

Transition environnementale des bétons autoplaçants pour la préfabrication

Mathieu Pellerano¹

¹LMDC, Université de Toulouse, INSA, UPS, Génie Civil, France

RESUME

La transition environnementale des usines de préfabrication vers des bétons bas-carbone nécessite un ajustement des formulations afin de satisfaire plusieurs critères : rhéologique (béton autoplaçant), mécaniques au jeune âge (25 MPa nécessaires à 24 heures pour le déplacement des pièces au décoffrage) et mécaniques à long terme notamment en application structurelle. Les bétons étudiés, CEM III et LC3 seul ou combiné avec du laitier de haut fourneau, présentent des réductions d'au moins 40% de CO₂ par rapport un béton de référence à base de CEM I (295 kg.eqCO₂/m³). Différents paramètres d'activation (finesse du laitier - Blaine = 4400 et 6800 cm²/g, température de cure entre 20 et 50°C et ajout d'activateur chimique), pris seuls ou combinés, ont été étudiés pour améliorer les résistances mécaniques en compression à 24 heures. Les activations thermique et physique (finesse) des matrices bas-carbone permettent d'atteindre la résistance visée. Une étude combinant caractérisation microstructurale (analyse thermogravimétrique, diffraction de rayons X, porosimétrie), analyse par calorimétrie isotherme et résistance mécanique en compression à l'échelle du liant a été réalisée et montre que, selon le type d'activation, des différences significatives d'assemblage d'hydrates sont observées, notamment sur les phases de type AFt et AFm.

Mots-clés Bétons bas-carbone ; Préfabrication ; Activation ; CEM III ; LC3

I. INTRODUCTION

La production de ciment Portland (OPC) représente 5 à 8 pourcents des émissions de carbone mondiales (Zhu et al., 2022). L'industrie de la construction cherche donc à réduire son utilisation au profit de solutions à plus faible impact environnemental. Parmi ces solutions, les ciments CEM III ou les matrices de type LC3 peuvent être envisagées (Zhu et al., 2022). Néanmoins, ces liants bas-carbone ne sont pas aussi performants que les bétons CEM I ou CEM II/A du point de vue des résistances mécaniques à la compression au jeune âge (Castellano et al., 2016; Han et al., 2021; Mishra et al., 2019) ce qui pourrait freiner leur mise en place, notamment dans le domaine de la préfabrication. La littérature présente cependant plusieurs solutions, appelées ici *leviers*, permettant d'augmenter les résistances mécaniques au jeune âge et pouvant s'appliquer aux matrices bas-carbone. On retrouve parmi celles-ci la mise en place d'activation chimique (Mishra et al., 2019) ou thermique (Castellano et al., 2016; Cyr and Patapy, 2016; Mishra et al., 2019) et l'utilisation de matières premières de plus grande finesse (Cyr and Patapy, 2016). L'objectif de ce travail est d'étudier plusieurs liants bas-carbone pouvant s'adapter à un cahier des charges de préfabrication consistant en l'obtention de bétons autoplaçants bas-carbone de classe C45/55, avec une résistance à 24 heures d'au moins 25 MPa. En parallèle, l'étude étudie l'impact de ces leviers sur les réactions d'hydratation et leur influence sur les résistances mécaniques.

II. MATERIAUX ET METHODES

Six liants bas-carbone ont été testés. Trois sont de type binaires (SXX) combinant CEM I (*Lafarge*, CEM I 52,5 R CE CP2 NF) et laitier de haut fourneau (*Ecocem*, noté LHF) avec des taux massiques de LHF de 50 % (S50), 70 % (S70) et 85 % (S85). Ces trois premiers liants correspondent respectivement à des CEM III/A, B et C recomposés. Un liant LC3, composé de 50 % de clinker, de 30 % d'argile calcinée (*Métakaolin Flash*, *Argeco Developement*), de 15 % de filler calcaire (*Betocarb*, *Omya*) et de 5 % de gypse (*Sulfacal*, *Saint-Gobain*), a également été testé (noté LC3_C50). Enfin, deux liants combinant LC3_C50 et LHF ont été produits : le premier, noté LC3_S40, composé de 60 % de LC3_C50 (soit 30 % de clinker) et 40 % de LHF alors que les proportions sont inversées pour le liant noté LC3_S60 (soit 20 % de clinker).

