

21^e édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Polytechnique Montréal, Montréal, Canada
5 et 6 juillet 2023

APPROCHE PERFORMANTIELLE DE LA DURABILITÉ DES OUVRAGES EN BÉTON : PRINCIPAUX RÉSULTATS DU PROJET NATIONAL PERFDUB

G. Escadeillas^A, F. Cussigh^B, D. Brazillier^C

A LMDC, UPS/INSA, Directeur scientifique du projet, Toulouse, France

B Vinci Construction, Directeur du projet, Paris, France

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

RÉSUMÉ : Le béton est le produit de construction manufacturé le plus utilisé dans le monde compte tenu de ses bonnes propriétés d'usage. Cependant, il est de plus en plus décrié pour sa contribution au réchauffement climatique. Pour diminuer cet impact environnemental, il convient de développer des bétons plus respectueux de l'environnement. Pour qualifier ces bétons, l'approche dite « performantielle » semble être une solution sécuritaire puisque basée sur une obligation de résultats en termes de durabilité de l'ouvrage et non plus uniquement de moyens à la fabrication des bétons. Cependant, cette approche performantielle n'était que très peu utilisée en France en l'absence de règles normatives détaillées. 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 cette approche faisant consensus parmi tous les acteurs de la construction. Cet article a pour objectif de présenter quelques résultats de ce Projet National achevé en 2022.

1. INTRODUCTION

Le béton est réputé pour sa facilité d'utilisation et, dans la grande majorité des cas, pour sa durabilité. Il est toutefois de plus en plus critiqué pour son mauvais impact environnemental et plus particulièrement au niveau des gaz à effet de serre et de leurs conséquences avérées sur le dérèglement climatique. Ce mauvais bilan carbone est principalement lié à la fabrication du clinker présent en grande proportion dans les ciments Portland les plus utilisés. Pour diminuer cet impact, la profession cherche à développer des bétons « bas carbone », plus respectueux de l'environnement, présentant en particulier des teneurs en clinker limitées. Ce développement doit évidemment être encadré normativement pour ne pas remettre en cause les exigences des différents maîtres d'ouvrages. En particulier, toutes les propriétés usuelles du béton doivent être conservées (comportement à l'état frais, comportements mécaniques instantanés et différés à l'état durci, durabilité...).

Pour qualifier ces « nouveaux » bétons, la profession avait la possibilité, depuis le début des années 2000, d'appliquer une approche dite « performantielle » (voir norme EN 206) qui 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 était considérée comme innovante car elle permettait, en théorie, de passer d'une logique « d'obligation de moyens », comme proposé par la plupart des réglementations prescriptives sur les bétons (type de ciment, dosage en liant minimum, rapport eau/liant 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 et a été de fait, très peu utilisée. Pour pallier ces inconvénients, le prescripteur français a pu, par la suite, s'appuyer sur les « recommandations professionnelles provisoires FNTP/FFB/CERIB/FIB » de mars 2009 [Rozière et al, 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 [LCPC, 2010]. Cependant, ces documents restaient encore trop « informatifs » et ne facilitaient pas l'appropriation et le déploiement de l'approche à l'ensemble des acteurs de la construction, en dehors de quelques grands chantiers (pont sur le Tage au Portugal, pont Rion-Antirion en Grèce, viaduc de la Nouvelle Route du Littoral à la Réunion...).

Il était donc indispensable pour la profession de lever les freins à la mise en place effective de l'approche performantielle en proposant des essais de qualification et des seuils d'acceptabilité pertinents et fiables ainsi qu'une méthodologie d'application acceptée par l'ensemble des acteurs de la construction. Ces objectifs ont conduit à la création en 2015 du Projet National PerfDuB (Approche Performantielle de la Durabilité des ouvrages en Béton). Ce type de Projet National, labellisé par le ministère, a la particularité de réunir sur quelques années différents acteurs volontaires de la construction (prescripteurs, fournisseurs de constituants, producteurs de béton, utilisateurs, laboratoires privés et universitaires) autour d'une thématique commune dans l'objectif de faire progresser les connaissances générales et, si possible, la réglementation. Le projet PerfDuB (4 M€), géré par l'IREX, a regroupé ainsi sur la période 2015-2022 une cinquantaine de partenaires avec pour domaine d'application les ouvrages de génie civil, les bâtiments et les produits préfabriqués d'une durée de vie de 50 ou 100 ans. Cet article a pour objectif de présenter la démarche scientifique retenue et quelques résultats significatifs obtenus au cours du projet.

2. DEMARCHE SCIENTIFIQUE

Pour atteindre les objectifs fixés en début de projet, la démarche scientifique suivante a été adoptée :

- 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.

Cette démarche est précisée ci-après.

