

Produits préfabriqués en béton filé : Vers l'amélioration des performances du matériau pour mieux gérer le procédé de production

Franck CASSAGNABERE

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) – INSA, Université Paul Sabatier - Toulouse – 135 avenue de Rangueil - 31 400 TOULOUSE Cedex 4

RESUME. L'industrie de la préfabrication est actuellement en pleine phase de mutation en raison de i) l'apparition de normes européennes basées sur des approches performantielles, ii) l'impératif de produire plus écologique, iii) l'émergence de constituants novateurs comme le métakaolin. Dans ce contexte, le travail de thèse a pour objectif d'améliorer et d'approfondir les connaissances sur les propriétés du béton filé et par conséquent sur la qualité du produit fini (poutrelles et dalles alvéolées).

MOTS-CLÉS : préfabrication, béton étuvé, métakaolin.

ABSTRACT. Precast industry is actually faced with i) the appearance of European standards based on performential approach, ii) an environmental production iii) the emergency of new constituents (metakaolin). In this context, the objective for the research consists in improving and deepening the knowledge on concrete specifically used for prestressed beams and hollow core slabs.

KEYWORDS : precasting industry, steam cured concrete, metakaolin.

1. INTRODUCTION

La préfabrication d'élément précontraint par fil adhérent de la société **SEAC-Gf** (poutrelles ou dalles alvéolées) nécessite un process très rigoureux. Ce procédé d'industrialisation s'articule en sept étapes.



Figure 1 : Mouleuse.

matériau afin d'accélérer sa maturation. g). À la fin cycle d'étuvage, le béton dispose d'une résistance suffisante permettant la détension des câbles et donc la mise en précontrainte des éléments.

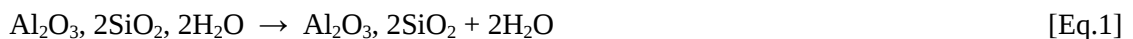
Le process est basé sur l'utilisation d'un béton qui allie une consistance ferme à l'état frais et des performances mécaniques élevées à l'état durci. Dans un premier temps, pour assurer une bonne productivité (rotation journalière), le béton doit posséder une résistance élevée au jeune âge afin de pouvoir détendre les câbles. Ensuite, il est primordial d'assurer une bonne qualité du matériau à long terme. Afin d'atteindre ces objectifs, deux solutions sont actuellement retenues :

- l'utilisation d'un ciment CEM I-52,5R, très réactif au jeune âge (notation R) et performant à long terme (notation 52,5) ;

- l'étuvage qui favorise le développement des performances mécaniques au jeune âge (Pihlajavaara, 1972). Lors de l'hydratation du ciment, la mise en solution des ions, favorisée par la hausse de température, réduit la période dormante. Il s'agit d'une thermoactivation de la réaction d'hydratation.

Cependant, les ciments CEM I-52,5R, en raison de leur teneur en clinker élevée (95% avec la notation CEM I), engendrent un effet néfaste sur l'environnement. En effet, pour la production d'une tonne de clinker, une tonne de CO₂ est rejetée dans l'atmosphère lors de la phase de décarbonatation du cru.

Dans ce contexte, des solutions alternatives à l'emploi de tels ciments sont proposées. L'utilisation couplée de ciment composé de type CEM II-52,5N et de métakaolin (MK) est une piste à envisager. En effet, le MK est une argile (kaolinite) calcinée dont la production ne génère pas de CO₂ [Eq.1] (Gartner, 2004) et dont l'utilisation dans les bétons pourrait être généralisée.



Mélangé au ciment, ce composé possède de très bonnes propriétés pouzzolaniques. La réaction pouzzolanique est une réaction chimique en solution entre la silice provenant de la dissolution du MK et l'hydroxyde de calcium (CH) produit par l'hydratation du ciment. Cette réaction donne des C-S-H (hydrates conférant au matériau sa résistance) qui précipitent (Jones, 2002) et des aluminates de calcium hydratés. La substitution de MK au ciment reste bénéfique sur des critères de performance mécanique (Sabir *et al*, 2001). D'autres caractéristiques sont améliorées du fait de cette substitution : la durabilité (Courard *et al*, 2003), les déformations différées (Brooks *et al*, 2001)...

et renfermant des teneurs en quartz variables (MK1 et MK2) sont employées. Les caractéristiques des ciments et des additions minérales sont résumées dans les tableaux 1 et 2.

