



HAL
open science

Projet ANR EcoBéton : Optimisation de la formulation de bétons avec une forte teneur en additions minérales

Muhammad Irfan Ahmad Khokhar, Emmanuel Rozière, Philippe Turcry, Frederic Grondin, Ahmed Loukili

► To cite this version:

Muhammad Irfan Ahmad Khokhar, Emmanuel Rozière, Philippe Turcry, Frederic Grondin, Ahmed Loukili. Projet ANR EcoBéton : Optimisation de la formulation de bétons avec une forte teneur en additions minérales. Rencontres de l'AUGC, Jun 2009, Saint-Malo, France. pp.1-13. hal-04913984

HAL Id: hal-04913984

<https://hal.science/hal-04913984v1>

Submitted on 27 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Projet ANR EcoBéton : Optimisation de la formulation de bétons avec une forte teneur en additions minérales

Muhammad Irfan Ahmad KHOKHAR* — **Emmanuel ROZIÈRE*** — **Philippe TURCRY**** — **Frédéric GRONDIN*** — **Ahmed LOUKILI***

** Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR-CNRS 6183, Universités Nantes-Angers-Le Mans (UNAM), Ecole Centrale de Nantes, BP 92101, 44321 Nantes cedex 3
{muhammad.khokhar, emmanuel.roziere, frederic.grondin, ahmed.loukili@ec-nantes.fr}*

*** Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert et de l'Instantanéité : Agro-industrie et Bâtiment (LEPTIAB), Université de La Rochelle, Avenue M. Crépeau, 17000 La Rochelle
philippe.turcry@univ-lr.fr*

RÉSUMÉ. La réduction des émissions de dioxyde de carbone issues de la production de ciment est un enjeu important pour l'industrie de la construction dans le cadre du développement durable. La fabrication d'une tonne de clinker s'accompagne d'un dégagement important de 0,9 tonne de CO₂. Dans le cadre du projet ANR EcoBéton, nous étudions la possibilité de remplacer une partie du ciment par des additions minérales telles que le laitier de haut fourneau, les cendres volantes ou le filler calcaire. L'utilisation de ces additions minérales avec un fort taux de substitution du ciment peut altérer la résistance à la compression du béton au jeune âge. Or une résistance minimale est nécessaire pour permettre le décoffrage. Pour répondre à ce problème, une méthode simple et rationnelle d'intégration des additions dans le béton est proposée. Les résultats de cette étude devraient permettre de promouvoir l'utilisation d'additions minérales introduites directement dans la fabrication du béton et à des forts taux de substitution du ciment.

ABSTRACT. Reducing carbon dioxide emissions from cement production is an important issue for the construction industry in the context of sustainable development. The production of one ton of clinker is accompanied by a significant release of 0.9 tonne of CO₂. Under the NAR project EcoBéton (Green concrete), we have studied the possibility to made concrete with low cement quantity replacing it by mineral additions i.e., blast-furnace slag, fly ash or limestone fillers. Replacement of cement by other materials at high percentage lowers the

early age strength of resulting concrete. A minimum compressive strength is required to remove the formwork. To cope with this problem, a simple and efficient method of integrating additions in concrete is proposed. The results of this study should help to promote the use of mineral additions at high substitution rate of cement introduced directly in the manufacturing of concrete.

MOTS-CLÉS: Emissions CO₂, EcoBéton, Additions minérales, Résistance à la compression, Optimisation

KEYWORDS: CO₂ emissions, Green Concrete, Mineral additions, Compressive strength, Optimisation

1. Introduction

Dans le cadre du Protocole de Kyoto, un certain nombre de pays s'engagent à réduire leurs émissions de dioxyde de carbone, l'un des principaux gaz à effet de serre. La réduction des émissions de dioxyde de carbone lors de la production de ciment est un enjeu important pour l'industrie de la construction dans le cadre du développement durable (2008). L'industrie cimentière a déjà réduit ces émissions en améliorant le rendement énergétique de ses fours, en revanche la part « chimique » due à la décarbonatation du calcaire est pratiquement incontournable. Une des solutions proposées par les ingénieurs et les scientifiques de l'industrie de la construction est de remplacer le clinker par des matières premières secondaires, qui peuvent également améliorer les caractéristiques du ciment et la durabilité du béton. La réduction des émissions de dioxyde de carbone peut ainsi être associée à la diminution de la consommation de matières premières naturelles, d'énergie thermique et électrique (2005). Ce remplacement d'une partie du ciment peut être effectué durant le mélange du béton, plutôt que lors de la fabrication du ciment comme c'est le cas pour les ciments composés (Toutanji *et al.*, 2004, Malhotra 2006 et Chen, 2007). Actuellement, la norme française (NF EN 206-1) restreint l'utilisation d'additions minérales introduites au cours de la fabrication du béton en imposant des dosages minimums en ciment. La norme laisse néanmoins la possibilité à l'ingénieur de composer le béton librement à condition de prouver son équivalence de performances comparé à un béton respectant les prescriptions de norme.

