

Application d'une démarche performantielle pour évaluer la durabilité du tablier d'un grand ouvrage d'art, 15 ans après sa construction

Géraldine VILLAIN *

Nantes Atlantique Université,
Laboratoire central des ponts et chaussées,
Bouguenais, France

Mickaël THIERY, Gérard PLATRET,
Jean-Luc CLÉMENT

Université Paris-Est, Laboratoire central des
ponts et chaussées, Paris, France

■ RÉSUMÉ

Dans le cadre de la surveillance des ouvrages d'art en béton armé, un diagnostic de l'état d'un grand ouvrage et des causes potentielles de dégradation du béton d'enrobage a été effectué. La démarche performantielle adoptée a suivi celle proposée dans le guide AFGC (Association française de génie civil). Cependant, comme les indicateurs de durabilité de référence à l'état sain n'avaient pas été déterminés au moment de la conception, un béton similaire au béton de l'ouvrage a été reformulé, puis caractérisé en laboratoire après 90 jours de cure sous eau. Les méthodes d'essais et les résultats obtenus sur le béton d'ouvrage ainsi que sur le béton reformulé sont présentés. On montre que la cause principale de vieillissement du béton d'enrobage est la carbonatation, toutefois sans début de corrosion des armatures et sans dégradations visibles sur le parement. Le béton reformulé, quoique différent en raison de l'évolution des matériaux de carrière, de son âge au moment des essais et des conditions de conservation, possède des indicateurs de durabilité voisins de ceux du béton d'ouvrage, à l'exception d'une microstructure plus fine. Il rend possible l'utilisation du guide AFGC pour classer le béton vis-à-vis de son environnement et évaluer sa durabilité potentielle. Enfin, l'ensemble des résultats obtenus constitue la base de données nécessaire à la modélisation de la carbonatation.

Application of a performance-based approach to evaluate the durability of a large bridge deck 15 years after its construction

■ ABSTRACT

Within the scope of a survey program intended for reinforced concrete bridges, a diagnostic assessment of both the condition of a large structure and the potential causes of cover concrete degradation has been conducted. The performance-based approach adopted herein was introduced in accordance with the approach proposed in the guide published by the French Civil Engineering Association (AFGC).

However, since the reference durability indicators for the intact state had not been determined during the design phase, a concrete similar to the structural concrete was remixed and then characterized in the laboratory following 90 days of water curing. The testing methods and results obtained on both the structural concrete and remixed concrete are presented herein. It will be shown that the primary cause of cover concrete aging is carbonation, yet without the onset of reinforcement corrosion and without any visible degradation on the facing. The remixed concrete, despite its difference due to the evolution in quarry materials, its age at the time of testing and specific conservation conditions, displays durability indicator values near those of the structural concrete, except for a finer microstructure. This remixed concrete enables using the AFGC guide to classify the concrete with respect to its environment and evaluate its potential durability. Moreover, the complete set of results constitutes the database required for carbonation modeling.

* AUTEUR À CONTACTER :

Géraldine VILLAIN
geraldine.villain@lcp.fr

INTRODUCTION

Dans le cadre de la surveillance régulière et de la maintenance des ouvrages d'art au niveau national, un maître d'ouvrage a commandé au Laboratoire central des ponts et chaussées une étude très

complète sur l'évolution des propriétés mécaniques nécessaires à la stabilité structurelle d'un grand ouvrage du parc, ainsi que sur le diagnostic de l'état et de l'évolution des propriétés de durabilité du béton armé du tablier. On s'intéresse ici à cette seconde problématique qui concerne l'étude des propriétés physiques, chimiques et microstructurales, ainsi que la détermination de l'avancement des dégradations du béton d'enrobage dues à des agressions physico-chimiques. Le béton d'enrobage, ayant une fonction de protection des armatures contre la corrosion, assure la durabilité du tablier de cet ouvrage. Compte tenu de l'exposition de l'ouvrage, l'investigation a été limitée aux agressions chimiques potentielles, soit la carbonatation par le dioxyde de carbone atmosphérique (CO_2) et la pénétration des chlorures pouvant provenir des sels de déverglaçage ou des embruns marins.

Au cours des dix dernières années, différentes approches fondées sur l'évaluation des performances de durabilité du béton armé ont été élaborées [1-12]. La démarche choisie et développée ici suit celle recommandée par le guide AFGC [1]. Elle est fondée sur la mesure d'indicateurs de durabilité (caractéristiques des performances) des matériaux et leur comparaison à des critères qui dépendent des conditions d'exposition et de la durée de vie souhaitée par le maître d'ouvrage. Cependant, les critères performantiels du guide AFGC ont été établis par des laboratoires français et européens à partir de résultats d'essai sur des bétons de laboratoire âgés de 90 jours. De ce fait, la démarche est mieux adaptée aux ouvrages en construction, pour lesquels il est effectivement possible de mesurer les indicateurs de durabilité en laboratoire à 90 jours puis de suivre l'évolution des paramètres adéquats au cours de la vie de l'ouvrage. Comme la construction du tablier du pont étudié ici date de la fin des années 1980, les indicateurs de durabilité à la conception font défaut. C'est pourquoi il s'est avéré nécessaire d'adapter la démarche performantielle choisie pour pouvoir la mener à bien. Il s'agit de reformuler le béton de l'ouvrage et de déterminer les indicateurs de durabilité à 90 jours de ce béton reformulé, de les comparer aux résultats obtenus sur carottes d'ouvrage et aux classes de durabilité potentielle définies dans le guide AFGC [1]. Il faut souligner la difficulté de la reformulation et les incertitudes engendrées sur les mesures des indicateurs, dues à l'évolution des matériaux de carrière, constituants de base des bétons (granulats, fines et ciment). Toutefois, comme la plupart des ouvrages d'art du parc national ont été conçus et construits avant la mise en pratique de cette démarche performantielle, il semble particulièrement intéressant de présenter cette étude, première démarche complétant la démarche performantielle pour le diagnostic à un âge donné d'un ouvrage ancien.

Pour mener à bien le diagnostic de durabilité du béton armé de l'ouvrage, la démarche choisie, les conditions d'exposition de l'ouvrage et le programme expérimental sont d'abord décrits. Les principaux résultats obtenus sur carottes d'ouvrage, sur béton reformulé en laboratoire et sur une pâte de ciment sont ensuite présentés et analysés. On conclut enfin sur l'état de dégradation à l'âge d'environ 15 ans et les performances résiduelles de durabilité du béton du tablier.

DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE

■ Démarche performantielle du guide AFGC

La démarche performantielle proposée dans le guide AFGC [1] est fondée sur la détermination des propriétés relatives à la durabilité du béton armé (indicateurs de durabilité). Elle s'appuie sur les connaissances acquises sur les agressions physico-chimiques du béton d'enrobage liées à l'alcali-réaction, ainsi qu'à la carbonatation et la pénétration des chlorures, ces deux derniers phénomènes étant limités à la période d'incubation, c'est-à-dire la période nécessaire pour que les agents agressifs atteignent les armatures et dépassent les aciers [13]. Cette démarche est particulièrement bien adaptée à la phase de conception des ouvrages ; elle aide à élaborer une formulation de béton qui réponde aux exigences de durée de vie des ouvrages dans un environnement donné.

La démarche performantielle comporte les étapes suivantes :

- la caractérisation de l'ouvrage dans son environnement et la détermination des agressions potentielles subies. Les conditions d'exposition des ouvrages ont été réparties en différentes classes environnementales dans la norme européenne EN 206-1 [14] ;

- le choix et la mesure des indicateurs de durabilité ou caractéristiques physico-chimiques du matériau sain, complétés par quelques caractéristiques mécaniques de base comme par exemple la résistance à la compression. Ces indicateurs de durabilité, mesurés en laboratoire à l'âge de 90 jours, servent de données d'entrée aux modèles de dégradation des bétons ou modèles de durée de vie ;
- le choix et la mesure des paramètres de suivi des dégradations potentielles, appelés aussi témoins de durée de vie. Ces paramètres de suivi sont des résultats d'essais réalisés sur carottes d'ouvrage. Lorsque cela n'est pas possible, des essais accélérés de dégradation sont effectués en laboratoire et les paramètres de suivi mesurés. Il faut cependant remarquer que ces essais ne peuvent pas reproduire la réalité ; les résultats pour lesquels il n'existe pas de correspondance directe avec une durée de vie d'ouvrage constituent simplement une aide au pronostic. Les paramètres de suivi, obtenus sur carottes prélevées sur site ou sur éprouvettes ayant subi un essai accéléré, permettent de valider les modèles de dégradation lorsqu'ils sont comparés avec les données de sortie de ces modèles ;
- le choix et la mise en œuvre de modèles de durée de vie, traduisant au mieux les phénomènes physico-chimiques de dégradation du béton d'enrobage ;
- une extrapolation à plus long terme, si les modèles sont validés à court et/ou moyen terme, pour prévoir et encadrer, en utilisant les incertitudes de mesures et celles du modèle, une durée de vie estimée de l'ouvrage.

En ce qui concerne cet ouvrage, pour le choix, la mise en œuvre et la validation des modèles, le lecteur pourra notamment se reporter à [15].

■ L'ouvrage et son environnement

L'ouvrage est situé en zone tempérée de climat océanique ; il est soumis à la pluie et au vent, donc à des cycles de mouillage et de séchage, et exposé au dioxyde de carbone de l'atmosphère, ainsi qu'aux sels de déverglaçage (contenant des ions chlorure) en période hivernale, voire éventuellement à des embruns marins. Selon la norme européenne EN 206-1 [14], la classe d'exposition environnementale correspondante serait XC2-XC3 (risque de corrosion par carbonatation, dans un environnement où alternent des périodes humides ($HR > 80\%$) et moyennement humides ($65 < HR < 80\%$), identifiables aux types d'environnement 2 et 3 du guide AFGC [1]). En ce qui concerne l'exposition aux chlorures, il serait aussi possible de placer l'ouvrage en classes XS1 ou XD1, correspondant à une exposition à des sels marins (XS) ou de déverglaçage (XD), sans contact direct avec l'eau salée et avec de faibles concentrations surfaciques, identifiables au type d'environnement 5.1 du guide AFGC [1].

Le béton, de résistance moyenne à la compression (de l'ordre de 40 MPa), est constitué de granulats siliceux, de sable marin siliceux contenant de faibles quantités de calcite et d'argiles, de filler contenant essentiellement du quartz ainsi que des traces d'argile, et de ciment CEM II/A-LL 42,5 (donc comprenant un filler calcaire) dosé à 400 kg/m³.

■ Choix des indicateurs de durabilité et des témoins de suivi des dégradations

Les phénomènes de dégradation étudiés sont limités à la carbonatation et à la pénétration des chlorures. En conséquence, on a choisi comme indicateurs de durabilité :

- la porosité accessible à l'eau en surface et à cœur,
- la résistivité électrique à cœur,
- la teneur en portlandite à cœur,
- le coefficient de diffusion apparent des chlorures à cœur ;

et comme témoins de dégradation :

- la profondeur de pénétration des chlorures,
- le profil des chlorures totaux,

- la profondeur de carbonatation,
- le profil de carbonatation.

Afin de caractériser plus précisément l'état microstructural au moment du prélèvement, ces déterminations ont été complétées par :

- le profil de porosité,
- la distribution volumique des pores en surface et à cœur,
- la microfissuration de surface.

Tout d'abord, l'étude expérimentale a porté sur les carottes d'ouvrage. Une zone représentative de l'exposition *a priori* la plus sévère par rapport aux embruns a été déterminée pour le carottage ; il s'agit de la paroi ouest des caissons du tablier, soumise aux vents dominants et à la pluie. Sur les carottes sont réalisées des mesures des indicateurs de durabilité et des témoins de la progression des agents agressifs (CO_2 et chlorures) selon le programme détaillé dans le [tableau 1](#). Pour une même travée du pont, des carottes ont été prélevées sur 3 voussoirs courants différents (VC8, VC9 et VC10) et un voussoir sur pile (VSP) et emballées dans des sacs plastiques pour le transport. Elles ont été sciées sous eau afin d'avoir les dimensions requises pour les essais, puis emballées de nouveau dans des sacs étanches pour conservation. La face correspondant au parement a été protégée par du plastique et de l'aluminium adhésif, en particulier pour éviter de lessiver les chlorures.

Le programme expérimental s'est poursuivi par la reformulation en laboratoire du béton utilisé pour la construction de l'ouvrage. En effet, pour pallier le manque de données de durabilité initiales à la conception, on a cherché à reconstituer le béton de l'époque avec des matériaux commercialisés en 2005, malgré l'évolution des ciments et des granulats de carrière. Trois formules de béton reformulé ont été proposées et testées à 28 jours par des mesures de porosité accessible à l'eau ainsi que par des caractérisations mécaniques et rhéologiques, afin de distinguer la formule la plus proche possible de celle du chantier. Sur la formule de béton reformulé retenue (notée F2'), les indicateurs de durabilité indiqués dans le [tableau 1](#) ont été déterminés après 90 jours de cure sous eau conformément au guide AFGC [1]. Une cure de 90 jours permet de supposer que l'évolution du matériau est pratiquement terminée. En effet, l'hydratation du ciment modifie certains indicateurs comme la teneur en portlandite ou la microporosité. Par ailleurs, il est intéressant de donner la classe indicative de durabilité du béton étudié. Comme le guide AFGC utilise des résultats d'essais réalisés en laboratoire après une cure de 90 jours sous eau, et que les conditions thermiques, hydriques et la durée de la cure ont une influence considérable sur les caractéristiques des bétons, les valeurs de ce guide ne peuvent être comparées qu'à des résultats obtenus dans les mêmes conditions de laboratoire. Les témoins de suivi de carbonatation ont été mesurés en laboratoire au cours d'essais accélérés. Les témoins de pénétration des chlorures n'ont pas été mesurés, étant donné que les résultats sur carottes ont permis d'éliminer ce risque potentiel de dégradation (voir plus loin).

