

Contribution du Projet National PerfDuB au développement durable

Gilles ESCADEILLAS¹, François CUSSIGH², Didier BRAZILLIER³

¹ LMDC, UPS/INSA, Université de Toulouse, Directeur scientifique du projet

² Vinci Construction, Directeur du projet

³ Ingénieur en chef des Travaux publics de l'État (en retraite), Président du projet

RESUME Le béton, produit de construction manufacturé le plus consommé au monde, réputé pour sa facilité d'utilisation et sa durabilité, est très décrié pour son impact environnemental. Pour diminuer cet impact, le développement de bétons plus respectueux de l'environnement et toujours adaptés aux conditions d'exposition des ouvrages constitue un objectif sociétal majeur. Pour qualifier ces bétons, il est possible depuis le début des années 2000 d'appliquer une approche dite « performantielle » qui consiste à appréhender leur durabilité en considérant, en plus de certaines données liées à la formulation, certaines propriétés du matériau dont on sait qu'elles présentent un intérêt pour prévoir l'évolution de celui-ci lorsqu'il est exposé à des conditions environnementales données. Cependant, cette approche performantielle ne faisait pas l'objet de règles normatives détaillées que ce soit au niveau français comme au niveau européen. L'objectif du Projet National PerfDuB (Approche Performantielle de la Durabilité des ouvrages en Béton), lancé en 2015, était de définir une méthodologie reconnue pour la mise en œuvre de l'approche performantielle et faisant consensus parmi tous les acteurs (fournisseurs de constituants, producteurs de béton, prescripteurs et utilisateurs). Cet article a pour objectif de présenter la démarche scientifique du Projet National PerfDuB et quelques résultats montrant sa contribution aux enjeux de développement durable.

Mots-clefs Béton - Approche performantielle – Développement durable

I. INTRODUCTION

Le béton, produit de construction manufacturé le plus consommé au monde, est réputé pour sa facilité d'utilisation et aussi, dans la grande majorité des cas, pour sa durabilité. Il est cependant de plus en plus décrié pour son impact environnemental et plus particulièrement au niveau du bilan carbone fortement impacté par l'utilisation du clinker présent en grande proportion dans les ciments Portland. Pour diminuer cet impact, le développement de bétons plus respectueux de l'environnement constitue un objectif majeur. Cependant, ce développement doit être bien encadré normativement pour se faire sans remettre en cause les exigences de durabilité des différents maîtres d'ouvrages tout en adaptant au mieux les formulations aux conditions d'exposition des ouvrages. En particulier, toutes les propriétés usuelles du béton doivent être conservées (comportement à l'état frais, comportements mécaniques à l'état durci, ...).

Pour qualifier ces bétons, il est possible depuis le début des années 2000 d'appliquer une approche dite « performantielle ». Cette méthode consiste à appréhender leur durabilité en considérant, en plus de certaines données liées à la formulation, certaines propriétés du matériau

qui présentent un intérêt pour prévoir l'évolution de celui-ci lorsqu'il est exposé à des conditions environnementales données. Cette approche est innovante car elle conduit à passer d'une logique « d'obligation de moyens », comme proposé historiquement par la plupart des réglementations prescriptives sur les bétons (type de ciment, dosage en ciment minimum, rapport eau/ciment maximum, ...) à une logique « d'obligation de résultats » en termes de durabilité selon les classes d'exposition (XC, XS, XD, XA). Cependant, cette approche performantielle ne faisait pas l'objet de règles normatives détaillées que ce soit au niveau français ou au niveau européen.

En effet, depuis le début des années 2000, le prescripteur peut utiliser le concept de performance équivalente du béton pour définir un béton dans une partie d'ouvrage donnée (article 5.2.5.3 de la norme EN 206), ou la méthode de conception performantielle (article 5.3.3 de la norme EN 206 pour des ouvrages de durée de vie de 50 ans ou article 8.1.1.4 du fascicule 65 pour des ouvrages de durée de vie de 100 ans). Il peut aussi s'appuyer sur les recommandations professionnelles provisoires FNTP/FFB/CERIB/FIB de mars 2009 et sur le guide du LCPC « Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton – Application de l'approche performantielle » de mars 2010 [1-2]. Par contre, ces documents restent un peu trop « informatifs » et ne facilitent pas l'appropriation et le déploiement de l'approche à l'ensemble des acteurs de la construction, en dehors de quelques grandes entreprises pour de grands ouvrages d'art (pont sur le Tage au Portugal, pont Rion-Antirion en Grèce, viaduc de la Nouvelle Route du Littoral à la Réunion...). Il est donc indispensable de lever les freins au développement de l'approche performantielle en proposant à la fois des essais de qualification et des seuils d'acceptabilité pertinents et fiables en s'appuyant sur des résultats issus d'une démarche scientifique rigoureuse, et aussi une méthodologie d'application acceptée par l'ensemble des acteurs de la construction.

