

RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR UN BÉTON ÂGÉ DE 30 ANS CONTENANT UN CIMENT RICHE EN LAITIER

Christophe CHARRON*, Maxime LION**, Alain JEANPIERRE**, Abdelkrim AMMOUCHE***

* HOLCIM, Obourg – Belgique,

** EDF Ceidre-TEGG, Aix-en-Provence,

*** LERM, Arles

1. CONTEXTE

EDF est gestionnaire d'un parc d'ouvrages de Génie Civil dont la grande variété, en termes de localisation géographique, d'époque de construction ou encore de composition de bétons, implique la nécessité d'acquérir des connaissances approfondies sur le comportement in situ des bétons. Dans ce contexte, EDF est fréquemment amenée à réaliser des retours d'expérience sur des bétons exposés à des environnements variés. Ces bétons varient des ouvrages hydrauliques des années 1900

aux BFUP exposés durant plusieurs années au cœur d'aéroréfrigérants [1].

L'étude présentée dans cet article, issue d'une collaboration EDF/HOLCIM, vise à diagnostiquer l'état d'un béton âgé d'une trentaine d'année contenant un ciment dont la teneur en laitier est de l'ordre de 40-50 % (ciment CHF de l'époque qui entrerait dans la catégorie actuelle des CEM III/A). Les prélèvements sont issus d'un voile BA d'un ouvrage EDF du nord de la France et situé en bordure de mer (Figure 1). Le dosage théorique en ciment est de l'ordre de 350 kg/m^3 et le rapport E_{eff}/C de l'ordre de 0,5.



Figure 1 : Illustration du carottage sur voile et des échantillons prélevés.

Les granulats de ce béton sont des granulats silico-calcaires.

Le béton étudié est soumis depuis plus de 30 ans à :

- un environnement humide, rarement sec, mais sans être immergé (HR > 80%) : exposition à la carbonatation en classe XC2 suivant la norme NF EN 206-1 [2] ;
- un environnement marin mais sans contact direct avec l'eau de mer : exposition aux sels marins (chlorures et sulfates) en classe XS1 suivant la norme NF EN 206-1 [2] ;
- un environnement industriel avec possibilité d'exposition à des attaques chimiques acides ou sulfatiques...

Un diagnostic du béton a été réalisé par le LERM [3]. De nombreux essais ont pour cela été effectués : analyses DRX et thermogravimétriques, MEB, détermination des profils de chlorures et sulfates, essais de résistance à la compression, de porosité à l'eau et de coefficient de diffusion apparent des chlorures, mesures de la profondeur de carbonatation...

En accord avec l'approche performantielle du guide AFGC 2004 [4], les résultats obtenus dans le cadre de cette étude sont scindés en deux parties : une première partie « indicateurs de durabilité » et une seconde « témoins de durée de vie ». Ces parties sont respectivement présentées dans les chapitres qui suivent, ce qui permettra dans le dernier chapitre de discuter des résultats dans une optique d'évaluation de la durabilité de l'ouvrage.

2. INDICATEURS DE DURABILITÉ ET RÉSISTANCE MÉCANIQUE

2.1. Porosité à l'eau

La porosité à l'eau a été mesurée suivant le mode opératoire AFPC-AFREM. Les résultats de masse volumique et de porosité sont donnés ci-dessous (Tableau 1).

Masse volumique imbibée (kg/m ³)	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Porosité à l'eau (%)
2 370	2 250	12,6

Tableau 1 : Résultats de mesure de la masse volumique et de la porosité à l'eau.

2.2. Coefficient de diffusion apparent des chlorures

Le coefficient de diffusion apparent des chlorures a été mesuré par essai de migration sous champ électrique en régime transitoire, selon la méthode de TANG-NILSSON. Les résultats sont donnés dans le tableau 2 ci-dessous. Le coefficient de diffusion apparent moyen obtenu est égal à $1,7 \cdot 10^{-12}$ m²/s.

	Coefficient de diffusion apparent (m ² /s)
Échantillon 1	$1,9 \cdot 10^{-12}$
Échantillon 2	$1,4 \cdot 10^{-12}$
Échantillon 3	$1,7 \cdot 10^{-12}$
Coefficient de diffusion apparent moyen	$1,7 \cdot 10^{-12}$

Tableau 2 : Résultats de mesures du coefficient de diffusion apparent.

2.3. Teneur en portlandite

Une analyse thermogravimétrique a été réalisée sur un échantillon prélevé dans le cœur d'une carotte. La teneur en Ca(OH)₂ mesurée est de l'ordre de 0,8 % de la masse du béton, soit de l'ordre de 5-6 % de la masse du ciment.

2.4. Résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée sur 3 échantillons selon la norme NF EN 12504-1. Les valeurs obtenues sont données dans le tableau 3. La résistance moyenne obtenue est égale à 49,3 MPa.

	Résistance à la compression (MPa)
Carotte 1	48,0
Carotte 2	52,9
Carotte 3	47,1
Résistance à la compression moyenne	49,3

Tableau 3 : Résultats de mesure de résistance à la compression.

3. TÉMOINS DE DURÉE DE VIE

3.1. Profondeur de carbonatation

La profondeur de carbonatation a été mesurée sur 3 échantillons par le test à la phénolphthaléine sur fractures fraîches. Les résultats montrent que le front de carbonatation moyen obtenu est situé à une profondeur estimée entre 15 et 20 mm (tableau 4).

