



**HAL**  
open science

## Etude des bétons soumis au risque de carbonatation par le concept d'équivalence de performances

Emmanuel Rozière, Ahmed Loukili, François Cussigh, Benjamin Vincent

### ► To cite this version:

Emmanuel Rozière, Ahmed Loukili, François Cussigh, Benjamin Vincent. Etude des bétons soumis au risque de carbonatation par le concept d'équivalence de performances. XXIVes Rencontres Universitaires de Génie Civil, 2006, La grande Motte, France. hal-01008159

**HAL Id: hal-01008159**

**<https://hal.science/hal-01008159>**

Submitted on 19 Oct 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# Etude des bétons soumis au risque de carbonatation par le concept d'équivalence de performances.

**Emmanuel Rozière\*** – **Ahmed Loukili\*** – **François Cussigh\*\*** – **Benjamin Vincent\*\*\***

*\*Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique – UMR CNRS 6183, Ecole Centrale de Nantes*

*1 rue de la Noé, BP 92101, F-44321 Nantes cedex 3.*

*{Emmanuel.Rozière, Ahmed.Loukili}@ec-nantes.fr*

*\*\* GTM Construction*

*61 avenue Jules Quentin, 92003 Nanterre cedex*

*fcussigh@gtm-construction.com*

*\*\*\*Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, INSA Génie Civil, Complexe Scientifique de Rangueil, 31077 Toulouse cedex 4.*

---

*RÉSUMÉ. La nouvelle norme NF EN 206-1 introduit, alternativement aux valeurs limites de composition du béton, le concept de performance équivalente, qui permet de qualifier de nouvelles compositions de béton par comparaison avec un béton de référence conforme à l'approche prescriptive. L'étude porte sur les classes XC (carbonatation) et montre un exemple de variabilité des performances du béton de référence, à quantité de liant et d'eau constantes, ainsi que des limites des indicateurs de durabilité généraux dans l'estimation de la durabilité potentielle des bétons.*

*ABSTRACT. Performance-based specifications have been introduced in the French standards through the equivalent performance concept. New concrete mixtures may be used provided that they are proved to be as durable as reference mixtures designed through prescriptive specifications. Our study deals with carbonation. It shows how some performances of reference concrete mixtures can vary even if binder content and water/binder ratio are kept constant.*

*MOTS-CLÉS: Carbonatation, approche performantielle, propriétés de transfert.*

*KEYWORDS: Carbonation, performance-based specifications, transfer properties.*

---

## 1. Introduction

Les normes françaises sur la composition des bétons ont pendant longtemps fondé la garantie de durabilité sur une obligation de moyens. Cette approche, dite prescriptive, impose pour chaque action environnementale des valeurs limites en termes de rapport Eau/Ciment maximal, de quantité de ciment minimale, de

résistance minimale et de quantité d'additions prises en compte maximale. Or il est apparu que les performances de bétons issus de cette approche pouvaient ne pas être en adéquation avec les objectifs de durabilité visés, et à l'inverse que des compositions exclues par cette approche pouvaient se révéler intéressantes. Dans le même temps l'évaluation de la durabilité potentielle des bétons a progressé et permet de fournir des indicateurs et des critères (Baroghel-Bouny et al., 2004) rendant mieux compte de la performance des bétons que leur composition.

La nouvelle norme EN 206-1 sur les « spécification, performances, production et conformité » du béton est entrée en vigueur en janvier 2005. Elle intègre ces progrès à travers l'approche performantielle de formulation des bétons, qu'elle propose comme alternative aux traditionnelles valeurs limites sur la composition, pour satisfaire le même objectif de durabilité de 50 ans. Pour appliquer l'approche performantielle, la norme propose une méthode comparative fondée sur le Concept de performance équivalente du béton. Selon ce principe, *il doit être prouvé que le béton a une équivalence de performance avec celle d'un béton de référence, en particulier pour ce qui concerne son comportement vis-à-vis des agressions de l'environnement et sa durabilité, conformément aux exigences pour la classe d'exposition concernée*. Pour appliquer ce principe, il convient donc de justifier d'une part de *méthodes basées sur des essais approuvés et vérifiés représentatifs des conditions réelles, et contenant des critères de performance approuvés* (Annexe J de la norme) pour les essais performantiels, et d'autre part de choix pertinents pour les bétons de référence.