Les avantages de l'ajout dans le béton des additions minérales sont déjà connus (Malhotra, 1993, Bijen, 1996 et Lachemi *et al.*, 1998). De nombreuses études ont été réalisées pour déterminer les propriétés mécaniques, thermiques, les mécanismes de transport et de l'influence des additions minérales sur la durabilité du béton (Shehata *et al.*, 2000, Neilsen, 2002, Sobolev, 2005, Barnett *et al.*, 2006, Bhatti *et al.*, 2006 et Khokhar *et al.*, 2007). Cependant l'utilisation de ces additions minérales avec un fort taux de substitution du ciment peut altérer la résistance à la compression du béton au jeune âge. Or une résistance minimale est nécessaire pour permettre le décoffrage suffisamment tôt pour assurer la cadence du chantier et assurer la stabilité de la structure. Un béton peut être obtenu, avec un coût et une durabilité

satisfaisants, et des émissions de CO₂ réduites, en combinant les additions minérales avec l'utilisation de superplastifiants de dernière génération (Malhotra, 2006).

Dans cet article, nous proposons une méthode d'optimisation de bétons avec de forts taux de substitution du ciment par des additions (supérieurs à 50% en masse). Les additions étudiées sont des cendres volantes et un laitier de haut fourneau. Le critère d'optimisation est une résistance à la compression minimale au jeune âge. La méthode repose sur une optimisation de la quantité d'eau et une prise en compte de la capacité liante des additions par un coefficient d'activité. Une étude préliminaire sur mortier est nécessaire pour déterminer l'activité des additions. L'approche est validée par des essais sur bétons.

2. Optimisation de la formulation

L'optimisation de la formulation du béton est importante pour obtenir le meilleur résultat possible en termes de performances : propriétés mécaniques, déformations différées et durabilité du matériau, qui sont bien souvent liés.

Pour formuler un béton, il est nécessaire de tenir compte des résistances visées à court et long terme et des propriétés rhéologiques. Une méthode rationnelle de l'intégration des additions dans le béton est proposée, compte tenu du fait que les deux bétons (avec ou sans addition minérale) peuvent atteindre la même résistance à un âge donné par l'ajustement du rapport eau sur matériaux cimentaires (Smith, 1967).

L'optimisation de la formulation requiert des paramètres spécifiques – coefficients d'activité – tandis que certaines autres quantités sont gardées constantes. L'optimisation consiste en la détermination de plusieurs paramètres (par exemple, les quantités d'eau, de ciment, le rapport eau/ciment (E/C)) pour les différentes compositions, à partir d'un taux de substitution. Comme dans notre cas le taux de remplacement par des additions est très élevé, cela conduit à une faible résistance à la compression du béton au jeune âge. Pour augmenter la résistance au jeune âge, le rapport eau sur liant est réduit. Cela nécessite de connaître l'activité des additions et de connaître l'amplitude de la réduction en eau nécessaire. La consistance du béton frais est ajustée à l'aide d'un superplastifiant.

En termes mathématiques, l'optimisation consiste à résoudre le système d'équations ci-après, constitué de 5 équations [1], [2], [3], [4], [5] pour les 5 inconnues du problème V_G , V_S , V_C , V_A et V_E (les volumes par 1m^3 de béton de gravillon, sable, ciment, addition et eau). Notons que le volume de superplastifiant est négligé.

$$1\text{m}^3 = V_G + V_S + V_C + V_A + V_E \quad [1]$$

$$V_G/V_S = x \quad [2]$$

$$V_P = V_C + V_A + V_E \quad [3]$$

$$A/(A + C) = y \quad [4]$$

Où x et VP sont respectivement la proportion du mélange des granulats et le volume de pâte. Ces deux paramètres sont pris égaux à ceux d'un béton de

composition connue (qui sera dans la suite notre référence). Le taux de substitution du ciment par l'addition, noté y , est calculée en fonction de la masse de ciment C et de la masse d'additions A . Il est fixé par exemple à 25, 50 ou 75%. L'équation [5] lie la résistance notée f_c et les proportions de la pâte. On peut trouver dans la littérature plusieurs relations entre les proportions et la résistance, par exemple, la relation de Féret modifiée (De Larrard *et al.*, 2002). Dans notre étude, il a été décidé d'utiliser l'équation de Bolomey (Bolomey, 1927):

$$f_c = K_B \left(\frac{C + \chi_B A}{E + V} - 0.5 \right) \quad [5]$$

Où χ_B est le coefficient d'activité de l'addition, K_B la constante de Bolomey prenant en compte l'activité du ciment et la qualité des granulats, E le volume d'eau utilisée et V le volume de l'air entraîné. Dans notre approche, χ_B et K_B sont déduits des résistances obtenues sur les mortiers avec différents taux de substitutions (cf. §3). Les proportions de la pâte sont calculées avec cette relation en se fixant $f_c = 10$ MPa à 2 jours, résistance à la compression qui est a priori suffisante pour garantir une résistance avant 24 heures permettant le décoffrage. La quantité de superplastifiant est ajustée à partir de l'essai au cône d'Abrams avec pour objectif une classe de consistance donnée.