Les mélanges. Deux types de mélanges sont gâchés. Pour mettre en évidence les évolutions de performance relative à l'incorporation de MK dans la matrice, des mortiers sont confectionnés avec les trois ciments. Leurs compositions sont calquées sur celle d'un mortier normalisé (NF EN 196-1) dans lequel on effectue des substitutions massiques (0-12,5-25%) de ciment par MK1. Pour expliquer ces évolutions d'un point de vue microstructural, des pâtes de ciment sont gâchées avec C1 et C3 avec ou sans substitution de MK1. Les dosages des mélanges sont consignés dans le tableau 3¹.

	C1	C2	C3	Oxydes (% massique)	MK1	MK2
Type	CEM I ^{a)}	CEM I ^{b)}	CEM II ^{b)}	SiO ₂	58,1	68,7
Classe	52,5	52,5	52,5	Al ₂ O ₃	35,1	25,7
Réactivité	R	R	N-S	Fe ₂ O ₃	1,2	2,3
Finesse (cm ² /g)	4200	4322	4241	CaO	1,2	0,7
% de clinker ^{c)}	97	99	82	MgO	0,2	0,02
% d'addition ^{c)}	3 (LL)	1	18 (S)	Na ₂ O	0,1	0,1
Composition de				K ₂ O	1,1	0,2
Bogue du clinker ^{c)}				SO ₃	0,3	/
C ₃ S	62,0	58,9	58,9	Perte au feu	1,9	0,8
C ₂ S	10,2	14,2	14,2	Passant 10µm (%)	50	10
C ₃ A	8,1	9,3	9,3	Passant 2µm (%)	12	/
C ₄ AF	8,4	6,9	6,9	Surface spécifique (m ² /g)	18	/

évolutions semi-quantitatives. Par exemple, l'avancement de la réaction pouzzolanique peut être suivi par la consommation de la Portlandite (CH). L'analyse thermique différentielle (ATD) (Saikia *et al*, 2006) complète l'analyse DRX car en plus de qualifier les phases cristallisées, elle permet de distinguer les phases amorphes comme les C-S-H (hydrates conférant majoritairement la résistance aux matériaux cimentaires). Finalement, l'analyse thermogravimétrique (ATG) permet de quantifier certaines phases hydratées grâce à la perte de masse engendrée par le départ d'eau des hydrates lors de l'accroissement de température. Le positionnement des courbes ATG entre elles renseigne donc sur la réactivité des mélanges étudiés.

2.2. RESULTATS

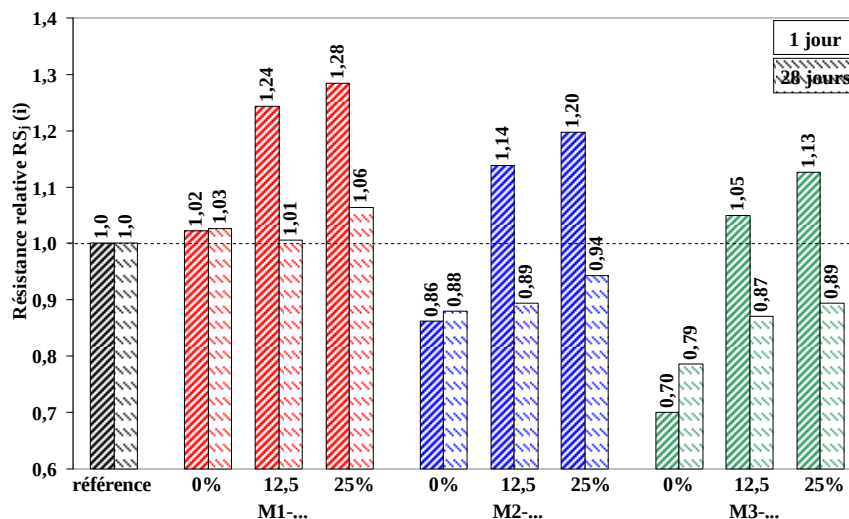
2.2.1. Résultats mécaniques

Le tableau 5 présente les résultats des résistances en compression obtenus sur les mortiers témoins (0%) et avec MK1 (12,5-25%).