Les résultats présentés ici s'inscrivent dans une étude plus globale dont le but est donc de fournir, pour chaque classe d'exposition, une méthodologie d'application du concept de performance équivalente. Ils concernent plus particulièrement les classes d'exposition XC, autrement dit les bétons soumis au risque de carbonatation. Dans le cadre de la démarche comparative proposée, il convient de faire le choix d'un béton de référence pour chaque composition de béton à qualifier. Afin de guider le choix des bétons de référence, l'étude présentée ici vise à montrer la variabilité des performances de bétons conformes aux spécifications d'une même classe d'exposition, en faisant varier plusieurs paramètres de composition et le mode de cure.

## **2. Programme expérimental**

Huit compositions de bétons ont été conçues pour obtenir des niveaux de risque différents, mais tout en respectant les spécifications de la norme NF EN 206-1 pour les classes XC. Les bétons obtenus ont été soumis, d'une part, à l'essai performantiel choisi pour la démonstration de l'équivalence de performances – l'essai de carbonatation accéléré, mis en œuvre selon le mode opératoire AFPC-AFREM (AFPC-AFREM, 1997) au LMDC. D'autre part, afin d'étudier l'influence de la porosité et des propriétés de transfert sur les performances de bétons exposés à la

carbonatation, des mesures de porosité accessible à l'eau, de coefficient de diffusion des ions chlorures (au LMDC) et de perméabilité au gaz (à l'Ecole Centrale de Nantes) ont été effectuées sur les matériaux sains.

### **2.1 Compositions et conservations des bétons**

Le tableau NA.F.1 de la norme NF EN 206-1 définit pour les classes XC (risque de corrosion induite par carbonatation) deux niveaux de spécifications. Le premier concerne les classes XC1 et XC2, le deuxième les classes XC3, XC4, XD1, XF1. Deux séries de respectivement cinq et trois compositions de bétons (tableau 1), conformes à ces deux séries de spécifications, ont été conçues dans le but d'étudier la variabilité des performances pour des bétons conformes à la même classe d'exposition et donc de guider le choix du béton de référence. Les valeurs limites de teneurs minimales en Liant équivalent et de rapports Eau efficace/Liant équivalent ont été respectées et choisies comme constantes, en conservant la marge imposée sur la quantité d'eau (- 0,02 sur le rapport  $E_{\text{eff}}/L$ . éq.). Les paramètres étudiés sont la nature des granulats, la compacité du squelette granulaire, le type de cure, et pour une des compositions l'échéance de démoulage. Afin d'analyser l'influence des granulats, deux mélanges granulaires ont été utilisés. Le premier comprend des granulats calcaires du Boulonnais, choisis pour limiter le phénomène d'auréole de transition. Ces granulats sont peu poreux (coefficient d'absorption  $Ab = 0,7 \%$ ), et la courbe granulaire a été optimisée selon la méthode de Faury. Le deuxième mélange a été constitué à partir de graviers siliceux et crayeux (Graves de mer,  $Ab = 2 \%$ ), qui ont une mauvaise adhérence avec la matrice cimentaire, et de sable marin présentant un défaut d'éléments fins de taille inférieure à 0,315 mm – compensé en partie par l'ajout de sablon correcteur dans la composition B8. En combinant les paramètres de formulation et de cure, 17 bétons ont ainsi été obtenus, et les séries d'échantillons correspondantes ont été fabriquées en 17 gâchées.

Pour chacune de ces compositions, deux types de cure ont été appliqués. Dans la désignation des bétons, « 24h Eau » désigne les séries d'éprouvettes démoulées 24 heures après le malaxage et conservées dans l'eau, « 50 % » désigne les éprouvettes démoulées lorsque la résistance du béton mesurée sur trois échantillons issus de la même gâchée atteint 50 % de la résistance spécifiée (20 MPa pour XC1/XC2 et 25 MPa pour XC3/XC4), puis conservées à 20°C et 50 % d'humidité relative. De plus, pour le béton B4, un lot d'éprouvettes a été démoulé à 18 h (50 % de la résistance spécifiée) et un lot d'éprouvettes de la même gâchée a été démoulé à 48 h.

Classes d'exposition (kg/m <sup>3</sup> )	XC1, XC2					XC3, XC4 XF1, XD1		
	B1	B2	B3	B7	B8	B4	B5	B6
G. Boulonnais 12/20	541	561				541	561	
G. Graves de mer 10/20			553	553	553			553
G. Boulonnais 4/12	416	432				416	432	
G. Graves de mer 4/12			446	425	452			446
S. Boulonnais 0/4	992	915	819	880	712	980	900	805
Sable marin 0/4								
Sablon correcteur 0/1	-	-	-	-	-	-	-	144
C CEM I 52,5 N	260	207	207	260	260	280	223	223
CV Cordemais (k = 0,6)	-	89	89	-	-	-	95	95
Eau efficace	163, 8	163, 8	163, 8	163, 8	163, 8	162, 4	162, 4	162, 4
Sp(Glénium27)	3,82	3,65	0,97	0,50	0,60	3,67	2,98	1,69
<b>E<sub>eff</sub>/Liant équivalent</b>	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,58	0,58	0,58
<b>Liant équiv. (C+k.CV)</b>	260	260	260	260	260	280	280	280
<b>A/(A+C)</b>	0	0,30	0,30	0	0	0	0,30	0,30
<b>Teneur en éléments fins (&lt; 125 µm)</b>	447	468	317	283	289	465	488	339
<b>Volume de pâte (L) (1)</b>	318	328	271	256	258	322	340	284

