

# Étude de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures des bétons formulés avec des ciments à forte teneur en laitier de haut fourneau

Loïc DIVET

Université Paris Est, IFSTTAR, Marne-la-Vallée, France

Robert LE ROY

École Nationale Supérieure d'Architecture

Paris-Malaquais, France

Université Paris Est, IFSTTAR, Marne-la-Vallée, France

## ■ RÉSUMÉ

La durabilité de neuf bétons formulés principalement avec des ciments à base de laitier de haut fourneau a été étudiée à partir de corps d'épreuve réalisés en vraie grandeur. Cet article rappelle les propriétés d'hydratation du laitier de haut fourneau et ses différents modes d'activation. Il présente les résultats expérimentaux obtenus lors des essais réalisés en laboratoire sur des carottes extraites des corps d'épreuve âgés de 90 jours. Plusieurs grandeurs ont été mesurées afin de déterminer les propriétés des bétons vis-à-vis de leur résistance mécanique et de leur durabilité : la résistance en compression, la porosité accessible à l'eau, la perméabilité apparente au gaz, le coefficient de diffusion effectif des ions chlorure, la résistance à la carbonatation par un essai accéléré, la détermination de la taille des pores par porosimétrie au mercure et le suivi de la microstructure par analyse thermique. Les résultats expérimentaux montrent que l'incorporation dans les ciments de plus de 40 % de laitier de haut fourneau génère des bétons de meilleure durabilité vis-à-vis des processus liés à la pénétration des chlorures dans le matériau. L'utilisation dans les structures en élévation de ciment à base de laitiers de haut fourneau n'est pas systématiquement associée à un risque de corrosion des armatures par carbonatation.

## A study about durability with regard to framework corrosion of concretes formulated with high blast-furnace slag content

### ■ ABSTRACT

The durability of nine concretes, mainly formulated with blast-furnace slag based cements, has been studied from life-size test samples. This article recalls hydration properties of blast-furnace slag and its different activation forms. It presents experimental results obtained from tests carried out in laboratory on cores extracted from 90 days old test samples. Several quantities have been measured to determine the properties of concretes with regard to their mechanical resistance and durability: compression strength, water porosity, gas permeability, effective diffusion coefficient of chloride ions, carbonation resistance by an accelerated test, pore size determination by mercury porosimetry, and microstructure monitoring by thermal analysis. Experimental results show that blending in cements of more than 40% of blast-furnace slag generates better durability concretes with regard to processes linked with chlorides penetration in the material. The use of blast-furnace slag based cement in raising frameworks is not systematically associated with a corrosion risk of armature by carbonation.

## 1. INTRODUCTION

Dans un souci d'optimisation des ressources financières et naturelles, un nombre croissant de concepteurs et de gestionnaires d'ouvrage souhaite concilier durabilité des ouvrages et utilisation de matériaux de construction plus respectueux de l'environnement. L'utilisation de ciments composés

au laitier de haut fourneau dans la formulation des bétons peut être une solution pour répondre aux grands enjeux de la construction durable. Dans le monde, près de 250 millions de tonnes de laitier de haut fourneau sont disponibles par an (CEMSUISSE, 2004). Le laitier de haut fourneau est de plus en plus utilisé pour plusieurs raisons, d'ordre technique, environnemental ou esthétique.

Sur le plan technique, la première qualité des ciments au laitier de haut fourneau est de permettre la réalisation de structures durables en environnement chimiquement agressif (eau de mer, eau sulfatée, etc.). De plus, il est en général plus facile de fluidifier les bétons formulés avec des ciments au laitier du fait de leur demande en eau plus faible que celle de la plupart des ciments Portland. Leur vitesse de dégagement de chaleur étant assez lente, ils sont aussi appropriés pour les bétons de masse. Ils contribuent également à la prévention des désordres par alcali-réaction et réaction sulfatique interne. La résistance au gel pur des bétons de ciment au laitier est comparable à celle des bétons de ciment Portland (Brandstetr, 1987). Par contre, ils sont plus sensibles à l'attaque du gel en présence de sels de déverglaçage (Saric-Coric, 2001). Leur formulation doit être optimisée et la mise en œuvre (en particulier la cure) doit être particulièrement soignée afin d'avoir un béton d'enrobage de qualité et de structure poreuse assez fermée.

Du point de vue environnemental, les laitiers de haut fourneau peuvent être utilisés dans le but de diminuer l'émission de dioxyde de carbone. Selon le Centre Interprofessionnel Technique et d'Études de la Pollution Atmosphérique (CITEPA), les cimenteries sont à l'origine de 2,7 % des émissions de CO<sub>2</sub> en France, soit 12 % des émissions de l'industrie en 2003. Et selon le World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), si les pratiques actuelles ne changent pas, les émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'industrie du ciment au niveau mondial devraient être multipliées par quatre d'ici 2050. En effet, la fabrication d'une tonne de clinker, principal constituant du ciment, génère environ 870 kg de CO<sub>2</sub>. Le laitier, qui est un sous-produit de la sidérurgie, est considéré comme un co-produit à zéro émission de CO<sub>2</sub> (toutefois, ce sujet est en cours de discussion au niveau international et les attributions pourraient aller de 40 à 1600 kg de CO<sub>2</sub> par mètre cube). La substitution au clinker d'un laitier à zéro émission de CO<sub>2</sub> permet une réduction d'émission directe comprise entre 65 et 95 %. C'est aussi un moyen de préserver les ressources naturelles nécessaires à la production du clinker (calcaire, argile).

Enfin, les qualités esthétiques des bétons de ciment au laitier sont reconnues car elles s'apparentent à celles obtenues avec les bétons formulés avec des ciments blancs.

Les laitiers de haut fourneau présentent donc de nombreuses qualités qui les rendent intéressants dans plusieurs domaines d'application. Leur utilisation dans les structures en élévation reste toutefois limitée en France en raison du manque de données sur leur durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures due au phénomène de carbonatation de la matrice cimentaire. En effet, les bétons à base de laitier de haut fourneau sont réputés plus sensibles à la carbonatation parce qu'ils ont une teneur plus faible en portlandite (Ca(OH)<sub>2</sub>). Or, la réserve basique que constituent les cristaux de portlandite est primordiale pour assurer et maintenir la passivation des armatures au cours du temps. La carbonatation de la matrice cimentaire est provoquée par une réaction acido-basique entre le dioxyde de carbone contenu dans l'air et les produits d'hydratation du ciment (en particulier la portlandite et les silicates de calcium hydratés CSH). Un front de carbonatation s'établit alors et peut progresser vers l'intérieur des structures en béton et abaisser le pH suite à la formation de carbonate de calcium. Lorsque ce front atteint le niveau des armatures métalliques, la diminution du pH ne permet plus de protéger les armatures par passivation des aciers.

L'IFSTTAR (alors Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), en partenariat avec la société HOLCIM, a lancé pour cette raison un programme expérimental ayant pour objectif de caractériser la durabilité d'une gamme de 9 bétons formulés principalement avec des ciments à base de laitier de haut fourneau pour des applications dans le domaine du bâtiment et des ouvrages d'art. La durabilité de ces bétons n'a pas été mesurée sur des éprouvettes de béton coulées en laboratoire, mais sur des éléments de structure exposés à des conditions naturelles de maturation afin de bien caractériser la qualité du béton de recouvrement des armatures. En effet, il existe une différence microstructurale

entre la peau (2 à 3 cm d'épaisseur) et le cœur du béton engendrée par plusieurs causes liées à la mise en place et à la cure du béton : effet de coffrage, ségrégation, évaporation, fissuration excessive. Les essais sur éprouvettes de laboratoire ne permettent pas de se rapprocher de la réalité du terrain. L'étude a reposé sur la détermination des indicateurs de durabilité préconisés dans le guide AFGC « Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages » (AFGC, 2004).

Le présent article rappelle les propriétés d'hydratation du laitier de haut fourneau et ses différents modes d'activation. Il présente les résultats expérimentaux obtenus lors des essais réalisés en laboratoire sur des carottes extraites des corps d'épreuve âgés de 90 jours. Plusieurs grandeurs ont été mesurées afin de déterminer les propriétés des bétons vis-à-vis de leur résistance mécanique et de leur durabilité : la résistance en compression, la porosité accessible à l'eau, la perméabilité apparente au gaz, le coefficient de diffusion effectif des ions chlorure, la résistance à la carbonatation par un essai accéléré, la détermination de la taille des pores par porosimétrie au mercure et le suivi de la microstructure par analyse thermique.

Les valeurs des indicateurs de durabilité obtenues sont également confrontées à celles des bétons formulés avec un ciment portland artificiel de type CEM I et un ciment Portland composé de type CEM II ainsi qu'à celles figurant dans le guide de l'AFGC.

## 2. LE LAITIER GRANULÉ DE HAUT FOURNEAU

### ■ 2.1. Liste des ciments comportant de fortes teneurs en laitier de haut fourneau

Il existe aujourd'hui trois grandes catégories de ciment comportant des fortes teneurs en laitier de haut fourneau : le ciment de laitier de haut fourneau, le ciment composé et le ciment sursulfaté.

Le ciment de laitier de haut fourneau est dénommé CEM III selon la norme NF EN 197-1 (AFNOR, 2001, 2012). La proportion massique de laitier est comprise entre 36 % et 95 %, le reste étant du clinker. Le **tableau 1** rappelle les trois sous-classes, leurs notations ainsi que leurs compositions.

Le ciment composé est dénommé CEM V selon la norme NF EN 197-1. Il s'agit d'un ciment ternaire qui contient du clinker, du laitier de haut fourneau ainsi que des cendres volantes ou des pouzzolanes (**tableau 2**).

Enfin, la dernière catégorie concerne le ciment sursulfaté dénommé CSS selon la norme NF EN 15 743 (AFNOR, 2010). Le **tableau 3** donne la composition de ce ciment. Il présente notamment la

**tableau 1**  
Tableau récapitulatif  
des ciments au laitier  
de haut fourneau  
dénommés CEM III selon  
la norme NF EN 197-1.

Type de ciment	Désignation	Clinker (% massique)	Laitier de haut fourneau (% massique)	Constituants secondaires (% massique)
CEM III	CEM III/A	35-64	36-65	0-5
	CEM III/B	20-34	66-80	0-5
	CEM III/C	5-19	81-95	0-5

**tableau 2**  
Tableau récapitulatif  
des ciments composés  
dénommés CEM V selon la  
norme NF EN 197-1.

Type de ciment	Désignation	Clinker (% massique)	Laitier de haut fourneau (% massique)	Pouzzolanes ou cendres volantes siliceuses (% massique)	Constituants secondaires (% massique)
CEM V	CEM V/A	40-64	18-30	18-30	0-5
	CEM V/B	20-38	31-50	31-50	0-5

**tableau 3**  
Composition du ciment sursulfaté dénommé CSS selon la norme NF P15-313 à l'époque de l'étude.

Type de ciment	Laitier de haut fourneau (% massique)	Sulfate de calcium (% massique)	Constituants secondaires (% massique)
CSS	≥ 80	≤ 20	0 à 5

particularité de ne pas contenir de clinker. C'est un ciment qui a été mis au point par L. Blondiau en 1937. En Europe, les différentes normes nationales du ciment sursulfaté sont devenues obsolètes avec la mise en application des normes européennes EN 197, qui n'ont pas repris cette famille de ciment. Le ciment sursulfaté a été produit jusqu'au début des années 1980 en France et en Belgique. La production a été arrêtée par manque de laitier de qualité suffisante. Depuis mai 2005, la norme NF P15-313 (AFNOR, 2005) a été rééditée et ce ciment est à nouveau commercialisé en raison notamment de progrès dans l'activation du laitier de haut fourneau. Ce ciment a fait ensuite l'objet d'une norme européenne à partir de 2010 (AFNOR, 2010).