L'objectif du Projet National PerfDuB (Approche Performantielle de la Durabilité des ouvrages en Béton), lancé en 2015, était donc de définir une méthodologie reconnue pour la mise en œuvre de l'approche performantielle en méthode absolue ou en méthode comparative et faisant consensus parmi tous les acteurs (fournisseurs de constituants, producteurs de béton, prescripteurs et utilisateurs), applicable aux ouvrages de génie civil, à certains bâtiments complexes ou certains produits préfabriqués. Ce projet géré par l'IREX, doté d'un budget de près de 4 M€ et regroupant une cinquantaine de partenaires volontaires, devait aussi établir des essais de caractérisation fiables, pouvant être potentiellement normalisés.

Cet article a pour objectif de présenter la démarche scientifique du Projet National PerfDuB et quelques résultats montrant sa contribution aux enjeux de développement durable.

II. DEMARCHE SCIENTIFIQUE

Une démarche scientifique spécifique a été établie pour atteindre plusieurs objectifs généraux :

- Définir des essais accélérés et des indicateurs de durabilité fiables et robustes.
- Définir les seuils admissibles pour les différentes classes d'exposition, durées d'utilisation des projets et valeurs d'enrobages.
- Proposer un cadre contractuel permettant le déploiement de l'approche performantielle.

A. Essais accélérés et indicateurs de durabilité

L'objectif spécifique était de pouvoir fournir aux futurs utilisateurs (laboratoires d'essais) des modes opératoires éprouvés, normalisables, permettant de qualifier rapidement les bétons dans le cadre d'une démarche performantielle. Une attention particulière devait être apportée pour remonter si possible à un indicateur de durabilité avec un seuil de performance admissible permettant d'appliquer la méthode absolue, sans nécessité de béton de référence. Dans le cas contraire, le béton de référence devait être défini pour pouvoir appliquer la méthode comparative.

a. Essais déjà éprouvés

Il existait plusieurs essais au démarrage du projet, notamment sur la porosité, la carbonatation, la pénétration des ions chlorure, issus en particulier de travaux communs précédents [3], mais leur normalisation n'était pas finalisée. Il convenait de les éprouver, sur différentes familles de bétons, en évaluant en particulier leur fiabilité et leur reproductibilité, et de les faire évoluer si nécessaire.

La démarche pour ces essais a été la suivante :

- Tester les modes opératoires existants (V1) sur 5 bétons différents, par 5 laboratoires spécialistes des essais de durabilité testés, afin d'évaluer leur pertinence, leur fiabilité et leur reproductibilité, et proposer des modifications de protocoles s'il y a lieu (V2).
- Qualifier les 42 bétons confectionnés dans le cadre du projet avec les nouveaux protocoles V2. Ajuster les modes opératoires s'il y a lieu (V3).
- Réaliser une campagne d'essais inter-laboratoires sur 3 bétons avec les modes opératoires V3 pour déterminer les données de fidélité (selon NF ISO 5725).
- Rédiger le mode opératoire final pour le proposer à la normalisation.

b. Essais non développés

Pour d'autres types d'agressions plus spécifiques, chimiques notamment, il n'y avait pas encore d'essais faisant consensus au démarrage du projet. Il convenait donc pour les agressions visées (attaque sulfatique externe, attaque acide, attaque biologique) de tester les essais développés par certains partenaires ou présents au niveau européen pour évaluer leur pertinence et leur fiabilité.