3. Etude préliminaire sur mortiers

3.1 Matériaux

Le ciment Portland (CEM I 52,5 N CE CP2 NF), qui vient de l'unité de production de Lafarge à La Couronne, a été utilisé pour tous les mortiers. Le laitier de haut fourneau était fourni par Ecocem (Usine de Moerdijk, Pays Bas) et les cendres volantes de Gardanne par Surchiste. Du sable de Palvadeau 0/2 mm a été utilisé. Les corrections ont été faites pour régler la quantité d'eau à ajouter sur sable humide.

3.2 Composition des mortiers et confection des échantillons

Le principe de la formulation des mortiers a été de maintenir constants les volumes de pâte et d'eau. Le ciment a été remplacé en volume par des additions minérales : laitier et cendres volantes. Huit compositions différentes de mortier ont été obtenues : une formule de référence contenant uniquement du ciment Portland, quatre compositions contenant du laitier de haut-fourneau avec des pourcentages de 25, 50, 75 et 85% et trois compositions contenant des cendres volantes à 25, 50 et 75%. Le tableau 1 donne les compositions des mortiers. Les matériaux ont été ajoutés dans l'ordre suivant : ciment, laitiers ou cendres volantes, sable et eau. Le mortier a été mélangé pendant 2,5 min et coulé en moules de dimensions 40 x 40 x 160 mm. L'affaissement a été mesuré en utilisant un mini cône d'Abrams. Les échantillons ont été vibrés sur une table vibrante et protégés par un film de

polyéthylène, conservés à 20°C et 95% d'humidité relative, démoulés après 23 heures puis placés dans l'eau à 20°C.

3.3 Maniabilité

Les valeurs d'affaissement obtenues pour des mortiers frais préparés avec les additions de laitiers et cendres volantes sont récapitulées dans le Tableau 1. On observe que l'utilisation de laitiers a tendance à améliorer la consistance du mortier par rapport au mortier contenant uniquement du ciment Portland. Alors que dans le cas des cendres volantes, l'affaissement a diminué de façon continue avec le taux de substitution.

Tableau 1. *Composition et propriétés des mortiers*

	CEM I		Laitiers			Cendres volantes		
Addition en volume (%)	0	25	50	75	85	25	50	75
Sable 0/2 Kg/m ³	1409	1409	1409	1409	1409	1409	1409	1409
Eau Kg/m ³	301	301	301	301	301	301	301	301
Ciment Kg/m ³	501	376	251	125	75	376	251	125
Addition Kg/m ³	0	115	230	345	391	88	176	264
V _{pâte} (l/m ³)	460	460	460	460	460	460	460	460
E/C	0.6	0.8	1.2	2.4	4	0.8	1.2	2.4
E/L	0.6	0.61	0.63	0.64	0.65	0.65	0.71	0.77
Affaissement (mm)	80	90	98	98	85	75	55	43

3.4 Développement de résistance

Pour apprécier l'influence des additions sur la résistance en compression, nous avons comparé la résistance du mortier avec additions au mortier témoin à un âge donnée (résistance relative). La tendance qui se dégage de nos résultats est la baisse de la résistance à la compression quand la proportion d'additions augmente (figures 1 et 2). Cependant à 28 jours, pour les mortiers avec laitier, on observe des valeurs de résistance proches de celle de la référence et l'écart observé au jeune âge se réduit progressivement. Le principal produit d'hydratation d'un mélange de laitier, de ciment et d'eau est un C-S-H similaire au composant produit par l'hydratation du ciment Portland. Cependant, la vitesse d'hydratation des laitiers de haut fourneau est plus faible que le ciment Portland. Ainsi, les ciments contenant des laitiers montrent une plus faible résistance au jeune âge mais ensuite une résistance égale ou plus

élevée. Si le pourcentage de laitier est trop élevé (75% et 85%), cette différence de résistance entre les compositions sans et avec additions reste nette (une différence de 10 MPa environ), même à 28 jours.