	Profondeur de carbonatation (mm)
Échantillon 1	15 à 20 mm
Échantillon 2	15 à 20 mm
Échantillon 3	14 à 20 mm
Profondeur de carbonatation moyenne	15 à 20 mm

Tableau 4 : Résultats de mesure de front de carbonatation.

3.2. Profil en chlorures

Le dosage des chlorures totaux a été réalisé par potentiométrie suivant le mode opératoire AFPC-AFREM sur une carotte. Les mesures ont été réalisées sur quatre tranches de 20 mm d'épaisseur afin d'obtenir un profil détaillé au niveau des 80 premiers millimètres du béton. Une cinquième mesure a été réalisée pour obtenir le dosage des chlorures à cœur (profondeur de 160-180 mm). Les résultats sont illustrés dans le graphique ci-dessous (Figure 2). La teneur en chlorures est élevée en surface du béton, traduisant un apport exogène lié à l'environnement marin. Plus en profondeur, la teneur en chlorures, de l'ordre de 0,2 % de la masse du ciment, est faible et bien inférieure à la limite de 0,4 % définie dans la norme NF EN 206-1 [2] pour les bétons armés et qui correspond généralement au seuil d'initiation de la corrosion sous l'effet des chlorures

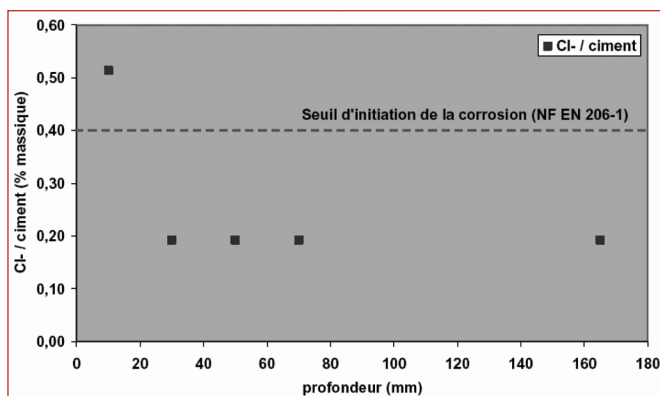


Figure 2: Profil en chlorures.

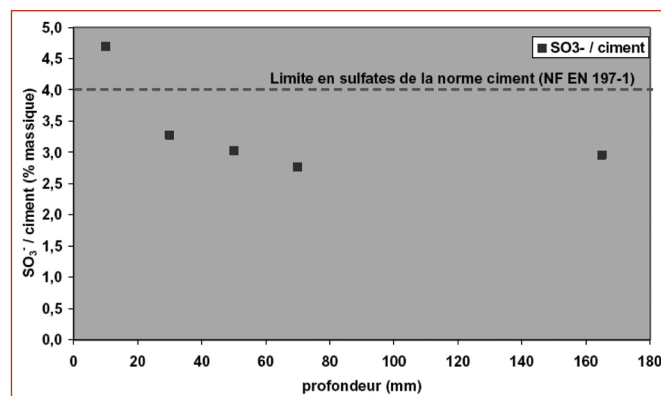


Figure 3: Profil en sulfates.

[4]. Il faut souligner que la norme NF EN 206-1 prévoit au niveau national une classe spécifique, avec un seuil de 0,65%, pour les bétons formulés avec des ciments CEM III, ce qui est le cas du béton étudié.

3.3. Profil en sulfates

Le dosage des sulfates a été réalisé par chromatographie ionique après attaque à l'acide chlorhydrique. A l'instar du profil des chlorures, les mesures ont été réalisées sur quatre tranches de 20 mm d'épaisseur afin d'obtenir un profil détaillé au niveau des 80 premiers millimètres du béton et une cinquième mesure a été réalisée pour obtenir le dosage des chlorures à cœur (profondeur de 160-180 mm). Les résultats sont illustrés dans le graphique ci-dessous (Figure 3).

La teneur en sulfates est élevée en surface du béton, traduisant un apport exogène lié aux environnements marin et industriel. Plus en profondeur, la teneur en sulfates, de l'ordre de 2,5-3 % de la masse du ciment, est faible et reste inférieure à la limite de 4 % en SO_3 spécifiée dans la norme ciment NF EN 197-1 [5].

3.4. Analyses DRX et MEB

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) a été réalisée dans le but de comparer la nature des phases minérales cristallisées présentes dans le béton en zone carbonatée et non carbonatée. Ces analyses ont porté sur deux échantillons : un premier prélevé dans les 20 premiers millimètres où la matrice est carbonatée (échantillon A) et un second prélevé à cœur en dehors de la zone concernée par la carbonatation (échantillon C). Les analyses ont été réalisées sur des échantillons broyés passant au tamis de 40 μm après séparation sélective des gravillons afin de maximiser la quantité de matrice analysée. Ces analyses ont permis de mettre en évidence les phases minérales cristallisées présentées dans le tableau 5.

