

Bétons bas carbone à base de liants ternaires : propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité.

Lucas MOSSER^{1,2}, Eric GARCIA DIAZ¹, Patrick ROUGEAU², François JACQUEMOT²

¹ *Équipe Durabilité des éco-Matériaux et Structures, LMGC UMR-5508*

² *Direction Matériaux et Economie Circulaire, Cerib, 28230 Epernon, France*

ABSTRACT Au sein de cette étude sont présentées des formulations de bétons bas carbone (empreinte carbone < 150 kg.éq.CO₂/m³) destinées aux produits préfabriqués. Deux liants ternaires ont été formulés : « MK » à base de ciment Portland, métakaolin et addition calcaire ; « LL » à base de ciment Portland et de deux additions calcaires. Afin de pallier l'effet de dilution entraîné par la substitution du ciment (de 65 à 70 %) deux leviers matériau (réduction d'eau et adjuvantation) et un concernant le process (cure thermique) ont été employés. Les propriétés rhéologiques, mécaniques ainsi que de durabilité des bétons bas carbone (notés B_{MK} et B_{LL}) ont été caractérisées et comparées à celles d'une référence. Hormis une viscosité plus importante pour B_{MK}, les propriétés obtenues à l'état frais sont comparables à celles de la référence. Les résistances en compression obtenues au jeune âge et à 28 jours pour B_{MK} (C40/50) sont proches de celles de la référence à base de ciment Portland. Celles obtenues pour B_{LL} sont inférieures (C25/30) mais potentiellement suffisantes pour de nombreuses applications. Enfin, les propriétés de durabilité (résistivité, diffusion des ions chlorure, vitesse de carbonatation et porosité accessible à l'eau) de B_{MK} et B_{LL} sont comparables voire supérieures à celles de la référence (à l'exception de la vitesse de carbonatation). Ces bétons bas carbone ont été qualifiés vis-à-vis de la classe d'exposition XC3/XC4 en s'inspirant de l'approche performantielle, telle que définie dans le fascicule FD P 18-480.

Keywords Béton bas carbone, Métakaolin, Addition calcaire, Propriétés mécaniques, Durabilité

I. INTRODUCTION

Les problématiques actuelles de changement climatique imposent la décarbonation de l'ensemble des secteurs d'activité. L'Industrie du Béton participe à cet effort de réduction et propose des solutions efficaces afin de réduire l'empreinte carbone de ses produits. Les contraintes de production de l'Industrie du Béton, liées au démoulage et à la manutention des produits, nécessitent d'atteindre des résistances mécaniques élevées à très jeune âge (moins de 24 h). Aujourd'hui, des ciments de types CEM I et CEM II/A sont souvent choisis. Le clinker étant le responsable majoritaire de l'empreinte carbone du béton, sa substitution par des additions minérales, tels que des métakaolins et des additions calcaires, constitue une solution potentielle. Les gisements sont en effet nombreux (Scrivener et al., 2018)), d'où le développement récent des liants LC3 (50 % de clinker, 30 % de métakaolin, 15 % d'addition calcaire et 5 % de gypse). À l'aide de ce liant, Dhandapani et al. ont pu formuler un béton ayant une résistance à la compression de 60 MPa à 28 jours (E/L de 0,4, cubes 10 x 10 x 10 cm) (Dhandapani et al., 2018). Dans la littérature, les taux de substitution du ciment (ou du clinker) par ces additions minérales peuvent aller jusqu'à 40 % voire 60 % (Antoni et al., 2012 ; Dhandapani et Santhanam, 2017 ; Medjigbodo et al., 2018 ; Tironi et al., 2015). Pour de nombreux auteurs, cette substitution permet d'atteindre des résistances

proches de celles obtenues avec un ciment Portland à partir de 28 jours, tandis que pour d'autres, les résistances mécaniques sont inférieures, du fait de l'effet de dilution. Yu et al. (2021) ont substitué jusqu'à 80 % du ciment par ces additions minérales mais n'ont pas pu atteindre des résistances équivalentes à celles d'une référence à base de ciment Portland (Yu et al., 2021). D'autres publications ont porté sur la substitution du ciment par des additions calcaires. Pour des taux de substitution allant de 5 % à 80 %, il est généralement observé une amélioration des propriétés mécaniques jusqu'à un taux de 10 à 15 % puis une réduction de ces dernières (Lawrence et al., 2005 ; Moon et al., 2017 ; Nehdi et al., 1996 ; Ramezani pour et Hooton, 2014 ; Varhen et al., 2016). Une augmentation de la compacité (optimisation du squelette granulaire, réduction de la quantité d'eau par adjuvantation) et une mise en place par des outils de serrage puissants, propres aux produits préfabriqués en usine, pourraient permettre néanmoins de pallier ces pertes de performances.