La démarche pour ces essais a été la suivante :

- Développer des essais accélérés pour les différentes agressions. Evaluer ces essais sur quelques bétons du Projet National et modifier les modes opératoires si besoin.
- Réaliser une campagne d'essais inter-laboratoires avec les modes opératoires finalisés pour déterminer les données de fidélité (selon NF ISO 5725).
- Rédiger les modes opératoires finaux et proposer des indicateurs de durabilité avec des seuils (méthode absolue) ou les bétons de référence (méthode comparative).

B. Seuils admissibles

Pour définir ces seuils, il convenait d'identifier les paramètres les plus à même d'influencer la durabilité des bétons, que ce soit des paramètres de composition (type de ciment, type d'additions, rapport eau efficace / liant équivalent, ...), de mise œuvre ou de cure.

Pour cela, la méthode a consisté à associer les résultats de la base de données obtenue à partir des 42 bétons confectionnés dans le cadre du PN, les retours d'expérience de plusieurs ouvrages ou

parties d’ouvrages d’âges et d’expositions différents et de la modélisation du vieillissement des structures en béton armé réalisée dans le cadre de l’ANR MODEVIE [4]. Les seuils obtenus ont ensuite été comparés à ceux actuellement proposés par la France dans le cadre européen du développement du concept des ERC (Exposure Resistance Class).

a. Base de données

42 bétons de différentes classes de résistance ont été confectionnés (figure 1) et caractérisés aux états frais et durcis. Ces bétons diffèrent par leur teneur en clinker (figure 2) et le type d’additions (incluant ainsi des bétons à faible impact carbone), leur teneur en eau et la porosité des granulats utilisés. Ces bétons peuvent être conformes aux normes prescriptives actuelles ou déroger volontairement aux exigences prescriptives vis-à-vis de leur teneur en liant équivalent, du rapport eau/liant équivalent ou du type de granulats. Des suivis spatial et temporel d’indicateurs de durabilité ont aussi été effectués sur un grand chantier et sur une centrale BPE.

Le Tableau 1 présente les essais de durabilité effectués sur l’ensemble des 42 bétons (sachant que d’autres essais de durabilité ont été effectués sur une partie seulement des 42 bétons).

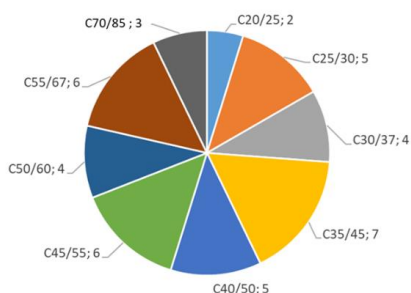


FIGURE 1. Répartition des classes de résistance à la compression des 42 bétons

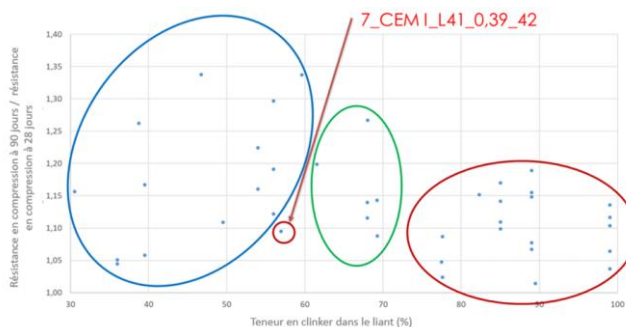


FIGURE 2. Groupes de béton basés sur la teneur en clinker dans le liant

TABLEAU 1. Essais de durabilité effectués pour les 42 bétons du PN PerfDuB

Propriétés	Cure humide	Cure sèche	Échéance d’essais (jours)
Perméabilité aux gaz CEMBUREAU	X		28, 90
Porosité accessible à l’eau	X		28, 90
Absorption d’eau par capillarité	X	X	28, 90
Absorption d’eau par immersion	X		28, 90
Diffusion de l’oxygène	X		28, 90
Migration des ions chlorure	X		28, 90
Résistivité électrique	X		28, 90
Carbonatation naturelle	X	X	90
Carbonatation accélérée selon XP P18-458 à 50% de CO ₂	X	X	90
Carbonatation accélérée selon prNF EN 12390-12 à 3% de CO ₂ (avec préconditionnement PerfDuB)	X	X	90

b. Retours d'expériences

19 structures ont été sélectionnées et évaluées (ponts, quais, monuments historiques, barrage, corps d'épreuves BHP 2000). Elles sont affectées potentiellement par la corrosion due à la carbonatation ou à la pénétration des chlorures ou soumises au gel-dégel avec ou sans sels de déverglaçage (classes XC, XS et XF/XD). Les structures ont été classées en 3 catégories : celles âgées de moins de 20 ans, celles entre 20 et 50 ans et celles de plus de 50 ans. La priorité a été donnée aux structures ayant soit fait l'objet d'une approche performantielle, soit ayant déjà fait l'objet d'un diagnostic depuis moins de 5 ans.

