + 110 % avec le traitement thermique TTA/80-3 h 30. Ces résultats mettent à nouveau en évidence la grande importance de la température du palier du traitement thermique sur le laitier, associée à la quantité de chaleur apportée. Ainsi, la résistance en compression à 24 heures (et non pas au démoulage) du CEM III activé et soumis au TTA/80-3 h 30 est quasiment équivalente à la référence visée (CEM I non traité thermiquement à 24 heures) bien que ceci ne soit plus le cas à 28 jours.

Contrairement au cas du ciment CEM III/A, l'activation chimique du ciment CEM III/A-LH, seule ou couplée avec le traitement thermique TTA/80-3 h 30, ne conduit pas à une amélioration aussi pertinente vis-à-vis de la compression. En parallèle, le traitement thermique semble conserver son effet bénéfique. On peut supposer que les quantités relatives entre le chlorure de sodium et de sulfate de sodium ne sont pas optimales puisque ce paramètre n'a pas une influence monotone sur l'activation des liants ternaires comme démontré au chapitre IV. De plus, l'estimation faite de la quantité de chlorure de sodium relative aux alcalins équivalents du laitier n'est certainement pas aussi fiable qu'une mesure réalisée sur le ciment CEM III/A-LH utilisé. Ceci démontre à nouveau la sensibilité de l'optimisation de la double activation chimique et thermique des liants binaires ou ternaires contenant des laitiers.

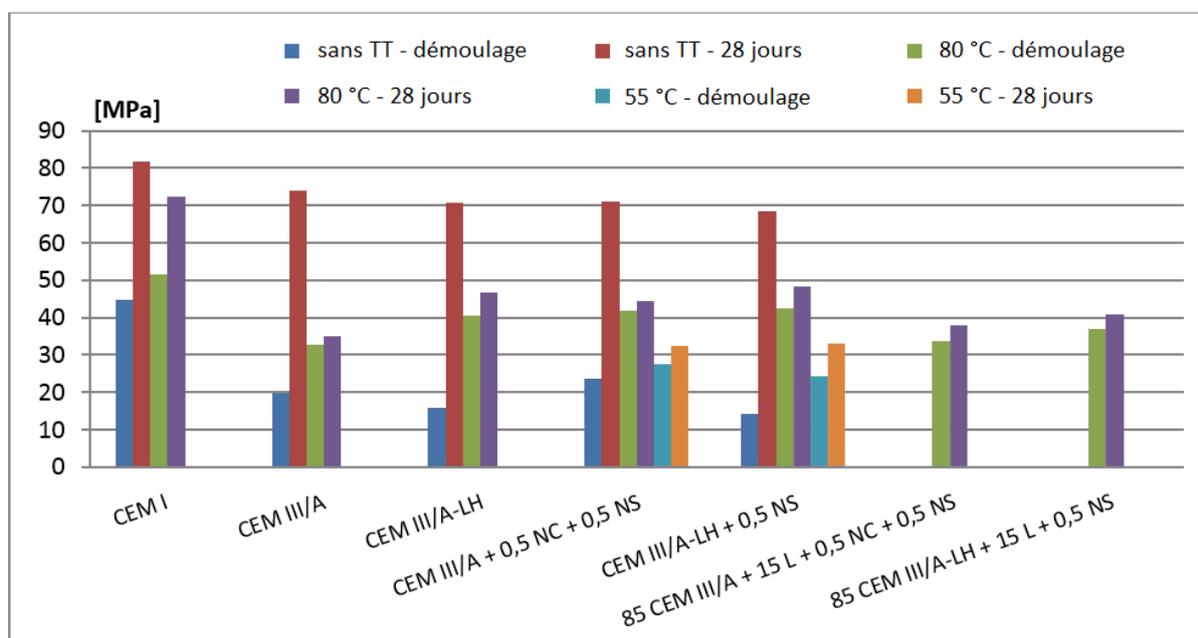


Figure 104 : Résistances en compression des mortiers à base de ciment CEM III en fonction des traitements thermiques appliqués

La substitution de 15 % des ciments CEM III par l'addition calcaire engendre une diminution de la résistance à la compression au démoulage même en présence d'activateurs chimiques et avec l'application du traitement thermique TTA/80-3 h 30 : -19 % pour le mortier à base de CEM III/A et -13 % pour le mortier à base de CEM III/A-LH (figure 104). Ceci démontre que l'addition calcaire est une addition « inerte » à court terme vis-à-vis de la résistance en compression.

Néanmoins, lorsque l'activation chimique est optimisée, la performance du liant ternaire CEM III/A + addition calcaire est équivalente à celle du ciment CEM III/A sans ajout additionnel d'activateurs chimiques. Ainsi, les activateurs chimiques conduisent à accélérer l'hydratation du système clinker + laitier.

Sans la double activation chimique et thermique, l'utilisation d'un ciment CEM III/A engendre une nette diminution de la résistance en flexion à 24 heures (-42 % en CEM III/A et -45 % en CEM III/A-LH) par rapport au témoin CEM I (figure 105). Toutefois, cette tendance est inversée à 28 jours (+7 % en CEM III/A et +25 % en CEM III/A-LH). L'application du traitement thermique TTA/80-3 h 30 ne semble pas impacter la résistance en flexion du mortier à base de ciment CEM III/A tandis qu'il permet d'augmenter de 57 % celle du mortier CEM III/A-LH, bien que restant inférieur au témoin CEM I non chauffé (-14 %).

L'activation chimique associée au traitement thermique du mortier « CEM III/A » améliore légèrement la résistance en flexion au démoulage tout comme celle à 28 jours. En revanche, l'activation chimique faite pour le mortier à base de CEM III/A-LH ne conduit pas à améliorer la résistance en flexion comme déjà observé pour la résistance en compression.

L'effet de la substitution du CEM III par une addition calcaire sur la résistance en flexion est similaire à celui observé pour la résistance en compression : légère diminution de la résistance avec toutefois une compensation de la réduction de la quantité de ciment par une activation chimique adaptée.

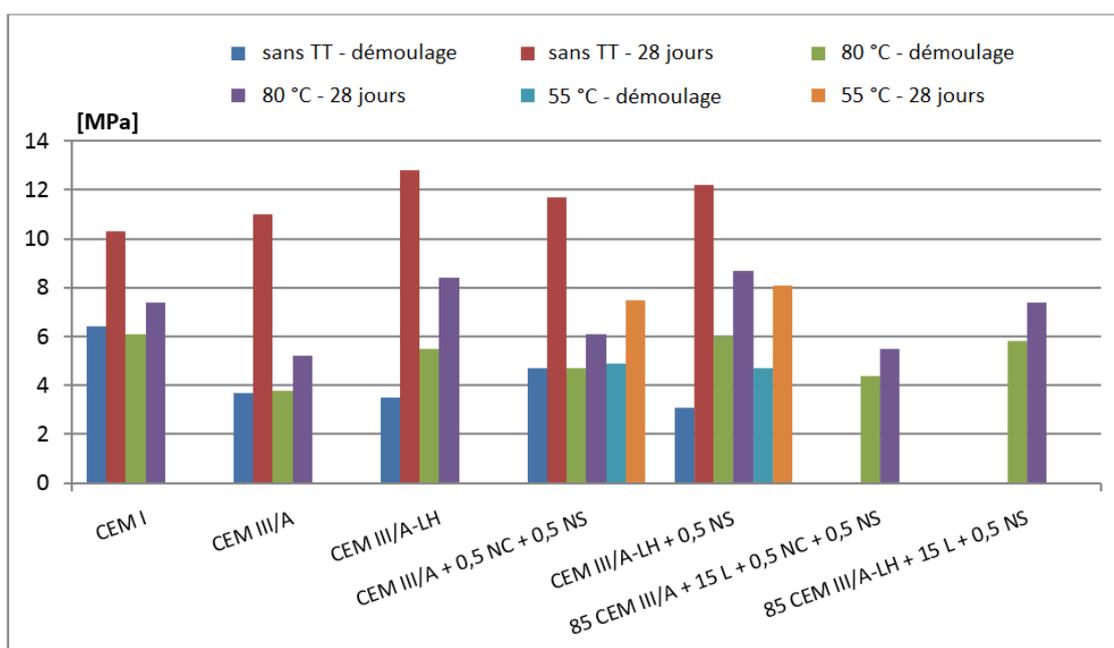


Figure 105 : Résistances en flexion des mortiers à base de ciment CEM III en fonction des traitements thermiques appliqués

3. Discussion

3.1. Résultats obtenus

En comparant les performances à l'état frais des mortiers à base de CEM III et de liant « 53 », on observe que l'étalement est similaire (175 mm) pour les mortiers « 53 + 0,5 NS + 0,5 NC » et « CEM III/A-LH + 0,5 NS » (56 % K + 43 % S). En diminuant encore la quantité de clinker, l'étalement augmente (190 mm pour le liant « 40 activé » et 205 mm pour le liant « 85 % CEM III/A-LH (31 % K + 53 % S) + 15 % L + 0,5 NS + 0,5 NC »).

À court terme, la double activation chimique et thermique impacte le système clinker + laitier. Ainsi, la transposition des solutions développées précédemment pour les liants ternaires est possible pour les ciments CEM III étudiés. Néanmoins, de façon analogue à ce qui avait été observé pour les liants ternaires de compositions différentes, il convient d'optimiser les paramètres de cette double activation pour maximiser la performance au risque sinon de dégrader cette dernière. Ceci est bien démontré avec les deux CEM III utilisés qui répondent différemment pour une même double activation.

Pour les CEM III, l'activation thermique apparaît plus efficace que l'activation chimique, particulièrement vis-à-vis de la résistance en compression. En prenant l'exemple du mortier « CEM III/A », l'application d'un traitement thermique, d'une activation seule et du couplage de ces deux activations, améliorent la résistance en compression respectivement de + 65 %, + 19 % et + 110 %. Vis-à-vis de la résistance en flexion, le traitement thermique a peu d'effet ; amélioration respectivement de + 3 %, + 27 % et + 27 % pour l'activation thermique, l'activation chimique et le couplage de deux activations. Dans ce cas, la température semble améliorer uniquement la résistance en compression tandis que l'activation chimique améliore les résistances en compression et flexion avec une prépondérance pour cette dernière.

Une comparaison des mortiers à base de CEM III et à base du liant « 53 » et « 40 », activés par les mêmes activateurs chimiques (0,5 NS + 0,5 NC) / traitement thermique (TTA/80-3 h 30) permet d'évaluer la pertinence de la mise en œuvre de liants ternaires à partir d'un ciment CEM III par rapport à un ciment CEM I. En effet, ceci pourrait être plus facile industriellement même si la gamme de composition du liant ternaire est plus limitée.

Les performances en compression et en flexion des mortiers à base de ciment CEM III sont comparées avec celles des mortiers à base de liants ternaires « 40 » et « 53 » d'une part, non activés et, d'autre part, activés par du sulfate de sodium et du chlorure de sodium (figures 106 et 107). Le ciment CEM III/A possède 56 % de clinker, soit une quantité similaire au liant « 53 ».

En comparant les mortiers incorporant ces deux liants, les performances en compression à 24 heures sans traitement thermique sont similaires (figure 106). Au bout de 28 jours, la résistance du mortier « 53 » non activé est supérieure de 27 % par rapport au mortier « CEM III/A ».

L'application du traitement thermique TTA/80-3 h 30 permet, pour les quatre liants, d'augmenter les performances jusqu'à 40 MPa au bout de 6 h 30. Les liants ternaires possèdent des résistances en compression légèrement supérieures, atteignant 50 MPa pour le liant « 40 » activé.

CHAPITRE VII : TRANSPPOSITION DES OPTIMISATIONS OBTENUES SUR LES MÉLANGES TERNAIRES AU CIMENT CEM III

Au bout de 28 jours, les performances des mortiers à base de ciment CEM III sont très proches de celles obtenues au démoulage, contrairement à celles des mortiers à base de liants ternaires qui continuent à augmenter pour atteindre plus de 70 MPa. Ainsi, la transposition des solutions développées avec les liants ternaires sur des liants à base de CEM III permet d'obtenir des résistances en compression proches au démoulage mais qui restent éloignées à 28 jours.

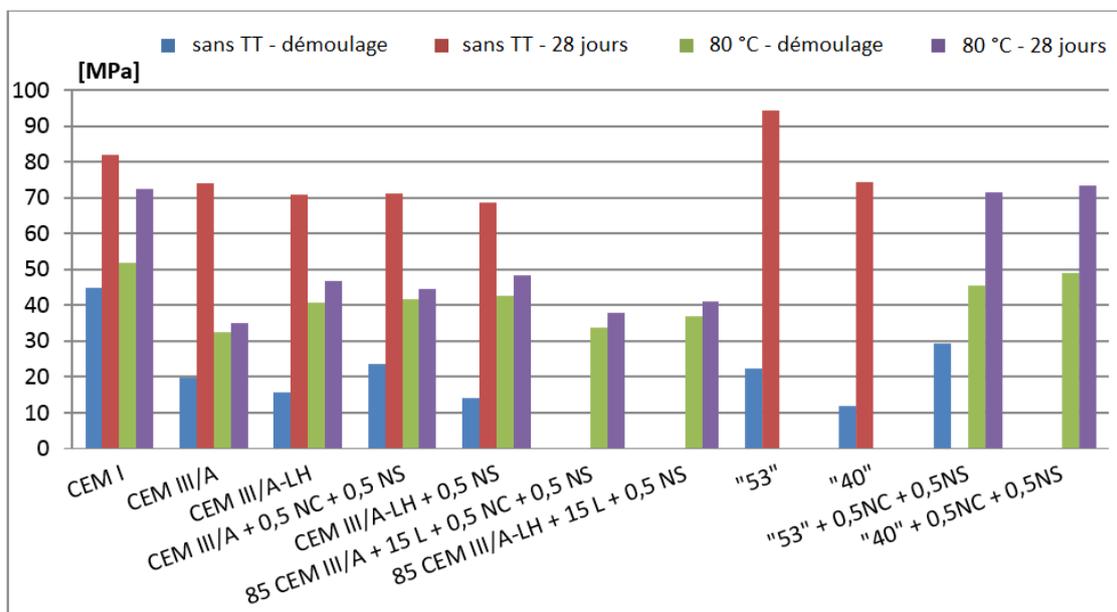


Figure 106 : Évolution des résistances en compression des mortiers à base de CEM III, du liant « 40 » ou « 53 » activés et chauffés

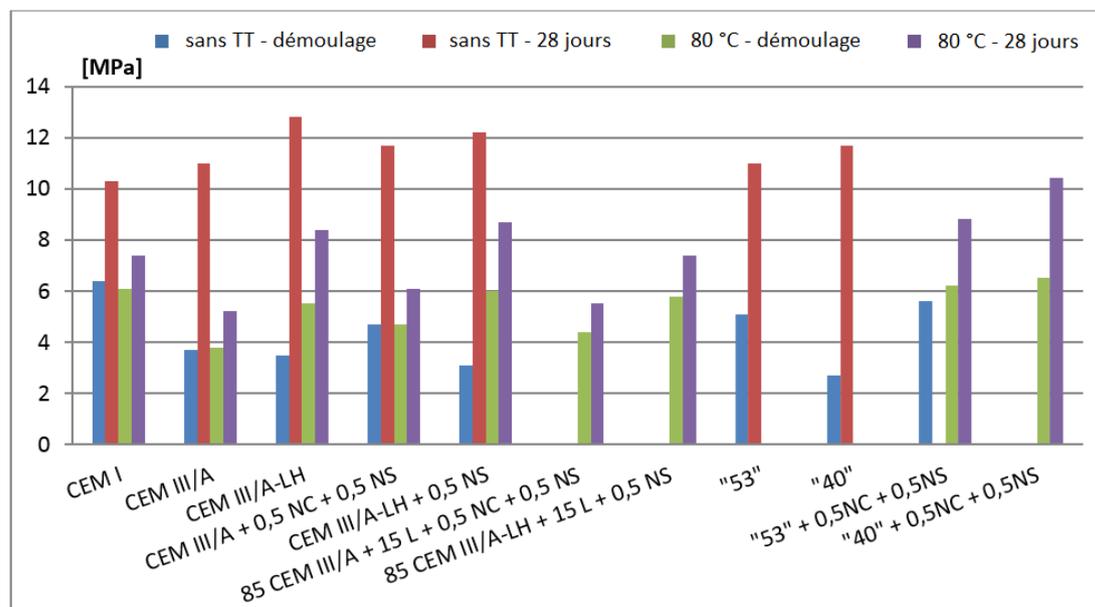


Figure 107 : Évolution des résistances en flexion des mortiers à base de CEM III, du liant « 40 » ou « 53 » activés et chauffés

Au démoulage à 24 heures, le liant « 53 » non activé permet l'obtention de résistance en flexion supérieure de 38 % par rapport au CEM III/A (figure 107).

