

Possibilité d'extension de l'approche performantielle aux bétons bas-carbone non structurels

Gilles Escadeillas¹, Christophe Justino²

¹LMDC, Université de Toulouse

²Solétanche Bachy / FNTF

RESUME

Les bétons dont la fonctionnalité première n'est pas structurelle peuvent voir leurs formulations spécifiées d'après la norme béton NF EN 206/CN +A2 en X0, XF ou XA. La classe de résistance n'étant généralement pas le paramètre dimensionnant, la spécification à cette norme entraîne par exemple dans le cas des classes d'expositions XA :

- un dosage élevé en liant équivalent et une limitation des possibilités de substitution du clinker par des additions minérales, ce qui augmente l'impact négatif de ces bétons en termes de bilan carbone ;
- l'obtention de résistances mécaniques très supérieures aux besoins, ces résistances élevées pouvant parfois induire des problématiques lors de l'exécution.

Une pré-étude a été réalisée sur des bétons de pieux primaires non armés dans le but d'évaluer par approche performantielle, selon la norme FD P18-480, la résistance aux agressions chimiques de formules de bétons ne respectant pas les teneurs en liant et en eau indiquées dans la norme NF EN 206/CN, mais dont la composition du liant total est conforme aux recommandations de la norme FD P 18-011 pour des bétons en environnements agressifs. Certains bétons étudiés ne respectaient pas non plus les limites indiquées dans la norme FD P 18-480.

Les résultats de cette pré-étude montrent que, d'une manière générale, des bétons bas-carbone non conformes à la norme NF EN 206/CN +A2 ou à la norme FD P 18-480 sont a minima aussi performants que des bétons conformes à ces normes. Toutefois, pour certaines agressions chimiques, comme les attaques sulfatiques externes, il convient de poursuivre les recherches.

Mots-clefs : bétons non structurels, approche performantielle, bétons bas-carbone

I. INTRODUCTION

Le béton est le matériau le plus utilisé au monde dans le domaine de la construction. C'est un matériau durable, normalisé, facile à produire et à utiliser. Cependant, le béton est fortement décrié pour son impact négatif sur l'environnement compte tenu de l'utilisation de ciment à base de clinker dans sa formulation qui est à l'origine d'importants dégagements de CO₂ dans l'atmosphère. Pour diminuer l'impact environnemental du béton, il est important de s'orienter vers des bétons « bas-carbone » qui doivent présenter des garanties aux moins équivalentes à celles des bétons traditionnels [1].

Pour qualifier ces bétons « bas-carbone », il est possible normativement depuis fin 2022 d'utiliser l'approche performantielle (norme FD P 18-480) qui consiste à étudier la durabilité des bétons en

prenant en compte plusieurs facteurs choisis en fonction des classes d'exposition et de la durée d'utilisation du projet [2]. Là où l'approche prescriptive traditionnelle limitait les compositions des bétons, le Projet National PerfDuB a montré que l'approche performantielle, en se basant sur une obligation de résultats, ouvrait des portes à de nouvelles compositions de bétons [3].

Toutefois, le déploiement de solutions « bas-carbone » en milieu chimiquement agressif (classes d'exposition XA de la norme béton NF EN 206/CN+A2), souvent limité par l'approche prescriptive, peut l'être aussi par l'approche performantielle actuelle. Par exemple, les bétons dont la fonctionnalité première n'est pas structurelle (applications où l'EC2 n'est pas pris en compte pour leur dimensionnement) peuvent voir leurs formulations spécifiées selon cette même norme pour les classes d'exposition citées. Ainsi, alors que la classe de résistance de ces bétons n'est généralement pas le paramètre dimensionnant, les spécifications de la norme béton NF EN 206/CN+A2 entraînent, dans le cas de ces classes d'expositions XA :

- L'obtention de résistances mécaniques très supérieures aux besoins, ces résistances élevées pouvant induire des problématiques lors de l'exécution ;
- Un risque d'augmentation des pathologies dues à la mise en œuvre de béton présentant des caractéristiques rhéologiques incompatibles avec les méthodes de coulage du béton (très faibles rapports E_{eff}/L_{eq} pour assurer une durée de service de 100 ans) ;
- Un surdosage en liant équivalent ainsi qu'une limitation des possibilités de substitutions du clinker par des additions minérales, et donc un impact négatif sur le bilan carbone de ces bétons.