2.1 Essais accélérés et indicateurs de durabilité

Au niveau des essais accélérés et des indicateurs de durabilité, l'objectif était de pouvoir fournir aux futurs utilisateurs (laboratoires d'essais) des modes opératoires éprouvés, normalisables à défaut d'être normalisés, permettant de qualifier rapidement les bétons dans le cadre d'une démarche performantielle. Ces essais devaient conduire, autant que possible à la mise en place d'indicateurs de durabilité avec des seuils de performance admissibles permettant d'appliquer soit la méthode absolue, sans nécessité de béton de référence, soit la méthode comparative avec proposition d'un béton de référence.

Au démarrage du projet il existait déjà plusieurs essais, notamment sur la porosité accessible à l'eau, la carbonatation, la pénétration des ions chlorure, issus de travaux communs précédents [Hornain et al. 2007]. Cependant, leur normalisation n'était pas toujours finalisée et il convenait de les évaluer sur une grande gamme de bétons, notamment en termes de fiabilité et de reproductibilité, et de les améliorer si nécessaire. Pour cela, dans un premier temps, 5 laboratoires spécialistes des essais ont testé 5 bétons différents avec les essais existants. Ensuite, les essais, modifiés ou non, ont été appliqués pour caractériser les 42 bétons confectionnés lors du PN. Enfin, après dernière adaptation si nécessaire, les essais ont fait l'objet d'une

campagne inter-laboratoires pour déterminer les données de fidélité (selon NF ISO 5725) avant rédaction du mode opératoire final.

Pour d'autres types d'agressions, chimiques notamment (attaques sulfatique externe, acide et biologique), il n'y avait pas d'essais faisant consensus au démarrage du projet. Pour ces agressions, des essais développés par certains partenaires ou présents au niveau européen devaient être évalués en particulier au niveau de leur pertinence et leur fiabilité. Ces essais ont aussi fait l'objet d'une campagne inter-laboratoires avant rédaction du mode opératoire final et proposition d'indicateurs de durabilité avec des seuils (méthode absolue) ou les bétons de référence (méthode comparative).

2.2 Seuils admissibles

Pour définir ces seuils, il était indispensable 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, ...) ou de cure.

Pour cela, la méthode a consisté à associer aux connaissances bibliographiques, les résultats d'une importante base de données établie à partir de 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 la modélisation du vieillissement des structures en béton armé réalisée dans le cadre d'un projet ANR (ANR MODEVIE [Carcasses et al., 2021]). 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).

Au niveau de la base de données, 42 bétons de différentes classes de résistance (de C20/25 à C70/85) ont été confectionnés et caractérisés aux états frais et durcis (28 et 90 jours). Ces bétons différaient par leur teneur en clinker (de 30 à 95%), le type et la quantité d'additions (laitier de haut fourneau, cendres volantes, métakaolin, fumée de silice, additions calcaire ou siliceuse, permettant de réaliser des bétons à faible impact carbone), leur teneur en eau et la porosité des granulats utilisés. Ces bétons pouvaient être conformes aux normes 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 (à noter que tous les constituants étaient conformes aux normes en vigueur). Des suivis spatial et temporel d'indicateurs de durabilité ont aussi été effectués sur des bétons pour ouvrage d'art (Nouvelle Route du Littoral à la Réunion) et sur des bétons pour bâtiments (centrale BPE en France métropolitaine).

Pour le retour d'expériences, 19 structures ont été sélectionnées et évaluées (ponts, quais, monuments historiques, barrage, corps d'épreuves de BHP 2000). Ces structures étaient 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). Pour l'analyse, les structures ont été classées en 3 catégories : moins de 20 ans, entre 20 et 50 ans et plus de 50 ans.

Le Tableau 1 présente les essais de durabilité effectués sur ces différents bétons (hors essais de durabilité en environnements chimiques XA).

Tableau 1. Essais de durabilité effectués dans le cadre du PN

Propriétés	Bétons du PN (42)	Bétons d'ouvrage (19)
Perméabilité aux gaz CEMBUREAU	X	X
Porosité accessible à l'eau	X	X
Absorption d'eau par capillarité	X	-
Absorption d'eau par immersion	X	-
Diffusion de l'oxygène	X	-
Migration des ions chlorure	X	X
Résistivité électrique	X	X
Carbonatation naturelle	X (sur 13 bétons)	X
Carbonatation accélérée selon XP P18-458 à 50% de CO ₂	X	X
Carbonatation accélérée selon prNF EN 12390-12 à 3% de CO ₂ (avec préconditionnement PerfDuB)	X	X

La modélisation, basée sur des modèles existants et éprouvés, la caractérisation des 42 bétons et les retours d'expérience sur ouvrages anciens, 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 XC et XS-XD). Sa particularité est de prendre en compte, en plus de la traditionnelle phase d'initiation de la corrosion la partie de la propagation de la corrosion sur l'armature qui ne remet pas en cause la sécurité de l'ouvrage.