Au bout de 28 jours, la flexion est équivalente entre les deux mortiers.

L'activation chimique par des chlorures et des sulfates des mortiers à base de CEM III (le ciment CEM III/A-LH est déjà activé par des chlorures) semble avoir un poids similaire à l'activation des mortiers à base de liants ternaires. Elle permet globalement d'améliorer de quelques MPa les résistances en flexion.

Ces résultats tendent à montrer que l'apport de température est le levier le plus puissant. En effet, en appliquant un traitement thermique dont la température de palier est de 80 °C [TTA/80-3 h 30], les résistances en compression dépassent systématiquement 40 MPa tandis que celles en flexion sont proches de 6 MPa au démoulage. Une telle température appliquée aux ciments CEM III (activés ou non) semble stopper le développement des résistances principalement en compression entre le démoulage et 28 jours. Ce phénomène est habituellement observé mais sans être aussi intense.

La durabilité de ces solutions doit donc être étudiée afin de comprendre pourquoi les résistances restent « figées ».

3.2. Impact de la composition sur les propriétés économiques et environnementales

Pour chaque liant étudié, l'évolution du coût est représentée en fonction des émissions de CO₂ associées mesurées par mètre cube de mortier (hypothèses dans le tableau 50). Le calcul a été réalisé en utilisant une valeur de masse volumique réelle moyenne issue des résultats, soit 2 300 kg/m³.

Le coût du traitement thermique, dépend de son mode d'alimentation. En France, on estime que l'industrie du béton utilise 60 % d'électricité, 27 % de gaz naturel et 13 % de fioul léger (source : Cerib).

Tableau 50 : Hypothèses prises pour le calcul du coût et de l'empreinte carbone des matières premières utilisées

	Hypothèses	
Matières premières	Coûts [€/T] (sans transport)	Empreinte CO ₂ [kgeqCO _{2eq} /T]
Ciment CEM I PLN	120 ¹⁾	766 ³⁾
Ciment CEM III/A	115 ¹⁾	400,7 ³⁾
Laitier de haut fourneau	90 ²⁾	20 ²⁾
Addition calcaire	30 ²⁾	75 ²⁾
Sable	20 ⁴⁾	2,8 ⁵⁾
Eau	3 ⁷⁾	0,3 ⁶⁾
Sulfate de sodium	105 ¹⁾	552 ⁸⁾
Chlorure de sodium	75 ¹⁾	200 ⁸⁾
Traitements thermiques ⁹⁾	Coûts [€/m ³ de mortier]	Empreinte CO ₂ [kgeqCO ₂ /m ³ de mortier]
TTA (113,0 kWh/m ³)	16,4	19,5
TTG (99,8 kWh/m ³)	14,4	17,2

¹⁾ Moyenne estimée à partir de plusieurs sources

³⁾ Donnée ATILH

⁵⁾ Granulats de roches meubles/massives UNPG 2010

⁷⁾ Donnée issue de l'Association pour le Contrat Mondial de l'Eau

⁹⁾ Tarif électricité EDF 2017 : 0,1449 € TTC/kWh ; hypothèse de consommation : 0,173 kgeqCO₂/kWh

²⁾ Données fournisseurs

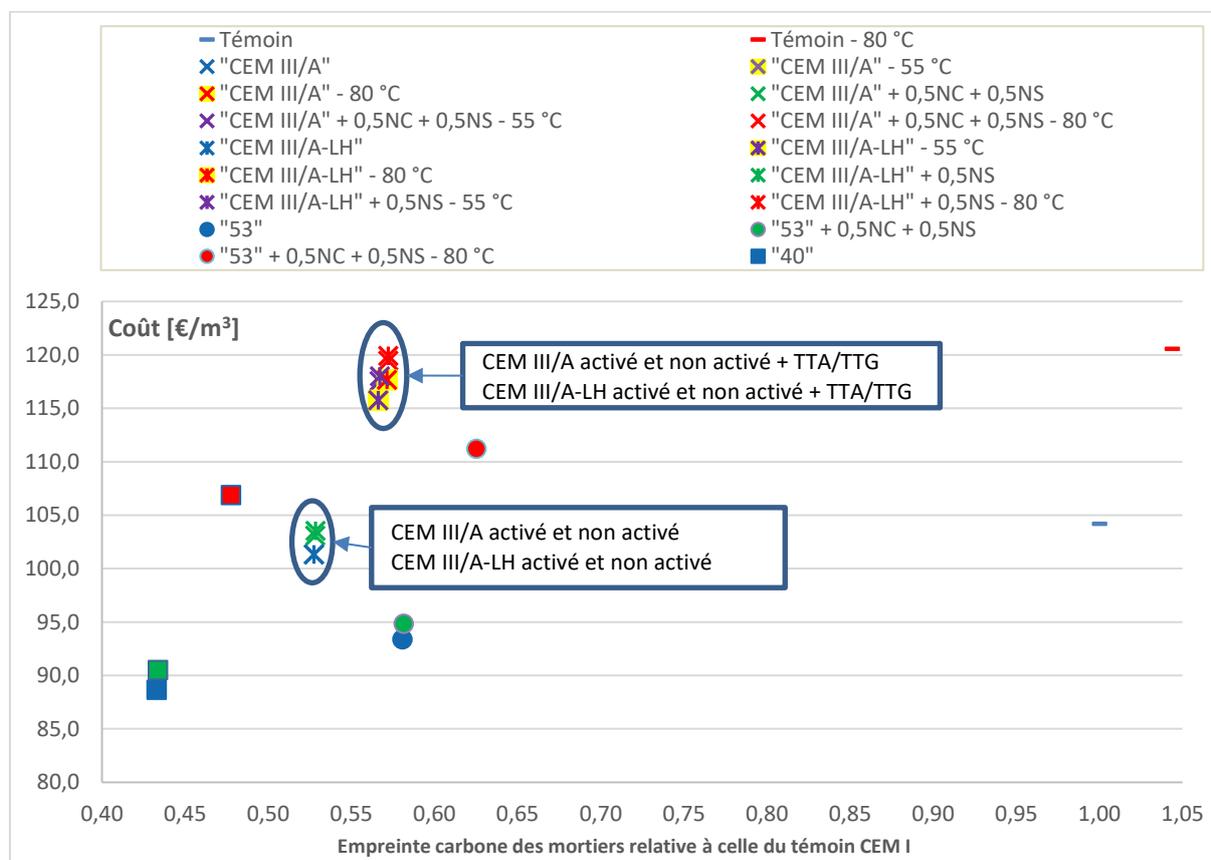
⁴⁾ Sable classique de bonne qualité

⁶⁾ Source : Logiciel ACV, base de données Ecoinvent

⁸⁾ Données Cerib

CHAPITRE VII : TRANPOSITION DES OPTIMISATIONS OBTENUES SUR LES MÉLANGES TERNAIRES AU CIMENT CEM III

L'utilisation de liants ternaires activés ou non permet de rester en dessous de 100 €/m³ de mortier fabriqué. L'augmentation de la quantité émise est directement liée à l'augmentation de la quantité de clinker entre le liant « 40 » et le liant « 53 » (figure 108).



Légende : « 53 » : 53 % clinker + 35 % laitier + 12 % calcaire ; « 40 » : 40 % clinker + 45 % laitier + 15 % calcaire ; « CEM III/A » : CEM III/A 42,5 N ; « CEM III/A-LH » : CEM III/A 42,5 N-LH ; « NN » : nitrate de sodium ; « NS » : sulfate de sodium.

Figure 108 : Représentation du coût de chaque mortier en fonction de leur empreinte carbone relative à celle du témoin CEM I

Une fois traités thermiquement, ces deux mortiers à base de liants ternaires activés voient leur coût de production augmenter d'environ 20 %, tout en restant en dessous du coût de production d'un mortier 100 % CEM I également traité thermiquement par le même cycle (TTA/80-3 h 30). En parallèle, l'application du traitement thermique n'a que très peu d'influence sur la quantité émise de CO₂ (+ 15 kgeqCO₂). Concernant l'utilisation de liants à base de ciment CEM III, les valeurs de coûts et d'émissions de CO₂ sont très proches pour les ciments CEM III/A et CEM III/A-LH. Les coûts générés sont également équivalents à ceux des mortiers à base de ciment CEM I, pour une économie importante de CO₂ (environ 200 kgeqCO₂).

Les figures 109 et 110 présentent respectivement les variations RC²c - RC²t au démoulage en fonction de la quantité de CO₂ émise pour la réalisation des mortiers (de la production des matières premières au procédé de fabrication). Les mortiers représentés sont à base de ciment CEM III/A, CEM III/A-LH ou à base de liants ternaires « 53 » et « 40 ». Les mortiers peuvent être activés et/ou traités thermiquement.

CHAPITRE VII : TRANSPOSITION DES OPTIMISATIONS OBTENUES SUR LES MÉLANGES TERNAIRES AU CIMENT CEM III

Les valeurs de RC^{2c} sont comprises entre 0,6 et 2,2 $MPa \cdot m^3 \cdot k\epsilon^{-1} \cdot kgeqCO_2^{-1}$, la majorité émettant moins de 60 % par rapport au témoin CEM I (figure 109).

La solution possédant le ratio RC^{2c} au démoulage le plus élevé est celle à base du liant « 40 » activé et traité thermiquement à 80 °C (« 40 + 0,5 NC + 0,5 NS – 80 °C »). Cette solution est également très peu émettrice de CO_2 (environ 48 % par rapport au témoin CEM I). Les solutions à base de ciment CEM III possèdent un RC^{2c} au démoulage compris entre 0,6 et 1,4 $MPa \cdot m^3 \cdot k\epsilon^{-1} \cdot kgeqCO_2^{-1}$ pour des quantités émises de CO_2 comprises entre 52 et 57 % par rapport au témoin.

Ces résultats démontrent que l'application d'un traitement thermique de 80 °C augmente systématiquement le RC^{2c} au démoulage des solutions à base de ciments CEM III et de liants ternaires, ce qui n'est pas le cas pour le mortier témoin à base de CEM I. La température de 55 °C, appliquée à base de CEM III, permet d'augmenter légèrement le RC^{2c} du mortier à base de CEM III/A-LH.

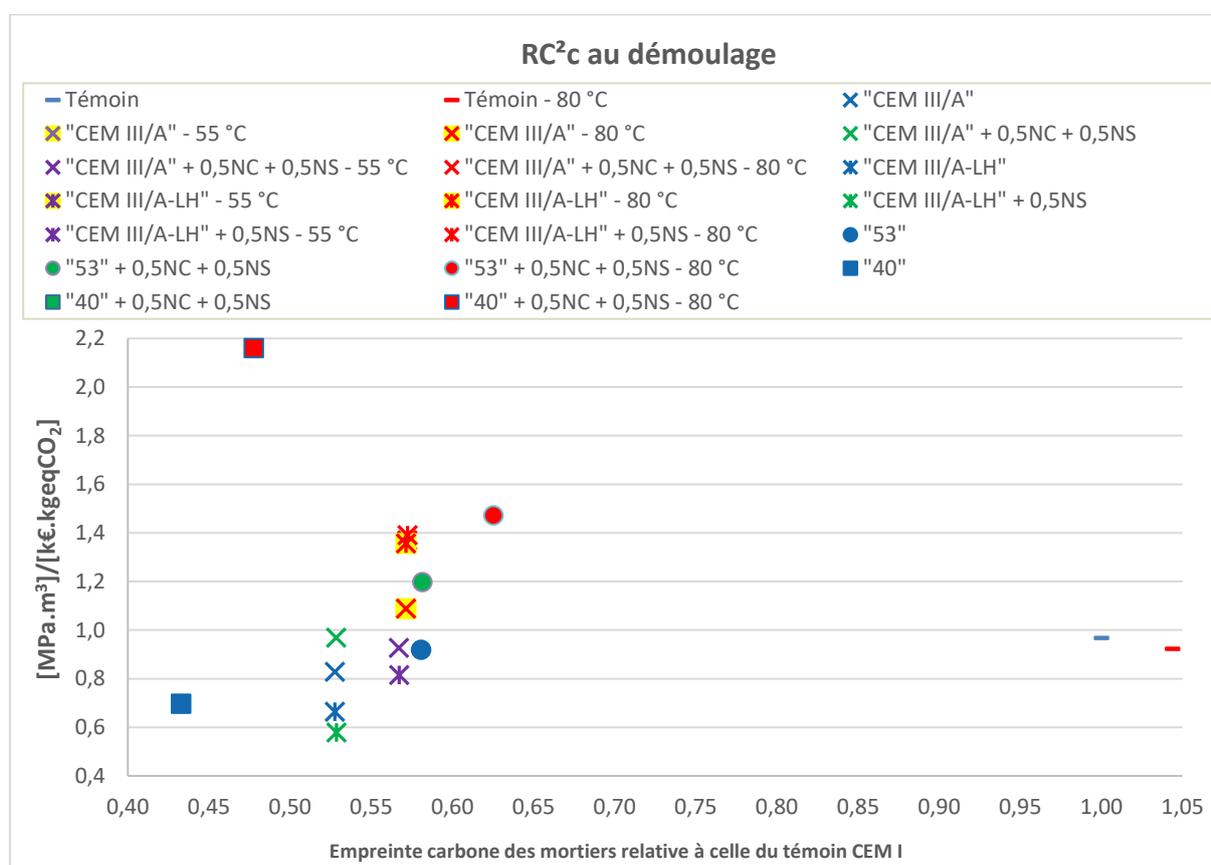


Figure 109 : Représentation du ratio RC^{2c} au démoulage des mortiers à base de CEM III et des mortiers à base de liant « 40 » et « 53 » en fonction de leur empreinte carbone relative à celle du témoin CEM I

Les valeurs de RC^{2t} sont comprises entre 0,11 et 0,29 $MPa \cdot m^3 \cdot k\epsilon^{-1} \cdot kgeqCO_2^{-1}$ (figure 110). Tout comme en compression, la solution possédant le ratio RC^{2t} au démoulage le plus élevé est celle à base du liant « 40 » activé et traité thermiquement à 80 °C (« 40 + 0,5 NC + 0,5 NS – 80 °C »). Les autres solutions à base du liant ternaire « 53 » et ciments CEM III voient leur RC^{2t} diminuer avec l'application d'un traitement thermique à 80 °C et 55 °C, tout comme le témoin CEM I.

