

Qualification de bétons bas-carbone destinés aux CMC par approche performantielle

Gilles ESCADEILLAS¹, Nathalie KOUTA¹, Jean OSTROVSKY²

¹ LMDC, UPS/INSA, Université de Toulouse

² Ménard France, Orsay

RESUME Dans un contexte environnemental de plus en plus exigeant, le développement de bétons plus respectueux de l'environnement, appelés aussi bétons bas-carbone, et bien évidemment toujours adaptés aux conditions d'exposition des ouvrages, est un enjeu majeur pour les entreprises du BTP. C'est dans ce contexte que la société Menard a réalisé avec le LMDC une étude visant à qualifier de nouveaux bétons pour la réalisation d'une de leur spécificité à savoir les colonnes à module contrôlé (CMC). Ces nouveaux bétons ont été développés en se basant sur la méthodologie d'approche performantielle, telle que développée dans le projet national PerfDub et précisée dans le fascicule de documentation FD P 18-480 (2022) et la NF EN 206+A2/CN. L'objectif de cet article est de montrer comment l'approche performantielle permet de qualifier ces bétons bas-carbone destinés à la réalisation de colonnes à module contrôlé, réalisés en centrale, mais aussi les limites actuelles de cette approche performantielle.

Mots-clefs Béton - Développement durable - Approche performantielle - FD P 18-480 - Colonnes à module contrôlé

I. INTRODUCTION

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde car il est à la fois disponible mondialement, facile d'utilisation et, quand il est bien formulé et utilisé, durable. Cependant, son impact environnemental et plus particulièrement son empreinte carbone sont fortement affectés par l'utilisation de ciments Portland à fortes teneurs en clinker. Pour diminuer cet impact, il convient de développer rapidement des bétons plus respectueux de l'environnement utilisant le moins possible de clinker. Ce développement doit se faire en maintenant à minima les propriétés d'usage aux états frais et durcis et en particulier en termes de durabilité en fonction des classes d'exposition des ouvrages ou parties d'ouvrages.

Pour qualifier ces nouveaux bétons, il était possible d'appliquer normativement depuis le début des années 2000 une approche dite « performantielle » (concept de performance équivalente ou méthode de conception performantielle présentés dans la norme NF EN 206-1 2004 (durée de vie 50 ans) ou le fascicule 65 du CCTG (durée de vie 100 ans)). Cette approche avait pour objectif de passer d'une logique prescriptive « d'obligation de moyens » (type et dosage minimum en ciment et additions, rapport eau/liant maximum, résistance à la compression à 28 jours...) à une logique performantielle « d'obligation de résultats » utilisant des indicateurs de durabilité généraux ou spécifiques aux classes d'exposition visées [1]. Cependant, cette approche performantielle ne faisait pas l'objet de règles normatives détaillées que ce soit au niveau français ou au niveau européen ce qui limitait son utilisation. Ainsi, seuls quelques bétons de grands ouvrages (par

exemple le pont sur le Tage au Portugal, le pont Rion-Antirion en Grèce, le viaduc de la Nouvelle Route du Littoral sur l'Île de la Réunion) ont été développés en utilisant cette approche.

Il était donc indispensable de lever les freins au développement de l'approche performantielle en proposant, à l'échelle nationale dans un premier temps, une méthodologie d'application s'appuyant sur des essais de qualification et des seuils d'acceptabilité pertinents et fiables. C'est ce qui a été fait dans le cadre du Projet National PerfDuB (Approche Performantielle de la Durabilité des ouvrages en Béton), regroupant de 2015 à 2023 une cinquantaine de partenaires universitaires et industriels. A l'issue de ce projet, et en s'appuyant sur l'expérience GranduBé [2], plusieurs essais de caractérisation ont été finalisés, dont la plupart ont été ensuite normalisés, et les valeurs seuils ont été proposées pour les propriétés de durabilité en adoptant une approche systématiquement sécuritaire permettant d'apporter une garantie de durabilité au moins équivalente à celle obtenue par l'approche prescriptive usuelle [3]. Ces valeurs seuils ont servi de base à l'élaboration du fascicule de documentation FD P 18-480 (octobre 2022) [4], norme française relative à l'approche performantielle dans le domaine de la NF EN 206+A2/CN [5].