Pour chaque liant xxx, trois bétons ont été coulés en faisant varier la finesse du LHF (Blaine = 4400 (Std) ou 6800 cm²/g (Fin)) et l'utilisation ou non d'un activateur chimique (*Sika® Rapid8Slag*) :

- LHF Standard + Pas d'activation chimique → xxx_Std_NoAcc
- LHF Standard + Activation chimique → xxx_Std_Acc
- LHF Fin + Pas d'activation chimique → xxx_Fin_NoAcc

Pour chaque béton, quatre températures de cure sont testées (20°C/30°C/40°C/50°C) pendant les 24 premières heures avant une conservation de type endogène à 20°C jusqu'à 28 jours. Ainsi, l'impact des leviers sur les résistances mécaniques à 24 heures ($f_{c,24h}$) et 28 jours ($f_{c,28d}$) est évalué sur des cubes 10x10x10cm³. Pour chaque essai, 3 cubes sont testés. Tous les bétons ont été coulés avec un rapport E/L de 0.40 et contiennent un superplastifiant (*Sika® ViscoCrete® Krono-947*, noté SP) afin d'obtenir un béton autoplaçant (contrôlé au cône d'Abrams).

Afin de comprendre l'influence des leviers sur les $f_{c,24h}$, une étude sur pâte a été menée avec un double objectif : quantifier et comprendre les avancements de réaction dus aux leviers et évaluer les limites éventuelles sur le développement de résistance mécanique à long terme de certains leviers. Ici, seules des pâtes S70 et LC3_S60, dont le rapport E/L vaut 0.40, sont étudiées en se basant sur des résistances mécaniques à la compression (6 cubes 2x2x2 cm³ pour chaque caractérisation), des essais de calorimétrie isotherme, des analyses thermogravimétriques (ATG) et des essais de diffraction à rayons X (DRX). Pour ces deux liants, trois pâtes ont été coulées en faisant varier la finesse du LHF et en ajoutant ou non un accélérateur de LHF. Seules deux températures de cure sont testées à l'échelle de la pâte : 20°C et 50°C.

III. RESULTATS

A. Validation du cahier des charges

a. Poids carbone des bétons et impact des leviers

A partir des poids carbone des matériaux présentés dans le Tableau 1, la Figure 1 illustre le poids carbone du béton de CEM I et ceux des bétons bas-carbone produits sans action des leviers : c'est-à-dire sans activation chimique ou thermique et avec l'utilisation de laitier de finesse standard (xxx_Std_NoAcc_T20). La Figure 1 présente également, pour chaque béton bas-carbone, la réduction du poids carbone par rapport au béton CEM I, béton de référence de l'étude.

TABLEAU 1. Poids carbone des matériaux (kg.eqCO₂/t) (Diogen, 2023).

	CEM I	LHF	Argile calcinée	Filler	Eau	Granulats	SP
Poids carbone	765	99	139	62	0.3	2.3	1880

En comparaison avec le béton CEM I (i.e. 294 kg.eqCO₂/m³), les bétons bas-carbone permettent de réduire le poids carbone de - 39 % à - 70 % par rapport à la référence. Pour les matrices binaires SXX, plus le taux de CEM I est bas, plus le poids carbone de la matrice est faible. Le même commentaire peut être fait pour les matrices LC3. Ainsi, les bétons S85 et LC3_S60 conduisent aux émissions les plus faibles, avec des poids carbone respectifs de 87 et 105 kg.eqCO₂/m³.