Le cadre normatif actuel est limitant en termes de compositions liantes autorisées et d'emploi des additions. Les règles imposées par la norme NF EN 206/CN vis-à-vis des classes d'exposition, au travers des concepts de coefficient k et de rapport $A/(A+C)$, limitent la substitution du ciment par des additions minérales. Néanmoins, une voie pour la validation d'une formulation de béton alternative réside dans l'application de l'approche performantielle, telle que décrite dans le fascicule FD P 18-480, via la réalisation d'essais de durabilité.

L'objectif de cette étude est la formulation et la caractérisation de bétons bas carbone par une réduction importante de la teneur en clinker (65 à 70 %). Il n'y a pas aujourd'hui de définition précise pour cette appellation. Il a été décidé de fixer un objectif d'empreinte carbone inférieure à 150 kg.éq.CO₂/m³. Ces formulations étant destinées à une application de produit préfabriqué (Murs à Coffrage Intégré, MCI), le cahier des charges suivant a été établi : affaissement au cône d'Abrams de classe S4 (16 à 21 cm) pendant 30 min à 1 heure, résistance à la compression sur cubes 10 x 10 x 10 cm de 14 MPa à 8 heures, classe de résistance C40/50, classe d'exposition XC3/XC4.

Les liants présentés ont été développés dans un premier temps au travers d'une étude sur mortiers. Une fois mis au point, ils ont été appliqués à l'échelle du béton. Afin d'atteindre ces propriétés, des leviers matériaux (réduction du rapport $E_{u,eff}/L_{iant,total}$, adjuvantation) et process (traitement thermique) ont été actionnés. Les bétons présentés sortant du cadre normatif, ils ont été qualifiés vis-à-vis de la classe d'exposition XC3/XC4 via l'approche performantielle. À titre comparatif, un béton de référence à base de 80 % de CEM I 52,5 R et de 20 % d'addition calcaire a également été fabriqué et caractérisé.

II. Constituants et méthodes d'essais

A. Constituants utilisés

Un ciment Portland CEM I 52,5 R (Port-La-Nouvelle, France), un métakaolin flash Mk (Fumel, France) ainsi que deux additions calcaires L₁ (Ferques, France) et L₂ (Salses, France) ont été utilisés. La maniabilité des bétons frais a été ajustée à l'aide d'un superplastifiant haut réducteur d'eau SP à base de polymères acryliques. Pour la formulation incorporant le métakaolin, un additif « inerteur d'argiles » IA, permettant de maximiser l'effet du superplastifiant, a également été ajouté. Deux granulats calcaires concassés, un sable 0/4 mm ainsi qu'un gravillon 6/14 mm, constituent le squelette granulaire. Des caractéristiques physico-environnementales des différents constituants

sont récapitulées dans le Tableau 1. Les empreintes carbone des différents constituants proviennent d'ACV réalisées par divers organismes (sources : Argeco Développement, 2018 ; ATILH, 2017 ; CCA Europe, 2021 ; EFCA, 2021 ; UNPG, 2017) tandis que les autres propriétés proviennent des Fiches Techniques Produits établies par les fournisseurs.

TABLEAU 1. Propriétés physiques et environnementales des différents constituants.