Dans un contexte de réduction des impacts carbone de la construction, il conviendrait de pouvoir faire évoluer les textes normatifs pour ce type de béton en classes d'expositions XA tout en restant dans le domaine de la sécurité et de la durabilité. C'est ainsi que le groupe d'expert « Solutions Bas-Carbone » (GE SBC) de la FNTP s'est donné pour objectif la possibilité de relaxer les contraintes de formulation pour ces bétons.

Un premier cas applicatif est présenté dans cette étude à savoir celui des bétons de pieux primaire entrant dans la réalisation des parois de pieux sécant. L'étude vise à évaluer la résistance aux agressions chimiques de formules de bétons ne respectant pas les teneurs en liant et en eau des tableaux de l'annexe NA.F de la norme NF EN 206/CN, mais dont la composition du liant total est conforme aux recommandations de la norme FD P 18-011 sur les environnements agressifs.

II. MATERIAUX ET PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

A. Matériaux

Les bétons bas-carbone non-structurels ont été confectionnés à partir des matériaux suivants :

- Ciment CEM II/A-S 52,5 N CE PM-CP2 NF de Port-La-Nouvelle (LafargeHolcim), composé de 83% de clinker, 15% de laitier de haut fourneau et 2% de constituant secondaire (masse volumique : 3 090 kg/m³ ; SSB : 4586 cm²/g ; Rc28 : 64,8 MPa) ;
- Laitier granulé de haut fourneau moulu CE de Fos-sur-Mer (Ecocem) (masse volumique : 2 900 kg/m³ ; surface spécifique > 4 200 cm²/g) ;

- Granulats siliceux CE des sablières Palvadeau (44), vendus secs en sacs (masse volumique : 2 630 kg/m³ ; coefficient d'absorption : 0,90) avec les coupures granulaires et proportions massiques suivantes : 0/0,315 mm : 10% ; 0,315/1 mm : 10% ; 1/4 mm : 27% ; 4/8 mm : 20% ; 8/12,5 mm : 25% ; 12,5/20 mm : 8%) ;
- Filler siliceux 0/0,063 mm (Sibelco), noté F, utilisé pour compenser le déficit en ciment (masse volumique : 2 600 kg/m³) ;
- Superplastifiant CHRYSO®Fluid Optima 100, à base de phosphonates modifiés ;
- Eau du robinet.

La proportion de laitier dans le liant a été fixée à 65% de manière à obtenir l'équivalent d'un CEM III/A SR régulièrement utilisé pour réaliser des pieux non-structurels. Les formulations ont été choisies de manière à avoir un béton conforme aux fascicules FD P18-480 et FD P18-011 (« Ref (300) »), alors que les deux autres (« 250 » et « 200 ») sont non-conformes. Les caractéristiques de base des formulations testées sont données dans le Tableau 1.

TABLEAU 1. Caractéristiques de base des formulations testées

| Appellation | Dosage liant (kg/m ³) | E _{eff} / L _{eq} | FvP | Type |
|-------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------|-----------------------------------|
| Ref (300) | 300 | 0,55 | 0,283 | Conforme FD P18-480 et FD P18-011 |
| 250 | 250 (+ filler siliceux) | 0,60 | 0,266 | Formule Chantier + annexe D - X0 |
| 200 | 200 (+ filler siliceux) | 0,60 | 0,236 | Formule Chantier + Annexe D - X0 |

(FvP = 1 – fraction volumique des particules de granulats supérieurs à 0,063 mm)

B. Protocoles expérimentaux

Fabrication et contrôle des bétons

Pour chacune des formulations, 70 litres de béton ont été confectionnés avec un malaxeur à train valseur Skako Couvrot de 125 l (homogénéisation des matériaux secs pendant 30 secondes, ajout de l'eau puis de l'adjuvant pendant 30 secondes, poursuite du malaxage pendant 2 minutes).