Enfin, des essais sur pâte de ciment sont indispensables pour calibrer les modèles, notamment le modèle de carbonatation développé par Thiéry [16, 17], qui est un des modèles physico-chimiques de progression des agents agressifs utilisés pour essayer de reconstituer le vieillissement de l'ouvrage au cours des 15 dernières années, puis d'extrapoler la modélisation pour estimer l'avancement des dégradations dans l'avenir. Une pâte de rapport eau sur ciment E/C égal à 0,45 a ainsi été préparée. Les éprouvettes ont été démoulées 24 heures après la coulée, puis recouvertes d'aluminium adhésif et conservées pendant 3 mois en atmosphère humide ($\text{HR} \approx 95\%$). Des essais de porosité accessible à l'eau, de carbonatation accélérée et de suivi de la carbonatation ont été réalisés ([tableau 1](#)).

■ Méthodes de mesure des indicateurs de durabilité et des paramètres de suivi des dégradations

La porosité accessible à l'eau a été déterminée en suivant le mode opératoire recommandé par l'AFPC-AFREM [18], consistant en une saturation sous vide, une pesée dans l'air, une pesée

tableau 1

Résistance à la compression, indicateurs de durabilité et témoins de durée de vie mesurés sur carottes d'ouvrage, sur éprouvettes de béton reformulé et sur pâtes de ciment.

	Paramètre	Unités	Carottes d'ouvrage, âge > 16 ans	Béton reformulé F2', âge > 90 jours	Pâte de ciment E/C = 0,45
	Résistance moyenne à la compression	MPa	valeur moyenne sur 3 carottes	valeur moyenne sur 3 éprouvettes (à 28 j)	-
Indicateurs de durabilité	Porosité à l'eau à cœur	%	valeur moyenne sur 3 carottes	valeur moyenne sur 3 éprouvettes	valeur moyenne sur 3 éprouvettes
	Porosité globale à cœur par porosimétrie au mercure	%	distribution + valeur globale en surf. et à cœur	distribution + valeur globale à cœur	-
	Porosité globale par gammadensimétrie	%	profil de porosité sur 2 carottes	profil de teneur en eau pour le suivi du séchage	-
	Microfissuration observée au microscope optique	-	photos	-	-
	Résistivité électrique	$\Omega \cdot m$	valeur moyenne sur 3 carottes	valeur moyenne sur 3 éprouvettes	-
	Teneur en portlandite à cœur	mol.L ⁻¹	valeur à cœur	valeur à cœur	valeur à cœur
	Coefficient de diffusion des Cl ⁻ par migration $D_{ns(mig)}$	m ² /s	valeur moyenne sur 3 carottes	-	-
Témoins de durée de vie	Profondeur de carbonatation	mm	moyenne sur l'ensemble des voussoirs	à 7, 14 et 28 j de carbonatation accélérée	à 7, 14 et 28 j de carbonatation accélérée
	Profil de carbonatation	mm	courbe en fonction de la profondeur (ATG-AC)	profil à 7,14 et 28 j de carbonatation accélérée (gammadensimétrie)	profil à 14 j de carbonatation accélérée (ATG-AC)
	Profondeur de pénétration des chlorures libres	mm	valeur moyenne sur 3 carottes	-	-
	Profil de chlorures totaux	mm	courbe en fonction de la profondeur	-	-

hydrostatique et une pesée après séchage à 105 °C. À partir de ces pesées, la masse volumique apparente sèche (ou saturée) du corps d'épreuve et la porosité totale ouverte, accessible à l'eau, sont calculées. Dans cette étude, la saturation a duré 48 heures au lieu des 24 heures prévues dans [18]. Les échantillons testés sont des éprouvettes ou des carottes de diamètre au moins égal à 10 cm et de hauteur comprise entre 5 et 10 cm.

L'essai de porosimétrie par intrusion de mercure [19, 20] est effectué sur des prélèvements d'environ 1 cm³. Cette technique de laboratoire permet de quantifier notamment la porosité totale et d'analyser la distribution volumique des pores dont les rayons sont compris entre 1,8 nm et 60 µm, valeurs correspondant au domaine de mesure de l'appareil.

La gammadensimétrie a été réalisée selon les modes opératoires décrits dans [19, 21, 22]. Cette technique, fondée sur l'absorption par la matière des rayons gamma émis par une source radioactive de Césium 137, permet de déterminer la densité de matériaux. Le dispositif utilisé permet d'ausculter une éprouvette cylindrique à différentes hauteurs grâce au robot qui la déplace verticalement dans le faisceau du rayonnement gamma et donc d'obtenir des profils de densité. Pendant la durée de la mesure à une hauteur donnée, l'éprouvette est posée au centre d'un plateau animé d'un mouvement de rotation autour de son axe : la mesure correspond alors à la moyenne sur une tranche de béton de hauteur égale au diamètre du faisceau, soit 6 mm pour ce dispositif.

Ainsi, les mesures à différentes échéances permettent de déterminer des profils de :

- porosité, par des auscultations à l'état saturé et à l'état sec ;
- perte relative de masse volumique entre l'état initial saturé d'eau et un temps t quelconque, traduisant l'état hydrique du matériau ;
- teneur totale en dioxyde de carbone (C_{CO_2} en mol.L^{-1}) ayant réagi lors de la carbonatation, qui correspond à la variation de masse volumique entre l'état au début de la carbonatation accélérée t_0 et le temps t de carbonatation (7, 14 ou 28 jours), car les variations de densité dues au séchage sont négligeables [21, 22].

Le coefficient d'absorption massique initial du béton étudié (F2') est égal à $7,79 \text{ mm}^2/\text{g}$. Il dépend de la formulation du béton et de la nature de ses différents constituants, donc notamment de la composition chimique du ciment et du filler.

La résistivité électrique d'une éprouvette cylindrique de béton de 11 cm de diamètre et de 5 cm de hauteur est déterminée selon le mode opératoire recommandé dans [23, 24]. L'essai consiste à soumettre l'échantillon saturé à une différence de potentiel électrique entre deux électrodes en acier inoxydable, le contact étant assuré par deux éponges humides, puis à mesurer la résistance de l'éprouvette. La résistivité électrique est indépendante de la géométrie de l'échantillon, mais dépend notamment de la porosité totale et de la connectivité du réseau poreux du matériau.

La profondeur de carbonatation est mesurée par pulvérisation de phénolphthaléine sur une surface fraîchement fendue, et de thymolphthaléine sur l'autre face, en se conformant au protocole décrit dans [18]. Le pH de virage est environ égal à 9 pour la phénolphthaléine, rose vif en milieu basique, alors que le pH de virage est proche de 10 pour la thymolphthaléine, bleu-violet en milieu basique. La profondeur de carbonatation correspond à la moyenne des 3 valeurs intermédiaires. Ces profondeurs sont mesurées en évitant les bords et les gros granulats.

L'analyse thermogravimétrique (ATG) [19, 25] est fondée sur la mesure, en fonction du temps et de la température, des variations de masse d'un échantillon de matériau soumis à une augmentation de température programmée de 20 à 1 150 °C à la vitesse de 10 °C par minute. Les plages de températures de décomposition étant caractéristiques des phases solides étudiées (par exemple la portlandite Ca(OH)_2 ou les carbonates de calcium CaCO_3), il est possible de quantifier ces phases solides dans des échantillons de pâte de ciment, de mortier ou de béton réduits en poudre (220 mg environ), par pesée des produits de décomposition (eau de la portlandite et CO_2 des carbonates). L'ATG permet notamment de quantifier la teneur initiale en portlandite.

L'analyse chimique (AC) [26] est réalisée sur une prise d'essai de 1 g de matériau broyé à 315 μm , pesée à 0,1 mg près, à laquelle sont ajoutés progressivement 100 mL d'eau distillée, puis 40 mL d'acide nitrique dilué et enfin 60 mL d'eau distillée. La solution est filtrée dans un filtre sans cendres et le résidu insoluble (RI) est quantifié. Le filtrat est complété à 1 000 mL avec de l'eau distillée, afin de doser les éléments majeurs, exprimés traditionnellement en oxydes : SiO_2 (silice soluble), Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , MnO et SO_3 , à l'aide d'un spectromètre d'émission atomique à plasma inductif par haute fréquence (ICP/AES).

Pour obtenir des profils de carbonatation, deux méthodes détaillées dans un document à paraître [27] ou plus succinctement dans [16, 28], peuvent être appliquées. La première méthode consiste à scier sous alcool l'éprouvette en tranches de 5 mm environ, parallèlement à la surface d'exposition, puis pour chaque tranche à prélever un échantillon de mortier dans le béton, à le réduire en poudre de granulométrie inférieure à 315 μm et à pratiquer une analyse thermogravimétrique sur une aliquote de la poudre et une analyse chimique sur une autre, et enfin à calculer la concentration en CO_2 fixé. Pour déterminer la quantité de ciment dans l'échantillon de poudre grâce à l'analyse chimique, Al_2O_3 est utilisé comme traceur du ciment [29]. Cette première méthode a été utilisée sur une carotte d'ouvrage et sur une éprouvette de pâte de ciment qui a subi 14 jours de carbonatation accélérée. La seconde méthode, par gammadensimétrie, permet de mesurer la teneur totale en dioxyde de carbone ayant réagi lors de la carbonatation (cf. ci-dessous). L'inconvénient de cette méthode est la nécessité de

disposer d'un état de référence non carbonaté et elle n'est, de ce fait, utilisée que pour des essais de laboratoire. Son avantage est qu'elle permet un suivi très précis à plusieurs échéances, puisqu'elle est non destructive. Dans cette étude, elle a été utilisée sur des éprouvettes de béton F2' et sur une éprouvette de pâte de ciment qui ont subi 28 jours de carbonatation accélérée, à t_0 puis aux échéances de 7, 14 et 28 jours.

La profondeur de pénétration des chlorures « libres » a été déterminée par colorimétrie au nitrate d'argent [19, 30]. Cet essai colorimétrique se pratique sur la section fendue d'un échantillon afin d'évaluer la présence et le cas échéant la profondeur de pénétration des chlorures. L'essai consiste à pulvériser sur l'échantillon une solution de nitrate d'argent ($[AgNO_3] = 0,1 \text{ mol.L}^{-1}$). En présence de chlorures « libres » (c'est-à-dire solubles dans l'eau), un béton exempt de carbonatation doit se colorer en gris clair et la profondeur de pénétration des chlorures peut être mesurée lorsque l'échantillon présente une zone imprégnée par les chlorures et une zone saine. Le seuil de détection de la colorimétrie par pulvérisation d' $AgNO_3$ est inférieur ou égal à 0,4 % de chlorures par rapport à la masse de ciment.

Le profil de concentration en chlorures totaux est obtenu selon la méthode présentée dans [19]. Celle-ci consiste à effectuer à différentes profondeurs un grignotage de l'échantillon, afin de disposer d'échantillons de poudre de béton destinés à une analyse chimique. La poudre de béton obtenue est conservée sous sac plastique scellé jusqu'à l'analyse, effectuée conformément au mode opératoire AFPC-AFREM [18]. Pour chaque échantillon, 5 g de poudre sont pesés, mis en suspension dans 50 mL d'eau distillée, puis dissous partiellement dans 100 mL d'acide nitrique dilué, et enfin filtrés. Le dosage des chlorures totaux est réalisé à l'aide d'une solution de nitrate d'argent ($0,1 \text{ mol.L}^{-1}$). Précisons également que les chlorures totaux sont définis comme l'ensemble des chlorures présents dans le béton, c'est-à-dire à la fois les chlorures sous forme ionique dans la solution interstitielle et les chlorures liés physiquement ou chimiquement à la matrice cimentaire.

Le coefficient de diffusion apparent des ions chlorure en conditions saturées a été mesuré par un essai de migration sous champ électrique en régime non stationnaire selon une procédure proche de celle proposée par Tang et Nilsson [31]. Cette méthode requiert notamment la détermination de la profondeur moyenne (x_d) de pénétration des chlorures dans l'éprouvette testée par une méthode colorimétrique (voir ci-dessus). L'essai est réalisé sur des échantillons d'une épaisseur de 50 mm, étanchés sur leur pourtour par de la résine époxyde. Préalablement à l'essai, les échantillons sont saturés sous vide avec une solution de $[NaOH] = 4 \text{ g.L}^{-1}$ (soit $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$), pendant 48 heures. Chaque éprouvette est placée entre les deux compartiments d'une cellule, l'un contenant une solution saline ($[NaCl] = 30 \text{ g.L}^{-1}$; $[NaOH] = 4 \text{ g.L}^{-1}$), l'autre une solution alcaline ($[NaOH] = 4 \text{ g.L}^{-1}$). Une différence de potentiel est appliquée entre des électrodes installées dans chaque compartiment afin d'obtenir au niveau de l'échantillon la tension souhaitée U_{ech} . Celle-ci force les anions chlorure à migrer de la cathode vers l'anode en traversant partiellement l'échantillon. Dans cette étude, une tension $U_{ech} \approx 10$ volts et une durée d'essai de 10 heures ont été choisies.

À l'issue de l'essai de migration, la profondeur moyenne de pénétration x_d des ions chlorure dans l'éprouvette testée est mesurée par colorimétrie [30, 32]. Ce paramètre est en effet nécessaire au calcul du coefficient de diffusion en régime non stationnaire. Sans prendre en considération les interactions entre les chlorures et la matrice ciment, en supposant une composition constante de la phase liquide en contact avec le matériau et les solutions très diluées, la solution numérique de l'équation modifiée de Nernst-Planck proposée par Tang [33] est utilisée pour calculer le coefficient de diffusion apparent des ions chlorure $D_{ns(mig)}$ ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$).

RÉSULTATS ET ANALYSE

■ Résultats obtenus sur carottes d'ouvrage

Dans le **tableau 2** sont présentés les résultats de porosité accessible à l'eau. On ne remarque aucune différence entre les tranches de carottes prélevées à cœur (à 10 cm de la surface) et les tranches

représentatives du parement (4 cm d'épaisseur à partir de la surface) au niveau des porosités moyennes. Ce constat est confirmé par les profils de porosité obtenus par gammadensimétrie. Par contre, on note une grande dispersion entre les voussoirs pour les tranches prélevées en surface, ce qui pourrait être l'indice d'un manque d'homogénéité du béton d'enrobage d'un voussoir à un autre. Les profils de porosité par gammadensimétrie, très dispersés, montrent que le béton présente de très fortes hétérogénéités dues aux bulles d'air et aux gros granulats. La porosité moyenne obtenue par gammadensimétrie sur trois carottes ($13,8 \pm 1,7 \%$ et $14,5 \pm 1,7 \%$) est inférieure à celle mesurée par pesée hydrostatique, l'écart type très élevé correspondant à la dispersion pour chaque éprouvette des mesures en fonction de la profondeur.

tableau 2

Porosité des carottes d'ouvrage : valeurs moyennes et écart type pour la porosité accessible à l'eau sur 3 éprouvettes, soit une par voussoir courant (VC).