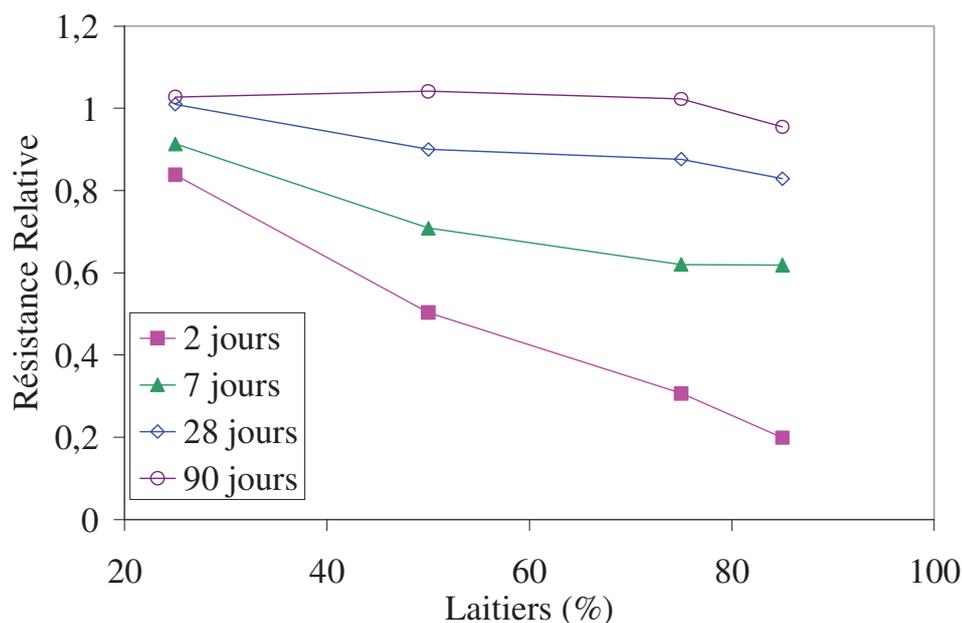


Figure 1. Effet du laitier sur la résistance en compression des mortiers

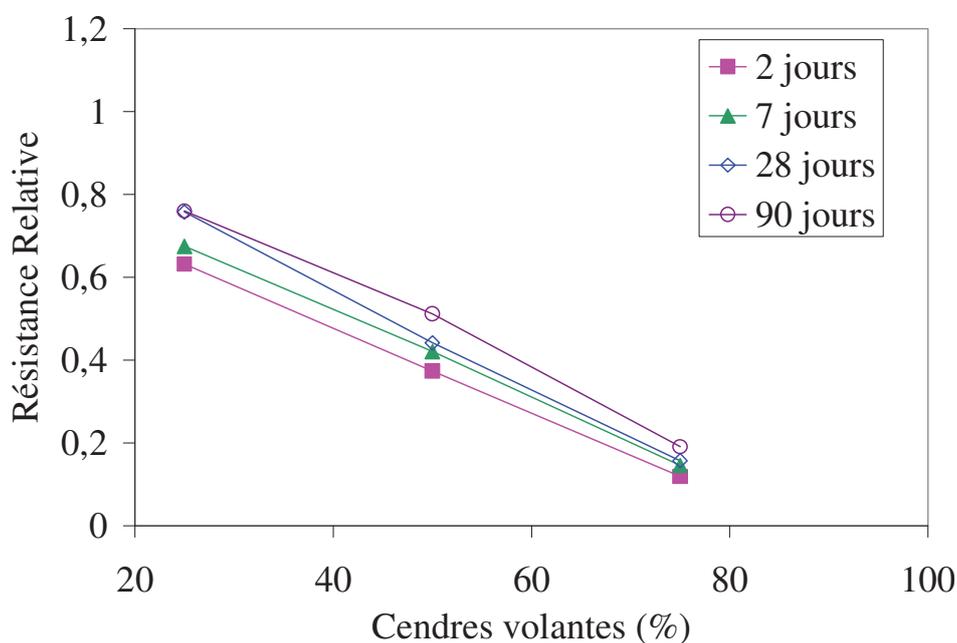


Figure 2. Effet des cendres volantes sur la résistance en compression des mortiers

Dans le cas des cendres volantes, la résistance en compression diminue très fortement avec une augmentation du taux de substitution. Pour un remplacement de 25 %, la résistance au jeune âge est proche de la résistance de la formule de référence. Mais pour les pourcentages de remplacement élevés, la résistance est très faible. Les échantillons contenant 75% en volume de cendres présentent un écart

élevé depuis le jeune âge jusqu'à 28 jours. Les études (Chen *et al.*, 2000, Fu *et al.*, 2000, Lam *et al.*, 2000 et Poon *et al.*, 2000) ont montré que le faible développement de la résistance peut être expliqué par le fait que la vitesse de réaction des cendres est très lente. Même à 90 jours, seuls 20 % des cendres volantes ont réagi. En fait, des cendres ont besoin de plus de 90 jours pour générer une résistance égale à celle de la référence à 28 jours compte tenu de la cinétique de la réactivité pouzzolanique des cendres volantes (Poon *et al.*, 2000).