On remarque que la portlandite est détectée seulement au cœur du béton en relation avec la carbonatation de la matrice dans la frange superficielle. En revanche, la présence d'une fraction granulaire carbonatée non négligeable ne permet pas de mettre en évidence l'abondance de carbonate de calcium néoformé en surface du béton. Les chloroaluminates de calcium sont détectés dans la frange superficielle du béton. Ceci traduit la fixation par les alu-

Minéraux	Composition chimique	Intensité relative		Raie principale (Å)
		Échantillon A Zone carbonatée	Échantillon C Zone non carbonatée	
Calcite	CaCO_3	+++	+++	3,03
Quartz	SiO_2	++	++	3,34
Ettringite	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	+	+	9,73
Hydrocalumite	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{Cl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	+	—	7,89
Aragonite	CaCO_3	t	t	3,39
Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	t	t	2,89
Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	—	+	2,62
Gypse	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	—	t	7,62 – 4,28
Corps amorphe	—	p	p	—

(+++ = intensité forte, ++ = intensité moyenne, + = intensité faible, t = traces ; p = présence, ii : identification incertaine)

Tableau 5: Analyse qualitative par diffraction des rayons X.

minates hydratés d'une partie des chlorures apportés par l'environnement marin.

L'examen au microscope électronique à balayage (MEB), couplé à l'analyse élémentaire EDS, a été réalisé sur des fractures fraîches prélevées dans les 20 premiers millimètres du béton et à cœur du béton. Les figures suivantes illustrent respectivement ces observations.

On confirme que la matrice dans les 20 premiers millimètres présente des signes de carbonatation. Ceux-ci se manifestent par la présence de cristaux de carbonate de calcium néoformés par réaction entre le CO_2 atmosphérique et la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Ces signes sont le plus marqués au niveau de l'interface pâte-granulats où la portlandite était initialement localisée et au niveau de la matrice recouverte par les microcristaux de calcite. Par ailleurs, des cristaux de chloroaluminate de calcium sont détectés au niveau de cette frange superficielle. Enfin très ponctuellement, un amas d'ettringite à faciès massif est décelé à proximité d'un grain de clinker résiduel.

Plus à cœur, le béton se caractérise par une microstructure d'une bonne cohésion générale. La pâte de ciment est majoritairement dense malgré la présence de certaines zones microporeuses, essentiellement localisées au niveau de la pâte située entre certains granulats. Les contacts pâte-granulats sont généralement étroits. Les hydrates principaux constituant la matrice cimentaire sont :

- les silicates de calcium hydratés, généralement en assemblages denses et parfois à faciès fibreux au niveau des zones microporeuses,
- les aluminates et monosulfoaluminates hydratés,
- la portlandite, en plaquettes hexagonales au niveau des zones poreuses ou sous forme de cristaux massifs au niveau des contacts pâte-granulats,
- l'ettringite sous forme de fibres finement cristallisées.

Aucun signe de pathologie d'origine physico-chimique n'a été mis en évidence dans les échantillons de béton examinés.

4. DISCUSSION

Comme il a été mentionné en introduction, le béton étudié est exposé depuis plus de 30 ans à la carbonatation, aux chlorures, aux sulfates marins ainsi qu'à diverses attaques chimiques (acides, sulfates, ...) liées à l'environnement industriel.

Selon les types d'exposition énoncés, les remarques suivantes peuvent être proposées :

Carbonatation

Le front de carbonatation est situé en moyenne à une profondeur estimée entre 15 et 20 mm. On peut considérer que la profondeur de carbonatation est relativement faible compte-tenu de l'âge du béton. Après plus de 30 ans d'exposition, le front de carbonatation n'a pas atteint la première nappe d'armatures et le risque de corrosion lié à la carbonatation n'est donc pas actuellement à considérer.

Chlorures

La teneur en chlorures totaux est relativement élevée (0,5 % par rapport à la masse du ciment) uniquement en

surface (environ 20 premiers millimètres) traduisant un apport en chlorures lié à l'environnement marin. Cette teneur élevée est à mettre aussi en relation avec une forte présence de chloroaluminates traduisant la fixation d'une partie des chlorures par les aluminates du ciment.

Au-delà des 20 premiers millimètres, la teneur en chlorures totaux est de l'ordre de 0,2 % de la masse du ciment, c'est-à-dire clairement en dessous du seuil de 0,4 % de la norme NF EN 206-1 [2] qui s'applique pour tout béton armé, quelle que soit la nature du ciment, et dont la valeur admissible est de 0,65 % du fait de l'usage d'un ciment CEM III. Après plus de 30 ans d'exposition, le front de pénétration des chlorures n'a pas atteint la première nappe d'armatures et le risque de corrosion lié aux chlorures n'est donc pas actuellement à considérer.

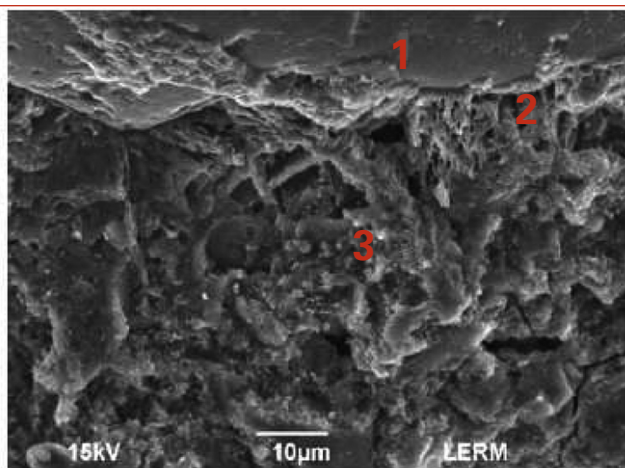
Attaques chimiques diverses

En surface (environ les 20 premiers millimètres), un taux de sulfates relativement élevé est observé, ce qui est indicatif d'un apport exogène en sulfates et qui explique que très ponctuellement des amas d'ettringite à faciès massif ont été relevés à la surface du béton. Au delà de la frange superficielle, la teneur en sulfate est en dessous de 4% par rapport à la masse du ciment, valeur limite spécifiée dans la norme ciment NF EN 197-1 [5].