## ■ 2.2. L'élaboration du laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un matériau non-métallique formé essentiellement de silice, d'alumine et de chaux. C'est un sous-produit de l'industrie sidérurgique provenant de l'élaboration de la fonte. Il est constitué par la partie non ferreuse de la « charge », c'est-à-dire la gangue du minerai, et par des constituants secondaires tels que les résidus de minerais de fer, de combustion du coke et de carbonate de calcium.

Afin d'obtenir l'état vitreux, indispensable pour son utilisation comme substitut du ciment Portland, ce laitier de haut fourneau doit être granulé. Le principe de la granulation est d'extraire le plus possible de chaleur d'une quantité de laitier fondu, en un minimum de temps (trempe). Pour ce faire, il est d'abord nécessaire de réduire le laitier en gouttelettes ou en grains de 3 à 5 mm. Cette granulation se fait soit sous air, soit sous eau.

## ■ 2.3. La réactivité hydraulique du laitier de haut fourneau

L'hydraulicité, ou réactivité hydraulique, du laitier est essentiellement appréciée à partir de critères granulométriques, de critères minéralogiques (taux de vitrification), de critères chimiques (indices de basicité, teneur en MgO...) mais surtout par des essais de résistance mécanique sur mortiers et/ou bétons. En effet, le laitier est jugé d'autant plus hydraulique que les résistances d'un ciment l'utilisant seront élevées.

### › 2.3.1. Influence de la granulométrie

La granulométrie a une influence prédominante sur la demande en eau du ciment et sur la réactivité hydraulique du laitier. Plus la finesse du laitier est élevée, plus la réactivité hydraulique est grande et plus les résistances mécaniques sont élevées.

### › 2.3.2. Influence de la minéralogie

Des critères minéralogiques tels que le taux de vitrification du laitier de haut fourneau ont une influence sur la réactivité hydraulique du laitier. Le laitier vitrifié présente une structure vitreuse riche en énergie. En effet, le laitier à l'état fondu renferme une énergie thermique très importante (1700 kJ/kg = énergie interne du laitier), qui n'est pas entièrement dissipée par refroidissement rapide, de sorte que le très bas niveau d'énergie de l'état cristallisé n'est pas atteint. De ce fait, le laitier possède une énergie interne plus élevée qu'à l'état cristallin, ce qui le rend plus réactif chimiquement (Regourd et al., 1980 ; Goto et al., 1985). L'hydraulicité du laitier vitrifié correspond donc à sa faculté d'évoluer, sous l'effet d'une activation basique ou autre, vers son plus bas niveau d'énergie en formant des produits d'hydratation solides. Le laitier vitrifié est donc un liant hydraulique latent.

### › 2.3.3. Influence de la composition chimique

L'hydraulicité du laitier, ou sa réactivité hydraulique, dépend également de sa composition chimique. En effet, les teneurs en CaO, en MgO, en SiO<sub>2</sub> et en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ont une influence sur la réactivité du laitier. La réactivité hydraulique du laitier augmente avec la teneur en chaux (CaO). Elle augmente avec la teneur en oxyde de magnésium pour un dosage strictement inférieur à 15 % et lorsque les teneurs en silice (SiO<sub>2</sub>) et en oxyde de manganèse (MnO) diminuent (Smolcyk, 1978). Selon Goto et al. (1985), le dosage idéal en alumine permettant d'obtenir une réactivité hydraulique maximale du laitier serait aux alentours de 13-14 %. L'aluminium, ainsi que le magnésium, contribuent à désordonner la structure du verre de laitier en augmentant le niveau d'énergie du verre. Celui-ci devient ainsi moins stable et plus soluble, c'est-à-dire plus hydraulique.

La composition chimique est donc une donnée simple et déterminante pour définir l'hydraulicité des laitiers. C'est pourquoi des modules et index chimiques ou encore indices d'activité ont été établis dans le but d'évaluer ce caractère hydraulique des laitiers. L'indice le plus connu et le plus répandu est l'indice de basicité. Il correspond au rapport de la somme des constituants basiques d'un laitier sur la somme des constituants acides. Là aussi, il existe plusieurs indices. Le module de basicité ( $I = \text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) est le plus couramment utilisé. Les laitiers peuvent alors être classés en trois catégories :

- les laitiers de basicité élevée :  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,3$  à  $1,4$  ;
- les laitiers de basicité modérée :  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,1$  à  $1,2$  ;
- les laitiers acides :  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 1$ .

Selon Uchikawa et Okamura (1983), une basicité élevée est caractéristique d'une bonne réactivité du laitier. La qualité des laitiers a évolué au cours du temps en fonction notamment de l'approvisionnement en minerais. En France, le module de basicité a diminué au cours des dernières décennies, passant de 1,5 à 1,2. Le cas des laitiers de très faible basicité et des laitiers acides se rencontre dans certains pays comme les États-Unis d'Amérique, ce qui se traduit par des ciments au laitier de haut fourneau moins performants.

## ■ 2.4. L'hydratation du laitier de haut fourneau

Le laitier granulé de haut fourneau, dont la composition peut être schématisée par la formule moyenne  $C_5S_3A$  en notation cimentière (rappel : C = CaO, S = SiO<sub>2</sub>, A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, H = H<sub>2</sub>O et S = SO<sub>3</sub>). Elle reflète assez bien la répartition des trois oxydes principaux dans les laitiers courants puisqu'elle correspond à la composition centésimale suivante : CaO = 49,8 %, SiO<sub>2</sub> = 32,0 % et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 18,2 %. Contrairement au ciment qui est soluble dans l'eau et s'hydrate par simple addition d'eau, le laitier de haut fourneau vitrifié est peu soluble et a donc besoin, pour faire prise dans un délai raisonnable, d'un additif appelé activant. Le processus d'hydratation du laitier est ensuite semblable à celui du ciment Portland tel qu'il fut expliqué par Le Chatelier.

La réaction du produit nécessaire à l'activation du laitier vitrifié est en pratique toujours basique. L'activation du laitier vitrifié peut être obtenue de différentes manières ; on caractérise l'activation par le mode d'action chimique qu'elle met en jeu (Regourd, 1980 ; Dron et Brivot, 1980 ; Dron, 2004 ; Regourd, 1986 ; Goto et al., 1992 ; Kim et Hong, 2001). L'activant peut jouer le rôle de catalyseur ou de réactif :

- le catalyseur active la réaction de dissolution/précipitation mais n'entre pas dans la structure de l'hydrate ;
- le réactif active la réaction de dissolution/précipitation, est consommé lors de la réaction d'hydratation et entre dans la structure de l'hydrate.

### › 2.4.1. Activation alcaline

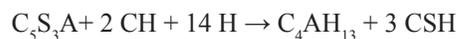
L'activation alcaline peut-être sodique, potassique ou calcique. Le pouvoir dissolvant de l'eau est alors modifié par une élévation du pH, qui assure le passage en solution de l'alumine du

laitier, de la silice et de la chaux ainsi que la formation d'hydrates de natures différentes selon le mode d'activation.

Par activation sodique ou potassique, il se forme trois hydrates qui sont les silicates de calcium hydratés (C-S-H), l'aluminate tétracalcique hydraté ( $C_4AH_{13}$ ) et la gehlenite hydratée ( $C_2ASH_8$ ). L'activation de la soude se limite à un rôle de catalyseur. Les C-S-H résultant de l'hydratation du laitier sont plus denses que ceux du ciment Portland. De plus, le rapport massique «CaO/SiO<sub>2</sub>» est plus faible et est voisin de 1 au lieu de 1,5 ou 1,7 pour les ciments Portland. La formule stœchiométrique pour l'hydratation du laitier activé par la soude peut s'écrire de la manière suivante :



Dans le cas de l'activation calcique, la gehlénite hydratée n'apparaît pas en présence de  $Ca(OH)_2$ . En effet, toute l'alumine du laitier se retrouve dans l'aluminate tétracalcique hydraté. Ce composé est nettement plus riche en chaux, d'où une consommation de l'activant (CaO), comparé à l'activation par la soude. La silice se trouve intégralement dans les phases hydratées sous forme de silicate de calcium hydraté. Avec la chaux, la réaction d'hydratation des laitiers granulés de haut fourneau activés, s'écrit:

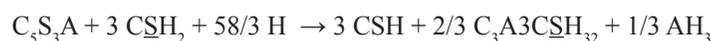


#### › 2.4.2. Activation sulfatique

L'activation sulfatique s'écarte de l'action strictement catalytique davantage encore que l'activation calcique. En effet, le sulfate de calcium, tel que le gypse ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  ou  $CSH_2$ ), est un véritable réactif, qui se combine avec les éléments du laitier, solubilisés dans l'eau, pour donner naissance principalement au trisulfoaluminate de calcium hydraté ( $C_3A_3CSH_{32}$  ou  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ , appelé ettringite). Il se forme par ailleurs du silicate de calcium hydraté (C-S-H) et de la gibbsite ( $AH$  ou  $Al(OH)_3$ ).

Les grains de laitier s'entourent d'une couche dense de silicate de calcium hydraté (C-S-H) et d'aiguilles d'ettringite très nombreuses. L'ettringite se présente en fines aiguilles liantes omniprésentes dans la pâte tandis que l'ettringite du ciment Portland est localisée près des cristaux de  $C_3A$ . L'ettringite constitue la phase majoritaire de la microstructure. Avec ce type d'activation, l'hydratation du laitier de haut fourneau est lente.

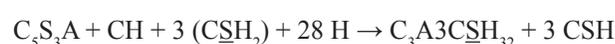
La réaction d'hydratation du laitier activé par le gypse est la suivante:



La réaction d'hydratation du ciment nécessite alors plus d'eau que celle des ciments Portland ou de laitier de haut fourneau et le rapport massique « CaO/SiO<sub>2</sub> » est aussi plus faible que celui des ciments Portland. Ce type d'activation nécessite une formulation du ciment très précise pour convertir exclusivement en ettringite les sulfates et les aluminates qui passent en solution dans l'eau interstitielle. Ce ciment est aussi sensible à la température interne du béton au jeune âge, qui peut ralentir, voire empêcher, la formation d'ettringite à partir de 65°C.

#### › 2.4.3. Activation sulfato-calcique ou sodo-calcique

Dans le cas de l'activation sulfato-calcique, c'est-à-dire en présence de gypse et de chaux, la réaction d'hydratation du laitier de formule moyenne  $C_5S_3A$ , s'écrit:



Là aussi, l'ettringite a un développement sous la forme d'aiguilles fines en épis. Elle est également associée, comme dans tous les mécanismes d'hydratation du laitier, à la formation de silicates de calcium hydraté. Dans ce type d'activation, la chaux présente avec le gypse permet d'accélérer la cinétique d'hydratation du laitier par rapport à une activation uniquement à base de sulfate de calcium.

L'activation sulfato-calcique est rencontrée dans les ciments au laitier de haut fourneau (type CEM III). En effet, le gypse et la chaux libérée par l'hydratation des silicates du clinker participent au mécanisme d'hydratation de ces ciments. Ce mécanisme d'activation peut être aussi utilisé dans les ciments sursulfatés susceptibles de contenir jusqu'à 5 % de constituants secondaires. La réactivité de ces ciments peut être amplifiée par ajout d'alcalis, par exemple par l'apport des poussières de four calcinées. Dans ces conditions, il s'agit alors d'une activation sodo-sulfatique.

Le développement des résistances mécaniques des bétons au laitier obtenues par activation sulfato-calcique est lié à la formation de très nombreuses aiguilles d'ettringite dans la pâte durcie. Par rapport aux ciments Portland, ces ciments présentent des résistances initiales plus faibles, mais des résistances finales équivalentes, voire plus élevées. Il est important de préciser que, dans ces conditions de formation, l'ettringite ne possède aucun caractère nocif vis-à-vis du béton. En effet, la formation a lieu dans une matrice en cours de durcissement suivant un processus de dissolution/précipitation à partir de la solution interstitielle lorsque celle-ci atteint le seuil de saturation requis. L'ettringite cristallise alors sans provoquer un gonflement du béton.