**CHAPITRE VII : TRANSPOSITION DES OPTIMISATIONS OBTENUES
SUR LES MÉLANGES TERNAIRES AU CIMENT CEM III**

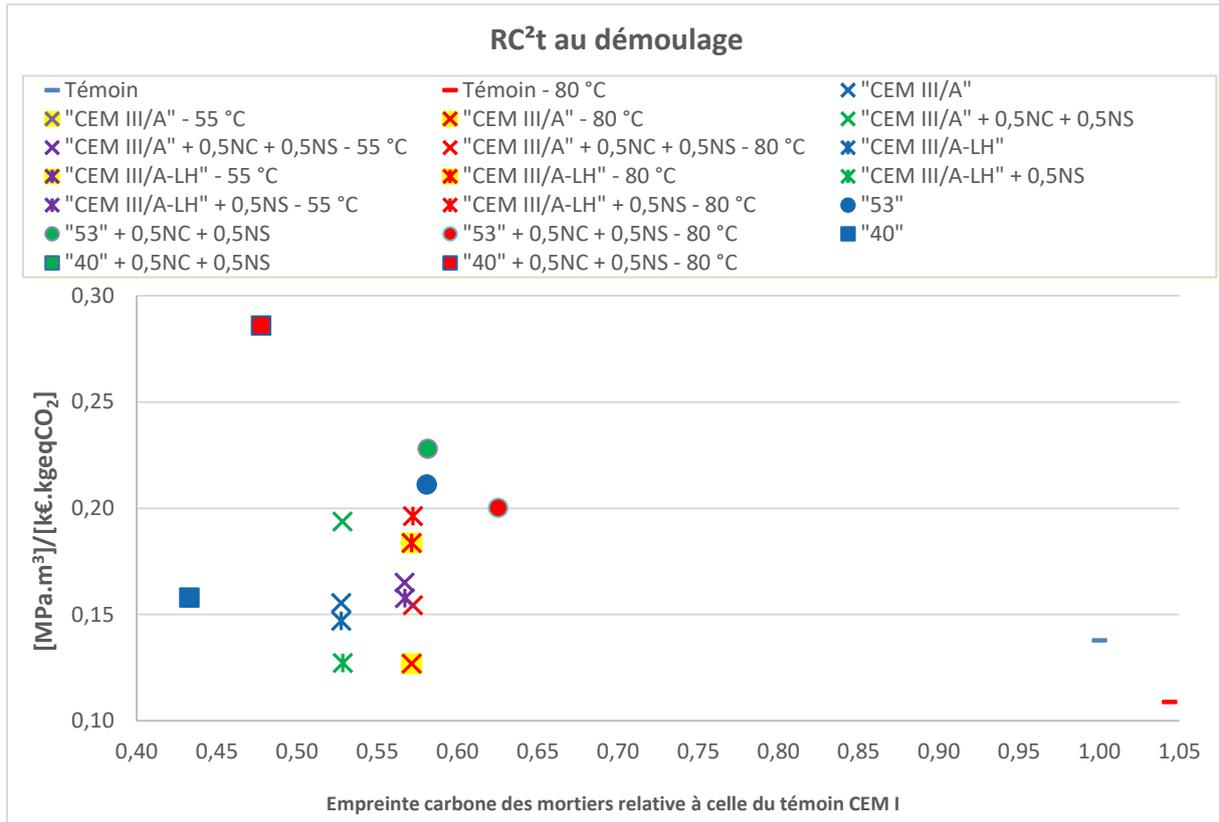


Figure 110 : Représentation du ratio RC^{2t} au démoulage des mortiers à base de CEM III et des mortiers à base de liant « 40 » et « 53 » en fonction de leur empreinte carbone relative à celle du témoin CEM I

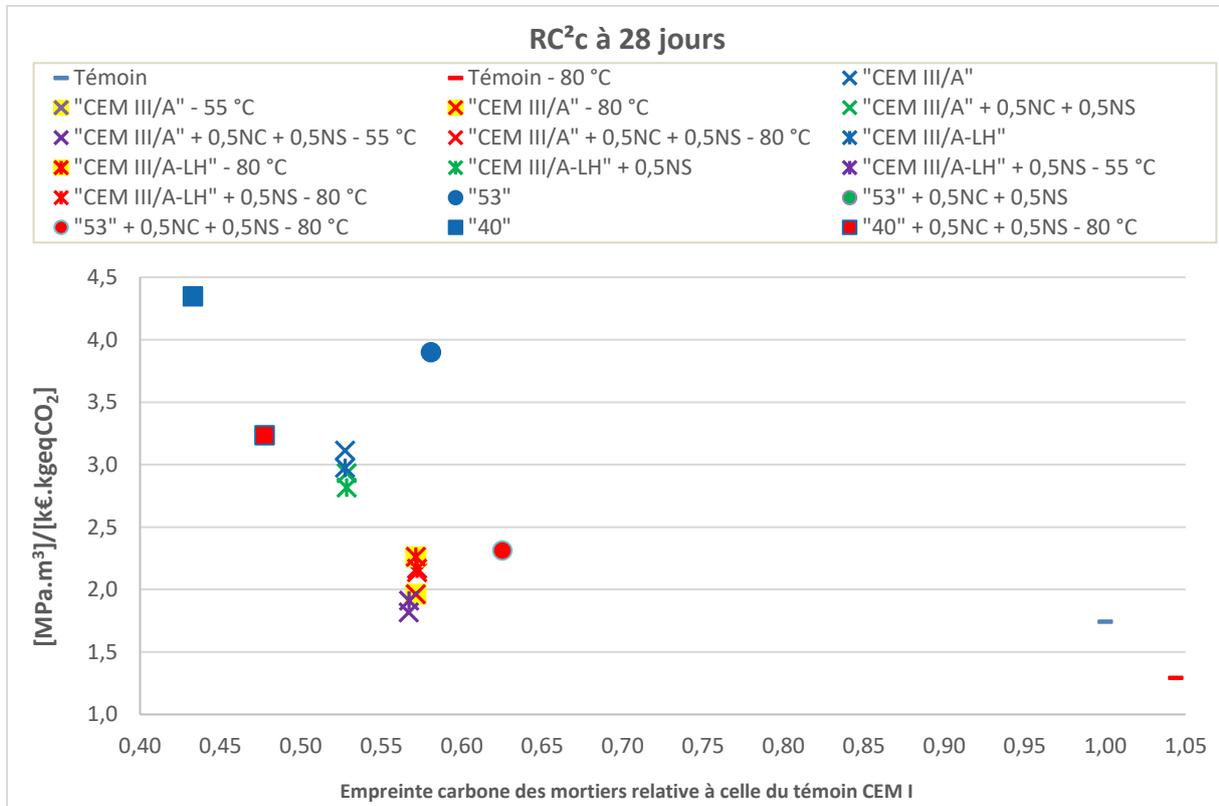


Figure 111 : Représentation du ratio RC^{2c} à 28 jours des mortiers à base de CEM III et des mortiers à base de liant « 40 » et « 53 » en fonction de leur empreinte carbone relative à celle du témoin CEM I

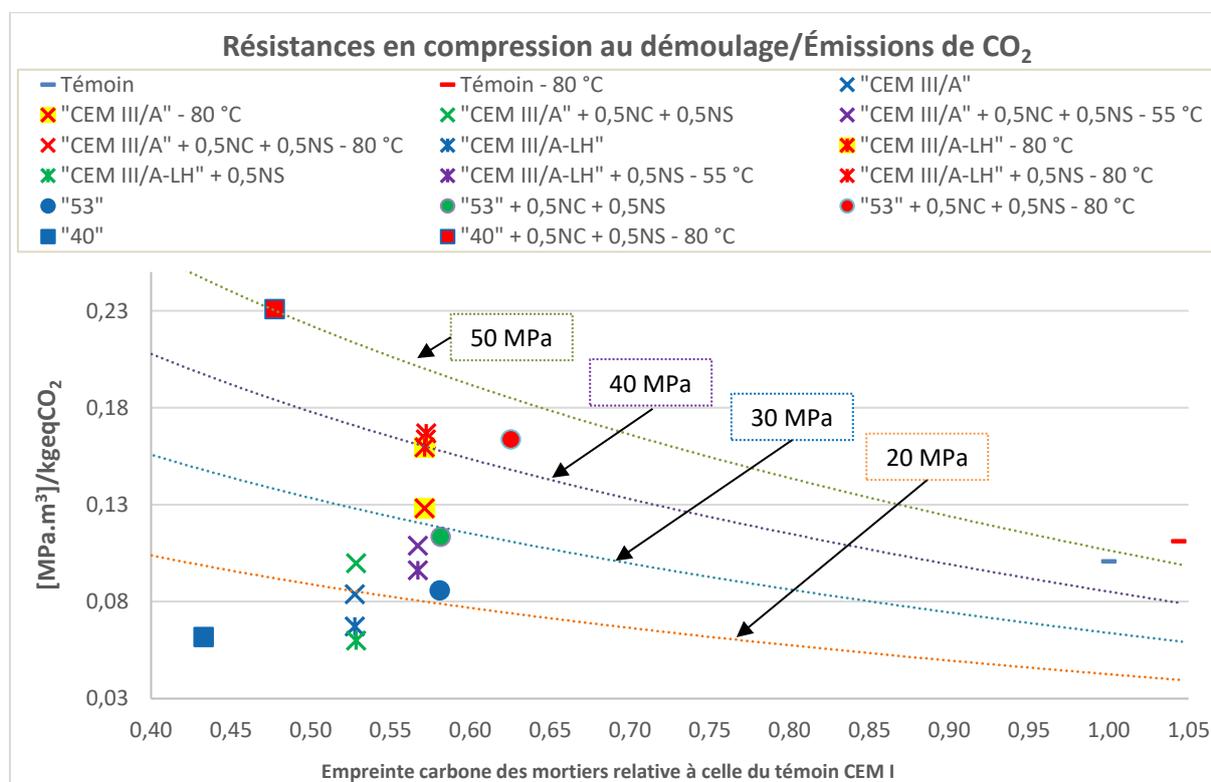
Les ratios RC^{2c} obtenus à 28 jours sont compris entre 1,3 et 4,35 $MPa \cdot m^3 \cdot k\epsilon^{-1} \cdot kgeqCO_2^{-1}$ (figure 111). Les résultats mettent en avant que les solutions non activées et non traitées thermiquement possèdent des valeurs plus élevées. Le ratio optimal est obtenu pour le mortier à base du liant « 40 » suivi du mortier à base du liant « 53 ».

À la vue de ces différents résultats au démoulage et à 28 jours, la solution qui permet d'émettre le moins de CO_2 pour sa production, tout en ayant des ratios RC^{2c} et RC^{2t} intéressants est la solution à base de liant « 40 » activé par du sulfate de sodium et du chlorure de sodium et traité thermiquement à 80 °C. Les solutions à base de ciment CEM III permettent également d'obtenir des ratios pertinents tout en émettant peu de CO_2 (inférieur à 65 % par rapport au témoin).

Les figures 112 et 113 représentent des ratios permettant d'évaluer l'intérêt d'émettre du CO_2 pour la production des mortiers vis-à-vis des performances mécaniques au démoulage.

Les valeurs en compression sont comprises entre 0,06 et 0,23 $MPa \cdot m^3 \cdot kgeqCO_2^{-1}$, la valeur la plus élevée correspondant au mortier « 40 + 0,5 NC + 0,5 NS – 80 °C » et possédant une résistance mécanique de 50 MPa au démoulage (figure 112).

Les solutions à base de ciment CEM III possèdent des ratios avoisinant 0,17 $MPa \cdot m^3 \cdot kgeqCO_2^{-1}$ dès lors qu'un traitement thermique de 80 °C est appliqué. Les résistances mécaniques associées sont d'environ 40 MPa au démoulage. Sans traitement thermique, la quantité de CO_2 émise par ces mêmes mortiers est légèrement plus faible (diminution de 20 $kgeqCO_2$) et le ratio diminue fortement (obtention de résistance autour de 20 MPa).

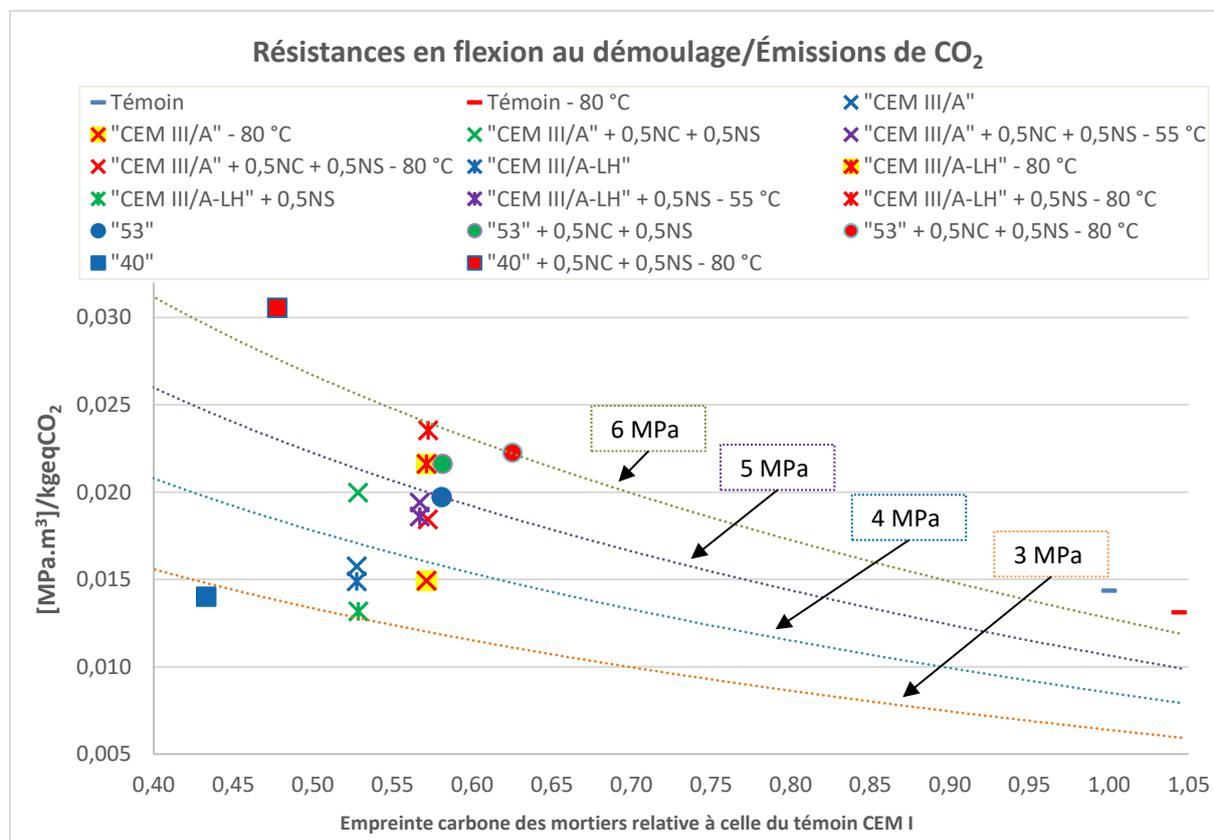


Légende : « 53 » : 53 % clinker + 35 % laitier + 12 % calcaire ; « 40 » : 40 % clinker + 45 % laitier + 15 % calcaire ; « CEM III/A » : CEM III/A 42,5 N ; « CEM III/A-LH » : CEM III/A 42,5 N-LH ; « NN » : nitrate de sodium ; « NS » : sulfate de sodium.

Figure 112 : Représentation de l'intérêt d'émettre du CO_2 vis-à-vis de la résistance en compression au démoulage

CHAPITRE VII : TRANSPOSITION DES OPTIMISATIONS OBTENUES SUR LES MÉLANGES TERNAIRES AU CIMENT CEM III

Les valeurs en flexion sont comprises entre 0,013 et 0,031 MPa.m³.kgeqCO₂⁻¹. La valeur la plus élevée correspond, comme en compression, au mortier « 40 + 0,5 NC + 0,5 NS – 80 °C » et possédant une résistance mécanique de supérieure à 6 MPa au démoulage (figure 113). Cette valeur de résistance est similaire à celle du témoin CEM I chauffé et non chauffé. Le couplage « activation chimique + température » permet de doubler le ratio par rapport au mortier « 40 ».