Profitant de ce nouveau contexte réglementaire, la société Ménard, qui est à l'origine de nombreuses techniques de renforcement de sols, a souhaité développer de nouveaux bétons en s'appuyant sur cette approche performantielle, en particulier pour son application de Colonnes à Module Contrôlé (CMC). Cette technique, qui s'applique à tous types de sols et est adaptée à tous types de structures, consiste à insérer dans les sols un réseau d'inclusions rigides, généralement non armées, afin d'améliorer la portance et/ou réduire les tassements verticaux du sol, ce qui présente une alternative idéale aux pieux/dalles structurales en permettant de fonder l'ouvrage sur un système fondation conventionnelle/dalle sur sol (<https://www.menardfrance.fr/soil-expert-portfolio/colonnes-a-module-controle-cmc/>). Pour réaliser cette étude, la société Ménard s'est rapprochée du LMDC, laboratoire universitaire qui a participé au Projet National PerfDuB. Cet article présente une petite partie des résultats obtenus au cours de l'étude dans l'objectif de montrer les avantages et les limites actuelles de l'approche performantielle.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Matériaux

Le principe d'étude retenu était basé sur l'utilisation de bétons industriels, fabriqués en centrale à béton. Les formulations de base sont des formulations livrées par les centrales pour les classes d'exposition données. Les formulations « performantielles » sont obtenues à partir des formulations de base en remplaçant une partie du ciment par des additions normalisées. Des ajustements liés aux spécificités des CMC peuvent être effectués (bétons fluides, généralement avec un D_{\max} limité).

Cette approche, non traditionnelle, permet de valider, en amont des essais, la faisabilité industrielle de la formulation très spécifique utilisée pour les applications CMC [6]. De manière à rendre compte de la diversité des matériaux (ciments, additions, granulats, ...), des approches de formulation et des outils de fabrication, plusieurs formulations ont été testées sur plusieurs centrales, dans différentes zones françaises.

Seuls les résultats relatifs à deux séries de formulations seront présentés ici. Une formulation est relative à un béton soumis à une agression par des sulfates (classe d'exposition XA2 « sulfates ») alors que l'autre béton est soumis à une agression par du nitrate d'ammonium, assimilée en première approche à une attaque acide (classe d'exposition XA2 « ammonium »).

a. Liants

Les liants et additions utilisés dans les différentes formulations sont présentés dans le Tableau 1.

TABLEAU 1 : Type de liant, dosage en liant et eau efficace (kg/m³) des différentes formulations étudiées

Appellation	C1 XA2 "Sulfates"	C1p XA2 "Sulfates"	C2 XA2 "Ammonium"	C2p XA2 "Ammonium"
Type de liant - Addition	CEM I 52,5 N SR3	CEM I 52,5 N - S - LL	CEM I 52.5 N SR3	CEM I 52.5 N SR3 - S
Liant total	380	400	368	320
Clinker	380	110	368	114
Laitier	0	200	0	206
Filler calcaire	0	90	0	0
Eau efficace	171	170	167	185

Ce tableau met en évidence la diminution importante de la partie clinker dans les formulations « performantielles ». Les dosages en liant total sont conformes aux exigences de la norme NF EN 206+A2/CN pour les formulations C1, C1p et C2 en classe d'exposition XA2 (> 350 kg/m³) et non conforme pour la formulation C2p. Par contre, les liants sont conformes aux exigences de la norme FD P 18-011 [7] pour les classes d'exposition visées et toutes les formulations sont conformes au FD P 18-480 (liant total > 300 kg/m³).

b. Phase granulaire

Les principales caractéristiques des granulats utilisés dans les différentes formulations sont présentées dans le Tableau 2.

TABLEAU 2 : Minéralogie, forme, G/S et D_{max} des granulats utilisés dans les différentes formulations

Appellation	C1 XA2 "Sulfates"	C1p XA2 "Sulfates"	C2 XA2 "Ammonium"	C2p XA2 "Ammonium"
Minéralogie Sable	Siliceux	Siliceux	Calcaire	Calcaire
Minéralogie Gravillons	Calcaire	Calcaire	Calcaire	Calcaire
Forme	Roulé lavé + concassé	Roulé lavé + concassé	Concassé	Concassé
G/S	0,99	0,95	1,29	0,65
D _{max} (mm)	20	20	16	16

A noter la différence significative de rapport G/S entre les formulations C2 et C2p qui ne permettra pas d'appliquer l'approche performantielle comparative pour les classes XA (on doit en effet comparer des bétons de même squelette granulaire).

c. Autres caractéristiques

Les autres caractéristiques des formulations des bétons étudiés sont présentées dans le Tableau 3.