	Ciment	Mk	L ₁	L ₂	Granulats		SP	IA
d ₅₀ (µm)	14	12,4	4,28	2,94	0-4	6-14		
Masse vol. (g/cm ³)	3,13	2,61	2,74	2,73	2,55	2,6	1,07	1,10
Empreinte carbone (kg éq CO ₂ /t)	766	139	43,9	56,4	2,60	2,60	1 530	1 530

B. Malaxage, confection et conservation des éprouvettes

Un malaxeur planétaire a permis la réalisation de deux gâchées d'environ 80 litres. La première (G1) a permis la fabrication d'éprouvettes pour les essais mécaniques (compression, fendage et module d'Young). La seconde (G2) a permis la réalisation d'éprouvettes pour les essais de durabilité. Afin d'assurer la comparabilité des bétons, des éprouvettes pour la mesure des résistances en compression ont également été confectionnées lors de la seconde gâchée. Les compositions réelles des différents bétons formulés sont présentées au Tableau 2. La référence « B_{REF} » est constituée d'un mélange de 80 % de ciment et 20 % d'addition calcaire L₁. Elle a été formulée de sorte à respecter l'approche prescriptive définie par la norme EN 206/CN. Les deux liants sont un ternaire : « B_{MK} », mélange de 30 % de ciment, 20 % de métakaolin et 50 % d'addition calcaire L₂, et un second « ternaire », « B_{LL} », mélange de 35 % de ciment, 35 % de L₁ et 30 % de L₂.

TABLEAU 2. Compositions réelles des bétons fabriqués au cours de l'étude.

Compositions réelles (kg/m ³)	B _{REF}		B _{MK}		B _{LL}	
	G1	G2	G1	G2	G1	G2
Sable 0/4	802	799	825	829	832	826
Gravillon 0/4	1 021	1017	1 051	1056	1 059	1051
CEM I 52,5 R	318	317	123	123	144	143
Métakaolin flash			82	82	0	
Addition calcaire L ₁	79,5	79			144	143
Addition calcaire L ₂			204,5	205,5	124	123
Superplastifiant	3	2,8	3,2	3,5	3,3	3,3
Inerteur d'argile			0,8	0,9		
Eau efficace	160,4	159,7	122,6	123,4	125,3	123
E _{eff} /L _{tot}	0,40	0,40	0,30	0,30	0,30	0,30
Volume de pâte (L)	299	296	280	283	277	276

Les éprouvettes ont été coulées en deux temps en serrant le béton frais à l'aide d'une table vibrante aimantée (du type de celles utilisées dans les usines de préfabrication) à chaque étape de remplissage. Elles ont ensuite été placées dans une enceinte de traitement thermique préchauffée. Le béton de référence B_{REF-G1} a suivi un traitement à une température de consigne fixée à 30 °C pendant 7 heures (cycle réalisé en usine) tandis que les bétons bas carbone ont été conservés à 40 °C pendant 8 heures. Pour la seconde gâchée G2, tous les bétons ont été traités à 40 °C pendant

8 heures afin que les résultats des essais de durabilité ne soient influencés que par les formulations. En fin de traitement thermique, les éprouvettes qui n'ont pas été directement testées ont été conservées en salle humide à une température de 20 °C et une humidité relative supérieure à 95 %.

C. Essais réalisés à l'état frais

La maniabilité des bétons frais a été évaluée par un essai d'affaissement au cône d'Abrams selon la norme NF EN 12350-2 et un essai d'écoulement au cône inversé selon la norme XP P 18-469 adaptée pour l'étude : les étapes de piquage du béton frais n'ont pas été réalisées car créant des « bouchons » de granulats en sortie du cône. Ces essais ont été réalisés à intervalles de 15 minutes pendant les 30 minutes suivant la vidange du malaxeur. La masse volumique à l'état frais ainsi que l'air occlus (à l'aide d'un aéromètre) ont été mesurés selon les normes NF EN 12350-6 et NF EN 12350-7.

D. Essais réalisés à l'état durci

Les essais réalisés à l'état durci ont nécessité la fabrication de différents types d'éprouvettes : cubes 10 x 10 x 10 cm (résistance à la compression selon NF EN 12390-3) et cylindres 11 x 22 cm (résistance au fendage selon NF EN 12390-6, module d'Young selon NF EN 12390-13, porosité accessible à l'eau selon NF P 18-459, résistivité selon XP P 18-481, migration des ions chlorures selon XP P 18-462 et carbonatation accélérée selon XP P 18-458). Les résultats de résistance à la compression obtenus ont été convertis en résultats sur cubes 15 x 15 x 15 cm selon les équations données au paragraphe NA.5.5.1.1 de la norme NF EN 206 CN (2014). Selon l'Eurocode 2, la résistance à la compression caractéristique peut alors être estimée à partir de la résistance à la compression moyenne réduite de 8 MPa. Comme défini dans le fascicule FD P 18-480, des valeurs caractéristiques V_{carac} de vitesse de carbonatation accélérée et de porosité accessible à l'eau ont également été calculées à partir des résultats moyens V_{moy} multipliés par 1,5 x l'écart type (équation (1)).