Légende : « 53 » : 53 % clinker + 35 % laitier + 12 % calcaire ; « 40 » : 40 % clinker + 45 % laitier + 15 % calcaire ; « CEM III/A » : CEM III/A 42,5 N ; « CEM III/A-LH » : CEM III/A 42,5 N-LH ; « NN » : nitrate de sodium ; « NS » : sulfate de sodium.

Figure 113 : Représentation de l'intérêt d'émettre du CO₂ vis-à-vis de la résistance en flexion au démoulage

Les solutions à base de ciment CEM III possèdent des ratios compris entre 0,013 et 0,023 MPa.m³.kgeqCO₂⁻¹. L'application d'une température de 80 °C permet aux mortiers à base de CEM III/A-LH d'atteindre un ratio supérieur à 0,021 MPa.m³.kgeqCO₂⁻¹ pour une résistance supérieure à 5 MPa. Le ciment CEM III/A génère des ratios inférieurs et des résistances en flexion comprises entre 4 et 5 MPa pour une empreinte carbone équivalente aux mortiers CEM III/A-LH.

4. Conclusion partielle

L'utilisation de ciment CEM III permet de répondre en partie à l'objectif technique du cahier des charges. Dès lors que le ciment CEM III/A 42,5-LH subi un traitement thermique de 80 °C pendant 3 h 30, la résistance en compression au démoulage (au bout de 6 h 30) avoisine 40 MPa (objectif du béton précontraint). Dans les mêmes conditions expérimentales, le ciment CEM III/A 42,5 permet l'obtention d'une résistance en compression supérieure à 30 MPa (4 MPa en flexion), soit 10 MPa de plus que la résistance nécessaire pour une application en béton armé.

Cette résistance nécessaire peut être obtenue en optimisant les paramètres du traitement thermique (température, durée), tout en s'assurant que la résistance en flexion reste suffisante. L'utilisation des ciments CEM III en présence d'un traitement thermique de température élevée ne semble pas permettre une évolution importante des résistances entre le démoulage et 28 jours. Une étude de durabilité devrait donc être réalisée pour confirmer l'intérêt technique de ces solutions (ciment + conditions expérimentales).

En parallèle, l'utilisation de ciment CEM III est pertinente d'un point de vue logistique. Malgré le coût très proche de celui d'un ciment CEM I, le CEM III permet de répondre à un cahier des charges qui prend en compte le volet environnemental.

CHAPITRE VIII : Passage au béton à l'échelle pré-industrielle

1. Essais en usine

Une des solutions développées à l'échelle du laboratoire a été testée en usine pour une formulation de béton destinée à la production de chambres de télécommunication. Ce type de produit en béton armé subit un traitement thermique appliqué dans un carrousel de température constante.

1.1. Conditions d'essais

La température a été mesurée dans le carrousel au niveau du béton (haut et bas de moule) et à proximité du béton dans l'air ambiant (haut et bas de moule). En fonction des conditions d'usine, ce traitement thermique a une durée totale comprise entre 5 heures et 7 heures. On remarque que la température du béton augmente progressivement pour finir à plus de 40 °C voire 50 °C après respectivement 5 et 7 heures (tableau 51).

Tableau 51 : Description des traitements thermiques

Traitement thermique	Description	Durée totale	Aire $\int_0^t A (T)$ [°C.minutes]	Conso. En. [KWh/m ³]	Émissions CO ₂ [kgeqCO ₂ /m ³]
1	20 °C à 40 °C en 5 h	5 h	9 750	62,4	10,8
2	20 °C à 45 °C en 6 h	8 h 05	12 240	66,1	11,4
3	20 °C à 50 °C en 7 h	9 h 40	14 910	69,8	12,1

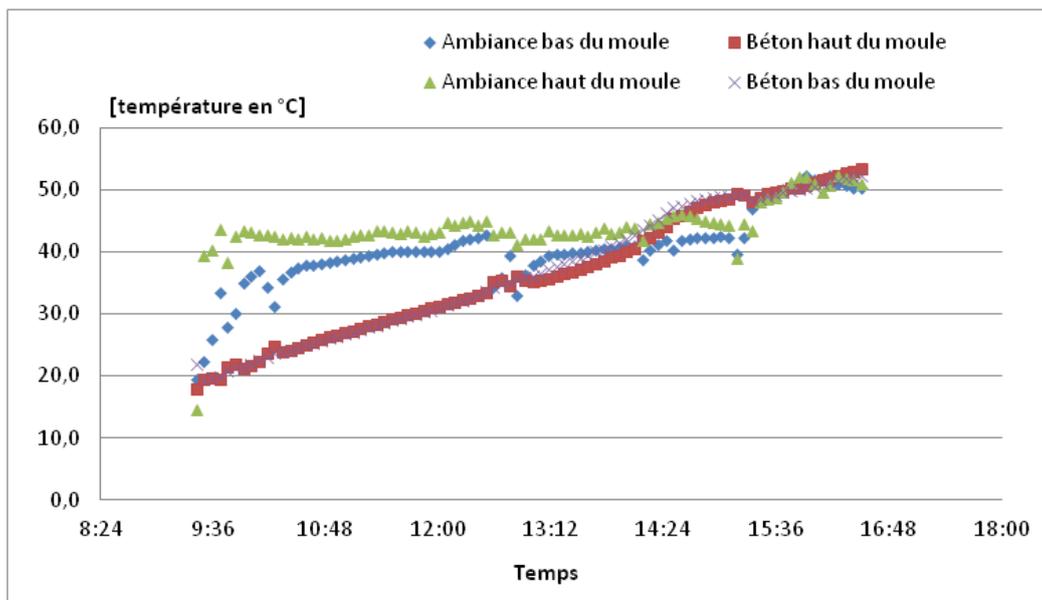


Figure 114 : Traitement thermique industriel (source : Industriel)

1.2. Essais préliminaires

Des essais préliminaires à l'essai industriel ont été réalisés sur mortier afin d'évaluer l'influence de ce traitement thermique sur les solutions développées à base des liants « 53.0,5 » et « 40.0,5 » utilisant cependant le CEM I de Couvrot à la place de celui de Port-la-Nouvelle (tableau 52). Le traitement thermique industriel a été reproduit dans une enceinte programmable afin d'avoir une augmentation de température des mortiers comparables à celle mesurée en usine sur les bétons (figure 115). Lors des essais, les résistances mécaniques ont été mesurées pour deux durées de traitement thermique (5 h et 7 h) sur des éprouvettes cubiques de dimensions 10 x 10 x 10 cm³. Les mesures de résistance en flexion et compression ont été réalisées sur éprouvettes directement après leur sortie d'étuve (perte de température de 2 °C au cœur du béton entre la sortie et l'essai).

Tableau 52 : Composition et résultats des mortiers réalisés pour l'essai pré-industriel

		Témoïn	« 53.0,5 »	« 40.0,5 »
Proportions massiques [g]				
Ciment CEM I 52,5 R Couvrot		2 205,0	1 730,0	1 305,5
Laitier de haut fourneau		0	1 102,0	1 417,5
Addition calcaire		945,0	318,0	427,0
Na ₂ SO ₄		0	12,5	16,1
NaCl		0	5,2	6,6
Sable 0/2 mm		9 450,0	9 450,0	9 450,0
Eau (E _{eff} /L = 0,4)		1 260,0	1 260,0	1 260,0
Adjuvant (0,25 %/L)		7,8	7,8	7,8
Caractéristiques à l'état frais				
Étalement [mm]		160,0	155,0	175,0
ρ [kg/m ³]		2 305,0	2 295,0	2 290,0
Ressuage [visuel]		Non	Non	Non
Caractéristiques à l'état durci				
Compression [MPa]	t ₀ + 5 h	14,2	9,7	10,2
	t ₀ + 7 h	21,3	21,3	19,8

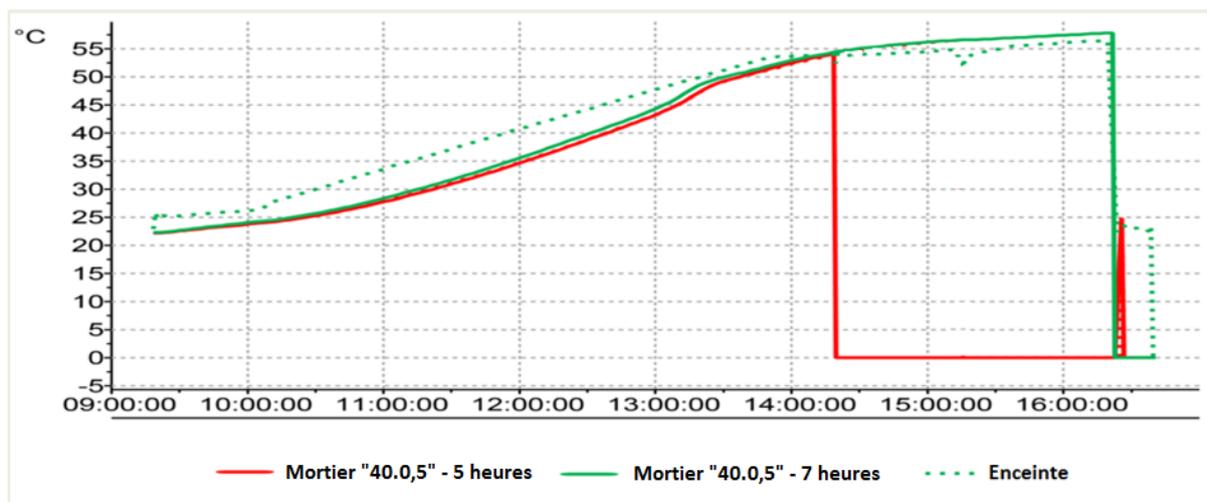


Figure 115 : Relevé de température des mortiers testés après simulation traitement thermique en carrousel

La résistance en compression des éprouvettes croît avec la durée du palier. Les mortiers « témoin » et « 40.0,5 » (liant 40 + 0,5 NS + 0,5 NC) voient leur résistance augmenter de respectivement 50 % et 94 % entre 5 et 7 heures tandis que le mortier « 53.0,5 » (liant 53 + 0,5 NS + 0,5 NC) voit sa résistance multipliée par 2,2 entre 5 et 7 heures. Un apport de chaleur pendant 7 heures permet au mortier « 53.0,5 » d'atteindre l'équivalence par rapport au témoin et au mortier « 40.0,5 » de s'en rapprocher très fortement.

À la vue des résultats préliminaires, il a été décidé de tester en usine le liant « 40 » activé par du sulfate de sodium et du chlorure de sodium. Ses performances techniques au démoulage sont légèrement inférieures au liant « 53 » activé dans les mêmes conditions mais il est économiquement plus intéressant.

1.3. Essais en usine

Le travail en usine a consisté à produire des cubes de dimensions 15 x 15 x 15 cm³ à partir de la formulation de béton destinée à la production de chambre télécom. Des produits en béton n'ont toutefois pas été réalisés. Deux bétons ont été produits : un béton de référence et un béton dans lequel le liant a été substitué par le liant « 40 » activé par du sulfate de sodium et du chlorure de sodium. Le liant de la formulation industrielle témoin était constitué de ciment CEM I 52,5 R de Couvrot et de filler calcaire pour un total d'environ 550 kg/m³. Le squelette granulaire, qui représente environ 1 700 kg/m³, est composé de deux coupures. La formulation comporte un superplastifiant ainsi qu'un accélérateur de prise, pour un rapport E_{eff}/L de 0,42 (des informations plus complètes concernant ces matières premières ne sont pas communiquées volontairement pour des raisons de confidentialité). La formule de béton à base du liant ternaire activé chimiquement possédait le même squelette granulaire et la même quantité de liant total (tableau 53). Le superplastifiant est conservé tandis que l'accélérateur de prise est supprimé. Ce dernier est remplacé par le couple d'activateurs chimiques (chlorure de sodium et sulfate de sodium) définis dans ce travail de thèse. Néanmoins, la présence de chlorure est potentiellement néfaste vis-à-vis de la corrosion des armatures. Il a donc été décidé de diminuer son taux d'incorporation. Le travail en laboratoire ayant été réalisé avec des pourcentages égaux de chlorure de sodium et de sulfate de sodium, la quantité de sulfate de sodium a également été diminuée. Ainsi, les quantités de sulfate de sodium et de chlorure de sodium introduites en usine ont été de 0,37 % de Na₂O par rapport à la quantité de laitier de haut fourneau, soit 0,06 % de chlorure par rapport au ciment (tableau 53). Ces teneurs sont largement en dessous des prescriptions de la norme 206/CN (0,4 % de chlorure par rapport au ciment pour les bétons armés et 0,2 % pour les bétons précontraints ; 0,65 % en présence de CEM III).

Le béton a été coulé dans des éprouvettes cubiques en plastique de dimension 15 x 15 x 15 cm³ qui ont ensuite été placées dans le carrousel sur un moule vide afin de subir le traitement thermique. Les moules sont sortis du carrousel au bout de 4 h 30. La température interne au béton reste supérieure à 40 °C pendant 2 heures après la sortie du carrousel. Une première série d'éprouvettes a été testée en compression 30 minutes après démoulage donc après 5 heures. Les autres cubes de bétons ont été emballés dans du film plastique et testés au bout de $t_0 + 7$ heures (température interne au béton de 40 °C), $t_0 + 24$ heures et $t_0 + 28$ jours. Entre 24 heures et 28 jours, les éprouvettes sont placées dans deux conditions différentes de stockage (stockage à 95 % HR ; 20 °C ou stockage à l'extérieur – températures estivales) (tableau 53).

Tableau 53 : Composition et résultats des essais en usine réalisés sur béton utilisé pour la réalisation de chambre de télécommunication

	Témoin	« 40 + 0,37 NS + 0,37 NC »
Proportions massiques [kg]		
Ciment CEM I 52,5 R Couvrot	X*	22,0
Laitier de haut fourneau	0	24,8
Addition calcaire	55,0 – X*	8,2
Superplastifiant	0,3	0,3
Accélérateur de prise	0,4	0
Na ₂ SO ₄ (« NS »)	0	0,205
NaCl (« NC »)	0	0,085
Squelette granulaire	170,0	170,0
Eau (E _{eff} /L = 0,42)	126,0	126,0
Caractéristiques à l'état frais		
Étalement [mm]	> 600 (BAP)	> 600 (BAP)
ρ [kg/m ³]	2 350,0	2 380,0
Compacité [%]	55,4	56,1
Air occlus [%]	0,8	0,5
Ressuage [visuel]	Faible	Faible
Résistance en compression sur cubes 15 × 15 × 15 cm³ [MPa]		
5 heures	12	9,9
7 heures	13,9	16,5
24 heures	34,1	35,7
28 jours (stockage à 95 % HR ; 20 °C)	56,3	57,5
28 jours (stockage à l'extérieur)	49,2	56,6

* Informations confidentielles de l'industriel préfabriquant ; « NS » : sulfate de sodium ; « NC » : chlorure de sodium.

À l'état frais, le béton « 40 » activé a une meilleure compacité que le béton témoin (air occlus inférieur associé à une masse volumique plus importante).

Au bout de 5 heures, les deux bétons n'atteignent pas la résistance souhaitée de 15 MPa. À partir de 7 heures, le béton « 40 » activé respecte le cahier des charges contrairement au béton témoin. La non-conformité de ce dernier reste difficile à expliquer et provient certainement des conditions expérimentales.

La solution liant/activateur/température a montré précédemment qu'elle permettait l'obtention de résistances en flexion intéressantes pouvant potentiellement permettre de démouler plus rapidement. La résistance en flexion n'a pas été mesurée sur béton mais on peut supposer que cette dernière serait également bonne en considérant la tendance sur mortier. Si ces résultats sont retrouvés sur béton, l'utilisation de la formule de calcul issue de la norme [NF EN 1992-1-1] (formule issue du paragraphe 3.1.2, tableau 3.1) pourrait permettre de mettre en avant cette propriété par rapport à la résistance en compression pour les bétons armés.