La fraction volumique de pâte F_{vp} , utilisée pour le calcul de la vitesse de carbonatation, est calculée en prenant en compte le rapport entre tous les volumes de matériaux inférieurs à 63 μm , l'eau efficace et les adjuvants sur le volume total. Le facteur de vieillissement α , ou ageing factor, qui permet de prendre en compte l'évolution des propriétés du béton au cours du temps et notamment le D_{rcm} , est calculé selon le FD P 18-480 avec la formule suivante :

- $\alpha = 0,3 + \min(0,2 S ; 0,15) + \min(1,1 V ; 0,30) + \min(1,1 D ; 0,10) + \min(1,1 MK ; 0,10)$;
- Où S est la fraction massique de laitier moulu, V est la fraction massique de cendres volantes, D est la fraction massique de fumée de silice et MK est la fraction massique de métakaolin de type A, les fractions massiques étant rapportées à la masse cumulée du ciment, du laitier moulu, des cendres volantes, de la fumée de silice et du métakaolin.

L'empreinte carbone est calculée à partir des données de la profession (intègre la fabrication et le transport du béton).

TABLEAU 3 : Autres caractéristiques des formulations des bétons étudiés
(F_{vp} : fraction volumique de pâte, α : facteur de vieillissement)

Appellation	C1 XA2 "Sulfates"	C1p XA2 "Sulfates"	C2 XA2 "Ammonium"	C2p XA2 "Ammonium"
Eau efficace / Liant total	0,45	0,43	0,45	0,58
Entraîneur d'air	non	non	oui	oui
F_{vp}	0,302	0,319	0,330	0,353
α	0,30	0,43	0,30	0,43
Empreinte carbone (kg CO ₂ eq / m ³)	326	145	316	143

On peut souligner l'augmentation du facteur α des formulations « performantielles » liée à l'utilisation de laitier ainsi que la baisse importante de l'empreinte carbone de ces formulations (en moyenne 40 % de l'empreinte initiale avec laitier pris à 100 kg_{eqCO2}/t). Les rapports Eau efficace / Liant total sont conformes aux exigences de la norme NF EN 206+A2/CN pour les formulations C1, C1p et C2 en classe d'exposition XA2 (< 0,5) et non conforme pour la formulation C2p.

d. Fabrication et conservation des éprouvettes

Les bétons de CMC étudiés ont été fabriqués en centrale à béton sous la responsabilité de l'entreprise Ménard. 24 éprouvettes Φ 11 cm H 22 cm (ou 11x22) ont été confectionnées par type de béton. Après démoulage (entre 1 et 3 jours), les éprouvettes ont été conservées sur centrale dans de l'eau à 20 °C puis envoyées au LMDC où elles ont été de nouveau mises dans de l'eau à 20 °C jusqu'à échéance d'essai.

B. Méthodes

a. Essais mécaniques

Des essais en compression simple avec détermination du module d'élasticité ont été faits à 28 et 91 jours après rectification des éprouvettes (4 éprouvettes testées par échéance).

b. Porosité accessible à l'eau

Les essais de porosité accessible à l'eau ont été effectués à 91 jours sur 3 corps d'épreuve de 50

mm d'épaisseur prélevés pas sciage dans trois éprouvettes 11x22 différentes mais issues d'un même lot. L'essai est basé sur la norme NF P 18-459 d'août 2022.

c. Résistivité électrique

Les essais de résistivité électrique ont été effectués à 91 jours sur 3 corps d'épreuve de 50 mm prélevés pas sciage dans trois éprouvettes 11x22 différentes mais issues d'un même lot. L'essai est basé sur la norme XP P 18-481 de décembre 2022.

d. Essai accéléré de migration des ions chlorure en régime non stationnaire

Cet essai permet de déterminer le coefficient de diffusion apparent D_{rcm} des ions chlorure. Les essais ont été effectués à 91 jours sur 3 corps d'épreuve de 50 mm prélevés pas sciage dans trois éprouvettes 11x22 différentes mais issues d'un même lot (Figure 1). Il est basé sur la norme XP P 18-462 de décembre 2022.