	Carottes, tranches en surface			Carottes, tranches à cœur			Carotte VSP (voussoir sur pile), tranche à cœur
Durée de saturation sous vide	48 h			48 h			24 h
	VC8	VC9	VC10	VC8	VC9	VC10	VSP
Porosité globale (%)	16,9	17,1	15,4	16,5	16,7	16,0	15,6
Porosité globale moyenne (%)	$16,5 \pm 0,9$			$16,4 \pm 0,4$			15,6
Densité apparente sèche (kg/dm^3)	$2,20 \pm 0,03$			$2,21 \pm 0,02$			2,23

Les mesures de porosimétrie par intrusion de mercure ont été réalisées sur l'éprouvette 10-4, découpée en tranches de la manière suivante :

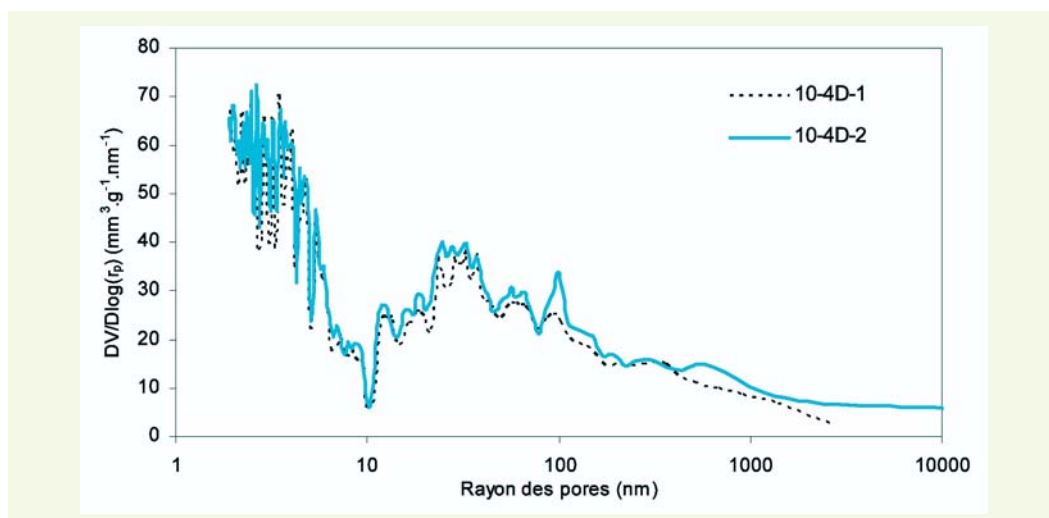
- tranche 10-4A : parement très proche de la surface (profondeur de 0 à 10 mm) ;
- tranche 10-4B : à 1 cm sous la surface (profondeur de 10 à 20 mm) ;
- tranche 10-4D : à cœur (profondeur de 100 à 110 mm) (essai doublé).

La **figure 1** montre que les distributions volumiques des pores pour les deux essais réalisés sur des échantillons prélevés à cœur sont très répétables. On observe un maximum de porosité pour les pores de rayon $r_p < 7$ nm (pores des hydrates) et un autre pic centré autour de 30 nm (pores entre les amas d'hydrates).

L'analyse des résultats de porosimétrie au mercure est délicate au voisinage de la surface d'une carotte d'ouvrage, car la distribution des pores est affectée à la fois par la carbonatation et par le défaut d'hydratation dû à la perte d'eau par séchage à l'issue de la cure lors du décoffrage précoce

figure 1

Distribution volumique des pores à cœur dans la carotte 10-4 - Étude de répétabilité.



d'un béton poreux, comme celui étudié ici. En outre, un lessivage par l'eau de pluie peut conduire à une lixiviation superficielle des hydrates. De ce fait, l'essai sur l'échantillon 10-4B a été réalisé afin d'essayer de séparer les causes de modification de la microporosité.

L'échantillon 10-4D n'a subi ni carbonatation ni séchage superficiel prématuré car il est prélevé à cœur. En outre, une profondeur de carbonatation de l'ordre de 10 mm a été mesurée ; on suppose donc que l'échantillon 10-4B n'est pas touché par ce phénomène. Il en résulte que la comparaison des courbes caractéristiques des échantillons 10-4D et 10-4B montre un défaut d'hydratation de la pâte de l'échantillon 10-4B, hydratation gênée par un séchage précoce (figure 2). C'est pourquoi, pour l'échantillon 10-4B, le pic des pores entre les amas d'hydrates est encore très important et centré autour d'un rayon élevé de 60 nm (alors qu'il est centré autour de 30 nm pour 10-4D), d'une part, et que, d'autre part, les très petits pores des hydrates ($r_p < 9$ nm) sont moins nombreux que dans l'échantillon 10-4D.

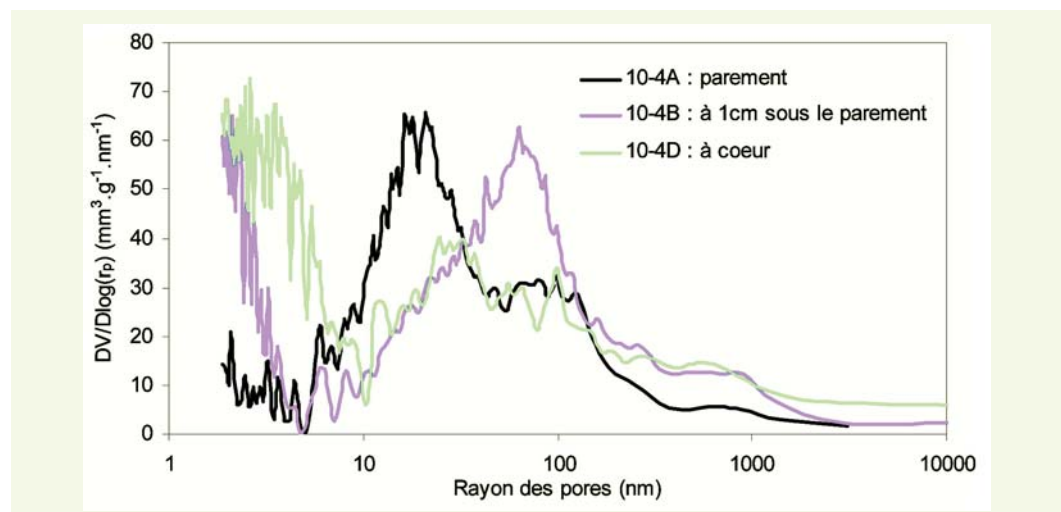
Par ailleurs, la comparaison des résultats sur les échantillons 10-4B et 10-4A montre l'effet de la carbonatation sur la distribution des pores (cf. figure 2). Les très petits pores ($r_p < 4$ nm) sont comblés par le carbonate de calcium formé et les pores entre les amas d'hydrates compris entre 30 et 120 nm sont aussi partiellement comblés.

Bien que la porosimétrie au mercure ne donne une valeur ni très précise, ni très fiable de la porosité globale, les valeurs mesurées montrent tout de même que la carbonatation conduit à une diminution de cet indicateur (14,8 % au niveau du parement contre 16,2-17,5 % à cœur).

Les mesures de résistivité électrique sur les échantillons 8-2-B, 9-2-B et 10-2-B ont été effectuées à l'issue d'une saturation en eau sous vide de 48 heures, à trois reprises sur chaque échantillon. On constate une bonne homogénéité des résultats obtenus sur les trois échantillons. La valeur moyenne des résistivités mesurées sur les trois voussoirs est de $36 \pm 1 \Omega.m$.

La résistivité de la solution interstitielle n'a pas été mesurée car il s'agit d'un essai extrêmement complexe, et la solution n'a pas été reconstituée facilement car le ciment n'est pas un ciment portland ordinaire. La perméabilité à l'eau du béton étudié ne peut pas être calculée à partir des résultats de résistivité électrique et de porosimétrie par intrusion de mercure, en utilisant le modèle de Katz-Thompson [34], développé pour les sols et les roches et étendu aux matériaux poreux cimentaires par Garboczi [35]. De ce fait, la perméabilité intrinsèque à l'eau a été évaluée à partir des seules mesures de porosimétrie par intrusion de mercure, selon une extension du modèle de Katz-Thompson développé et explicité par Thiéry *et al.* [36] pour les pâtes de ciment et bétons, en vue de la modélisation de la progression de la carbonatation [16]. Ce modèle est fondé sur la détermination du rayon critique de percolation (r_c), rayon limite déterminant un chemin continu à travers

figure 2
Comparaison des distributions volumiques des pores en fonction de la profondeur de prélèvement dans la carotte 10-4.



la porosité connectée de l'échantillon de matériau, et celle du rayon hydraulique (r_h), correspondant à l'optimum de la « conductance » hydraulique, au moyen des distributions volumiques de pores obtenus par porosimétrie au mercure. On note que les distributions poreuses doivent présenter un unique pic principal de pores pour que les méthodes de Katz-Thompson puissent être appliquées. On obtient une perméabilité intrinsèque à l'eau (k_{int}) égale à $7,8.10^{-20} \pm 0,9.10^{-20} \text{ m}^2$ pour le béton d'ouvrage à cœur (**tableau 3**). L'incertitude sur la perméabilité k_{int} est estimée à partir de l'incertitude sur les déterminations du rayon critique, du rayon hydraulique et de la porosité globale obtenue par intrusion de mercure sur plusieurs échantillons. En utilisant la même méthode, on obtient des valeurs similaires pour des bétons de résistance moyenne à la compression comprises entre 40 et 54 MPa, dont les formulations sont données dans [22].

tableau 3

Comparaison des valeurs de perméabilité intrinsèque à l'eau calculée par la méthode de Katz-Thompson, à partir d'essais de porosimétrie par intrusion de mesure réalisés sur le béton d'ouvrage, le béton F2' et 2 bétons de classes de résistance proches.

Béton		Carotte 10-4-D	F2'	M40	M50
Rayon critique r_c	(nm)	30,3 ± 1,2	17,6 ± 0,6	36,6 ± 1,6	23,1 ± 0,8
Rayon « hydraulique » r_h	(nm)	22,9 ± 0,5	13,1 ± 0,5	26,8 ± 1,5	17,7 ± 0,9
Porosité globale ϕ	(%)	16,8 ± 0,7	15,4	12,3 ± 0,7	11,7 ± 0,7
Perméabilité k_{int}	(10^{-20} m^2)	7,8 ± 0,9	4,3 ± 0,4	10,3 ± 1,5	6,1 ± 0,9

Le **tableau 4** présente une synthèse des profondeurs de carbonatation mesurées par pulvérisation de phénolphthaléine. La profondeur de carbonatation moyenne est comprise entre 8,3 et 12,7 mm et dépend du voussoir et donc des variations entre les différentes gâchées. On remarque surtout que, pour plusieurs carottes, les mesures sont très dispersées, les profondeurs minimale et maximale s'écartant considérablement de la valeur moyenne. Ceci montre que la qualité du béton n'est pas constante et que le béton d'enrobage est sans doute dégradé, voire fissuré. Ceci est illustré par la **figure 3**, où la zone carbonatée jusqu'à 18 mm de profondeur est nettement visible. Il faut aussi noter que des observations réalisées au microscope électronique à balayage (MEB) ont permis de visualiser une forte porosité et un état fissuré et même parfois des espaces vides entre pâte et granulats.

tableau 4

Profondeur de carbonatation mesurée sur des carottes d'ouvrage.

Carotte	Profondeur de carbonatation P_c (mm)		
	Mini	Maxi	Moyenne
8-8A	6	9	8,3
10-6A	8	10	9,1
8-2A	3	19	9,7
9-2A	8	16	12,7
10-2A	8	18	12,3

Les microfissures superficielles ont été également observées par la méthode du colorant rouge [37, 38]. L'éprouvette 8-2A a été sciée selon le schéma de la **figure 4a**. Cette figure montre l'état de la surface sciée avant (**4b**) et après (**4c**) application du colorant. Certaines microfissures semblent parfois situées à l'interface entre la pâte et les plus gros granulats. Des microfissures sont visibles en surface et la profondeur de carbonatation (**figure 4b**) est effectivement plus importante au niveau de ces fissures. Certaines fissures se prolongent plus au cœur du béton et pourraient donc constituer des chemins préférentiels de pénétration des agents agressifs, en particulier du dioxyde de carbone. L'évolution de ce phénomène doit donc être attentivement surveillée, d'autant plus que la carbonatation entraîne du retrait, et qu'une différence de retrait entre la surface et le cœur du matériau peut engendrer des tensions et donc des fissures supplémentaires.

Afin de déterminer le profil de carbonatation, des essais d'analyse thermique couplés à des analyses chimiques (ATG-AC) ont été réalisés sur six tranches de béton provenant de la carotte 8-8A. Les échantillons correspondent aux profondeurs suivantes :

– tranche n° 1 : de 0 à 3 mm,

figure 3

Profondeur de carbonatation déterminée par pulvérisation de phénolphthaléine : exemple de l'éprouvette 10-2A.