(1) Défini comme la somme des volumes des éléments fins et de l'eau efficace.

**Tableau 1.** Compositions des bétons.

## 2.2 Procédures expérimentales

L'essai de carbonatation accéléré a été réalisé sur quatre éprouvettes 7x7x28 cm<sup>3</sup>. Après la conservation initiale de 28 jours, ces éprouvettes ont été conservées

pendant 2 jours en étuve à 40°C, avant d'être placées dans l'enceinte de carbonatation, à 20°C et 65 % d'humidité relative, dans un mélange gazeux composé de 50 % d'air et 50 % de CO<sub>2</sub>.

La porosité accessible à l'eau a été mesurée selon le mode opératoire AFPC-AFREM [AFP97], sur trois échantillons issus d'éprouvettes cylindriques 11x22 cm, après 28 jours de conservation.

Les éprouvettes 11x22 cm destinées à l'essai de perméabilité au gaz ont été sciées après 60 jours de conservation initiale de manière obtenir des disques de 50 mm d'épaisseur, rectifiés et protégés sur leur pourtour d'une bande d'aluminium adhésif. Ces disques ont été séchés en étuve à 80°C jusqu'à stabilisation de leur masse, puis pendant 24 heures, avant l'essai, dans un dessiccateur. Pour chacun des trois échantillons de chaque béton, l'essai de perméabilité à l'azote a consisté en la mesure de la perméabilité apparente pour 5 pressions d'entrée différentes, comprises entre 2,0 et 4,0 bars, par la mesure du débit d'entrée du perméamètre. La relation [1] utilisée pour le calcul de la perméabilité apparente  $K_a$  est la suivante :

$$K_a = \frac{Q_1 2\mu L P_{atm}}{S(P_1^2 - P_{atm}^2)} \quad [1]$$

$Q_1$  est le débit à l'entrée,  $\mu$  la viscosité dynamique de l'azote,  $L$  l'épaisseur de l'échantillon,  $P_{atm}$  la pression atmosphérique lors de l'essai,  $S$  la section du disque et  $P_1$  la pression d'injection. La perméabilité intrinsèque est ensuite calculée selon l'approche de Klinkenberg par la relation [2].

$$K_a = K_v \left(1 + \frac{\beta}{P_m}\right) \quad [2]$$

Le calcul de coefficient de diffusion a été effectué à partir des résultats de l'essai de migration LMDC Test, sur des disques de béton de 5 cm d'épaisseur soumis à l'essai après 28 jours de conservation initiale et saturation.

### 3 Résultats

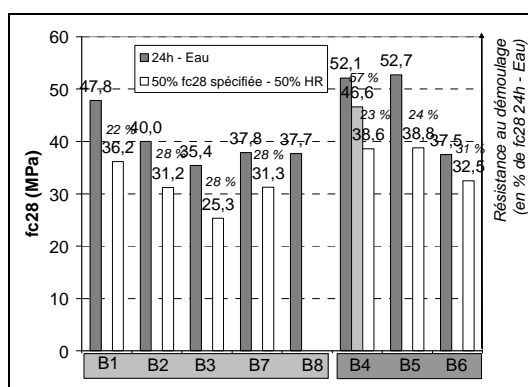
#### 3.1 Résistances

Les résultats présentés dans le graphe de la figure 1 sont les moyennes des résultats de trois essais de compression sur des éprouvettes cylindriques 11x22 cm rectifiées. L'écart type (non représenté) varie entre 0,1 et 2 MPa.

Les classes de résistances minimales pour les classes XC1-XC2 et XC3-XC4 sont respectivement C20/25 et C25/30. Malgré le choix de valeurs seuils pour les teneurs en liant équivalent et le rapport  $E_{eff}/Liant$  eq., les valeurs obtenues sont largement supérieures aux valeurs spécifiées. Ce sont cependant les résistances spécifiées qui ont servi de référence pour les échéances de démoulage. Les

résistances au démoulage sont comprises entre 23 et 31 % et donc nettement inférieures à 50 % de la résistance réelle.