2. Évaluation environnementale, économique et normative

Trois procédés de fabrication de produits en béton ont été évalués vis-à-vis des critères techniques, économiques et environnementaux représentatifs de la préfabrication et mettant en œuvre :

- un béton armé non traité thermiquement ;
- un béton armé traité thermiquement ;
- un béton précontraint traité thermiquement.

La plupart des bétons actuellement utilisés en préfabrication contiennent essentiellement du ciment Portland CEM I. Chaque système est donc composé d'un béton de référence et d'un béton à base du liant « 40 » activé par du sulfate de sodium et du chlorure de sodium. En fonction de l'application (béton armé ou précontraint), le traitement thermique change (tableau 54). Il s'agit toutefois d'une première approche sur béton qui prend uniquement en compte les composantes relatives aux matériaux (matières premières constitutives du béton) et au traitement thermique.

Tableau 54 : Systèmes étudiés pour l'analyse environnementale

	S1 - Béton armé non traité thermiquement		S2 - Béton armé traité thermiquement		S3 - Béton précontraint traité thermiquement	
	Témoïn	« 40.0,5 »	Témoïn	« 40.0,5 »	Témoïn	« 40.0,5 »
Proportions massiques [kg]						
Ciment CEM I	400,0	160,0	400,0	160,0	400,0	160,0
Laitier de HF	0	180,0	0	180,0	0	180,0
Ad. calcaire	0	60,0	0	60,0	0	60,0
Superplastifiant	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Accélérateur de prise	2,9	0	2,9	0	2,9	0
Na ₂ SO ₄	0	2,05	0	2,05	0	2,05
NaCl	0	0,85	0	0,85	0	0,85
Squelette granulaire	1 700,0	1 700,0	1 700,0	1 700,0	1 700,0	1 700,0
(E _{eff} /L = 0,40)	160,0	160,0	160,0	160,0	160,0	160,0
Traitements thermiques appliqués						
Détail des cycles de température						
<i>Prétraitement</i>			/	40 °C ; 2 h	30 °C ; 1 h ;	
<i>Montée en T</i>	/		/	40 °C à 64 °C ; 1 h	30 °C à 60 °C ; 1 h 30	
<i>Palier</i>			45 °C ; 5 h	64 °C ; 3 h	60 °C ; 5 h 30	
Conso. Énerg. [kWh/m³]*	0		81,4	98,9	103,3	
Ém. de CO₂ [kgeqCO₂/m³]	0		14,1	17,1	17,9	

« 40.0,5 » : liant 40 (40 % clinker + 45 % laitier + 15 % calcaire) activé par 0,5 % de sulfate de sodium et 0,5 % de chlorure de sodium ; « Conso. Énerg. » : consommation énergétique calculée en à partir des hypothèses pour la réalisation d'ACV ; « Ém. CO₂ » : Émissions de CO₂ par mètre cube ; « T. » : Température.

2.1. Analyse du cycle de vie des systèmes étudiés

2.1.1. Méthode et hypothèses

La méthode utilisée pour chiffrer les impacts environnementaux des produits est basée sur l'Analyse du Cycle de Vie (NF EN ISO 14044) et en suivant les exigences de la norme NF EN 15804/CN portant sur les déclarations environnementales pour les produits de construction. Les indicateurs environnementaux calculés sont ceux décrits dans cette norme. Les indicateurs d'impacts retenus ici concernent la consommation de ressources, la pollution de l'air et la pollution de l'eau. Conformément aux recommandations normatives et à la pratique d'ACV dans la filière cimentière, et étant donné la faible contribution de la commercialisation du laitier aux résultats économiques de la filière acier, seul l'impact des traitements du laitier (broyage, transport additionnel) est pris en compte dans l'impact du laitier de haut fourneau. En particulier aucun impact de la production de fonte n'est imputé au laitier. D'autres choix méthodologiques d'affectation des impacts sont envisageables comme imputer l'impact d'un procédé entre co-produits comme par exemple, à travers des affectations physiques sur une base énergétique (5 %) ou massique (19 %). Le calcul est également basé sur une hypothèse moyennée pour le transport.

L'énergie liée au traitement thermique est estimée à 0,18 MJ/kg. Cette valeur est une moyenne correspondant à des bétons majoritairement constitués de ciment CEM I. Pour être représentatif des pratiques nationales, on considère que 60 % de cette énergie est d'origine électrique et que 40 % est d'origine thermique (dont 1/3 à partir de fioul léger et 2/3 à partir de gaz naturel). Les bases de données prises en compte pour le calcul des indicateurs environnementaux sont présentées dans le tableau 55.

Tableau 55 : Source des différentes données prises en compte pour le calcul des indicateurs environnementaux

Matière/Process	Source
Ciment	ATILH 2016
Granulats courants	UNPG 2010 actualisé format NF EN 15804/CN
Laitier de haut fourneau	EPD ECOCEM 2016
Fillers calcaire	IMA 2006 actualisé format NF EN 15804/CN
Adjuvants	EFCA 2015
Sulfate de sodium	Ecoinvent v3.2
Chlorure de sodium	Ecoinvent v3.2
Électricité	Ecoinvent v3.2
Combustion fioul	Ecoinvent v3.2
Combustion gaz naturel	Ecoinvent v3.2

2.1.2. Résultats

Les résultats du calcul des indicateurs environnementaux obtenus avec le logiciel SimaPro 8.0.1 concernent les indicateurs d'impacts environnementaux (tableau 56), les principaux étant également présentés sur la figure 116. Les valeurs sont données pour 1 m³ de mortier.

Tableau 56 : Impacts environnementaux des systèmes étudiés

	S1 - Béton armé non traité thermiquement		S2 - Béton armé traité thermiquement		S3 - Béton précontraint traité thermiquement	
	Témoin	« 40,0,5 »	Témoin	« 40,0,5 »	Témoin	« 40,0,5 »
Changement climatique [kgeqCO ₂]	319	140	334	154	342	158
Énergie primaire totale [MJ]	2,08.10 ³	1,10.10 ³	2,74.10 ³	1,77.10 ³	2,84.10 ³	1,95.10 ³
Appauvrissement couche d'ozone [kgeqCFC ⁻¹¹]	8,83.10 ⁻⁶	4,36.10 ⁻⁶	1,49.10 ⁻⁵	1,04.10 ⁻⁵	1,64.10 ⁻⁵	1,20.10 ⁻⁵
Acidification des sols et de l'eau [kgeqSO ₂]	0,682	0,332	0,723	0,373	0,744	0,387
Eutrophisation [kgeqPO ₄ ³⁻]	0,0996	0,0556	0,103	0,0587	0,106	0,0602
Formation d'ozone photochimique [kgeqC ₂ H ₄]	0,0294	0,0150	0,0316	0,0172	0,0319	0,0178
Épuisement ressources : éléments [kgeqSb]	2,83.10 ⁻⁵	1,15.10 ⁻⁴	3,19.10 ⁻⁵	1,18.10 ⁻⁴	3,21.10 ⁻⁵	1,19.10 ⁻⁴
Épuisement ressources : combustibles fossiles [MJ]	883,0	514,0	111,0	744,0	1 120,0	807,0
Pollution de l'eau [m ³]	2,4	37,3	26,8	40,0	28,0	40,8
Pollution de l'air [m ³]	1,13.10 ⁴	1,16.10 ⁴	1,18.10 ⁴	1,21.10 ⁴	1,22.10 ⁴	1,22.10 ⁴

Les six ensembles étudiés permettent de mettre en avant l'impact du traitement thermique seul, de l'activation chimique seule et de l'association des deux, pour trois grandes familles (béton armé non traité thermiquement, béton armé traité thermiquement et béton précontraint traité thermiquement).

De par la faible quantité de clinker dans les mortiers à base du liant « 40 », ces derniers sont moins impactants vis-à-vis du changement climatique, de l'énergie primaire totale, de l'eutrophisation, de la formation d'ozone photochimique et de l'épuisement des combustibles fossiles.

Concernant la pollution de l'air, les impacts sont similaires, tandis que la présence de sulfate de sodium (552 kgeqCO₂/tonne) et de laitier entraînent une pollution plus importante de l'air et un épuisement des éléments supérieur aux témoins (figure 116).

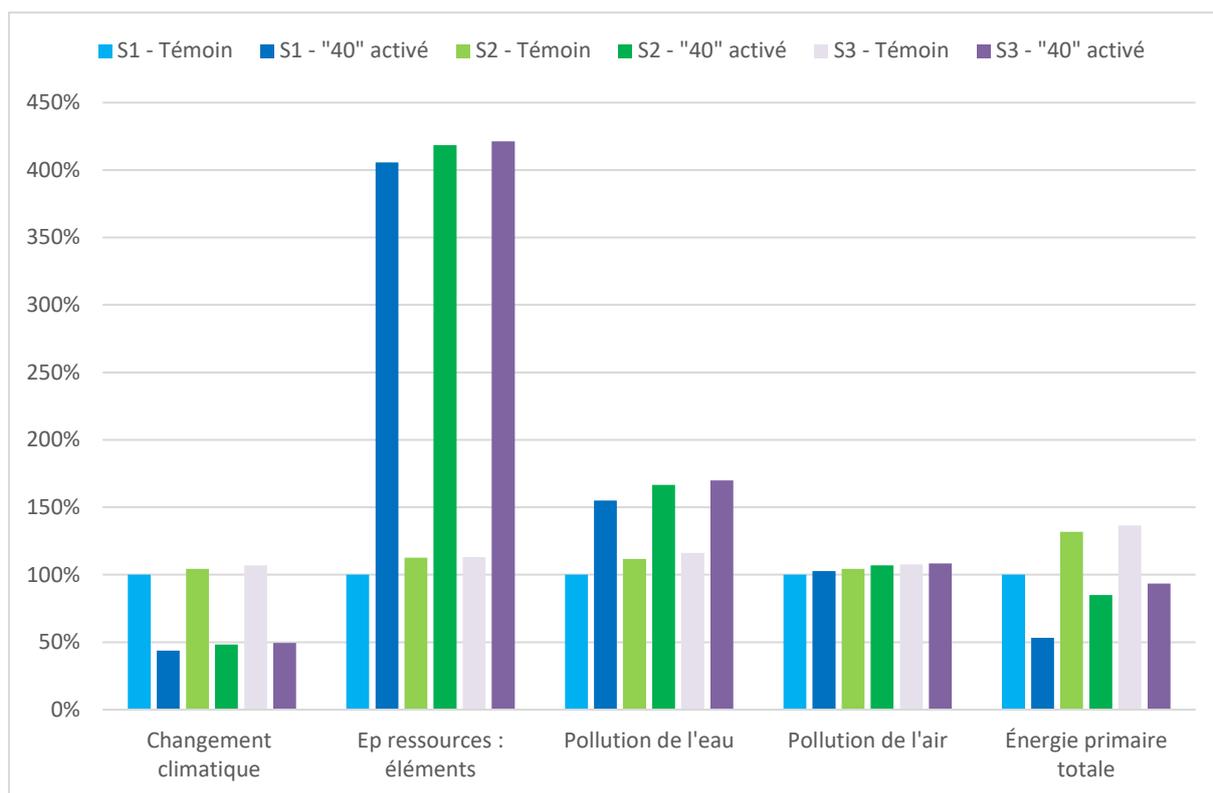


Figure 116 : Présentation des principaux impacts environnementaux relatifs au « S1 – Témoin »

En affectant une allocation économique au laitier, ces tendances observées évolueront fortement (voir les travaux de [Jacquemot, 2014] concernant l'activation de bétons à base de laitier).

2.2. Évaluation économique des systèmes étudiés

Les trois procédés de fabrication de produits en béton étudiés ont été évalués économiquement. Cette première évaluation ne prend pas en compte le squelette granulaire ni la quantité d'eau. Le coût des adjuvants étant dépendant de plusieurs paramètres (conditionnement, volume annuel acheté...), il s'agit donc d'une première approximation (tableau 57).

Tableau 57 : Hypothèses prises dans le cadre de l'analyse économique des systèmes étudiés

	Hypothèses des coûts
Ciment CEM I PLN	120 €/T ¹⁾
Laitier de haut fourneau	90 €/T ¹⁾
Addition calcaire	30 €/T ¹⁾
Granulats	20 €/T ¹⁾
Eau	3 €/T ²⁾
Sulfate de sodium	105 €/T ¹⁾
Chlorure de sodium	75 €/T ¹⁾
Superplastifiant	1,8 €/L ¹⁾ (densité de 1,05 g/cm ³)
Accélérateur de prise	1,4 €/L ¹⁾ (densité de 1,45 g/cm ³)
Traitement thermique	Fonction de la consommation ³⁾

¹⁾ Moyenne estimée à partir de plusieurs sources

²⁾ Donnée issue de l'Association pour le Contrat Mondial de l'Eau

³⁾ Tarif électricité EDF 2017 : 0,1449 € TTC/KWh ; hypothèse de consommation 0,173 kgeqCO₂/1 KWh

Chaque traitement thermique étant particulier, ils possèdent tous une consommation énergétique spécifique (tableau 58) (source « Ecoinvent v3.2 »).

En prenant en compte toutes ces hypothèses (tableaux 54 et 57), les systèmes étudiés sont estimés entre 80 €/m³ et 103 €/m³.

Tableau 58 : Estimation du coût des différents systèmes étudiés

€/m ³	S1 – Témoïn	S1 – « 40.0,5 »	S2 – Témoïn	S2 – « 40.0,5 »	S3 – Témoïn	S3 – « 40.0,5 »
Coût Matériau	88,5	75,2	88,5	75,2	88,5	75,2
Coût process	0	0	11,8	11,8	14,3	15,0
Coût total	88,5	75,2	100,3	87,0	102,9	90,2

Les systèmes étudiés à base du liant « 40 » semblent systématiquement coûter moins cher que les systèmes témoins à base de CEM I.

2.3. Contexte normatif associé aux solutions développées

D'après les différents résultats présentés dans ce manuscrit, certaines solutions développées semblent pouvoir techniquement, sous réserve d'une validation vis-à-vis de la durabilité, être utilisées dans des produits en béton armé et précontraint.

Plusieurs référentiels normatifs existent aujourd'hui :

- les produits en béton possèdent une norme autoportante (exemple des produits d'assainissement) ;
- les produits répondent à la norme NF EN 206/CN « Béton — Spécification, performance, production et conformité » ;
- la norme NF EN 13369 « Règles communes pour les produits préfabriqués en béton ».

Les normes autoportantes possèdent des spécifications sur les propriétés finales du produit en béton tandis que la norme NF EN 206/CN comprend des dispositions vis-à-vis de la formulation du béton en lien avec sa future utilisation (classes d'exposition...). Cette dernière prescrit l'utilisation de matières premières normalisées et impose des limites sur béton vis-à-vis des chlorures, des alcalins et des sulfates (via les recommandations pour la réaction sulfatique interne pour les deux derniers éléments). En fonction de l'utilisation, la norme prescrit également une quantité minimale de ciment ainsi que des quantités maximales d'additions dans le liant équivalent.

L'utilisation des solutions développées à base de liant ternaire (ciment Portland + laitier de haut fourneau + addition calcaire) dans des bétons armés et/ou précontraints nécessite donc que les bétons qui les incorporent répondent à la norme béton NF EN 206/CN.

Les leviers peuvent être utilisés à conditions de respecter les précautions suivantes qui ont été définies pour des solutions majoritairement composées de ciment CEM I :

- la présence de chlorures dans le béton ne doit pas dépasser 0,2 % par rapport au ciment dans le cas des bétons précontraints et 0,4 % par rapport au ciment dans le cas des bétons armés ([Norme 206/CN]) ;

- la réaction sulfatique interne peut être induite par la présence simultanée de sulfates (limite de 3 % sur le ciment), d'alcalins (limite de 3 kg/m³ sur le béton), d'humidité et de l'utilisation d'un traitement thermique de température supérieure à 65 °C [Recommandation pour la RSI, 2017]. L'ajout de sulfate de sodium doit donc être fait en présence d'un ciment pauvre en sulfates et en alcalins ;
- l'utilisation d'un traitement thermique nécessite des précautions en fonction du type de pièce (géométrie) et de l'utilisation du béton (classes d'exposition).