Sous l'action des leviers, les poids carbone des bétons sont majorés. Une activation thermique à 50°C augmente le poids carbone d'un m³ de béton de + 2.6 kg.eqCO₂ pour une production d'électricité selon le mix énergétique français (Ademe ; Turner and Collins, 2013). Une activation chimique avec 3 % d'accélérateur, dosage recommandé par le fournisseur, majore le poids carbone du béton de + 25 kg.eqCO₂/m³ selon les données fournies par ce dernier. Enfin, en cas d'utilisation de LHF Fin (Blaine = 6800 cm²/g), le poids carbone d'une tonne de LHF est rehaussé de + 10 kg.eqCO₂/t (Sebaïbi and Boutouil, 2020) ce qui génère des augmentations entre + 4 et + 8 kg.eqCO₂ pour un m³ de béton.

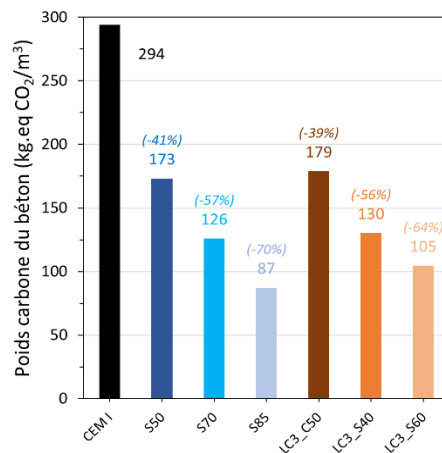


FIGURE 1. Poids carbone du béton CEM I et des six bétons bas-carbone sans action des leviers.

b. Résistance mécanique à la compression

La Figure 2 représente les résistances mécaniques à la compression à 24 heures ($f_{C,24h}$) en fonction du poids carbone des bétons et des leviers actionnés. Un second axe horizontal est ajouté pour illustrer le pourcentage de réduction du poids carbone par rapport au béton CEM I, béton de référence de l'étude. Enfin, une ligne horizontale, placée à 25 MPa, permet de visualiser la résistance cible à atteindre à 24 heures.

Sur la Figure 2, chaque liant est représenté par une couleur et les températures d'activation sont représentées par différents marqueurs. Le fond des marqueurs (vide, plein ou rayé) représente la finesse du LHF et l'utilisation ou non d'accélérateur.

Pour chaque type de liant, il est possible d'atteindre 25 MPa, à condition d'utiliser un ou plusieurs leviers. En effet, les $f_{C,24h}$ des bétons non-activés utilisant un LHF standard (xxx_Std_NoAcc_T20) vont de 4 à 18 MPa, la baisse de la résistance étant corrélée ici à une baisse du poids carbone. Dans le même ordre d'idée, plus le poids carbone d'un béton est bas, plus il sera nécessaire d'actionner les leviers pour atteindre 25 MPa. Pour illustrer ce point, la Figure 3a illustre de manière plus précise l'impact des leviers (activation thermique, activation chimique ou utilisation de LHF Fin) sur les $f_{C,24h}$ des bétons S70 et LC3_S60.

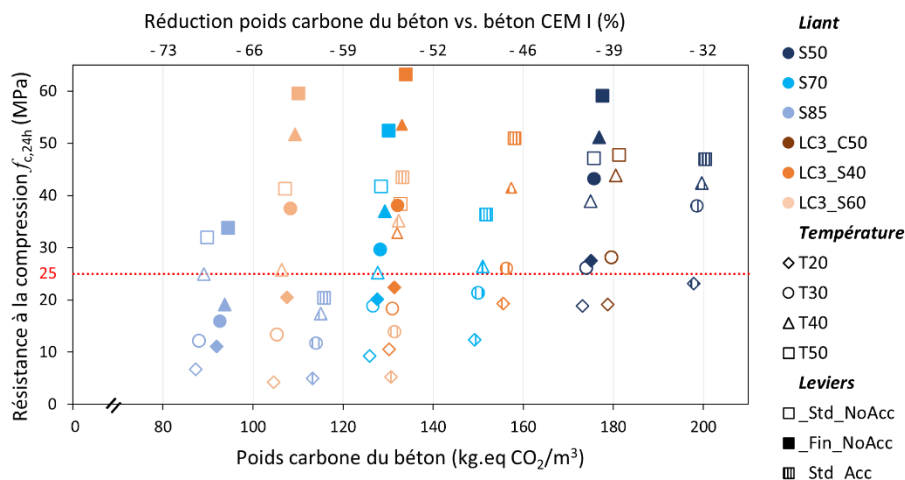


FIGURE 2. Résistance mécanique à la compression à 24h en fonction du poids carbone d'un m³ de béton.