Les mesures d'affaissement (objectif : classe S4), de teneur en air et de masse volumique à l'état frais ont été réalisées sur le béton fraîchement vidangé.

Le béton a ensuite été mis en place dans les moules sous vibration : sur table vibrante en deux couches pour les éprouvettes cubiques (15 cm de côté) ou prismatiques (7 x 7 x 28 cm³) équipées de plots de retrait ; à l'aiguille vibrante en deux couches pour les éprouvettes cylindriques Ø 11,3 cm x H 22,6 cm. Les éprouvettes ont ensuite été conservées sans échange hydrique à 20 ± 2 °C dans le laboratoire jusqu'à démoulage (2 jours) puis dans l'eau à 20 ± 2 °C jusqu'à essai.

Résistance mécanique en compression

Les essais en compression simple ont été réalisés à 7, 28 et 91 jours sur les éprouvettes cylindriques Ø 11,3 cm x H 22,6 cm préalablement rectifiées. A l'échéance, 3 éprouvettes par composition ont été testées sur une presse de 4 000 kN conformément à la norme EN 12390-3.

Essais physico-chimiques nécessaires à l'approche performantielle

Les essais pratiqués sont issus des travaux réalisés au cours du Projet National PerfDuB [3]. Ils

ont été réalisés sur 3 échantillons issus de 3 éprouvettes différentes à l'exception de l'essai de lixiviation (2 échantillons issus de 2 éprouvettes différentes) :

- Porosité à 28 et 91 jours selon la norme NF P 18-459 d'août 2022 ;
- Résistivité à 28 et 91 jours selon la norme XP P 18-481 de décembre 2022 ;
- Coefficient de diffusion des ions chlorure à 91 jours selon la norme XP P 18-462 de décembre 2022 ;
- Lixiviation à l'acide nitrique à 91 jours à pH constant (pH de 4) selon la norme XP P 18-482 de juillet 2022 ;
- Réaction sulfatique externe par saturation et par immersion-séchage, selon les protocoles PerfDuB (en cours de normalisation).

III. RESULTATS

A. A l'état frais

Le Tableau 2 présente les principales caractéristiques des bétons à l'état frais.

TABLEAU 2. Propriétés des bétons testés à l'état frais

| Essai | Ref (300) | 250 | 200 |
|---|---------------|--------------|--------------|
| Affaissement initial (cm) | 7 | / | 1 |
| Ajout d'eau (kg/m³) | - | - | + 20 |
| Ajout d'adjuvant (kg/m³) | + 0,67 | + 3,27 | + 4,01 |
| Affaissement final (cm) | 16 | 18 | 17 |
| Air (%) | 1,2 | 1,6 | 1,3 |
| Masse volumique (kg/m³) | 2365,2 ± 10,5 | 2381,1 ± 5,9 | 2391,5 ± 7,5 |
| $E_{eff} / L_{eq} - E_{eff} / (L_{eq}+F)$ | 0,55 - 0,55 | 0,60 - 0,51 | 0,70 - 0,48 |
| FvP | 0,284 | 0,271 | 0,258 |

Ce tableau montre qu'il a été nécessaire d'ajuster les dosages en adjuvant pour les 3 bétons testés, mais aussi en eau pour le béton « 200 » le plus faiblement dosé en liant équivalent, afin d'obtenir la plasticité visée (S4). Le rapport eau efficace sur liant est donné en ne prenant pas en compte (E_{eff} / L_{eq}) ou en prenant en compte ($E_{eff} / (L_{eq}+F)$) le filler siliceux comme partie du liant (pour mémoire, le filler siliceux a été introduit en remplacement volumique du liant).

B. A l'état durci

Résistances mécaniques en compression

Les résultats des résistances mécaniques en compression pour les 3 bétons aux échéances de 7, 28 et 91 jours sont donnés Tableau 3.