Ces prescriptions ont été mises en place pour des bétons principalement constitués de ciment Portland CEM I et sont mesurées en fonction de la quantité de ciment. Dans le cas des liants ternaires étudiés, la quantité de ciment CEM I est proche de 50 % voire inférieure. La possibilité d'introduire des activateurs chimiques à base de chlorures et/ou de sulfates, introduits ou non par l'intermédiaire des matières premières traditionnelles (laitier, adjuvants...) peut alors se poser.

En se basant sur le contexte normatif actuel, les démarches à appliquer pour les solutions développées peuvent être résumées comme tel :

- le liant à base de 53 % de clinker contient 35 % de laitier de haut fourneau (coefficient $k = 0,9$), engendrant un ratio « A/A + C » supérieur à 0,30 (0,39). Sous réserve d'une étude préliminaire performantielle et de l'acceptation par l'utilisateur et le prescripteur, cette solution peut être utilisée dans les bétons d'ingénierie (utilisation des tableaux NAF 3 et NAF 4 de la norme NF EN 206/CN) ;
- le liant à base de 40 % de clinker et 45 % de laitier de haut fourneau engendre un ratio « A/A + C » supérieur à 0,50 (0,52). Afin de pouvoir se placer dans la catégorie des bétons d'ingénierie, une partie du laitier (minimum 5 %) ne doit pas être pris en compte dans le liant ;
- l'utilisation des ciments CEM III permet d'augmenter la quantité maximale de chlorures du béton (0,65 % par rapport au ciment). Ces derniers doivent répondre à la norme ciment NF EN 197-1 et leur utilisation peut dépendre de l'application du béton [NF EN 197-1] (teneur de sulfure en fonction des catégories CP1 ou CP2).

Conclusion générale

Dans des conditions classiques de production, les liants ternaires à faible teneur en clinker incluant une forte teneur en additions (laitier de haut fourneau et addition calcaire) possèdent de faibles résistances mécaniques à très court terme (8 à 24 heures), ce qui ne favorise pas leur utilisation pour des applications en béton préfabriqué. À partir de 7 jours, leurs performances mécaniques sont proches voire supérieures à une référence 100 % ciment Portland CEM I en garantissant une bonne durabilité vis-à-vis de milieux agressifs comme les attaques chimiques.

L'objectif de ces travaux est donc de proposer des solutions industriellement viables pour accélérer le durcissement de liants ternaires à plus faible impact environnemental dans les produits en béton qui soient à la fois durables et environnementalement bénéfiques. Plus précisément, il s'agit de permettre à ces liants d'atteindre des résistances à court terme équivalentes à celles obtenues sur des bétons à base de ciment Portland de type CEM I (mortier de référence à base de 100 % de ciment Portland CEM I 52,5 R), en se plaçant dans des conditions représentatives de celles de l'Industrie de la préfabrication. En fonction du produit visé, l'objectif de résistance à la compression au démoulage est de 40 MPa et 20 MPa respectivement pour les produits en béton précontraint et en béton armé.

Afin d'atteindre cet objectif, quatre moyens d'amélioration des performances ont été expérimentés : l'activation chimique, l'activation thermique, une recherche d'optimisation de la compacité et l'utilisation d'additions de finesses différentes, les trois derniers leviers étant actuellement régulièrement utilisés dans l'Industrie. Ainsi, ces travaux sont une recherche de leur optimisation en termes d'efficacité en les utilisant seuls ou en association dans des mortiers puis dans des bétons à faible teneur en clinker.

Une approche globale a été menée à partir des performances techniques, environnementales et économiques en intégrant leur degré d'importance spécifique. Une méthode et des indicateurs ont été établis, ce qui a permis de mieux différencier les différents couples compositions & process (traitement thermique).

Une première partie a permis de sélectionner certaines compositions de liants ternaires grâce à un plan d'expérience. Puis, la partie majeure de ce travail a porté sur l'accélération du durcissement de deux liants ternaires nommés liant « 40 » et liant « 53 », respectivement composés de 40 et 53 % de clinker, 45 et 35 % de laitier de haut fourneau et 15 et 12 % d'addition calcaire.

L'activation chimique seule permet d'améliorer les performances mécaniques à court terme mais ne permet pas de répondre aux exigences techniques du cahier des charges. Parmi les activateurs chimiques utilisés, l'association du chlorure de sodium et du sulfate de sodium, tous les deux à hauteur de 0,5 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ relatifs à la quantité de laitier, présente les meilleures performances.

À partir de 28 jours, la réaction d'hydratation du laitier avec les activateurs permet l'obtention de résistances en flexion supérieures au témoin CEM I et au mortier ternaire sans activateur (tendance non retrouvée pour la résistance en compression). En prenant également en compte les critères économiques et environnementaux, les formulations de mortiers qui semblent les plus prometteuses sont le mortier à base de liant « 40 » activé par 2 % de sulfate de sodium (noté « 40 + 2 NS ») et de liant « 53 » en présence de 0,5 % de sulfate de sodium et 0,5 % de chlorure de sodium (noté « 53.0,5 »).

En associant l'activation chimique et l'activation thermique, les performances au démoulage obtenues par les mortiers à base des liants « 40 » et « 53 » sont améliorées et permettent d'atteindre dans certaines conditions des performances en compression proches de celles du témoin, tandis que celles en flexion sont supérieures. La résistance en flexion est la propriété majeure dans le cas des produits armés en béton. Les solutions développées peuvent donc être utilisées pour ce type d'application. De plus, les résistances mécaniques mesurées à plus long terme montrent globalement que les mortiers ternaires obtiennent des performances en compression supérieures à 60 MPa. Toutefois, il peut exister un effet optimum ou pessimum en fonction de la concentration en activateur chimique.

Le levier thermique est très efficace et d'autant plus en présence de laitier de haut fourneau.

La température de 80 °C permet au liant « 53 » (53 % clinker + 35 % laitier + 12 % calcaire) l'obtention rapide de performances en compression supérieures à 40 MPa, qui sont encore améliorées en présence de 0,5 % de chlorure de sodium et 0,5 % de sulfate de sodium. Le liant « 40 » (40 % clinker + 45 % laitier + 15 % calcaire) semble être plus performant à 60 °C mais permet néanmoins d'atteindre des performances intéressantes à 40 °C pour un temps de palier rallongé. Les autres étapes du cycle thermique ont également un rôle permettant l'obtention de résistances importantes. En effet, une diminution de température trop rapide à partir d'un palier de température élevée peut engendrer une diminution des résistances en flexion vraisemblablement induite par la microfissuration. En parallèle, un apport de chaleur important semble être plus pertinent à 40 °C qu'à 60 °C d'un point de vue technique mais également économique et environnemental.

En flexion, la température joue également un rôle important. Il semble que 80 °C ne soit pas favorable au bon développement des résistances. Cette tendance est accentuée avec l'augmentation de la durée de palier.

La température de 60 °C semble permettre d'atteindre l'optimum en flexion pour le liant « 40.0,5 » (40 % clinker + 45 % laitier + 15 % calcaire + 0,5 % NaCl + 0,5 % Na₂SO₄) tandis que l'optimum du liant « 53.0,5 » (53 % clinker + 35 % laitier + 12 % calcaire + 0,5 % NaCl + 0,5 % Na₂SO₄) est observée à 40 °C au bout de 14 h 30 de palier.

Ainsi, il est important pour les liants ternaires activés chimiquement d'optimiser les paramètres du cycle thermique au lieu d'utiliser de plus fortes concentrations en activateur chimique ou des mélanges d'activateurs.

Il apparaît d'autant plus pertinent d'optimiser les paramètres du traitement thermiques car ce dernier a un poids fort sur les résistances et faible sur les critères économiques et environnementaux. En effet, toutes les solutions développées en couplant la formulation du liant ternaire et le type de traitement thermique, permettent d'obtenir un bilan économique-environnemental largement meilleur que celui d'un béton témoin composé uniquement de ciment Portland CEM I (au moins deux fois inférieur).

En parallèle, les performances mécaniques à court terme peuvent encore être améliorées grâce au levier lié à l'optimisation de la compacité par le rapport E_{eff}/L et l'utilisation d'un superplastifiant. Toutefois la compatibilité entre le liant ternaire, le superplastifiant et les activateurs chimiques utilisés doit être prise en compte avec attention.

La piste d'amélioration par la substitution des matériaux constitutifs du liant par des matériaux plus fins semble être pertinente pour le laitier de haut fourneau, engendrant en parallèle un surcoût lié à la finesse de broyage ainsi qu'à l'aspect logistique (stockage sur site).

La transposition des leviers d'activation sur les ciments CEM III permet d'atteindre les objectifs mécaniques à court terme. Ces résultats montrent que l'apport de chaleur est le levier le plus puissant.

En effet, en appliquant un traitement thermique dont la température de palier est de 80 °C, les résistances en compression dépassent systématiquement 40 MPa tandis que celles en flexion sont proches de 6 MPa au démoulage.

En utilisant le ratio [Propriété mécanique/Émissions de CO₂] représenté en fonction de la quantité de CO₂ émise, les gains sur le rendement du kilogramme de CO₂ émis sont identifiés, ce qui permet de mettre en avant le poids de chacun des leviers. Il s'avère qu'en fonction de la nature du liant, le poids des leviers n'est pas constant.

Ces travaux ont ainsi permis de réaliser un classement des différents leviers utilisés :

- le traitement thermique s'avère être le plus efficace dans les domaines technique, économique et environnemental. En effet, son utilisation améliore les performances à court terme pour les liants ternaires et les liants à base de ciments CEM III étudiés ;
- le levier chimique permet d'obtenir des améliorations inférieures à celles du levier thermique. La nature des activateurs jouant sur des performances spécifiques, leur utilisation est optimale dans des cas particuliers ;
- 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 ; elle reste néanmoins moins efficace que les deux leviers précédents avec le superplastifiant utilisé dans cette étude ;
- 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.

L'efficacité du traitement thermique apparaît être plus grande pour les liants ternaires notamment riches en laitier de haut fourneau que pour le ciment CEM I. Ainsi, une optimisation du couplage de l'activation thermique avec d'autres activations, classiquement utilisées dans l'Industrie du Béton, a permis d'atteindre les objectifs du cahier des charges en termes de performances au démoulage (obtention de performances en compression minimum de 20 MPa et 40 MPa respectivement à 8 heures pour les produits en béton armé et 10 heures pour les produits en béton précontraint) avec certains des liants ternaires développés dans ce travail de thèse. Cette équivalence en termes de performances d'usage, qui était loin d'être acquise au début de ce travail, s'accompagne d'une nette supériorité des liants ternaires vis-à-vis des performances économiques et environnementales (tableau 59). Ainsi, l'utilisation de liants ternaires pourrait contribuer au développement de produits en béton innovants tout en apportant une grande souplesse puisque la composition du liant ternaire, mais aussi les paramètres du traitement thermique, peuvent être adaptés à l'application visée (figures 117 à 120).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Tableau 59 : Solutions répondant au cahier des charges en termes de résistance mécanique en compression

Liant	Activateur chimique	Traitement thermique	Résistances Rc et Rt (MPa)	Coût (€/m ³)	Changement climatique (kgeqCO ₂ /m ³)
CEM I	/	/	Rc = 44,9 MPa ; Rt = 6,4 MPa	104,2	445,3
Application béton armé					
« 40 »	2 NS	60 °C ; 8 h 20 (TTB)	Rc = 25,7 MPa ; Rt = 4,5 MPa	108,9	210,3
« 53 »*	0,5 NS + 0,5 NC	60 °C ; 8 h 20 (TTB)	Rc = 35,4 MPa ; Rt = 5,6 MPa	108,5	275,3
« CEM III-LH »	0,5 NS	55 °C ; 7 h (TTG)	Rc = 24,3 MPa ; Rt = 4,7 MPa	118,0	252,6
Application béton précontraint					
« 53 »	0,5 NS + 0,5 NC	80 °C ; 6 h 30 (TTA)	Rc = 45,6 MPa ; Rt = 6,2 MPa	111,2	278,4
« 40 »	0,5 NS + 0,5 NC	80 °C ; 6 h 30 (TTA)	Rc = 49,1 MPa ; Rt = 6,5 MPa	106,9	212,6
« CEM III-LH »	0,5 NS	80 °C ; 6 h 30 (TTA)	Rc = 42,5 MPa ; Rt = 6,0 MPa	119,9	254,8

* Certaines solutions permettent d'atteindre des performances comprises en 20 MPa et 40 MPa. Elles pourraient donc également être utilisées après une optimisation du traitement thermique (température ou durée du palier) pour des applications en béton armé.

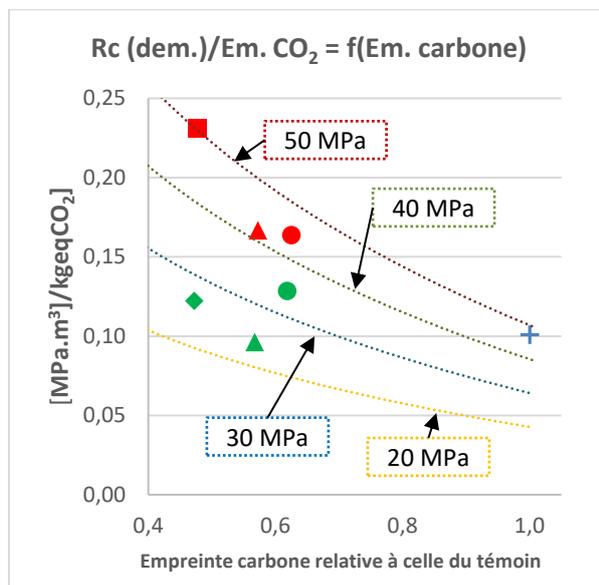


Figure 117 : Rendement CO₂ vis-à-vis des résistances en compression au démoulage en fonction du CO₂ émis

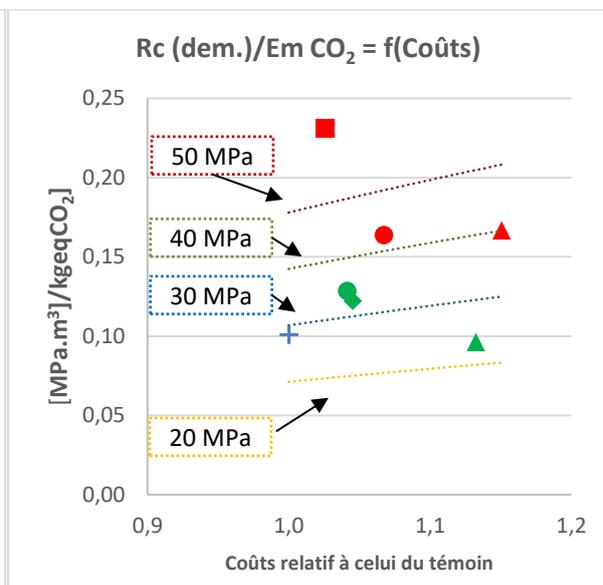


Figure 118 : Rendement CO₂ vis-à-vis des résistances en compression au démoulage en fonction du coût

Légende commune aux figures 117 et 118 :

+ CEM I	◆ « 40 » + 2 NS/60 °C	● « 53 » + 0,5 NS + 0,5 NC/60 °C
▲ « CEM III-LH » + 0,5 NS/55 °C	● « 53 » + 0,5 NS + 0,5 NC/80 °C	■ « 40 » + 0,5 NS + 0,5 NC/80 °C
▲ « CEM III-LH » + 0,5 NS/80 °C		

