

Lyon France
5-6 juillet 2012

Performances du laitier de haut-fourneau granulé moulu : durabilité, indice d'activité et coefficient k

AM. Marion^A, Nicolas Musikas^A, Maxime Prossnitz^B

A Ecocem France

B Consultant

RESUME : L'indice d'activité et le coefficient k sont généralement considérés comme des paramètres de caractérisation pertinents du laitier moulu (LM) utilisé comme addition de type II dans le béton. Cependant, l'indice d'activité et le coefficient k ne constituent pas des indicateurs de performances physicomécaniques et de durabilité des combinaisons à base de laitier moulu. L'indice d'activité est un indicateur de régularité de la qualité du LM mais il ne constitue pas un indicateur des performances physico-mécaniques d'une combinaison d'un ciment spécifique avec ce LM. Le coefficient k, défini à l'origine en termes de résistance physicomécanique, est sensé, aujourd'hui, refléter la durabilité. L'attribution d'une valeur de k sur base de la performance mécanique du CEM I constitutif de la combinaison « LM-CEM » est incompatible avec une valeur de k sensée refléter la durabilité. L'étude présentée illustre ce constat à travers le lien entre durabilité, Indice d'Activité et coefficient k.

MOTS CLES : durabilité, laitier moulu, Bolomey, k, Indice d'Activité

1. INTRODUCTION

La norme EN 206 permet l'utilisation de certaines additions minérales comme substituts du ciment dans le béton. La future norme harmonisée révisée (à paraître en 2013) intégrera le laitier moulu (LM) parmi ces additions. Trois concepts sont reconnus « aptes à l'usage » à cet égard : le concept du coefficient k (Smith, 1967) (Visser, 1998), le concept de performance équivalente de béton (Equivalent Concrete Performance Concept / ECPC) et le concept de performance équivalente de combinaisons (EPCC).

La présente étude concerne l'applicabilité du concept de coefficient k au LM. Initialement, ce concept a été introduit pour prendre en compte l'influence du remplacement du ciment par des cendres volantes (CV) (Smith, 1967). L'objectif visé était la prise en considération de l'impact de la substitution sur les performances physico-mécaniques, le taux de substitution étant de l'ordre de 25 %: le principe de base de ce concept reposait sur la comparaison de la résistance en compression d'un béton dont 25 % de CEM I était remplacé par des CV avec la résistance en compression d'un béton dont le liant est constitué de 100% du CEM I concerné. L'application d'un coefficient k visait à « corriger » une formulation de béton de manière à ce que la réactivité moindre de l'addition soit prise en compte.

Selon ce principe appliqué au laitier, l'application d'un coefficient k de 1 permet le remplacement de 1 kg de ciment par 1 kg de laitier: c'est le cas des ciments CEM III où le laitier remplace le clinker kilo pour kilo. Si le coefficient k est de 0,6 (valeur recommandée pour le laitier moulu dans la norme EN 206-1 à paraître en 2013), 1 kg de ciment doit être remplacé par 1,66 kg de laitier. Simultanément, la teneur en ciment doit, elle aussi, être augmentée afin que le rapport laitier /ciment de la combinaison soit respecté (Baron et al., 1997).

L'exemple suivant illustre l'application pratique, injustifiée techniquement pour le LM (s) comme le démontrera cette étude, d'un coefficient k inférieur à 1. Le cas évoqué concerne un béton dosé à 400 kg/m³ de liant dont le rapport E/L est de 0,50 et le coefficient k de 0,6. On vise le remplacement d'un CEM III par une combinaison LM-CEM à 50 % de laitier moulu (c/s = 1).

Le béton doit satisfaire les exigences suivantes, en termes de « liant équivalent » (L) :

$$L = 400 \text{ kg/m}^3 = c + k*s$$

$$c/s = 1$$

$$E/L = E/(c + ks)$$

Où c = teneur en CEM I ; s = teneur en laitier ; E = teneur en eau ; k = coefficient k

La règle d'application du coefficient k mène aux teneurs suivantes, pour la confection de ce béton incorporant du laitier moulu:

$$E = 200 \text{ kg/m}^3 ; c = 250 \text{ kg/m}^3 ; s = 250 \text{ kg/m}^3$$

Si le producteur de béton choisit d'utiliser un CEM III comportant 50 % de laitier, les teneurs en liant seront significativement réduites car le laitier du CEM III bénéficie d'office d'un coefficient k de 1:

$$E = 200 \text{ kg/m}^3 ; c = 200 \text{ kg/m}^3 ; s = 200 \text{ kg/m}^3$$

La conclusion s'impose d'elle-même: le bétonnier n'a aucun intérêt à utiliser du laitier moulu car il se heurte non seulement à une augmentation potentielle du coût mais il sera de plus confronté à des difficultés techniques liées à la mise en œuvre d'un béton trop sec qui, même fortement adjuvanté, risque de présenter une ouvrabilité médiocre. Ajouté à cela l'aspect gaspillage injustifié d'un matériau « vert » aux propriétés remarquables et l'on complète la démonstration économique de l'impact négatif d'un coefficient k inférieur à 1. Enfin, si l'on prend en compte le fait que le même laitier issu du même site sidérurgique et possédant les mêmes propriétés chimiques et minéralogiques peut être utilisé comme constituant du ciment sans aucune pénalité et comme laitier moulu avec sanction, la boucle de l'absurdité technique est bouclée.