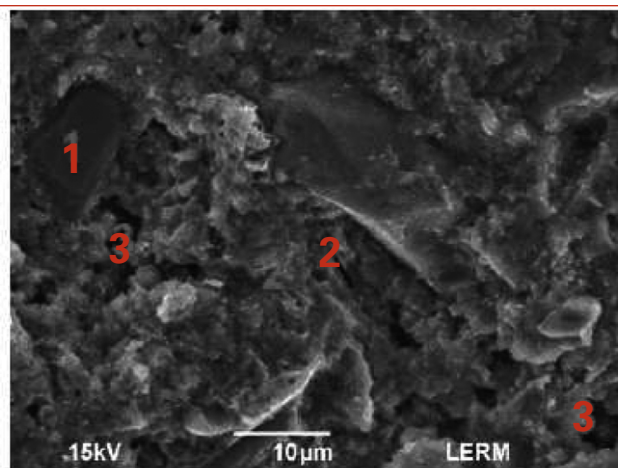
D'un point de vue microstructural, le béton présente une bonne cohésion générale. Il se caractérise par une matrice cimentaire globalement compacte et des contacts pâte-granulats majoritairement étroits. Aucun signe majeur de pathologie d'origine physico-chimique n'a été mis en évidence dans les échantillons de béton examinés (lixiviation, réaction alcali-granat, réaction sulfatique interne ou externe, ...).

Indicateurs de durabilité

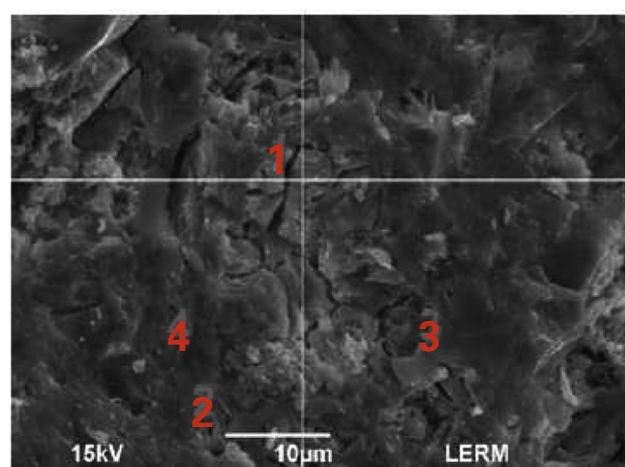
Le diagnostic ainsi effectué indique que le béton étudié bénéficie d'un bon niveau de durabilité qu'il faut mettre en lien avec les propriétés du matériau. L'application de la démarche performantielle du guide AFGC [4] peut alors aider à mieux cerner le niveau de durabilité de ce béton via les indicateurs de durabilité mesurés dans le cadre de cette étude. L'intérêt de la démarche performantielle dans le cas d'ouvrages anciens avait déjà été souligné par le LCPC lors d'une étude menée sur un béton âgé de 15 ans ainsi que sur sa réplique reconstituée en laboratoire [6] suivie d'une tentative de prédiction de la durabilité résiduelle de l'ouvrage [7]. Cette étude avait compris la mesure d'indicateurs de durabilité sur le béton prélevé mais aussi sur un béton reformulé en laboratoire avec l'objectif de caractériser son état « sain » initial, permettant ainsi d'évaluer son niveau de durabilité potentielle suivant l'approche performantielle du guide AFGC [4]. Dans le cadre de notre étude de diagnostic, les indicateurs de durabilité mesurés à cœur du béton de l'ouvrage sont plus simplement assimilés à ceux du béton d'origine, et comparés aux seuils proposés dans l'approche performantielle afin d'estimer le niveau de durabilité correspondant. Par ailleurs, il est à noter qu'il est souvent difficile de reproduire l'état « sain » initial d'un béton âgé de plus de 30 ans (impossibilité de reproduire les constituants d'origine, données parfois manquantes sur les



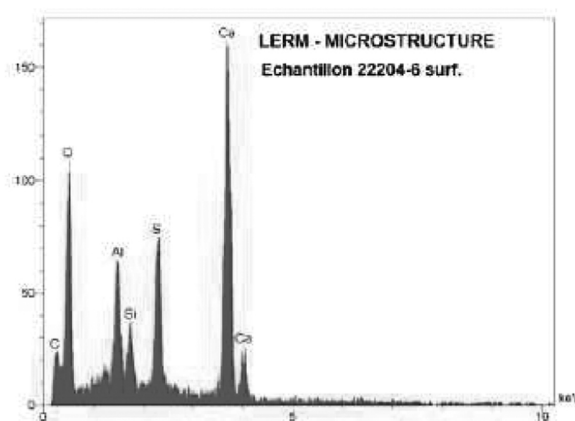
Détail de la matrice à proximité d'un granulat
1 = granulat, 2 = portlandite partiellement carbonatée, 3 = matrice