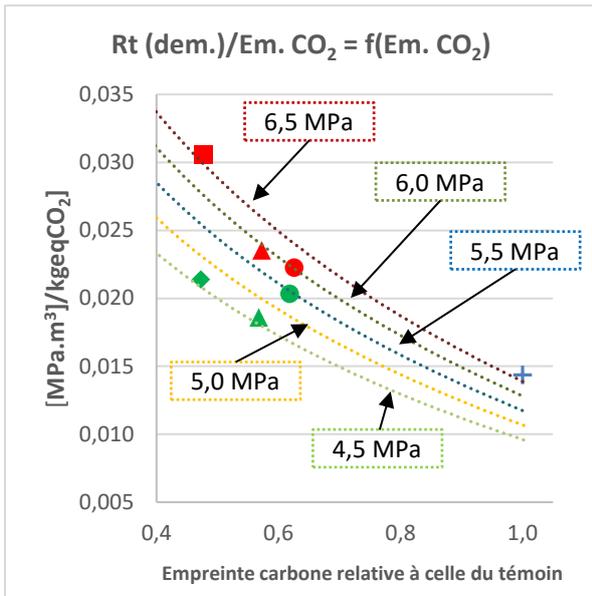


Figure 119 : Rendement CO₂ vis-à-vis des résistances en flexion au démoulage en fonction de l’empreinte carbone

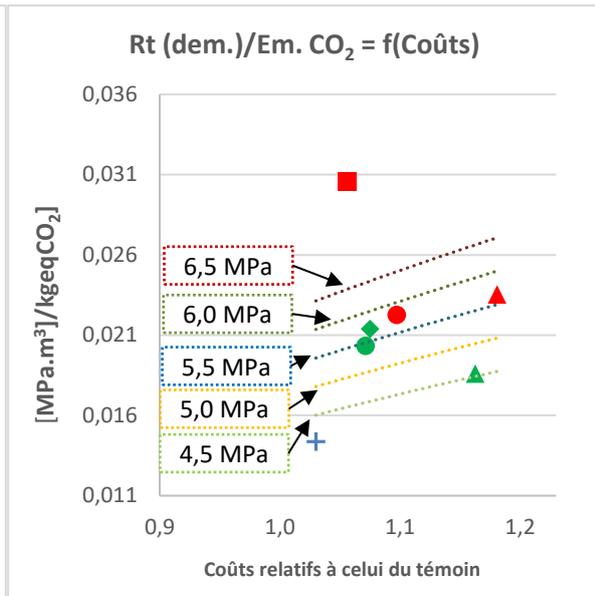


Figure 120 : Rendement CO₂ vis-à-vis des résistances en flexion au démoulage en fonction du coût

Légende commune aux figures 119 et 120 :

+ CEM I	◆ « 40 » + 2 NS/60 °C	● « 53 » + 0,5 NS + 0,5 NC/60 °C
▲ « CEM III-LH » + 0,5 NS/55 °C	● « 53 » + 0,5 NS + 0,5 NC/80 °C	■ « 40 » + 0,5 NS + 0,5 NC/80 °C
▲ « CEM III-LH » + 0,5 NS/80 °C		

Perspectives

La durabilité des solutions développées doit être étudiée afin de valider leur intérêt et ainsi définir les familles de produits dans lesquelles elles pourront être utilisées.

Des essais en usine sur produits sont nécessaires afin de finaliser l'optimisation des différents leviers (température, activation chimique) en fonction du cahier des charges du produit.

Dans le cadre de la politique actuelle d'économie circulaire, la diminution de l'impact carbone du béton peut également passer par l'utilisation de matériaux alternatifs issus de domaines industriels producteurs de matières premières secondaires. La caractérisation physico-chimique de ces dernières démontre que certaines sont très proches des constituants normalisés. Un travail de transposition des solutions permettant d'accélérer le durcissement du béton pourrait donc être réalisé sur des bétons incorporant ces nouveaux constituants sans changer de manière trop importante les pratiques actuelles de la profession. Cette démarche permettra également de réaliser des économies de matières, tout en assurant la qualité du produit fini en termes de performances techniques, sanitaires et environnementales.

Références bibliographiques

- [Balency, 1964] A. Balency-Béarn, N. Esquillan, P. Lebel « Le béton armé ou précontraint et la préfabrication lourde en France » ; première édition 1964, repris en 2016
- [Begarín, 2012] F. Begarín « Étude des paramètres endogènes et exogènes au ciment Portland ordinaire influençant l'hydratation de sa phase principale : le silicate tricalcique » ; Thèse de doctorat de l'Université de Bourgogne (2012)
- [Bello, 2014] L. Bello « Mise au point d'une méthodologie pour formuler de nouveaux bétons légers autoplacants durables » ; Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II, Ecole Doctorale I2S Mécanique et Génie Civil (2014)
- [Bentz, 2016] D.P. Bentz, D. Lootens, S.Z. Jones « Minimizing Paste Content in Concrete Using Limestone Powders – Demonstration Mixtures » ; NIST Technical Note 1906, 2016
- [Berodier, 2014] E. Berodier, K. L. Scrivener « Understanding the filler effect on the nucleation and growth of C-S-H » ; J. Am. Ceram. Soc. 97 (2014), 3764-3773
- [Bessa-Badreddine, 2004] A. Bessa- Badreddine « Étude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers » ; Thèse de doctorat de l'Université de Cergy Pontoise (2004)
- [Bihouix, 2010] P. Bihouix « L'âge des Low Tech », Édition Seuil, 2010
- [Boudra, 2015] S. Boudraa, S. Bensebti, R. Lassoued « Effet de l'ajout de filler calcaire sur le retrait des bétons autoplacants » ; article soumis pour le Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert ». ISABTP/UPPA, Anglet, 27 au 29 mai 2015
- [Bur, 2012] N. Bur « Étude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux bétons éco-respectueux pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement durable » ; Thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg, École doctorale Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur, 2012
- [Chen, 2006] W. Chen « Hydration of slag cement - theory, modeling and application » ; Enschede, University of Twente. PhD: 223, 2006
- [Cimbéton – Tribu Énergie, 2017] « Étude comparative ACV de différents systèmes constructifs dans le cadre des travaux sur l'étiquetage environnemental » ; Demandée par Cimbéton et réalisée par le bureau d'étude Tribu Energie, 2017
- [Dehaut, 2009] S. Dehaut « Contribution à la réduction des émissions de CO₂ : évolution des ciments et des besoins de l'industrie du béton » ; rapport Cerib 186.P ; 2009
- [De Larrard, 1999] F. De Larrard « Structures granulaires et formulation des bétons » ; Collection Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° OA 34 ; 1999
- [Dieryck, 2004] V. Dieryck « Attaque chimique des bétons » ; Les Dossiers du CSTC – Cahier n° 9 – 4^e trimestre 2004

- [Ferraris, 2001] C. F. Ferraris, K. H. Obla, R. Hill « The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete » ; Cement and Concrete Research, vol. 31, pp. 245-255, 2001
- [Fernandez-Jimenez, 1999] A. Fernandez-Jimenez, J.G. Palomo, F. Puertas « Alkali-activated slag mortars. Mechanical strength behavior » ; Cement and Concrete Research 29, Issue 8 (1999) 1313-1321
- [Gebregziabiher, 2015] B.S. Gebregziabiher, R. Thomas, S. Peethamparan « Very early-age reaction kinetics and microstructural development in alkali-activated slag » ; Cement & Concrete Composites 55 (2015) 91-102
- [Gruyaert, 2011] E. Gruyaert « Effect of Blast-Furnace Slag as Cement Replacement on Hydration, Microstructure, Strength and Durability of Concrete » ; Thèse de Doctorat à l'Université de Gent, 2011
- [Houze, 2013] C. Houze « Étude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silicomanganèse » ; Thèse de Doctorat de l'Université Paris Est, École doctorale Sciences, Ingénierie et Environnement, 2013
- [Jacquemot, 2014] F. Jacquemot « Accélération du durcissement des liants à base de laitier de haut fourneau pour les produits préfabriqués » ; Thèse de Doctorat de l'Université de Lille 1, École Doctorale SMRE 104, 2014
- [Khalifa, 2012] N.E.H Khalifa., M.Bouasker, P. Mounanga, N. Ben Kahla « Étude du comportement mécanique de liants binaires et ternaires à base de ciment Portland, de laitier de haut fourneau et de filler calcaire » ; Journal MATEC Web of Conferences Volume 2, 2012
- [Le prix du carbone, 2016] « Le prix du carbone, Levier de la transition énergétique » ; Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer – DICOM-CGDD/DEP/15280-3 – Août 2016 – Impression : MEEM-MLHD/SG/SPSSI/ATL
- [Le Brun, 2015] L. Le Brun, F. Jacquemot « Panorama des nouveaux liants utilisés à l'international » ; rapport cerib 342.P, 2015
- [Li, 2015] L.G. Li, A.K.H. Kwan « Adding Limestone Fines as Cementitious Paste Replacement to Improve Tensile Strength, Stiffness, and Durability of Concrete » ; Cement and Concrete Composites, Vol. 60, 17-24, 2015
- [Malhotra, 1996] V. M. Malhotra, P. K. Metha « Pozzolanic and cementitious materials » ; Advances in concrete technology. Ed. V. M. Malhotra, CANMET. Gordon and Breach publishers, Ottawa, Ont. p. 191.
- [Marciano, 1997] E. Marciano JR, A.F. Battagin « The influence of alkali activator on the early hydration and performance of Portland blast furnace slag cement » ; Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Gothenburg, Sweden, June 2-6, 1997

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [NF EN 1008] Norme « Eau de gâchage pour bétons Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton », 2003
- [NF EN 15167-1] Norme « Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis – Partie 1 : Définitions, exigences et critères de conformité », 2006
- [NF EN 196-1] Norme « Méthodes d'essais des ciments —Partie 1 : Détermination des résistances », 2016
- [NF EN 1992-1-1] Norme « Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments », 2005
- [NF EN 197-1] Norme « Ciment - Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants », 2012
- [NF EN 1992-1-1] Norme « Eurocode 2 – Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments », 2016
- [NF EN 206/CN] Norme « Béton — Spécification, performance, production et conformité — Complément national à la norme NF EN 206 », 2014
- [NF EN 934-2/IN1] Norme « Adjuvants pour bétons, mortier et coulis – Partie 2 : adjuvants pour béton – Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage », 2012
- [NF P 18-508] Norme « Additions pour béton hydraulique – Additions calcaires : Spécifications et critères de conformité », 2012
- [Recommandations pour la RSI, 2017] Guide technique « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne » ; IFSTTAR, 2017
- [Reporterre, 2016] Site internet : <https://reporterre.net/L-arnaque-des-cimentiers-pour-polluer-tout-en-speculant-sur-le-climat>
- [Richardson, 2004] I.G. Richardson « Tobermorite/jennite – and tobermorite/calcium hydroxide-based models for the structure of C-S-H: applicability to hardened pastes of tricalcium silicate, β -dicalcium silicate, Portland cement, and blends of Portland cement with blast-furnace slag, métakaolin or silica fume » ; Cement & Concrete Research 34 (2004) 1733-1777
- [Scrivener, 2011] K.L. Scrivener, A. Nonat « Hydration of cementitious materials, present and future » ; Cement & Concrete Research 41 (2011) ; 651-665
- [Scrivener, 2015] K.L. Scrivener, P. Juilland, P.J.M. Monteiro « Advances in understanding hydration of Portland cement » ; Cement & Concrete Research 78 (2015) 38-56
- [Taylor, 1997] H.F.W Taylor « Cement Chemistry, 2nd edition » ; London, Thomas Telford Publishing (1997)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Wang, 1994] S. D Wang, K. L. Scrivener, P. L. Pratt « Factors affecting the strength of alkali-activated slag » ; Cement and Concrete Research 24, Issue 6 (1994) 1033-1043
- [Weissenberger, 2015] S. Weissenberger « Impacts et adaptation aux changements climatiques : une perspective mondiale et locale » ; Atelier de transfert au Centre Culture et Environnement Frédéric Back à Québec ; 11 et 12 février 2015
- [Zeghichi,2007] L. Zeghichi, B. Mezghiche, A. Merzougui « L'influence de l'activation du laitier sur le comportement mécanique des bétons » ; Lebanese Science Journal, Vol. 8, No. 2, 2007

Annexes

Annexe 1 : Données sur le secteur de la préfabrication

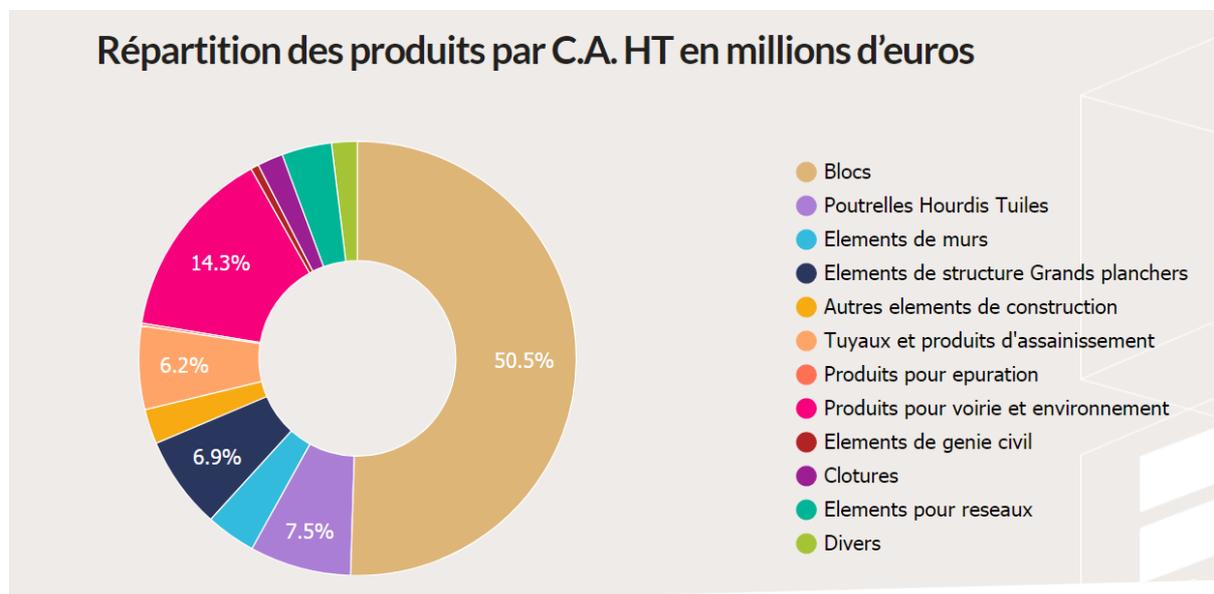


Figure 121 : Répartition des produits par chiffre d'affaire (en million d'euros HT)



Figure 122 : Répartition des différents sites de préfabrication sur le territoire français

Annexe 2 : Méthode de fabrication

Le protocole de fabrication est chronologiquement le suivant :

1. Préparation des constituants :
 - l'adjuvant est introduit dans l'eau de gâchage,
 - le sable est préparé,
 - les constituants fins (liant, activateur(s) chimiques(s)) sont introduits dans le bol humidifié ;
2. Protocole de malaxage et ordre d'incorporation des constituants :
 - le malaxage est lancé (T0) à vitesse lente pendant 10 secondes et l'ensemble eau + adjuvant est introduit dans le bol sur une durée T1,
 - le coulis est malaxé pendant une durée T2,
 - le sable est introduit dans le bol en 60 secondes,
 - le mortier est malaxé à vitesse lente sur une durée T3,
 - le mortier est malaxé à vitesse rapide pendant 30 secondes,
 - le malaxage est arrêté, le bol raclé pendant 30 secondes puis le mortier est laissé au repos pendant 1 minute,
 - le malaxage est repris à vitesse rapide pendant 60 secondes.