L'aberration relative à l'application du concept de coefficient k au laitier moulu ne s'arrête pas là. D'autres réflexions techniques rendent le concept tout à fait caduque dans le cas du laitier moulu. Le taux de remplacement envisageable pour le laitier moulu est, en effet, largement supérieur aux 25 % pris en compte par Smith pour les cendres volantes, si l'on en réfère au taux de laitier des CEM III/C qui peut atteindre 95%. Ce taux, potentiellement fort élevé, rend totalement incongrue la comparaison avec le CEM I constitutif de la combinaison « LM-ciment ». Il s'agit d'un non sens technique d'autant plus inacceptable que, aujourd'hui et de l'avis unanime des experts, le coefficient k est sensé prendre en compte la durabilité (Haerdtl, 2010). Or, pour le comportement durable plus particulièrement, il n'existe aucune « correspondance » entre un CEM I et un CEM III. De la même manière, car il n'y a aucune différence de comportement attendue entre une utilisation amont (comme constituant du ciment) ou aval (en ajout direct à la bétonnière) du laitier, il ne peut exister aucun point commun entre le comportement aux environnements agressifs d'un CEM I et de sa combinaison avec laitier moulu. L'octroi d'un coefficient k sur base, à la fois d'une comparaison de résistance avec un CEM I et d'une perspective de durabilité en comparaison avec un CEM I, est une négation pure et simple des acquis des 30 dernières années en matière de compréhension du rôle primordial des ajouts minéraux sur la durabilité.

Bien qu'il représente une hérésie technique pour ce cas d'espèce, le concept k a été élargi au laitier moulu dans la EN 206-1 harmonisée, à paraître en 2013. Cette décision prise en dépit du bon sens technique a suscité de vives controverses et incité Ecocem à explorer de multiples données expérimentales pour démontrer, sur base d'arguments solides, l'absence de fondement de l'application du concept k dans son principe actuel, pour le laitier moulu. Il s'agit également de démontrer que l'attribution d'un coefficient k inférieur à 1 pour le laitier moulu n'est assortie d'aucune justification technique et constitue une sanction injustifiée pour le matériau.

Cette étude comporte deux approches (partie 1 et partie 2) dont le principe est différent mais qui reposent toutes deux sur la comparaison des performances d'une combinaison « LM-CEM » avec un CEM III de teneur en laitier correspondante.

La première approche (partie 1) se décline en une "procédure multi-étapes" qui permet d'établir un lien entre la durabilité, l'indice d'activité (IA)¹ et une valeur du coefficient k pour le laitier moulu. Le principe technique à la base de cette évaluation qui permet de justifier une valeur de 1 pour le coefficient k est évident : si une combinaison « LM-CEM » présente une durabilité comparable à celle d'un CEM III de teneur en laitier correspondante, IA peut être utilisé comme un « indicateur de durabilité » ; un seuil minimum peut ainsi être défini pour IA, et toute combinaison « LM-CEM » présentant un IA égal ou supérieur à cette valeur-seuil peut être considérée comme garante d'une tenue satisfaisante aux environnements agressifs, sans qu'il faille effectuer des essais de durabilité. Si la combinaison est évaluée comme « durable », une valeur de 1 pour le coefficient k peut lui être attribuée. En conséquence, une valeur de k de 1 peut être associée à une valeur-seuil de IA. Ce principe est intéressant dans la mesure où il permet de s'affranchir de la répétition d'essais de durabilité fastidieux, longs et coûteux.

La seconde partie de l'étude, complémentaire à la première, tend à mieux comprendre la raison pour laquelle une valeur de k inférieure à 1 est généralement attribuée au laitier moulu. La démarche proposée, basée sur la comparaison de l'évolution de la résistance en compression de combinaisons à base de laitier moulu et de CEM III, repose sur l'application de la formule de Bolomey (Baron et al., 1997) : un coefficient k est calculé dans le cas de combinaisons LM-CEM et, de manière analogue, un k assimilé est déterminé pour le laitier constitutif de ciments CEM III. Cette analyse comparative, via le coefficient k/k_{ass} , du développement des résistances pour les deux types de liants doit permettre de mieux apprécier la légitimité technique de l'attribution d'un coefficient k inférieur à 1 au laitier moulu alors que le laitier de haut-fourneau utilisé comme constituant du ciment bénéficie d'office d'un k de 1.

2. MATERIAUX ET METHODES

2.1. Matériaux

Le laitier moulu est produit par ORCEM, filiale hollandaise d'Ecocem Materials. Les données exploitées concernent une période de 12 mois de production de laitier moulu. Les caractéristiques chimiques essentielles du laitier moulu sont présentées au tableau 1 : elles satisfont à la fois les exigences de l'Agrément Technique belge (ATG), de la BRL 9340 et de la norme EN 15167.

Les CEM I et CEM III concernés par l'étude sont issus de sites de production européens (Belgique, Hollande et Allemagne) : seule la classe de résistance est connue. La confidentialité est de mise quant à l'origine précise de ces ciments.

Le squelette granulaire du béton est constitué de sable et granulats de rivière.

