

Nouvelle approche de la durabilité du béton. Méthodologie et exemples

par **Véronique BAROGHEL-BOUNY**

*Docteur de l'École nationale des Ponts et Chaussées
Ingénieur divisionnaire des Travaux Publics de l'État
Chef de la Section « Microstructure et durabilité des bétons »
au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)*

1. Classes et spécifications relatives aux indicateurs de durabilité	C 2 246 - 2
1.1 Classes relatives aux indicateurs de durabilité (vis-à-vis de la corrosion des armatures)	— 2
1.2 Spécifications en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée	— 4
2. Prédiction de la durée de vie d'un ouvrage neuf ou existant	— 8
2.1 Introduction	— 8
2.2 Témoins de durée de vie. Définitions dans le cas de la corrosion des armatures	— 8
2.3 Témoins de durée de vie. Méthodes de mesure et exemples dans le cas de la corrosion des armatures	— 9
2.4 Modèles prédictifs	— 10
2.5 Méthodologie de prédiction de la durée de vie. Exemples dans le cas de la corrosion des armatures	— 11
3. Conclusions et applications : « boîte à outils » proposée	— 13
Pour en savoir plus	Doc. C 2 247

Cet article avec l'article [C 2 245] décrivent les grandes lignes d'une approche performantielle, globale et prédictive de la durabilité des structures en béton armé, fondée sur la notion d'indicateurs de durabilité, et combinant mesures en laboratoire et codes de calcul (modèles). Cette approche a été développée pour la prévention de la corrosion des armatures et des dégradations générées par l'alcali-réaction dans le cadre du groupe de travail de l'Association Française de Génie Civil « **Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages - Indicateurs de durabilité** » et a fait l'objet d'un Guide.

La méthodologie proposée pour la mise en œuvre de cette nouvelle approche de la durabilité est présentée dans cet article. Elle inclut notamment :

- un système de classes (accompagnées de valeurs-seuil) définies pour chaque indicateur de durabilité, afin d'évaluer la durabilité « potentielle » des bétons armés ;

- des spécifications relatives aux indicateurs, fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée pour l'ouvrage, en vue de sélectionner ou de qualifier des formules de béton pour cet ouvrage.

La démarche proposée pour la prédiction de la durabilité en phase de conception, ou pour le diagnostic et l'évaluation de la durée de vie résiduelle de structures existantes, dégradées ou non, est ensuite présentée. Elle s'articule autour de trois outils essentiels :

- un ou des modèles prédictifs de durée de vie ;

- les indicateurs de durabilité précédemment mentionnés (données d'entrée des modèles) ;
- des témoins de durée de vie (sorties des modèles).

Les caractéristiques requises pour les modèles sont précisées et des méthodes de mesure des témoins de durée de vie, applicables en laboratoire sur éprouvettes ou sur prélèvements issus d'ouvrages, sont de plus proposées.

Des exemples d'application de l'approche sont en outre donnés dans cet article, relativement à la prévention de la corrosion des armatures, induite par la carbonatation ou la pénétration des chlorures dans le béton.

Comme il va être illustré dans cet article, cette nouvelle approche offre une « boîte-à-outils », c'est-à-dire une méthodologie complète pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité.

L'étude complète du sujet comprend les articles :

- [C 2 245] « Nouvelle approche de la durabilité du béton. Indicateurs et méthodes » ;
- [C 2 246] « Nouvelle approche de la durabilité du béton. Méthodologie et exemples » ;
- [Doc. C 2 247] « Nouvelle approche de la durabilité du béton. Pour en savoir plus ».

1. Classes et spécifications relatives aux indicateurs de durabilité

1.1 Classes relatives aux indicateurs de durabilité (vis-à-vis de la corrosion des armatures)

1.1.1 Système de classes proposé relativement aux indicateurs de durabilité généraux

Pour chaque indicateur de durabilité, des classes de durabilité « potentielle » vis-à-vis de la corrosion des armatures initiée par la carbonatation ou par les chlorures peuvent être définies. Le tableau 1 présente le système de classes (durabilité « potentielle » de très faible à très élevée) établi relativement aux indicateurs de durabilité généraux sur la base des travaux du groupe AFGC [16]. On notera que des classes ont également été proposées relativement aux indicateurs de durabilité de substitution porosité accessible au mercure et résistivité électrique. Celles-ci figurent dans la référence [16].

Les bornes des classes relatives à la teneur en portlandite Ca(OH)_2 indiquées dans le tableau 1 correspondent à des formules simples. Ces valeurs sont susceptibles de variations notables selon la valeur des autres indicateurs (perméabilité, coefficient de diffusion...).

Exemple : ainsi, malgré une teneur en portlandite faible, voire très faible, les BHP et BTHP ont généralement une durabilité « potentielle » élevée ou très élevée vis-à-vis de la corrosion des armatures [16].

Les classes proposées dans le tableau 1 sont applicables pour des mesures réalisées en laboratoire à $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, selon les méthodes décrites dans cet article, sur des éprouvettes conservées dans l'eau pendant 90 jours au plus après le coulage et avant le démarrage des essais (moyennes sur au moins 3 éprouvettes). Les valeurs limites figurant dans le tableau 1 sont basées sur les

valeurs des indicateurs de durabilité obtenues expérimentalement dans le cadre de diverses études et recherches sur une large gamme de matériaux allant des B20 aux BTHP.

1.1.2 Méthodologie d'évaluation de la durabilité « potentielle » d'un béton armé donné

Pour évaluer la durabilité « potentielle » d'un béton armé donné, il s'agira de comparer les valeurs des indicateurs de durabilité qui auront été quantifiés pour ce béton, avec les classes et les valeurs limites proposées dans le tableau 1, tel qu'illustré en figure 1 (processus n° 1). La quantification des indicateurs s'effectuera soit expérimentalement, sur des éprouvettes fabriquées en laboratoire et dans les conditions requises par les protocoles d'essai, soit en se reportant à une base de données dans le cas où la formule a déjà fait l'objet d'études. Le lecteur se reportera au tableau 1 de l'article [C 2 245], pour la précision de la mesure relative à chaque méthode d'essai.

Ceci constitue une première utilisation très simple des indicateurs de durabilité. Cette évaluation peut permettre au concepteur ou au maître d'œuvre de « dégrossir » un problème et d'évaluer une durabilité *a priori* ne dépendant que du matériau constitutif de l'ouvrage (béton).

Exemple : on pourra ainsi sur la base des classes proposées, comparer la durabilité « potentielle » de différents bétons et classer ces bétons, dans le but de faire une sélection ou d'optimiser la formule selon des critères fixés *a priori*.

1.1.3 Illustrations

Afin d'illustrer la pertinence des classes proposées pour les indicateurs porosité accessible à l'eau, coefficient de diffusion apparent des chlorures et perméabilité apparente au gaz, et de mettre en évidence le domaine de valeurs couvert par ces paramètres, les résultats expérimentaux obtenus sur une large gamme de bétons sont présentés respectivement en figures 2, 3 et 4, en fonction de la résistance moyenne à la compression mesurée à 28 jours. Les classes proposées figurent sur les graphiques.

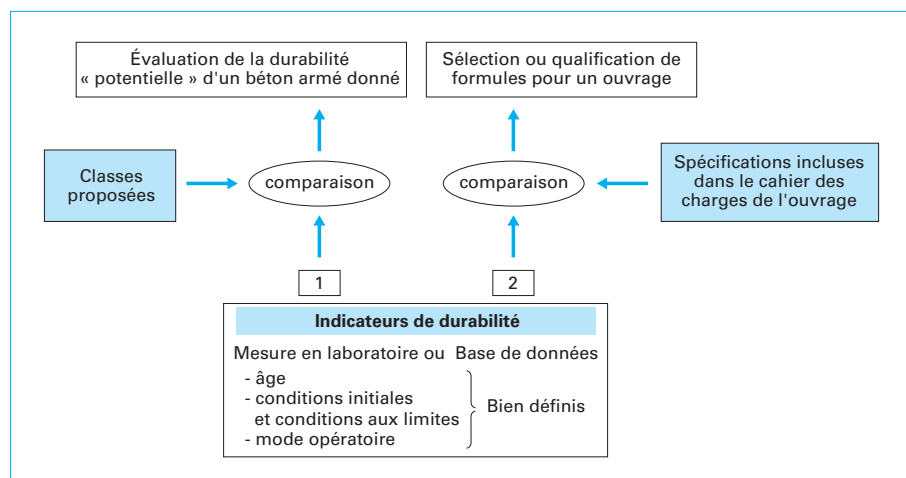


Figure 1 – Mise en œuvre de l'approche performantielle développée sur la base d'indicateurs de durabilité :
 – processus n° 1 : évaluation de la durabilité « potentielle » d'un béton armé donné ;
 – processus n° 2 : sélection ou qualification de formules de béton pour un ouvrage donné

Tableau 1 – Durabilité « potentielle » vis-à-vis de la corrosion des armatures : classes et valeurs limites (indicatives) relatives aux indicateurs de durabilité généraux (1)