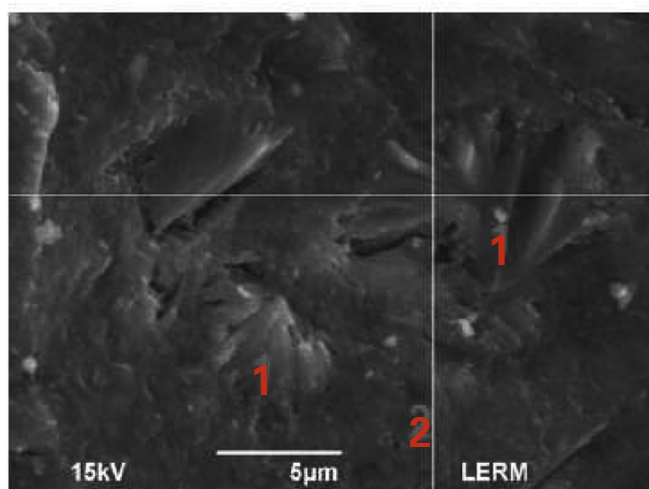
1 = laitier, 2 = matrice partiellement carbonatée, 3 = pore



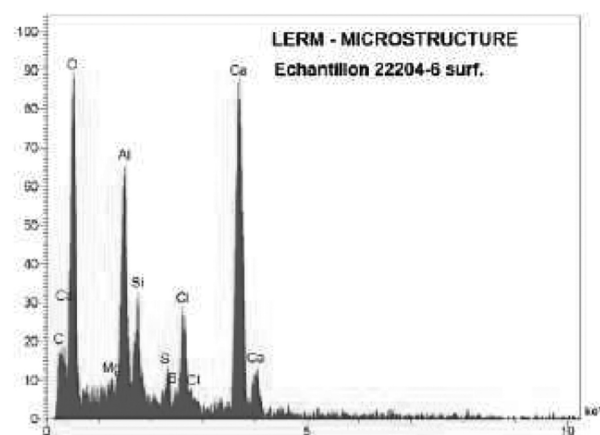
1 = amas d'ettringite, 2 = aluminates de Ca hydratés, 3 = clinker résiduel, 4 = C-S-H denses



Analyse élémentaire EDS en de l'amas d'ettringite (=1)



Vue de la matrice dense
1 = chloroaluminates de calcium, 2 = C-S-H denses



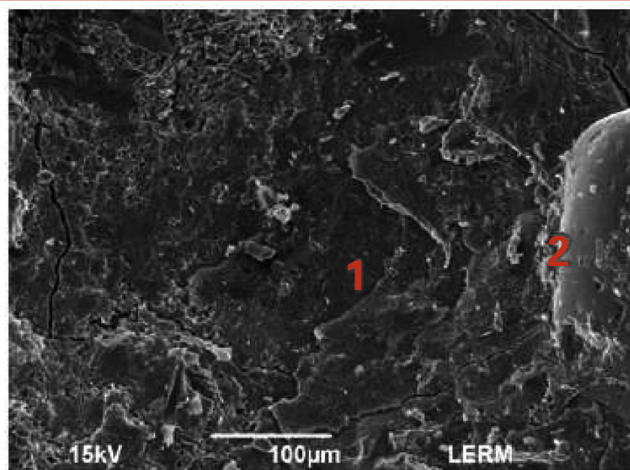
Analyse élémentaire EDS des chloroaluminates

Figure 4: Vues de la microstructure du béton dans les 20 premiers millimètres.

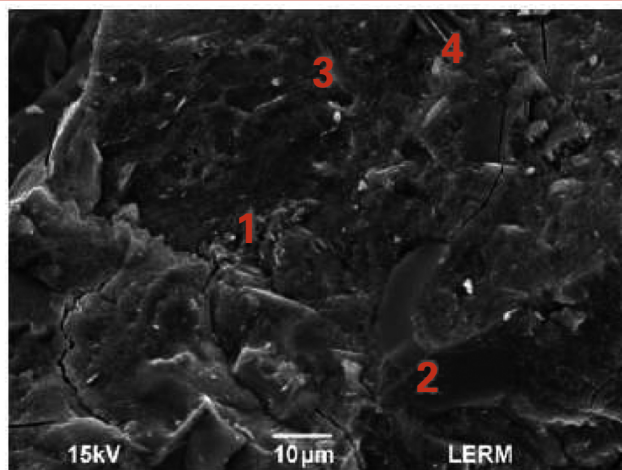
dosages, impossibilité de reproduire la mise en œuvre initiale,...).

L'approche performantielle du guide AFGC permet tout d'abord de définir une classe de durabilité relative aux indicateurs de durabilité généraux (G) ou de substitution

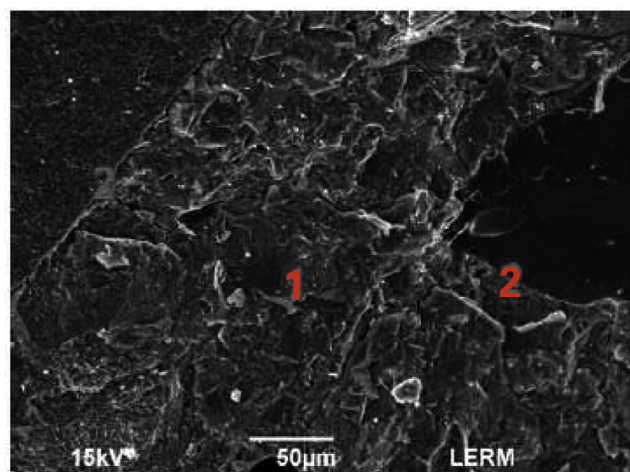
(S). La figure 6 ci-après présente les classes de durabilité évaluées en fonction des résultats obtenus : porosité à l'eau de 12,6 %, coefficient de diffusion apparent de $1,7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, pour un béton de résistance à la compression de 49,3 MPa.