Tableau 1- Paramètres chimiques du laitier moulu (moyenne, minima et maxima)

Laitier moulu		CaO+MgO+ SiO ₂ (%)	(CaO+MgO)/Si O ₂	S ²⁻ (%)	PF (%) (*)	RI (%)	SO ₃ (%)
12 mois de contrôle	Min	81.0	1.3	0.5	-1.6	0.1	0.1
	Max	86.0	1.5	1.5	0.2	1.1	0.2
	Moy	82.5	1.4	1.1	-0.9	0.4	0.1
(*) pas de correction sulfures							

Laitier moulu		Cl ⁻ (%)	Na ₂ O eq (%)	Mn ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Eau (%)	Blaine (cm ² /g)
12 mois de contrôle	Min	0.01	0.5	0.2	7.4	0.00	3995
	Max	0.08	0.7	0.7	9.1	0.10	4712
	Moy	0.04	0.6	0.5	8.1	0.03	4259

2.2. Méthodes

¹ IA, déterminé conformément à la EN 15167, est un rapport de résistances en compression (Rc) sur mortier EN 196-1 : $R_c (50\% \text{ CEM I} - 50\% \text{ LM}) / R_c (100\% \text{ CEM I})$

2.2.1. Détermination de l'Indice d'Activité (IA) sur mortier

L'indice d'activité, déterminé selon EN 15167, est généralement utilisé pour contrôler la régularité du laitier moulu : ce contrôle est effectué avec un ciment de référence.

La détermination de l'indice d'activité a été effectuée sur base des données issues de l'autocontrôle réalisé sur 12 mois de production, pour tous les ciments CEM I utilisés par les bétonniers-clients.

2.2.2. Détermination des paramètres de durabilité

Les données de trois études distinctes réalisées en Hollande en 2002, 2004 et 2008 ont été exploitées. La démonstration d'équivalence en application du concept ECPC a été établie sur base de la méthode décrite dans les recommandations hollandaises du CUR 48 (2010) et de la BRL 9340 (2007).

A cette fin, la résistance en compression (Rc), la carbonatation, la pénétration des chlorures, et la tenue au gel-dégel en l'absence de sels de déneigement ont été étudiées sur béton (tableau 2) et la résistance aux sulfates et à l'eau de mer a été évaluée sur mortier EN 196-1 (Marion et al., 2009).

Tableau 2 – Bétons investigués

paramètres de durabilité	%	LM	L= 280 kg/m ³	L= 280 kg/m ³	L= 300 kg/m ³	L= 300 kg/m ³	L= 340 kg/m ³
			E/L= 0.65	E/L= 0.55	E/L= 0.55	E/L= 0.50	E/L= 0.45
Rc	2002	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2004	70	X	nd	nd	nd	X
	2008	70	X	nd	nd	nd	X
Carbo	2002	50 et 70	nd	X	nd	nd	nd
	2004	70	nd	X	nd	X	X
	2008	70	nd	X	nd	nd	X
Chlorure	2002	50 et 70	nd	nd	nd	nd	X
	2004	70	nd	nd	nd	nd	X
	2008	70	nd	nd	nd	nd	X
gel-dégel	2002	50	nd	nd	nd	nd	X
	2004	70	nd	nd	nd	nd	X
	2008	70	nd	nd	nd	nd	X

nd= non déterminé

2.2.3. Lien entre Indice d'Activité et durabilité (Partie 1)

Une procédure multi-étapes a été appliquée pour établir un lien entre IA et la durabilité.

Etape 1. Le concept de performance équivalente de béton est appliqué pour assier la durabilité de la combinaison: le comportement durable d'un béton à base d'une combinaison LM-CEM I est comparé à un béton de CEM III de teneur en laitier équivalente. Les formulations de béton sont similaires pour la teneur en liant, le rapport Eau/Liant et la composition du squelette granulaire. A noter que la résistance en compression n'est pas un critère déterminant en matière d'évaluation comparée de la durabilité.

Etape 2. Si l'équivalence est établie en termes de durabilité lors de l'étape 1, alors le laitier moulu concerné est considéré comme un matériau de qualité équivalente à celle du laitier constitutif du CEM III utilisé comme référence pour les essais de durabilité.

Etape 3. L'équivalence étant établie, la durabilité des combinaisons LM-CEM est démontré : le laitier moulu concerné peut bénéficier d'une valeur du coefficient k de 1, au même titre que le laitier constitutif du CEM III qui, d'office et quel que soit le clinker auquel il est associé, n'est pas soumis à la « règle d'application d'un coefficient k » (*) (Hourdin et al., 2011), et ce bien que les critères de conformité énoncés dans la EN 197-1 soient moins restrictifs que ceux de la EN 15167, notamment pour le seuil de réactivité du laitier : le laitier ne doit satisfaire aucune exigence d'activité lorsqu'il est utilisé comme constituant des ciments comportant du laitier, et ce, quelle que soit la proportion de laitier. (*) Un coefficient k de 1 a le même impact pratique que l'absence de coefficient k : 1 kg de Laitier remplace 1 kg de clinker.

Etape 4. L'Indice d'Activité est déterminé pour chacune des combinaisons démontrées durables via le concept ECPC : ces IA permettent de qualifier de durable la combinaison spécifique « LM-CEM »

testée. Ces valeurs de IA constituent en quelque sorte un « screening test » qui permet de définir une valeur-seuil qui serait un indicateur de durabilité.