$$V_{carac} = 1,5 * \sigma + V_{moy} \quad (1)$$

E. Empreinte carbone

L'empreinte carbone matière des différents bétons de l'étude, en kg.éq.CO₂/m³, a été calculée comme la somme des empreintes carbones de chaque constituant multipliées par leurs masses sèches au sein du mélange (pour un volume d'1 m³). Cette empreinte ne prend en compte que les étapes de production des différents constituants (en ACV : étapes A1 à A3). L'empreinte carbone relative à chaque traitement thermique a été calculée. Des compteurs électriques ont été installés sur les étuves afin de mesurer leur consommation en kWh, de l'entrée des éprouvettes jusqu'à leur sortie. Les consommations électriques respectives des traitements T₁ (30 °C pendant 7 h) et T₂ (40 °C pendant 8 h) de 2,1 kWh et 3 kWh ont été mesurées. En considérant une empreinte carbone de 0,105 kg.éq.CO₂/kWh (données CERIB) et un volume de béton chauffé maximal d'environ 70 litres pendant l'étude, des empreintes carbones respectives de 3,2 kg eq CO₂/m³ de béton traité à 30 °C et 4,5 kg eq CO₂/m³ de béton traité à 40 °C ont été calculées. Les empreintes carbones totales (traitement thermique compris), des bétons B_{REF}, B_{MK} et B_{LL} sont estimées respectivement à 260, 133 et 138 kg.éq.CO₂/m³.

III. Résultats et discussions

A. Propriétés à l'état frais

Les données issues des mesures réalisées à l'état frais pour les deux gâchées sont présentées dans le Tableau 3.

TABLEAU 3. Propriétés mesurées à l'état frais.

Mesure		B _{REF}		B _{BMK}		B _{LL}	
		G1	G2	G1	G2	G1	G2
Masse volumique (kg/m ³)		2 412	2 403	2 440	2 452	2 461	2 441
Air occlus (%)		0,7	0,3	1,1	1,5	0,8	0,8
Affaissement au cône d'Abrams (cm)	t = 0 min	18,5	22	21	21	20,5	22,5
	t = 15 min	15	n.m.	16	19	18	21
	t = 30 min	13	11,5	7,5	16,5	15,5	17
Écoulement au cône inversé (s)	t = 0 min	4	3	9	33	5	8
	t = 15 min	5	5	11	21	7	7
	t = 30 min	4	5	11	23	5	3

Note : n.m. = « non mesuré »

Les masses volumiques à l'état frais des bétons bas carbone sont plus élevées du fait de la réduction de la teneur en eau. Les pourcentages d'air occlus mesurés pour B_{REF} et B_{LL} sont également proches et B_{BMK} présente un pourcentage plus important. Ceci peut s'expliquer par des teneurs en adjuvants plus importantes que celles de B_{LL} et B_{REF}, leur incorporation entraînant généralement de l'air au sein du béton frais. Malgré la diminution du rapport E/L, un affaissement de classe S4 (16 à 21 cm) a été atteint pour les trois bétons. Le maintien de cette classe d'affaissement pendant 30 minutes n'a pas été observé pour les gâchées G1. Excepté pour B_{REF}, les gâchées G2 ont présenté des affaissements de classe S4 à toutes les échéances de test. Le béton avec LL présente une perte d'affaissement au cours du temps moins prononcée que les autres bétons.

Les durées d'écoulement au cône inversé évoluent peu au cours du temps pour l'ensemble des gâchées. Les valeurs maximales sont obtenues pour B_{BMK}. Les durées mesurées pour B_{REF} et B_{LL} sont proches. Les teneurs en adjuvants de ces derniers étant similaires et la teneur en eau de B_{LL} étant inférieure à celle de B_{REF}, il peut être estimé que les additions calcaires utilisées fluidifient fortement le mélange. Les mesures réalisées pour B_{BMK-G2} sont supérieures à celles de B_{BMK-G1}, évoquant une viscosité plus importante. Elle peut être due à une quantité d'eau en réalité plus faible pour B_{BMK-G2}, ce qui expliquerait également les résistances plus élevées mesurées au jeune âge.