Indicateurs de durabilité généraux	Classes et valeurs limites				
	Durabilité potentielle				
	Très faible (TF)	Faible (F)	Moyenne (M)	Élevée (E)	Très élevée (TE)
Porosité accessible à l'eau P_{eau} (en %)	> 16	14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9
Coefficient de diffusion effectif des chlorures D_{eff} (en $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	> 8	2 à 8	1 à 2	0,1 à 1	< 0,1
Coefficient de diffusion apparent des chlorures (mesuré par essai de migration) $D_{\text{app(mig)}}$ (en $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	> 50	10 à 50	5 à 10	1 à 5	< 1
Coefficient de diffusion apparent des chlorures (mesuré par essai de diffusion) $D_{\text{app(dif)}}$ (en $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)				< 5	
Perméabilité apparente aux gaz (2) $K_{\text{app(gaz)}}$ (en 10^{-18} m^2)	> 1 000	300 à 1 000	100 à 300	30 à 100	< 30
Perméabilité à l'eau liquide (à P_{max} , par mesure directe du flux, après saturation) k_{liq} (en 10^{-18} m^2)	> 10	1 à 10	0,1 à 1	0,01 à 0,1	< 0,01
Teneur en Ca(OH)_2 (3) (% massique par rapport au ciment)	< 10	10 à 13	13 à 20	20 à 25	≥ 25

(1) Les valeurs indiquées correspondent à des mesures réalisées selon les méthodes décrites dans l'article [C 2 245] sur des éprouvettes conservées préalablement dans l'eau. Ces valeurs sont valables pour des bétons âgés de 3 mois au plus.
 (2) Mesurée avec un perméamètre à charge constante à $P_{\text{entrée}} = 0,2 \text{ MPa}$ et après étuvage à $T = 105^\circ \text{C}$ (taux de saturation $s = 0$).
 (3) Pour des formules simples (par exemple sans addition pouzzolanique).

Les valeurs des indicateurs sont plutôt bien corrélées avec la résistance moyenne à la compression. Néanmoins, on constate des écarts par rapport à une simple relation linéaire.

Exemple : les bétons ordinaires contenant de fortes quantités de cendres volantes (ici de 20 à 54 %) présentent un très faible coefficient de diffusion par rapport à des formules simples (sans addition minérale) de résistance mécanique similaire et se trouvent ainsi dans la classe de durabilité « potentielle » supérieure. Certains ont des propriétés très proches de celles des BHP (cf. figure 4).

Ainsi, la résistance mécanique est insuffisante pour évaluer la durabilité « potentielle » des bétons armés (notamment avec addi-

tions) et pour sélectionner une formule devant satisfaire des critères relatifs à la durabilité.

Ces résultats illustrent que le classement d'une série de bétons en fonction de la valeur des indicateurs peut être différent de celui fourni par la résistance mécanique à la compression à 28 jours, mettant clairement en évidence la pertinence et l'utilité de l'approche performantielle de la durabilité proposée. Le lecteur pourra se reporter également aux références [13] et [19] où est présentée une analyse plus détaillée des indicateurs en fonction de différents paramètres de formulation.

Comme nous venons de le voir, il est possible d'évaluer la durabilité « potentielle », sur la base du tableau 1, selon chaque indicateur de durabilité quantifié. Le tableau 2, rassemblant les résultats

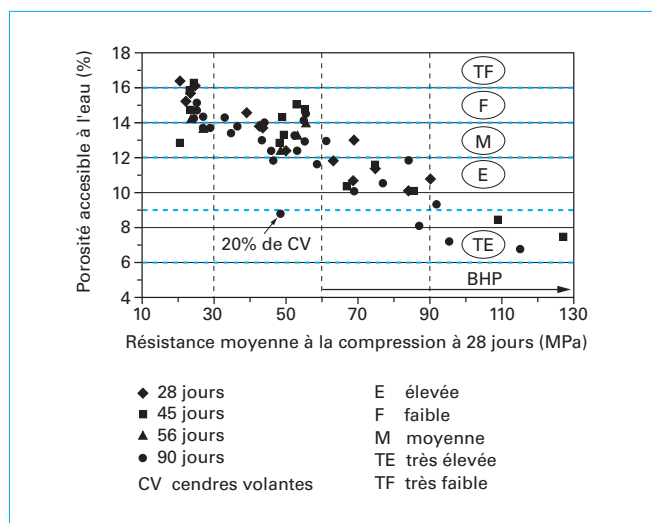


Figure 2 – Classes de durabilité « potentielle » et valeurs expérimentales (moyennes) de porosité accessible à l'eau mesurée par pesée hydrostatique sur éprouvettes de béton conservées dans l'eau en laboratoire, en fonction de la résistance moyenne à la compression mesurée à 28 jours

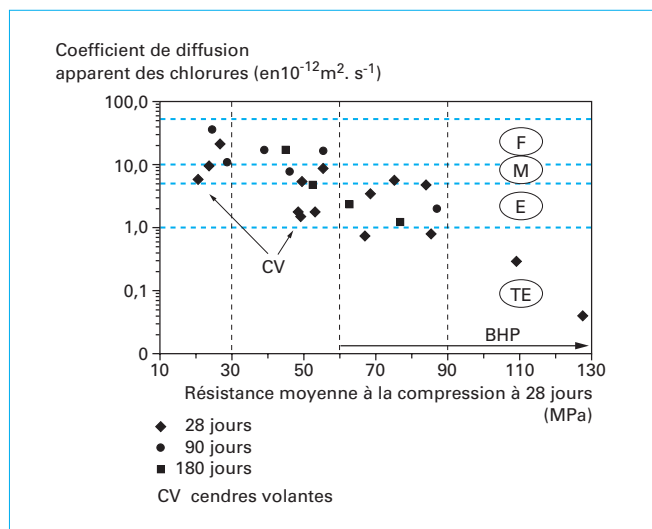


Figure 3 – Classes de durabilité « potentielle » et valeurs expérimentales (moyennes) de coefficient de diffusion apparent des chlorures obtenu à partir d'essais de migration en régime non stationnaire et en conditions saturées (méthode de Tang & Nilsson [73]) sur éprouvettes de béton conservées dans l'eau en laboratoire, en fonction de la résistance moyenne à la compression mesurée à 28 jours

obtenus sur une série de bétons testés à l'âge de 90 jours, illustre que dans l'ensemble les qualifications fournies par différents indicateurs sont cohérentes, mais que dans certains cas la qualification peut varier suivant le paramètre considéré, mettant en évidence le caractère complémentaire des indicateurs sélectionnés. Par exemple, la perméabilité et le coefficient de diffusion caractérisent des processus physiques différents. Il est donc également intéressant

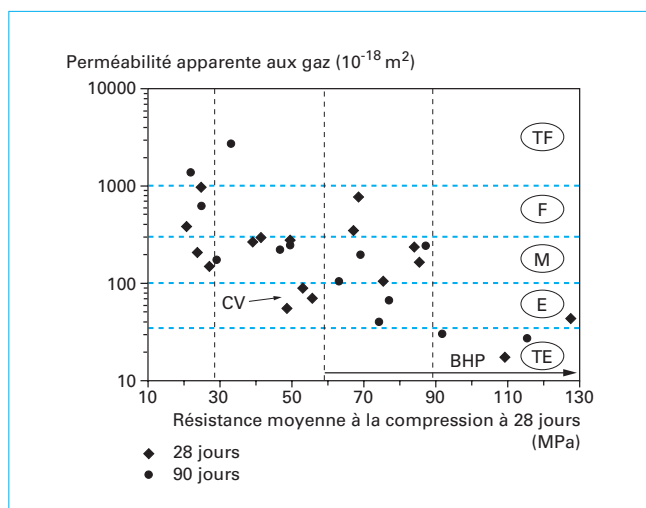


Figure 4 – Perméabilité apparente aux gaz, mesurée (à $P_{\text{entrée}} = 0,2 \text{ MPa}$) sur éprouvettes de béton conservées dans l'eau en laboratoire après séchage à $T = 105 \pm 5 \text{ °C}$ selon le protocole AFPC-AFREM [3], en fonction de la résistance moyenne à la compression mesurée à 28 jours

d'évaluer la durabilité « potentielle » au moyen d'une appréciation globale, résultant de celles relatives à chaque indicateur de durabilité choisi et pondérées en fonction des données du problème (dégradations envisageables, conditions environnementales, ...). Ceci est illustré dans le tableau 2, où une pondération identique a été choisie pour chaque indicateur.

1.2 Spécifications en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée

1.2.1 Objectif

Dans le cadre de la sélection ou de la qualification d'une formule de béton pour un ouvrage donné, les critères à prescrire (valeurs limites pour les indicateurs de durabilité) devront dépendre des conditions spécifiques de l'ouvrage (notamment son environnement) et des exigences du binôme concepteur-utilisateur (notamment en termes de performances et de durée de vie). La décision finale sera basée sur un compromis (optimisation) entre la durabilité de l'ouvrage et son coût de réalisation. Pour cette raison, la réalisation d'études de conception spécifiques à l'ouvrage considéré est fortement recommandée.