2.3 Cadre contractuel

Les difficultés d'application de l'approche performantielle étaient en partie liées à l'absence de cadre réglementaire sur les modalités de contrôle aux différentes étapes de la qualification d'un béton que sont les épreuves d'étude, de convenance, et de contrôle de production. Un des objectifs du projet national était de définir ce cadre contractuel, faisant consensus auprès de l'ensemble des acteurs, de manière à pouvoir fixer les responsabilités et les engagements des différents acteurs de l'acte de construire.

3. PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS

3.1 Essais accélérés et indicateurs de durabilité

3.1.1 Modes opératoires

Lors des 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. Ces essais existants ont donc été validés, parfois avec des modifications mineures, et leur répétabilité et leur reproductibilité ont été déterminées. Certains de ces essais ont depuis été normalisés (NP P 18-459 – Essai de porosité et de masse volumique – Août 2022 ; XP P 18-462 – Détermination du coefficient de diffusion apparent des ions chlorure – décembre 2022 ; XP P 18-481 – Mesure de résistivité électrique – décembre 2022).

Par contre, lors de la première campagne d'essai réalisée sur 5 bétons par 5 laboratoires, l'essai original XP P18-458 de carbonatation accélérée a montré une faible reproductibilité et surtout une faible sensibilité (voir Figure 1, gauche). La faible sensibilité a été reliée à un préconditionnement et à une géométrie d'éprouvette qui ne facilitaient pas le séchage des bétons nécessaire à la carbonatation. La faible reproductibilité a été reliée à l'utilisation de matériels différents par les laboratoires principalement lors du préconditionnement. Les modifications proposées dans le cadre du PN PerfDuB (10 éprouvettes Φ 11 cm, h 11 cm, séchage préalable de 14 jours à 45 ± 5 °C avec suivi des pertes de masse à la place d'un préconditionnement à 20 °C et 65% HR) permettent de bien différencier des bétons jusque-là peu

différentiables (voir Figure 1, droite). Ces modifications ont depuis été introduites dans la norme XP P18-458 – Essai de carbonatation accélérée de décembre 2022.

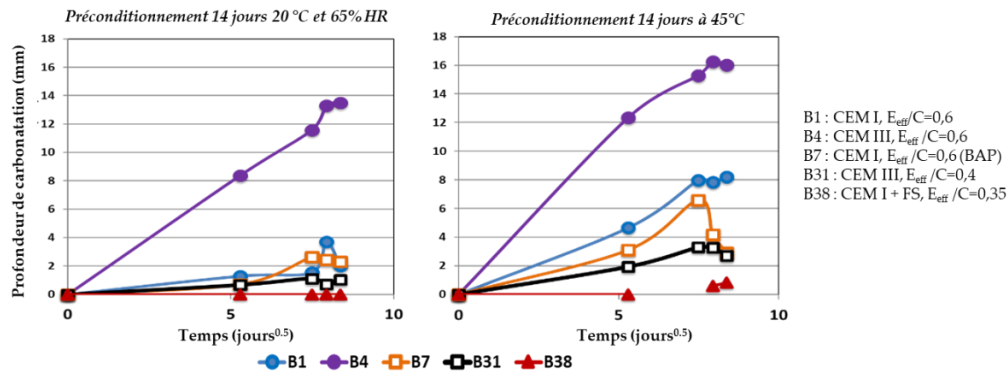


Figure 1. Profondeur de carbonatation selon le préconditionnement :
à gauche avec un préconditionnement de 14 jours à 20°C,
à droite avec un préconditionnement de 14 jours à 45 °C (et suivi des pertes de masse)

Par rapport aux agressions chimiques, de nouveaux modes opératoires ont été proposés permettant de qualifier les bétons vis-à-vis des attaques acides (norme XP P18-482 – juillet 2022), des attaques sulfatiques externes (essais par saturation [Messad, 2009] ou par immersion-séchage (dérivé de l'essai suisse SIA 262 Annexe D) et de la biodégradation (essais UGE et BAC test se différenciant par la source de soufre).

3.1.2. Corrélation entre essais accélérés et essais naturels

Le projet national s'est aussi attaché à démontrer la représentativité des essais accélérés de carbonatation ou de diffusion des ions chlorures vis-à-vis du vieillissement naturel.