e. Essai accéléré de résistance aux sulfates extérieurs sur béton (immersion-séchage)

Cet essai permet de caractériser le comportement de bétons placés dans un environnement chimiquement agressif renfermant des sulfates (classes d'exposition XA). L'essai réalisé est basé sur la norme SIA 262/1 Annexe D de 2013. Réalisé sur des carottes prélevées dans le béton à tester, il consiste dans un premier temps à réaliser 4 cycles successifs d'immersion dans une solution à 50 g/l de Na_2SO_4 suivi d'un séchage à 50 °C, puis, dans un deuxième temps, de conserver 56 jours supplémentaires ces carottes dans la solution sulfatique. Pendant tout l'essai, les variations dimensionnelles et massiques sont suivies. L'essai est réalisé sur 6 carottes de 28 ± 1 mm de diamètre.

f. Essai de lixiviation à l'acide nitrique à pH constant

Cet essai permet de caractériser le comportement de bétons placés dans un environnement chimiquement agressif composé d'eau pure et/ou d'acides minéraux (classes d'exposition XA). L'essai consiste à immerger des corps d'épreuve en béton dans une solution chimiquement agressive du fait de son pH, à suivre la lixiviation du calcium dans le temps et à évaluer sa dégradation en fin d'essai (Figure 2). Les essais ont été faits à 91 jours à pH 4 (classe d'exposition XA3) sur 2 corps d'épreuve de 80 mm de diamètre et 20 mm d'épaisseur prélevés pas carottage puis sciage dans deux éprouvettes 11x22 différentes mais issues d'un même lot. Il est basé sur la norme XP P 18-482 de juillet 2022.



FIGURE 1. Dispositif utilisé pour la détermination du coefficient de diffusion apparent D_{rcm}

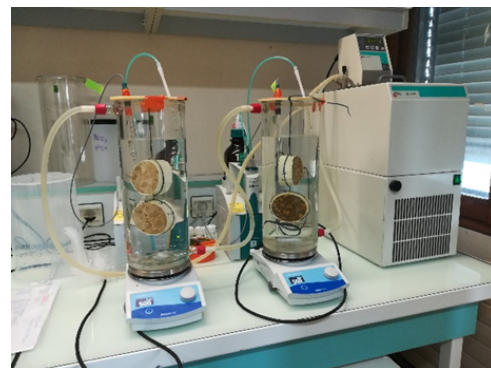


FIGURE 2. Dispositif utilisé pour l'essai de lixiviation à l'acide nitrique à pH constant

III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

A. Résultats

a. Essais mécaniques

Les valeurs moyennes des résistances en compression et des modules d'élasticité, et leurs écarts-types, déterminées sur éprouvettes 11x22 aux échéances de 28 et 91 jours, sont présentées Tableau 4.

TABLEAU 4 : Résistances en compression et modules d'élasticité à 28 et 91 jours (écarts-types)

Appellation	C1 XA2 "Sulfates"	C1p XA2 "Sulfates"	C2 XA2 "Ammonium"	C2p XA2 "Ammonium"
Rc 28j (MPa)	62,4 (0,29)	56,8 (0,59)	65,6 (0,67)	45,1 (0,42)
Ec 28j (MPa)	42316 (296)	39929 (420)	42448 (1093)	35984 (1798)
Rc 91j (MPa)	67,6 (0,59)	65,4 (0,55)	74,2 (0,72)	57,8 (0,74)
Ec 91j (MPa)	43063 (638)	43534 (674)	50463 (968)	41565 (526)

Ce tableau montre que les résistances en compression et les modules d'élasticité augmentent sensiblement entre 28 et 91 jours, plus particulièrement pour les formules « performantielles ». Les résistances sont toutes conformes aux exigences de la classe d'exposition XA2 (C35/45).

b. Indicateurs de durabilité

Les valeurs moyennes des différents indicateurs de durabilité généraux et spécifiques (et leurs écarts-types), déterminées à 91 jours, sont présentées Tableau 5.