Afin d'aider le concepteur dans cette démarche, des spécifications types pour le matériau constitutif béton peuvent être proposées pour différents types d'environnement et différentes valeurs de durée de vie visée. Pour les spécifications proposées ici, les types d'environnement choisis sont basés sur les classes d'exposition de la norme NF EN 206-1 et des Eurocodes, avec l'objectif d'être plus synthétique et de ne prendre en compte que ceux concernés par la dégradation considérée (cf. tableau 3, pour la corrosion des armatures, et tableau 4 pour l'alcali-réaction). La correspondance avec les classes de l'EN 206-1 et des Eurocodes figure également dans le tableau 3 (pour les classes autres que XF1 à XF4 et XA1 à XA3, qui ne concernent pas la corrosion des armatures) et dans le tableau 4 (pour les classes autres que XA1 à XA3, qui ne concernent pas l'alcali-réaction), avec ses restrictions. Les durées

Tableau 2 – Valeurs moyennes des indicateurs de durabilité déterminées sur des éprouvettes de béton conservées dans l'eau en laboratoire pendant 90 jours. Durabilité « potentielle » (F, M, E, TE) selon chaque indicateur et durabilité « potentielle » globale avec pondération identique pour chaque indicateur (1)

Bétons (classés selon $R_{moy,28}$)	E/C (2)	$E/liant$	$R_{moy,28}$ (MPa)	P_{eau} (%)	$K_{app(gaz)} (s = 0)$ (en $10^{-18} m^2$)	$D_{ns(mig)}^{(3)}$ ou $D_{ns(dif)}^{(4)}$ (en $10^{-12} m^2 \cdot s^{-1}$)	Durabilité « potentielle » globale
M25	0,84	0,84	25,1	14,9 (F)	632 (F)	37,6 (3) (F)	Faible (F)
CFA	0,74	0,48	28,9	13,7 (M)	173 (M)	2,1 (4) (E)	Moyenne (M)
B32	0,44	0,44	46,5	11,8 (E)	217 (M)	8,6 (4) (M)	Moyenne (M)
BO	0,49	0,49	49,5	12,4 (M)	245 (M)	7,8 (3) (M)	Moyenne (M)
B60	0,34	0,34	68,8	10,1 (E)	196 (M)	1,2 (4) (E)	Élevée (E)
B80-S	0,35	0,32	76,9	10,5 (E)	67 (E)	1,2 (3) (E)	Élevée (E)
B80-C	0,64	0,37	87,0	8,1 (TE)	242 (M)	2,0 (3) (E)	Élevée (E)
B80-SN	0,30	0,28	91,9	9,3 (E)	30 (TE)	0,68 (4) (E)	Élevée (E)

(1) Porosité accessible à l'eau (P_{eau}).Perméabilité apparente aux gaz ($K_{app(gaz)}$) à taux de saturation $s = 0$.Coefficient de diffusion apparent des chlorures mesuré en régime non stationnaire par essai de migration ($D_{ns(mig)}$) ou de diffusion ($D_{ns(dif)}$).(2) E/C rapport eau sur ciment.**Tableau 3 – Types d'environnement influençant la corrosion des armatures**

Processus initiateur	N°	Type d'environnement	Classes d'exposition correspondantes de l'EN 206-1 ou des Eurocodes
Carbonatation	1	• Sec et très sec ($HR < 65 \%$) • Humide en permanence (γ compris immersion en eau douce)	X0 et XC1 (limités au climat sec)
	2	Humide, rarement sec ($HR > 80 \%$)	XC2
	3	Humidité modérée ($65 < HR < 80 \%$)	XC3
	4	Périodes d'humidité alternant avec des périodes sèches sans chlorure (sels de déverglaçage, embruns...)	XC4
Pénétration des chlorures	5	Exposition aux sels marins ou de déverglaçage, mais pas de contact direct avec l'eau de mer • 5.1 : $[Cl^-]$ faible : concentration en chlorures libres à la surface $C_s \leq 10 g \cdot L^{-1}$ • 5.2 : $[Cl^-]$ forte : concentration en chlorures libres à la surface $C_s \geq 100 g \cdot L^{-1}$	XS1, XD1 et XD3 (1)
	6	Immersion dans l'eau contenant des chlorures	XS2 et XD2
	7	Zone de marnage	XS3

(1) Dans le cas XD3, les cycles de gel-dégel peuvent constituer un facteur aggravant pour le « béton d'enrobage » et de là pour la corrosion des armatures. Dans ce dernier cas, la classe XD3 correspondra au type d'environnement 5.2, ou éventuellement au type d'environnement 7.

de vie choisies correspondent aux valeurs les plus fréquemment rencontrées dans les projets d'ouvrages (cf. [C 2 245], § 1).

1.2.2 Spécifications types pour la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures

Le tableau 5 (respectivement le tableau 6) synthétise les spécifications types proposées pour la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures induite par la carbonatation (respectivement par les chlorures). Ces spécifications sont basées sur les classes proposées au paragraphe 1.1.1 (cf. tableau 1) et sur les enrobages minimaux imposés par les règlements français et européen. Ces critères ont été établis sur la base des données expérimentales précédemment évoquées (cf. § 1.1.1) et ont été vérifiés par des simulations numériques effectuées à l'aide de modèles empiriques (approche déter-

ministe ou probabiliste) et physiques (cf. § 2 et [16]). Ils correspondent à des mesures réalisées selon les méthodes décrites sur des éprouvettes conservées dans l'eau pendant 3 mois au plus après le coulage.

Les spécifications types proposées se présentent sous la forme d'un tableau croisé : pour chaque niveau d'exigence (par exemple, durée de vie) et pour chaque type d'environnement, un panel d'indicateurs doit être quantifié et des critères doivent être satisfaits. Ces spécifications constituent un minimum indispensable. On remarquera toutefois qu'il n'est pas nécessaire de déterminer systématiquement tout le panel des indicateurs identifiés dans l'article [C 2 245] (§ 3.2). Le nombre requis va de 1 à 4 selon le cas considéré (cf. tableaux 5 et 6). En effet, quand le niveau d'exigence et l'agressivité du milieu environnant augmentent, le nombre d'indicateurs à contrôler croît également et les critères deviennent

Tableau 4 – Types d’environnement influençant l’alcali-réaction		
N°	Type d’environnement	Classes d’exposition correspondantes de l’EN 206-1 ou des Eurocodes
1	• Sec et très sec • Humidité modérée avec peu d’alternances	X0 et XC1 (limités au climat sec)
2	Périodes d’humidité alternant avec des périodes sèches	X0 XC1, XC3, XC4 XD1, XD3, XS1, XS3 XF1, XF3
3	Immersion en eau douce ou de mer ou fortes doses de sels de déverglaçage	X0 XC1, XC2, XD2, XS2, XS3 XF2, XF4

plus sévères. Pour les niveaux d'exigence 1 et 2, les spécifications relatives à la durabilité se réduisent à la vérification d'une simple valeur de porosité, accessible à partir d'un essai très facile à réaliser et disponible dans tout laboratoire de proximité, et ce quel que soit le type d'environnement. Ceci représente un enjeu considérable pour le domaine du bâtiment, couvert par ces deux niveaux d'exigence. On peut en effet espérer dans ce domaine une mise en pratique effective à court terme de cette approche puisque celle-ci n'engendrera pas de contraintes supplémentaires notables (en termes de coût notamment). Elle devrait par contre permettre d'améliorer notablement la qualité du bâti et de résoudre le problème énorme de la durée de vie réelle (effective) trop courte de bon nombre de ces ouvrages résultant d'une qualité déficiente, dégradant le cadre de vie et générant des démolitions anticipées à impact socio-économique très négatif.

On notera que les spécifications proposées dans les tableaux 5 et 6 ne font pas intervenir la teneur en portlandite. Toutefois, pour ce qui concerne la corrosion induite par carbonatation, des spécifications relatives à cet indicateur ont été proposées en solution alternative dans la référence [16]. Par ailleurs, on verra au paragraphe 2.4.2, que cet indicateur intervient en tant que donnée d'entrée dans les modèles prédictifs de carbonatation.

Le principe de l'approche proposée est d'offrir un cadre et une méthodologie rigoureux pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité, tout en laissant néanmoins plus de liberté au concepteur. Il est par conséquent parfaitement envisageable d'adapter les critères proposés. Par exemple, des critères moins restrictifs peuvent être fixés dans le cas où un enrobage supérieur à la valeur réglementaire est choisi. Le lecteur pourra se reporter à l'exemple relatif à la résistivité électrique présenté dans la référence [16]. À l'inverse, un critère supplémentaire peut être ajouté si nécessaire (sur la base des classes et des valeurs limites indiquées dans le tableau 1), pour plus de sécurité, selon les spécificités du problème à traiter et en fonction du budget alloué à l'étude. De même, les limites peuvent être redéfinies pour des bétons particuliers du fait de leurs constituants (granulats légers, par exemple) ou de leur process de fabrication (démoulage immédiat, par exemple).