Ces résultats montrent l'influence assez nette des paramètres de formulation – nature des granulats, compacité du squelette granulaire, mode de cure – sur la résistance en compression. Ainsi les compositions de béton avec granulats calcaires du Boulonnais induisent des résistances plus élevées que les compositions avec Graves de mer et sable marin. Ces différences peuvent provenir de différences au niveau de l'auréole de transition (de meilleure qualité pour les granulats calcaires), d'écart importants dans la teneur en fines (cf. tableau 1) et la compacité du squelette granulaire, et éventuellement aussi de différences de teneur en eau réelles, dues aux différences de porosité des granulats. En effet la quantité d'eau efficace est calculée pour une absorption d'eau par les granulats égale à la mesure d'absorption d'eau à 24 h (0,7 pour les granulats du Boulonnais et 2 pour les Graves de mer). Les conditions de fabrication peuvent ne pas permettre une telle absorption d'eau, d'où une quantité d'eau restante plus importante dans la matrice cimentaire.



**Figure 2.** Résistances en compression à 28 jours.

### 3.2 Indicateurs de durabilité généraux

Les résultats suivants concernent les bétons B4, B5, B6, conformes aux spécifications des classes d'exposition XC3, XC4, XD1, XF1. Dans la pratique, ces bétons sont destinés par exemple aux murs extérieurs et façades de bâtiments.

Les résultats de la figure 2 sont les moyennes de trois mesures, et les flèches représentées sur le graphe correspondent à l'écart type. Les bétons avec cendres, B5 et B6, semblent plus sensibles au mode de cure. Il apparaît également possible d'identifier l'influence des granulats, à travers la différence de porosité entre B6 24 h Eau (15,1 %) et B4 24h Eau et B5 24h Eau (14,2 %).

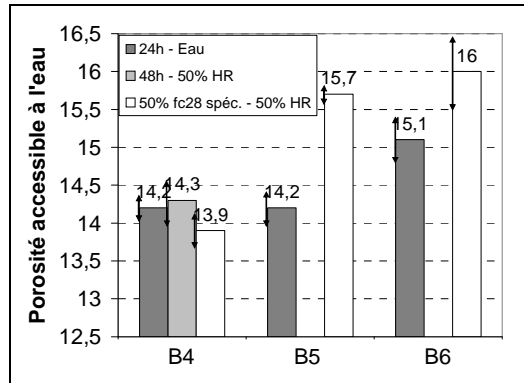


Figure 2. Résultats des mesures de porosité accessible à l'eau.

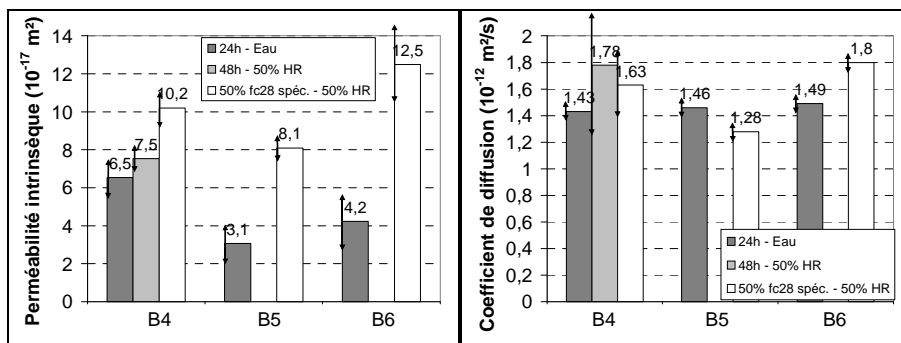


Figure 3. Résultats des mesures de perméabilité au gaz. Coefficients de diffusion des ions chlorures issus de l'essai de migration.

Les bétons soumis au même type de cure ont des perméabilités intrinsèques du même ordre, même si le béton B5 semble être le moins perméable – la limite des valeurs mesurables sur le dispositif utilisé a été atteinte sur le béton B5 24h Eau. L'échéance de la mesure (60 jours) et l'effet pouzzolanique des cendres pourraient expliquer ces résultats. Cependant peu de différences significatives sont apparues dans le comportement de ces bétons lors de l'essai.

D'après le deuxième graphe de la figure 3, les bétons conservés dans l'eau présentent un comportement très homogène, et peu de réelles différences ont été mises en évidence lors de l'essai de migration des ions chlorures. Seuls les écarts entre valeurs extrêmes peuvent être considérés comme réellement significatifs, et les sept bétons sont caractérisés par des coefficients de diffusion du même ordre.



