

ÉVOLUTION NORMATIVE, ADAPTATION AUX USAGES ET APPROCHE DURABILITÉ

NEW STANDARD DEVELOPMENTS, ADJUSTING TO NEW APPLICATIONS AND MOVING TOWARDS DURABILITY

par / by Jean-Pierre Commène, directeur des Laboratoires / Laboratory Manager,
et / and Abdelkrim Ammouche, directeur Recherche et Innovation /
Research & Innovation Manager, Laboratoire d'études et de recherches
sur les matériaux / Materials Research Laboratory (Lerm), Arles

Après les deux précédentes parutions qui, d'un point de vue historique, racontaient la naissance du ciment naturel, puis celle du ciment Portland, cet article traite cette fois de l'actualité du ciment. On y voit comment la diversité des ciments, issue des diversités géographiques et des pratiques locales originales de construction, a rencontré la normalisation européenne.

Following the two prior publications, which narrated the history of the birth of natural cement and then of Portland cement, this article will this time deal with cement as we know it currently. You will appreciate the great range of existing cements, that have resulted from the geographic diversities and from the local original construction practices, that European Standardisation has come across.

Cette entreprise de normalisation a encadré la diversification des ciments, qui se sont adaptés à la diversité des usages, aux caractéristiques des structures et aux contraintes environnementales et économiques. Les bétons innovants ont également été un puissant moteur de recherche sur les matrices cimentaires...

DIVERSITÉ DES CIMENTS

La définition d'un ciment reste la même depuis déjà de nombreuses années, c'est celle d'un produit hydraulique constitué d'une poudre minérale finement moulue, destiné à être utilisé comme liant dans les mortiers et les bétons. Gâché avec de l'eau, le ciment durcit, aussi bien à l'air

que sous l'eau, il acquiert alors une certaine résistance et se doit de rester stable.

Grâce à l'avancée des techniques modernes de production, la fabrication rationnelle du ciment a progressé en parallèle et les moyens d'analyse et de mesure associés au dosage du cru, au pilotage de la cuisson du clinker, mais aussi au contrôle du broyage, permettent maintenant d'accéder à une gamme importante de ciments.

La normalisation européenne a bien entendu suivi le mouvement dans le cadre de l'harmonisation. Les disparités régionales rencontrées à cette occasion, concernant les habitudes d'utilisation des ciments, les techniques de construction, les conditions climatiques mais aussi les différentes qualités de matières premières

disponibles, expliquent la grande variété des ciments proposés sur les différents marchés nationaux. À partir de là et dans un souci de clarté, les travaux de normalisation vont distinguer deux familles de ciments : les ciments courants qui, comme leur nom l'indique, répondent aux domaines d'application courants, et les ciments spéciaux dotés de propriétés supplémentaires ou particulières.

Ainsi, du point de vue de la désignation des ciments, l'évolution des normes définissant les différents types de ciment courant s'est traduite, ces vingt-cinq dernières années, par un net élargissement de la gamme des produits, établie sur la base d'un encadrement plus précis de leur composition. Alors que, en France il existait cinq types de ciment courant reconnus en 1981, ce nombre est passé à dix en 1994 suivant l'évolution de la norme NF P 15-301^[1, 2], pour atteindre le nombre de vingt-sept en 2001, au moment de la parution de la norme EN 197-1^[3] actuellement en vigueur. Le tableau 1 résume de manière succincte cette évolution. On peut également souligner une exigence accrue concernant les caractéristiques physicochimiques et minéralogiques en fonction de la nature des différents constituants autorisés (clinker, laitier de haut-fourneau, cendres volantes, fillers, fumée de silice, pouzzolanes...).

Si les types de ciment courant répondent à des compositions bien déterminées, leur classification est toujours fonction de leur résistance mécanique, répartie dans la norme européenne en six classes de résistances, étagées entre 32,5 N et 52,5 R. Le durcissement du ciment étant principalement dû à l'hydratation des silicates et des aluminates de calcium, les performances mécaniques sont donc tributaires de la composition minéralogique du clinker et des autres composants du ciment, ainsi que de leurs caractéristiques physiques, comme la finesse de mouture, notamment. Ces paramètres influent directement sur la réactivité plus ou moins élevée des ciments et sur leur chaleur d'hydratation (voir figure 1). Les mesures de temps de prise et de stabilité font partie des essais qualitatifs.