Les systèmes à base de liants ternaires étudiés présentent des affaissements satisfaisants mais des viscosités plus importantes, et notamment lorsque le métakaolin est employé. Plusieurs pistes pourraient permettre d'expliquer ce constat. Tout d'abord, les métakaolins sont connus pour leur demande en eau élevée (Diederich et al., 2013 ; Murat et Bachiorrini, 1982). À teneur en eau constante, l'ajout de métakaolin conduit à une quantité inférieure d'eau disponible pour le mouillage des particules. Aussi, ce type de mélange (adjuvantation, faible teneur en eau et métakaolin) peut entraîner la formation d'une pâte au comportement rhéoépaississant (Cyr et al., 2000). Une teneur en eau inférieure pour B_{BMK-G2} par rapport à B_{BMK-G1}, peut expliquer ce comportement. Ensuite, la géométrie des particules de métakaolin (plaquettes anguleuses) réduit

leur mobilité dans la suspension, contrairement à des particules sphériques (Diederich et al., 2013 ; Sakai et al., 1997). Enfin, la diminution de la teneur en eau réduit les distances interparticulaires dans le mélange en suspension et favorise les interactions entre particules dans leurs déplacements respectifs lors de l'écoulement (Cyr, 1999).

B. Propriétés mécaniques

Les mesures de résistances à la compression, au fendage ainsi que de module d'élasticité sont présentées au Tableau 4. Les résultats de compression ont été représenté dans le diagramme en Figure 2.

TABLEAU 4. Propriétés mécaniques des bétons réalisés.

Mesure	Échéance	B _{REF}		B _{MK}		B _{LL}	
		G1	G2	G1	G2	G1	G2
Résistance à la compression moyenne sur cubes 10 x 10 x 10 cm (MPa)	8 heures	19,1	30	16,2	19,8	17,8	16,5
	24 heures	39,8	-	24,8	-	25,7	-
	7 jours	61	-	49,1	-	37,4	-
	28 jours	69,5	67,2	61,6	66,5	43,2	41,6
	90 jours	73,5	-	65,6	-	44,9	-
Résistance au fendage moyenne sur cylindres 11 x 22 cm (MPa)	8 heures	2,33	-	1,30	-	1,47	-
	28 jours	3,38	-	5,13	-	3,12	-
Module d'Young (GPa)	28 jours	37,9	-	39,7	-	35,4	-

Les résistances atteintes à 8 heures sont supérieures au seuil de 14 MPa. La différence de traitement thermique (augmentation de 10 °C) entre B_{REF-G1} et B_{REF-G2} provoque une augmentation considérable des résistances à 8 heures. Ce résultat souligne l'apport déterminant des procédés d'activation thermique.

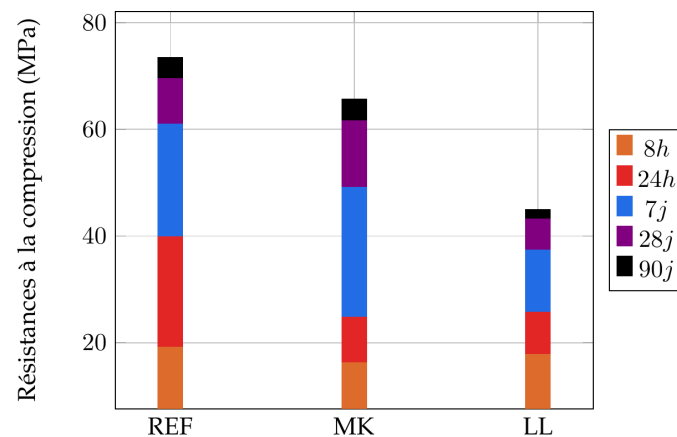


FIGURE 2. Évolution des résistances à la compression au cours du temps.