La démarche pour ces investigations a été la suivante :

- Sélection des ouvrages avec recherche d'informations.
- Investigations sur site avec carottage si nécessaire. Analyses en laboratoires.
- Réalisation de la base de données avec mesures des indicateurs de durabilité et des témoins de durée de vie selon le Tableau 2.

TABLEAU 2. Indicateurs de durabilité et témoins de durée de vie déterminés sur les 19 structures

Indicateurs de durabilité	Témoins de durée de vie
<ul style="list-style-type: none"> • Porosité accessible à l'eau • Perméabilité au gaz • Coefficient de diffusion des chlorures (migration) • Résistivité électrique • Absorption d'eau par capillarité • Carbonatation accélérée • Et si possible : teneur en Ca(OH)_2 	<ul style="list-style-type: none"> • Profondeur de carbonatation • Profils de chlorures (libres et totaux) • Profils de sulfates (selon le type de structure) • Epaisseur d'enrobage • Potentiels d'électrode (RILEM TC 154-EMC) • Résistivité électrique (RILEM TC 154-EMC) • Etat de la structure et de la corrosion des armatures (analyse éventuelle de l'interface acier / béton)

c. Modélisation

L'objectif global de la modélisation était de définir des seuils admissibles pour chaque classe d'exposition et pour différentes durées d'utilisation du projet et valeurs d'enrobages.

La démarche scientifique pour définir les critères de performance pertinents est basée sur la conjonction des approches de modélisation à partir de modèles existants et éprouvés, de caractérisation des bétons considérés durables par les règles de composition de la norme et des retours d'expérience basés sur le diagnostic sur ouvrages anciens. Elle s'appuie sur un modèle « ingénieur » global capable de fournir une évaluation fiable de la durée d'utilisation des structures en béton armé soumises au risque de corrosion (classes XS-XD et XC).

C. Cadre contractuel

Il était attendu plus particulièrement une définition des modalités de contrôle aux différentes étapes que sont les épreuves d'étude, de convenance, et le contrôle de production pour fixer les responsabilités et les engagements des différents acteurs de l'acte de construire.

III. QUELQUES RESULTATS

A. Amélioration des modes opératoires

Chaque mode opératoire est généralement associé à un indicateur de durabilité. Ainsi, pendant la phase d'initiation de la corrosion, ce sont les propriétés du béton d'enrobage qui sont à caractériser. Pour un environnement XC (carbonatation), ce sont les essais de carbonatation accélérée, de porosité accessible à l'eau ou de perméabilité aux gaz qui sont utilisés ; pour les environnements XS et XD (chlorures), l'essai utilisé est la mesure du coefficient de migration des ions chlorure. L'essai de résistivité s'avère lui particulièrement intéressant dans la phase de propagation de la corrosion, et en particulier pour les bétons avec certaines additions minérales.

Lors de essais de qualification des modes opératoires, les essais de porosité accessible à l'eau, de perméabilité aux gaz, de migration des ions chlorure et de résistivité ont montré une bonne répétabilité et une bonne reproductibilité. Leurs modes opératoires ont été très peu modifiés. Par contre, l'essai de carbonatation accéléré XP P18-458 a montré une faible reproductibilité et surtout une faible sensibilité liée à un préconditionnement et une géométrie d'éprouvette inadaptes. Les modifications proposées dans le cadre du PN PerfDuB (séchage préalable de 14 jours à $45 \pm 5 \text{ °C}$ à la place d'un préconditionnement à 20 °C et 65% HR) permettent de bien différencier des bétons jusque-là peut différenciables comme le montre la Figure 3.