L'ajout de sulfates sous forme de gypse et/ou d'anhydrite, pour réguler la prise des ciments, se fait dans des teneurs limitées afin d'éviter les gonflements liés à un ajout excessif. Les teneurs en magnésium sont quant à elles contrôlées au niveau de la fabrication du clinker. Suivant les types de ciment analysés, les mesures de perte au feu, de résidus insolubles et

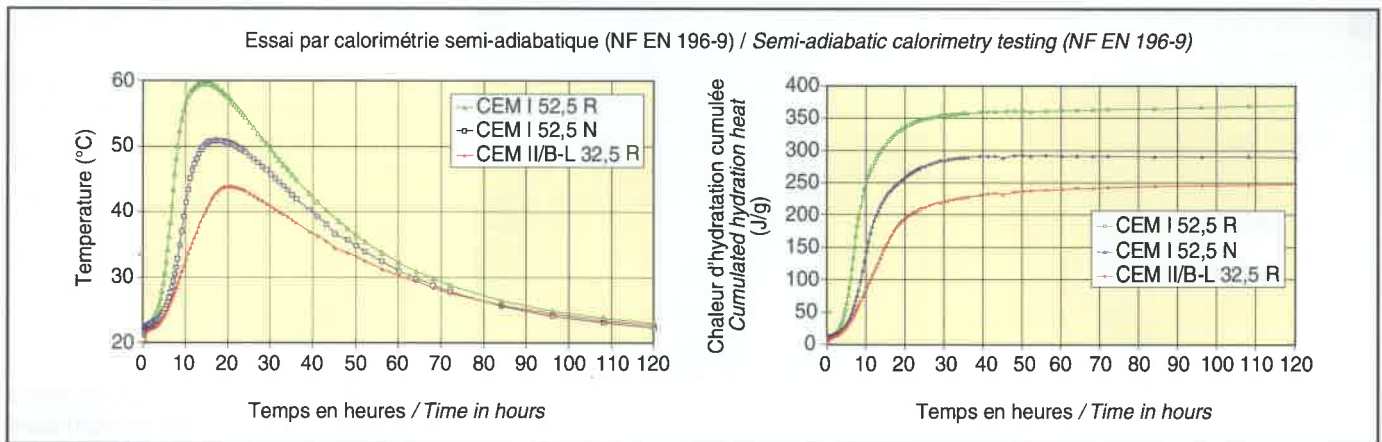


Figure 1 – Courbes d’élévation de température (a) et de chaleur d’hydratation (b) de différents types de ciments obtenues par calorimétrie semi-adiabatique (NF EN 196-9)
 Increase in temperature curve (a) and of heat of hydration (b) of various types of cement obtained by semi-adiabatic calorimetry (NF EN 196-9)

de pouzzolanité sont des garanties supplémentaires apportées par le fabricant. Par ailleurs, la teneur en chlorures est limitée, compte tenu des utilisations dans les bétons armés et précontraints.

De nombreuses autres méthodes d’essais normalisés (NF P 15-433 [4]: essais de retrait et de gonflement, EN 196-9 [5]: chaleur d’hydratation...) ou non (comme la mesure de la chaux libre) sont autant d’outils de laboratoire nécessaires à une caractérisation plus poussée des ciments, qu’ils soient courants ou spéciaux.

L’évolution de la fabrication et du contrôle des ciments depuis l’époque des pionniers, associée à l’édification de normes nationales et à la récente harmonisation européenne (EN 197-1), dont les exigences sont rendues obligatoires du fait du marquage CE des ciments, ont permis d’obtenir des produits aux caractéristiques bien définies dont les performances répondent aux besoins des utilisateurs tout en se tournant naturellement vers la notion de durabilité.

À côté des ciments courants, existent différents ciments spéciaux dont les caractéristiques ajustées permettent de formuler des matériaux aux propriétés et aux performances spécifiques. Ainsi, à l’échelon national, les utilisateurs français désireux de conserver les garanties apportées par la marque NF-Liants hydrauliques[6] ont de ce fait maintenu les exigences complémentaires en relation avec des qualités d’usage spécifiées telles que ciments pour travaux à la mer (NF P 15-317)[7], ciments à teneur limitée en sulfures pour béton précontraint (NF P 15-318)[8], ciment pour travaux en eaux à haute teneur en sulfate (NF P 15-319)[9], auxquels on peut également ajouter les ciments à faible chaleur d’hydra-

tation (NF EN 197-1/A1[10]), dont les marquages respectifs sont notifiés par les sigles PM, ES, CP et LH.