La figure 2 présente la corrélation entre vitesses de carbonatation naturelle (en mm/an^{0.5}) et accélérée (en mm/jour^{0.5}) pour différents bétons du PN de compositions très différentes. Le rapport entre les deux grandeurs (~ 3) est proche de celui obtenu à partir de la 1^{ère} loi de Fick :

$$v_{nat} / v_{acc} = 365^{0,5} * (C_{nat}/C_{acc})^{0,5} = 2,5 \quad \text{Équation 1}$$

où v_{nat} est la vitesse de carbonatation naturelle [mm/an^{0.5}], v_{acc} la vitesse de carbonatation accélérée [mm/jour^{0.5}], C_{nat} la concentration en CO₂ en conditions atmosphérique à l'intérieur d'un bâtiment (~ 0,05%) et C_{acc} la concentration en CO₂ dans l'enceinte de l'essai accéléré (3%).

La figure 3 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.

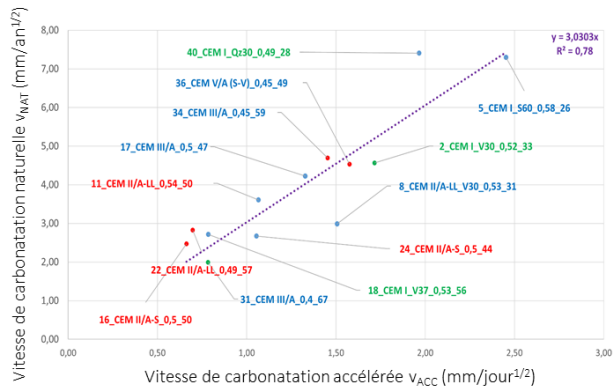


Figure 2. Vitesse de carbonatation naturelle vs vitesse de carbonatation accélérée

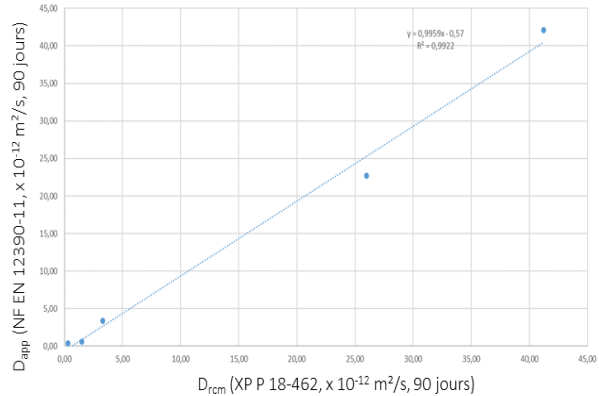


Figure 3. Diffusion accélérée sous champ électrique (D_{rcm}) vs diffusion naturelle (D_{app})

Ainsi, les résultats présentés ici, obtenus sur des bétons très différents, permettent de rassurer les utilisateurs de ces essais accélérés sur leur capacité à reproduire ce qui se passe naturellement.

3.1.3. Subsidiarité de certains essais

Toujours dans un souci d'efficacité, le projet national a étudié la possibilité de proposer des essais alternatifs afin d'obtenir plus rapidement et toujours sûrement, une qualification des bétons en termes de durabilité.

Pour la carbonatation, il est proposé d'utiliser l'essai de porosité à l'eau, qui est à la fois en relation avec la vitesse de carbonatation, répétable, reproductible et pratiqué par plus de laboratoires. En se basant sur des travaux précédents, 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 comme pour les bétons autoplacants [Rozière, 2007].

La Figure 4 présente la vitesse de carbonatation accélérée en fonction de cet indicateur « porosité accessible à l'eau / fraction volumique de pâte ». 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 permette pas de valider des bétons dont la vitesse de carbonatation accélérée serait supérieure aux valeurs seuils représentées par les lignes pointillées horizontales. À titre d'exemple, en retenant un critère « porosité accessible à l'eau / fraction volumique de pâte » inférieur à 45 %, on s'assure que les bétons validés correspondants ne présentent pas une vitesse de carbonatation supérieure à 1,4 mm/jour^{1/2}.