3.5 Détermination de coefficient d'activité χ_B

La méthode d'optimisation est basée sur le calcul du coefficient d'activité d'une addition minérale, déterminé sur la base de résultats expérimentaux. A partir de la base de données des mortiers, le coefficient d'activité a été calculé pour chaque taux de remplacement du ciment en fonction du temps en utilisant l'équation de Bolomey :

$$\chi_B = \left(\left(\frac{f_p}{K_B} + 0.5 \right) \left(\frac{E+V}{C} \right) - (1-p) \right) / p$$

où f_p est la résistance du mortier de taux de substitution p à un âge donné. Le paramètre K_B , dépendant de la classe du ciment et des granulats, est déterminé à partir des résultats obtenus sur le mortier de référence ne contenant pas d'addition. Les figures 3 et 4 présentent l'évolution du coefficient d'activité calculé pour les laitiers et les cendres volantes respectivement. On observe que le coefficient d'activité dépend à la fois du temps et du taux de remplacement par des additions minérales, alors que la norme NF EN 206-1 le donne constant pour le calcul du liant équivalent. Les formules avec forte teneur en additions montrent un faible coefficient d'activité au jeune âge.

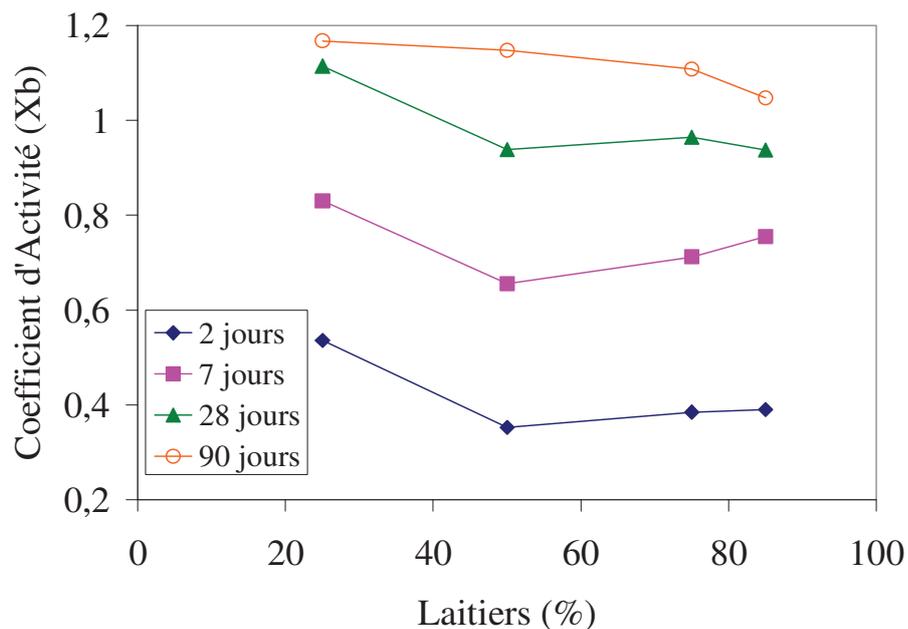


Figure 3. Coefficient d'activité pour le laitier selon Bolomey

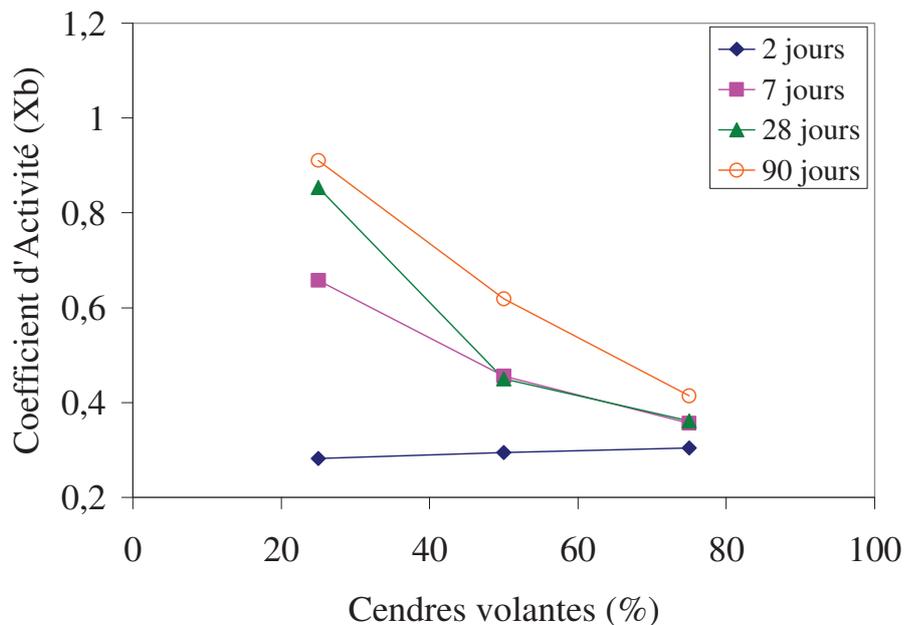


Figure 4. Coefficient d'activité pour les cendres volantes selon Bolomey

4. Optimisation des compositions de bétons

Il est clair que le développement de résistance est différent pour le mortier et le béton, mais celui du mortier est une bonne indication. Des formules de béton contenant le laitier et les cendres volantes avec différents pourcentages ont été sélectionnés (Tableau 2). A titre de comparaison, des formules sans aucune optimisation (simple remplacement du ciment par des additions minérales) ont également été testées.