L'évolution des résistances en compression jusqu'à 24 heures est similaire pour B_{MK} et B_{LL}. À cette échéance, le développement des résistances est principalement dû à l'hydratation du ciment (Tironi et al, 2015). La résistance à la compression évolue très peu jusqu'à 90 jours pour B_{LL}, atteignant une limite d'environ 40 MPa à partir de 7 jours. Pour B_{MK}, une augmentation significative peut être observée entre 24 heures et 7 jours, poursuivie jusqu'à 28 jours pour ensuite évoluer peu jusqu'à 90

jours. La réaction pouzzolanique entre le métakaolin et la portlandite issue de l'hydratation du ciment semble intervenir précocement, de la même manière qu'observé par (Antoni et al., 2012 ; Krishnan et al., 2019 ;). Les bétons B_{REF} et B_{MK} peuvent être qualifiés comme étant de classe C40/50 tandis que B_{LL} peut être qualifié comme respectant la classe C25/30. Concernant les résistances au fendage, B_{MK} et B_{LL} présentent des valeurs plus faibles que B_{REF} en fin de traitement thermique. La résistance au fendage de B_{MK} est cependant supérieure à celle de B_{REF} à 28 jours tandis que celle de B_{LL} est légèrement inférieure. Les valeurs de modules d'élasticité obtenues pour B_{REF} et B_{MK} sont similaires, légèrement plus faible pour B_{LL}.

C. Durabilité

Les résultats issus des différents essais de durabilité réalisés après 90 jours de cure humide ont été regroupés au sein du Tableau 5.

TABLEAU 5. Propriétés de durabilité des bétons réalisés.

Mesure		B _{REF}	B _{MK}	B _{LL}
Porosité à l'eau (%)	Moyenne	13,9	12,0	12,4
	Caractéristique	15,0	12,9	13,3
Porosité à l'eau caractéristique/Fraction volumique de pâte (%)		50,7	45,6	48,2
Résistivité ($\Omega.m$)		60,3	439	45,7
Coefficient de diffusion des ions chlorures (m^2/s)		17.10^{-12}	$0,9.10^{-12}$	70.10^{-12}
Vitesse de carbonatation accélérée ($mm/(jour)^{0,5}$)	Moyenne	0,3	0,9	1,4
	Caractéristique	0,41	1,24	1,92

Les porosités accessibles à l'eau de B_{MK} et B_{LL} sont inférieures à B_{REF}, ce qui peut être dû à la réduction du rapport E/L (Bucher et al., 2017). La porosité plus faible de B_{MK} par rapport à B_{LL} peut quant à elle être due à la formation d'une matrice plus dense par la réaction pouzzolanique.

La résistivité la plus élevée est obtenue pour B_{MK} tandis que la plus faible est mesurée pour B_{LL}. Dhandapani et al. (2018) avaient également mesuré une résistivité supérieure pour un béton à base de LC3 par rapport à un béton à base de ciment Portland. Le constat opposé peut être fait pour le coefficient de diffusion des ions chlorures.

Les vitesses de carbonatation accélérée mesurées pour B_{MK} et B_{LL} sont plus élevées que pour REF. Une faible teneur en portlandite (soit par effet de dilution, soit par réaction pouzzolanique dans le cas où du métakaolin est utilisé) de ces deux bétons à 90 jours peut être à l'origine de cette tendance (Medjigbodo et al., 2018). La plus faible vitesse de carbonatation de B_{MK} par rapport à B_{LL} peut quant à elle être liée à la formation d'une matrice cimentaire plus dense pour B_{MK} et d'un réseau poreux plus fin (Antoni et al., 2012 ; Avet et Scrivener., 2018), constituant une barrière « physique » à la propagation du CO₂. Les hydrates autres que la portlandite participent également en partie à la fixation du CO₂ (Morandea et al., 2015). La formation d'une plus grande quantité de ces hydrates par la réaction pouzzolanique peut également participer à améliorer la résistance à la carbonatation du matériau et compenser la réduction de la teneur en portlandite (Papadakis et al., 1991)..