Etape 5. Tout ciment CEM I qui présente une valeur égale ou supérieure à la valeur-seuil de IA déterminée lors de l'étape 4, est considéré comme apte à garantir une durabilité satisfaisante, çàd équivalente à celle d'un CEM III, lorsqu'il est combiné au laitier concerné dans des proportions similaires à celles pour lesquelles l'équivalence de durabilité par rapport à un CEM III a été démontrée. L'établissement d'un lien entre la résistance (IA) et la durabilité peut se substituer avantageusement au concept du facteur k, car la méthode associe résistance mécanique et durabilité, ce que ne permet pas le coefficient k.

2.2.4. Résistance en compression sur mortier: combinaison « LM-CEM » et CEM III (partie 2)

La formule de Bolomey [1] permet le calcul du coefficient k à tout âge d'hydratation et pour toute proportion de laitier moulu :

$$k = 1 - ((1/p) * (1 - 0.5 * E/L) * (1 - IA)) \quad [1]$$

Le rapport Eau/Liant (E/L) et la teneur en LM (p = quantité de ciment remplacée par le LM) sont pris en compte dans cette formule générale où IA est l'Indice d'Activité du laitier moulu déterminé selon EN 15167 sur mortier EN 196-1.

L'application de la formule de Bolomey permet de comparer le comportement physico-mécanique de combinaisons « LM-CEM » d'une part et de CEM III d'autre part, pour tout CEM.

Dans le cas de combinaisons à 50 % de laitier moulu et E/L 0.50, la formule de Bolomey permet de calculer k selon la relation :

$$k = 1.5 IA - 0.5$$

Dans le cas des CEM III, la formule de Bolomey peut être utilisée pour calculer un coefficient k « assimilé » (k_{ass}) pour le laitier constitutif du ciment, en prenant en compte les modifications suivantes dans la formule de Bolomey :

- k devient k_{ass}
- L'Indice d'Activité devient l'Indice de Réactivité (IR)
- 50 % de LM (p) est remplacé par la teneur en laitier annoncée du CEM III, ç'est à dire dans le cas présenté dans cette étude 40 /62 / 51 ou 71 % selon le CEM III concerné

La formule de Bolomey est applicable aux CEM III de cette étude parce que le clinker constitutif des CEM III est identique au clinker des CEM I auxquels ils sont comparés : on prend donc bien en compte la réactivité particulière d'un laitier combiné à un clinker spécifique par rapport à ce clinker « pur », ce qui constitue la base du principe de Bolomey. Le fait que, à la fois la teneur en sulfate et la teneur en constituants secondaires des CEM III est, en toute logique, supérieure à celle des combinaisons « LM-CEM » est susceptible de favoriser le développement des résistances des CEM III à court terme : les résultats obtenus (voir 4.1.2) montrent toutefois que cet effet n'est pas prépondérant.

3. RESULTATS – PARTIE 1

3.1. Indice d'Activité

Les valeurs de IA, déterminées conformément à EN 15167 sont présentées au tableau 3. Pour chaque CEM I, la valeur de IA présentée est la moyenne sur 12 mois d'autocontrôle. IA a également été mesuré à 90 jours, l'objectif étant de vérifier le comportement de la combinaison « LM-CEM » lorsque le degré d'hydratation du liant est proche d'un état « mature » (Marion et al., 2012).

Vingt-sept ciments d'origine européenne, issus de sites de production différents, ont été investigués en termes d'Indice d'Activité, en combinaison avec le laitier concerné par cette étude : ces ciments, couramment utilisés par des bétonniers pour fabriquer des bétons à base de combinaison « LM-CEM », font l'objet de contrôles systématiques mensuels.

Parmi ces ciments, deux ciments constituent des « références » utilisées pour le contrôle de la régularité du LM.

Les données du tableau 3, relatives à un grand nombre de ciments distincts, démontrent que la performance du laitier concerné n'est pas ponctuelle, même si certaines combinaisons sont légèrement moins performantes que d'autres : ce constat traduit les interactions particulières qui se développent lors de l'hydratation d'un couple spécifique « LM-CEM ». Par ailleurs, il convient de garder en mémoire que l'Indice d'Activité, qui résulte d'un rapport de résistances, n'est pas un indicateur de la performance intrinsèque « absolue » du laitier moulu puisque cet Indice d'Activité est susceptible de varier selon le CEM auquel le laitier est combiné. Par contre, la résistance absolue en compression est un indicateur fiable de performance physico-mécanique puisqu'elle permet d'attribuer une classe de résistance à la combinaison testée, de la même manière qu'une classe de résistance caractérise un ciment conforme à EN 197. Il est pertinent de signaler que, bien que l'Indice d'Activité de la plupart des combinaisons du tableau 3 n'atteigne pas 1 à 28 jours, toutes ces combinaisons à 50 % de LM satisfont aux exigences de la classe de résistance 42,5.