A la lecture de ce tableau, on peut voir :

- Peu de différence de masses volumiques entre les différents bétons à toutes les échéances (2 350 à 2 380 kg/m³) ;

- Peu de différence de résistances mécaniques entre les différents bétons (11-14 MPa à 7 jours, 32-34 MPa à 28 jours et 50-53 MPa à 91 jours) alors que ces bétons ont été confectionnés avec des dosages en liant assez différents (de 200 à 300 kg de liant équivalent / m³) et des rapports eau efficace / liant équivalent aussi très différents (de 0,55 à 0,70) si on ne prend pas en compte le filler siliceux dans la partie liante ;
- Des résistances mécaniques assez élevées dans l'ensemble avec une augmentation importante entre 28 et 91 jours pour les 3 bétons.

TABLEAU 3. Masses volumiques et résistances mécaniques en compression des bétons testés

| Échéance (jours) | Essai | Ref (300) | 250 | 200 |
|------------------|--------------------------------------|--------------|--------------|---------------|
| 7 | Masse volumique (kg/m ³) | 2362,5 ± 4,4 | 2362,0 ± 7,7 | 2376,8 ± 6,1 |
| | Rc (MPa) | 14,4 ± 0,4 | 11,0 ± 0,2 | 11,7 ± 0,0 |
| 28 | Masse volumique (kg/m ³) | 2363,3 ± 5,6 | 2367,5 ± 4,9 | 2380,4 ± 1,0 |
| | Rc (MPa) | 32,7 ± 0,8 | 33,0 ± 0,4 | 34,3 ± 0,5 |
| 91 | Masse volumique (kg/m ³) | 2351,7 ± 4,3 | 2365,0 ± 8,8 | 2359,4 ± 26,1 |
| | Rc (MPa) | 49,9 ± 0,4 | 52,0 ± 0,7 | 53,2 ± 1,9 |

Essais physico-chimiques

Les résultats des différents essais physico-chimiques pour les 3 bétons sont donnés Tableau 4.

TABLEAU 4. Résultats des essais physico chimiques des bétons testés

| Essai | Ref (300) | 250 | 200 |
|--|---------------|---------------|---------------|
| Porosité 28 j (%) | 14,22 ± 0,31 | 13,48 ± 0,08 | 12,72 ± 0,15 |
| Porosité 91 j (%) | 14,41 ± 0,56 | 13,73 ± 0,07 | 11,96 ± 0,03 |
| Résistivité 28 j (Ω.m) | 110,7 ± 3,0 | 92,8 ± 4,2 | 101,2 ± 5,4 |
| Résistivité 91 j (Ω.m) | 235,5 ± 21,9 | 201,0 ± 14,9 | 215,6 ± 13,0 |
| Chlorure : D _{rcm} 91 j (10 ⁻¹² m ² /s) | 2,15 ± 0,33 | 2,07 ± 0,05 | 2,41 ± 0,48 |
| Lixiviation : I _{Ca} (%) | 4,27 | 3,31 | 2,87 |
| Lixiviation : Vitesse dégradation (mm.j ^{0,5}) | 0,029 | 0,033 | 0,035 |
| RSE saturation : ΔM / M (%) | -0,11 ± 0,03 | -0,04 ± 0,02 | 0,01 ± 0,02 |
| RSE saturation : ΔL / L (%) | 0,004 ± 0,001 | 0,004 ± 0,001 | 0,007 ± 0,002 |
| RSE immersion-séchage : Δmsn (kg/m ³) | - | - | - |
| RSE immersion-séchage : Δln (%) | - | - | - |

Ces résultats amènent les commentaires suivants :

- Pour la porosité : faible porosité pour les trois bétons avec une diminution avec la diminution du dosage en liant ; pas d'évolution notable entre 28 et 91 jours ;
- Pour la résistivité : résultat équivalent pour les trois bétons ; forte augmentation entre 28 et 91 jours avec un niveau final de résistivité élevé ;
- Pour le coefficient de diffusion des ions chlorure : résultat équivalent pour les trois bétons avec une valeur relativement basse ;
- Pour la lixiviation à pH 4 : résultats équivalents pour les trois bétons avec des valeurs relativement basses en indice calcium et vitesse de dégradation ;