### 3.3 Essai de carbonatation accéléré

Les mesures ont été réalisées sur des sections d'éprouvettes prismatiques  $7 \times 7 \times 28$   $\text{cm}^3$ , et les flèches sur le premier graphe de la figure 4 représentent l'écart type. Des différences significatives apparaissent en fonction du mode de cure. Les résultats des essais sur bétons conservés dans l'eau semblent mettre en évidence les différences de formulation, comme le montrent la profondeur carbonatée plus élevée des bétons avec cendres B5 et B6 par rapport à B4. L'effet attendu des granulats n'apparaît pas, mais les bétons B4 et B5, formulés avec des granulats identiques, ont des comportements similaires et différents du béton B6. La tendance observée pour la cure humide s'inverse pour les bétons conservés à 50 % d'humidité relative avant l'essai, et pourrait trouver une origine dans le mode de cure. En effet le pourcentage de la résistance (réelle, en cure humide) atteint au démoulage est supérieur pour le béton B6 par rapport aux bétons B4 et B5 – 31 % au lieu de 23 et 24 % - ce qui pourrait être rapproché du taux d'hydratation du béton de peau. Le bon comportement relatif du béton B6 50 % reste toutefois difficile à interpréter et à relier aux propriétés de transfert du même matériau. Les données relatives à ce matériau ne figurent pas dans le deuxième graphe, qui met en relation les résultats de l'essai de carbonatation accéléré et les indicateurs de durabilité mesurés. D'après ce graphe, l'augmentation de la vitesse de carbonatation semble liée à l'augmentation de la perméabilité au gaz et du coefficient de diffusion des chlorures. En revanche, quatre bétons de porosités très voisines (autour de 14 %) ont des comportements très différents lors de l'essai de carbonatation accéléré.

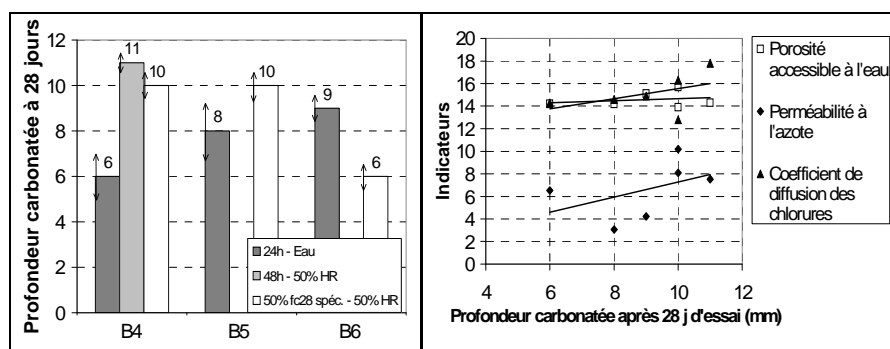


Figure 4. Résultats de l'essai de carbonatation accéléré et indicateurs de durabilité.

## 4. Conclusion

Si l'influence des paramètres de formulation et de cure sur la résistance mécanique et la porosité sont conformes à celles qui pouvaient être attendues, leur effet sur les propriétés de transfert et sur la résistance à la carbonatation est plus

difficile à interpréter. Ces premiers résultats sur des bétons conformes à XC3 et XC4 demandent donc à être complétés par les résultats de l'étude sur les classes XC1 et XC2, dans le but de tirer des conclusions plus cohérentes de l'ensemble de l'étude. Cependant ils montrent la complexité du problème de l'évaluation de la durabilité potentielle des bétons, qui dépend des propriétés de transfert mais aussi des caractéristiques du liant (la teneur en portlandite notamment) et de l'état de saturation du matériau. Ainsi, alors que certaines limites de composition pourraient ne pas être justifiées, il convient de choisir dans le cadre d'une approche performantielle des essais appropriés, représentatifs et suffisamment sensibles aux variations de performances des bétons exposés à un mécanisme de dégradation donné. Cette étude sur les classes XC décrit la méthodologie et certaines difficultés de la démonstration de l'équivalence de performances, qui pourrait cependant trouver des applications plus intéressantes pour d'autres expositions, telles que la pénétration des chlorures ou les attaques acides et sulfatiques.

## 5. Bibliographie

*Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM Durabilité des bétons, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité*, 11 et 12 décembre 1997, Toulouse, 1997, p. 121-158.

*Norme NF EN 206-1, Béton – Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité*, AFNOR, 2004.

Baroghel-Bouny V. *et al.*, *Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages*, Association Française de Génie Civil, Juillet 2004.