4.1 Matériaux

Les ciments, additions minérales ont été les mêmes que ceux utilisés pour les mortiers. Les graviers concassés de granulométrie 6/10 et 10/14 sont utilisés avec un sable de mer 0/4 mm. Le sable utilisé était humide et des corrections ont été faites pour régler la quantité d'eau d'ajout. Dans les formules optimisées, un superplastifiant de base polycarboxylate, Optima 206 fourni par Chryso, a été utilisé.

4.2 Composition et fabrication des bétons

La formule de référence avec ciment Portland est une formule avec 350 kg/m^3 de ciment, sans adjuvant, produite par VM Matériaux, l'un des partenaires industriels du projet ANR Ecobéton. La méthode de formulation des bétons contenant les additions, notés « optimisés », est celle décrite au paragraphe 2. Le coefficient d'activité utilisé est celui déterminé à l'aide des données obtenues sur mortiers. Le

volume de pâte et les proportions gravillon / sable sont pris égaux à ceux de la référence.

Lors de la fabrication, les constituants ont été ajoutés dans l'ordre suivant : gravier, sable, ciment et laitier ou cendres volantes. Après mélange à sec pendant 30 secondes, l'eau a été ajoutée pendant les 30 secondes suivantes ; puis une minute après le mélange, le superplastifiant a été ajouté et mélangé pendant 90 secondes. Le béton a été coulé dans des éprouvettes 11 x 22 cm, compactées avec une aiguille vibrante puis conservées dans une salle humide à une température de 20°C. Les éprouvettes ont été démoulées après 23 heures puis placées dans l'eau à 20°C.

Tableau 2. *Composition et propriétés des bétons*

	CEM I		Laitiers			Cendres volantes		
	Réf	A	B	C (*)	E (*)	F	G (*)	I (*)
(kg/m ³)								
Addition en volume (%)	0	25	50	50	75	25	50	75
Gravier 10/14	860	860	860	860	860	860	860	860
Gravier 6/10	210	210	210	210	210	210	210	210
Sable 0/4	843	843	843	843	843	843	843	843
Ciment	350	263	175	187	109	263	201	178
Addition	-	81	161	172	301	61	141	178
Eau efficace	199	199	199	192	172	199	182	173
Vp (l/m ³)	310	310	310	310	310	310	310	310
E/C	0,57	0,76	1,14	1,03	1,58	0,76	0,91	1,0
E/L	0,57	0,58	0,59	0,53	0,42	0,61	0,53	0,49
Sp (kg/m ³)	-	-	-	-	3,3	-	2	3,3
A/A+C	-	0,23	0,48	0,48	0,73	0,19	0,41	0,5
A	0,00	80,5	75,2	80,2	46,8	61,3	86,4	76,3
Liant éq. (C+kA)	350,0	335	243	258,9	151,0	299	253	223,4
Eau/Liant éq.	0,57	0,59	0,82	0,74	1,14	0,63	0,54	0,78
Affaissement (mm)	105	137	147	93	237	147	73	230
fc 24hr (MPa)	11,9	7,5	3,9	5,2	4,2	5,8	4,5	4,9
fc 48hr (MPa)	21,3	14,2	8,5	10,5	12,2	12,3	10,9	11,4

* = Formule Optimisé

4.3 Résistance en compression

Le Tableau 2 présente les résistances en compression obtenues au jeune âge (24 et 48 heures) pour les formules de béton contenant laitiers et cendres. La résistance

obtenue à 48 heures pour les bétons optimisés est supérieure ou égale au seuil de résistance visé, fixé à 10 MPa. Bien qu'ils n'atteignent pas la résistance de la formule de référence avec ciment Portland, les compositions optimisées ont montré un développement de résistance rapide par rapport à des formules non optimisées, par exemple la formule avec 50% de laitier en substitution simple. La méthode d'optimisation mise au point apparaît donc satisfaisante vis à vis de la résistance et suffisamment simple et robuste pour une application industrielle.

Les principaux produits d'hydratation d'un ciment sont un silicate de calcium hydraté amorphe de composition variable, de symbole C-S-H, et la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CH. Théoriquement, un rapport E/C de 0,24 devrait être suffisant pour hydrater complètement le ciment, d'après un calcul basé sur l'eau chimiquement lié (Power *et al.*, 1948), mais un rapport E/C d'environ 0,38 serait optimal pour obtenir l'hydratation (Power *et al.*, 1948, Taylor, 1990 et Neville, 1996). L'eau ajoutée au-dessus de ce rapport est nécessaire pour avoir un béton plus maniable. Dans les formules étudiées, la teneur en eau a été réduite, mais pour améliorer l'ouvrabilité du béton, du superplastifiant a été ajouté.

A long terme, les compositions avec laitiers présentent des valeurs très proches de la composition du béton avec ciment Portland (figure 5). Les compositions avec cendres volantes présentent une résistance significativement plus faible que celle de la référence (figure 6), mais tout de même supérieure à 25 MPa, classe de résistance courante dans le domaine du bâtiment.