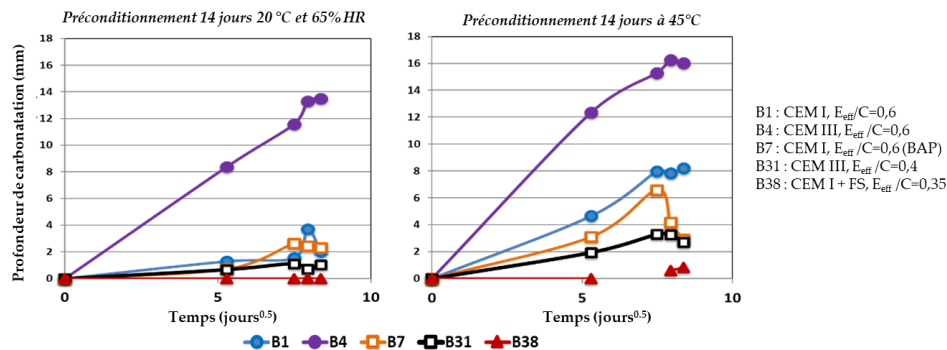


FIGURE 3. Profondeur de carbonatation selon le préconditionnement : à gauche avec un préconditionnement de 14 jours à 20 °C , à droite avec un préconditionnement de 14 jours à 45 °C

B. Corrélation entre essais accélérés et essais naturels

Les essais accélérés ne sont pertinents que si une corrélation forte existe entre leurs résultats et ceux obtenus naturellement. Les résultats obtenus dans le PN PerfDuB permettent de rassurer les utilisateurs de ces essais accélérés sur leur capacité à reproduire ce qui se passe naturellement.

La figure 4 présente la corrélation entre vitesses de carbonatation naturelle (en $\text{mm}/\text{an}^{0,5}$) et accélérée (en $\text{mm}/\text{jour}^{0,5}$) pour différents bétons du PN. Le rapport entre les deux grandeurs (3,03) est proche de celui obtenu à partir de la 1^{ère} loi de Fick :

$$v_{nat} / v_{acc} = 365^{0,5} * (C_{nat}/C_{acc})^{0,5} = 2,5$$

où v_{nat} est la vitesse de carbonatation naturelle [$\text{mm}/\text{an}^{0,5}$], v_{acc} la vitesse de carbonatation accélérée [$\text{mm}/\text{jour}^{0,5}$], C_{nat} la concentration en CO_2 en conditions atmosphérique à l'intérieur d'un bâtiment ($\sim 0,05\%$) et C_{acc} la concentration dans l'enceinte de l'essai accéléré (3 %).

La figure 5 présente la corrélation entre la diffusion accélérée sous champ électrique (D_{rcm}) et la diffusion naturelle (D_{app}). Bien que testé uniquement sur 5 bétons, on observe une bonne corrélation entre les coefficients de migration et de diffusion, ce qui confirme les résultats de la littérature et valide l'utilisation d'essais de migration, bien plus rapides, pour déterminer la performance des bétons pour les classes d'exposition XS et XD.

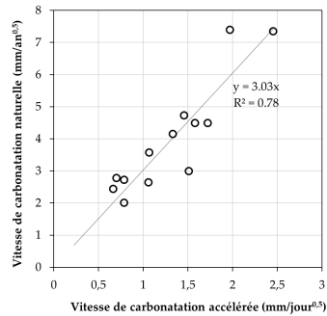


FIGURE 4. Vitesse de carbonatation naturelle vs vitesse de carbonatation accélérée

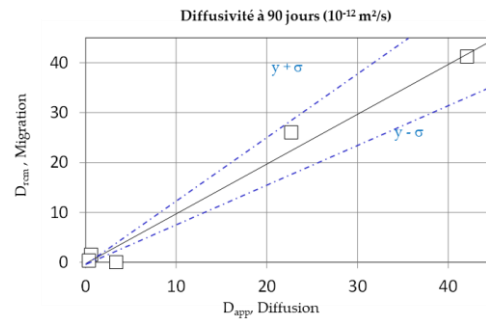


FIGURE 5. Diffusion accélérée sous champ électrique (D_{rcm}) vs diffusion naturelle (D_{app})

C. Subsidiarité de certains essais

Il est toujours intéressant de proposer des essais alternatifs qui permettent d'obtenir plus rapidement, et toujours aussi sûrement, une qualification du béton en termes de durabilité. Pour la carbonatation, il est proposé d'utiliser l'essai de porosité à l'eau, qui présente une certaine relation avec la vitesse de carbonatation, répétable et reproductible, et pratiqué par plus de laboratoires. Dans le projet PerfDuB, il a été décidé d'utiliser l'indicateur « porosité accessible à l'eau/fraction volumique de pâte » qui permet une meilleure prise en compte des bétons à forts volumes de pâte [5]. La Figure 6 présente la vitesse de carbonatation accélérée en fonction de cet indicateur « porosité accessible à l'eau/fraction volumique de pâte ».