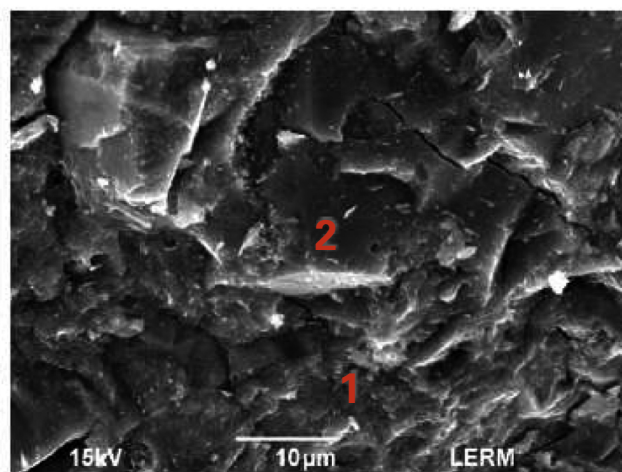
Vue générale de la matrice dense (=1) et des contacts pâte-granulats étroits (=2)



Vue de détail de la matrice dense
1 = C-S-H denses, 2 = laitier partiellement anhydre,
3= aluminates de Ca hydratés, 4 = portlandite



Vue générale de la matrice généralement dense (=1) et des contacts pâte-granulats étroits (=2)



Vue de détail de la matrice généralement dense
1 = C-S-H denses, 2 = laitier partiellement anhydre

Figure 5: Vues de la microstructure du béton à cœur.

De manière globale, on remarque que le béton étudié se situe à une classe de durabilité potentielle moyenne/élevée. Dans un second temps, des classes relatives à la teneur en portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ peuvent être définies. La figure suivante (Figure 7) illustre l'évaluation de ces classes en fonction des résultats obtenus (teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de l'ordre de 5-6 % par rapport à la masse de ciment).

On observe que la classe de durabilité relative à la teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est très faible pour la durabilité potentielle vis-à-vis de la corrosion des armatures (cette faible valeur pouvant logiquement s'expliquer par le fait que le ciment utilisé est de type CEM III). Le guide AFGC souligne que les valeurs limites relatives à la teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dépendent en fait des autres indicateurs (perméabilité, porosité, coefficient de diffusion...) et prend l'exemple des BHP et BTHP qui, malgré une teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ faible voire très faible, possèdent généralement une durabilité potentielle très élevée vis-à-vis de la corrosion. Le diagnostic effectué dans le cadre de notre étude ayant montré un bon niveau de durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures (carbonatation et chlorures), on peut donc considérer que ce sont les bonnes propriétés du béton étudié (porosité et coefficient

de diffusion, ...) qui permettent d'assurer ce niveau de durabilité, en compensant les effets liés à une faible teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Pour finir, les résultats de notre étude peuvent être utilisés afin de situer le béton étudié par rapport aux niveaux d'exigence qui sont définis dans le guide AGFC pour des enrobages conformes aux réglementations actuelles, c'est-à-dire un enrobage de 50 mm pour les ouvrages exposés aux chlorures et un enrobage de 30 mm pour les ouvrages exposés uniquement à la carbonatation (Figure 8).

D'après le contenu du tableau ci-dessus, on voit que le béton faisant l'objet de cette étude se situe a minima dans la catégorie d'ouvrages de niveau 3 (bâtiments et ouvrages de génie civil pour une durée de vie de 50 à 100 ans) pour des enrobages conformes aux réglementations actuelles. Par ailleurs, on peut remarquer que, de par ses caractéristiques, le béton étudié peut satisfaire à des conditions plus strictes relatives à des durées de vies plus élevées ou à des milieux plus agressifs. On voit par exemple que du point de vue de la diffusivité des chlorures, la valeur du coefficient de diffusion apparent permettrait de répondre à des niveaux d'exigence encore supérieurs (niveaux 4 et 5) vis-

		Classes et valeurs limites				
	Durabilité potentielle →	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
G	Porosité accessible à l'eau (%) P_{eau}	> 16	14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9
S	Porosité mesurée par intrusion de mercure ($P_{Hg\ max} = 400\ MPa$ et prétraitement par étuvage à $T = 45\ ^\circ C$ pendant 14 jours en présence de gel de silice) (%) P_{Hg}		13 à 16	9 à 13	6 à 9	3 à 6
S	Résistivité électrique ($\Omega.m$) ρ	< 50	50 à 100	100 à 250	250 à 1000	> 1000
G	Coefficient de diffusion <i>effectif</i> des chlorures ($10^{-12}\ m^2.s^{-1}$) D_{eff}	> 8	2 à 8	1 à 2	0,1 à 1	< 0,1
G	Coefficient de diffusion <i>apparent</i> des chlorures (mesuré par essai de migration) ($10^{-12}\ m^2.s^{-1}$) $D_{app(mig)}$	> 50	10 à 50	5 à 10	1 à 5	< 1
G	Coefficient de diffusion <i>apparent</i> des chlorures (mesuré par essai de diffusion) ($10^{-12}\ m^2.s^{-1}$) $D_{app(dif)}$				< 5	
G	Perméabilité apparente aux gaz (à $P_{entrée} = 0,2\ MPa$ et après étuvage à $T = 105\ ^\circ C$) ($10^{-18}\ m^2$) K_{gaz}	> 1000	300 à 1000	100 à 300	10 à 100	< 10
G	Perméabilité à l'eau liquide (à P_{max} , par mesure directe du flux, après saturation, cf. § 7.2.4.1 et 7.2.4.2) ($10^{-18}\ m^2$) $k_{lq}(\tau)$	> 10	1 à 10	0,1 à 1	0,01 à 0,1	< 0,01
	Type de béton (indicatif et pour des formules simples)		B25 à B40	B30 à B60	B55 à B80	> B80