La Figure 3a montre l'impact positif de la température d'activation sur les $f_{c,24h}$. En effet, indépendamment d'une activation chimique ou de la finesse du LHF, les bétons conservés à température ambiante (T20) présentent les $f_{c,24h}$ les plus faibles. A l'inverse, ceux conservés à 50°C (T50) possèdent les $f_{c,24h}$ les plus hautes.

La Figure 3a montre également qu'une activation thermique à 40°C ou plus est nécessaire pour atteindre 25 MPa pour les bétons utilisant LHF standard sans activateur chimique (xxx_Std_NoAcc, avec xxx = S70 ou LC3_S60). A température ambiante, une utilisation d'activateur de LHF (xxx_Std_Acc_T20) permet également d'améliorer les $f_{c,24h}$ des bétons de respectivement + 3 et + 6 MPa par rapport aux bétons non-activés (xxx_Std_NoAcc_T20). Néanmoins, même en cas d'utilisation d'accélérateur de LHF, une activation thermique à 40°C ou plus est nécessaire pour atteindre 25 MPa. L'utilisation de LHF Fin est plus efficace pour améliorer les $f_{c,24h}$ à température ambiante (xxx_Fin_NoAcc_T20, respectivement + 11 et + 17 MPa) et permet également d'abaisser la température d'activation à 30°C pour atteindre 25 MPa pour les deux liants étudiés.

La Figure 3b présente les résistances mécaniques à 28 jours ($f_{c,28d}$) des bétons S70 et LC3_S60 en fonction des leviers. Une ligne horizontale est placée à 63 MPa, soit la $f_{c,28d}$ à atteindre pour obtenir un béton de classe C45/55. L'ensemble des bétons S70 permettent d'atteindre la valeur imposée par le cahier des charges, indépendamment des leviers. A l'inverse, seuls deux bétons LC3_S60 atteignent cette valeur.

La Figure 3b permet également d'observer l'impact des leviers sur les $f_{c,28d}$. Une activation thermique au jeune âge fait chuter les $f_{c,28d}$ par rapport aux bétons conservés à température ambiante (T20) après coulage. Cette baisse des $f_{c,28d}$ est plus problématique pour les bétons LC3_S60 aucun béton activés à 40°C ou plus n'atteint 63 MPa. En revanche, une utilisation d'activateur chimique (xxx_Std_Acc) ou de LHF plus fin (xxx_Fin_NoAcc) permettent d'améliorer les $f_{c,28d}$.

L'étude a ainsi montré qu'il était possible de réduire sensiblement le poids carbone d'un m³ de béton tout en maintenant les $f_{c,24h}$ et les $f_{c,28d}$. Pour cela, une utilisation des leviers est nécessaire. Dans la partie suivante, l'impact des leviers est étudié à l'échelle de pâtes, afin notamment d'évaluer les avancements de réaction et d'éventuels phénomènes de ralentissement de l'hydratation avec l'utilisation de leviers par rapport au mélange sans activation.