Dans l'activation sodo-sulfatique, la soude joue un simple rôle de catalyseur tandis que la chaux et le gypse entrent dans la réaction d'hydratation. Cette activation utilise cinq fois plus d'activant que l'activation calcique, mais la quantité d'hydrates formée est deux fois plus importante.

### 3. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

#### ■ 3.1. Caractéristiques des ciments et des bétons étudiés

Quatre bétons représentatifs d'une utilisation pour la construction des bâtiments coulés in situ (classe de résistance C25/30) et cinq bétons pour la construction des ouvrages d'art et des éléments préfabriqués de bâtiment (classe de résistance C50/60) ont été étudiés. Ce choix a permis de caractériser des bétons dont la résistance moyenne à la compression varie de 30 à 80 MPa. La formulation détaillée est donnée dans les **tableaux 4** et **5**. Pour tous les bétons, nous avons utilisé des granulats (sable 0/4 et de gravillons 4/20) provenant de calcaires concassés du Tournaisis.

Nous avons également fait varier la nature du ciment et le mode d'activation du laitier de haut fourneau :

- pour la nature du ciment : il s'agit d'un ciment Portland artificiel de type CEM I et de plusieurs ciments à base de laitiers de haut fourneau dont la teneur varie de 21 à 82 % (**tableau 6**). Pour ces

	Béton 1	Béton 2	Béton 3	Béton 4
Nature du ciment	CEM II/B 32,5 R	CSS	CSS	CEM III/A 42,5 N
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	320	320	320	320
Sable humide 0/4 (kg/m <sup>3</sup> )	861	888	916	865
Gravillon humide 4/20 (kg/m <sup>3</sup> )	1025	1034	1080	1048
Eau efficace (L/m <sup>3</sup> )	175	160	134	175
Superplastifiant (% de la masse de ciment)	0	0	0	0
$e_{\text{eff}}/c$	0,54	0,47	0,42	0,53
Affaissement (mm)	130	230	130	120
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2360	2407	2401	2358
Air occlus (%)	1	0,7	1,5	1,3

**tableau 4**  
Formulation des bétons  
de classe C25/30.

	Béton 5	Béton 6	Béton 7	Béton 8	Béton 9
Nature du ciment	CEM III/C 32,5 N PM ES	CEM I 52,5 N PM ES	CEM III/A 42,5 PM ES	CSS	CSS
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	395	385	386	388	386
Sable humide 0/1 (kg/m <sup>3</sup> )	870	854	893	900	919
Gravillon humide 4/20 (kg/m <sup>3</sup> )	1058	1051	1064	1061	1080
Eau efficace (L/m <sup>3</sup> )	142	142	142	142	136
Superplastifiant (%)	3,46	0,90	2,45	1,92	5,39
$e_{\text{eff}}/c$	0,36	0,37	0,36	0,37	0,33
Affaissement (mm)	240	220	230	240	240
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2423	2463	2414	2410	2448
Air occlus (%)	0,8	1,3	1,0	1,4	0,9

**tableau 5**  
Formulation des bétons d'ouvrages d'art.

Nature du ciment	CEM I 52,5 N PM ES	CEM II/BM 32,5 R	CEM III/A 42,5 N	CEM III/A 42,5 PM ES	CEM III/C 32,5 N PM ES	CSS
Clinker	100	68	54	35	15	0
Laitier	0	21	43	62	82	80
Calcaires	0	6	0	0	0	0
Constituants secondaires	0	5	3	3	3	3
Gypse	3,0	4,0	4,0	4,8	4,4	< 20
Surface massique (cm <sup>2</sup> /g)	4100	3000	3900	4100	4100	5400

**tableau 6**  
Teneurs en constituants et surface massique des ciments utilisés dans la formulation des bétons (résultats exprimés en % massique).

ciments, l'origine du clinker et du laitier de haut fourneau est identique afin de pouvoir notamment analyser l'influence de la teneur en laitier du ciment sur les propriétés de durabilité des bétons ;

- pour le mode d'activation du laitier de haut fourneau : les bétons 5 et 8 sont formulés avec des ciments comportant la même quantité de laitier de haut fourneau, mais ils se distinguent par une activation au sulfate de calcium pour le béton 8 et une activation au sulfate de calcium et à la chaux (ou portlandite) pour le béton 5.

La composition des différents ciments utilisés dans la campagne expérimentale est donnée dans le **tableau 6**.

### ■ 3.2. Réalisation des éléments de structure et prélèvement des échantillons

Les corps d'épreuve sont des voiles en béton d'épaisseur 20 cm, de largeur 1 m pour 2 m de hauteur, ancrés sur une semelle filante afin d'assurer leur stabilité (**figure 1**). Les corps d'épreuve ont été fabriqués en avril 2005 par la société HOLCIM sur leurs installations de broyage de Dunkerque. Ils ont été bétonnés à la pompe et ont été décoffrés à l'âge de 10 jours, afin de se trouver dans des conditions de très bonne cure.

Plusieurs carottages par voile ont été effectués 3 mois après la réalisation des corps d'épreuve, afin de laisser un temps de maturation des bétons suffisamment important. Deux diamètres de carottes ont été utilisés : l'un approprié pour les mesures de perméabilité au gaz (150 mm) et l'autre pour la détermination de la diffusivité des ions chlorure (110 mm) et pour l'essai de carbonatation accélérée.



**figure 1**  
*Vue générale du site  
d'HOLCIM à Dunkerque  
avec les corps d'épreuve.*

Ces carottes ont ensuite été sciées en laboratoire en plusieurs tranches afin de caractériser, d'une part, le béton de recouvrement des aciers (profondeur analysée : 0 - 3 cm) et, d'autre part, le béton au cœur des carottes.

### ■ 3.3. Méthodes de détermination des indicateurs de durabilité

Les carottes extraites des voiles en béton ont été soumises à différentes techniques de caractérisation afin de déterminer les propriétés des bétons vis-à-vis de leur résistance mécanique et de leur durabilité. Ces essais correspondent pour la majorité à ceux déjà utilisés dans les travaux de V. Baroghel-Bouny (Baroghel-Bouny et al., 2000, 2002a, 2004 ; Baroghel-Bouny, 2005a, 2005b). Il s'agit :

- de la résistance en compression ;
- des caractéristiques porosimétriques (par porosité accessible à l'eau et porosimétrie au mercure) ;
- de la perméabilité aux gaz ;
- du coefficient de diffusion aux gaz ;
- de la cinétique de carbonatation en conditions accélérées.

Les résistances à la compression ont été mesurées sur des éprouvettes cylindriques 110 x 220 mm réalisées sur le chantier de Dunkerque. Elles ont été conservées 24 heures sur le site puis transportées au laboratoire pour être conservées en salle humide à 20°C. Les résistances ont été déterminées à différentes échéances : 1, 2, 7, 28 et 90 jours.

Les mesures de porosité accessible à l'eau ont été réalisées sur des échantillons prélevés au cœur (à environ 10 cm de profondeur) et à la surface des carottes. Ils ont été séchés à 105°C et ont subi le mode opératoire recommandé par l'AFPC-AFREM (1997).

La distribution du rayon d'accès des pores par intrusion de mercure a été déterminée pour deux niveaux de profondeur : à cœur et en surface (le premier centimètre). Les échantillons ont été préparés selon la méthode décrite par Baroghel-Bouny et al. (2002b), qui consiste à les sécher à 45°C sous vide et en présence de gel de silice durant 14 jours.

Les essais de perméabilité aux gaz ont été réalisés à l'aide d'un perméamètre CEMBUREAU selon la méthode proposée par l'AFPC-AFREM (1997). Les mesures de perméabilité sont faites sur les trois premiers centimètres au contact de l'air représentatif du béton de recouvrement des aciers. Après saturation en eau sous vide, les faces latérales des disques obtenus sont recouvertes d'un ruban d'aluminium adhésif. Ils sont ensuite placés dans une étuve ventilée à 80°C durant 28 jours avant d'être séchés à 105°C jusqu'à masse constante.

La détermination du coefficient de diffusion des chlorures a été réalisée sur les deux premiers centimètres de chaque béton. Nous avons utilisé la méthode en régime stationnaire qui permet de déterminer le coefficient de diffusion « effectif » à partir d'un essai de migration sous champ électrique (Baroghel-Bouny et al., 2002b). Il est important de signaler que cette méthode ne prend pas en compte l'interaction de l'ion avec le matériau. Une tranche de carotte de diamètre 110 mm et d'épaisseur 20 mm est placée au centre d'une cellule constituée de deux compartiments qui contiennent, du côté aval, une solution exempte de chlorures (eau distillée) et, du côté amont, la même solution additionnée de chlorures. À l'extrémité de chaque compartiment se trouve une électrode reliée à un générateur de tension stabilisée. Une différence de potentiel est appliquée entre ces deux électrodes de sorte que les ions chlorure migrent de la solution saline vers le compartiment aval en traversant l'échantillon. Afin d'éviter la diffusion latérale, la périphérie de l'échantillon est recouverte d'une résine époxy étanche à l'eau. L'échantillon de béton est saturé par immersion dans l'eau distillée sous vide durant au moins 24 heures avant de commencer l'essai.

Des essais de carbonatation accélérée ont été également réalisés. La résistance à la carbonatation a été ici mesurée sur les cinq premiers centimètres de chaque béton. Le préconditionnement des carottes de béton avant les essais de carbonatation accélérée est relativement complexe et fait l'objet de nombreuses discussions dans la littérature. Nous avons retenu le mode opératoire proposé par Villain et al. (2007), qui consiste à sécher les échantillons pendant un mois à  $T = 60^\circ\text{C}$  et  $H_r = 65\%$  avec des variations lentes de la température pour éviter les chocs thermiques. Ce mode opératoire permet d'obtenir un taux de saturation en eau plus homogène dans les éprouvettes de béton, ce qui facilite la comparaison des résultats de carbonatation accélérée. Les carottes ont été emballées par de l'aluminium adhésif, qui présente l'avantage d'assurer un séchage et une carbonatation unidirectionnels et de diminuer considérablement les effets de bord. Des mesures de profondeur carbonatée par phénolphthaléine ont été effectuées après différentes durées d'exposition (0, 7, 14, 21, 28, 45 et 56 jours).