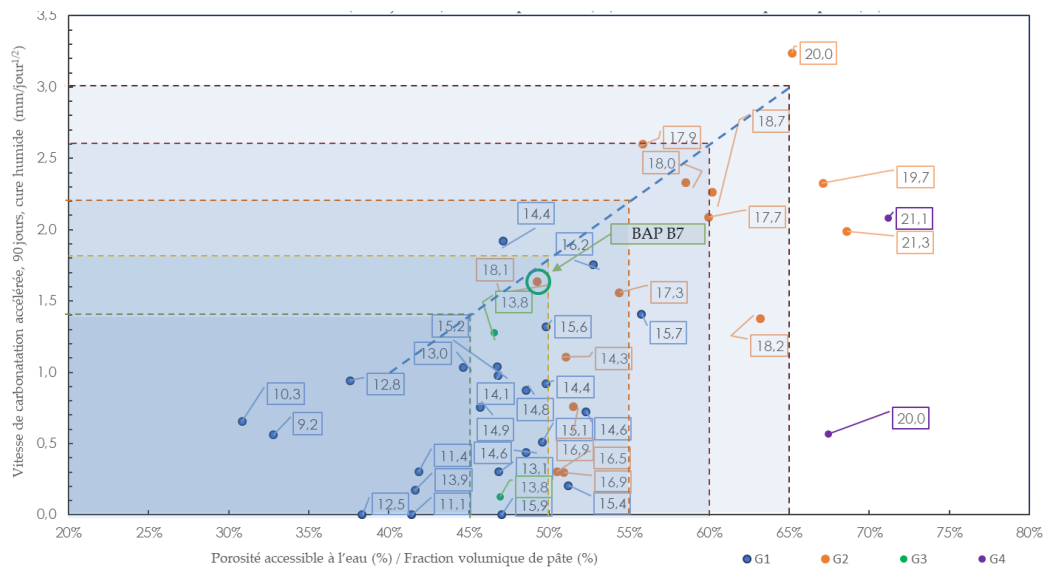


FIGURE 6. Vitesse de carbonatation accélérée vs ratio « porosité accessible à l'eau/fraction volumique de pâte » ; les étiquettes correspondent à la valeur caractéristique de la porosité accessible à l'eau (%).

Sur cette figure, le choix des valeurs seuils est représenté par les rectangles colorés. La pente de la ligne pointillée est définie de telle manière que l'utilisation de ce critère alternatif ne permet pas de valider des bétons dont la vitesse de carbonatation accélérée serait supérieure aux valeurs seuils représentées par les lignes pointillées horizontales. On peut souligner l'importante approche sécuritaire retenue dans la définition de ces seuils de manière à garantir l'option de substitution par rapport à l'autre. À titre d'exemple, en retenant un critère « porosité accessible à l'eau/fraction volumique de pâte » inférieur à 55 %, on s'assure que les bétons validés correspondants ne présentent pas une vitesse de carbonatation supérieure à 2,2 mm/jour^{1/2}.

D. Justification des seuils admissibles

L'objectif du PN PerfDuB était de proposer des valeurs des seuils de performance définis pour assurer le respect d'une durée d'utilisation de projet satisfaisante (50 ans ou 100 ans) pour les classes d'exposition liées à la problématique de corrosion des armatures (XC, XS et XD).

La durée d'utilisation de projet (t_{final}) est définie en calculant la somme de la période d'initiation (t_{ini}) et de la période de propagation de la corrosion (t_{prop}) avec : $t_{\text{final}} = t_{\text{ini}} + t_{\text{prop}}$.