TABLEAU 5 : Indicateurs de durabilité à 91 jours (écarts-types)

Appellation	C1 XA2 "Sulfates"	C1p XA2 "Sulfates"	C2 XA2 "Ammonium"	C2p XA2 "Ammonium"
Porosité 91j (%)	13,93 (0,20)	11,55 (0,29)	14,28 (0,12)	17,55 (0,08)
Résistivité 91j ($\Omega.m$)	39,6 (1,4)	269,9 (15,5)	51,4 (2,8)	189,4 (12,8)
D_{rcm} 91j ($10^{-12} m^2/s$)	12,60 (1,62)	1,2 (0,08)	8,19 (0,47)	1,19 (0,06)
Sulfates dls 91j (SIA, ‰)	0,260 (0,035)	0,223 (0,040)	0,191 (0,018)	0,290 (0,032)
I_{Ca} 91j (mm) – pH 4			0,73	0,58

On peut remarquer les points suivants :

- la porosité des formulations « performantielles » peut être plus faible (formulation C1) ou plus forte (formulation C2) que celle des formulations de base. Ceci découle directement du rapport Eau efficace sur liant total qui est sensiblement plus élevé pour le béton C2p (0,58) par rapport au béton C2 (0,45) et au changement du rapport G/S ;
- la résistivité des formulations « performantielles » est beaucoup plus élevée que celle des bétons de base. Cette différence est à relier à l'utilisation de laitier de haut fourneau dans les formulations « performantielles » qui augmente cette résistivité [8] ;
- le coefficient de diffusion des ions chlorure des formulations « performantielles » est beaucoup plus faible que celui des bétons de base. Cette différence est à relier aussi à

- l'utilisation de laitier de haut fourneau dans les formulations « performantielles » [9] ;
- les résultats obtenus en diffusion des ions chlorure et en résistivité pour les formulations « performantielles » avec laitier de haut fourneau sont en accord avec ceux de Van Noort et al. qui proposent d'utiliser l'essai de résistivité comme méthode alternative à la détermination du coefficient de diffusion des ions chlorure [10] ;
 - les valeurs des allongements des carottes plongées dans la solution sulfatique sont sensiblement les mêmes entre formulations « performantielles » et formulations de base et restent bien inférieures à la limite supérieure fixée par cet essai pour la classe d'exposition XA3 (1,2 ‰).
 - L'indice calcium de la formulation « performantielle » C2p est légèrement plus faible que celui du béton de base C2. A noter que l'essai a été fait à un pH de 4 et donc légèrement plus sévère que celui normalement exigé pour la classe d'exposition XA2 (pH de 4,5).

B. Interprétations

A partir des résultats obtenus, il est possible de qualifier les différents bétons testés vis-à-vis des différentes classes d'exposition selon la méthode performantielle décrite dans le FD P 18-480 pour les CMC (classes XA) ou d'autres applications que les CMC, en béton armé (classes XC, XS, XD). Ceci est en effet un des avantages de cette approche qui donne des seuils de performance.

a. Classe d'exposition XC

La qualification des différentes formulations dans les classes d'exposition XC peut se faire selon la méthode performantielle à partir des résultats d'essai de porosité et du calcul de la fraction volumique de pâte en faisant le rapport de ces deux grandeurs et en utilisant les seuils de performance donnés dans le tableau 3 du FD P 18-480. Les résultats sont présentés Tableau 6.

TABLEAU 6 : Classification en classe d'exposition XC

Appellation	C1 XA2 "Sulfates"	C1p XA2 "Sulfates"	C2 XA2 "Ammonium"	C2p XA2 "Ammonium"
Porosité 91j (%)	13,93	11,55	14,28	17,55
FV _p	0,302	0,319	0,330	0,353
Porosité / FV _p (%)	46,13	36,21	43,27	49,78
Classe exposition XC	XC4 DUP 100	XC4 DUP 100	XC4 DUP 100	XC4 DUP 100

Ce tableau montre que tous les bétons évalués conduisent à une classification XC4 avec une DUP de 100 ans. A noter toutefois que pour cette classe d'exposition XC4, il sera nécessaire de réaliser un essai de carbonatation accélérée au stade de la validation de la formulation.

b. Classes d'exposition XS et XD

La qualification des différentes formulations dans les classes d'exposition XS peut se faire à partir des résultats d'essais de migration des chlorures et du facteur de vieillissement en utilisant les seuils de performance donnés dans le tableau 4 du FD P 18-480. Il en est de même pour les classes XD en utilisant les seuils de performance donnés dans le tableau 5 du FD P 18-480. Les résultats sont présentés Tableau 7.