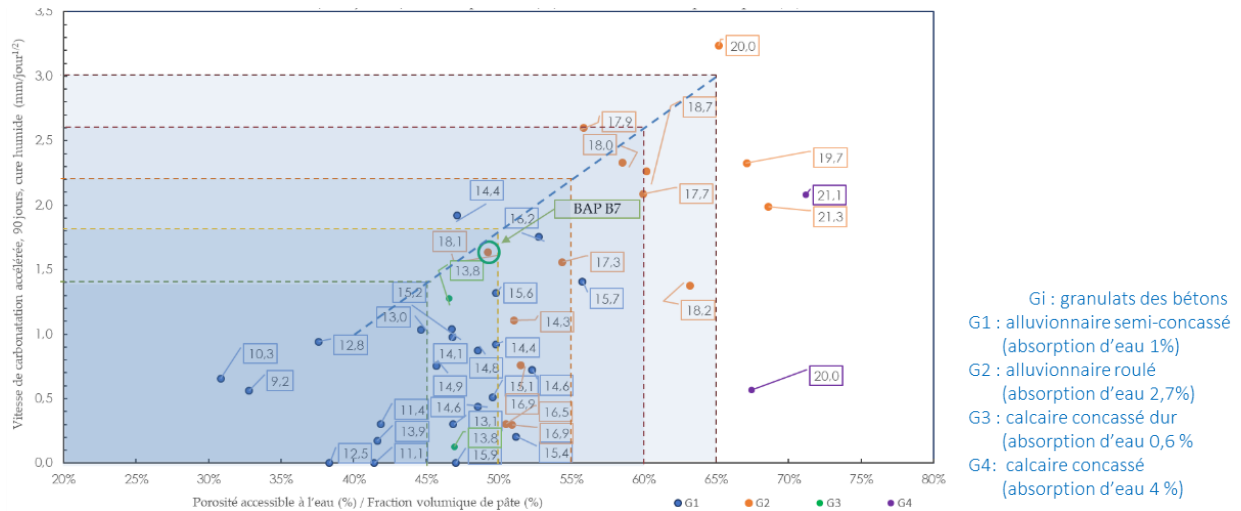


Figure 4. Vitesse de carbonatation accélérée vs ratio « porosité accessible à l'eau / fraction volumique de pâte » (étiquettes : valeur caractéristique de la porosité accessible à l'eau (%))

On peut souligner encore l'importante approche sécuritaire retenue dans la définition de ces seuils de manière à garantir l'option de substitution par rapport à l'essai original.

3.2. Justification des seuils admissibles

Un des objectifs du PN PerfDuB était de proposer des valeurs des seuils de performance permettant d'assurer 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). Ceci a été fait par modélisation des phases d'initiation et de corrosion.

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 : $t_{final} = t_{ini} + t_{prop}$ (voir Figure 5).

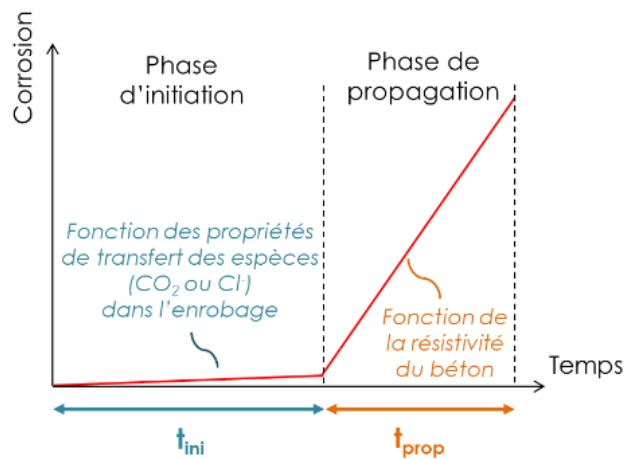


Figure 5 : Évolution de la corrosion avec le temps et propriétés associées

Il a semblé indispensable de prendre en compte l'étape de propagation de la corrosion jusqu'à une limite de service qui correspond au temps nécessaire à la production d'une quantité de produits de corrosion

supposée conduire à l'apparition de la première fissure, 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.

3.2.1 Corrosion liée à la carbonatation (classes XC)

Pour les classes XC, la démarche est celle utilisée dans la plupart des modèles analytiques (type *fib* model-code 2010) avec l'hypothèse que l'évolution de la profondeur de carbonatation x_c [mm] en fonction du temps [an] est contrôlée par la diffusion du CO_2 (1^{ère} loi de Fick) :

$$x_c(t) = v_{nat} k_{HR} k_c t_{eff}^{0,5} \quad \text{Équation 2}$$

Avec v_{nat} : vitesse de carbonatation naturelle [mm/an^{0,5}], k_{HR} : effet de l'humidité relative, k_c : effet de la cure, t_{eff} : temps effectif de carbonatation [an] modulé en fonction des cycles humidification/séchage

t_{ini} [an] est donc le temps mis par le front de carbonatation pour atteindre les armatures.

Le calcul du temps de propagation t_{prop} [an] est déterminé à partir de la relation suivante :

$$t_{prop} = \frac{x_{crit}}{v_{corr}} \quad \text{Équation 3}$$

avec x_{crit} : perte de diamètre critique de l'armature pour une ouverture de fissure de 0,1 mm [Torres-Acosta et Sagues, 2004] et v_{corr} : vitesse de corrosion

Le calcul de v_{corr} est basé sur la loi de Faraday ($v_{corr} = 11,61 i_{corr}$) et la densité de courant de corrosion i_{corr} est déterminée à partir de la relation suivante :

$$i_{corr} = v_0 \frac{k_{HR} k_t}{\rho_0} \quad \text{Équation 4}$$

Avec v_0 : 168.9 $\mu\text{A} \cdot \Omega\text{m} \cdot \text{cm}^{-2}$ (donnée de la littérature), k_{HR} : influence de l'humidité relative, k_T : influence de la température, ρ_0 [$\Omega \cdot \text{m}$] : résistivité électrique du béton en conditions saturées (Lifecon 20004 pp 108 - Duracrete model 2000) (la prise en compte de la résistivité du béton s'appuie sur le retour d'expérience)

Le tableau 2 présente les profondeurs de carbonatation déterminées sur trois ouvrages anciens et les résultats des calculs. On observe une corrélation satisfaisante entre les deux séries de résultats.