Tableau 3. Indices d'Activité (différents CEM I)

CEM I	IA 28j	IA 90j
52.5 N	0.91	1.07
52.5 R	0.87	1.08
52.5 R	0.86	1.02
42.5 R	1.04	1.23
52.5 R	0.90	1.05
42.5 R	0.94	1.01
42.5 R	0.92	1.09
52.5 R	0.74	0.98
<i>52.5 R référence</i>	<i>0.86</i>	<i>0.97</i>
52.5 N	0.78	1.03
52.5 N	0.77	1.04
52.5 N	0.86	1.10
42.5 R	0.93	1.12
<i>42.5 R référence</i>	<i>0.90</i>	<i>1.02</i>
52.5 N	0.90	1.04
42.5 R	0.81	1.12
52.5 R	0.85	1.02
52.5 N	0.86	1.01
52.5 R	0.79	0.97
42.5 R	0.85	1.08
52.5 R	0.87	0.97
42.5 R	0.87	0.94
52.5 R	0.78	0.94
42.5 R	0.96	1.01
52.5 R	0.85	1.05
52.5 R	0.81	1.04
42.5 R	0.98	1.07

En dépit de cette performance systématiquement démontrée, le laitier moulu est pénalisé, entre autres en France, à la fois par un coefficient k inférieur à 1 et par un taux de substitution limité à 30 % pour les bétons courants. Parallèlement, il est opportun de signaler que les CEM III de classe 32,5 existent sur le marché européen et ne souffrent d'aucune limite d'utilisation qui serait liée à leur cinétique plus lente de développement des résistances. Cette règle deux poids-deux mesures interpelle.

Pour les vingt-sept CEM I concernés par le tableau 3, IA à 28 jours est significativement plus élevé que la valeur requise par la norme EN 15167 (0,70). Cette observation démontre que les exigences de la norme ne rendent pas compte du réel potentiel réactif du laitier moulu disponible sur le marché européen et, du fait de leur caractère minimaliste, ces exigences sont de nature à ne pas encourager l'utilisation du laitier moulu. La norme EN 15167 devrait être revue de manière à ce que l'utilisateur de laitier moulu puisse disposer d'informations plus précises quant au potentiel hydraulique atteignable par le matériau, en conditions réelles, çàd dans une association avec un CEM spécifique. L'Indice d'Activité n'étant pas un critère de réactivité intrinsèque, seule la détermination de la classe de résistance d'une combinaison d'un CEM spécifique avec un laitier particulier peut renseigner l'utilisateur sur la réactivité réelle d'une combinaison déterminée. Le concept EPCC appliqué en Angleterre et en Irlande dans le cadre de l'utilisation du laitier moulu repose sur ce principe.

A 90 jours, IA est ≥ 1 pour la plupart des CEM I testés en association avec le LM. A cet âge, un béton à base de laitier, qu'il s'agisse d'une utilisation amont ou aval du laitier, est supposé avoir atteint un degré d'hydratation proche de la « maturité » : la courbe d'évolution de la résistance en compression démontre en effet généralement l'amorce d'un plateau à cette échéance. Cette observation suggère que l'échéance la plus « réaliste » pour associer la résistance et la durabilité est 90 jours d'hydratation. A cet égard, on se souviendra que les experts en matière de réactivité des additions minérales en matrice cimentaire recommandent de réaliser les essais de durabilité après une cure du béton de 90 jours (Ollivier et al., 2008) (Guide AFGC, 2004)(LCPC, 2010). Ainsi, l'évaluation du coefficient k à 90 jours revêt un sens tant en termes de résistance (par rapport au CEM I constitutif de la combinaison) qu'en terme de durabilité car le coefficient k trouve alors un double fondement technique cohérent au niveau des caractéristiques qu'il est sensés traduire.

3.2. Indice d'Activité et durabilité

Quatre CEMI produits en Europe (Belgique, Hollande et Allemagne) ont été investigués en durabilité en combinaison avec des teneurs en laitier de 50 et 70 % (Marion et al., 2012).

Les résultats synthétiques des essais de durabilité, réalisés en application du concept ECPC, sont présentés au tableau 4 : la mention « OK » signifie que la combinaison concernée a démontré un comportement équivalent à un CEM III de teneur en laitier similaire. L'équivalence est démontrée pour tous les paramètres de durabilité testés ainsi que pour la résistance en compression.

Tableau 4 – Lien entre IA et durabilité

CEM I	IA			ECPC versus CEM III					
	7d	28d	90d	Rc	carbo	gel-dégel + sels	chlorure	Sulfate	Eau de mer
5 - 52.5 R	0.69	0.90	1.05	OK	OK	OK	OK	OK	OK
7 - 42.5 R	0.66	0.92	1.09	OK	OK	OK	OK	OK	OK
9 - 52.5 R ref	0.71	0.86	0.97	OK	OK	OK	OK	OK	OK
10 - 52.5 N	0.59	0.78	1.03	OK	OK	OK	OK	OK	OK
OK	testé avec 50 et 70 % LM et démontré équivalent à CEM III/A et CEM III/B de teneur en laitier équivalente								
OK	testé avec 70 % LM et démontré équivalent à CEM III/B de teneur en laitier équivalente								

Les valeurs de IA des combinaisons spécifiques testées en durabilité peuvent être mises en relation avec un comportement durable satisfaisant. Ces données suggèrent que la durabilité est « garantie » lorsque la valeur de IA est $\geq 0,78$ à 28 jours. Ce constat supporte l'idée que la performance physico-mécanique à 28 jours d'une combinaison à base de laitier moulu ne doit pas nécessairement atteindre celle du CEM I constitutif pour se révéler aussi durable qu'un ciment conventionnel à base de laitier de haut-fourneau : un IA / k inférieur à 1 à 28 jour (sur base de Rc) ne menace donc pas la durabilité. Cette conclusion est acceptée de longue date pour les CEM III qui n'atteignent jamais, lorsque la teneur en laitier est élevée, les performances d'un CEM I à 28 jours : les propriétés intrinsèques du laitier sont gouvernées par ses caractéristiques minéralogiques et sont indépendantes de la classe de résistance des CEM III. Or, c'est bien cette durabilité-là que l'on vise, celle qui est spécifique d'un CEM III et non d'un CEM I, lorsqu'on utilise 50 % ou plus de laitier moulu: l'objectif majeur lié à l'utilisation du LM est le dosage « à la carte », mais dans des proportions qui correspondent aux teneurs en laitiers des CEM III dont le comportement est très bien documenté tant en termes de résistance que de durabilité.