Il a semblé en effet indispensable de prendre en compte l'étape de propagation de la corrosion, que ce soit lors de la conception de l'ouvrage ou lors de l'évaluation d'une structure existante. Lors de la conception d'un nouvel ouvrage, la prise en compte de la phase de propagation doit permettre d'optimiser l'épaisseur d'enrobage, la conception à partir du seul temps d'initiation étant excessivement sécuritaire notamment pour la carbonatation. Ce choix conduit à diminuer le volume de béton à utiliser et donc à diminuer l'impact environnemental de la construction.

Ces seuils de performance reposent sur la prise en compte :

- Des données issues de la littérature sur les différents mécanismes liés à la diffusion du CO₂ ou des chlorures et à la corrosion des armatures.
- Des résultats expérimentaux obtenus sur les 42 bétons du Projet National PerfDuB.
- Des observations effectuées sur des ouvrages anciens exposés à différentes conditions environnementales.
- De la variabilité des paramètres d'entrée.
- De la comparaison des durées d'utilisation calculées par le modèle aux durées visées dans les normes (50 ou 100 ans) pour différents couples béton/enrobage définis dans la norme NF EN 206/CN et l'Eurocode 2 en fonction des classes d'exposition.

Ces propositions de seuils ont été aussi comparées à celles issues des modélisations réalisées par la France dans le cadre de la préparation de la révision de l'Eurocode 2 par le groupe européen TC250/WG1/TG10 entre 2018 et 2020 selon l'approche européenne des classes ERC.

Les seuils retenus ont été choisis parmi des séries prédéfinies couvrant la gamme de performance recherchée et intégrant un écart entre les valeurs successives au sein d'une même série compris entre 2 et 3 fois l'écart type de reproductibilité de l'essai déterminé lors de la campagne finale d'essais croisés du PN. Ces séries sont les suivantes :

- Vitesse caractéristique de carbonatation accélérée [en mm/jour^{0,5}] mesurée à 90 jours :

1 – 1,4 – 1,8 – 2,2 – 2,6 – 3 – 3,5 – 4

- Coefficient de migration des chlorures [en 10^{-12} m²/s] mesuré à 90 jours :

1 – 1,5 – 2 – 3 – 5 – 9 – 16 – 22 – 28

Le Tableau 3 ci-après présente cette démarche pour les classes d'exposition XC3 et XC4 et les seuils obtenus pour des enrobages conformes à l'Eurocode NF EN 1992-1-1 pour la classe structurale S6 (durée d'utilisation de projet (DUP) de 100 ans). A noter qu'une modulation selon 3 classes de résistivité correspondant aux plages de performances observées sur les 42 bétons du PN PerfDuB, dont la valeur influe directement sur le temps de propagation, a été introduite.

TABLEAU 3. Seuils de performance (valeurs caractéristiques à 90%) – Classes XC - DUP 100 ans

Classe d'exposition	Classes de résistivité à 90j ($\Omega.m$)	Limite de vitesse de carbonatation accélérée (mm/jour ^{0,5})			
		Base de données PerfDuB	Modèle PerfDuB MODEVIE	ERC	Synthèse PERFDUB
XC3	< 100	1,6	1,6	1,8	1,8
	100 à 175		1,7		
	> 175		1,8		
XC4	< 100	1,7	1,7	1,8	1,8
	100 à 175		1,9	2,2	
	> 175		2,4		2,2

Pour ces classes XC3 et XC4, on peut voir que les différentes approches donnent des valeurs voisines pour la durée d'utilisation de projet de 100 ans.

Si on trace la variation de la perméabilité aux gaz k_{sec} en fonction de la porosité accessible à l'eau pour les bétons du PN PerfDuB conformes ou non conformes aux classes XC3 et XC4 (figure 7), on peut voir que plusieurs bétons actuellement non conformes peuvent être validés par l'approche performantielle. Il est intéressant de noter que ces bétons se caractérisent en particulier par des teneurs en additions minérales élevées et donc des faibles teneurs en clinker, ce qui va dans le sens de validation de bétons à faibles impacts environnementaux.