Tableau 2 : Evaluation du modèle sur des ouvrages anciens

Ouvrage	Carbonatation mesurée		Carbonatation calculée
	Age [an]	$x_c(t)$ [mm]	$x_c(t)$ [mm]
Pont de la Bruche	66	30	33
Pont de Blondel	47	35	30
Pont de la Vachette	34	17	19

Le tableau 3 présente les critères de performance retenus pour une durée d'utilisation de 100 ans pour les classes XC2 et XC4 avec une modulation basée sur les classes de résistivité à 90 jours (les seuils retenus, exprimés en vitesse caractéristique de carbonatation accélérée [en mm/jour^{0,5}] mesurée à 90 jours, ont été choisis parmi une série prédéfinie qui couvre la gamme de performance recherchée : 1 – 1,4 – 1,8 – 2,2 – 2,6 – 3 – 3,5 – 4). On constate une bonne corrélation entre les différentes approches.

Tableau 3 : Critères de performance pour une durée d'utilisation de 100 ans (classes XC2 et XC4)

Classe d'exposition	Critère de performance (90% valeurs caractéristiques)				
	Modulation basée sur des classes de résistivité à 90j ($\Omega.m$)	Limite de vitesse de carbonatation accélérée [mm/jour ^{0,5}]			
		Base de données	Modèle PerfDuB	ERC*	Synthèse PerfDuB
XC2	< 100	1,8	3,3	2,6	2,6
	100 à 175		3,3	3	3
	> 175		3,3		
XC4	< 100	1,7	1,7	1,8	1,8
	100 à 175		1,9	2,2	
	> 175		2,4		2,2

* seuils issus 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 (approche européenne des « Exposure Resistance Classes » (ERC) du futur Eurocode 2)

Les données d'entrée du modèle en classes XC sont donc des données sur le béton (vitesse de carbonatation naturelle ou accélérée et résistivité), sur l'ouvrage (durée d'utilisation du projet et classe structurale) et sur l'environnement (classe d'exposition et température).

3.2.2 Corrosion liée aux chlorures (classes XS et XD)

Pour les classes XS et XD, la modélisation est basée sur une solution analytique de la 2^{ème} loi de Fick [El Farissi et al., 2018] de même forme que le modèle *fib* (*fib* model-code Bulletin 34 2006) :

$$C(x,t) = c_0 + (c_{s,\Delta x} - c_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \Delta x}{2 \sqrt{D_m(t) \cdot t}} \right) \right] \quad \text{Équation 5}$$

avec $C(x,t)$ [% liant en masse] : concentration en chlorures libres à la profondeur x [mm] et à l'instant t [s], C_0 [% liant en masse] : concentration initiale en chlorures libres (= 0), $C_{s,\Delta x}$ [% liant en masse] : concentration maximale de surface à la profondeur Δx [mm], $D_m(t)$ [m²/s] : coefficient de diffusion moyen sur toute la durée d'exposition et jusqu'à l'instant t [s]

t_{ini} [an] correspond au moment où la concentration $C(x,t)$ aux armatures est égale à la concentration critique en chlorures C_{crit} (prise égale à 0,6% par masse de liant).

Le calcul du temps de propagation t_{prop} [an] est déterminé à partir de la relation suivante :

$$t_{prop} = \mu \left(\frac{S_a}{D} \right) \left(\frac{1}{k i_{corr}} \right) \quad \text{Équation 6}$$

avec $\mu = 1\,629 \text{ A}\cdot\text{an}/\text{m}^3$, S_a [m^2] : perte de section locale calculée d'après [Alonso et al., 1998, modifié par Vidal et al., 2004], D [m] : diamètre nominal de la barre d'acier, k : facteur correspondant à la partie du courant conduisant à la perte de section de l'acier (pris en première approche égal à 0,5), i_{corr} [A/m^2] : densité de corrosion maximale (directement après l'initiation) basée sur des résultats expérimentaux obtenus à partir d'un test expérimental développé par [Chalhoub et al., 2019].