La confrontation des données du tableau 4 permettent de proposer une valeur-seuil de IA qui serait « apte » à garantir une durabilité satisfaisante, çàd équivalente à celle, attendue, d'un CEM III.

Si l'on prend en compte un écart-type de 0,03 sur la détermination de IA, cette valeur-seuil caractéristique IA serait fixée à 0,84 à 28 jours. Si ce seuil est atteint, la valeur de k doit être 1, l'argument majeur étant que le coefficient k doit aussi prendre en compte la durabilité.

Par extension, il pourrait être considéré que, si la valeur-seuil de IA à 28 jours est atteinte pour un laitier spécifique combiné à un ciment de référence testé en durabilité, le contrôle périodique de l'indice d'activité de ce couple «LM-CEM réf » est suffisant pour garantir la durabilité de tous les couples « LM-CEM » à base de ce laitier qui satisfont la valeur-seuil, sans pour autant que ces couples CEM-LM soient soumis à des essais de durabilité.

4. RESULTATS – PARTIE 2

4.1. Application de la formule de Bolomey

4.1.1. Calcul de k pour les combinaisons à 50 % de laitier moulu

Le coefficient k, calculé selon la formule de Bolomey, est présenté au tableau 5, pour les combinaisons testées en durabilité et démontrées équivalentes au CEM III.

Tableau 5 – I A et k selon Bolomey pour le LM dans les combinaisons “LM-CEM”

CEM I	IA 7j	k 7j	IA 28j	k 28j	IA 90j	k 90j
5 - 52.5 R	0.69	0.54	0.90	0.85	1.05	1.08
7 - 42.5 R	0.66	0.49	0.92	0.88	1.09	1.14
9 - 52.R ref	0.71	0.57	0.86	0.79	0.97	0.96
10 - 52.5 N	0.59	0.39	0.78	0.67	1.03	1.05

A 28 jours, les valeurs de k sont inférieures à 1 bien que la durabilité soit satisfaisante (eu égard à celle d'un CEM III). Ce constat renforce la conviction selon laquelle une valeur k de 1, calculée sur base de la comparaison avec la résistance en compression d'un CEM I, n'est pas un indicateur de durabilité approprié pour le laitier moulu.

A 90 jours, le coefficient k est de 1. Il ressort de ce double constat que si le coefficient k doit refléter à la fois la durabilité et la résistance, l'échéance de 90 jours, en termes de résistance, doit être préférée à 28 jours, comme le recommandent les experts en matière de durabilité (Guide AFGC, 2004).

Cette alternative d'une valeur de k à 90 jours pose toutefois question, elle aussi, car le principe-même de la détermination de k est biaisé et ce quelle que soit l'échéance d'hydratation : la comparaison avec un CEM I est en effet caduque dans le cas d'un taux de substitution élevé de la combinaison (apparenté aux cas des CEM III à ≥ 50 % laitier).

La détermination de la classe de résistance est la seule voie acceptable pour attribuer une valeur de coefficient k, car elle repose sur des bases techniques solides et bien documentées et permet d'éviter toute discrimination normative en matière d'utilisation du laitier de haut-fourneau dans les ciments conventionnels ou dans les liants recomposés au malaxeur à béton.

4.1.2. Calcul de k_{ass} pour les CEM III

La lenteur à l'hydratation du laitier de haut-fourneau est une évidence du matériau. La « correction » de cette « faiblesse » du matériau a fait l'objet de multiples recherches visant à activer le laitier, l'objectif spécifique étant d'atteindre, à court terme, les performances du ciment Portland.

Ces nombreuses tentatives n'ont pas abouti puisque à ce jour, il est rare qu'un ciment au laitier, par exemple un CEM III/A à 50 % de laitier, puisse égaler les performances d'un CEM I fabriqué avec le même clinker, même à 28 jours. Ainsi, sur le marché européen, les CEM I justifient aisément une classe 52,5 alors que les CEM III/ A et /B s'inscrivent généralement dans les classes 42,5 et 32,5. Si l'on traduit cette conclusion en termes de IA et de k cela signifie irrémédiablement que IA et k sont inférieurs à 1, pour le laitier constitutif du CEM III. Les « cas » présentés ci-après illustrent cette réalité des ciments au laitier conventionnels.

Cas 1 / Etude réalisée en France. Les Figures 1 et 2 ont été reproduites sur base des données extraites d'une étude réalisée en France sur mortier EN 196-1. (Cimbéton, 2010)(Bailly C., 2011).

Le développement plus lent de la résistance en compression du CEM III versus un CEM I comportant le même clinker ne laisse planer aucun doute sur les performances inférieures du CEM III à 7 et 28 jours, même lorsque la teneur en laitier n'est que de 40 % (Figure 2).