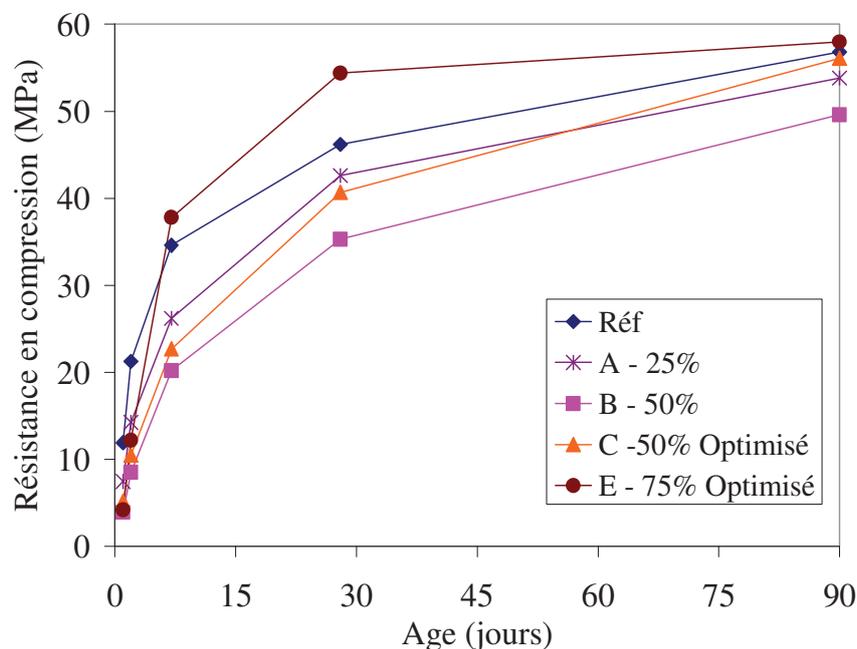


Figure 5. Développement de résistances des bétons aux laitiers

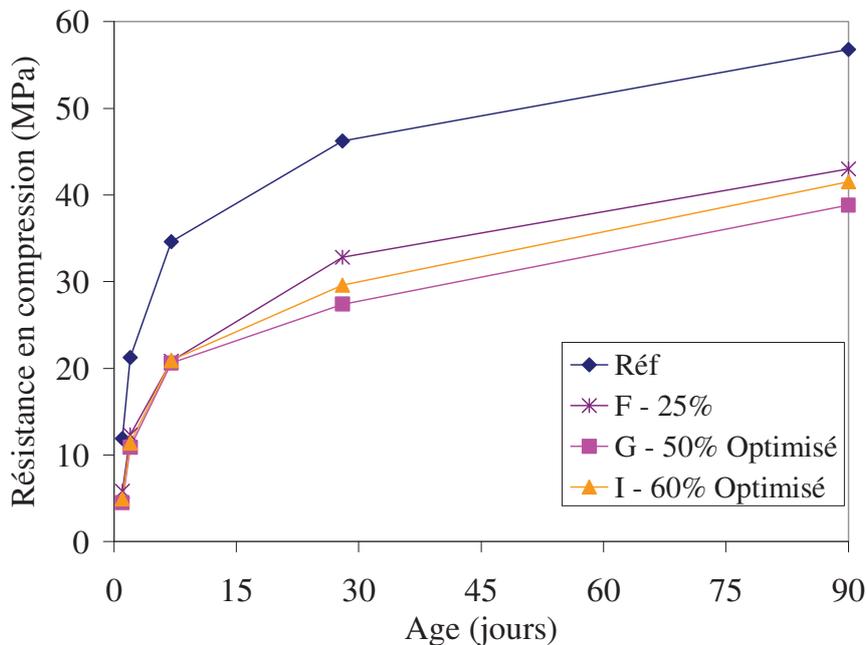


Figure 6. Développement de résistances des bétons aux cendres volantes

5. Conclusions

Les résultats de cette étude montrent la possibilité d'utiliser des additions minérales à des taux de substitution élevés tout en conservant des résistances en compression suffisantes même à court terme. Notre méthode d'optimisation est suffisamment simple et robuste pour une application industrielle, car le principal paramètre à déterminer est le coefficient d'activité de l'addition utilisée. Des essais sur mortiers permettent d'y accéder facilement.

Les normes françaises sur le béton prêt à l'emploi limitent la prise en compte des additions minérales dans le liant et les considèrent avec un coefficient d'activité constant. D'après les résultats de cette étude, il apparaît que ce coefficient dépend fortement de l'âge du béton et du niveau de substitution.

Les mélanges avec des taux de remplacement élevés comportent une proportion relativement élevée de superplastifiant et se caractérisent par un béton visqueux à l'état frais. Un compromis doit donc être trouvé entre l'approche à volume de pâte constant (égal à celui d'une formule de référence - approche appliquée ici) et une approche à quantité d'eau constante, (même système d'équations en fixant V_E et non V_P), cependant plus coûteuse en liant. Des améliorations peuvent être apportées par des superplastifiants ou des activateurs de dernière génération, dont l'utilisation en plus faible proportion permet en outre de ne pas retarder la prise.