Le tableau 4 présente les critères de performance retenus pour une durée d'utilisation de 100 ans avec une modulation basée sur « l'ageing factor » (les seuils retenus, exprimés en coefficient de migration des chlorures [en $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$] mesuré à 90 jours, ont été choisis parmi une série prédéfinie qui couvre la gamme de performance recherchée : 1 – 1,5 – 2 – 3 – 5 – 9 – 16 – 22 – 28). A noter qu'il a été choisi d'intégrer une dissociation de la classe d'exposition XS3 qui, du fait des phénomènes d'enrichissement de surface, conduit à des risques élevés de corrosion par rapport à la classe XS. Les sous classes XS3m pour la zone de marnage ou de projections et XS3e pour la zone exposée aux embruns sont donc considérées.

Tableau 4 : Critères de performance pour une durée d'utilisation de 100 ans (classes XS3e et XS3m)

Classe d'exposition	Critère de performance (90% valeurs caractéristiques)				
	Modulation basée sur ageing factor	Limite du coefficient de migration des chlorures [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]			
		Base de données	Modèle PerfDuB	ERC	Synthèse PerfDuB
XS3e	0,30 to 0,39	10	4	5	5
	0,40 to 0,49		7	9	9
	0,50 to 0,59		13	16	16
	0,60 et plus		26	22	22
XS3m	0,30 to 0,39	10	2	1,6	2
	0,40 to 0,49		3	2,7	3
	0,50 to 0,59		5	4,6	5
	0,60 et plus		13	7,8	9

On peut noter une différence notable entre les valeurs issues de la base de données et celles issues de la modélisation. Dans la mesure où le retour d'expérience sur ouvrages anciens a montré des faiblesses du système prescriptif actuel concernant certaines de ces classes (XS3 en particulier, avec des ouvrages conçus pour une durée de vie de 100 ans qui montrent des signes visibles de corrosion après 30 ans de service seulement malgré des enrobages conformes), le choix sécuritaire a été fait de prendre en compte principalement les valeurs modélisées.

Les données d'entrée du modèle en classes XS-XD sont des données sur le béton (composition du liant, coefficient de migration des chlorures, porosité accessible à l'eau et résistivité), sur l'ouvrage (durée d'utilisation du projet et classe structurale), et sur l'environnement (classe d'exposition et température). Un coefficient de vieillissement (ageing factor) est aussi introduit pour prendre en compte l'évolution du coefficient de diffusion avec le temps selon le type de liant utilisé.

3.3. Cadre contractuel

Le cadre contractuel définit la méthodologie de justification performantielle associée à une formule de béton donnée. Avant la mise en œuvre du béton, la formulation « performantielle » doit être validée sur la base

d'un dossier technique donnant la composition détaillée de la formule nominale et les limites de variations sur les dosages des différents constituants autorisées conformément aux épreuves d'études en laboratoire, les caractéristiques de l'ensemble des constituants et les résultats de durabilité obtenus.

L'objet de l'alternative par rapport à la formule de béton vis-à-vis de l'approche prescriptive décrite dans la norme NF EN 206/CN peut être de plusieurs natures :

- Rapport Eeff/Leq et/ou dosage Leq mini
- Nature du liant (NF EN 206/CN + FD P 18-011)
- Qualité des granulats (NF EN 206/CN)

En phase d'étude et de convenance, les essais de durabilité et les grandeurs associées à la durabilité doivent être mesurées par un laboratoire bénéficiant de références probantes sur chacun des essais réalisés. Le choix de l'approche performantielle en alternative à l'approche prescriptive devra être validé par les différentes parties, quel que soit l'acteur à l'initiative de la démarche. Ce choix est ensuite intégré dans les spécifications d'exécution.

Un exemple d'essais à réaliser pour la validation d'un béton en classe XC2 en approche performantielle pour une durée de vie de 100 ans (niveau N3) est donné dans le tableau 5 (indépendamment des autres caractéristiques du béton à vérifier comme l'affaissement à l'état frais ou les résistances mécaniques à la compression à 28 jours par exemple). L'essai retenu ici pour justifier la conformité à la classe d'exposition XC2 est l'essai de porosité accessible à l'eau, selon la norme NF P18-459. Les seuils sont établis sur la valeur caractéristique maximale de porosité, $P_{eau,k,90j}$, divisée par la fraction volumique de pâte f_{vp} [en %].