L'application de la formule de Bolomey permet de « traduire » cette différence de comportement CEM III-CEM I via le calcul d'un Indice de Réactivité (IR pour les CEM III assimilé à IA pour les

combinaisons à base de laitier moulu) et d'un coefficient k_{ass} (k_{ass} , pour les CEM III, assimilé à k des combinaisons à base de laitier moulu). Les résultats obtenus sont présentés au tableau 6.

Tableau 5. IR et k_{ass} CEM III

	IR 7 j	k_{ass} 7 j	IR 28 j	k_{ass} 28 j
CEM III/A (40 % S)	0.66	0.36	0.88	0.77
CEM III/A (62 % S)	0.71	0.64	0.89	0.90

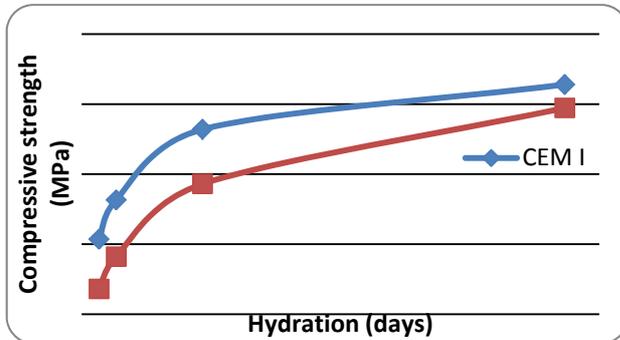


Figure 1. CEM I et CEM III/A (62 % S)

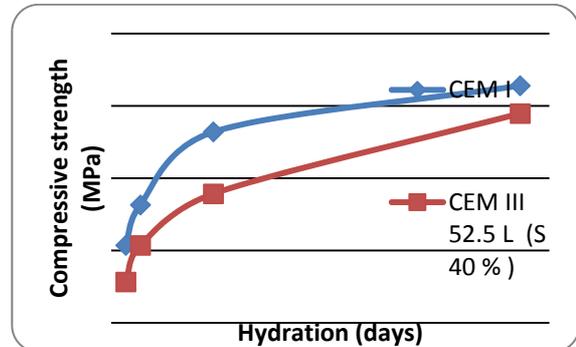


Figure 2. CEM I et CEM III/A (40 % S)

A 28 jours, les coefficients k_{ass} associés au laitier de haut-fourneau constitutif des CEM III concernés par les Figures 1 et 2 s'inscrivent dans la fourchette de valeurs du coefficient k caractéristiques du laitier moulu des combinaisons « LM-CEM » : la comparaison des tableaux 5 et 4 assoit ce constat.

Par ailleurs, le k_{ass} du laitier constitutif du CEM III est, comme attendu, < 1 . Nonobstant cette réalité de terrain, tout laitier de haut-fourneau satisfaisant les critères chimiques de la EN 197 bénéficie d'office d'une valeur de k de 1 lorsqu'utilisé comme constituant du ciment et ce bien qu'aucune exigence en matière de réactivité du laitier ne soit formulée dans la EN 197 alors que la norme EN 15167 exige un seuil d'activité minimum du laitier.

Il ressort de cette analyse globale que le laitier utilisé comme constituant du ciment bénéficie d'un triple avantage versus le laitier moulu : il ne doit satisfaire à aucune exigence de réactivité, il bénéficie d'un k de 1 pour autant que, combiné au clinker, il satisfasse une classe de résistance 32,5 et, il peut remplacer le clinker à hauteur de ...95 %!(CEM III/C). Il s'agit là d'une discrimination normative pure car aucun argument technique valable ne justifie cette règle "deux poids deux mesures", aucune différence de comportement n'étant observée entre l'utilisation amont ou aval du laitier.

Cas 2 / Autres études. D'autres données publiées, relatives à des CEM III (IBAC, 2008)(CTPL, 2008) ont été exploitées afin de calculer un k_{ass} selon la formule de Bolomey. Les données présentées au tableau 6 confirment le constat précédent.

Tableau 6 – IR et k_{ass} pour le laitier constitutif du CEM III

Etude IBAC - mortier EN 196-1 - CEM III/A (51 % S)			
IR 7j	k_{ass} 7j	IR 28j	k_{ass} 28j
0.56	0.35	0.85	0.78
Etude CTPL-CEBTP-CERIB - Béton - CEM III/B (71 % S)			
E/L 0.55		E/L 0.65	
IR 28j	k_{ass} j	IR 28j	k_{ass} 28j
0.48	0.47	0.39	0.42

5. CONCLUSIONS

Le principe du concept de coefficient k , basé sur la résistance en compression d'une combinaison avec addition minérale en comparaison avec celle du CEM I constitutif de la combinaison, est une hérésie technique dans le cas du laitier moulu (LM), du fait du taux élevé de remplacement potentiel du ciment par le laitier. Cette comparaison est d'autant plus caduque que le coefficient k , de l'avis

unanime des experts, est sensé refléter aussi la durabilité. Ce double critère « résistance et durabilité » sensé gouverner l'attribution d'un coefficient k implique qu'un lien soit établi entre la résistance en compression et la durabilité. Cette étude explore ce lien à travers l'application du concept de performance équivalente de béton (ECPC) en établissant une correspondance entre l'équivalence de performance en durabilité et l'Indice d'Activité des combinaisons testées en durabilité.