À l'extrême et comme précédemment évoqué, les indicateurs de durabilité généraux sélectionnés peuvent être remplacés par d'autres paramètres plus faciles à déterminer avec les techniques disponibles, plus spécifiques au problème posé, ou plus adaptés aux modèles mis en œuvre, tels que les indicateurs de substitution mentionnés dans l'article [C 2 245] (§ 3.4). Des exemples sont donnés dans la référence [16]. Ces modifications seront réalisées sous

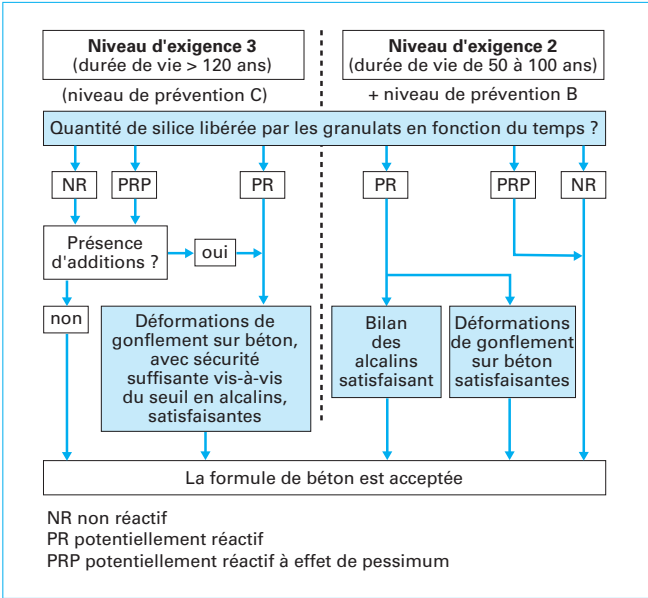


Figure 5 – Organigramme d'utilisation des indicateurs de durabilité spécifiques à l'alcali-réaction : sélection ou qualification d'une formule de béton pour un ouvrage donné, d'après [16]

réserve de validations préalables et en se basant sur les classes et les valeurs limites indiquées dans le tableau 1 ou dans d'autres systèmes de classement disponibles.

On notera pour finir que les valeurs indiquées dans les spécifications types proposées pourront encore évoluer en fonction du retour d'expérience et du développement de méthodes ou de modèles plus précis.

1.2.3 Spécifications types pour la durabilité vis-à-vis de l'alcali-réaction

La politique de prévention des désordres dus à l'alcali-réaction [46] repose sur un tableau qui fixe des niveaux de prévention A, B et C en fonction de la catégorie de l'ouvrage et de l'environnement auquel il est soumis. Il est possible de relier ces niveaux de prévention A, B et C à des durées de vie (car plus le niveau de prévention sera élevé, plus la durée de vie de l'ouvrage sera augmentée) et donc à des niveaux d'exigence en termes de spécifications vis-à-vis de la durabilité (1, 2 ou 3). C'est la démarche qui a été adoptée dans la référence [16] pour établir des spécifications types pour la durabilité vis-à-vis de l'alcali-réaction (cf. tableau 7). Pour le niveau de prévention A, aucune spécification supplémentaire par rapport aux recommandations [46] n'est requise vis-à-vis de la durabilité. Pour les niveaux B et C, interviennent les indicateurs de durabilité spécifiques à l'alcali-réaction (cf. [C 2 245], § 3.3) conformément à l'organigramme donné en figure 5. Le lecteur pourra se reporter à la référence [16] pour plus de détails.

1.2.4 Méthodologie de sélection ou de qualification de formules de béton pour un ouvrage donné

Pour sélectionner ou qualifier une formule de béton en vue de la construction d'un ouvrage, on vérifiera que l'ensemble des spéci-

Tableau 5 – Exemple de spécifications proposées pour la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures initiée par la carbonatation, en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée, et dans le cas où l'enrobage est égal à 30 mm (1)

Durée de vie exigée / Catégorie d'ouvrage / Niveau d'exigence	Type d'environnement			
	1	2	3	4
	Sec et très sec (HR < 65 %) ou humide en permanence	Humide (HR > 80 %)	Modérément humide (65 < HR < 80 %)	Cycles fréquents d'humidification-séchage
< 30 ans Niveau 1	$P_{\text{eau}} < 16$	$P_{\text{eau}} < 16$	$P_{\text{eau}} < 15$	$P_{\text{eau}} < 16$
de 30 à 50 ans Bâtiment Niveau 2	$P_{\text{eau}} < 16$	$P_{\text{eau}} < 16$	$P_{\text{eau}} < 14$	$P_{\text{eau}} < 14$
de 50 à 100 ans Bâtiment et ouvrages de génie civil Niveau 3	$P_{\text{eau}} < 14$	$P_{\text{eau}} < 14$	$P_{\text{eau}} < 12$ $K_{\text{app(gaz)}} < 100$	$P_{\text{eau}} < 12$ $k_{\text{liq}} < 0,1$
de 100 à 120 ans Grands ouvrages Niveau 4	$P_{\text{eau}} < 12$ $K_{\text{app(gaz)}} < 100$	$P_{\text{eau}} < 12$ $K_{\text{app(gaz)}} < 100$	$P_{\text{eau}} < 9$ $K_{\text{app(gaz)}} < 30$	$P_{\text{eau}} < 9$ $K_{\text{app(gaz)}} < 30$ $k_{\text{liq}} < 0,01$
> 120 ans Ouvrages dits exceptionnels Niveau 5	$P_{\text{eau}} < 9$ $K_{\text{app(gaz)}} < 30$	$P_{\text{eau}} < 9$ $k_{\text{liq}} < 0,01$	$P_{\text{eau}} < 9$ $K_{\text{app(gaz)}} < 30$ $k_{\text{liq}} < 0,01$	$P_{\text{eau}} < 9$ $D_{\text{app(mig)}} < 1$ $K_{\text{app(gaz)}} < 30$ $k_{\text{liq}} < 0,01$

(1) P_{eau} est donnée en %.

$D_{\text{app(mig)}}$ est donné en $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

$K_{\text{app(gaz)}}$ (à taux de saturation $s = 0$ et à $P_{\text{entrée}} = 0,2 \text{ MPa}$) et k_{liq} sont données en 10^{-18} m^2 .

Les valeurs correspondent à des mesures réalisées selon les méthodes décrites dans l'article [C 2 245] sur des éprouvettes conservées dans l'eau pendant 3 mois au plus après le coulage.

Tableau 6 – Exemple de spécifications proposées pour la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures initiée par les chlorures, en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée, et dans le cas où l'enrobage est égal à 50 mm (1)

Durée de vie exigée / Catégorie d'ouvrage / Niveau d'exigence ↓	Type d'environnement			
	5		6	7
	Exposition aux sels marins ou de déverglaçage		Immersion dans l'eau contenant des chlorures	Zone de marnage
	5.1 [Cl ⁻] faible	5.2 [Cl ⁻] forte		
< 30 ans Niveau 1	$P_{\text{eau}} < 16$	$P_{\text{eau}} < 14$	$P_{\text{eau}} < 15$	$P_{\text{eau}} < 14$
de 30 à 50 ans Bâtiment Niveau 2	$P_{\text{eau}} < 15$	$P_{\text{eau}} < 11$	$P_{\text{eau}} < 13$	$P_{\text{eau}} < 11$
de 50 à 100 ans Bâtiment et ouvrages de génie civil Niveau 3	$P_{\text{eau}} < 14$	$P_{\text{eau}} < 11$ $D_{\text{app(mig)}} < 2$ $k_{\text{liq}} < 0,1$	$P_{\text{eau}} < 13$ $D_{\text{app(mig)}} < 7$	$P_{\text{eau}} < 11$ $D_{\text{app(mig)}} < 3$ $k_{\text{liq}} < 0,1$
de 100 à 120 ans Grands ouvrages Niveau 4	$P_{\text{eau}} < 12$ $D_{\text{app(mig)}} < 20$ $k_{\text{liq}} < 0,1$	$P_{\text{eau}} < 9$ $D_{\text{app(mig)}} < 1$ $K_{\text{app(gaz)}} < 30$ $k_{\text{liq}} < 0,01$	$P_{\text{eau}} < 12$ $D_{\text{app(mig)}} < 5$	$P_{\text{eau}} < 10$ $D_{\text{app(mig)}} < 2$ $K_{\text{app(gaz)}} < 100$ $k_{\text{liq}} < 0,05$
> 120 ans Ouvrages dits exceptionnels Niveau 5	$P_{\text{eau}} < 9$ $D_{\text{app(mig)}} < 10$ $K_{\text{app(gaz)}} < 30$ $k_{\text{liq}} < 0,01$	$P_{\text{eau}} < 9$ $D_{\text{app(mig)}} < 1$ $K_{\text{app(gaz)}} < 30$ $k_{\text{liq}} < 0,01$	$P_{\text{eau}} < 9$ $D_{\text{app(mig)}} < 1$	$P_{\text{eau}} < 9$ $D_{\text{app(mig)}} < 1$ $K_{\text{app(gaz)}} < 30$ $k_{\text{liq}} < 0,01$

(1) P_{eau} est donnée en %.

$D_{\text{app(mig)}}$ est donné en $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

$K_{\text{app(gaz)}}$ (à taux de saturation $s = 0$ et à $P_{\text{entrée}} = 0,2 \text{ MPa}$) et k_{liq} sont données en 10^{-18} m^2 .

Les valeurs correspondent à des mesures réalisées selon les méthodes décrites dans l'article [C 2 245] sur des éprouvettes conservées dans l'eau pendant 3 mois au plus après le coulage.