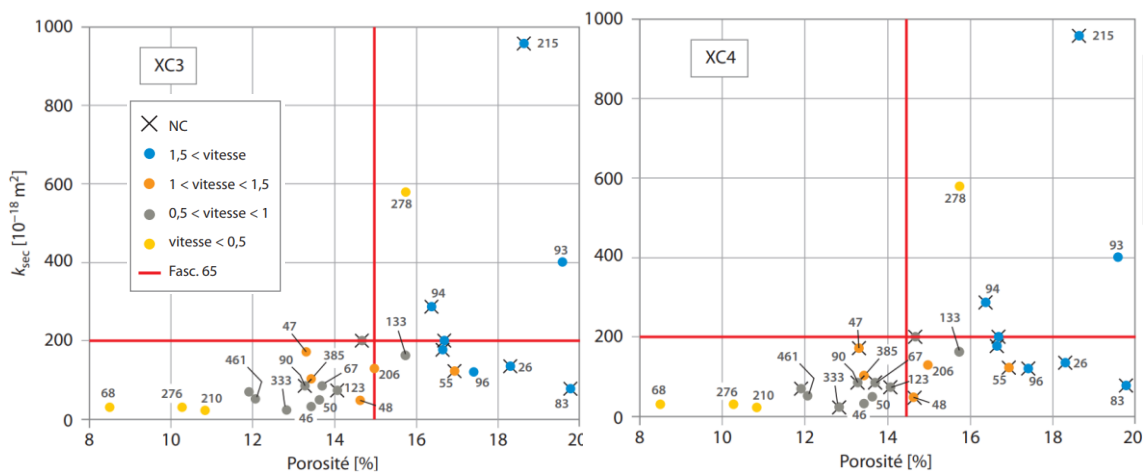


FIGURE 7. Perméabilité aux gaz (k_{sec} en 10^{-18} m²) vs porosité accessible à l'eau (%) pour 4 plages de vitesse de carbonatation accélérée pour les classes XC3 (gauche) et XC4 (droite) (croix : bétons non conformes (NC) au fascicule 65 ; lignes rouges : valeurs limites de porosité et de k_{sec} spécifiées dans le fascicule 65 ; étiquettes : valeurs des résistivités électriques en $\Omega.m$ à 90 jours).

IV CONCLUSIONS

L'objectif du Projet National PerfDuB était de faciliter l'utilisation de l'approche performantielle en proposant des valeurs seuils pour les propriétés de durabilité et une méthodologie de mise en œuvre de ce type d'approche. L'originalité du travail effectué dans le cadre du projet a été de coupler trois types de données : celles venant des 42 bétons confectionnés spécifiquement durant le projet, celles issues des retours d'expériences sur des ouvrages anciens et celles issues de la modélisation développée dans le cadre de l'ANR MODEVIE.

A l'issue du projet, plusieurs essais de caractérisation ont été finalisés, dont la plupart ont été proposés à la normalisation, et les valeurs seuils ont été proposées pour les propriétés de durabilité. Ces valeurs seuils ont servi de base à l'élaboration du fascicule de documentation FD P18-480 [6], norme française relative à l'approche performantielle dans le domaine de la NF EN 206/CN.

Ainsi, à l'issue de ce Projet National, un nouveau contexte normatif permettant la qualification et la mise en œuvre de bétons à faibles impacts environnementaux à partir d'une approche performantielle absolue ou comparative est désormais possible. Il a été également conçu, grâce à une approche systématiquement sécuritaire, pour apporter une garantie de durabilité équivalente ou supérieure à celle obtenue par l'approche prescriptive usuelle.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ensemble des partenaires du Projet National PerfDuB pour le travail réalisé tout au long du projet.

REFERENCES

[1] Méthodologie d'application du concept de performance équivalente des bétons : Recommandations professionnelles provisoires, Emmanuel Rozière, François Cussigh, Fédération Nationale des Travaux Publics, 2009.

[2] Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton. Application de l'approche performantielle, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2010.

[3] GranDuBé : Grandeurs associées à la durabilité des bétons, Hugues Hornain, Ginette Arliguie, Presses des Ponts, ISBN285978425X, 9782859784256, 2007.

[4] MODEVIE PROJECT : Proposal of new service-life model, Myriam Carcassès, Chantal Chalhoub, Anass El Farissi, Philippe Turcry, Jonathan Mai-Nhu, Abdelghafour Ait-Alaiwa, Lionel Linger et François Cussigh, Conference: fib2020 Symposium, Shanghai (China), 2021.

[5] Rozière Emmanuel, Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle, thèse de doctorat en Génie Civil, École Centrale de Nantes, 2007.

[6] FD P18-480, Béton - Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle, octobre 2022.