- L'application du concept ECPC permet de démontrer l'équivalence de durabilité entre les combinaisons "LM-CEM" et CEM III de teneur en laitier similaire.
- L'Indice d'Activité (IA) est un indicateur de la réactivité d'un couple spécifique "LM-CEM".
- La confrontation des valeurs de IA et des conclusions de ECPC a permis de proposer une valeur-seuil de IA, qui pourrait constituer une garantie en terme de durabilité.
- Il pourrait être considéré que, si la valeur-seuil de IA à 28 jours est atteinte pour un laitier spécifique combiné à un ciment de référence testé en durabilité, le contrôle périodique de IA de ce couple «LM-CEM réf » est suffisant pour garantir la durabilité de tous les couples « LM-CEM » à base de ce laitier qui satisfont la valeur-seuil, sans pour autant que ces couples CEM-LM soient soumis à des essais de durabilité.
- Cette confrontation a aussi permis de démontrer que la durabilité n'est pas remise en question si IA et k sont inférieurs à 1. Ce constat est cohérent avec le fait que la durabilité des CEM III est acquise d'office y compris pour la classe 32,5 et en l'absence de tout essai de durabilité

La formule de Bolomey a été appliquée aux combinaisons à base de LM et aux CEM III, pour calculer un coefficient k et un coefficient k_{ass} relatifs, respectivement, au LM et au laitier constitutif du CEM III.

- k et k_{ass} sont du même ordre de grandeur à 28 jours. Le fait que seul le laitier moulu soit sanctionné du fait d'un k inférieur à 1 constitue une discrimination normative grave.
- A 28 jours, ni le laitier moulu, ni le laitier constitutif du CEM III n'atteignent une valeur de IA de 1 et, en conséquence, la valeur de $k=1$ n'est pas atteinte, elle non plus.

L'application du concept k au laitier moulu introduit une règle « deux-poids-deux mesures » car l'utilisation d'un laitier de même origine, selon que son utilisation soit amont ou aval, générera une sanction économique totalement injustifiée dans le cas du laitier moulu.

La vérification de la classe de résistance d'une combinaison spécifique « LM-CEM » remplacerait avantageusement le concept k et éliminerait la discrimination normative actuelle car le système serait alors en phase avec ce qui est pratiqué pour les CEM III conformes à EN 197-1: pour ces ciments conventionnels en effet, la teneur en laitier et la classe de résistance sont garanties d'un comportement durable pour un environnement spécifique sans qu'il soit nécessaire d'effectuer des essais de durabilité. L'aptitude spécifique est donc acquise d'office pour les CEM III pour autant que la classe de résistance 32,5 soit satisfaite. Or, la fabrication d'un CEM III exige aussi la combinaison d'un clinker avec un laitier, les laitiers et clinker utilisés à cette fin, d'usines à usines, étant des variables constitutives du CEM III, au même titre que le laitier et le ciment qui composent une combinaison LM-CEM. Il n'y a donc aucune raison technique qui pourrait empêcher de transposer, aux combinaisons à base de laitier moulu, la règle qui vaut pour les CEM III: autoriser le remplacement du ciment kg pour kg si la combinaison testée satisfait au minimum accepté par la EN 197-1 en termes de classes de résistance à savoir 32,5. La classe de résistance 32,5 devrait être le passeport pour un coefficient k de 1.

6. REFERENCES

- AFGC, *Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages*, 2004.
- Bailly, C. "Dossier Spécial – Laitiers de haut-fourneau". *Béton(s)* n° 33, Mars/Avril 2011
- Baron, J., Ollivier, JP. *Les bétons–Bases et données pour leur formulation* pp. 62-66, Eyrolles 1997.
- BS 8500-2, Concrete (2006). Part 2: Specification for constituent materials and concrete.
- Cimbéton- Centre d'information sur le ciment et ses applications. "Vous avez dit ciments verts ?".
- CTPL,CEBTP,CERIB. Etude des bétons aux laitiers de haut-fourneau vitrifiés moulus. Rap int 2008.
- Hardtl, R. "The application of the k-value concept to ground granulated blast furnace slag". *Cement International*, 6/2010 vol 8, pp 66-73.
- Hourdin, A., Songeur, W. "La valorisation des laitiers sidérurgiques en cimenterie" Association française des opérateurs sur coproduits industriels. Journée technique 19 Mai 2011.
- Marion, AM., Musikas, N. "Laitier de haut-fourneau moulu : il a sa place dans le béton" *Laitiers sidérurgiques* N°94 – Mai 2009 – CTPL
- Marion, AM., Musikas, N. "GGBS as a concrete addition? A "true" substitute for concrete". *Proceedings of the International Congress on Durability of Concrete, Trondheim 2012.*
- Marion, AM., Musikas, N., Prossnitz-Bodart, M. "Evidence for k-value 1 for GGBS". *Proceedings of the International Congress on Durability of Concrete, Trondheim 2012.*

Ollivier, JP., Vichot, A. Association Technique des Liants hydrauliques (ATILH)
La durabilité des bétons- 2008 - Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées.
Rasch, S., Brameshuber, W. Erarbeitung von Anwendungsregeln für Huttensand als betonzusatzstoff gemäß der harmonisierten Europäischen Stoffnorm. IBAC – Aachen – August 2008.
Smith, I.A. The Design of Fly Ash Concrete. Proc. Institution of Civil Engineers, Vol. 36, London 1967, p. 769-790.
Vissers, J. L. J. k-value determination for type II additions- Background and recommendations". KEMA report 99-6597, Arnheim/NL 1998, 26 pp.