Afin de qualifier ces bétons par l'approche performantielle, les valeurs caractéristiques ont été calculées et comparées aux valeurs indiquées dans le fascicule FD P 18-480. Comme ces résultats ont été obtenus pour des gâchées de béton uniques, les écarts types ont aussi été calculés. Le

fascicule FD P 18-480 recommande dans ce cas de les estimer à l'aide de coefficients de variation (écart type divisé par la moyenne des résultats) de 20 % et 3 % pour la vitesse de carbonatation et la porosité respectivement. Par sécurité, des coefficients de 25 % et 5 % ont été appliqués. Les valeurs seuils indiquées dans le fascicule sont récapitulées dans le Tableau 6.

TABLEAU 6. Seuils indiqués dans le FD P 18-480 pour les classes d'exposition XC2 et XC4.

Classe d'exposition	Modulation selon la classe de résistance à 90 j ($\Omega.m$)	Porosité à l'eau caractéristique/Fraction volumique de pâte (%)		Vitesse de carbonatation accélérée ($mm/(jour)^{0,5}$)	
		DUP 50 ans	DUP 100 ans	DUP 50 ans	DUP 100 ans
XC2	< 100	65	60	3	2,6
XC4	< 100	50	50	1,8	1,8
	> 175	65	55	3	2,2

Via les essais de porosité à l'eau, les bétons avec MK et LL pourraient être validés vis-à-vis d'une classe d'exposition XC4. Cependant, pour cette classe d'exposition, le fascicule requiert que le béton testé soit au moins qualifié une fois lors d'un essai de carbonatation accélérée. Or, via cet essai, seul le béton avec MK est validé pour la classe XC4, tandis que B_{LL} serait validé pour la classe XC2. Bien entendu, cette validation nécessite la réalisation d'une étude complète au sens du FD P 18-480.

IV. Conclusion

La fabrication de bétons bas carbone (130 à 140 kg éq CO₂/m³) a été rendue possible par la substitution d'une forte teneur en ciment par des additions minérales. À la suite des différentes caractérisations réalisées, les conclusions suivantes peuvent être faites :

1. L'effet de dilution lié à un taux élevé de substitution du ciment peut être compensé par une réduction importante de la teneur en eau et une optimisation de l'adjuvantation.
2. L'application d'un traitement thermique apparaît déterminante pour les résistances au très jeune âge. Les solutions développées présentent ainsi des résistances élevées au jeune âge, permettant le démoulage et la manutention des produits fabriqués. L'augmentation modérée de la température de traitement thermique est un levier efficace pour améliorer les résistances au jeune âge sans perturber les cycles de production.
3. La réduction de la teneur en eau peut amener une modification des propriétés rhéologiques (augmentation de la viscosité) et de maintien d'ouvrabilité, notamment en présence de métakaolin. Le recours à une adjuvantation adaptée est nécessaire. L'utilisation d'additions calcaires de finesses adaptées peut permettre également de fluidifier le mélange.
4. Il est possible de réaliser des bétons bas carbone qui répondent à la fois aux contraintes des process industriels (résistance élevée au très jeune âge, mise en place) et aux attentes concernant la durabilité.
5. Les performances mécaniques et de durabilité des deux bétons développés mènent à des applications potentielles différentes. Le béton avec LL pourrait être adapté à la fabrication de produits en intérieur (non exposés). Le béton avec MK, bien plus performant en termes de résistances mécaniques et de durabilité, peut être destiné à des produits structurels exposés à des environnements agressifs. Des performances intermédiaires pourraient être obtenues en adaptant les proportions de MK et LL.