TABLEAU 7 : Classification en classe d'exposition XS ou XD (DUP : Durée Utilisation du Projet)

Appellation	C1 XA2 "Sulfates"	C1p XA2 "Sulfates"	C2 XA2 "Ammonium"	C2p XA2 "Ammonium"
D_{rcm} 91j (10^{-12} m ² /s)	12,60	1,2	8,19	1,19
Facteur de vieillissement α	0,30	0,43	0,30	0,43
Classe exposition XS	XS1 DUP 50	XS3m DUP 100	XS1 DUP 100	XS3m DUP 100
Classe exposition XD	XD1 DUP100	XD3tf DUP100	XD3f DUP100	XD3tf DUP100

Ce tableau montre que, pour les classes XS, les bétons « performantiels » sont classifiés XS3m avec une DUP de 100 ans alors que les bétons de base sont soit XS1 avec une DUP de 50 ans (C1), soit XS1 avec une DUP de 100 ans (C2). A noter que pour les classes d'exposition XS2 et XS3, le ciment doit être PM ou respecter les prescriptions du FD P 18-011, ce qui est le cas ici.

Ce tableau montre aussi que, pour les classes XD, les bétons « performantiels » sont classifiés XD3tf avec une DUP de 100 ans alors que le béton de base C2 est XD3f avec une DUP de 100 ans ou XD1 avec une DUP de 100 ans (C1). A noter que pour XD3, le ciment doit respecter aussi les prescriptions de la note i de la NF EN 206+A2/CN.

c. Classe d'exposition XA

La qualification des différentes formulations dans les classes d'exposition XA peut se faire à partir des résultats d'essais de résistance aux sulfates externes ou aux attaques acides en utilisant les seuils de performance donnés respectivement dans les tableaux 7 et 8 (sulfates) et 9 et 10 (acides) du FD P 18-480. A noter que pour cette classe d'exposition, la plupart des critères à satisfaire sont basés sur la méthode comparative par rapport à des résultats obtenus sur un béton de référence de même nature et spectre granulaire. Les résultats sont présentés Tableau 8.

TABLEAU 8 : Classification en classe d'exposition XA

Appellation	C1 XA2 "Sulfates"	C1p XA2 "Sulfates"	C2 XA2 "Ammonium"	C2p XA2 "Ammonium"
Sulfates dls 91j (SIA, ‰)	0,260 (0,035)	0,223 (0,040)	0,191 (0,018)	0,290 (0,032)
Classe exposition XA Sulfates	XA3	XA3	XA3	XA3
I_{ca} 91j (mm) – pH 4			0,73	0,58
Classe exposition XA Acide				XA3 (sous réserve)

A partir de ce tableau, et pour la classe d'exposition Sulfates, il est possible de valider les formulations en XA3 en utilisant la méthode absolue (valeurs inférieures à la limite fixée de 1,2 ‰ pour l'essai SIA, Tableau 7 du FD P 18-480). Cependant, si on utilise la méthode relative qui est la règle pour la classe d'exposition XA2, ceci n'est plus possible pour la formulation « performantielle » C2p qui présente une valeur dls légèrement plus élevée que celle de la formulation de base C2. Par contre, comme le liant de la formule « performantielle » n'est pas conforme aux exigences du FD P 18-011, il n'est pas possible d'utiliser les valeurs du D_{rcm} qui sont pourtant bien inférieures à celles de la formule de base (tableau 8 du FD P 18-480).

Pour l'environnement riche en ammonium, assimilé en première approche à une exposition acide, la méthode « performantielle » indiquée dans le FD P18-480 est une approche comparative. Dans le cas présenté, il s'avère que le béton de base ne peut pas être considéré comme « béton de référence » au sens du FD P 18-480 du fait d'un ciment non conforme (pas CEM II/B-S ou CEM III/A), d'un rapport E_{eff}/L trop élevé (0,45 au lieu de 0,40 pour une classe d'exposition XA2 et une DUP de 100 ans) et d'un changement de squelette granulaire. On ne peut donc pas classer ces bétons à partir de la méthode performantielle même si le résultat obtenu montre un comportement au moins équivalent à la formule de base, qui est conforme à la norme EN 206 et au FD P 18-011.

IV CONCLUSIONS

Cette étude avait pour principal objectif d'améliorer l'empreinte carbone des bétons destinés à la réalisation des Colonnes à Module Contrôlé (CMC) en s'appuyant sur la nouvelle norme FD P 18-480 qui permet de justifier la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle.