- Pour la RSE par saturation : résultat équivalent pour les trois bétons avec une valeur finale inférieure à la limite indiquée dans la norme FD P 18-480 (0,05%) ;
- Pour la RSE par immersion-séchage : toutes les éprouvettes ont dépassé rapidement la limite de gonflement indiquée dans la norme FD P 18-480 (0,12%) avec forte dégradation puis rupture des éprouvettes.

IV. INTERPRETATIONS

A. Résistances mécaniques

Les résistances mécaniques des bétons « 250 » et « 200 » s'avèrent particulièrement élevées par rapport au dosage en liant équivalent. Ceci est confirmé par la Figure 1 qui montre le décalage entre les résistances calculées selon Bolomey, sans prise en compte du filler siliceux dans le liant, et les résistances mesurées (points en dessous de la bissectrice). Or, en intégrant le filler siliceux dans le liant équivalent (Figure 2), on obtient une très bonne corrélation entre les résistances calculées et les résistances mesurées. Ceci montre que, pour ce type de béton, les fines siliceuses doivent être prises en compte dans la notion de liant équivalent, comme cela a été fait dans le cadre du Projet National PerDuB. Ces résistances globalement élevées sont la conséquence d'un squelette granulaire optimisé et de rapports $E_{eff} / (L_{eq}+F)$ relativement bas ($\sim 0,5$).

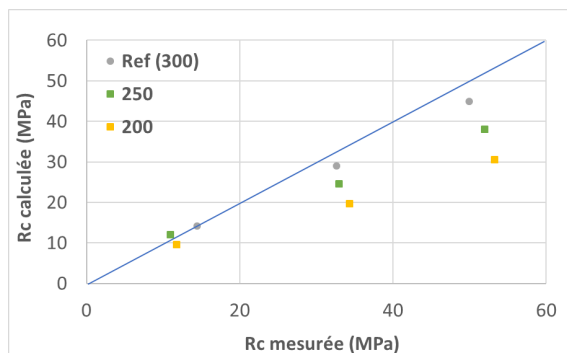


FIGURE 1. Comparaison entre résistance calculée selon Bolomey sans prise en compte du filler dans le liant et résistance mesurée

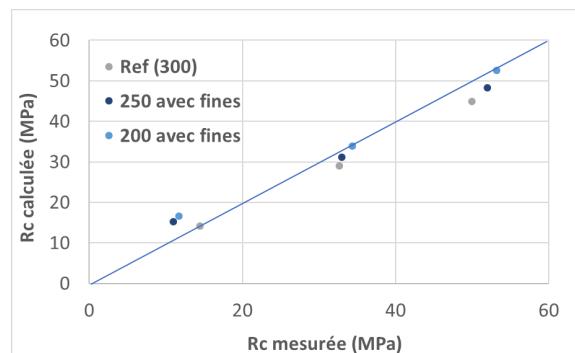


FIGURE 2. Comparaison entre résistance calculée selon Bolomey avec prise en compte du filler dans le liant et résistance mesurée

B. Qualification des bétons selon l'approche performantielle (norme FD P 18-480)

A l'issue des travaux réalisés dans le cadre du Projet National PerfDuB, l'approche performantielle a fait l'objet d'une norme spécifique qui peut être utilisée pour justifier des bétons pour des applications industrielles [2].

Selon cette norme, il convient d'une part de vérifier la conformité des formulations de bétons et, d'autre part, les conformités des bétons pour des durées d'utilisation pratiques (DUP) de 50 ou 100 ans pour les différentes classes d'exposition.

Conformité des formulations de béton

Le Tableau 5 présente les critères à respecter et les conformités qui en découlent.