Tableau 7 – Niveau de prévention en fonction du type d’environnement et de la durée de vie exigée			
Durée de vie exigée / Catégorie d’ouvrage / Niveau d’exigence ↓	Type d’environnement		
	1 (sec ou modérément humide)	2 (cycles d’humid-séchage)	3 (immersion ou présence de sels)
de 5 à 50 ans Ouvrages provisoires + produits préfabriqués Niveau 1 (risque faible ou acceptable)	A	A	A
de 50 à 100 ans La plupart des bâtiments et ouvrages de génie civil Niveau 2 (risque peu tolérable)	A	B	B
> 120 ans (ou bien exigence d’absence de fissuration, même en cas de durée de vie plus courte, pour des raisons de sécurité ou d’esthétique) Ouvrages dits exceptionnels Niveau 3 (risque inacceptable)	C	C	C

fications incluses dans le cahier des charges de l’ouvrage, établies selon les recommandations faites par exemple ici (notamment les spécifications types proposées), sont respectées, tel qu’illustré en figure 1 (processus n° 2). Cette vérification s’effectuera en mesurant, sur des éprouvettes fabriquées en laboratoire et dans les conditions requises par les protocoles d’essai (cf. [C 2 245], § 6), les différents indicateurs de durabilité apparaissant dans les spécifications.

2. Prédiction de la durée de vie d’un ouvrage neuf ou existant

2.1 Introduction

La nouvelle approche de la durabilité peut également être utilisée sous un aspect plus quantitatif à des fins de prédiction de la durée de vie d’un ouvrage neuf en phase de conception, ou de diagnostic et de prédiction de la durée de vie résiduelle d’ouvrages existants (éventuellement dégradés).

La démarche proposée pour la prédiction de la durabilité s’articule dans ce cas autour de trois outils essentiels : les indicateurs de durabilité, le(s) modèle(s) prédictif(s) et les témoins de durée de vie (cf. figure 6).

2.2 Témoins de durée de vie. Définitions dans le cas de la corrosion des armatures

Les modèles prédictifs doivent permettre, à partir des données d’entrée que constituent les indicateurs de durabilité, de fournir en tant que « sorties » des valeurs numériques pour les témoins de durée de vie. Dans le cas de la corrosion des armatures, les « témoins » de durée de vie sont définis par :

— **environnement sans chlorure** : profondeur de carbonatation (c’est-à-dire zone où $\text{pH} \leq 9$) et évolution en fonction du temps, ou profil de teneur en CaCO_3 (ou de Ca(OH)_2 résiduelle) et évolution en fonction du temps ;

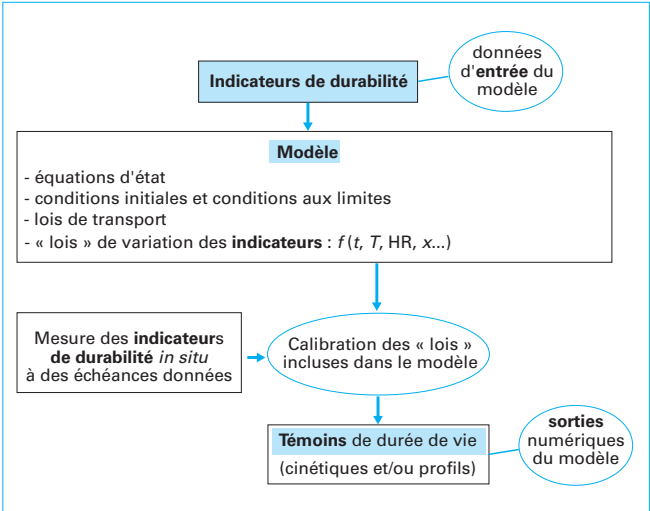


Figure 6 – Mise en œuvre de l’approche développée pour la prédiction de la durée de vie : connexions entre les trois outils fondamentaux (indicateurs de durabilité, modèle(s) prédictif(s) et témoins de durée de vie). Rôle central du modèle

— **en présence de chlorures** : profondeur de pénétration des chlorures (c’est-à-dire zone où $[\text{Cl}^-]_{\text{libres}} \geq [\text{Cl}^-]_{\text{libres}}^{\text{crit}}$) et évolution en fonction du temps, ou profil de $[\text{Cl}^-]_{\text{libres}}$ et évolution en fonction du temps.

On notera que $[\text{Cl}^-]_{\text{libres}}^{\text{crit}}$ dépend en fait de $[\text{OH}^-]$. Ce dernier paramètre est difficile à déterminer directement dans un béton. On peut toutefois estimer sa valeur à partir de la teneur en alcalins du ciment, de la teneur en ciment du béton et du volume poreux du béton. On prend classiquement un rapport $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ compris entre 0,6 et 1. Ceci conduit généralement à $[\text{Cl}^-]_{\text{libres}}^{\text{crit}}$ de l’ordre de 0,4 % par rapport à la masse de ciment, pour un béton non carbonaté, soit 6,7 g par litre de solution interstitielle.

Naturellement d’autres témoins de durée de vie sont envisageables, en fonction des possibilités de calcul et de mesure.

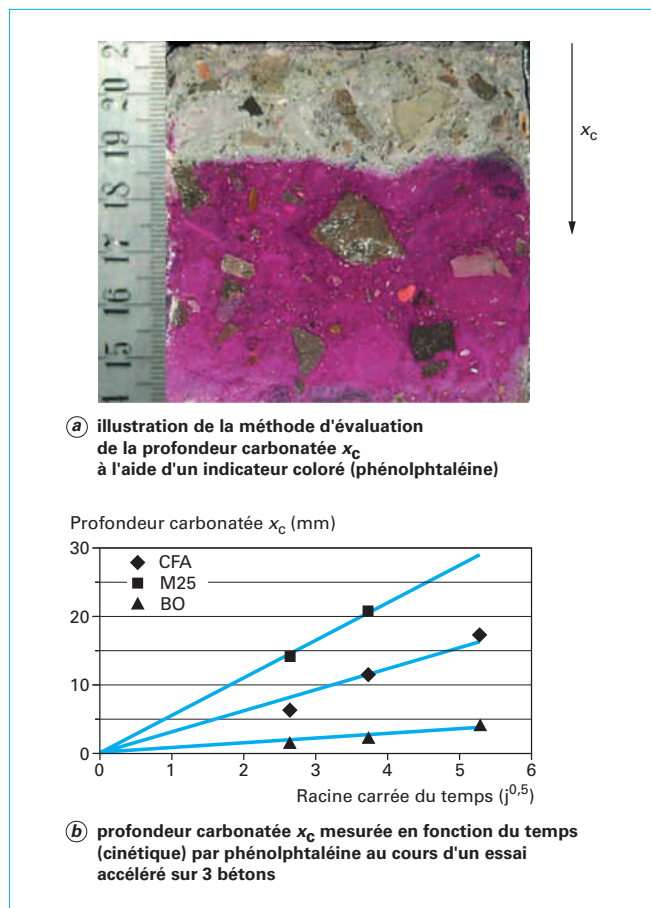


Figure 7 – Témoin de durée de vie relatif à la corrosion des armatures : cinétique de carbonatation

2.3 Témoins de durée de vie. Méthodes de mesure et exemples dans le cas de la corrosion des armatures

2.3.1 Évolution de la profondeur de carbonatation en fonction du temps (cinétiques)

Lorsque seule est requise la détermination de l'avancement du « front » de carbonatation ($\text{pH} \approx 9$), l'utilisation d'un indicateur coloré pour évaluer la profondeur de carbonatation est envisageable, que ce soit en laboratoire ou sur ouvrage. L'indicateur le mieux adapté est la phénolphthaléine dont le pH de virage de la couleur rose à incolore se situe aux environs de 9 (la coloration rose indique la zone non carbonatée, cf. figure 7a). La thymolphthaléine peut également être utilisée. La mesure s'effectue sur une fracture fraîche de béton. L'AFPC-AFREM a publié en 1998 [3] des recommandations pour la mesure de la profondeur de béton carbonaté à des échéances données par phénolphthaléine.

Exemple : l'avancement du front de carbonatation en fonction du temps (cinétique), au cours d'un essai accéléré réalisé en laboratoire (profondeur de carbonatation mesurée par phénolphthaléine aux échéances de 7, 14 et 28 jours, selon les recommandations de l'AFPC-AFREM) sur les bétons M25, CFA et BO âgés de 90 jours, est présenté en figure 7b.