	Valeurs de référence		M1-0%	M2-0%	M3-0%	
1/28 jours	39,3/54,1		40,2/55,5	33,6/47,6	27,5/42,5	
	M1-12.5%	M1-25%	M2-12.5%	M2-25%	M3-12.5%	M3-25%
1/28 jours	48,9/54,4	50,5/57,5	44,7/48,3	47,1/51,0	41,3/47,1	44,3/48,3

Tableau 5 : Résistance en compression moyenne des mortiers étuvés à 1 et 28 jours (MPa).

A partir de ces valeurs, on introduit une résistance relative notée $RS_j(i)$. Cette valeur s'appuie sur des valeurs de résistances de référence à 1 et 28 jours établies sur trois ciments répondant aux critères d'exigence de la préfabrication. La figure 2 présente le calcul et les valeurs pour les différents mélanges de $RS_j(i)$.



iii) Le ciment C3 est encore moins intéressant vis à vis de la préfabrication car il présente des problèmes sérieux de réactivité ($RS_{M3-0\%}(1) = 0,70$) et de qualité à long terme ($RS_{M3-0\%}(28) = 0,79$).

Lors de l'incorporation de MK1 dans les mélanges, diverses observations peuvent être faites.

i) Cette incorporation, dans une matrice cimentaire étuvée, améliore les performances mécaniques quel que soit le ciment utilisé et quelle que soit l'échéance.

ii) Plus le taux de substitution est élevé et plus le développement des performances est observable. Selon la littérature, l'intervalle optimal de substitution du ciment par du MK se situe entre 20 et 30% en masse (Sabir *et al*, 2001).

iii) Au jeune âge, lorsque l'on substitue 25% de MK1 au liant composé (C3), on s'aperçoit que le liant résultant possède des performances supérieures au critère de référence fixé ($RS_{M3-25\%}(1) = 1,13$). A 28 jours, l'incorporation de MK1 corrige le manque de performance du ciment C3 et permet de se rapprocher du critère exigé ($RS_{M3-25\%}(28) = 0,89$). Pour obtenir l'équivalence, c'est à dire $RS_{M3-25\%}(28) \approx 1$, il est possible d'intervenir sur l'étuvage en diminuant la température maximale du palier (Cassagnabère *et al*, 2007).

iv) On remarque que moins le ciment est réactif (C3) et plus l'incorporation de 25% de MK1 est bénéfique à 1 jour. Pour illustrer cette observation, on compare les résistances relatives des mélanges à base du ciment C1 (CEM I-52,5R réactif) et celles des mélanges composés du ciment C3 (CEM II-52,5N-S peu réactif). Pour le ciment réactif (C1), on observe que $RS_{M1-0\%}(1) = 1,02$ (sans MK1) évolue à la valeur

ciment utilisé (CEM I-52,5R ou CEM II-52,5N) ;

ii) l'apparition, grâce à la réaction pouzzolanique, de phases cristallisées néoformées de type aluminates de calcium hydratés qui sont C_4AH_{13} (V) et C_3ASH_6 (W) ;

iii) une phase siliceuse cristallisée qui est du quartz (impureté contenue dans MK1).

Mais, cette analyse connaît des limites surtout lorsque l'on s'intéresse aux C-S-H, hydrates responsables de la résistance du matériau qui possèdent une structure nanocristalline, équivalente à une phase amorphe.

La figure 4 présente les diagrammes d'analyse thermique différentielle (ATD) des poudres considérées précédemment. La figure 5 présente les courbes d'analyse thermogravimétrique (ATG) effectuées sur les mêmes poudres.

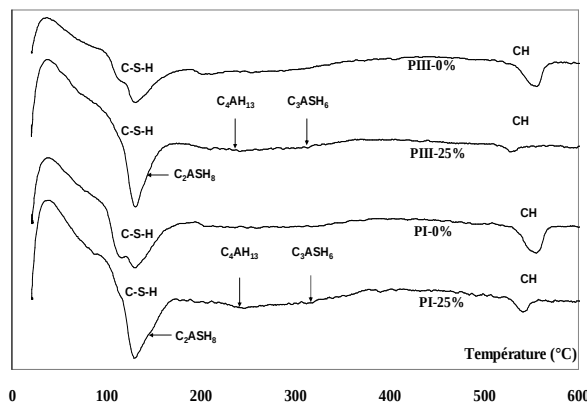


Figure 4 : Diagrammes ATD à 1 jour .