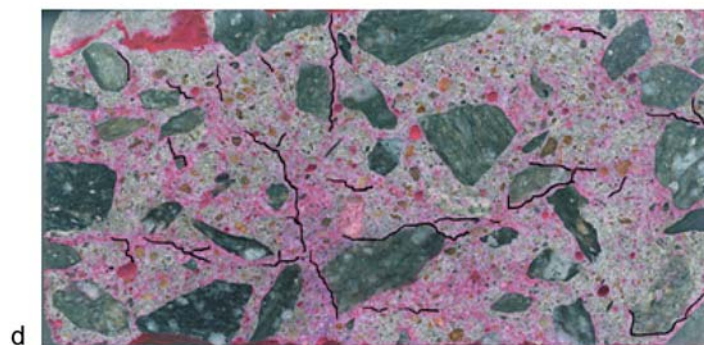
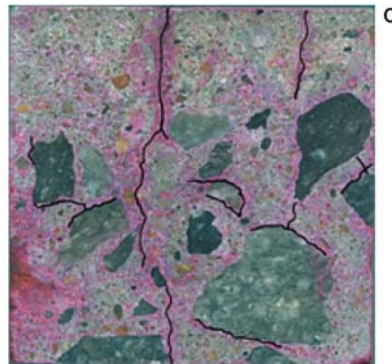
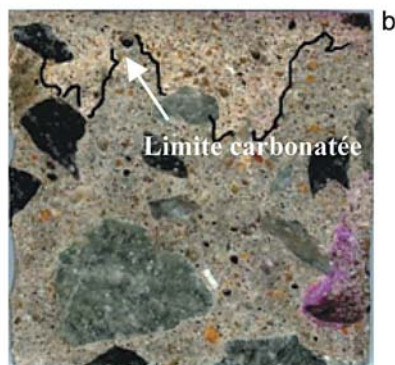
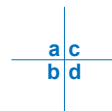
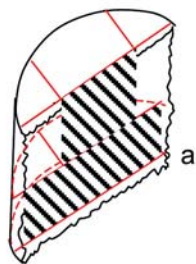


figure 4

Observation au colorant rouge des microfissures de l'éprouvette 8-2A :

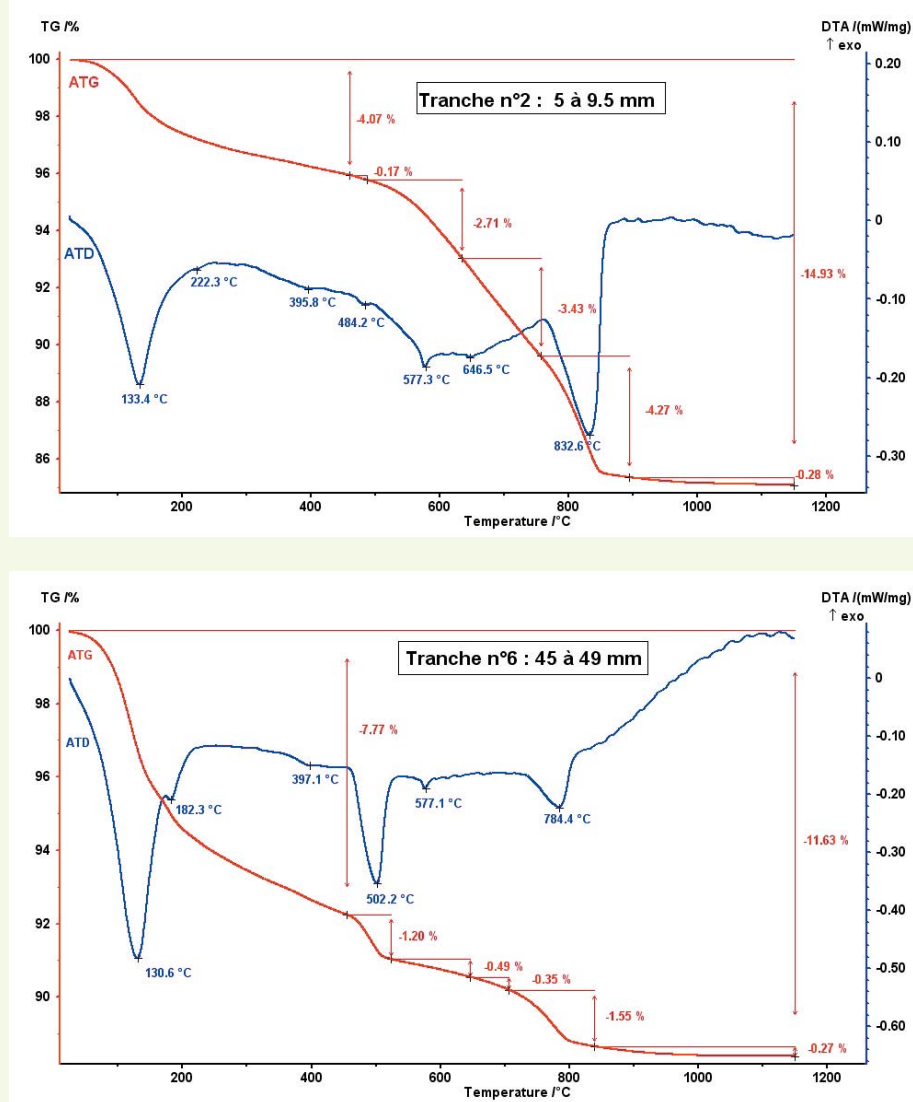
a : principe de sciage (avec face avant sciée),

b : photo après sciage (avec tracé de la limite carbonatée, zone non carbonatée en gris foncé correspondant à la thymolphthaleine décolorée à la lumière),

c et d : photos après préparation au colorant rouge (avec tracé des fissures les plus évidentes).

- Seules les deux premières tranches présentent une carbonatation poussée, comme la tranche n° 2 présentée sur la **figure 5** : en effet, le pic de portlandite est difficilement décelable (484 °C) alors que le pic correspondant à la calcite est très important (833 °C). Sur cette même figure, la tranche n° 6 est représentative du béton non carbonaté à cœur. Les granulats utilisés sont bien siliceux (pic ATD du quartz à 577 °C). Bien qu'elle ne soit pas carbonatée, on observe une perte de CO₂, due à la présence de calcite, sur la courbe ATG de la tranche n° 6 (pic à 784 °C) : cette calcite provient à la fois du sable utilisé, dans lequel des traces de calcaire ont été détectées, et du ciment (CEM II/A-LL contenant un filler calcaire) dans le béton non carbonaté. Le profil de carbonatation a donc été calculé en tenant compte des additions calcaires de la même manière que pour des bétons contenant des granulats calcaires [21, 29]. En outre, le fait que le filler utilisé contient des argiles, donc de l'alumine (Al₂O₃), a aussi été pris en compte dans le calcul de la teneur en ciment de chaque échantillon, c'est-à-dire chaque tranche de carotte : le rapport filler/ciment étant constant, la teneur en Al₂O₃ du filler est proportionnelle à la teneur en Al₂O₃ du ciment et la quantité de ciment peut être

Courbes ATG/ATD de l'éprouvette 8-8A tranches 2 et 6 (ATG : analyse thermogravimétrique ; ATD : analyse thermique différentielle).

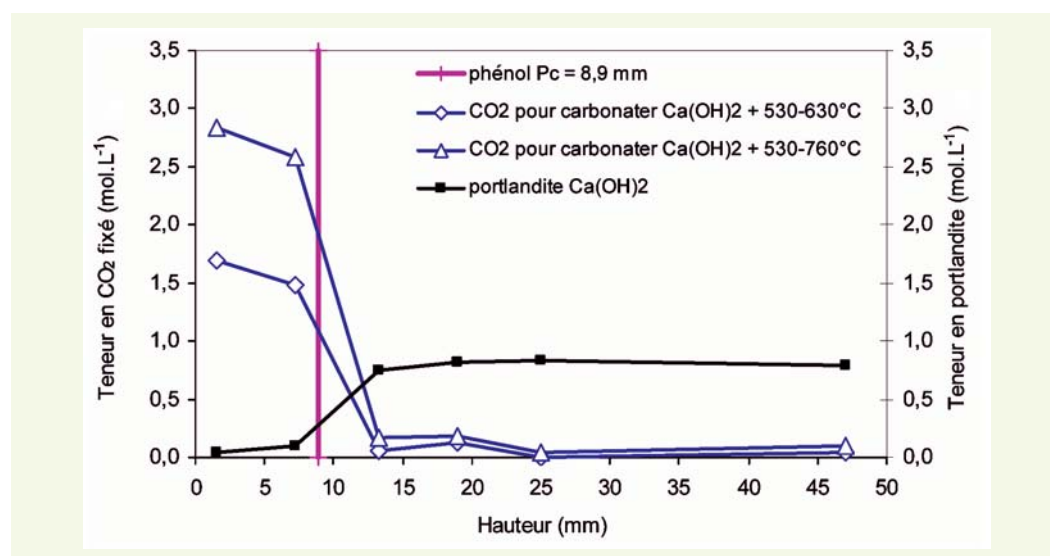


calculée à partir des teneurs en oxydes déterminées par analyse chimique. On note toutefois qu'un éventuel défaut de malaxage et de dispersion des liants augmenterait l'incertitude de la mesure, mais un tel défaut n'a pas été constaté lors de cette étude.

De plus, dans un béton carbonaté, le pic des fillers calcaires (784 °C) se superpose au pic caractéristique de la calcite de carbonatation de la portlandite (832 °C). Le CO_2 total de carbonatation est donc obtenu en additionnant le CO_2 nécessaire pour carbonater la portlandite au CO_2 de carbonatation des autres hydrates : ce CO_2 peut être mesuré sur deux plages de températures, soit entre 530 et 630 °C, soit entre 530 et 760 °C [29, 39]. On obtient ainsi un encadrement du profil de carbonatation réel. Il semble préférable de donner un encadrement de ce profil, compte tenu de la difficulté de l'analyse de cette formulation (ciment avec filler calcaire, filler contenant des argiles, sable contenant des calcaires) et de l'incertitude des mesures liée à la différence entre les matériaux de base employés lors de la construction et ceux analysés en 2005-2006.

figure 6

Profil de portlandite résiduelle et encadrement du profil de carbonatation de l'éprouvette 8-8A, mesuré par ATG-AC.



La **figure 6** montre le profil de portlandite, qui diminue fortement, voire disparaît en zone carbonatée, et deux profils de carbonatation :

- CO_2 de carbonatation de la portlandite + CO_2 mesuré dans l'intervalle 530-630 °C,
- CO_2 de carbonatation de la portlandite + CO_2 mesuré dans l'intervalle 530-760 °C, permettant d'encadrer le profil de CO_2 total de carbonatation.

On remarque que la teneur en portlandite est très faible dans la tranche 1, proche de la surface, en accord avec les résultats obtenus sur ouvrage par Parrott *et al.* [40]. La portlandite contrôle le maintien du pH de la solution interstitielle à une valeur élevée. Son profil de concentration est en bonne cohérence avec la profondeur de carbonatation mesurée à la phénolphtaléine sur cette même éprouvette juste avant le sciage en tranches :

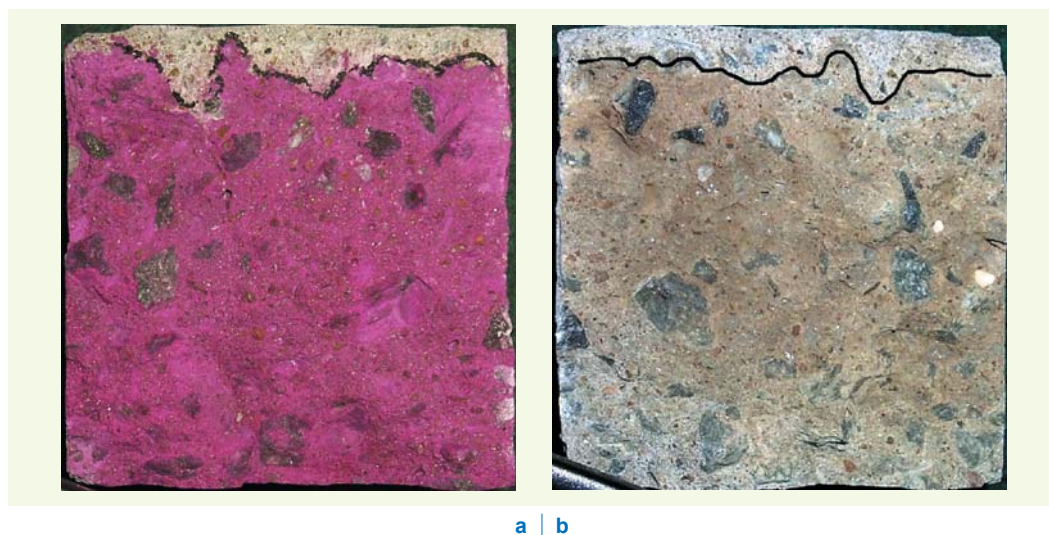
- profondeur de carbonatation mesurée par pulvérisation de phénolphtaléine : $P_c = 8,9$ mm,
- profondeur de carbonatation mesurée par pulvérisation de thymolphtaléine : $P_c = 11,2$ mm.

Enfin, l'ATG-AC donne la teneur en portlandite à cœur, égale à $0,82 \pm 0,02$ mol.L⁻¹. Cet indicateur de durabilité est une donnée d'entrée importante de la modélisation de la progression de la carbonatation dans les bétons.

En vue de mesurer la profondeur de pénétration des chlorures « libres » par colorimétrie au nitrate d'argent, les carottes 8-2A, 9-2A et 10-2A ont été fendues. Sur une des surfaces fraîchement fendues, du nitrate d'argent a été pulvérisé et, sur l'autre, de la phénolphtaléine (**figure 7**). La pulvérisation de nitrate d'argent a mis en évidence en gris clair un front colorimétrique qui a été comparé

figure 7

Comparaison des essais de colorimétrie au nitrate d'argent (gris) et à la phénolphthaléine (rose) : exemple de l'éprouvette 8-2-A.



au front de carbonatation obtenu par pulvérisation de phénolphthaléine. La symétrie des résultats obtenus par les deux méthodes montre que le front colorimétrique révélé par le nitrate d'argent correspond à de la carbonatation et non à des chlorures. Par conséquent, si des chlorures sont présents, leur profondeur de pénétration est inférieure ou égale à la profondeur de carbonatation.

Afin de compléter l'analyse précédente, des demi-échantillons ont à nouveau été fendus et les nouvelles surfaces fraîchement fendues ont été réalcalinisées par pulvérisation d'une solution de soude ($[\text{NaOH}] = 10\%$ en masse). Dans ces conditions, seuls les chlorures sont susceptibles d'être révélés lors de la pulvérisation de nitrate d'argent. Aucun front colorimétrique n'est apparu après application de cette technique et il est ainsi possible de conclure que la concentration en chlorures « libres » dans ces échantillons est inférieure au seuil de détection de cette méthode, soit moins de $0,4\%$ par rapport à la masse de ciment [1, 6]. Il est donc nécessaire d'examiner les résultats de mesure du profil de teneur en chlorures pour conclure à la présence ou non de cet agent agressif pour le béton armé.