Bien que les résultats obtenus montrent la faisabilité de l'approche de formulation, une démarche d'optimisation complète doit tenir compte de l'ensemble des performances d'un béton, en particulier son retrait et sa tendance à la fissuration, et sa durabilité dans des conditions d'exposition précisément définies.

6. Remerciements

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet EcoBéton financé par l'Agence National pour la Recherche (ANR) dans le programme « Recherche Génie Civil et Urbain » (RGCU) sous le numéro ANR-06-RGCU-006. Les auteurs tiennent à remercier les partenaires du projet pour leur collaboration et leurs conseils avisés.

7. Bibliographie

- Barnett SJ., Soutsos MN., Millard SG., Bungey JH., « Strength development of mortars containing ground granulated blast-furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies », *Cement and Concrete Research*, 36 (2006) 434 – 440.
- Bhatty JL., Taylor PC., « Sulfate resistance of concrete using blended cements or supplementary cementitious materials », *Portland Cement Association R&D*, Serial No. 2916a (2006).
- Bijen J., « Benefits of slag and fly ash », *Construction & Building Materials*, 10 (1996) 5.
- Bolomey J., « Determination of the compressive strength of mortars and concretes », *Bulletin Technique de la Suisse Romande*, 16(22 and 24), 1927.
- Chen Y., Li D., Shen J., Su J., Wu X., « The influence of alkalinity on activation and microstructure of fly ash », *Cement and Concrete Research* 30 (6) (2000) 881– 886.
- Chen W., Hydration of slag cement: Theory, modeling and application, PhD thesis, University of Twente, 2007.
- De Larrard F., Sedran T., « Mixture-proportioning of high-performance concrete », *Cement and Concrete Research*, 32 (11) (2002) 1699– 1704.
- Fu X., Hou W., Yang C., Li D., Wu X., « Studies on high-strength slag and fly ash compound cement », *Cement and Concrete Research*, 30 (8) (2000) 1239– 1243.
- Khokhar MIA., Rozière E., Grondin F., Loukili A., « Effect of mineral additives on some of durability parameters of concrete ». *Proceedings of International Conference on Advances in Cement Based Materials and Applications in Civil Infrastructure (ACBM-ACI)*, Lahore-Pakistan, December 12-14, 2007, P (289-300)
- Lachemi M., Li G., Tagnit-Hamou A., Aitcin PC., « Long-term performance of silica fume concretes », *Concrete International*, 20(1) (1998) 59.
- Lam L., Wong YL., Poon CS., « Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems », *Cement and Concrete Research*, 30 (5) (2000) 747– 756.
- Malhotra VM., « Fly ash, slag, silica fume and rice-husk ash in concrete – A review », *Concrete international*, 15 (1993) 4.

- Malhotra VM., «Presentation at the 2004 ACI Fall convention as part of the ACI Commemorative Lecture series honouring Lewis H. Tuthill », *Concrete International*, September 2006.
- Malhotra V.M., «Reducing CO2 Emissions-The role of fly ash and other supplementary cementitious materials », *Concrete international*, September 2006 pp. 42-45.
- Mehta PK., Walters M., «Roadmap to a sustainable concrete construction industry », *Construction Specifier*, vol 61, n° 1, 2008, pp. 48-57
- Neville AM., *Properties of Concrete*, Wiley, New York, 1996.
- NF EN 206-1. *Béton, Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité*, AFNOR, 2004.
- Nielsen CV., «Mechanical Properties for Green Concrete », *XVIII Symposium on Nordic Concrete Research*, Helsingør, June, (2002).
- Poon CS., Lam L., Wong YL., «A study on high-strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash » *Cement and Concrete Research*, 30 (3) (2000) 447–455.
- Powers TC., Brownyard TL., «Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste », Bulletin, vol. 22, *Research Laboratories of the Portland Cement Association*, Chicago, 1948.
- Roskovic R., Bjegovic D., «Role of mineral additions in reducing CO2 emissions », *Cement and Concrete Research*, 35 (2005) 974-978.
- Shehata MH., Thomas MDA., «The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali–silica reaction », *Cement and Concrete Research*, 30 (2000) 1063–1072.
- Sobolev K., «Mechano-chemical modification of cement with high volumes of blast furnace slag », *Cement & Concrete Composites*, 27 (2005) 848–853.
- Smith LA., Proceedings Institution of Civil Engineers, London, April, Vol.36, 769-790/1967.
- Taylor HFW., *Cement Chemistry*, Academic Press, New York, 1990.
- Toutanji H., Delatte, Aggoun S., Duvalb R., Danson A., «Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of short-term cured concrete », *Cement and Concrete Research*, 34 (2004) 311-319.