Il existe également des ciments générant une faible chaleur d’hydratation, limitée à 220 J/g selon la norme NF EN 14216[11], particulièrement adaptés à la

construction de structures massives en béton.

Les ciments concernés peuvent être des ciments de haut fourneau (VLH III/B et VLH III/C), des ciments pouzzolaniques (VLH IV/A et VLH IV/B) ou des ciments composés (VLH V/A et VLH V/B).

Tableau 1 – Évolution de l’appellation des ciments courants entre 1981 et 2001
 Development in labelling ordinary cements between 1981 and 2001

1981 (NF P 15-301)	1994 (NF P 15-301)	2001 (NF EN 197-1)
Ciment Portland artificiel Portland artificial cement (CPA)	CPA-CEM I	CEM I
Ciment Portland composé Portland composed cement (CPJ)	CPJ-CEM II/A & CPJ-CEM II/B	CEM II/A-S & CEM II/B-S CEM II/A-D CEM II/A-P & CEM II/B-P CEM II/A-Q & CEM II/B-Q CEM II/A-V & CEM II/B-V CEM II/A-W & CEM II/B-W CEM II/A-T & CEM II/B-T CEM II/A-L & CEM II/B-L CEM II/A-L & CEM II/B-L CEM II/A-LL & CEM II/B-LL CEM II/A-M & CEM II/B-M
Ciment de haut fourneau Blast furnace cement (CHF)	Ciment de haut fourneau Blast furnace cement CHF-CEM III/A & CHF-CEM III/B	CEM III/A, CEM III/B & CEM III/C
Ciment de laitier au clinker Clinker slag cement (CLK)	CLK-CEM III/C	
	Ciment pouzzolanique Pozzolanic cement CPZ CEM IV/A & CPZ CEM IV/B	CEM IV/A et CEM IV/B
Ciment au laitier et aux cendres Slag and ash cement (CLC)	CLC CEM V/A & CLC CEM V/B	Ciment composé Compounded cement CEM V/A et CEM V/B

S : laitier / slag, D : fumée de silice / fume silica, P : pouzzolane naturelle / natural pozzolana, Q : pouzzolane naturelle calcinée / calcined natural pozzolana, V : cendre volante siliceuse / silicious fly ash, W : cendre volante calcique / calcic fly ash, T : schiste calciné / calcined schist, L et LL : fillers calcaires / limestone fillers, M : constituant principal autre que le clinker / main constituent other than the clinker

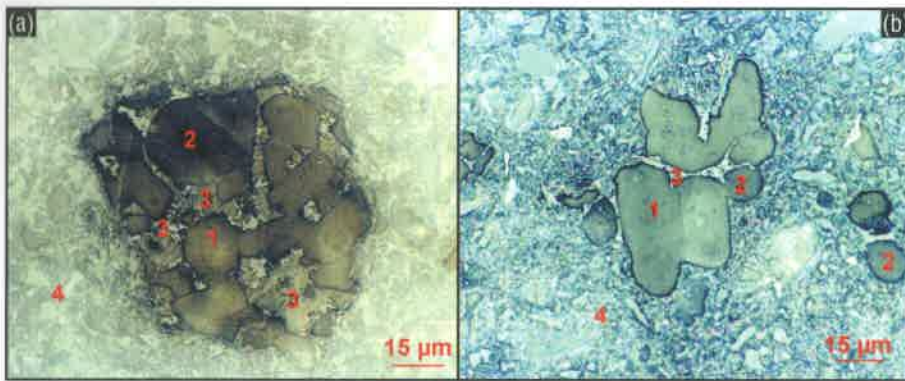


Figure 2 – Vues au microscope optique en lumière réfléchie de grains de clinker dans deux bétons à base de ciments différents / View of clinker grains of two different types of cement based concrete under an optical reflected light microscope

(a) Clinker riche en aluminat tri-calcique (C_3A). 1 = C_3S , 2 = C_2S , 3 = phase interstitielle riche en C_3A , 4 = hydrates

(a) Tricalcium aluminate rich clinker (C_3A). 1 = C_3S , 2 = C_2S , 3 = rich interstitial phase C_3A , 4 = hydrate

(b) Clinker peu riche en C_3A . 1 = C_3S , 2 = C_2S , 3 = phase interstitielle pauvre en C_3A , 4 = hydrates

(b) Tricalcium aluminate poor clinker C_3A . 1 = C_3S , 2 = C_2S , 3 = poor interstitial phase C_3A , 4 = hydrates

DES CIMENTS ADAPTÉS À DES USAGES SPÉCIFIQUES

Un produit ne vaut que pour son adaptabilité à l'usage ou aux usages qui lui sont dévolus. Dans le cas des ciments, leurs utilisations sont assez diverses et concernent aussi bien le BTP que le génie civil, l'industrie de la préfabrication que l'industrie des matériaux prêts à l'emploi.