Pour obtenir le profil de teneur en chlorures, le prélèvement d'échantillons de poudre, sur la carotte 9-9A, a été limité à une profondeur de 12 mm par incréments de 3 mm, au vu des résultats obtenus par colorimétrie. Les concentrations en chlorures totaux dans l'échantillon 9-9A sont présentées dans le **tableau 5** et y sont comparées à la concentration critique en chlorures « libres » C_{crit} , susceptible d'amorcer la corrosion des armatures [6]. C_{crit} a été calculée sur la base d'une concentration en chlorures de $0,4\%$ par rapport à la masse de ciment, avec une proportion de ciment de $16,5\%$, selon la formulation F2'.

tableau 5
Concentrations en chlorures totaux obtenues dans l'échantillon 9-9A.

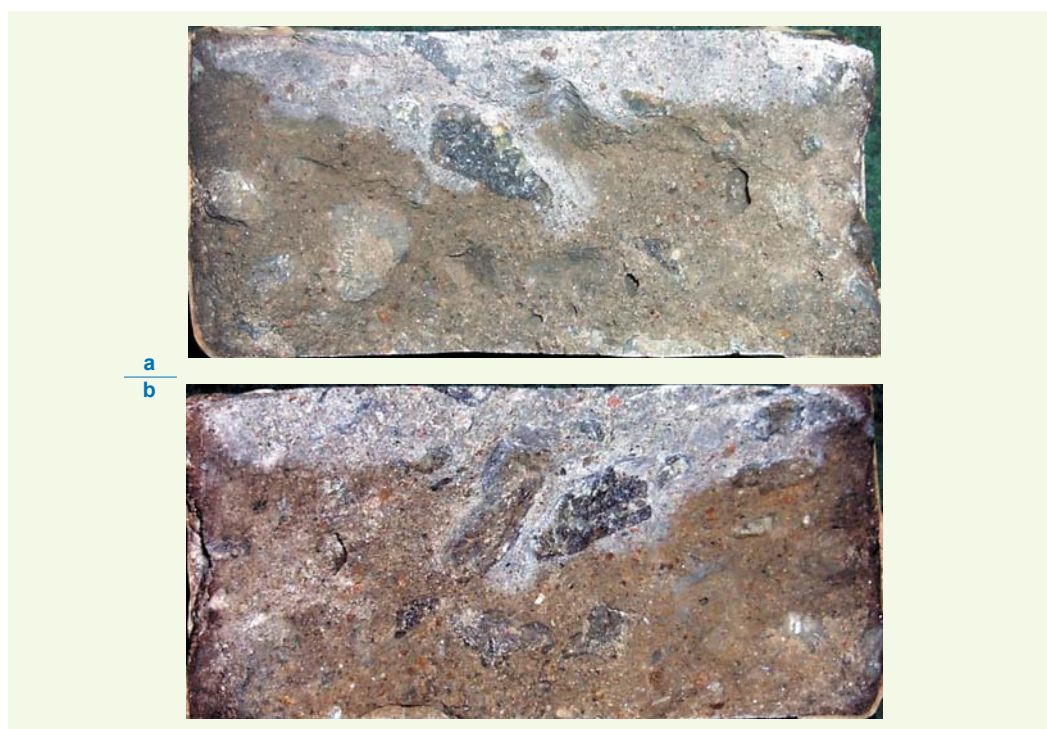
Profondeur (mm)	0 - 3 mm	3 - 6 mm	6 - 9 mm	9 - 12 mm
Cl ⁻ totaux (g/100 g de béton)	0,008	0,012	0,013	0,016
C_{crit} « libres » (g/100 g de béton)	0,066			

Ce tableau met en évidence les très faibles concentrations en chlorures en comparaison de C_{crit} , ce qui corrobore les résultats obtenus par colorimétrie au nitrate d'argent. Compte tenu des conditions environnementales auxquelles l'ouvrage étudié est soumis, il semble donc ne pas présenter de risque de corrosion des armatures liée aux ions chlorure.

Le coefficient de diffusion des chlorures par migration électrique a été déterminé sur les éprouvettes 8-8B et 9-9B, prélevées à cœur. À l'issue de l'essai de migration, sous une tension de $U_{\text{ech}} \approx 10$ volts, après fendage et pulvérisation de nitrate d'argent, une photo de chaque surface

figure 8

Résultats des essais colorimétriques après essai de migration en régime non stationnaire sur béton d'ouvrage (échantillon 8-8 B).



fraîchement fendue a été prise. La **figure 8** présente les photos de l'échantillon 8-8B et met en évidence la similitude (symétrie) des résultats obtenus sur chaque face d'un même échantillon. La présence de gros granulats semble contribuer à une pénétration des chlorures localement plus importante, au niveau de l'interface, ce qui pourrait être attribué à une « faiblesse » du matériau entre la pâte et les gros granulats, en accord avec les observations des microfissures par la méthode du colorant rouge (cf. ci-dessus). Les résultats des mesures des profondeurs moyennes de pénétration des ions chlorure x_d , les conditions exactes d'essai et les coefficients de diffusion obtenus sont présentés dans le **tableau 6**.

tableau 6

Conditions d'essai, profondeurs de pénétration des ions chlorure (x_d) et coefficients de diffusion apparents des ions chlorure obtenus par essai de migration en régime non stationnaire ($D_{ns(mig)}$).

Échantillon	8-8 B	9-9 B
U_{ech} (V)	10,13	10,25
Durée (h)	9,5	9,5
x_d (mm)	18,6	21,1
$D_{ns(mig)}$ (10^{-12} m ² .s ⁻¹)	58	66

En conclusion, les résultats des essais sur les carottes d'ouvrage montrent que l'ouvrage n'a pas été dégradé par pénétration des ions chlorure au cours des 15 dernières années. Si les conditions environnementales et d'exploitation sont maintenues, cet ouvrage ne devrait donc pas présenter de risque de dégradation par les chlorures, à condition que les profondeurs d'enrobage prévues aient été respectées. En outre, les résultats indiquent une microfissuration et une porosité assez élevée qui contribuent à la carbonatation du béton d'enrobage, plus importante au niveau des microfissures superficielles. Ce type de dégradation doit donc être surveillé et une estimation de l'évolution de la carbonatation peut s'avérer utile pour planifier cette surveillance.

■ Résultats obtenus sur le béton reformulé en laboratoire

Dans le but de reconstituer la formulation du béton d'ouvrage, la formule F2' a été finalement retenue au vu des résultats des essais rhéologiques et mécaniques, notamment ceux de résistance à la compression, et des mesures de porosité accessible à l'eau. Ces résultats ont été comparés aux résultats obtenus sur les éprouvettes de contrôle de chantier testées à l'âge de 28 jours et sur

les carottes d'ouvrage prélevées à l'âge de 16 ans environ. Les résultats de chantier montrent une très grande variabilité de la résistance du béton à 28 jours selon les gâchées, donc selon les voussoirs : $48,5 \pm 3,8$ MPa pour VC8, $39,7 \pm 2,9$ MPa pour VC9 et $44,5 \pm 2,0$ MPa pour VC10, soit une moyenne de $44,2 \pm 4,6$ MPa pour les trois voussoirs étudiés. La résistance moyenne à la compression du béton d'ouvrage obtenue sur les carottes, égale à $43,0 \pm 4,5$ MPa, indique aussi une grande dispersion. En fait, les valeurs sur ouvrage sont tellement dispersées qu'on ne peut pas discerner l'évolution de la résistance entre 28 jours et 16 ans. La résistance moyenne mesurée après 28 jours de cure sous eau de la formule F2' égale à $44,1 \pm 1,4$ MPa est globalement comparable aux résultats obtenus sur ouvrage.

La formule F2' retenue (gâchée le 07/07/05) semble toutefois présenter une porosité globale moins élevée ($15,4 \% \pm 0,1 \%$) que celle des carottes des voussoirs 8 à 10 du pont ($16,4 \% \pm 0,4 \%$; cf. [tableau 2](#)). Les résultats ont été confirmés par la gâchée du 13/09/05, dont les éprouvettes présentent une porosité globale accessible à l'eau égale à $15,0 \% \pm 0,5 \%$. Malgré la différence d'âge qui influence la porosité des matériaux, ces résultats sont satisfaisants puisque la précision absolue des mesures de cet essai est de l'ordre de 1 % d'une gâchée à une autre, soit, dans notre cas, $15,4 \% \pm 1 \%$.

Les essais fournissant les indicateurs de durabilité retenus et permettant de comparer le béton d'ouvrage avec le béton reformulé F2' après 90 jours de cure sous eau sont les suivants :

- porosité accessible à l'eau,
- porosimétrie au mercure,
- profil de porosité par gammadensimétrie,
- résistivité électrique,
- teneur en portlandite à cœur par ATG-AC.

Outre l'essai de porosité accessible à l'eau déjà présenté (porosité globale égale à $15,4 \% \pm 0,1 \%$), les résultats donnés par la suite sont obtenus sur les éprouvettes 11 x 22 cm de la formule F2' (gâchée du 07/07/05) testées après 90 jours de cure sous eau et sont rassemblés dans un tableau en conclusion.

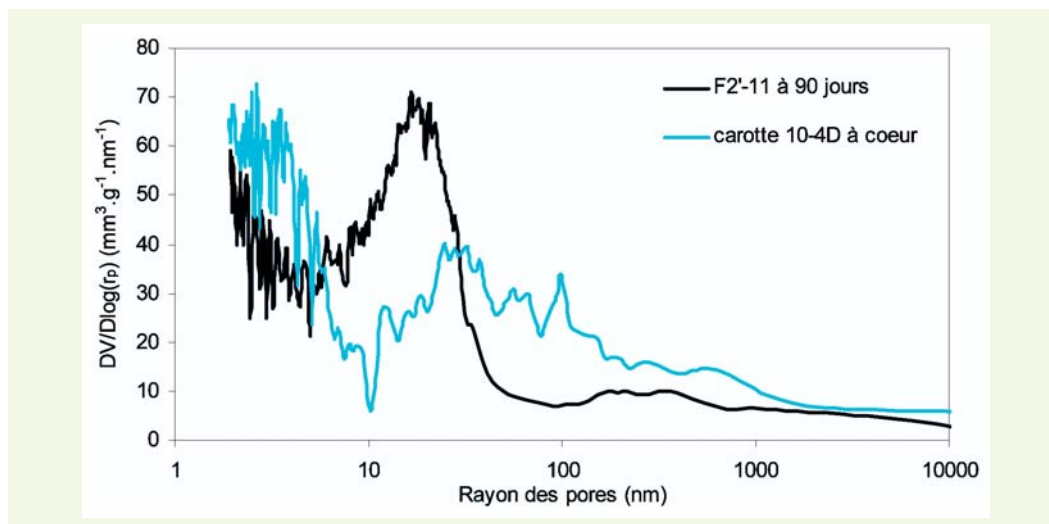
Concernant la porosimétrie par intrusion de mercure, la [figure 9](#) montre que la microstructure du béton reformulé F2' est différente de celle du béton d'ouvrage. Ainsi, dans le béton F2', les pores entre les amas d'hydrates sont plus petits (8-40 nm) et très nombreux. Ceci est dû principalement à la différence d'âge, de conditions de fabrication et de cure. Il ne faut pas oublier, en outre, que les matériaux constitutifs du béton (ciment, fillers et granulats), provenant de carrières, évoluent au cours du temps. La porosité globale obtenue est égale à $15,4 \%$. En appliquant la méthode de Katz et Thompson fondée sur les distributions volumiques de pores, une perméabilité intrinsèque à l'eau égale à $4,3 \pm 0,4 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ est calculée pour le béton F2' à cœur. Cette valeur, plus faible que celle calculée pour le béton du pont étudié ($7,8 \cdot 10^{-20} \pm 0,9 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$), traduit en fait que les pores du pic principal sont plus fins.

Le profil de porosité a été déterminé par gammadensimétrie sur une éprouvette de béton F2' de 100 mm de haut, sciée au cœur d'une éprouvette 11 x 22 cm. Comme pour le béton d'ouvrage, la dispersion est liée aux granulats et aux bulles d'air emprisonnées dans le béton lors du gâchage. La porosité moyenne obtenue par gammadensimétrie est égale à $14,7 \% \pm 0,6 \%$. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle obtenue par mesure de la porosité accessible à l'eau.

La valeur moyenne des résistivités électriques mesurées sur les 3 éprouvettes à cœur (F2' gâchée le 07/07/05) est égale à $100 \pm 4 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$. On note que ces mesures ont été refaites pour un contrôle sur des éprouvettes fabriquées le 13/09/05 et que les résultats sont confirmés : la valeur moyenne obtenue des résistivités mesurées sur 3 éprouvettes est égale à $100 \pm 6 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$. Cette valeur est nettement supérieure à la valeur obtenue sur les carottes d'ouvrage à cœur égale à $36 \pm 1 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$. Cela pourrait être dû, d'une part à la différence de microstructure des bétons, et d'autre part à l'évolution des

figure 9

Comparaison des distributions de pores du béton reformulé F2' et du béton d'ouvrage.



caractéristiques des matériaux entrant dans la formulation, comme le ciment et le filler, qui peuvent être à l'origine d'une différence de composition des solutions interstitielles.