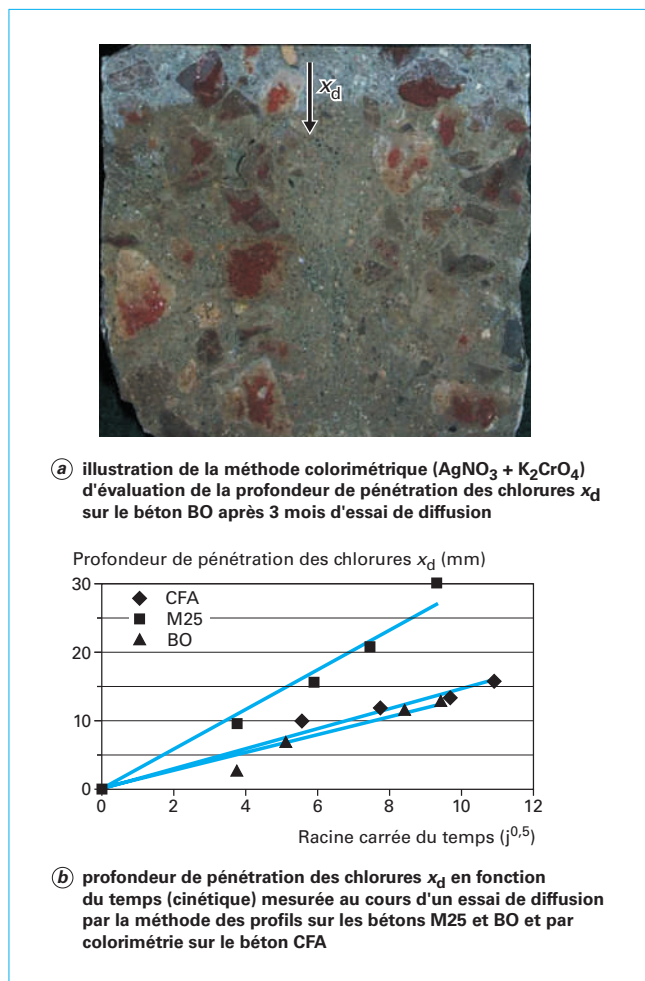


Figure 8 – Témoin de durée de vie relatif à la corrosion des armatures : cinétique de pénétration des chlorures

2.3.2 Évolution de la profondeur de pénétration des chlorures en fonction du temps (cinétiques)

Lorsque seule est requise la détermination de l'avancement du « front » de pénétration des chlorures ($[\text{Cl}^-_{\text{libres}}] \approx [\text{Cl}^-_{\text{libres}}]_{\text{crit}}$), la profondeur de pénétration des chlorures correspondant à la concentration critique peut être estimée par colorimétrie. Deux méthodes peuvent notamment être appliquées :

- la pulvérisation d'un réactif, le nitrate d'argent AgNO_3 , et éventuellement d'un révélateur, le chromate de potassium K_2CrO_4 [14] [15] (figure 8a) ;
- la pulvérisation de fluorescéine et de nitrate d'argent 0,1 N, selon la méthode de Collepardi [26].

En effet, il a été montré que ces deux méthodes donnaient des résultats analogues et que la concentration en chlorures libres correspondant au seuil de détection de ces méthodes était du même ordre que la concentration critique couramment considérée (cf. § 2.2) [15]. On notera toutefois que les méthodes colorimétriques associées aux chlorures fournissent des résultats moins précis que celle associée à la carbonatation (cf. § 2.3.1).

Exemple : l'avancement du front de pénétration des chlorures en fonction du temps (cinétique), au cours d'un essai de diffusion en régime non stationnaire réalisé en laboratoire (solution diffusante : $\text{NaCl} = 30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ et $\text{NaOH} = 0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) sur les bétons M25, CFA et BO âgés de 90 jours, est présenté en figure 8b. La profondeur de pénétration a été mesurée par colorimétrie ($\text{AgNO}_3 + \text{K}_2\text{CrO}_4$) sur CFA et par la méthode des profils (cf. § 2.3.4) sur M25 et BO.

2.3.3 Évolution du profil de carbonatation en fonction du temps

Dans le cas où la détermination du profil de Ca(OH)_2 résiduelle et/ou de CaCO_3 de néoformation est requise, on pourra utiliser par exemple l'analyse thermogravimétrique (cf. [C 2 245], § 6.6), ou le dosage volumétrique du CO_2 [65], ou encore les mesures gammadensimétriques qui sont semi-destructives [84].

2.3.4 Évolution du profil de concentration en chlorures « libres » en fonction du temps

Dans le cas où la détermination de l'ensemble du profil de concentration en chlorures « libres » est requise, ce dernier peut être obtenu à l'aide du dosage des chlorures par analyse chimique à partir de prélèvements (de poudre par forage à différentes profondeurs [3], ou par « grignotage » [14], ou encore par sciage sous alcool ou à sec puis broyage). En outre, l'avancement du « front » de pénétration des chlorures peut également être évalué dans ce cas, sans avoir recours à des mesures supplémentaires de colorimétrie, en déterminant la profondeur correspondant à la concentration critique à partir des profils obtenus à différentes échéances [15], comme illustré en figure 8b.

2.4 Modèles prédictifs

2.4.1 Rôle et caractéristiques requises

Dans le cadre de la nouvelle approche de la durabilité, les modèles prédictifs permettent d'accéder aux témoins de durée de vie (sorties numériques de ces modèles) à partir des indicateurs de durabilité (données d'entrée de ces modèles). Le modèle tient donc ici un rôle central. Les modèles prédictifs pourront être utilisés soit en phase de conception d'un ouvrage, soit lors du suivi d'un ouvrage existant, afin de réévaluer la prédiction initiale en prenant en compte le vieillissement du matériau *in situ* ou de calculer la durabilité résiduelle.

Différents types de modèle existent. Les principaux critères de sélection des modèles à recommander parmi le grand nombre à disposition sont les suivants :

- les modèles (et les hypothèses inhérentes) doivent être fondés physiquement ;
- les paramètres fondamentaux du modèle doivent être les indicateurs de durabilité sélectionnés (cohérence entre l'approche adoptée et celle du modèle) ;
- le modèle doit être aisément accessible, pour une mise en pratique facile de la méthode (disponibilité du modèle).

En ce qui concerne la corrosion des armatures, il paraît suffisant de se restreindre à la période d'incubation (cf. [C 2 245] figures 1 et 5), dans la mesure où l'approche développée ici est consacrée au matériau constitutif béton, et que cette hypothèse va dans le sens de la sécurité (cf. [C 2 245], § 2).

Les principaux modèles de carbonatation, de pénétration des chlorures et d'alcali-réaction décrits dans la littérature ont été listés, classés suivant leurs caractéristiques et évalués dans la référence [16], précisant notamment les paramètres et les couplages pris en compte, les conditions initiales et les conditions aux limites, les sorties et le domaine de validité.

La tendance actuelle est aux modèles multiéchelles (du matériau à la structure) (voir par exemple pour l'alcali-réaction [22] [50]). Pour la prédiction de la corrosion des armatures, la tendance est également au développement de modèles couplés, plus pertinents pour rendre compte des phénomènes de dégradation des bétons dans les ouvrages réels [67]. Cependant, la plupart des modèles sélectionnés dans le cadre de l'approche présentée ici sont des modèles simples, relatifs à un seul processus de dégradation, dans un objectif de rapidité d'apprentissage et de facilité d'utilisation pour les ingénieurs futurs utilisateurs. On fait ainsi l'hypothèse que le processus décrit par le modèle est celui qui prédomine dans le cas pratique étudié. Les modèles doivent toutefois inclure si possible les couplages physico-chimiques (tels que les interactions chlorures-matrice) et chimico-mécaniques dans le cas de l'alcali-réaction. En ce qui concerne le couplage avec les transferts hydriques, celui-ci ne pourra être pris en compte que dans certains modèles. En effet, par exemple la plupart des modèles disponibles de pénétration des chlorures travaille en conditions saturées, car des conditions de saturation partielle, bien que plus fréquentes en environnement naturel, sont plus difficiles à prendre en compte et rendent les modèles plus lourds.

2.4.2 Modèles relatifs à la carbonatation des bétons. Exemples

Dans les nombreuses approches visant à modéliser la carbonatation publiées dans la littérature, les modèles reposent sur l'utilisation de la première loi de Fick. Ils se différencient les uns des autres par les paramètres pris en compte, les hypothèses simplificatrices sur les mécanismes physico-chimiques, et les conditions initiales et aux limites.

Les concepts physico-chimiques des modèles sur la carbonatation des bétons sont de plus en plus complets. Notons à ce titre le récent modèle de Bary & Sellier [20], qui prend notamment en compte le rôle déterminant de la migration (par diffusion et convection avec l'eau liquide) du calcium dans le processus de colmatage de la zone carbonatée. On notera toutefois qu'à l'heure actuelle peu de modèles sont susceptibles de prendre en compte des cycles réalistes d'humidification-séchage (voir notamment Bakker [8]), bien que ces derniers aient une influence prépondérante sur le profil de carbonatation.

La plupart des modèles utilise comme données d'entrée les indicateurs de durabilité généraux sélectionnés (notamment porosité et teneur en portlandite), associés à des paramètres complémentaires. Pour ce qui concerne l'approche statistique multifacteurs de Vesikari [82], on peut manquer de valeurs obtenues expérimentalement pour les nombreux paramètres d'entrée requis. Ceci peut rendre difficile la mise en œuvre de ce type de modèles.

Certains modèles de carbonatation (empiriques), tel que celui intégré dans le logiciel LEO [62] (et dénommé dans la suite LEO-EDF) ne sont basés que sur la résistance mécanique à la compression à 28 jours (caractéristique de base, cf. [C 2 245], § 3.5) et font intervenir des coefficients qui prennent en compte les conditions environnementales.