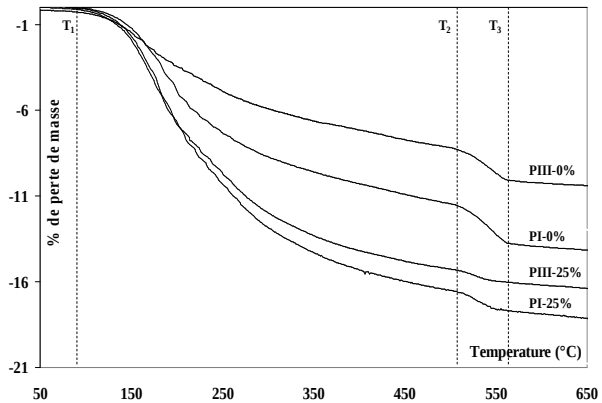


Figure 5 : Diagrammes ATG à

engendrées par la production d'un mètre cube de mortier dont les compositions sont détaillées dans le tableau 3.

	M1-0%	M1-25%	M3-0%	M3-25%
Emission de CO ₂ par m ³ de mortier (kg)	496	370	447	332
Réduction de CO ₂ / M1-0%	/	-25%	-10%	-33%

Tableau 6 : Emissions de CO₂ des divers mélanges.

Ainsi avec le remplacement d'un CEM I-52,5R par un mélange de CEM II-52,5N avec 25% de MK en substitution, une économie de 33% de CO₂ est envisageable pour un matériau aux performances quasiment analogues. Il existe donc des solutions alternatives au mode de production actuel qui respectent mieux l'environnement.

3. VALIDATION SUR LES BETONS EN USINE

Après des résultats concluants en laboratoire, une phase de validation sur site est entreprise. Ces essais en usine sont réalisés avec MK2 produit industriellement par la société **Argéco Développement** implantée à Fumel (47).

Cette campagne de validation s'effectue en trois étapes. Dans un premier temps, des taux de substitution jusqu'à 15% de MK2 montrent des résultats satisfaisants sur les performances mécaniques des bétons préfabriqués (bétons B1 à B5 du tableau 7).

Béton (% de substitution en MK2)		B1 (8%)	B2 (8%)	B3 (9%)
-----------------------------------	--	---------	---------	---------

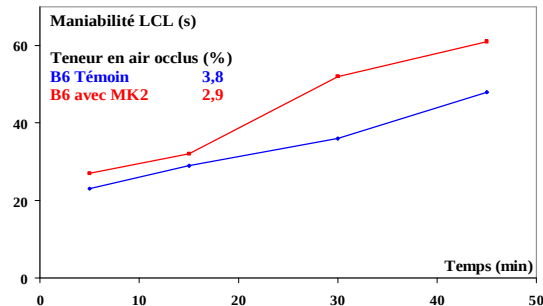


Figure 6 : Maniabilité LCL du béton B6.

	Porosité (%)	Absorption NF EN 13369
Témoin	12,93 ± 0,24	4,64 ± 0,13
25%MK2	13,05 ± 0,22	5,06 ± 0,05

Tableau 8 : Durabilité du béton B6.

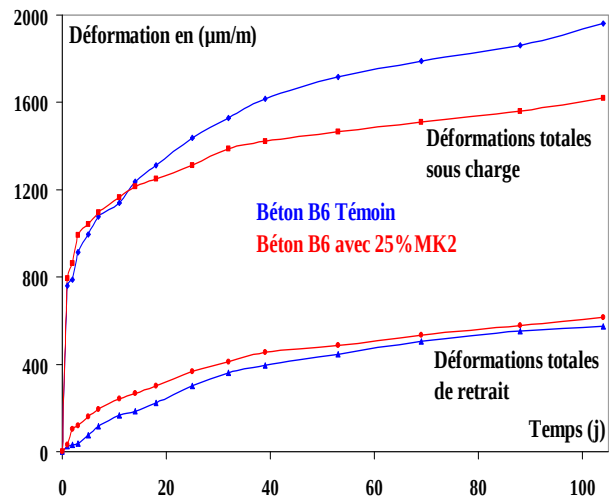


Figure 7 : Déformations différées du béton B6.

Dans un futur proche, la troisième et dernière étape de cette validation consistera à remplacer les ciments à forte teneur en clinker (CE