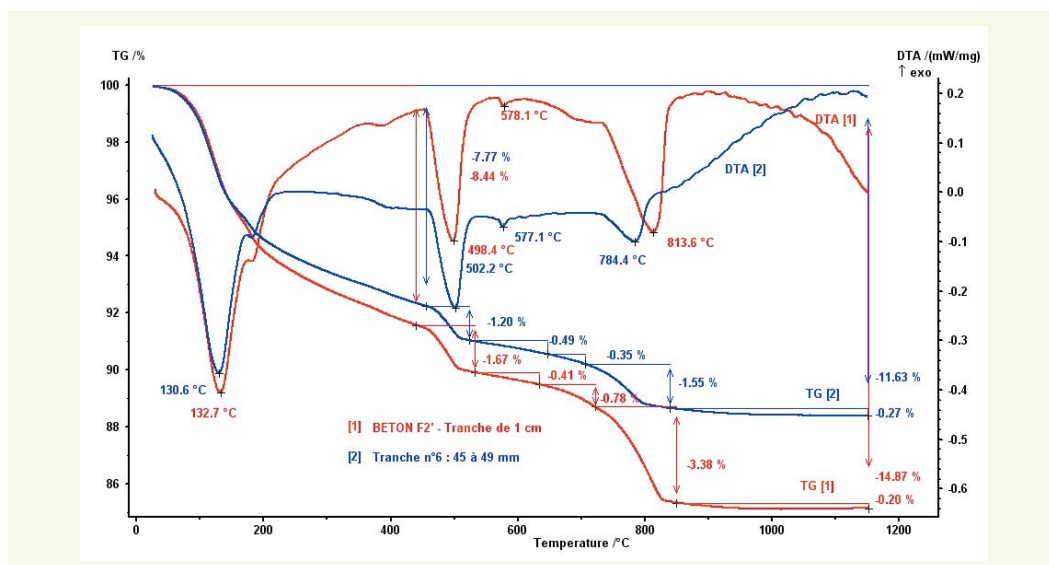
La teneur en portlandite à cœur a été mesurée sur l'échantillon 4D prélevé à cœur. Les résultats d'ATG obtenus sont présentés sur la **figure 10**. On note que cette courbe a la même allure que la courbe de la tranche n° 6 de la carotte d'ouvrage, avec un pic correspondant aux fillers calcaires (812 °C) plus marqué. L'analyse chimique a permis de compléter l'ATG et de calculer précisément la teneur en portlandite à cœur, égale à 1,04 mol.L⁻¹. Cette valeur étant plus élevée que pour la carotte d'ouvrage, le béton reformulé F2' sera donc plus résistant à la carbonatation. Ce résultat est en accord avec la valeur plus élevée de la résistivité électrique du béton F2' par rapport à celle du béton d'ouvrage.

Les essais sur les carottes d'ouvrage ayant montré qu'il était possible de s'affranchir de l'étude de la pénétration des chlorures, la carbonatation a été plus particulièrement étudiée. Les témoins de suivi de la carbonatation accélérée d'éprouvettes du béton F2' après 90 jours de cure sous eau sont les suivants :

- profil de teneur en eau pour le suivi du séchage par gammadensimétrie (suivi du prétraitement),
- profil de teneur en carbonates pour le suivi de la carbonatation par gammadensimétrie,
- profondeur de carbonatation à la phénol à 7, 14 et 28 jours.

figure 10

Comparaison des courbes ATG/DTA de l'éprouvette 4D du béton reformulé F2' et de la tranche n° 6 prélevée au cœur de la carotte 8-8A.



La carbonatation accélérée des éprouvettes de béton F2' a été réalisée conformément au mode opératoire [27, 41] complétant celui initialement recommandé par l'AFPC-AFREM [18] pour le prétraitement. Les éprouvettes, sciées et recouvertes sur leur pourtour d'aluminium adhésif, sont séchées en étuve pendant un mois à une humidité relative contrôlée $HR = 65\%$ avec un cycle de température dont le palier est $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$. La carbonatation accélérée a lieu dans une enceinte dans des conditions contrôlées ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $HR = 65\%$ et teneur en $\text{CO}_2 = 45\% \pm 5\%$) pendant un mois. Les variations relatives de masse des éprouvettes de béton pendant le séchage, une fois par semaine, puis pendant la carbonatation accélérée, aux échéances de 7, 14 et 28 jours, permettent un contrôle du bon déroulement des phases de séchage et de carbonatation, ainsi que de l'homogénéité de comportement des éprouvettes. À chaque échéance, 4 éprouvettes (2 en bas et 2 en haut) sont fendues et pulvérisées de phénolphthaleïne et de thymolphthaleïne pour mesurer la profondeur de carbonatation.

Trois éprouvettes cylindriques de 100 mm de haut et de 110 mm de diamètre (éprouvettes 5B, 8B et 9B) ont été analysées par gammadensimétrie pour obtenir :

- le profil de densité des 3 éprouvettes (figure 11),
- le profil du taux de saturation à l'issue du séchage (figure 12),
- le profil de teneur totale en CO_2 fixé pour 2 éprouvettes après 14 jours de carbonatation accélérée (figure 13),
- l'évolution du profil de teneur en CO_2 fixé pendant la carbonatation accélérée (figure 14).

La figure 12 montre que les éprouvettes ne sont pas à l'équilibre avec l'humidité relative extérieure : un gradient d'humidité persiste entre la surface et le cœur des éprouvettes. Le profil de teneur en carbonates après 14 jours de carbonatation accélérée est obtenu sur deux éprouvettes différentes (figure 13). Ceux-ci ne sont pas superposables car les éprouvettes testées sont de densités différentes (figure 11). La figure 14 montre l'avancée de la carbonatation dans l'éprouvette au cours du temps, ce qui traduit l'augmentation de densité due à la fixation de CO_2 en négligeant les transferts hydriques pendant la phase de carbonatation accélérée. À cœur, à 28 jours, la teneur en carbonates est anormalement élevée mais peut être expliquée, soit par un décollement de l'aluminium adhésif protecteur et une carbonatation superficielle sur le pourtour de l'éprouvette, visible au moment des fendages pour la mesure de la profondeur de carbonatation par pulvérisation de phénolphthaleïne, soit par le changement du moteur du banc entraînant des erreurs systématiques.

Ces courbes, ainsi que les profondeurs de carbonatation, indiquent que le comportement de ce béton vis-à-vis de la carbonatation est similaire à celui du béton M40 (aussi intitulé B35, de résistance moyenne à la compression à 28 jours de 40 MPa) étudié par les Laboratoires des ponts et chaussées

figure 11

Profil de densité de
3 éprouvettes de béton
reformulé F2'-5B, 8B et 9B
(état saturé).

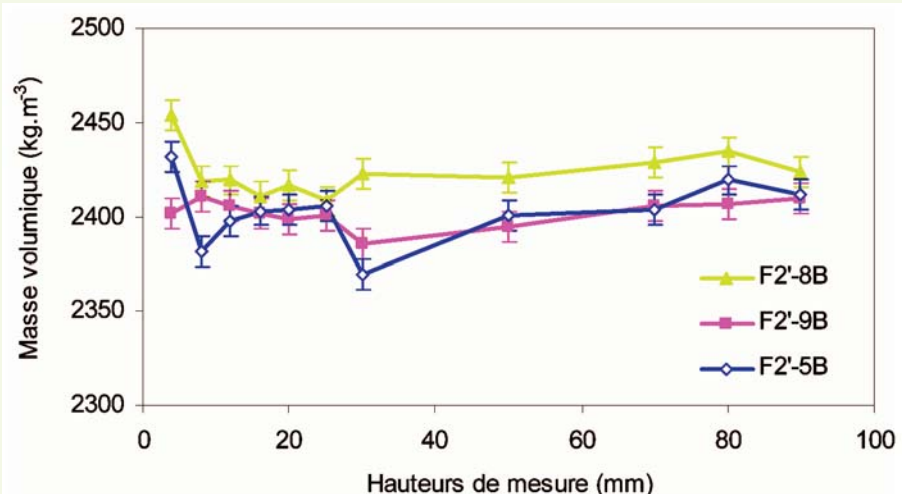


figure 12
Profil du taux de saturation du béton reformulé à l'issue du séchage (F2'-8B) - Comparaison avec le profil du béton M40 [41].

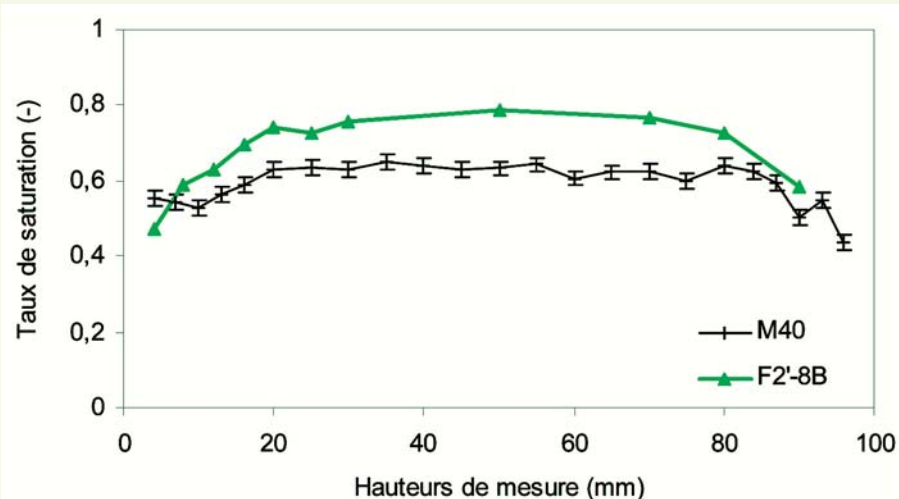


figure 13
Profil de teneur en CO₂ fixé après 14 jours de carbonatation accélérée (F2'-5B, F2'-9B) - Comparaison avec le profil du béton M40 [41].

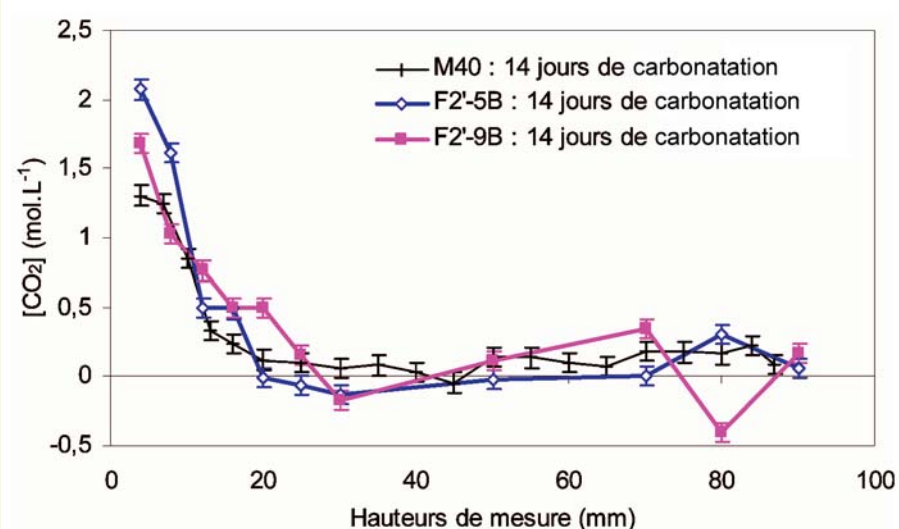
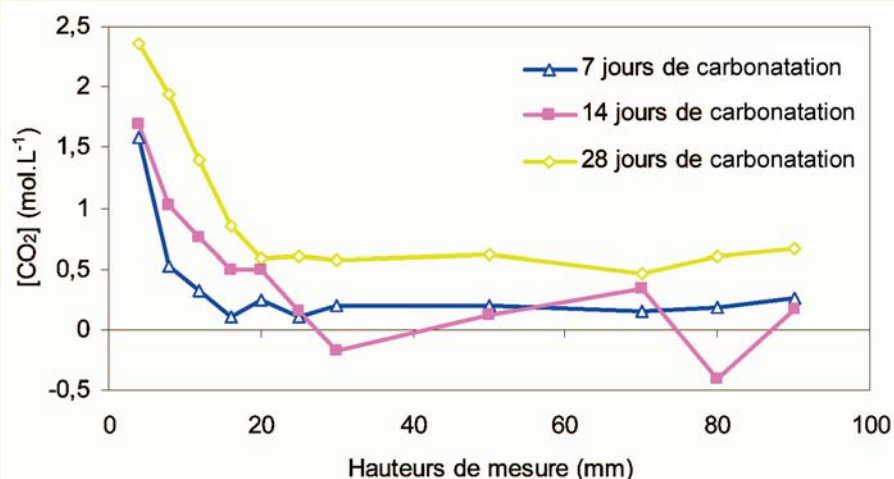
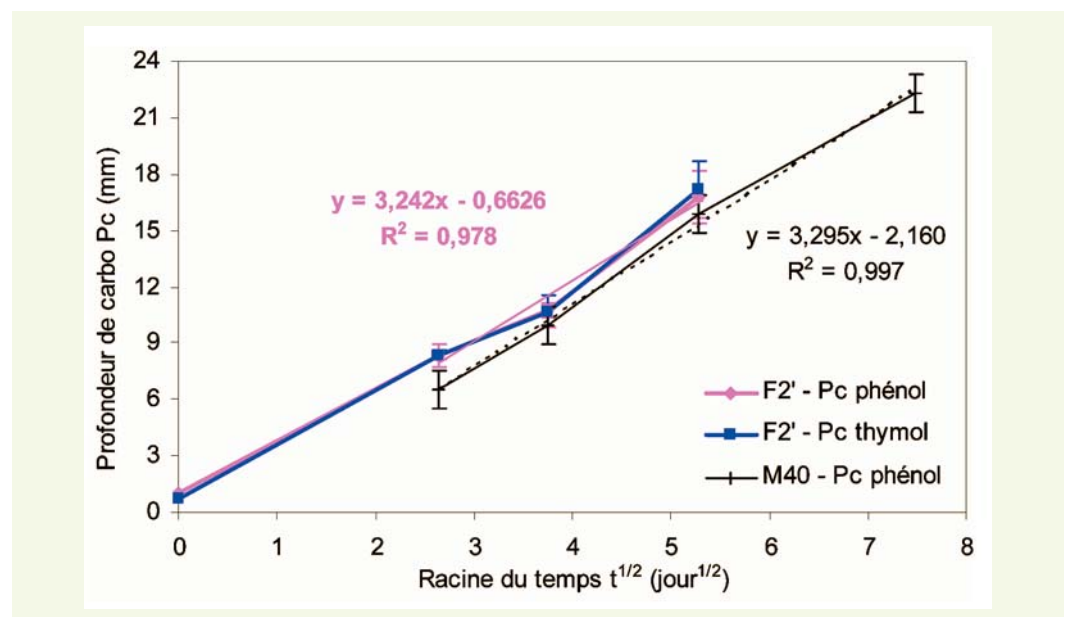


figure 14
Évolution du profil de teneur en CO₂ fixé pendant la carbonatation accélérée (F2'-9B).