Le modèle développé par Papadakis *et al.* [55] [56] est très simple d'emploi. Les auteurs proposent une formule simple proportionnelle à la racine carrée du temps, impliquant un coefficient dépendant de caractéristiques telles que la pression de CO_2 extérieure, l'humidité relative et les constituants de la pâte de ciment durcie. Ce modèle peut être utilisé sous une forme simplifiée qui consiste à ne pas tenir compte des minéraux susceptibles de réagir avec le dioxyde de carbone autres que la portlandite. Il requiert dans ce cas comme données d'entrée uniquement les deux indicateurs de durabilité généraux teneur en portlandite et porosité, le coefficient de diffusion du CO_2 apparaissant dans les équations pouvant être calculé à partir de la porosité.

Le modèle physico-chimique développé par Thierry *et al.* [77] (et dénommé dans la suite LCPC) est plus sophistiqué, mais est bien adapté à l'approche proposée. Ses spécificités sont les suivantes :

- prise en compte de l'évolution au cours de la carbonatation de la porosité (due à la dissolution des produits d'hydratation et à la formation de calcite) et du taux de saturation en eau liquide (augmentation locale lors de la dissolution des produits d'hydratation) ;
- prise en compte des cinétiques chimiques responsables de l'adoucissement du « front » de carbonatation ;
- intégration du séchage du matériau (par transfert darcéen de l'eau liquide et en utilisant une relation donnant la pression capillaire en fonction du taux de saturation calée sur l'isotherme de désorption de vapeur d'eau expérimentale du matériau) ;
- prédiction du pH de la solution interstitielle.

2.4.3 Modèles relatifs à la pénétration des ions chlorure dans le béton. Exemples

La plupart des modèles relatifs à la pénétration des chlorures dans le béton utilise, parmi les données d'entrée, un coefficient de diffusion obtenu à l'aide d'un essai accéléré (migration sous champ électrique). Les différents modèles peuvent être regroupés en deux catégories :

- **modèles empiriques** : la prédiction du profil de concentration en chlorures est dans ce cas effectuée à partir de solutions analytiques ou numériques de la seconde loi de Fick. Pour l'approche déterministe, on peut citer le logiciel LEO [62] intégrant un modèle de pénétration des chlorures prenant en compte une éventuelle carbonatation du béton. Ce modèle peut facilement être alimenté avec les caractéristiques de base et les indicateurs de durabilité, complétés de quelques paramètres complémentaires facilement accessibles. Pour l'approche probabiliste, on citera le modèle issu du projet BRITE « DURACRETE » [37] [97] ;
- **modèles physiques** : le transport des ions et les interactions sont décrites par des équations séparées, basées sur les mécanismes physiques. On peut citer dans cette catégorie le modèle de transport des ions proposé par Houdusse *et al.* [40] (et dénommé dans la suite LERM).

2.4.4 Calibration des lois de variation des indicateurs de durabilité incluses dans les modèles

La mesure des indicateurs de durabilité *in situ* à des échéances données, à partir de prélèvements issus d'ouvrages (ou d'éléments de structures vieillissant en conditions naturelles) ou à partir de méthodes non destructives, permet une calibration des « lois » de variation des indicateurs incluses dans les modèles de prédiction de la corrosion des armatures (cf. figure 6).

En ce qui concerne la prévention vis-à-vis de la corrosion des armatures, ces « lois » expriment notamment la variation des propriétés de transport en fonction du temps (âge), des conditions thermo-hygrométriques, de la profondeur sur l'ouvrage....

Exemple : les phénomènes pris en compte dans le modèle LERM [40] [41] sont les suivants (cf. § 2.5.4) :

- évolution de la structure poreuse induisant une évolution dans le temps du coefficient de diffusion ionique ;
- variation du coefficient de diffusion en fonction de la position dans l'espace (profondeur) ;
- précipitation ou dissolution de certains composés ;
- interactions entre la matrice et les ions présents dans la solution interstitielle, se traduisant par une diminution de la concentration de l'ion pouvant diffuser et par une modification de la structure poreuse.

Avant construction de l'ouvrage et si aucune donnée *in situ* n'est disponible, il est possible d'effectuer un premier dégrossissage sur des échantillons de laboratoire de différents âges.

2.5 Méthodologie de prédiction de la durée de vie. Exemples dans le cas de la corrosion des armatures

2.5.1 Méthodologie de prédiction de la durée de vie

Il s'agit ici de confronter les valeurs des témoins de durée de vie, calculées à partir du ou des modèles prédictifs, aux caractéristiques de l'ouvrage, telles que l'enrobage dans le cas de la corrosion des armatures (cf. figure 9) (**processus n° 1**).

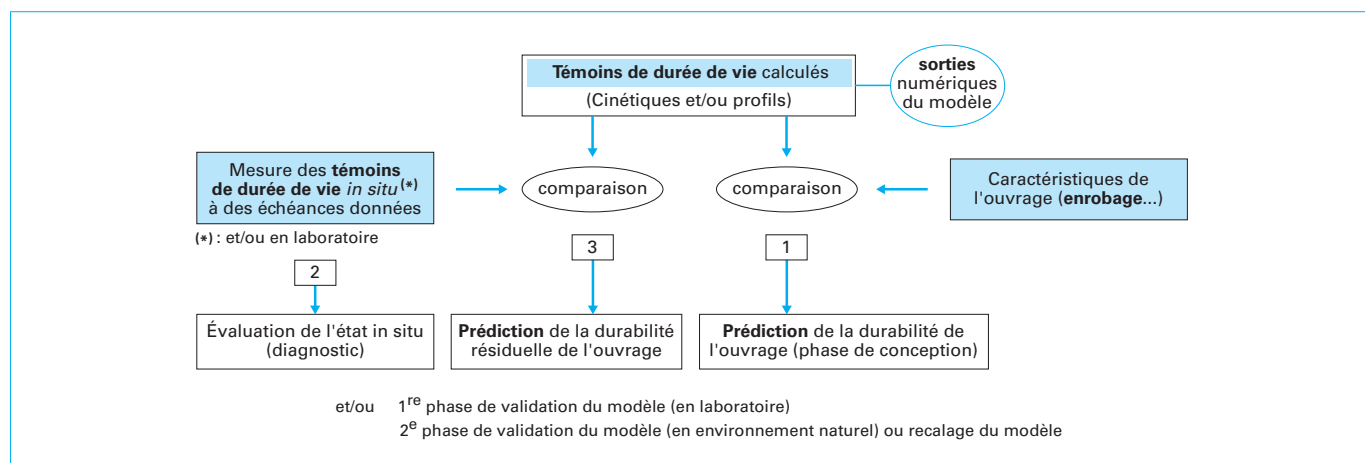


Figure 9 – Mise en œuvre de l'approche prédictive développée sur la base d'indicateurs de durabilité. Rôle des témoins de durée de vie :

- processus n° 1 : prédiction de la durée de vie d'un ouvrage en phase de conception ;
- processus n° 2 : diagnostic d'un ouvrage existant ;
- processus n° 3 : validation du modèle (ou recalage éventuel) et prédiction de la durée de vie résiduelle d'un ouvrage existant

La mesure des témoins de durée de vie, à partir de prélèvements sur un ouvrage existant (dégradé ou non) à des échéances données, par les méthodes mentionnées au paragraphe 2, permet d'effectuer un diagnostic de cet ouvrage (cf. figure 9) (**processus n° 2**).

La comparaison des valeurs des témoins de durée de vie mesurés sur l'ouvrage considéré avec les sorties numériques du modèle (témoins de durée de vie calculés) permet de valider le modèle (seconde phase de validation) et éventuellement de le recalculer, puis d'évaluer la durabilité résiduelle de l'ouvrage (cf. figure 9) (**processus n° 3**).

Cette méthodologie est illustrée par les exemples traités dans les paragraphes suivants.

2.5.2 Exemple de prédiction de la cinétique et de l'évolution du profil de carbonatation. Première phase de validation

Il est très difficile de disposer de données expérimentales adéquates acquises en conditions réelles (*in situ*) pour valider les modèles prédictifs de durée de vie. En effet, les données à disposition sont souvent partielles, obtenues à des échéances trop courtes, sur un petit nombre de formules de bétons, ou avec une connaissance incomplète de l'historique voire des conditions initiales (composition du béton, cure...). De plus, dans la plupart des cas une telle validation ne sera possible qu'*a posteriori* (c'est-à-dire plusieurs années après la construction de l'ouvrage).

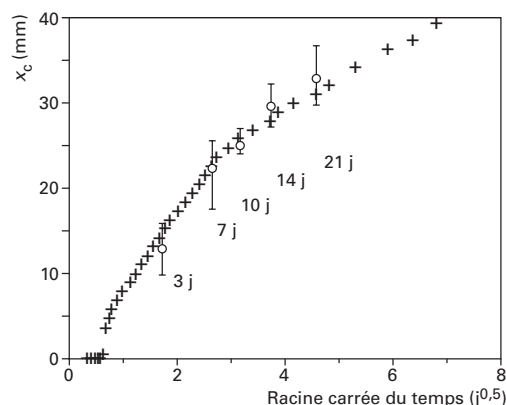
Des essais de vieillissement accéléré, réalisés en laboratoire, peuvent permettre une première phase de validation des modèles. En effet, il est possible avec ces essais de simuler des processus analogues à ceux ayant lieu *in situ* tout en maîtrisant complètement ou presque les conditions initiales (composition du béton, profil hydrique de l'échantillon de matériau...) et les conditions aux limites (teneur en CO_2 ou concentration en chlorures, humidité relative, température...).