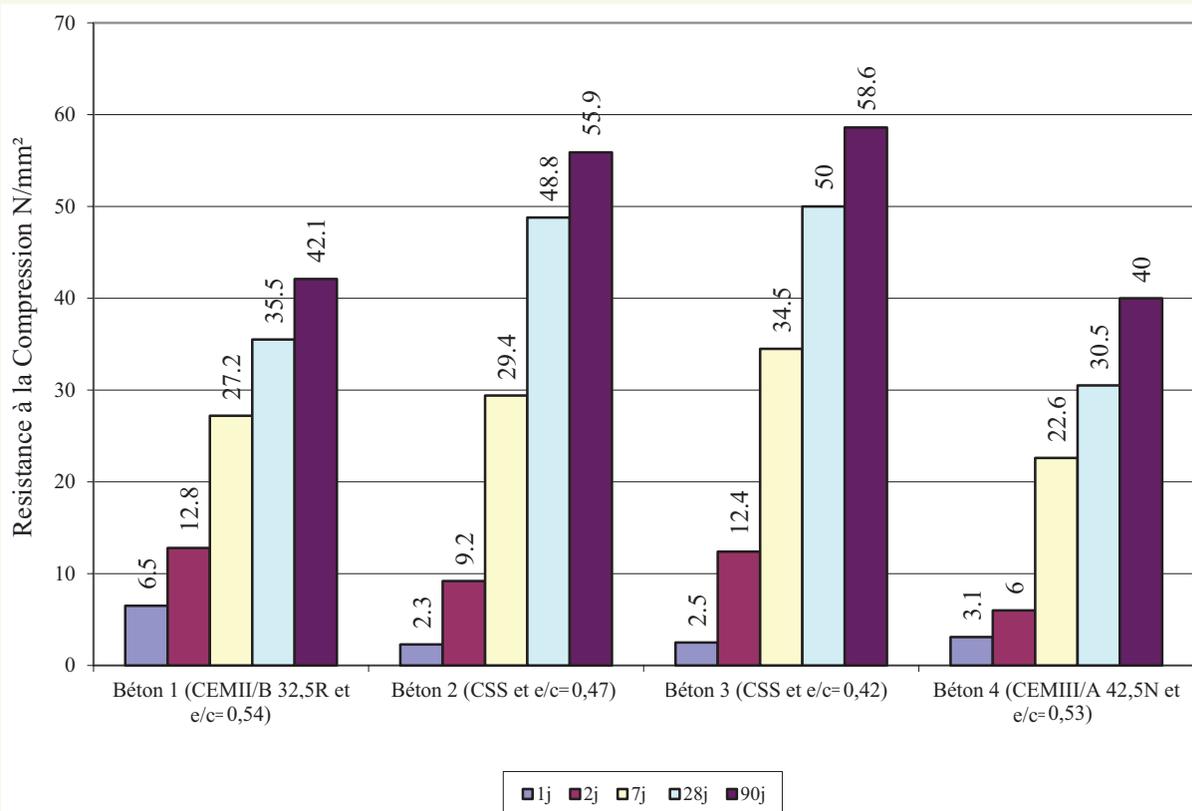
## 4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET INTERPRÉTATION

### ■ 4.1. Résistance mécanique à la compression

La résistance mécanique moyenne à la compression du béton de chaque corps d'épreuve a été déterminée à partir de trois éprouvettes. Les résultats sont présentés sur la [figure 2](#) pour les bétons de classe de résistance C25/30 et sur la [figure 3](#) pour les bétons de classe de résistance C50/60.

Pour les bétons de classe de résistance C25/30, la gamme des résistances à l'échéance contractuelle de 28 jours varie de 30 à 50 MPa. Quelle que soit la nature du ciment, la résistance mécanique évolue entre 28 et 90 jours lorsque les échantillons sont conservés dans l'eau. Les résistances au très jeune âge (1 jour) des bétons 2, 3 et 4 sont faibles et résultent principalement du délai nécessaire à l'activation du laitier de haut fourneau. La diminution du rapport e/c du béton formulé avec du ciment sursulfaté n'a pas un effet significatif sur la résistance à la compression. Aux échéances de 28 et 90 jours, les résistances mécaniques des bétons à base de CSS sont nettement supérieures à celles des autres bétons.

Pour les bétons de classe de résistance C50/60, la gamme des résistances à l'échéance de 28 jours est relativement restreinte car elle ne varie que de 55 à 67 MPa. On notera que, pour le béton formulé avec le ciment CEM I, la valeur à 1 jour est très élevée comparativement aux autres bétons.

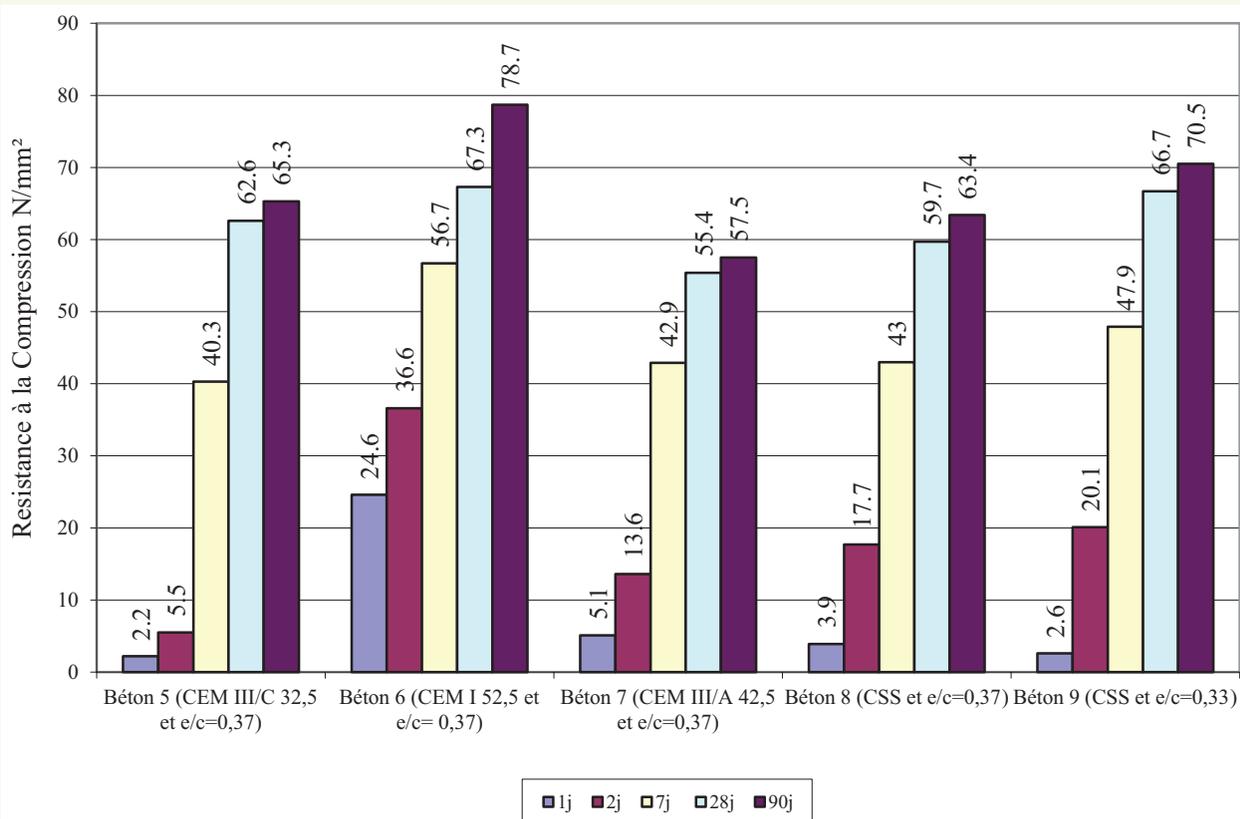


**figure 2**

Résistance à la compression des bétons de classe de résistance C25/30.

**figure 3**

Résistance à la compression des bétons de classe de résistance C50/60.



Ceci illustre bien la réactivité plus lente des ciments à forte teneur de laitier de haut fourneau par rapport à un ciment comportant essentiellement du clinker. Par contre, aux échéances de 28 et 90 jours, les écarts de résistances deviennent faibles. La différence de mode d'activation entre le béton 5 (à base de CEM III/C) et le béton 8 (à base de CSS) pour une même quantité de laitier de haut fourneau se traduit par des résistances plus élevées aux jeunes âges (1 et surtout 2 jours) pour le béton formulé avec le ciment sursulfaté.

#### ■ 4.2. Porosité accessible à l'eau

Les résultats des essais de porosité à l'eau obtenus pour les bétons de classe C25/30 sont donnés dans le **tableau 8**. Il n'existe pas de différences significatives entre les porosités des échantillons provenant de la surface des carottes (exposés aux conditions environnementales) et de ceux prélevés à cœur. De même, aucun écart significatif n'est constaté entre les bétons de cette même catégorie. Nous expliquons cette uniformité de caractéristiques dans l'épaisseur par la cure prolongée de 10 jours. Selon les classes et les valeurs limites données dans le guide de l'AFGC (2004), tous les bétons appartiennent à la catégorie de durabilité potentielle faible, voire très faible. Toutefois, il est important de signaler que ce guide donne des valeurs pour des bétons ayant été formulés en laboratoire et conservés dans l'eau pendant 3 mois. Ceci peut conduire à des différences notables entre les différentes propriétés des bétons de laboratoire et des bétons de chantier.

Les résultats des essais de porosité à l'eau obtenus pour les bétons de classe C25/30 sont donnés dans le **tableau 9**. Quel que soit le béton considéré, la porosité des échantillons prélevés à cœur est similaire à celle des échantillons provenant de la surface des carottes (zone superficielle subissant l'influence de l'environnement). On ne note donc pas d'influence significative des conditions environnementales sur ce critère lorsque les surfaces de béton ont été correctement protégées de la dessiccation. La plus faible porosité est obtenue avec le béton formulé avec le ciment CEM I. Selon le guide AFGC, le béton 6 appartient à la classe de durabilité potentielle élevée, le béton 7 appartient à la classe de durabilité moyenne et les autres à la classe de durabilité faible.

#### ■ 4.3. Distribution des volumes poreux mesurée par intrusion de mercure

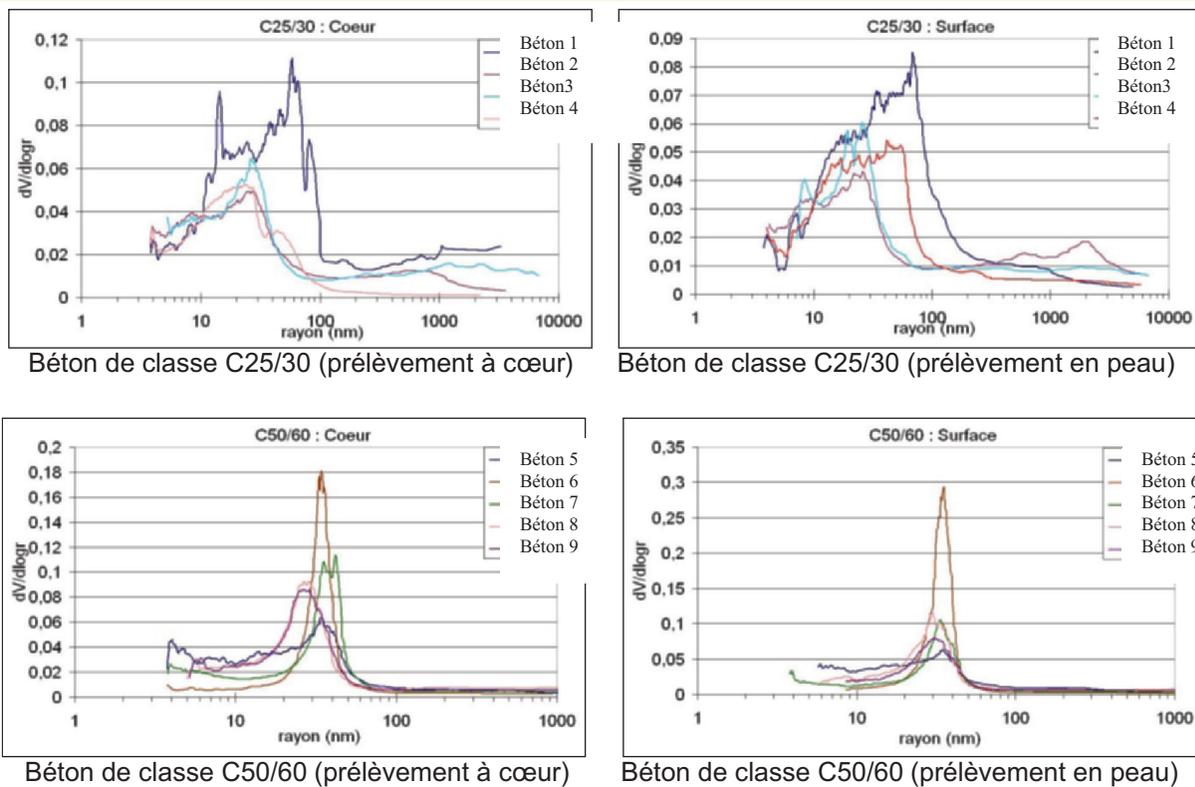
Les distributions poreuses sont reportées sur la **figure 4**. Pour tous les bétons, il n'existe pas de différences entre la distribution du rayon d'accès des pores des échantillons prélevés à cœur et en surface des carottes. Par contre, la distribution des pores des bétons de classe de résistance C25/30 n'a pas la même allure que celle des bétons de classe de résistance C50/60. Pour ces derniers, le rayon d'accès est globalement centré sur 30 nm, excepté les bétons formulés avec le ciment CSS, qui

**tableau 8**  
Porosité accessible à l'eau  
des bétons de classe  
de résistance C25/30.  
Prélèvements  
d'échantillons réalisés  
à cœur et en surface  
des carottes.