(LPC) dans les mêmes conditions [27, 29, 41], ce qui est illustré par la **figure 15**. Les profils de carbonatation à 14 jours sont similaires (**figure 13**), bien que les compositions des bétons diffèrent pour des raisons contradictoires. Le béton F2' contient moins de portlandite initiale à cause du ciment choisi et des additions minérales, ce qui constitue un facteur favorisant la carbonatation. Cependant, le béton F2' sèche moins rapidement que le béton M40 : le taux de saturation du béton F2' à l'issue du préconditionnement reste plus élevé et présente un gradient plus marqué entre le cœur et la surface de l'éprouvette (**figure 12**). Cela peut être expliqué par un rapport E/C plus faible et une microstructure plus fine (pic centré autour de 20 nm sur la distribution poreuse par porosimétrie au mercure de la **figure 9**) pour F2'. Une microstructure plus fine du béton F2' et un taux de saturation plus élevé sont des facteurs ralentissant la carbonatation.

figure 15
Profondeurs de carbonatation mesurées par pulvérisation de phénolphthaléine et de thymolphthaléine à différentes échéances de carbonatation accélérée des éprouvettes de béton reformulé F2 - Comparaison avec les profondeurs de carbonatation mesurées sur du béton M40 aussi intitulé B35 [41].



■ Résultats obtenus sur pâte de ciment

Les mesures des témoins de suivi de la carbonatation accélérée d'éprouvettes de pâte de ciment (nommée C45-CA), après 90 jours de cure sous eau, ont été réalisées de manière à disposer des données spécifiques au ciment CEM II/A-LL nécessaires pour calibrer le modèle de Thiéry [16, 17] de prévision de l'avancée de la carbonatation dans un béton, modèle initialement calibré et validé sur des bétons formulés avec du ciment CEM I. Sur différentes éprouvettes de 50 mm de hauteur et 70 mm de diamètre ont été effectués des essais de gammadensimétrie et de détermination de profondeur de carbonatation après 7, 14 et 28 jours de carbonatation accélérée, ainsi qu'un profil de carbonatation par ATG-AC après 14 jours de carbonatation accélérée.

La porosité globale mesurée par gammadensimétrie (éprouvette C45-CA_5B) est égale à $37 \pm 3 \%$ (moyenne sur l'ensemble des hauteurs de mesure). La densité saturée mesurée par gammadensimétrie (C45-CA_5B) est égale à $1963 \pm 12 \text{ kg/m}^3$ (moyenne sur l'ensemble des hauteurs de mesure). Les densités à t_0 , à l'issue du préconditionnement, sont égales à $1\,827 \pm 38 \text{ kg/m}^3$ (C45-CA_5B) et $1\,812 \pm 31 \text{ kg/m}^3$ (C45-CA_6B). Les valeurs à t_0 sont plus dispersées car le séchage n'est pas vraiment homogène (**figure 16**).

Les profils de carbonatation obtenus par ATG-AC et par gammadensimétrie (**figure 17**) sont cohérents. On note cependant que les mesures par gammadensimétrie comptabilisent le CO_2 qui a pénétré sur les bords entre l'aluminium adhésif décollé et la pâte de ciment (comme pour les éprouvettes de béton F2'), alors que ce CO_2 n'entache pas les résultats d'ATG-AC. En effet, pour les ATG-AC,

figure 16

Profil du taux de saturation à l'issue du séchage, obtenu par gammadensimétrie sur une éprouvette de pâte de ciment (C45-CA_5B).

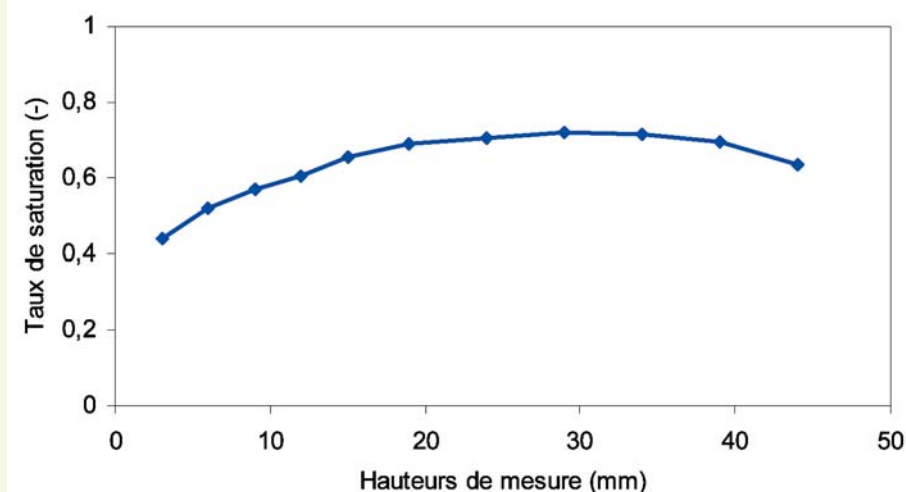


figure 17

Profils de portlandite résiduelle et encadrement du profil de carbonatation mesuré par ATG-AC et par gammadensimétrie dans une éprouvette de pâte de ciment (C45-CA_6B).

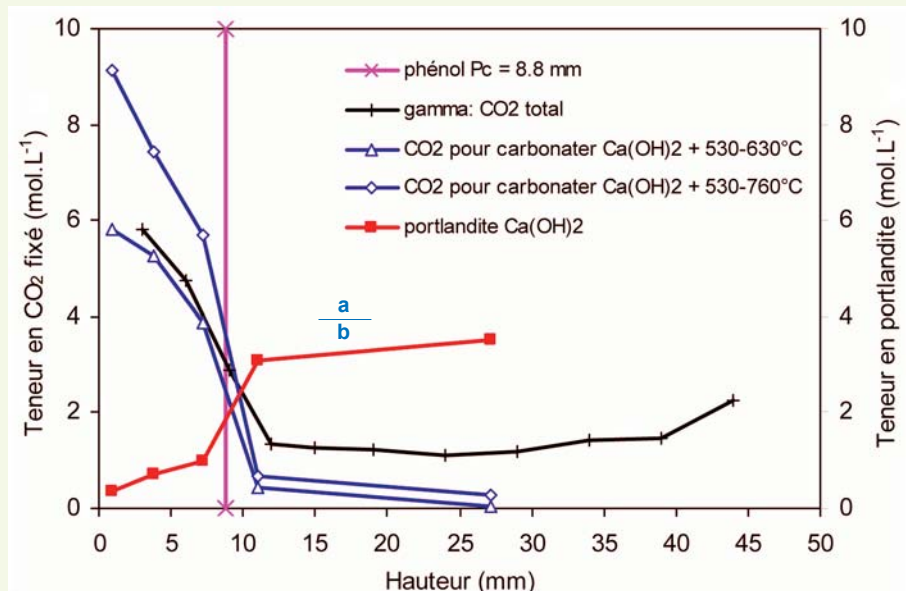


figure 18

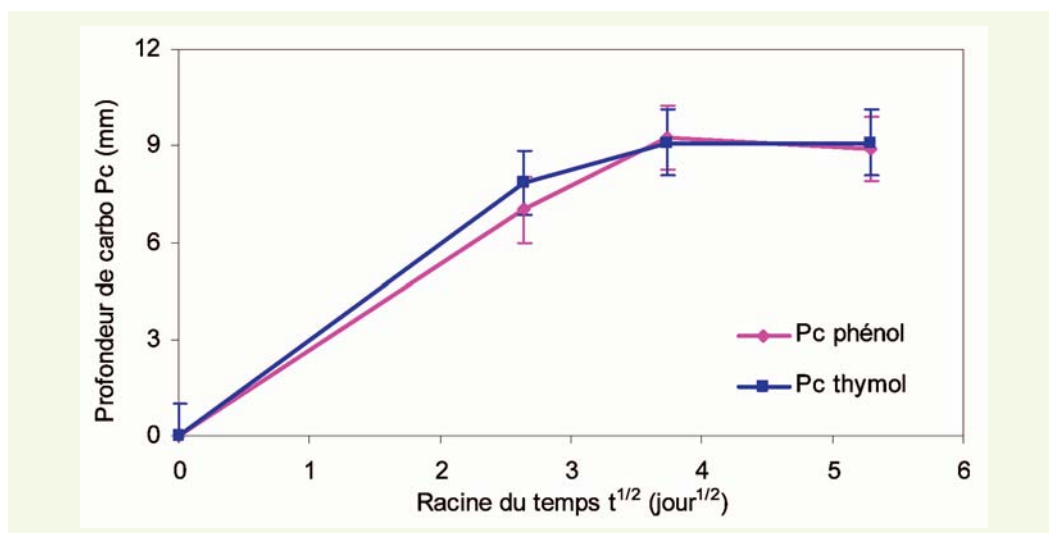
Photos prises lors de la mesure des profondeurs de carbonatation à la phénolphthaléine (rose) et à la thymolphthaléine (bleu) de l'éprouvette C45-CA_6B après 14 jours de carbonatation accélérée, avant l'essai ATG-AC.

l'échantillon, très petit, est soigneusement prélevé au centre de manière à éviter ce type d'effet de bord. La carbonatation superficielle sur le pourtour lorsque l'aluminium est décollé est visible sur les photos de la **figure 18**. La **figure 19** montre l'évolution des profondeurs de carbonatation moyennes.

a | b



figure 19
Profondeurs de carbonatation mesurées par pulvérisation de phénolphthaléine et de thymophthaléine à différentes échéances de carbonatation accélérée des éprouvettes de pâte de ciment C45-CA.



SYNTHÈSE DE LA DÉMARCHE PERFORMANTIELLE ADOPTÉE ET PERSPECTIVES

Le béton des carottes prélevées dans les voussoirs du pont étudié est un béton de résistance moyenne à la compression de l'ordre de 43 MPa, mais sa porosité relativement élevée et les autres indicateurs de durabilité (résistivité électrique et coefficient de diffusion des chlorures) semblent correspondre à un béton faiblement durable. Le [tableau 7](#) récapitule les résultats des mesures des indicateurs de durabilité obtenus sur les carottes de l'ouvrage.

Les paramètres de suivi de l'avancée de la carbonatation et de la pénétration des chlorures (ou témoins de durée de vie) du béton des carottes du tablier sont récapitulés dans le [tableau 8](#). Ces mesures montrent que les teneurs en ions chlorure dans le béton d'ouvrage sont extrêmement faibles. Il en résulte que, compte tenu des conditions environnementales auxquelles il est soumis, le pont étudié ne présente pas actuellement de risque de corrosion des armatures liée aux ions chlorure.

Par contre, le béton du tablier est carbonaté jusqu'à des profondeurs moyennes de 8,3 à 12,7 mm selon les voussoirs. On a observé en outre que, localement, le CO₂ a pénétré plus profondément jusqu'à des profondeurs de 18-19 mm, ce qui correspond à des microfissures constituant des chemins préférentiels de pénétration du CO₂. Le pont étudié pourrait donc courir dans l'avenir un risque de dégradation par corrosion de ses armatures due à la carbonatation. Une surveillance régulière semble donc nécessaire pour contrôler l'avancement de la carbonatation, qui peut être aggravée localement par la présence de microfissures.

Le béton reformulé F2' a une résistance moyenne à la compression de 44 MPa environ. Les caractéristiques microstructurales et relatives à la durabilité du béton de laboratoire sont légèrement meilleures que celles du béton des carottes d'ouvrage. La porosité accessible à l'eau du béton reformulé F2' est du même ordre de grandeur que celle des carottes prélevées dans les voussoirs du tablier du pont. Par contre, la microstructure caractérisée par porosimétrie au mercure et liée à l'hydratation du ciment est différente. On peut observer que, pour le béton de laboratoire et le béton de l'ouvrage, l'âge, les conditions de cure et de mise en œuvre sont différentes. De plus, les matériaux entrant dans la formulation (ciment et granulats de carrière) ont évolué en 15 ans. Finalement, compte tenu de ces différences irréductibles, qui influencent fortement les indicateurs de durabilité et la résistance à la compression, la formule F2' correspond à une reformulation correcte du béton de l'ouvrage.

Dans le **tableau 7**, les indicateurs de durabilité du béton reformulé F2' ont été mesurés en laboratoire après une cure de 90 jours sous eau. Ils peuvent donc être comparés aux valeurs du guide AFGC déterminées selon les mêmes méthodes, dans les mêmes conditions, contrairement aux indicateurs du béton d'ouvrage, qui a été soumis aux conditions atmosphériques pendant son hydratation et les années suivantes. La classe indicative de durabilité potentielle ainsi obtenue pour le béton F2' est « faible » selon le guide AFGC.

tableau 7

Mesures des indicateurs de durabilité sur les carottes d'ouvrage et sur le béton reformulé F2' - Classes indicatives de durabilité potentielles selon le tableau 9 page 90 du guide AFGC.

		Carottes d'ouvrage, âge > 16 ans	Éprouvettes de laboratoire de béton reformulé F2', âge > 90 j	
	Caractéristiques	Mesures	Mesures	Classes indicatives
	Rc28	43,0 ± 4,5 MPa	44,1 ± 1,4 MPa	-
G	Porosité à l'eau à cœur	16,5 ± 0,5 %	15,4 ± 0,1 %	F
S	Porosité globale à cœur par porosimétrie au mercure	16,9 ± 0,6 %	15,4 %	F
X	Porosité globale par gammadensimétrie	14,1 ± 1,7 %	14,7 ± 0,6	-
S	Résistivité électrique	36 ± 1 Ω.m	100 ± 4 Ω.m	F/M
G	Teneur en portlandite à cœur	0,82 ± 0,02 mol.L ⁻¹ ou 2,3 ± 0,5 g/100 g de ciment	1,04 mol.L ⁻¹ ou 2,5 g/100 g cim.	TF
G	Coefficient de diffusion des Cl ⁻ par migration D _{ns} (mig)	62 ± 4.10 ⁻¹² m ² /s	-	-

Les paramètres de suivi des dégradations de la formule F2' (**tableau 8**) par les chlorures n'ont pas été mesurés car les mesures sur carottes d'ouvrage ont permis d'écarter ce risque. La modélisation de la progression de la pénétration des chlorures n'est donc pas nécessaire et ne sera pas mise en œuvre. Par contre, concernant la carbonatation, ils ont été déterminés par un essai accéléré sur le béton F2' et sur une pâte de ciment (formulée avec le même ciment, de E/C = 0,45). Soulignons qu'il est impossible d'établir une corrélation directe entre les valeurs obtenues à long terme sur ouvrage et les valeurs obtenues par des essais accélérés, dans l'état actuel des connaissances, notamment parce que les essais accélérés ne traduisent pas les fluctuations climatiques.