TABLEAU 5. Conformité des formulations des bétons étudiés selon le FD P18-480

| Critère | Ref (300) | 250 | 200 |
|--|-----------|-----|-----|
| Liant total (kg/m ³) | 300 | 250 | 200 |
| Conformité XC et XF1 (liant ≥ 260 kg/m ³) | Oui | Non | Non |
| Conformité autres classes (liant ≥ 300 kg/m ³) | Oui | Non | Non |
| Teneur en clinker du liant (%) | 35 | 35 | 35 |
| Conformité (clinker ≥ 15% du liant) | Oui | Oui | Oui |
| Conformité liant (P18-011) | Oui | Oui | Oui |

Ce tableau montre que les bétons « 250 » et « 200 » sont non-conformes par rapport au dosage minimum en liant quelle que soit la classe d'exposition. Par contre, tous les bétons sont conformes par rapport à la teneur minimale en clinker et au FD P18-011 (conformité du liant).

Conformité des formulations de béton pour les classes d'exposition XC

Pour déterminer les conformités des bétons à 50 et 100 ans pour les classes d'exposition XC selon la norme FD P 18-480, il est possible d'utiliser le rapport entre la porosité caractéristique (fractile de 90%) $P_{eau,k,91j}$, obtenue selon la norme NF P 18-459, et la fraction volumique de pâte FvP (avec $FvP = 1 -$ fraction volumique des particules de granulats supérieurs à 0,063 mm).

Le Tableau 6 donne les valeurs de porosité caractéristique, de fraction volumique de pâte, de rapport porosité caractéristique / fraction volumique de pâte, de résistivité des bétons à 91 jours (nécessaire pour la modulation) et les conformités par rapport aux classes XC.

TABLEAU 6. Conformité des formulations des bétons étudiés aux classes XC pour des DUP de 50 et 100 ans selon le FD P18-480

| Critère | Ref (300) | 250 | 200 |
|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $P_{eau,k,91j}$ (%) | 15,14 | 14,35 | 12,50 |
| FvP | 0,284 | 0,271 | 0,258 |
| $P_{eau,k,91j} / FvP$ (%) | 53,3 | 52,9 | 48,4 |
| Résistivité 91j ($\Omega.m$) | 235,5 ± 21,9 | 201,0 ± 14,9 | 215,6 ± 13,0 |
| Conformité classes XC DUP 50 ans | XC1, XC2, XC3*, XC4* | XC1, XC2, XC3*, XC4* | XC1, XC2, XC3*, XC4* |
| Conformité classes XC DUP 100 ans | XC1, XC2, XC4* | XC1, XC2, XC4* | XC1, XC2, XC3*, XC4* |

Ce tableau montre des conformités différentes selon les types de béton et les DUP envisagés :

- Les trois bétons sont conformes pour toutes les classes XC pour une DUP de 50 ans ;
- Le béton « 200 » est le seul à être conforme pour toutes les classes XC pour une DUP de 100 ans alors les bétons « Ref (300) » et « 250 » sont uniquement conformes pour les classes XC1, XC2 et XC4.

A noter qu'il faudra quand même confirmer la conformité pour les classes XC3 et XC4 en faisant des essais accélérés de carbonatation.

Conformité des formulations de béton pour les classes d'exposition XS et XD

Pour déterminer les conformités des bétons à 50 et 100 ans pour les classes d'exposition XS et XD selon la norme FD P 18-480, il faut utiliser le coefficient caractéristique de diffusion des ions chlorure, déterminé selon la norme XP P 18-462, et le facteur de vieillissement α ($\alpha = 0,3 + \min(0,2 S ; 0,15) + \min(1,1 V ; 0,30) + \min(1,1 D ; 0,10) + \min(1,1 MK ; 0,10)$ avec S la fraction massique de laitier moulu, V la fraction massique de cendres volantes, D la fraction massique de fumée de silice et MK la fraction massique de métakaolin type A).

Le Tableau 7 donne les valeurs du coefficient caractéristique de diffusion des ions chlorure à 91 jours (fractile de 90%), du facteur de vieillissement (nécessaire pour la modulation) et des conformités par rapport aux classes XS et XD pour des DUP de 50 ou 100 ans.