Porosité (%)	Béton 1	Béton 2	Béton 3	Béton 4
<b>Nature du ciment</b>	CEM II/B 32,5 R	CSS	CSS	CEM III/A 42,5 N
<b>Cœur</b>	17,0	17,2	16,0	16,4
<b>Surface</b>	16,5	15,8	16,4	16,1

**tableau 9**  
Porosité accessible à l'eau  
des bétons de classe  
de résistance C50/60.  
Prélèvements  
d'échantillons réalisés  
à cœur et en surface  
des carottes.

	Béton 5	Béton 6	Béton 7	Béton 8	Béton 9
<b>Nature du ciment</b>	CEM III/ C 32,5 N PM ES	CEM I 52,5 N PM ES	CEM III/A 42,5 PM ES	CSS	CSS
<b>Cœur</b>	15,5	11,2	13,1	14,5	14,0
<b>Surface</b>	15,1	11,5	13,4	14,3	14,9



**figure 4**  
Distributions des volumes poreux obtenues par intrusion de mercure en fonction du rayon des pores des différents bétons.

sont légèrement décalés vers les plus petits pores. Pour les bétons de classe de résistance C25/30, la distribution des pores est plus étendue et varie globalement entre 10 et 100 nm. Ce phénomène est plus accentué pour le béton formulé avec le ciment CEM II/B. On observe globalement que la distribution poreuse se décale vers les plus petits pores lorsque la teneur en laitier de haut fourneau augmente dans les ciments (CEM II/B : 21 % de laitier, CEM III/A : 42 % de laitier et CSS : 80 % de laitier).

Par ailleurs, les bétons formulés avec des ciments à forte teneur en laitier de haut fourneau montrent un volume de pores moins important que les bétons formulés avec le ciment CEM I ou CEM II. Ces résultats sont en bon accord avec les travaux de Moon et al. (2006).

En conclusion, les bétons contenant de fortes teneurs en laitier de haut fourneau présentent une porosité moins élevée et plus fine que les bétons de ciment Portland en raison de l'hydratation du laitier qui conduit à un meilleur remplissage des pores par les hydrates et à une microstructure plus dense des hydrates (Moon et al., 2006, Kim et Yeau, 2005).

#### ■ 4.4. Perméabilité apparente aux gaz

Les valeurs de la perméabilité apparente aux gaz mesurée après étuvage à 105°C sont données dans les **tableaux 10** et **11**. On constate globalement que la perméabilité est plus élevée pour les bétons de classe de résistance C25/30. Il existe quasiment un facteur 10 entre la perméabilité la plus élevée  $347.10^{-18} \text{ m}^2$  (correspondant au béton formulé avec le ciment CSS et ayant un rapport  $e/c = 0,47$ ) et la perméabilité la plus faible  $36.10^{-18} \text{ m}^2$  (correspondant au béton formulé avec le même ciment CSS et ayant un rapport  $e/c = 0,33$ ).

Selon les classes et les valeurs limites données dans le guide AFGC (2004), les bétons de classe de résistance C25/30 appartiendraient à la catégorie de durabilité potentielle, moyenne voire faible pour les bétons formulés avec le ciment CSS. Il est important de rappeler que le guide AFGC donne les valeurs pour des bétons fabriqués en laboratoire et conservés dans l'eau pendant 3 mois. Pour les

**tableau 10**  
Perméabilité apparente  
aux gaz ( $K_{\text{gaz}}$ ) des bétons  
de classe de résistance  
C25/30.

	Béton 1	Béton 2	Béton 3	Béton 4
Nature du ciment	CEM II/B 32,5 R	CSS	CSS	CEM III/A 42,5 N
$K_{\text{gaz}}$ ( $10^{-18} \text{ m}^2$ )	166	323	347	211

**tableau 11**  
Perméabilité apparente  
aux gaz ( $K_{\text{gaz}}$ ) des bétons  
de classe de résistance  
C50/60.

	Béton 5	Béton 6	Béton 7	Béton 8	Béton 9
Nature du ciment	CEM III/C 32,5 N PM ES	CEM I 52,5 N PM ES	CEM III/A 42,5 PM ES	CSS	CSS
$K_{\text{gaz}}$ ( $10^{-18} \text{ m}^2$ )	128	42	70	118	36

bétons de classe de résistance C50/60, la perméabilité est plus faible, ce qui les classe dans la catégorie de durabilité potentielle moyenne à élevée. Par ailleurs, les bétons formulés avec les ciments à forte teneur en laitier de haut fourneau ont des caractéristiques relativement proches du béton à base de ciment Portland de type CEM I.

#### ■ 4.5. Coefficient de diffusion des chlorures

Les coefficients de diffusion effectifs sont reportés dans les **tableaux 12** et **13**. Les coefficients de diffusion sont très faibles, excepté pour le béton de classe de résistance C25/30 formulé avec le ciment CEM II/B. Les ciments à forte teneur en laitier de haut fourneau, et en particulier le ciment sursulfaté, ont un excellent comportement. La réduction importante du coefficient de diffusion par incorporation de laitier de haut fourneau a largement été rapportée dans la littérature (Kim et Yeau, 2005 ; Turmen et al., 2003 ; Luo et al., 2003 ; Roy et al., 2000), malgré une porosité souvent supérieure à celle du matériau équivalent sans additions minérales. Les réductions les plus significatives du coefficient de diffusion des ions chlorure interviennent lorsque le clinker est substitué par un taux croissant de laitier (Turmen et al., 2003 ; Roy et al., 2000 ; Yigiter et al., 2006 ; Herrier et al., 2005). Yigiter et al. (2006) estiment qu'une teneur en laitier supérieure à 40 % procure une résistance à la corrosion des armatures sous l'effet des chlorures deux fois plus élevée que pour un béton à base de ciment Portland.

La **figure 5** présente la relation entre la teneur en laitier de haut fourneau dans les ciments et le coefficient de diffusion des ions chlorure effectif mesuré dans nos bétons compte tenu que les ciments sont élaborés avec la même source en clinker et en laitier de haut fourneau (excepté pour

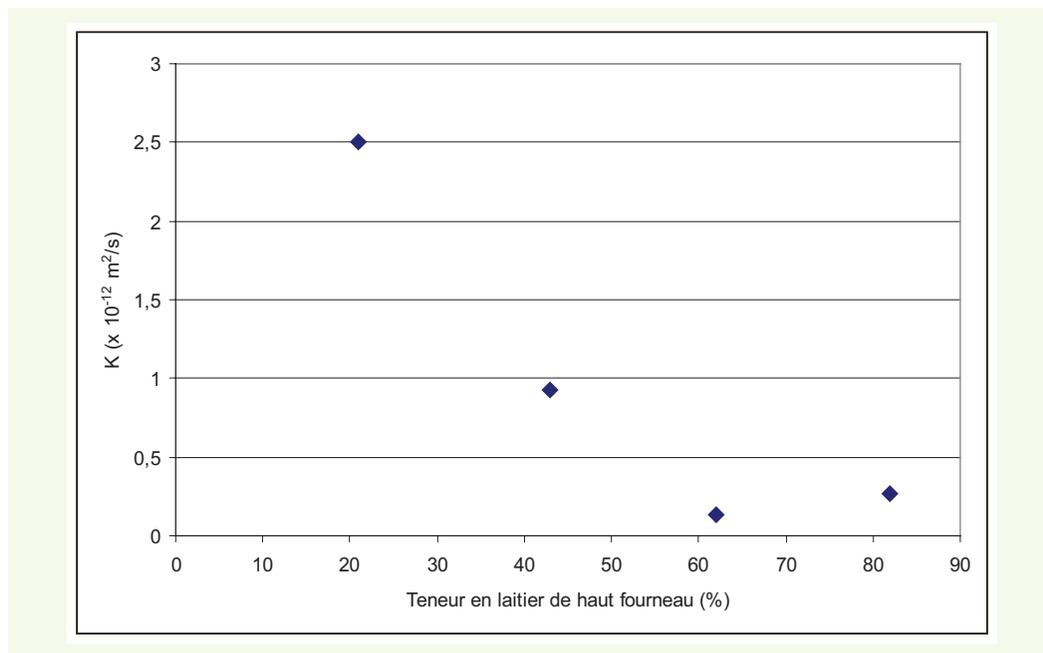
**tableau 12**  
Coefficient de diffusion  
effectif des chlorures ( $K_{\text{Cl}^-}$ )  
des bétons de classe de  
résistance C25/30.

	Béton 1	Béton 2	Béton 3	Béton 4
Nature du ciment	CEM II/B 32,5 R	CSS	CSS	CEM III/A 42,5 N
$K_{\text{Cl}^-}$ ( $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )	2,5	0,10	0,07	0,93

**tableau 13**  
Coefficient de diffusion  
effectif des chlorures ( $K_{\text{Cl}^-}$ )  
des bétons de classe de  
résistance C50/60.

	Béton 5	Béton 6	Béton 7	Béton 8	Béton 9
Nature du ciment	CEM III/C 32,5 N PM ES	CEM I 52,5 N PM ES	CEM III/A 42,5 PM ES	CSS	CSS
$K_{\text{Cl}^-}$ ( $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )	0,27	0,48	0,13	0,02	0,02

**figure 5**  
Influence de la teneur  
en laitier de haut fourneau  
sur le coefficient de  
diffusion des ions chlorure  
dans les bétons.



le clinker du ciment CEM I) de sorte que celui-ci n'est pas représenté sur la **figure 5**. Les bétons formulés avec le ciment CSS n'ont pas été représentés en raison du mode d'activation différent. Une augmentation de la teneur en laitier de haut fourneau conduit alors à une diminution du coefficient de diffusion et une teneur en laitier supérieure à 40 % améliore significativement les performances.