La détermination des paramètres de suivi de la carbonatation sur le béton F2' et sur la pâte de ciment, par essai accéléré, a pour objectif de disposer de données pour calibrer (essais sur pâte) et pour valider (essai sur béton F2' et sur carottes d'ouvrage) le modèle de prédiction de la progression de la carbonatation développé par Thiéry [16]. Dans [15], le modèle de Thiéry et celui de Papadakis

tableau 8

Mesures des témoins de durée de vie sur les carottes d'ouvrage et sur le béton reformulé F2'

	Carottes d'ouvrage, âge > 16 ans	Éprouvettes de laboratoire de béton reformulé F2', âge > 90 j	
Caractéristiques	Mesures		Mesures
Profondeurs de carbonatation, moyenne sur tous les voussoirs	10,4 ± 2 mm	7 j carbo acc.	8,4 ± 1 mm
		14 j carbo acc.	10,7 ± 1 mm
		28 j carbo acc.	16,8 ± 2 mm
Profil de carbonatation par ATG-AC et gammadensimétrie	voir les courbes	-	-
Profondeur de pénétration des chlorures libres	< seuil de détection	-	-
Profil de chlorures totaux	constant	-	-
Teneur moyenne en chlorures totaux entre 0 et 12 mm	0,012 ± 0,003 g/100 g de béton	-	-

[42] sont mis en œuvre pour cet ouvrage. Les sorties des modèles ont été comparées et validées par les résultats obtenus sur carottes à 15 ans. La progression de la carbonatation du béton d'enrobage dans les années futures peut ainsi être estimée dans une zone non fissurée. Elle permet donc de donner une évolution potentielle de la carbonatation pour que le maître d'ouvrage décide de la planification de la surveillance.

Cette étude a permis de montrer que la démarche performantielle proposée dans le guide AFGC pour la conception des ouvrages peut être étendue et ainsi appliquée avec circonspection à l'expertise d'un ouvrage ancien, pour analyser son état, évaluer sa durabilité, voire prédire l'avancée des dégradations dans l'avenir [15].

Enfin, compte tenu de l'évolution des connaissances sur la durabilité du béton armé et de la démarche performantielle, s'il s'agissait aujourd'hui de construire dans cet environnement un grand ouvrage, dont la durée de vie souhaitée est de 100 ans, une autre formule de béton que celle employée pour le tablier du pont étudié serait choisie.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Denis Rouanet et l'équipe du Laboratoire régional d'Angers qui a réalisé les carottages, ainsi que Patrick Belin, Jean Lett, Ludovic Routhe, Jean-François Bouteloup, Pierre Roussel, Étienne Massieu et Bruno Zitoun du LCPC pour leur contribution active à la campagne expérimentale et à l'analyse des essais.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **AFGC**, *Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages - Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction - État de l'art et guide pour l'élaboration d'une démarche performantielle sur la base d'indicateurs de durabilité*, documents scientifiques et techniques de l'Association française de génie civil, groupe de travail animé par V. BAROGHEL-BOUNY, juillet **2004**, 252 p.
- 2 **KROPP J.**, *Relations between transport characteristics and durability*, In *Performance criteria for concrete durability*, RILEM Report 12, Spon, London, Ed. J. Kropp & H.K. Hilsdorf, **1996**, pp. 98-111.
- 3 **SCHIESSL P.**, **HERGENRÖDER M.**, **KÜNZEL H.M.**, **MÖLLER J.S.**, **NILSSON L.O.**, **SIEMES T.**, New approach to durability design - An example for carbonation induced corrosion, *CEB Bulletin*, **1997**, Vol. **238**, 138 p.
- 4 **DURACRETE**, *General Guidelines for durability design and redesign*, EU Project, Report, February **2000**, 109 p.
- 5 **ALEXANDER M.G.**, **MACKECHNIE J.R.**, **BALLIM Y.**, Use of durability indexes to achieve durable cover concrete in reinforced concrete structures, *Materials Science of Concrete*, Ed. J. P. Skalny and S. Mindess, American Ceramic Society, **2001**, Vol. **VI**, pp. 483-511.
- 6 **BAROGHEL-BOUNY V.**, Which toolkit for durability evaluation as regards chloride ingress into concrete ? Part II : Development of a performance approach based on durability indicators and monitoring parameters, *Proc. of the 3rd RILEM Workshop Testing and modelling chloride ingress into concrete*, Madrid, Spain (Ed. by C. Andrade & J. Kropp), sept. 9-10 **2002**, pp. 137-163.
- 7 **BAROGHEL-BOUNY V.**, Durability indicators : relevant tools for performance-based evaluation and multi-level prediction of RC durability, *Proceedings of the International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability*, Madrid, Spain, 19-21 March **2006**, pp. 3-30.
- 8 **POLDER R. B.**, **VAN DER WEGEN G.**, **BOUTZ M.**, Performance based guideline for service life design of concrete for civil engineering structures - The present approach in The Netherlands, *Proceedings of the International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability*, Madrid, Spain, 19-21 March **2006**, pp. 31-39.
- 9 **ANDRADE C.**, Multilevel (four) methodology for durability design, *Proceedings of the International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability*, Madrid, Spain, 19-21 March **2006**, pp. 101-108.
- 10 **ISHIDA T.**, **MAEKAWA K.**, **NAKARAI K.-I.**, A unified approach to performance evaluation of existing concrete structure - Integration of a numerical simulation scheme and durability indicators, *Proceedings of the International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability*, Madrid, Spain, 19-21 March **2006**, pp. 109-116.
- 11 **GULIKERS J.**, **BAKKER J.**, Development of a simple calculation method for condition evaluation of concrete structures regarding chloride-induced reinforcement corrosion, *Proceedings of the International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability*, Madrid, Spain, 19-21 March **2006**, pp. 117-126.
- 12 **ALEXANDER M. G.**, **STANISH K.**, **BALLIM Y.**, Performance-based durability design and specification : overview of the South African approach, *Proceedings of the International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability*, Madrid, Spain, 19-21 March **2006**, pp. 197-206.
- 13 **TUUTTI K.**, Service life of structures with regard to corrosion of embedded steel, *Proceedings of the 9th CBI Congress*, Stockholm, **1983**, pp. 233-243.
- 14 **EN 206-1**, Norme européenne : béton - Partie 1 : *Spécifications, performances, production et conformité*, Afnor, janvier **2000**.
- 15 **THIERY M.**, **VILLAIN G.**, **GOYER S.**, **PLATRET G.**, **CLÉMENT J.-L.**, **DANGLA P.**, Exemple d'application d'un modèle de carbonatation *in situ*, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **2007**, Vol. **xxx**, pp. xx-xx.
- 16 **THIERY M.**, Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires - Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques, *thèse de doctorat*, LCPC, Paris, septembre **2005**, 333 pages.
- 17 **THIERY M.**, **DANGLA P.**, **VILLAIN G.**, **PLATRET G.**, **MASSIEU E.**, **DRUON M.**, **BAROGHEL-BOUNY V.**, Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **2004**, Vol. **253**, pp. 153-187.
- 18 **AFPC-AFREM**, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Compte rendu des *Journées Techniques AFPC-AFREM « Durabilité des Bétons »*, 11-12 décembre **1997**, Toulouse, France, 283 pages.
- 19 **BAROGHEL-BOUNY V.**, **CHAUSSADENT T.**, **CROQUETTE G.**, **DIVET L.**, **GAWSÉWITCH J.**, **GODIN J.**, **HENRY D.**, **PLATRET G.**, **VILLAIN G.**, Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons - Méthodes de mesures et d'essais de laboratoire, Méthodes d'essai n° 58 dans *Techniques et Méthodes des Laboratoires des ponts et chaussées*, LCPC Paris, février **2002**, 87 pages.
- 20 **AFGC-RGCU**, *Grandeurs associées à la durabilité du béton - Guide de l'AFGC-RGCU*, sous la direction de G. Arliguie et H. Homain, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, **2007**.
- 21 **VILLAIN G.**, **THIERY M.**, **ROUSSEL P.**, Détermination par gammadensimétrie de profils de séchage et de carbonatation dans les bétons, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **2004**, Vol. **248**, pp. 49-71.
- 22 **VILLAIN G.**, **THIERY M.**, Gammadensimetry : a method to determine drying and carbonation profiles in concrete, *NDT & E Int. Journal*, **2006**, Vol. **39**, n° **4**, pp. 328-337.
- 23 **ANDRADE C.**, **ALONSO C.**, **ARTEAGA A.**, **TANNER P.**, Methodology based on the electrical resistivity for the calculation of reinforcement service life, *Proceeding Supplementary papers of the 5th CANMET/ACI Int. Conf. on Durability of Concrete*, June 4-9 **2000**, Barcelona, Spain, pp. 899-915.
- 24 **CASTELLOTE M.**, **ANDRADE C.**, **ALONSO M.C.**, Standardization, to a reference of 25 °C, of electrical resistivity for mortars and concretes in

- saturated or isolated conditions, *ACI Materials Journal*, March **2002**, Vol. **99**, n° **4**, pp. 119-128.
- 25 **PLATRET G., DELOYE F.-X.**, Thermogravimétrie et carbonatation des ciments et des bétons, *Actes des Journées des Sciences de l'Ingénieur*, 4-7 octobre **1994**, Presqu'île de Giens, Vol. **1**, pp. 237-243.
 - 26 **PCM**, *Recueil de modes opératoires pour l'analyse des ciments, bétons, sols et roches - Mode Opérateur n° 19* - publication interne du service Physico-Chimie des Matériaux du LCPC, septembre **1993**, pp. 5-8.
 - 27 **BAROGHEL-BOUNY V., VILLAIN G., THIERY M.**, *Durabilité du béton armé et de ses constituants : Maîtrise et approche performantielle - Bilan de quatre années de recherche et méthodes d'essai*, Études et Recherches des LPC, série Ouvrages d'Art, LCPC, **2008**.
 - 28 **VILLAIN G., PLATRET G.**, Two experimental methods to determine carbonation profiles in concrete, *ACI Materials Journal*, July-August **2006**, Vol. **103**, n° **4**, pp. 265-271.
 - 29 **VILLAIN G., THIERY M., PLATRET G.**, Measurement methods of carbonation profiles in concrete : Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry, *Cement and Concrete Research*, August **2006**, Vol. **37**, n° **8**, pp. 1182-1192.
 - 30 **BAROGHEL-BOUNY V., BELIN P., MAULTZSCH M., HENRY D.**, AgNO₃ spray tests - Advantages, weaknesses, and various applications to quantify chloride ingress into concrete. Part 1 : Non-steady-state diffusion tests in laboratory and exposure to natural conditions, accepted for publication in *Materials and structures*, **2006**.
 - 31 **TANG L., NILSSON L.O.**, Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field, *ACI Materials Journal, Technical Paper*, **1992**, pp. 49-53.
 - 32 **BAROGHEL-BOUNY V., BELIN P., MAULTZSCH M., HENRY D.**, AgNO₃ spray tests - Advantages, weaknesses, and various applications to quantify chloride ingress into concrete. Part 2 : Non-steady-state migration tests and chloride diffusion coefficients, accepted for publication in *Materials and Structures*, **2006**.
 - 33 **TANG L.**, Electrically accelerated methods for determining chloride diffusivity in concrete - Current development, *Magazine of Concrete Research*, **1996**, Vol. **48**, n° **176**, pp. 173-179.
 - 34 **THOMPSON A.H., KATZ A.J., KROHN C.E.**, The microgeometry and transport properties of sedimentary rocks, *Adv. Phys.*, **1987**, Vol. **36**, n° **5**, pp. 625-693.
 - 35 **GARBOCZI E.J.**, Permeability, diffusivity and microstructural parameters, a critical review, *Cement and Concrete Research*, **1990**, Vol. **20**, pp. 591-601.
 - 36 **THIERY M., VILLAIN G., JAAFAR W.**, Estimation de la perméabilité des matériaux cimentaires par porosimétrie au mercure, *Bulletin du Groupe Francophone d'Humidité et Transferts en Milieux Poreux (GFHN)*, novembre **2003**, Vol. **49**, pp. 139-144.
 - 37 **HORNAIN H., MARCHAND J., AMMOUCHE A., COMMÈNE J.-P., MORANVILLE M.**, Microscopic observation of cracks in concrete - A new sample preparation technique using dye impregnation, *Cement and Concrete Research*, April **1996**, Vol. **26**, n° **4**, pp. 573-583.
 - 38 **AMMOUCHE A., RISS J., BREYSSE D., MARCHAND J.**, Image analysis for the automated study of microcracks in concrete, *Cement and Concrete Composites*, April-June **2001**, Vol. **23**, n° **2-3**, pp. 267-278.
 - 39 **THIERY M., VILLAIN G., DANGLA P., PLATRET G.**, Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials : effects of the chemical kinetics, *Cement and Concrete Research*, July **2006**, Vol. **37**, n° **7**, pp. 1047-1058.
 - 40 **PARROTT L.J., KILLOH D.C.**, Carbonation in a 36 year old in-situ concrete, *Cement and Concrete Research*, **1989**, Vol. **19**, pp. 649-656.
 - 41 **VILLAIN G., COCHET D., OLIVIER G., THIERY M.**, Vers un mode opératoire performant et discriminant de carbonatation accélérée des bétons pour ouvrages d'art, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, Vol. **267**, pp. 63-78.
 - 42 **PAPADAKIS V.G., VAYENAS C.G., FARDIS M.N.**, Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem, *Chemical Engineering Science*, **1991**, Vol. **46**, n° **5/6**, pp. 1333-1338.