REFERENCES

- Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F., Scrivener, K. (2012). Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement and Concrete Research*, 42(12), 1579-1589. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>*
- Argeco Developpement (2018). Fiche DIOGEN : Métakaolin Flash Rose (NF P 18 513).
- ATILH (2017). Déclaration Environnementale de Produit : Ciments courants français CEM I.
- Avet, F., Scrivener, K. (2018). Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 107, 124-135. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.016>
- Bucher, R., Diederich, P., Escadeillas, G., Cyr, M. (2017). Service life of metakaolin-based concrete exposed to carbonation – Comparison with blended cement containing fly ash, blast furnace slag and limestone filler. *Cement and Concrete Research*, 99, 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.04.013>
- CCA Europe (2021). Dry ground calcium carbonate (GCC-Dry) Fine – Sector EPD. *Environmental Product Declaration*.
- Cyr, M. (1999). [Thèse]. Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires. INSA de Toulouse, Université de Sherbrooke. Français. (tel-00489599)
- Cyr, M., Legrand, C., Mouret, M. (2000). Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives. *Cement and Concrete Research*, 30 (9), 1477-1483. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00330-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00330-6)
- Dhandapani, Y., Santhanam, M. (2017). Assessment of pore structure evolution in the limestone calcined clay cementitious system and its implications for performance. *Cement and Concrete Composites*, 84, 36-47. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.012>
- Dhandapani, Y., Sakthivel, T., Santhanam, M., Gettu, R., Pillai, G. (2018). Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 107, 136-151. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.005>
- Diederich, P., Bücher, R., Mouret, M., Cyr, M., Escadeillas, G. (2013). Utilisation de métakaolins flash pour la formulation de bétons autoplaçants. *Quatorzième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF)²B*. Sherbrooke. <https://www.researchgate.net/publication/267451788>
- European Federation of Concrete Admixtures Associations a.i.s.b.i. (2021). Concrete admixtures : Plasticizers and Superplasticizers. *Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU)*.
- Krishnan, S., Emmanuel, A. C., Bishnoi, S. (2019). Hydration and phase assemblage of ternary cements with calcined clay and limestone. *Construction and Building Materials*, 222, 64-72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.123>
- Lawrence, P., Cyr, M., Ringot, E. (2005). Mineral admixture in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1092-1105. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.004>

- Medjigbodo, G., Rozière, E., Charrier, K., Izoret, L., Loukili, A. (2018). Hydration, shrinkage, and durability of ternary binders containing Portland cement, limestone filler and metakaolin. *Construction and Building Materials*, 183, 114-126. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.138>
- Moon, G. D., Oh, S., Jung, S. H., Choi, Y. C. (2017). Effects of the fineness of limestone powder and cement on the hydration and strength development of PLC concrete. *Construction and Building Materials*, 135, 129-136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.189>
- Morandeau, A., Thiéry, M., Dangla, P. (2015). Impact of accelerated carbonation on OPC cement paste blended with fly ash. *Cement and Concrete Research*, 67, 226-236. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.003>
- Murat, M., Bachiorrini, A. (1982). Corrélation entre l'état d'amorphisation et l'hydraulicité du métakaolin. *Bulletin de Minéralogie*, 105(5), 543-555. <https://doi.org/10.3406/bulmi.1982.7577>
- Nehdi, M., Mindess, S., Aïtcin, P. (1996). Optimization of high strength limestone filler cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 26(6), 883-893. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00071-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00071-3)
- Papadakis, V., Vayenas, C., Fardis, M. (1991). Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete. *ACI Materials Journal*, 88 (2), 186-196. Hal-03679518
- Ramezani pour, A. M., Hooton, R. D. (2014). A study on hydration, compressive strength, and porosity of Portland-limestone cement mixes containing SCMs. *Cement and Concrete Composites*, 51, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.006>
- Sakai, E., Hoshimo, S., Ohba, Y., Daimon, M. (1997). The fluidity of cement paste with various types of inorganic powders. *Proceedings of the 10th International Congress of the Chemistry of Cement*, Amarkai AB, Suède.
- Tironi, A., Castellano, C. C., Bonavetti, V., Trezza, M. A., Scian, A. N., Irassar, E. F. (2015). Blended Cements Elaborated with Kaolinitic Calcined Clays. *Procedia Materials Science*, 8, 211-217. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.066>
- UN Environment, Scivener, K., John, V. M., Gartner, M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2-26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Union Nationale des Producteurs de Granulats (2017). Module d'information environnementale de la production de granulats à partir de roches massives.
- Varhen, C., Dilonardo, I., de Oliveira Romano, R. C., Pileggi, R. G., de Figueiredo, A. D. (2016). Effect of the substitution of cement by limestone filler on the rheological behaviour and shrinkage of microconcretes. *Construction and Building Materials*, 125, 375-386. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.062>
- Yu, J., Wu, H., Mishra, D. K., Li, G., KY Leung, C. (2021). Compressive strength and environmental impact of sustainable blended cement with high-dosage Limestone and Calcined Clay (LC2). *Journal of Cleaner Production*, 278, 123616. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123616>