Figure 6 : Classes de durabilité potentielle selon le guide AFGC [4].

à-vis de la corrosion induite par les chlorures dans le cas d'une faible concentration en chlorures libres en surface. L'exigence sur le coefficient de diffusion serait également satisfaite pour une structure de niveau 3 qui serait exposée à une forte teneur en chlorures en surface ou située en zone de marnage. Des observations similaires peuvent être faites en ce qui concerne la porosité qui est relativement faible, de l'ordre de 12,6 %, et qui par exemple est très proche du seuil de 12 % défini pour le niveau 4 vis-à-vis de la corrosion induite par la carbonatation en environnement humide.

En somme, l'application de la démarche performantielle est cohérente avec les profondeurs de pénétration limitée

des agents agressifs observées sur le béton étudié : les fronts de carbonatation et de chlorures ne dépassent pas 20 mm après 30 ans d'exposition.

5. CONCLUSIONS

L'étude présentée a porté sur le diagnostic d'un béton à base de ciment au laitier ayant été soumis à un environnement marin/industriel pendant plus de 30 ans. Les examens réalisés indiquent que le béton étudié ne présente aucune pathologie d'origine physico-chimique. Les caractéristiques physiques, microstructurales et minéralogiques

		Classes et valeurs limites				
Durabilité potentielle vis-à-vis de la corrosion des armatures →		Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Teneur en Ca(OH)_2 (% massique par rapport au ciment)		< 10	10 - 13	13 - 20	20 - 25	≥ 25
Durabilité potentielle vis-à-vis de l'alcali-réaction →		Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Teneur en Ca(OH)_2 (% massique par rapport au ciment)		≥ 20	12 - 20	8 - 12	5 - 8	< 5

Figure 7 : Classes relatives à la teneur en Ca(OH)_2 selon le guide AFGC [4].

> 120 ans <i>Ouvrages dits exceptionnels</i> Niveau 5	de 100 à 120 ans <i>Grands ouvrages</i> Niveau 4	de 50 à 100 ans <i>Bâtiment et Ouvrages de génie civil</i> Niveau 3	de 30 à 50 ans <i>Bâtiment</i> Niveau 2	< 30 ans Niveau 1	Durée de vie exigée / Catégorie d'ouvrage / ← Niveau d'exigence	Type d'environnement ↓	
• $P_{\text{eau}} < 9$ • $K_{\text{gaz}} < 10$	• $P_{\text{eau}} < 12$ • $K_{\text{gaz}} < 100$	• $P_{\text{eau}} < 14^{(6)}$	• $P_{\text{eau}} < 16$	• $P_{\text{eau}} < 16$	Sec et très sec ($\text{HR} < 65\%$) ou humide en permanence	1	Corrosion induite par carbonatation ($e = 30 \text{ mm}$)
• $P_{\text{eau}} < 9$ • $k_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{eau}} < 12$ • $K_{\text{gaz}} < 100$	• $P_{\text{eau}} < 14^{(6)}$	• $P_{\text{eau}} < 16$	• $P_{\text{eau}} < 16$	Humide ($\text{HR} > 80\%$)	2	
• $P_{\text{eau}} < 9$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $k_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{eau}} < 9$ • $K_{\text{gaz}} < 10^{(4)}$	• $P_{\text{eau}} < 12^{(7)}$ • $K_{\text{gaz}} < 100^{(8)}$	• $P_{\text{eau}} < 14^{(5)}$	• $P_{\text{eau}} < 15$	Modérément humide ($65 < \text{HR} < 80\%$)	3	
• $P_{\text{eau}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $k_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{eau}} < 9$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $k_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{eau}} < 12^{(7)}$ • $K_{\text{liq}} < 0,1^{(9)}$	• $P_{\text{eau}} < 14^{(6)}$	• $P_{\text{eau}} < 16$	Cycles fréquents d'humidification-séchage	4	
• $P_{\text{eau}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 10$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $k_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{eau}} < 12$ • $D_{\text{app(mig)}} < 20$ • $K_{\text{liq}} < 0,1^{(3)}$	• $P_{\text{eau}} < 14$	• $P_{\text{eau}} < 15$	• $P_{\text{eau}} < 16$	5.1 [Cl] faible ⁽¹⁾	5	Corrosion induite par les chlorures ($e = 50 \text{ mm}$)
• $P_{\text{eau}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $k_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{eau}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $k_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{eau}} < 11$ • $D_{\text{app(mig)}} < 2$ • $K_{\text{liq}} < 0,1^{(3)}$	• $P_{\text{eau}} < 11$	• $P_{\text{eau}} < 14$	5.2 [Cl] forte ⁽²⁾		
• $P_{\text{eau}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$	• $P_{\text{eau}} < 12$ • $D_{\text{app(mig)}} < 5$	• $P_{\text{eau}} < 13$ • $D_{\text{app(mig)}} < 7$	• $P_{\text{eau}} < 13$	• $P_{\text{eau}} < 15$	Immersion dans l'eau contenant des chlorures	6	
• $P_{\text{eau}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $k_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{eau}} < 10$ • $D_{\text{app(mig)}} < 2$ • $K_{\text{gaz}} < 100$ • $k_{\text{liq}} < 0,05$	• $P_{\text{eau}} < 11$ • $D_{\text{app(mig)}} < 3$ • $K_{\text{liq}} < 0,1^{(3)}$	• $P_{\text{eau}} < 11$	• $P_{\text{eau}} < 14$	Zone de marnage	7	