Ces dernières décennies ont vu s'affiner les connaissances des mécanismes physicochimiques en relation avec l'hydratation des ciments, leur comportement en milieux chimiquement agressifs et leur association aux divers matériaux nécessaires à la confection des bétons.

Parallèlement, les moyens d'analyses des laboratoires se sont perfectionnés et, bien entendu, les diagnostics des principales pathologies rencontrées sur les bétons se sont faits plus précis.

Si les performances mécaniques des ciments courants restent un paramètre de choix essentiel qui va dépendre, par exemple dans le cas d'un ouvrage d'art, de la performance du béton à utiliser, elle-même fonction des charges structurales et des phases constructives (délais de mise sous tension des câbles de précontrainte...), les exigences en matière de durabilité ont pris une part non négligeable dans ce choix. Celles-ci sont relayées en cela par les normes, règlements et recommandations en vigueur.

Ainsi la norme Béton EN 206-1^[12], en définissant un ensemble de classes d'exposition, permet de prendre en compte l'environnement de l'ouvrage, les risques d'agression auxquelles il va être exposé et de définir ainsi des spécifications sur sa composition en fonction de l'agressivité du milieu.

Notons que les principaux thèmes de durabilité généralement retenus sont les suivants^[13] :

- durabilité des armatures et du béton d'enrobage ;
- durabilité des bétons soumis au gel et aux sels de déverglaçage ;
- prévention contre les phénomènes d'alcali-réaction ;
- prévention contre les phénomènes de gonflement interne ;
- durabilité des bétons vis-à-vis des environnements chimiquement agressifs.

A titre d'exemple, des études de cas réels et l'expérimentation en laboratoire ont permis de mieux appréhender les risques associés aux réactions endogènes au béton.

Le phénomène d'alcali-réaction (RAG), à l'origine de la formation dans les bétons et en milieu humide d'un gel expansif silico-alcalin, est un bon exemple de l'élaboration d'une démarche de prévention avec :

- une qualification ciblée des granulats (NF P 18-542^[14]) ;

- un bilan en alcalins actifs des constituants du béton ;
- une évaluation suivant un critère de performance du béton ;
- l'étude des bétons d'ouvrages de la région ;
- l'ajout d'additions minérales à effet bénéfique... (voir les recommandations pour les préventions des désordres dus à l'alcali-réaction, fascicule LCPC^[15]).

Les phénomènes de gonflement liés à la réaction sulfatique interne (RSI) dans les bétons font aussi l'objet d'une démarche alignée sur les facteurs déterminants pour le développement de la réaction (voir les Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne, fascicule LCPC^[16]).

Dans ces deux cas, le choix d'un ciment adapté est prépondérant quant à la limitation des risques. La limitation de la teneur en aluminates (voir figure 2), de la teneur en alcalins des ciments et l'utilisation d'ajouts spécifiques, en association avec d'autres mesures, permettent de limiter les réactions d'expansions interne au béton.

Ainsi la démarche durabilité actuelle doit intégrer à la fois les spécifications de la norme EN 206-1 sur les paramètres de composition des bétons en fonction de la classe d'exposition (dosage en ciment minimal, rapport E/Léq. maximal...) allant jusqu'au choix du ciment dans certains cas, des dispositions constructives réglementaires (Eurocode 2^[17]), par exemple sur les épaisseurs d'enrobage des armatures, et un ensemble d'outils expérimentaux fondés sur des critères de performance permettant d'optimiser la tenue du matériau vis-à-vis de l'environnement spécifique de l'ouvrage. Inutile de préciser que la gamme des ciments disponibles est un atout supplémentaire pour un choix adapté aux critères de durabilité (voir également le fascicule de documentation P 18-011^[18] pour ce qui concerne les recommandations dans le choix du ciment en fonction des environnements agressifs).

LES CIMENTS DANS LES BÉTONS INNOVANTS

Les trente dernières années ont vu le développement de nouveaux bétons