TABLEAU 7. Conformité des formulations des bétons étudiés aux classes XS et XD pour des DUP de 50 et 100 ans selon le FD P18-480

| | Ref (300) | 250 | 200 |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $D_{rcm,k,91j}$ (10^{-12} m²/s) | 2,80 | 2,69 | 3,13 |
| Facteur de vieillissement α | 0,43 | 0,43 | 0,43 |
| Conformité classes XS DUP 50 ans | XS1, XS2, XS3e, XS3m | XS1, XS2, XS3e, XS3m | XS1, XS2, XS3e |
| Conformité classes XS DUP 100 ans | XS1, XS2, XS3e, XS3m | XS1, XS2, XS3e, XS3m | XS1, XS2, XS3e |
| Conformité classes XD DUP 50 ans | XD1, XD2, XD3f, XD3tf | XD1, XD2, XD3f, XD3tf | XD1, XD2, XD3f, XD3tf |
| Conformité classes XD DUP 100 ans | XD1, XD2, XD3f, XD3tf | XD1, XD2, XD3f, XD3tf | XD1, XD2, XD3f, XD3tf |

Ce tableau montre des conformités différentes selon les types de béton et les DUP envisagés :

- Les trois bétons sont conformes pour toutes les classes XD pour les DUP de 50 et de 100 ans ;
- Les bétons « Ref (300) » et « 250 » sont conformes pour toutes les classes XS alors que le béton « 200 » est uniquement conforme pour les classes XS1, XS2 et XS3e pour une DUP de 50 et de 100 ans (pas conforme pour les zones de marnage XS3m).

Conformité des formulations de béton pour les classes d'exposition XA

Pour déterminer les conformités des bétons à 50 et 100 ans pour les classes d'exposition XA, plusieurs critères sont à respecter :

- Pour les attaques par les acides et eaux pures (lixiviation), il n'y a pas de méthode absolue et il convient de comparer l'indice calcium du béton à justifier à celui d'un béton de référence confectionné avec un ciment CEM V/A ES dans le cadre d'une classe d'exposition XA3. Pour ce même milieu, et si le liant est conforme aux exigences du FD P 18-011, il est aussi possible de justifier le béton en comparant son coefficient de diffusion des ions chlorure à celui d'un béton de référence confectionné avec un CEM V/A ES pour la classe XA3 (méthode comparative) ;

- Pour les milieux contenant des sulfates, pour une classe d'exposition XA3, il convient d'être en dessous de seuils (méthode absolue): 0,05% pour le protocole par saturation et 0,12% pour le protocole par immersion-séchage. Pour ce même milieu, et si le liant est conforme aux exigences du FD P 18-011, il est aussi possible de justifier le béton en comparant son coefficient de diffusion des ions chlorure à celui d'un béton de référence confectionné avec un CEM I SR3 pour la classe XA3 (méthode comparative).

Dans notre cas, nous n'avons pas de béton de référence répondant aux spécifications du FD P 18-480 ce qui limite l'exploitation des résultats à partir du coefficient de diffusion des ions chlorure.

Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre les résultats des indices calcium I_{Ca} obtenus en fin d'essai de lixiviation à l'acide nitrique à pH 4 ainsi que les conformités selon FD P 18-480.

TABLEAU 8. Conformité des formulations des bétons étudiés à la classe XA3 Acide pour des DUP de 50 et 100 ans selon le FD P18-480

| XA Acide | Ref (300) | 250 | 200 |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| I_{Ca} (mm) | 0,186 | 0,208 | 0,218 |
| Conformité classe XA3 acide | Pas de conclusion | Pas de conclusion | Pas de conclusion |

En l'absence de béton de référence, il n'est pas possible de conclure sur la conformité des bétons étudiés vis-à-vis de la classe d'exposition XA3 acide. Toutefois, les valeurs obtenues sont très faibles.

Le Tableau 9 montre les résultats de gonflements RSE obtenus en fin d'essai pour les protocoles par saturation ou par immersion-séchage ainsi que les conformités selon FD P 18-480.