A partir des deux exemples montrés, les principaux résultats sur les formulations « performantielles » développées sont les suivants :

- elles permettent de diminuer d'environ 60 % l'empreinte carbone des formulations initiales ;
- elles gardent leurs propriétés d'usage à l'état frais au moment de la mise en œuvre des CMC ;
- elles présentent à l'état durci des résistances mécaniques conformes aux exigences mécaniques des classes d'exposition visées (XA2 Sulfates et XA2 Acide) ;
- leurs indicateurs de durabilité (résistivité, D_{rcm} , tenue aux sulfates, tenue à l'acide) sont généralement meilleurs que ceux des formulations de base, régulièrement utilisées sur chantier et conformes à l'EN 206 ;
- leurs classifications dans les différentes classes d'exposition (XC, XS, XD, XA) sont au moins aussi bonnes que celles des formulations de base et permettent d'étendre ces formulations à des bétons armés, ce qui n'est généralement pas le cas des CMC.

Cette application a montré cependant quelques limites à cette approche « performantielle », telle que définie dans la norme FD P 18-480, qui mériteraient d'être étudiées :

- pour les classes d'exposition XA Sulfates, les seuils pour les classes d'exposition XA1 et XA2 sont uniquement définis en comparatif par rapport à un béton de référence. Il pourrait aussi y être indiqué les valeurs absolues données pour la classe XA3 qui sont censées être les plus sévères ;
- pour les classes d'exposition XA Acide, les ciments indiqués pour les bétons de référence limitent la transposition rapide sur chantier. En effet, ces ciments (CEM II/B-S ou CEM III/A, voire CEM V/A ES) ne sont pas forcément disponibles en centrale. Il conviendrait d'étendre le type de ciment du béton de référence à tout ciment conforme à la norme FD P 18-011 pour le type d'exposition donné ;

- pour cette même classe d'exposition XA Acide, la comparaison à même fraction volumique de pâte et même squelette granulaire limite la possibilité d'évolution d'une formule existante en se basant sur une approche performantielle. Il conviendrait de relâcher cette contrainte par des études complémentaires ;
- enfin, l'approche performantielle ne s'applique actuellement qu'à des bétons destinés à des ouvrages armés ou précontraints avec des dosages en liants supérieurs à 260 kg/m³ pour les classes d'exposition XC et XF1 et 300 kg/m³ pour les autres classes. Or, il est possible d'obtenir une équivalence de performance avec des dosages en liant plus faibles et le cas des bétons non armés n'est pas traité. Des diminutions encore importantes de coûts économiques et environnementaux, à performance au moins équivalente, sont encore certainement possibles.

REFERENCES

[1] Rozière E., « Étude de la durabilité des bétons par une approche performantielle », thèse de doctorat en Génie civil, École Centrale de Nantes, 2007.

[2] Hornain H. & Arliguie G., GranDuBé: Grandeurs associées à la Durabilité des Bétons, Presses des Ponts et Chaussées, 2007.

[3] PerfDuB (collectif d'auteurs) – Approche performantielle de la durabilité des ouvrages en béton - De la qualification en laboratoire au suivi d'exécution, Editions Eyrolles, 2023

[4] FD P 18-480, Béton - Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle, octobre 2022.

[5] NF EN 206+A2/CN, Béton - Spécification, performance, production et conformité – Complément national à la norme NF EN 206+A2, novembre 2022.

[6] Duplan F., Composites cimentaires à module d'élasticité contrôlé: conception, caractérisation, modélisation micromécanique et applications, thèse de doctorat en Génie Civil, Université Paul Sabatier, 2014.

[7] FD P 18-011, Béton - Définition et classification des environnements chimiquement agressifs – Recommandations pour la formulation des bétons, juin 2022.

[8] Geng J., Shen J.S. et Chen W., Resistivity characters of concrete with fly ash and slag, International Conference on Structures and Building Materials, Advances in Building Materials, pp.1409-1413, 2011.

[9] Leng F.G., Feng N.Q. et Lu X.Y., An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete, Cement and Concrete Research, 30 (6), pp.989-992, 2000.

[10] Van Noort R., Hunger M. et Spiesz P., Long-term chloride migration coefficient in slag cement-based concrete and resistivity as an alternative test method, Construction and Building Materials, 115, pp.746-759, 2016.