Figure 8 : Relations Niveau d'exigence/Indicateurs de durabilité proposée par le guide AFGC [4].

obtenues traduisent une bonne tenue de ce béton dans le milieu considéré.

Les indicateurs de durabilité mesurés (porosité, coefficient de diffusion) ont permis de positionner ce béton par rapport aux recommandations de l'approche performantielle proposée par le guide AFGC [4]. Une durabilité potentielle de classe moyenne/élevée a été obtenue pour ce béton. Le diagnostic réalisé a montré que les fronts de carbonatation et de chlorures, après 30 ans d'exposition à un environnement de type XC2 et XS1 suivant la norme NF EN 206-1, ne dépassaient pas 20 mm et n'avaient toujours pas atteint la première nappe d'armatures. Le risque de corrosion n'est donc pas actuellement à considérer après 30 ans d'exposition, ce qui conforte la disposition de ce béton dans la catégorie de béton pour ouvrages répondant à minima à un niveau 3 en terme de niveau d'exigences (bâtiments et ouvrages de génie civil pour une durée de vie de 50 à 100 ans) pour le type d'environnement considéré et pour des enrobages conformes aux réglementations actuelles.

Cette étude a montré également, à l'instar de ce qui est souligné dans le guide AFGC, que l'évaluation de la durabilité potentielle d'un béton doit considérer plusieurs facteurs pour être optimale. Pour le béton étudié dans l'environnement considéré, on a pu par exemple constater que ses propriétés (porosité et coefficient de diffusion,...) permettaient effectivement d'assurer son niveau de durabilité en compensant les effets liés à une faible teneur en Ca(OH)_2 , définie comme a priori prépondérante pour l'évaluation de la durabilité des armatures. En effet, si les résultats de certains de ces facteurs sont en accord avec l'aspect réel du béton, d'autres au contraire conduisent à des conclusions en opposition avec ce qui est réellement observé. Ainsi le critère teneur en portlandite semble peu approprié dans le cas présent. Malgré une faible teneur en portlandite (du fait de la nature du ciment CEM III), la carbonatation du béton est relativement faible et n'a pas dépassé les 20 mm de profondeur.

Pour finir, cette étude montre qu'une démarche basée sur des mesures d'indicateurs de durabilité associées aux méthodes de caractérisation physico-chimiques et micro-structurales, permet d'apporter au maître d'ouvrage une vision supplémentaire en situant le diagnostic d'un béton dans le cycle de vie de l'ouvrage. Une telle démarche s'inscrit directement dans la problématique de maintenance et de gestion des ouvrages, et trouve un intérêt particulier

lorsque les données sur la composition des bétons sont manquantes. En revanche, il est à mentionner que les niveaux d'exigence du guide AFGC sont définis dans une optique d'aide à la conception, en tenant compte des règles actuelles (enrobage de 30 mm pour la carbonatation et 50 mm pour les chlorures). Dans ces conditions, pour un ouvrage existant dont l'enrobage des armatures peut être différent, les données issues d'un diagnostic peuvent être utilement complétées par l'utilisation de modèles prédictifs (carbonatation et pénétration des chlorures) afin d'estimer la durée de vie résiduelle de l'ouvrage (temps d'initiation de la corrosion).

6. RÉFÉRENCES

- [1] Evolution in-situ de la résistance et des caractéristiques de durabilité d'un BFUP : retour d'expérience sur poutrelles dans un aéroréfrigérant, F. TOUTLEMONDE, M. CARCASSES et M. LION, à paraître, **Congrès BFUP 2009**, 17-18 novembre 2009 à Marseille.
- [2] Diagnostic d'état d'un béton de voile à base de ciment au laitier, A. AMMOUCHE, Rapport interne **LERM** 08.22204.001.01.A, 2008.
- [3] Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages - Indicateurs de durabilité. **Guide AFGC** de juillet 2004.
- [4] **Norme** NF EN 206-1. Béton – Partie 1 : spécifications, performances, production et conformité.
- [5] **Norme** NF EN 197-1. Ciment – Partie 1 : compositions, spécifications et critères de conformités des ciments courants.
- [6] Application d'une démarche performantielle pour évaluer la durabilité du tablier d'un grand ouvrage d'art, 15 ans après sa construction, G. VILLAIN, M. THIERY, G. PLATRET et J.L. CLEMENT, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 270-271, p. 3 à 28, 2007.
- [7] Exemple d'application d'un modèle de carbonatation in situ, M. THIERY, G. VILLAIN, S. GOYER, G. PLATRET, J.L. CLEMENT et P. DANGLA, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 270-271, p. 29 à 50, 2007.