TABLEAU 9. Conformité des formulations des bétons étudiés à la classe XA3 Sulfates pour des DUP de 50 et 100 ans selon le FD P18-480

| XA Sulfates | Ref (300) | 250 | 200 |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|
| RSE saturation (%) | 0,0037 | 0,0036 | 0,0067 |
| Conformité classe XA3 sulfates | Oui | Oui | Oui |
| RSE immersion-séchage (%) | > 0,12 | > 0,12 | > 0,12 |
| Conformité classe XA3 sulfates | Non | Non | Non |

Ce tableau montre une différence majeure entre les essais selon le protocole utilisé, avec une conformité de tous les bétons pour le protocole par saturation (à 8,9 g/L de sulfate de sodium) et une non-conformité pour tous les bétons avec le protocole par immersion-séchage (à 50 g/L de sulfate de sodium). Des essais complémentaires sont en cours pour expliquer ces différences.

V. CONCLUSIONS

L'objectif de cette pré-étude était d'évaluer par approche performantielle la conformité de 3 bétons bas-carbone destinés à la réalisation de pieux sécants non-structurels avec une formulation conforme (« Ref(300) ») et deux formulations non-conformes (« 250 » et « 200 ») à l'approche performantielle (FD P 18-480) du fait d'un dosage en liant insuffisant.

Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- Moyennant des ajustements en eau et en adjuvant, et une compensation du manque de fines des bétons peu dosés en liant par un ajout de fillers siliceux, il est possible d'obtenir des bétons fluides, sans ségrégation, même avec des dosages en liants faibles ;
- Les performances mécaniques sont élevées, même avec des teneurs en liants faibles, (environ 33 MPa à 28 jours et 50 MPa à 91 jours). Ceci peut s'expliquer par le squelette granulaire optimisé, la contribution des fines siliceuses à la réactivité du liant comme l'a montré l'application de la loi de Bolomey, et la présence de laitier ;
- Les indicateurs généraux de durabilité (porosité, résistivité, coefficient de diffusion des ions chlorure) et les indicateurs spécifiques de durabilité (indice calcium pour l'attaque acide ou gonflements pour les attaques sulfatiques externes) sont équivalents entre les bétons étudiés, avec une contradiction selon le protocole RSE utilisé ;
- En s'appuyant sur la norme FD P 18-480, les conformités des différents bétons pour les différentes classes d'exposition (XC, XD, XS et XA) et les DUP de 50 et 100 ans sont pratiquement identiques, indépendamment de la non-conformité des bétons « 250 » et « 200 » du point de vue du dosage en liant.

Ainsi, cette étude a montré qu'il était possible de diminuer les dosages en liant et d'augmenter le rapport E_{eff}/L_{eq} des bétons au-delà des seuils actuels indiqués dans l'approche performantielle (FD P 18-480) ou la norme béton (NF EN 206/CN+A2) sans modifier fondamentalement leurs propriétés de durabilité. Une extension de l'approche performantielle à des bétons bas-carbone non-structurels est donc envisageable. Il conviendra de confirmer ces résultats sur d'autres cas d'études et notamment avec des bétons de résistances plus faibles. De la même manière, il faudrait étudier la possibilité de déroger sur le type de ciment à utiliser pour le béton de référence et de lever les contradictions entre protocole sur les attaques sulfatiques externes.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la FNTF pour le financement de l'étude, Aurélien Bouyat, stagiaire M2 Matériaux de l'Université de Toulouse en charge de l'étude, et les personnels du service chimie du LMDC pour la mise en place et le suivi des essais de lixiviation.

REFERENCES

- [1] P.C. Aitcin et S. Mindess, Ecostructures en béton, Comment diminuer l'empreinte carbone des structures en béton, 276 pages, Editions Eyrolles, 2013
- [2] Normalisation française, FD P 18-480, Béton – Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle, AFNOR, 2022
- [3] Collectif IREX, Approche performantielle de la durabilité des ouvrages en béton, Editions Eyrolles, 2023