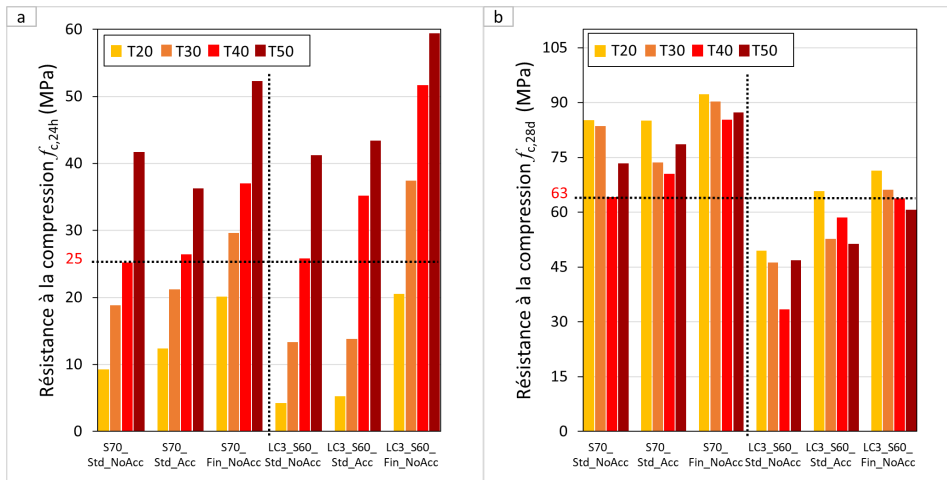


FIGURE 3. Résistance mécanique à la compression à (a) 24 heures et (b) 28 jours de bétons S70 et LC3_S60.

B. Impact des leviers sur l'hydratation de pâtes S70 et LC3_S60

a. Mesure de l'avancement des réactions à 24 heures

Après avoir confirmé la corrélation entre les f_c à l'échelle de la pâte de ciment et du béton (non présentée ici), la Figure 4 présente respectivement les $f_{c,24h}$ obtenues sur pâte en fonction de la chaleur cumulée à 24 heures obtenue par essais calorimétriques isothermes (Q_{24h} , Figure 4a) et en fonction de la quantité d'eau liée obtenue par analyse thermogravimétrique (ATG) à 24 heures (BW_{24h} , Figure 4b).

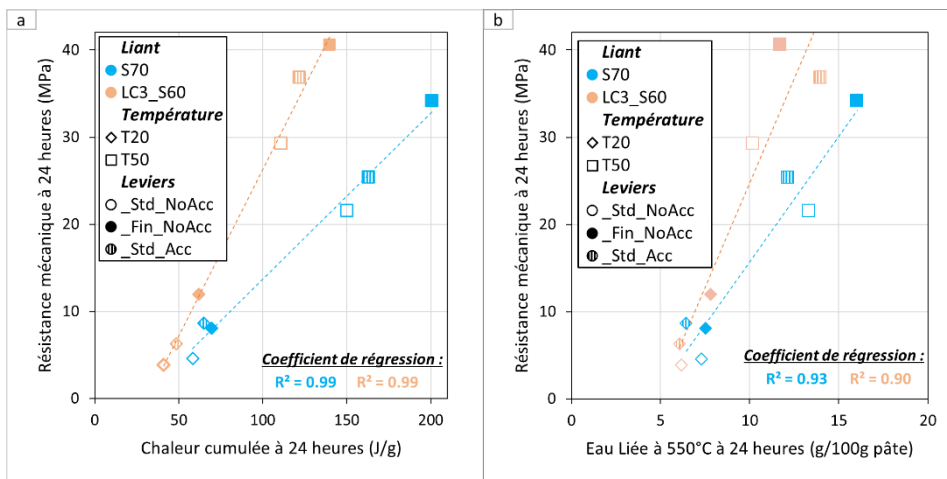


FIGURE 4. Corrélation entre les résistances mécaniques à la compression sur pâtes ($f_{c,24h}$) et (a) la chaleur cumulée à 24 heures (Q_{24h}) et (b) la quantité d'eau liée à 24 heures (BW_{24h}).

L'analyse des $f_{c,24h}$ montre que l'impact des leviers est le même à l'échelle de la pâte de ciment et du béton. En effet, les pâtes à 20°C (xxx_Std_NoAcc_T20) possèdent les $f_{c,24h}$ les plus faibles pour les deux liants. L'activation thermique à 50°C (xxx_Std_NoAcc_T50) est le levier le plus impactant, suivi de la finesse du LHF (xxx_Fin_NoAcc_T20) et enfin de l'activation chimique (xxx_Std_Acc_T20), levier le moins efficace pour améliorer les performances au jeune âge. Enfin, comme observé sur béton, les pâtes combinant activation thermique et utilisation de LHF fin (xxx_Fin_NoAcc_T50) possèdent les $f_{c,24h}$ les plus élevées.