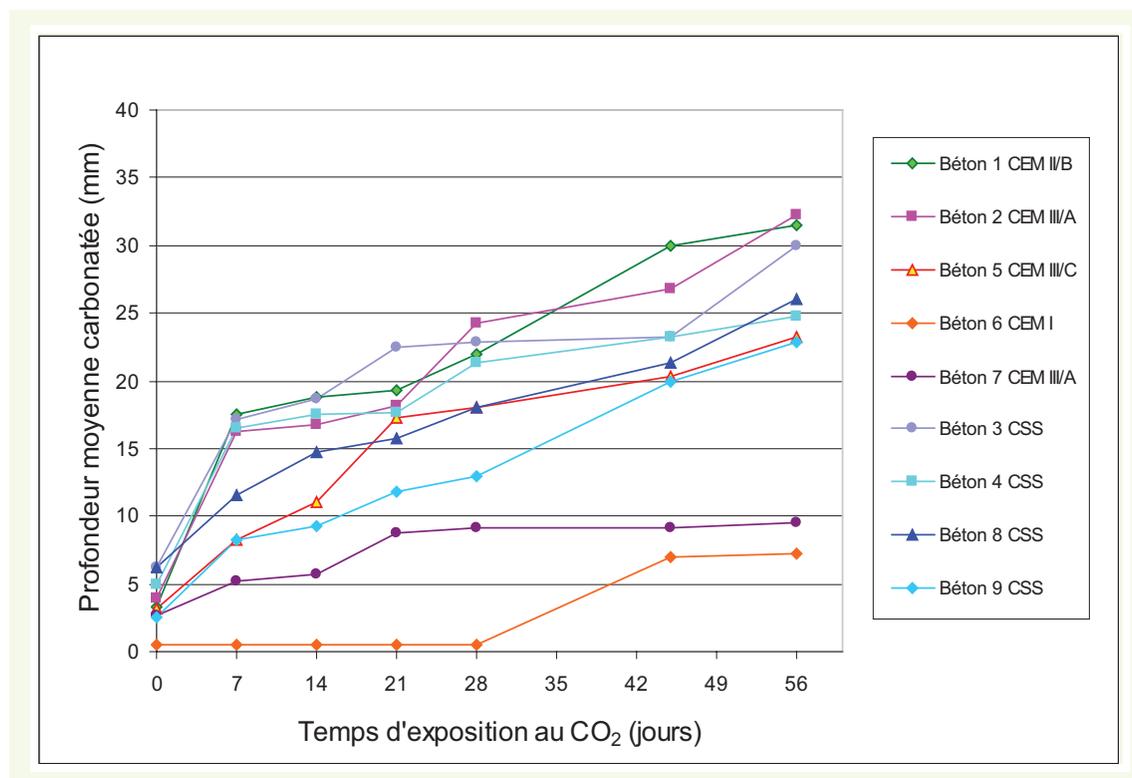
La différence entre le comportement à la diffusion des ions chlorure du béton 5 à base de CEM III/C et du béton 8 formulé avec du ciment CSS est très marquée (facteur 10) bien que leurs teneurs en laitier de haut fourneau soient identiques. Cet écart est vraisemblablement dû à des différences de microstructures (nature des hydrates) entre les deux bétons résultant de deux modes d'activation différents. Le ciment CSS donne naissance majoritairement à des sulfoaluminates de calcium hydratés qui conduisent à une interaction forte avec les chlorures pour former des monochloroaluminates de calcium hydratés. Pour rappel, le piégeage des chlorures par cette réaction chimique n'est pas pris en compte dans la détermination du coefficient effectif des ions chlorure, de sorte que la capacité de limiter chimiquement ou physiquement la pénétration des chlorures dans les bétons comportant du ciment sursulfaté est considérable. La néoformation de monochloroaluminates peut alors modifier la distribution poreuse et la tortuosité du matériau et ralentir la diffusion des ions chlorure.

Il en ressort que le classement des bétons à partir du coefficient de diffusion des ions chlorure ne suit pas systématiquement celui obtenu avec la résistance à la compression ou la mesure de la porosité accessible à l'eau. En effet, des bétons ayant une porosité de 16 % (bétons à base de CSS) présentent un coefficient de diffusion plus faible ( $0,1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ) que des bétons plus compacts (Béton à base de CEM I) ayant une porosité de 11,5 % et un coefficient de diffusion de  $0,48 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

En conclusion, le rapport e/c a un effet sur le coefficient de diffusion (béton 6 avec le ciment CEM I est plus performant que le béton 4 avec le ciment CEM III), mais la quantité de laitier de haut fourneau dans le ciment a également un rôle primordial.

#### ■ 4.6. Cinétique de carbonatation en conditions accélérées

L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus lors des essais de carbonatation accélérée (50 % en  $\text{CO}_2$ ) est reporté sur la **figure 6**. Il est important de noter qu'avant de réaliser l'essai de carbonatation accélérée, plusieurs bétons présentent déjà une épaisseur carbonatée allant de 1 à 7 mm. Cette carbonatation est naturelle et résulte de la phase de conservation durant 90 jours sur le site de Dunkerque. Pour l'exploitation des résultats, nous avons supposé que la profondeur carbonatée suit ici une loi en



**figure 6**

Évolution de la profondeur moyenne carbonatée des différents bétons en fonction du temps d'exposition au CO<sub>2</sub>. L'évolution du front de carbonatation du béton avec CEM I n'est pas habituelle : + 7 mm entre les échéances 28 et 45 jours.

racine du temps :  $P_{\text{carbonatée}} = k \sqrt{t}$ , dans laquelle  $k$  est le coefficient de carbonatation exprimé en  $\text{mm.j}^{-0.5}$ . Les valeurs absolues de ces coefficients n'ont pas de signification intrinsèque mais peuvent être utilisées pour comparer les différents bétons. Elles sont notamment liées à la sévérité du préconditionnement et du test (atmosphère extrêmement chargée en CO<sub>2</sub>). Les valeurs des coefficients de carbonatation ont alors été calculées par régression linéaire et reportées dans les **tableaux 14** et **15**. Il est possible d'identifier trois classes de comportement des bétons vis-à-vis de la carbonatation :

- classe I :  $k \approx 1$  ;
- classe II :  $k \approx 2,5$  ;
- classe III :  $k \approx 3,5$ .

**tableau 14**

Coefficient, classe de carbonatation et teneur en portlandite des bétons de classe de résistance C25/30.

	Béton 1	Béton 2	Béton 3	Béton 4
Nature du ciment	CEM II/B 32,5 R	CSS	CSS	CEM III/A 42,5 N
$K_{\text{CO}_2}$ (mm.j <sup>-1/2</sup> )	3,6	2,8	2,5	3,5
Classe	III	II	II	III
Portlandite (%)	2,4	0	0	1,5

**tableau 15**

Coefficient, classe de carbonatation et teneur en portlandite des bétons de classe de résistance C50/60.

	Béton 5	Béton 6	Béton 7	Béton 8	Béton 9
Nature du ciment	CEM III/C 32,5 N PM ES	CEM I 52,5 N PM ES	CEM III/A 42,5 PM ES	CSS	CSS
$K_{\text{CO}_2}$ (mm.j <sup>-1/2</sup> )	2,8	0,9	1,0	2,5	2,7
Classe	II	I	I	II	II
Portlandite (%)	0,9	3,0	1,4	0	0

Les bétons appartenant à la première classe sont les bétons de classe de résistance C50/60 formulés soit avec le ciment CEM I, soit avec le ciment CEM III/A. Ils montrent une résistance à la carbonatation très élevée. Les bétons de la deuxième classe concernent le béton formulé avec le ciment CEM III/C et tous les bétons à base du ciment sursulfaté CSS. Pour ce type de ciment, on constate que les classes relatives à la résistance à la carbonatation ne respectent pas le classement des bétons en fonction de la résistance mécanique. La dernière classe regroupe les deux autres bétons de classe de résistance C25/30, à savoir le béton formulé avec le ciment CEM II/B et celui à base de CEM III/A.

La résistance à la carbonatation dépend de plusieurs facteurs liés au matériau. Il s'agit notamment de la porosité et de la distribution poreuse du béton. Une étude réalisée par Logendran et al. (1999) sur des bétons à base de ciments comportant entre 0 et 70 % de laitier de haut fourneau montre que le taux de carbonatation est gouverné par les pores de rayon plus élevé que 45 nm. En effet, ces pores fourniraient, en plus d'un volume important qui aide à la diffusion du CO<sub>2</sub>, beaucoup de sites de nucléation dont le CO<sub>2</sub> a besoin pour carbonater la matrice cimentaire. Cette hypothèse pourrait expliquer le comportement observé pour les bétons de classe de résistance C25/30. Les coefficients de carbonatation les plus élevés concernent bien les bétons ayant ces plus gros pores (figure 4). Par contre, cette explication n'est pas adaptée aux bétons de classe de résistance C50/60, ce qui laisse à penser que d'autres facteurs interviennent dans la cinétique de carbonatation.

Les écarts entre les niveaux de front de carbonatation peuvent aussi s'expliquer par des taux d'hydratation différents. En particulier, les laitiers s'hydratent plus lentement et la quantité d'hydrates susceptible de piéger le CO<sub>2</sub> est donc moins importante que pour un béton à base de ciment Portland.

Un autre paramètre propre au matériau et susceptible d'intervenir dans la cinétique de carbonatation est la nature des hydrates formés. La nature des hydrates dépend du type de ciment (ciment Portland, ciment au laitier de haut fourneau, ...) et du mode d'activation pour les ciments comportant du laitier de haut fourneau. C'est la présence de produits potentiellement carbonatables, dont la quantité est propre à chaque ciment et au mode d'activation du laitier de haut fourneau, qui est aussi responsable des changements dans la profondeur de carbonatation. En particulier, la portlandite joue un rôle primordial vis-à-vis de la protection des armatures parce qu'elle réalise un effet tampon en maintenant le pH autour de 12,6. C'est donc un réservoir de basicité du béton. Cette teneur en portlandite a été déterminée dans chaque béton avant l'essai de carbonatation accélérée en utilisant l'analyse thermique. Les résultats exprimés en pourcentage massique par rapport à la masse totale du béton sont donnés dans les tableaux 14 et 15. Ceci peut expliquer le bon comportement du béton de classe de résistance C50/60 à base de ciment CEM III/A dont la teneur en portlandite est suffisamment élevée pour limiter la diffusion du CO<sub>2</sub>. L'efficacité du piégeage du CO<sub>2</sub> par la portlandite est bien sûr tributaire de la porosité et la distribution poreuse du matériau. On constate des comportements vis-à-vis de la carbonatation similaires entre le béton 6 (CEM I) et le béton 7 (CEM III/A). Ils présentent respectivement une épaisseur carbonatée de 7,2 et 9,5 mm à l'échéance de 56 jours. Le béton à base de CEM III/A se carbonate plus rapidement au jeune âge que le béton formulé avec le ciment CEM I, mais pour des longues échéances les épaisseurs carbonatées sont pratiquement identiques. Dans cette même catégorie de bétons de classe de résistance C50/60, ce sont les matériaux ne contenant pas de portlandite qui se carbonatent plus vite : bétons 8 et 9 à base de ciment sursulfaté (épaisseurs carbonatées à 56 jours : 26 et 23 mm).

La carbonatation des bétons se traduit également par un changement de la microstructure de la matrice cimentaire. Les ciments Portland sont moins sensibles à la carbonatation parce qu'ils ont une teneur plus importante en portlandite. Les bétons avec du ciment Portland se carbonatent moins vite en raison de la plus grande quantité de portlandite qui réagit avec le CO<sub>2</sub> ce qui ralentit la progression du front de carbonatation. De plus, le carbonate de calcium formé par le mécanisme de carbonatation occupe un volume molaire plus important, ce qui permet de densifier la microstructure en diminuant le nombre des pores plus petits que 9 nm (Litvan et Meyer, 1986). Ceci forme alors une barrière à la diffusion du CO<sub>2</sub>. Ce phénomène ne serait pas observé pour

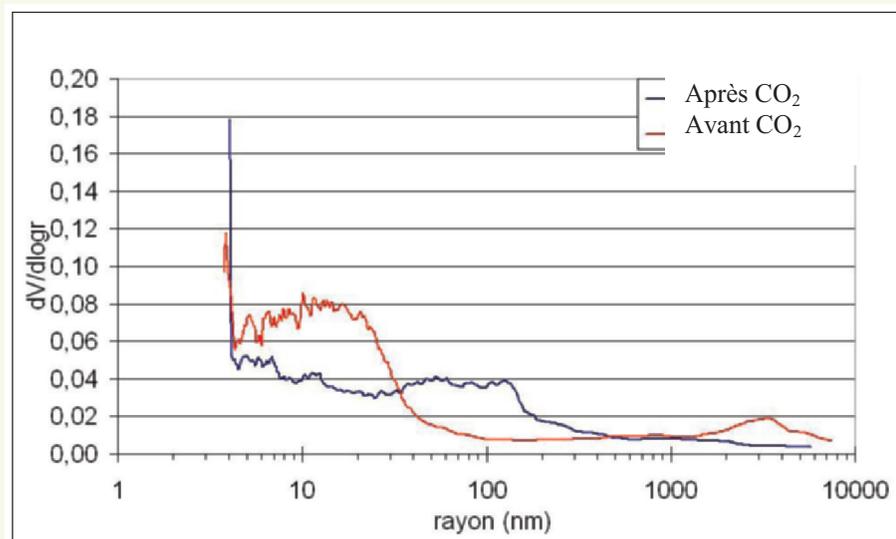
les ciments à base de laitier de haut fourneau en raison d'une plus faible teneur en portlandite ou de son absence dans le cas de laitiers de haut fourneau activés aux alcalins (Bakhrev et al., 2001). Selon Litvan et Meyer (1986), la carbonatation des pâtes de ciment à base de laitier de haut fourneau conduirait à la décalcification des C-S-H et à la formation de gel de silice générant une porosité plus grossière.