Tableau 5 : Étapes et essais à réaliser (E) avec seuils pour la validation (V) d'un béton en classe XC2 en approche performantielle pour une durée de vie de 100 ans

Etapas	Indicateurs de durabilité généraux et critère de validation	Evaluation XC2 : grandeur associée à la durabilité et critère de conformité
	E : Porosité accessible à l'eau E : Résistivité	E : $P_{eau,k,90j} / f_{vp}$ [%] à 90 jours
Epreuve d'étude (3 gâchées nominales)	E : essais à 28 j V : pas de critère	V : si $\rho < 100 \Omega.m$, seuil $\leq 60 \%$ ou si $\rho > 100 \Omega.m$, seuil $\leq 65 \%$ V : $P_{eau, 90j} \leq \text{Seuil} * f_{vp\text{béton}} - 1,5 * ET$
Epreuve d'étude (formules dérivées, a minima sur l'eau)	E : pas nécessaire V : pas de critère	V : si $\rho < 100 \Omega.m$, seuil $\leq 60 \%$ ou si $\rho > 100 \Omega.m$, seuil $\leq 65 \%$
Epreuve de convenance (gâchée nominale)	E : essais à 28 j V : $P_{eau (convenance)} \leq 1,1 * P_{eau (étude)}$ V : $\rho_{(convenance)} \geq 0,8 * \rho_{(étude)}$	V : si $\rho < 100 \Omega.m$, seuil $\leq 60 \%$ ou si $\rho > 100 \Omega.m$, seuil $\leq 65 \%$
Epreuves de contrôle (2 prélèvements par mois)	E : essais à 28 j V : $P_{eau (contrôle)} \leq 1,1 * P_{eau (étude)}$ V : $\rho_{(contrôle)} \geq 0,8 * \rho_{(étude)}$	V : $P_{eau (contrôle), 90j} \leq 1,1 * P_{eau (limite), 90j}$ et $\rho_{(contrôle), 90j} \geq 0,8 * \rho_{(limite), 90j}$

4. CONCLUSIONS

L'objectif du Projet National PerfDuB (2015-2022) 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. La démarche retenue a été de coupler des données venant de 42 bétons confectionnés spécifiquement durant le projet, des données venant de 19 ouvrages anciens et des résultats 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 [FD P18-480, 2022], norme

française relative à l'approche performantielle dans le domaine de la NF EN 206/CN. Les justifications de l'ensemble des travaux sont dans l'ouvrage collectif [PerfDuB, 2023].

Ainsi, à l'issue de ce Projet National, un nouveau contexte normatif permet la qualification et la mise en œuvre de bétons à faibles impacts environnementaux à partir d'une approche performantielle absolue ou comparative. Il a été conçu par l'ensemble des acteurs de la construction (prescripteurs, fournisseurs de constituants, producteurs de béton, utilisateurs, laboratoires privés et universitaires), avec une approche systématiquement sécuritaire, de manière à apporter une garantie de durabilité équivalente ou supérieure à celle obtenue par l'approche prescriptive usuelle. La démarche développée peut aussi servir à déterminer la durée de vie résiduelle d'une structure et permettre d'envisager ou non sa réhabilitation.

5. REMERCIEMENTS

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

6. REFERENCES

- Alonso C., Andrade C., Rodriguez J. & Diez J.M. (1998), Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion, *Materials and Structures*, Springer, n°31, p.435–441.
- Carcassès M., Chalhoub C., El Farissi A., Turcry P., JMai-Nhu J., Ait-Alaiwa A., Linger L. et Cussigh F. (2021) Modevie project: Proposal of new service-life model, Conference: fib2020 Symposium, Shanghai (China)
- Chalhoub C., François R. & Carcassès M. (2019), Determination of chloride threshold initiating corrosion: A new set-up taking the localized aspect of corrosion into account, *Cement and Concrete Research*, Elsevier, vol.124, p.105825
- FD P18-480 (2022), Béton - Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle
- Hornain H., Arliguie G. (2007) *GranDuBé : Grandeurs associées à la durabilité des bétons*, Presses des Ponts, ISBN285978425X, 9782859784256
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (2010) *Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton. Application de l'approche performantielle*
- Messad S. (2009), *Mise au point d'un essai de vieillissement accéléré de l'attaque sulfatique externe pour l'application du concept de performance équivalente dans le cadre de la norme NF EN 206*, thèse de doctorat de l'université de Toulouse
- PerfDuB (2023) *Approche performantielle de la durabilité des ouvrages en béton - De la qualification en laboratoire au suivi d'exécution*, Collectif IREX, Editions Eyrolles, 2023, ISBN: 978-2-416-00870-2
- Rozière E. (2007) *Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle*, thèse de doctorat en Génie Civil, École Centrale de Nantes
- Rozière E., Cussigh F. (2009) *Méthodologie d'application du concept de performance équivalente des bétons : Recommandations professionnelles provisoires*, Fédération Nationale des Travaux Publics
- Torres-Acosta A. & Sagues A. (2004), Concrete cracking by localized steel corrosion – Geometric effects, *ACI Materials Journal*, American Concrete Institute (ACI), vol.101, p.501–507
- Vidal T., Castel A. & François R. (2004), Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, vol.34, n°1, p.165–174