La Figure 4a présente le lien entre $f_{c,24h}$ sur pâte et chaleur cumulée Q_{24h} . Ainsi, plus le dégagement de chaleur est important, plus la résistance mécanique en compression est élevée. Il se dégage même une corrélation linéaire avec un $R^2 = 0,99$ entre ces deux paramètres pour les deux matrices ; ce R^2 étant calculé à partir des six pâtes de chacune des matrices. L'augmentation des $f_{c,24h}$ en cas d'action des leviers peut ainsi être expliquée par une intensification des réactions d'hydratation.

La Figure 4b présente les $f_{c,24h}$ en fonction de la quantité d'eau liée entre 10 et 550°C à 24 heures (BW_{24h}). Cette valeur correspond à la masse d'eau liée par la formation des phases C-(A)-S-H, ettringite, portlandite et AFm (*Aluminate Ferrite mono*). Pour les deux matrices, l'augmentation des $f_{c,24h}$ en cas d'action des leviers semble associée à une formation de produits d'hydratation en quantité plus importante, illustrée par une valeur d'eau liée BW_{24h} plus élevée. Là encore, une forte corrélation entre $f_{c,24h}$ et BW_{24h} est obtenue, avec des coefficients de régression R^2 respectifs de 0.93 et 0.90 pour les pâtes S70 et LC3_S60.

La Figure 5a présente les degrés de réaction α à 24 heures des pâtes S70 et LC3_S60 en fonction des leviers ; ce degré de réaction, obtenu par analyses des essais calorimétriques, correspond au rapport de la chaleur cumulé à 24 heures (ou 28 jours) sur la chaleur dégagée par les pâtes de référence (xxx_Std_NoAcc_T20) à un temps infini. Ainsi, les deux références ont un degré de réaction similaire ($\alpha \approx 33\%$) à 24 heures. En cas d'activation chimique ou d'utilisation de LHF Fin, des augmentations du degré sont observées ($\approx +10\%$), mais les augmentations les plus importantes sont observées en cas d'activation thermique à 50°C ($\approx +55\%$). Les gains de $f_{c,24h}$ observés à l'échelle des bétons en cas d'action des leviers peuvent ainsi être liés à un avancement plus important des réactions d'hydratation.

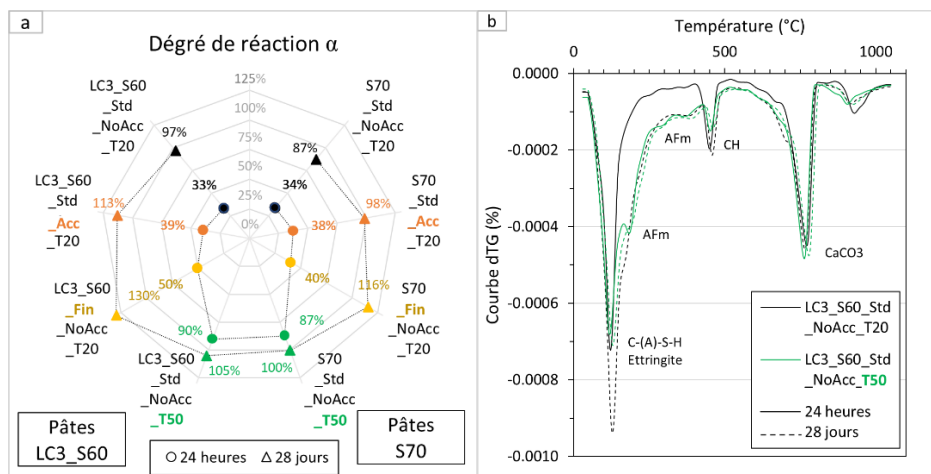


FIGURE 5. (a) Impact des leviers sur le degré de réaction de pâtes S70 et LC3_S60. (b) Impact d'une activation thermique à 50°C sur l'assemblage de phase d'une pâte LC3_S60.

b. Assemblages de phases à 24 heures

La Figure 6 présente les spectres DRX de pâtes S70 et LC3_S60 après 24 heures d'hydratation en fonction des leviers. Les pâtes de référence (xxx_Std_NoAcc_T20) sont notamment formées de C-(A)-S-H, d'ettringite (AFt) et de portlandite (CH), ce qui a été confirmé par les essais ATG. Les essais montrent également la formation de phases AFm à 24 heures, des hémicarboaluminates (Hc) pour la pâte S70 et des monosulfoaluminates (Ms) pour la pâte LC3_S60.