Ainsi, nous avons observé l'effet de la carbonatation sur deux bétons de classe de résistance C25/30 afin d'obtenir une épaisseur carbonatée suffisamment importante pour réaliser des prélèvements en vue des essais de porométrie au mercure. Il s'agit du béton 2 à base de ciment CSS et du béton 4 comportant du ciment CEM III/A. Les résultats sont présentés sur les figures 7 et 8.

La carbonatation de ces deux bétons conduit à des modifications notables de la microstructure. La carbonatation du béton 4 (à base de CEM III/A) mène à un décalage de la distribution vers les pores de taille plus petite. Ceci est en désaccord avec les travaux de Bakhrev et al. (2001), mais provient vraisemblablement du clinker contenu dans le ciment (54 %). Son hydratation génère une quantité significative de portlandite, qui réagit avec le CO<sub>2</sub> atmosphérique en formant du carbonate de calcium, ce qui conduit à une densification de la microstructure. Pour le béton 2 à base de CSS,

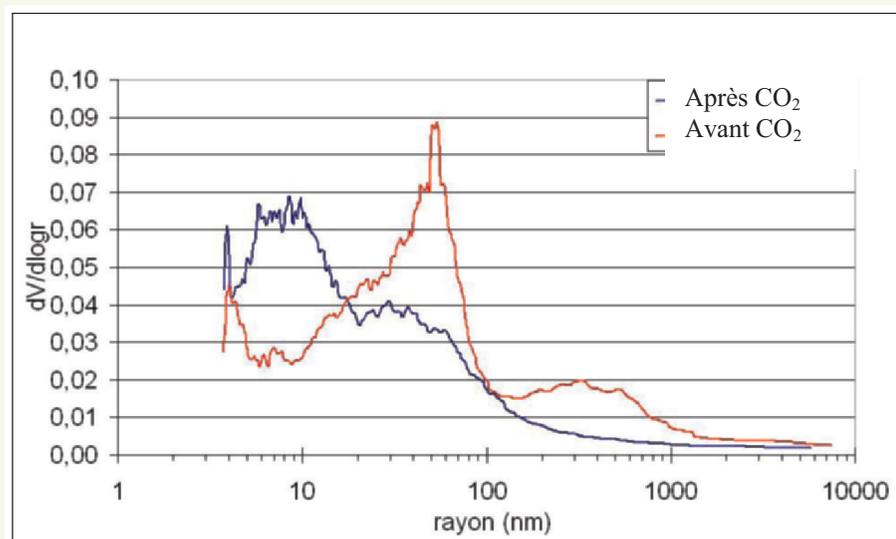
**figure 7**

*Distribution du rayon d'accès des pores avant et après carbonatation du béton 2 formulé avec du ciment sursulfaté CSS.*



**figure 8**

*Distribution du rayon d'accès des pores avant et après carbonatation du béton 4 formulé avec du ciment de haut fourneau CEM III/A.*



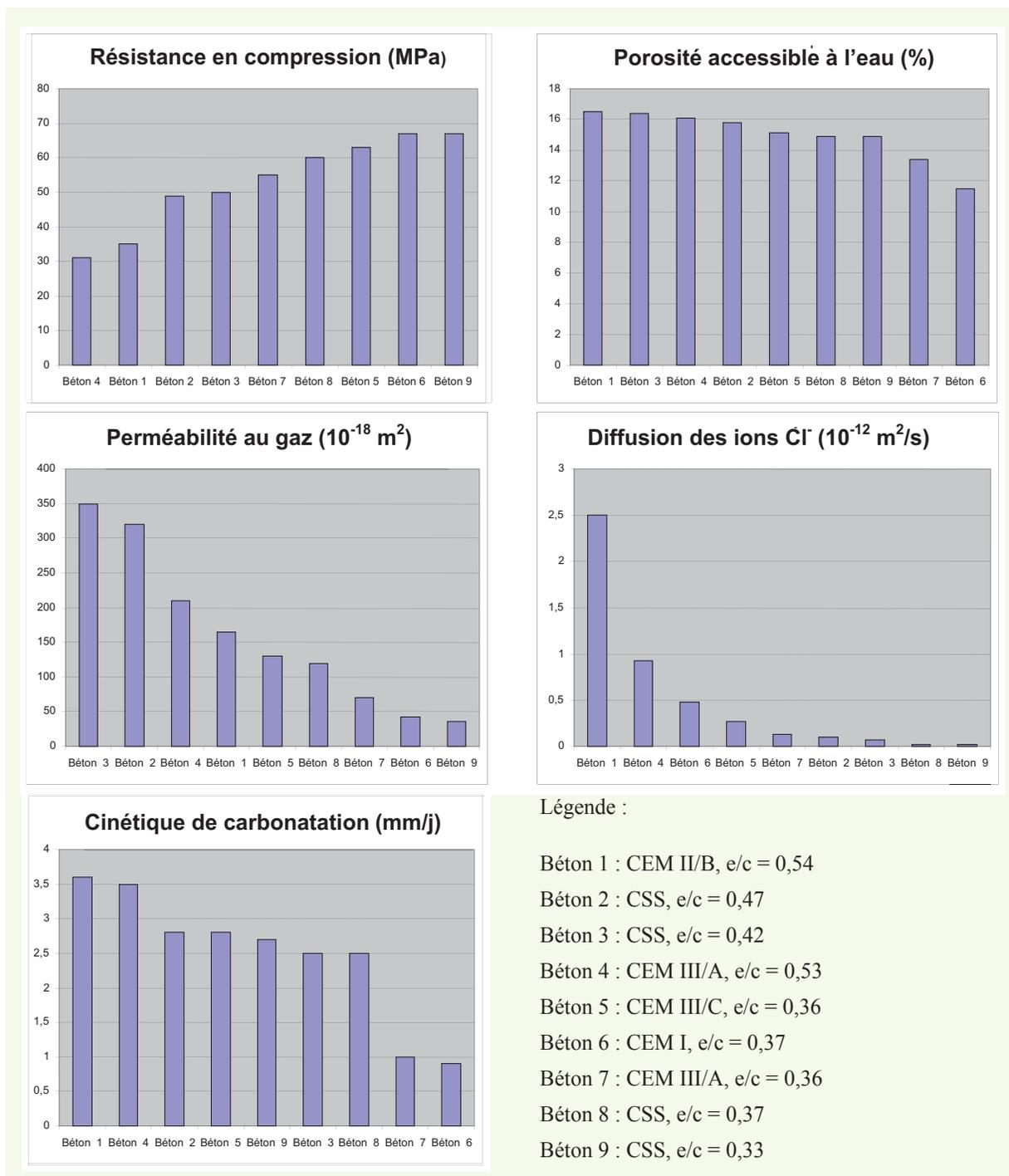
la carbonatation conduit bien à une augmentation des pores les plus grossiers comme le précisait Bakhrev et al. (2001), rayon compris entre 30 et 1000 nm.

En conclusion, le comportement vis-à-vis de la carbonatation des ciments à forte teneur en laitier de haut fourneau dépend de plusieurs facteurs : porosité et distribution poreuse de la matrice cimentaire, degré d'hydratation, quantité de laitier de haut fourneau ou de clinker et vraisemblablement la nature de l'activation du laitier.

**figure 9**  
 Comparaison des performances des différents bétons vis-à-vis de la résistance à la compression à 28 jours, de la porosité accessible à l'eau, de la perméabilité aux gaz, du coefficient de diffusion effectif des chlorures et du coefficient de carbonatation.

#### ■ 4.7. Comparaison des performances des différents bétons

La comparaison des performances des différents bétons vis-à-vis de la résistance à la compression mesurée à 28 jours sur éprouvettes conservées en laboratoire et sur les indicateurs de durabilité évalués à 90 jours sur carottes extraites des voiles, est représentée sur la **figure 9**.



La distinction entre bétons de classe de résistance C25/30 et bétons de classe de résistance C50/60 respecte bien le classement reposant sur la résistance à la compression, la porosité accessible à l'eau et la perméabilité aux gaz. Ceci n'est pas le cas pour les classements fondés sur le coefficient de diffusion des ions chlorure et le coefficient de carbonatation, pour lesquels la nature du ciment est prédominante. Il apparaît donc indispensable d'associer à la mesure de porosité accessible à l'eau, souvent préconisée comme indicateur de durabilité, soit le coefficient de diffusion des ions chlorure, soit le coefficient de carbonatation pour quantifier et prédire la durabilité potentielle des bétons en fonction de l'environnement que devra subir la structure (en milieu marin ou structure en élévation, par exemple).

Diverses combinaisons de paramètres sont envisageables pour établir un classement représentatif selon les processus et/ou les dégradations que l'on souhaite quantifier ou prédire. Dans le cas des structures exposées aux chlorures, les meilleurs comportements sont obtenus avec les bétons formulés avec des ciments comportant des teneurs en laitier de haut fourneau supérieures à 40 %. En particulier, le ciment sursulfaté donne d'excellents résultats quelle que soit la compacité du matériau.

Dans le cas de structures en élévation, pour lesquelles le risque de corrosion des aciers par carbonatation est prédominant, les meilleurs comportements sont obtenus avec le béton formulé avec le ciment Portland de type CEM I et le béton à base de ciment de haut fourneau de type CEM III/A. Toutefois, il est important de rappeler, notamment pour le béton 7 (à base de CEM III/A), qu'il a été formulé avec un faible rapport e/c et qu'il a subi une cure de 10 jours.

## 5. CONCLUSION

Nos travaux montrent que l'effet de l'incorporation de laitier de haut fourneau via le ciment dans le béton n'est pas le même en fonction du type de propriété étudié. Il apparaît dans nos résultats que la résistance mécanique, mais aussi la porosité accessible à l'eau et la perméabilité aux gaz, sont des indicateurs de durabilité insuffisants pour caractériser la résistance des bétons contenant des ciments avec du laitier de haut fourneau à la pénétration des chlorures ou à la carbonatation de la matrice cimentaire. Cela met donc en évidence les limites des approches fondées uniquement sur un seul critère de durabilité (notamment la porosité) car il ne prend pas suffisamment en compte les spécificités apportées par certaines additions minérales au ciment. Pour remédier à ce problème, il est donc nécessaire de choisir des indicateurs de durabilité adaptés aux altérations que pourrait subir la structure en béton.