Les valeurs de temps T1, T2 et T3 varient avec la quantité de mortier à malaxer (recherche d'homogénéité) ;

3. Le mortier subit une caractérisation à l'état frais ;
4. Mise en moule :
 - le mortier est mis en moule en deux fois entrecoupé et finalisé par une période de vibration (puissance et temps identiques pour toutes les compositions),
 - les moules sont emballés dans du polyane (≈ 100 % HR) et subissent ou non un traitement thermique,
 - le démoulage se déroule en fin de cure : 24 h sans traitement thermique ou en fin de traitement thermique. Des éprouvettes sont caractérisées mécaniquement à cette échéance ;
5. Conservation des éprouvettes :

Les autres éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'à l'échéance correspondant à leur caractérisation. Avant de mettre les éprouvettes dans l'eau, il est nécessaire que la température de ces dernières soit à température ambiante (paramètre important pour les éprouvettes sortant de traitement thermique) pour éviter un choc thermique.

Annexe 3 : Description des différents essais de caractérisation

Mesure de masse volumique et d'air occlus

L'air occlus est mesuré à l'aide d'un aéromètre de contenance 1 litre dans le cas de mortiers et de 8 litres dans le cas de béton. Le matériau est introduit en deux couches avec une vibration entre les deux et à la fin du remplissage. Une fois mis en place, le mortier/béton est arasé et le récipient nettoyé. Le tout est pesé et permet de déterminer la masse volumique à l'état frais.

Puis, la chambre de pressurisation est placée sur le récipient de manière étanche. De l'eau est injectée par l'un des robinets jusqu'à ce qu'elle ressorte par l'autre robinet. Les deux robinets sont alors fermés. De l'air est ensuite introduit par pompage jusqu'à ce que l'aiguille du manomètre se stabilise au niveau de pression initiale. L'air est chassé en appuyant sur un bouton. La teneur en air est alors lue sur le manomètre en pourcentage volumique.

Mesure d'étalement

Cette mesure est faite sur mortier frais en fin de procédure de malaxage.

La mesure de l'étalement permet de connaître la fluidité du mortier. Plus l'étalement est élevé, meilleure est sa mise en place.

La mesure est réalisée selon la norme NF EN 1015-3 selon le protocole suivant : À T₀, le malaxeur est mis en fonctionnement et le mortier entame son cycle de fabrication.

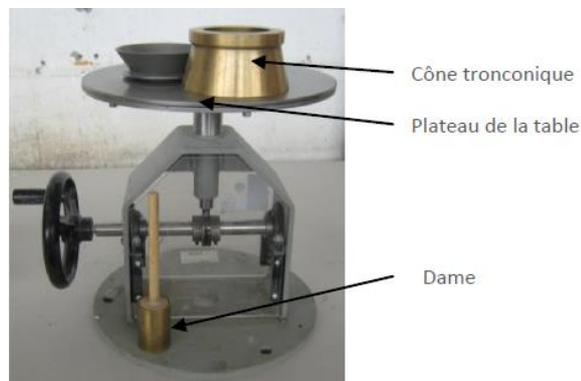


Figure 123 : Table à secousses

Une fois le cycle terminé, le mortier est placé sur le plateau de la table à secousses dans un cône tronconique de format normalisé, soit 60 mm de hauteur, diamètre intérieur de 100 mm à la base et diamètre intérieur de 70 mm au sommet.

Le cône est rempli en deux fois, opération intercalée par dix coups de dame (baguette rigide non absorbante de section circulaire) servant à compacter le mortier. Après arasement et un temps de 15 secondes, le cône est retiré verticalement.

Le cône de mortier subit alors 15 secousses, à la cadence de 1 par seconde, et s'étale sur la table. On mesure ensuite le diamètre moyen de l'étalement (deux prises de mesure perpendiculaires). Dans notre cas, l'essai est réalisé à T₀ + 5 minutes et à T₀ + 45 minutes.

Essai de résistances mécaniques en flexion et compression

Cet essai est réalisé selon la norme NF EN 196-1 « Méthodes d'essais des ciments – Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques ».

La méthode consiste à déterminer les résistances à la flexion et à la compression d'éprouvettes de forme prismatique et de dimensions 40 mm × 40 mm × 160 mm, selon le schéma suivant :

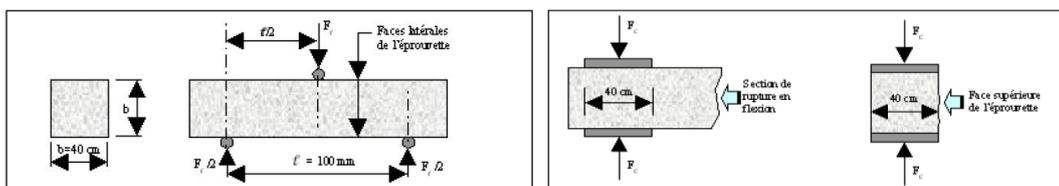


Figure 124 : Principe de l'essai de résistance mécanique en flexion (gauche) et en compression (droite)

Le mortier est préparé par malaxage mécanique et serré dans un moule au moyen d'une table vibrante. Les éprouvettes sont conservées dans leur moule en atmosphère humide pendant 24 heures et, après démoulage, elles sont conservées sous l'eau jusqu'au moment des essais de résistance.

À l'âge requis, les éprouvettes sont retirées de leur milieu de conservation humide, elles sont cassées en flexion, puis chaque demi-prisme est soumis à l'essai de résistance à la compression (unités MPa).

Les résultats de résistances mécaniques en compression se présentent sous la forme d'indice d'activité. Cet indice est le ratio de deux résistances mécaniques de même échéance :

$$I_c = \frac{F_{C_i}}{F_{C_t}}$$

Où F_{C_i} est la résistance en compression du mortier i considéré

F_{C_t} est la résistance en compression du mortier de référence avec 100 % de ciment à la même échéance.

Cet indice est significatif car il permet de comparer relativement les valeurs entre elles, dans la mesure où les deux mortiers ont été réalisés dans des conditions expérimentales similaires (main d'œuvre, matériel expérimental, protocole, conditions atmosphériques...).

Ainsi, il est possible d'affirmer que le mortier i a une meilleure résistance ($I_c < 1$) ou moins bonne résistance ($I_c > 1$) que le mortier de référence.

Mesure de masse volumique à l'état durci

Après démoulage, les éprouvettes sont pesées afin de calculer la masse volumique à l'état durci du mortier/béton.

Annexe 4 : Chapitre III

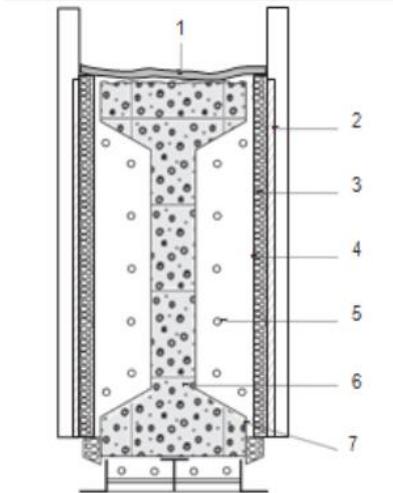
Tableau 60 : Liants ternaires testés

Dénomination des liants étudiés	Proportions des constituants du liant (%)		
	Ciment	Laitier de haut fourneau (S)	Addition calcaire
Témoin CEM I PLN	95,5	0	4,5
1	66,4	8,5	25,1
2	78,5	8,5	13,0
3	60,1	26,0	13,9
4	58,5	16,0	25,5
5	52,6	25,0	22,4
6	92,6	0	7,4
7	52,6	15,0	32,4
8	58,5	26,0	15,5
9	80,5	0	19,5
10	55,8	35,0	9,2
11	52,6	35,0	12,4
12	68,4	0	31,6
13	54,2	35,0	10,8
14	74,2	17,5	8,3
15	64,4	17,0	18,6
16	60,5	7,5	32,0
Liant « VI »	42,1	45	12,9

* Le calcaire est apporté par l'addition mais également par le ciment

Annexe 5 : Exemples de systèmes chauffants

Systèmes de chauffage externes pour moules fixes



- 1 - Bâche isolante
- 2 - Protection de l'isolant
- 3 - Isolant
- 4 - Clinquant
- 5 - Résistances électriques
- 6 - Béton
- 7 - Paroi du béton

Figure 125 : Chauffage électrique d'un moule de poutre



Figure 126 : Moules en batterie avec circulation de vapeur dans les caissons

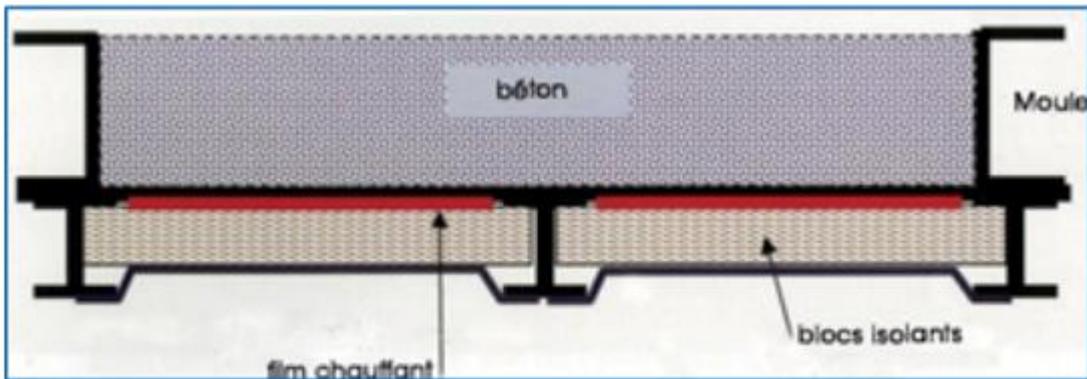


Figure 127 : Principe de chauffage d'un moule par un film chauffant

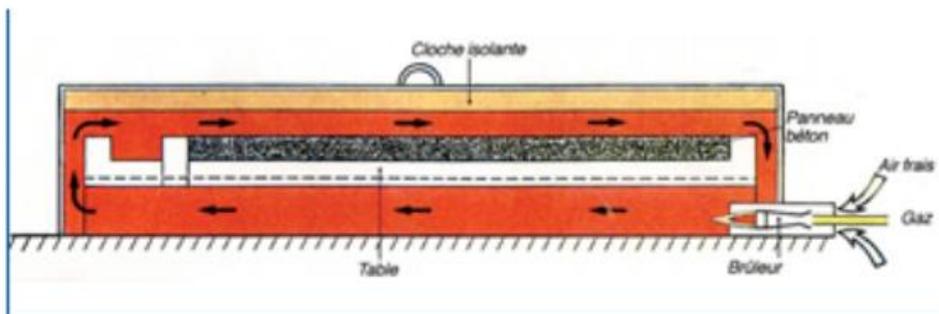


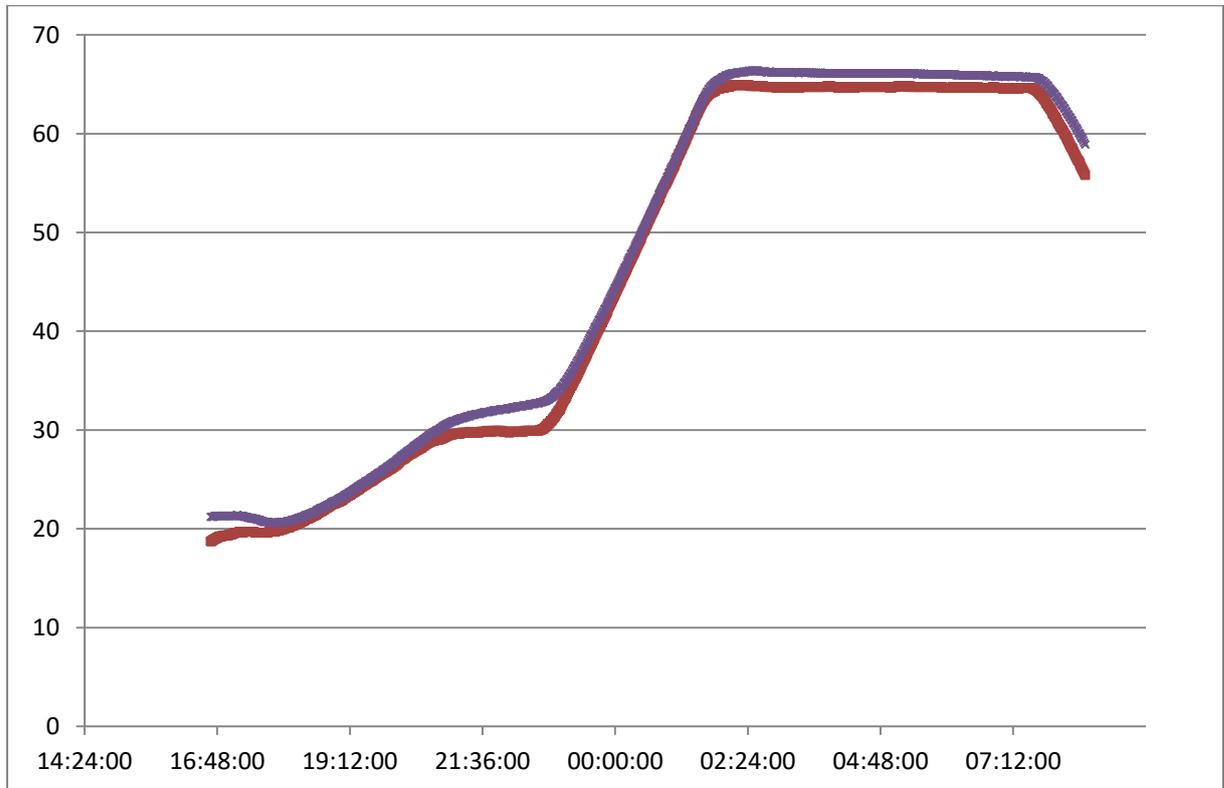
Figure 128 : Chauffage par brûleur à gaz directement implanté sous une cloche

Systèmes de chauffage externes pour moules ou plateaux mobiles



Figure 129 : Tunnel d'étuvage pour moules de voussoirs

Annexe 6 : Exemple d'un relevé de température au sein d'un mortier traité thermiquement



Légende : Rouge : température de l'enceinte
Violet : température au sein du mortier « 53 »

Figure 130 : Relevé de température pour le traitement thermique TT3/60-6 h

Bétons à faible impact environnemental pour l'Industrie du Béton : accélération du durcissement de bétons à base de liants ternaires

La présente étude s'inscrit dans le programme d'actions de l'Industrie du Béton ; elle a pour but de rechercher des solutions innovantes de béton à faible impact environnemental qui permettent l'obtention de performances techniques et économiques au moins équivalentes à celles des bétons traditionnels. Pour répondre à cet enjeu, l'étude de liants ternaires constitués de ciment Portland CEM I, laitier de haut fourneau et addition calcaire a été réalisée en optimisant les moyens disponibles en préfabrication pour accélérer leur durcissement : emploi d'un traitement thermique, utilisation d'activateurs chimiques et optimisation de la compacité du mélange. Le traitement thermique s'avère être le plus puissant levier d'action. Les solutions développées (matériau et procédé) permettent d'obtenir un bilan économique-environnemental meilleur que celui d'un béton témoin dont le liant est uniquement composé de ciment Portland CEM I.

Eco-Friendly concretes for precast products: acceleration of the hardening of ternary binders

This study is part of the action program of the French Concrete Industry; it aims finding innovative solutions of concrete with low environmental impact, which allow to get technical and economic performances at least equivalent to those of the traditional concretes. To answer this issue, the study of ternary binders, made of Portland cement CEM I, blast furnace slag and limestone addition, was realized by optimizing the means that are available in precast industry to accelerate their hardening: use of a thermal treatment, use of chemical activators and optimization of the mixture's compactness. Thermal treatment proves to be the most powerful lever of action. The developed solutions (material and process) obtain a much better economic-environmental balance compared to a control concrete whose binder is composed of Portland cement CEM I.