En cas d'activation chimique (xxx_Std_Acc_T20) ou d'utilisation de LHF fin (xxx_Fin_NoAcc_T20), ces quatre mêmes phases sont formées. Néanmoins, les quantités d'hydrates sont plus importantes, comme l'a montré l'étude des quantités d'eau liée BW_{24h} (cf. Figure 4b). En revanche, l'assemblage de phase est modifié en cas d'activation thermique à 50°C (xxx_Std_NoAcc_T50) avec une absence (S70) ou une réduction (LC3_S60) de la quantité d'ettringite (AFt) et une prédominance d'AFm type monosulfoaluminates (Ms) dans les deux cas. Il semble aussi que des monocarboaluminates (Mc) soient formés en cas d'activation thermique, mais en moins grande quantité que les Ms.

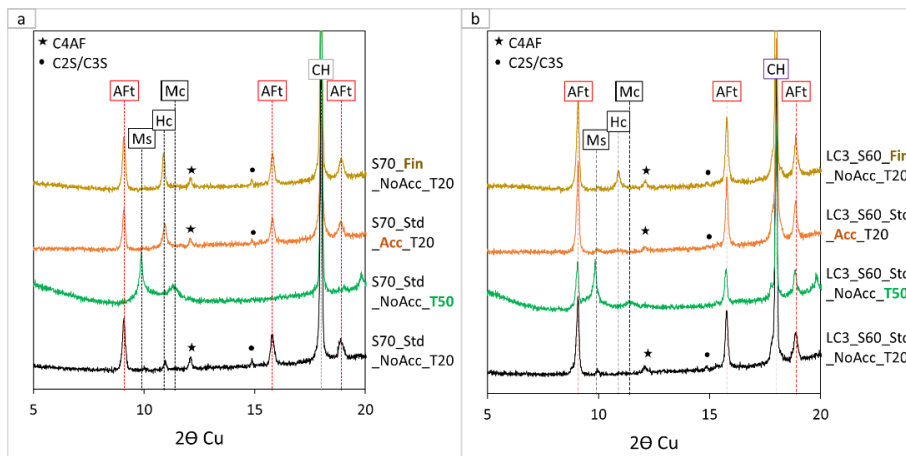


FIGURE 6. Impact des leviers sur l'hydratation de pâtes (a) S70 et (b) LC3S60 selon les spectres DRX à 24h.

c. Impact d'une activation thermique sur l'hydratation à 28 jours

La Figure 3b a montré qu'une activation thermique des bétons S70 et LC3_S60 avait un impact négatif sur les $f_{c,28d}$. En effet, l'évolution des f_c entre 24 heures et 28 jours d'un béton non activé (T20) est plus importante que pour le même béton activé à 50°C (T50).

La Figure 5b montre les courbes DTG de pâtes LC3_S60 après 24 heures (trait plein) et à 28 jours (pointillés). Pour la pâte LC3_S60 de référence (LC3_S60_Std_NoAcc_T20), il semble que les quantités de C-(A)-S-H, ettringite et AFm augmentent au cours de l'hydratation. A l'inverse, les courbes à 24 heures et 28 jours de la pâte activée à 50°C (LC3_S60_Std_NoAcc_T50) sont confondues, traduisant une absence d'évolution. Ce point est confirmé par l'évolution de la quantité d'eau liée BW entre ces deux échéances : + 4.4 g/100g de pâte sans activation thermique contre + 0.4 g/100g en cas d'activation à 50°C. Un ralentissement des réactions semble apparaître lorsqu'une activation thermique est mise en place au jeune âge.

La Figure 5a, qui représente les degrés de réaction α à 24 heures et 28 jours de l'ensemble des pâtes S70 et LC3_S60, semble confirmer l'hypothèse du blocage des réactions d'hydratation en cas d'activation thermique au jeune âge. En effet, l'évolution du degré de réaction α est plus importante pour les pâtes sans activation thermique (T20) (en moyenne + 68 %) par rapport aux deux pâtes activées à 50°C (+ 14 %).