L'incorporation de laitier de haut fourneau via un ciment composé génère un béton de meilleure durabilité vis-à-vis des processus délétères liés à la pénétration des chlorures dans le matériau. Une teneur en laitier de haut fourneau supérieure à 40 % par rapport au ciment améliore de manière importante les performances du béton. À teneur en laitier de haut fourneau équivalente, le ciment sursulfaté (CSS) est nettement plus efficace pour limiter la diffusion des ions chlorures que le ciment de haut fourneau (CEM III/C). Il existe deux raisons qui peuvent expliquer le bon comportement des bétons contenant du ciment au laitier de haut fourneau. Celui-ci diminue la diffusion des chlorures dans un béton en augmentant vraisemblablement la densité et la tortuosité de la matrice cimentaire. L'efficacité du ciment au laitier de haut fourneau peut être aussi expliquée par une potentialité élevée de fixation chimique et physique des chlorures par les produits d'hydratation pour laquelle la nature de l'activation du laitier intervient. La nature du ciment ou la présence d'additions minérales est donc un paramètre essentiel qui détermine le transport des chlorures par diffusion à l'intérieur d'un matériau cimentaire. Ceci suggère le caractère secondaire de la formulation du béton comme indicateur.

L'utilisation d'un ciment de haut fourneau dans les structures en élévation est souvent associée à un risque de corrosion des armatures par le phénomène de carbonatation. Toutefois, certains ciments comportant du laitier de haut fourneau peuvent parfaitement résister à la pénétration du CO<sub>2</sub> atmosphérique lorsque la compacité du béton a été optimisée. Dans notre étude, c'est le cas

du béton de classe de résistance C50/60 formulé avec un ciment de laitier de haut de fourneau de type CEM III/A. Le comportement des ciments à base de laitier de haut fourneau vis-à-vis de la carbonatation dépend de la présence de produits potentiellement susceptibles de se carbonater. En particulier, la portlandite joue un rôle primordial parce qu'elle est un réservoir de basicité pour le béton ce qui explique les moins bons comportements obtenus avec les bétons à base de ciment sursulfaté malgré un rapport e/c faible. Cette quantité de produits capables de piéger le CO<sub>2</sub> est fonction du taux d'hydratation du ciment, du mode d'activation du laitier de haut fourneau et de la quantité de clinker dans le ciment.

Le laitier de haut fourneau est bénéfique pour la protection des armatures vis-à-vis de la corrosion induite par les chlorures. Il peut, pour les ciments au laitier de haut fourneau de type CEM III/A, être suffisamment efficace pour protéger les aciers de la corrosion par le phénomène de carbonatation lorsque le béton est suffisamment compact. Néanmoins, il est important de rappeler que ce sont des ciments à prise relativement lente, qui nécessitent une durée de cure suffisante pour éviter la dessiccation au jeune âge préjudiciable à la bonne résistance ultérieure des bétons.

## 6. REMERCIEMENTS

*Les auteurs remercient la société HOLCIM pour le soutien financier de cette étude et pour sa contribution à la réalisation des corps d'épreuve. Les auteurs remercient Karine Trentin, Stéphane Fenouillet, Dominique Duragrín, Lucia Alarcon-Ruiz et James Parkin pour leur contribution à cette étude, ainsi que Gérard Olivier et Sandrine Moscardelli du CETE Île-de-France pour la réalisation des essais et des mesures relatifs à la carbonatation accélérée et à la diffusion des ions chlorure et Emmanuel Delaure de l'Institut Navier pour la réalisation des essais de porosimétrie au mercure.*

## 7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFGC (2004).** Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages. Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction. État de l'art et guide pour l'élaboration d'une démarche performantielle sur la base d'indicateurs de durabilité, *Documents scientifiques et techniques de l'Association française de génie civil*, groupe de travail animé par V. Baroghel-Bouny, juillet 2004, 252 pages.
- AFPC-AFREM (1997).** *Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité*, LMDC Toulouse, 1997, 283 pages.
- AFNOR (2001, 2012).** Norme NF EN 197-1, Ciment – Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. Norme de 2001 lors de l'étude, révisée en 2012.
- AFNOR (2005).** NF P 15-313, Liants hydrauliques – Ciment sursulfaté : Compositions, spécifications et critères de conformité.
- AFNOR (2010).** NF EN 15 743, Ciment sursulfaté – Composition, spécifications et critères de conformité.
- BAKHREV T., CHENG Y.B., SANJAYAN J.G. (2001).** Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001, pp. 1277-1283.
- BAROGHEL-BOUNY V. (2005a).** Nouvelle approche de la durabilité du béton. Indicateurs et méthodes, *Techniques de l'ingénieur*, C2 245.
- BAROGHEL-BOUNY V. (2005b).** Nouvelle approche de la durabilité du béton. Méthodologie et exemples, *Techniques de l'ingénieur*, C2 246.
- BAROGHEL-BOUNY V., AMMOUCHE A., HORNAIN H., GAWSEWITCH J. (2000).** Vieillessement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI<sup>ème</sup> siècle. II – Caractérisation microstructurale sur éprouvettes de béton de résistance 25 à 120 MPa. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 228, 2000, pp. 71-86.
- BAROGHEL-BOUNY V., ARNAUD S., HENRY D., CARCASSES M., QUENARD D. (2002a).** Vieillessement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI<sup>ème</sup> siècle. III – Propriétés de durabilité des bétons mesurées sur éprouvettes conservées en laboratoire. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 241, 2002, pp. 13-59.
- BAROGHEL-BOUNY V., CHAUSSADENT T., CROQUETTE G., DIVET L., GAWSEWITCH J., GODIN J., HENRY D., PLATRET G., VILLAIN G. (2002b).** Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons. Méthodes de mesure et d'essais de laboratoires. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Techniques et Méthodes des LPC, Méthode 58, 2002, 88 pages.
- BAROGHEL-BOUNY V., GAWSEWITCH J., BELIN P., OUNOUGH K., ARNAUD S., OLIVIER G., BISSONNETTE B. (2004).** Résultats issus des prélèvements effectués sur les corps d'épreuve de différents sites aux premières échéances de mesure. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 249, 2004, pp. 49-100.
- BRANDSTETR J. (1987).** The use of activated slags in concrete in Eastern Europe, *International Workshop on Granulated Blast-Furnace Slag in Concrete*, Toronto, 1987, pp. 329-361.
- CEMSUISSE (2004)** [http://www.cemsuisse.ch/file/Zementbrosch\\_f\\_2004.pdf](http://www.cemsuisse.ch/file/Zementbrosch_f_2004.pdf). Le ciment un produit

high-tech naturel, origines, fabrication et utilisation.

- DRON R., BRIVOT F. (1980).** Approche du problème de la réactivité du laitier granulé. *Actes, 7<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement*, Paris, Vol. III, 1980, pp. 91-94.
- DRON R. (2004).** *Structure et réactivité des laitiers vitreux*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Rapports des laboratoires, série Physique et Chimie, février 2004, 185 pages.
- GOTO S., AKAZAWA K., DIAMON M. (1992).** Solubility of silica-alumina gels in different pH solutions – Discussion on the hydration of slags and fly ashes in cement. *Cement and Concrete Research*, Vol. 122 1992, pp. 1216-1223.
- GOTO S., YOSHII T., DIAMON M. (1985).** Effects of the thermal history on the hydraulic properties of slags. *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, n° 6, 1985, pp. 964-968.
- HERRIER G., MARION A.M., SMITZ R., DUFOUR O. (2005).** Étude de la pénétration des chlorures et de la carbonatation dans les matériaux à matrice cimentaire. *Rapport CRIC 2003-2007*, 2005, pp. 5-24.
- KIM E.K., YEAO K.Y. (2005).** An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulated blast-furnace slag. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 2005, pp. 1391-1399.
- KIM J.C., HONG S.Y. (2001).** Liquid concentration changes during slag cement hydration by alkali activation. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001, pp. 283-285.
- LITVAN G.G., MEYER A. (1986).** Carbonation of granulated blast furnace slag cement concrete during twenty years of field exposure. *Actes, 7<sup>th</sup> International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Additives in Concrete*, Madrid, American Concrete Institute Special Publication, Vol. 2, 1986, pp. 1442-1462.
- LOGENDRAN D., SURYAVANSHI A.K., WEE T.H. (1999).** Pore structure controlling the carbonation of a hardened cement matrix blended with mineral admixture. *Advances in cement Research*, Vol. 11, n° 2, 1999, pp. 81-95.
- LUO R., CAI Y., WANG C., HUANG X. (2003).** Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 2003, pp. 1-7.
- MOON H. Y., KIM H.S., CHOI D.S. (2006).** Relationship between average pore diameter and chloride diffusivity in various concretes. *Construction and Building Materials*, Vol. 20, 2006, pp. 725-732.
- REGOURD M. (1980).** Structure et comportement des hydrates des ciments au laitier. *Actes, 7<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement*, Paris, Vol. III, 1980, pp. 10-23.
- REGOURD M. (1986).** Caractéristiques et activation des produits d'addition. *Actes, 8<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement*, Rio de Janeiro, 1986, pp. 200-229.
- REGOURD M., MORTUREUX B., GAUTIER E., HORNAIN H., VOLANT J. (1980).** Caractérisation et activation thermique des ciments au laitier. *Actes, 7<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement*, Paris, Vol. III, 1980, pp. 105-111.
- ROY D. M., JIANG W., SILSBEE M.R. (2000).** Chloride diffusion in ordinary blended and alkali-activated cement pastes and its relation to other properties. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 2000, pp. 1879-1884.
- SARIC-CORIC M. (2001).** Interactions superplastifiant-laitier dans les ciments au laitier. Propriétés du béton. *Thèse de doctorat de l'Université de Sherbrooke*, Canada, Décembre 2001, 291 pages.
- SMOLCYK H.G. (1978).** The effect of chemistry of slag on the strength of blast furnace cements, *Zem-Kalk-Gips*, Vol. 31, n° 6, 1978, pp. 294-296.
- TURMEN I., GAVGALI M., GUL R. (2003).** Influence of mineral admixtures on the mechanical properties and corrosion of steel embedded in high strength concrete. *Materials letters*, Vol. 57, 2003, pp. 2037-2043.
- UCHIKAWA H., OKAMURA T. (1983).** Binary and ternary components blended cement, *Mineral admixture in cement and concrete*, Ed. Gosh S.N., Sarkar S., Harsh S., New Delhi, Vol. 4, 1983, pp. 1-83.
- VILLAIN G., COCHET D., OLIVIER G., THIERY M. (2007).** Vers un mode opératoire performant et discriminant de carbonatation accélérée des bétons pour ouvrage d'art. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 267, 2007, pp. 1-16.
- YIGTER H., YAZICI H., AYDIN S. (2006).** Effect of cement type, w/c ratio and cement content on sea water resistance of concrete. *Building and Environment*, 2006.

# ERRATUM du numéro 279 de BLPC

- page 71 erronée,

$$R_{ui} = \frac{3(1+M_c)}{3-M_c} \left(1 - \frac{u_i}{p_c}\right)$$
$$R_{qu} = \frac{q_u - q_i}{M_c q_i}$$

**Veillez lire :**

$$R_{ui} = \frac{3(1+M_c)}{3-M_c} \left(1 - \frac{u_i}{p_c}\right)$$
$$R_{qu} = \frac{q_u - q_i}{M_c q_i}$$

- page 74 erronée,

$$c_u = \frac{M_c}{2} \sigma'_{vo} \left(\frac{R_{oc}}{2}\right)^\Lambda$$
$$q_t = \frac{4}{3} \alpha_e c_u (1 + \ln I_r) + p_o$$
$$u_2 = 2\alpha_e c_u \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \ln \frac{\sqrt{3} I_r}{2} - \frac{1}{M_c}\right) + p_o$$

**Veillez lire :**

$$c_u = \frac{M_c}{2} \sigma'_{vo} \left(\frac{R_{oc}}{2}\right)^\Lambda$$
$$q_t = \frac{4}{3} \alpha_e c_u (1 + \ln I_r) + p_o$$
$$u_2 = 2\alpha_e c_u \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \ln \frac{\sqrt{3} I_r}{2} - \frac{1}{M_c}\right) + p_o$$