Nota : Un degré de réaction supérieur à 100% est atteint quand la chaleur cumulée d'une pâte à 28 jours dépasse la chaleur cumulée de la pâte de référence à un temps supposé infini.

CONCLUSION

L'objectif de cette étude était d'obtenir des bétons bas-carbone autoplaçants de classe C45/55 ayant une résistance mécanique à la compression d'au moins 25 MPa à 24 heures, afin de correspondre à un cahier des charges de préfabricant. Les conclusions suivantes peuvent être faites :

- Les liants binaires CEM I + LHF (SXX, équivalent à des CEM III) ou les liants LC3 seuls ou combinés avec du LHF peuvent respecter les demandes du cahier des charges.
- Selon le liant, le poids carbone d'un m³ de béton peut être réduit de - 40 à - 70 % par rapport à un béton formulé avec du CEM I. De légères variations sont observées sur le poids carbone de matrice activées thermiquement ou utilisant un LHF plus fin. Au contraire, une augmentation non négligeable est observée en cas d'activation chimique.
- L'utilisation de *leviers* est nécessaire pour atteindre 25 MPa à 24 heures avec ces liants. Parmi ces leviers, l'activation thermique est le plus efficace pour améliorer les résistances au jeune âge, suivi de l'utilisation de LHF fin et de l'utilisation d'accélérateur de LHF. Plus le poids carbone est bas, plus l'action des leviers doit être forte, ce qui peut être expliqué par la baisse de la quantité de clinker.
- L'action des leviers impacte les mécanismes d'hydratation à 24 heures, avec notamment un avancement du degré de réaction illustré par l'intensification de phénomènes d'hydratation et une formation d'hydrates en plus grande quantité. Ces changements sont les plus marqués en cas d'activation thermique.
- L'application des leviers a également des conséquences sur les résistances mécaniques à 28 jours. Ces impacts sont positifs pour une utilisation de LHF fin ou une utilisation d'accélérateur de LHF, mais sont négatifs pour une activation thermique. Ce levier semble en effet conduire à un ralentissement des réactions d'hydratation.

REFERENCES

- Ademe. Bilan des émissions de gaz à effet de serre [WWW Document]. URL bilans-ges.ademe.fr
- Castellano, C.C., Bonavetti, V.L., Donza, H.A., Irassar, E.F., 2016. The effect of w/b and temperature on the hydration and strength of blast-furnace slag cements. *Construction and Building Materials* 111, 679–688. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.001>
- Cyr, M., Patapy, C., 2016. Synergic effects of activation routes of ground granulated blast-furnace slag (GGBS) used in the precast industry. <https://doi.org/hal-01344929>
- Diogen - Constituants des bétons et poids carbone [WWW Document], 2023. URL <http://www.diogen.fr/index.php/constituants-du-beton> (accessed 1.27.23).
- Han, Y., Lin, R., Wang, X.-Y., 2021. Performance and sustainability of quaternary composite paste comprising limestone, calcined Hwangtoh clay, and granulated blast furnace slag. *Journal of Building Engineering* 43. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102655>
- Mishra, G., Emmanuel, A.C., Bishnoi, S., 2019. Influence of temperature on hydration and microstructure properties of limestone-calcined clay blended cement. *Mater Struct* 52, p91. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1390-5>
- Sebaibi, N., Boutouil, M., 2020. Reducing energy consumption of prefabricated building elements and lowering the environmental impact of concrete. *Engineering Structures* 213, n°110594. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110594>
- Turner, L.K., Collins, F.G., 2013. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymers and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials* 43, p.125–130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>
- Zhu, H., Chen, W., Cheng, S., Yang, L., Wang, S., Xiong, J., 2022. Low carbon and high efficiency limestone-calcined clay as supplementary cementitious materials (SCMs): Multi-indicator comparison with conventional SCMs. *Construction and Building Materials* 341. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127748>