Ainsi, les modèles relatifs à la corrosion des armatures peuvent, dans une première phase (en conditions de laboratoire), être validés par la comparaison des calculs prédictifs avec les résultats d'essais de vieillissement (accélérés) menés sur des échantillons de béton en laboratoire, pour ce qui concerne les profondeurs et les profils de carbonatation ou de pénétration des chlorures. On pourra se conformer, pour la réalisation de ces essais, aux modes opératoires disponibles. L'AFPC-AFREM a, par exemple, publié en 1998 [3] des recommandations pour la réalisation d'essais accélérés de carbonatation. Il est toutefois à noter que des recherches sont encore en cours en vue d'améliorer le mode opératoire de cet essai (voir par exemple [18] [65]).

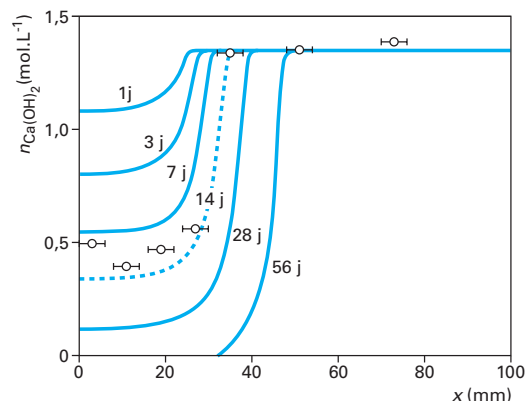
Exemple : dans la figure 10a, la cinétique de carbonatation calculée par le modèle LCPC est comparée à celle mesurée par phénolphthaleïne en conditions accélérées (en laboratoire à 50 % de CO_2 [77]), pour une éprouvette de béton M25 (teneur initiale en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de 1,2 mol par litre de béton et taux de saturation en eau liquide fixé à 0,60, avant carbonatation). Dans la figure 10b, le profil de teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ résiduelle du béton M25 après 14 jours de carbonatation, calculé par le modèle LCPC, est comparé à celui obtenu expérimentalement par ATG [77] dans les mêmes conditions accélérées que celles décrites précédemment. Une bonne correspondance est mise en évidence entre simulations numériques et résultats expérimentaux.

2.5.3 Exemple de prédiction de la cinétique de carbonatation. Seconde phase de validation

La validation des calculs prédictifs menés à l'aide des modèles par le biais d'essais accélérés est nécessaire mais pas suffisante. En effet, les essais accélérés s'éloignent de la réalité par l'utilisation, par exemple lors de l'essai de carbonatation accéléré, d'une teneur en CO_2 importante (5 à 50 % selon les modes opératoires couramment adoptés en France).



a) profondeur carbonatée x_c calculée (croix) et mesurée par phénolphthaleïne (cercles assortis de barres d'erreurs) en fonction de la racine carrée du temps



b) profils de teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ résiduelle calculés après 1, 7, 14, 28 et 56 jours de carbonatation et mesurés après 14 jours par analyses thermogravimétriques

Figure 10 – Comparaison de la cinétique de carbonatation et du profil de teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ résiduelle après 14 jours de carbonatation calculés par le modèle LCPC ($[\text{Ca}(\text{OH})_2]_{\text{initiale}} = 1,2$ mol par litre de béton) avec les résultats expérimentaux obtenus en conditions accélérées en laboratoire (50 % de CO_2) sur une éprouvette de béton M25 (taux de saturation fixé à 0,60 avant carbonatation), d'après [77]

Une seconde phase de validation des modèles prédictifs de durée de vie, complémentaire à celle basée sur les essais en laboratoire, est donc requise, à partir de l'analyse de prélèvements de bétons issus d'éléments de structures ou d'ouvrages soumis à la pénétration d'agents agressifs en conditions environnementales réelles. Cette phase doit permettre de valider les hypothèses relatives aux mécanismes réactionnels majeurs. Toutefois, les conditions aux limites sont dans ce cas beaucoup plus complexes et donc moins aisées à prendre en compte dans les modèles (fluctuation des conditions climatiques au cours du temps...). Cette seconde phase de validation (en environnement naturel) des modèles à partir de prélèvements sur corps d'épreuve ou sur ouvrages nécessite en outre de prendre en compte la combinaison éventuelle de différents agents agressifs.

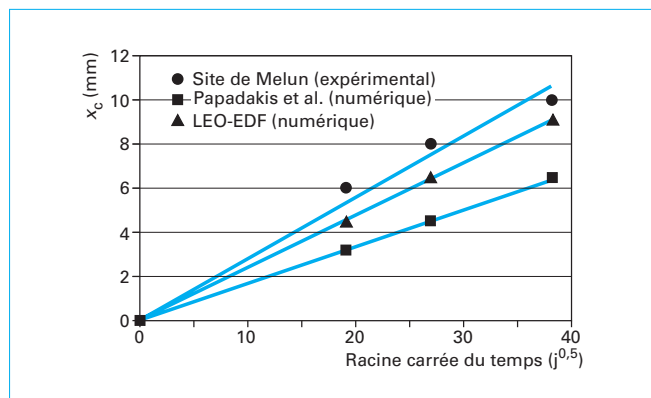


Figure 11 – Comparaison entre les cinétiques de carbonatation mesurées par le test à la phénolphthaléine sur le site naturel de Melun et les cinétiques de carbonatation simulées (modèles de carbonatation LEO-EDF et de Papadakis *et al.*) sur le béton M25

Exemple : dans la figure 11, la cinétique de carbonatation calculée par deux modèles différents (LEO-EDF [62] et Papadakis *et al.* [55]) est comparée à celle mesurée par phénolphthaléine à partir de prélèvements sur un corps d'épreuve en environnement naturel (site de vieillissement de Melun, près de Paris [18]), pour le béton M25. Les indicateurs de durabilité pris en compte dans le modèle développé par Papadakis *et al.* (cf. § 2.4.2) sont sans doute insuffisants (par exemple, la perméabilité n'intervient pas). De plus, ce modèle ne prend en compte ni les gradients d'humidité, ni l'évolution de la microstructure lors du processus de carbonatation. Ceci peut expliquer les divergences notables observées entre les simulations effectuées avec ce modèle et les résultats expérimentaux.

2.5.4 Exemple de prédiction de l'évolution du profil de concentration en chlorures. Seconde phase de validation

Dans le cadre de la conception et du suivi du Pont Vasco de Gama sur le Tage à Lisbonne (Portugal), conçu avec une exigence de durée de vie de 120 ans, des simulations numériques ont été effectuées à l'aide du modèle LERM, dans le but de parvenir à une estimation du temps nécessaire à l'initiation de la corrosion des armatures. Les simulations ont été menées en prenant en considération l'évolution des caractéristiques du matériau en fonction de l'âge et de la profondeur par rapport à la face externe exposée, et en considérant en particulier [41] :

- un coefficient de diffusion apparent des chlorures variable entre 1 mois et 3 ans, d'après les valeurs mesurées par essai de migration en régime non stationnaire à différentes échéances (1, 3, 6, 18 mois et 3 ans), puis considéré constant et égal à $0,1 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ entre 3 ans et 120 ans (non mesuré), d'après les évolutions constatées entre 6 mois et 3 ans ;
- une teneur en chlorures totaux superficielle égale à 6 % par rapport à la masse de ciment.

Les simulations ne prennent pas en compte les variations climatiques ni la variation des conditions aux limites, ni la pénétration des chlorures par capillarité (conditions saturées).

Les profils de concentration en chlorures totaux simulés ont été validés à partir de la mesure des profils réels à différentes échéances dans des éléments du pont situés en zone de marnage [41]. La figure 12 présente le résultat des simulations de l'évolution du profil de concentration en chlorures totaux en fonction du temps. Les profils mesurés *in situ* figurent aussi sur ce graphique. On constate que la progression des chlorures la plus importante a eu lieu dans les premières semaines ayant suivi la mise en place des

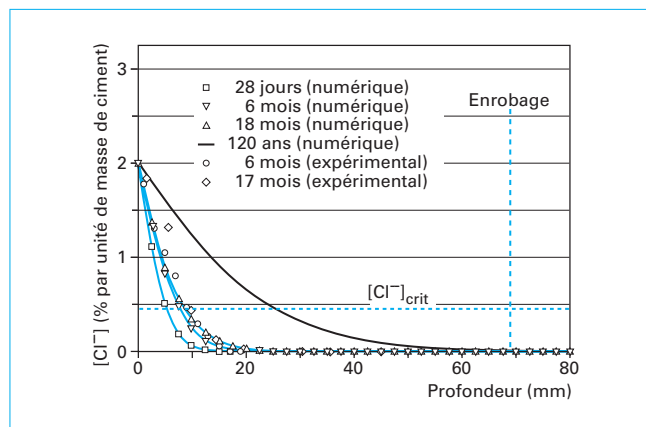


Figure 12 – Simulation numérique de profils de concentration en chlorures totaux avec le modèle LERM et comparaison avec les prélèvements effectués en zone de marnage sur le Pont Vasco de Gama sur le Tage à Lisbonne (Portugal), d'après [16]

bétons. Par la suite, en raison de l'évolution des caractéristiques microstructurales des bétons, la progression est devenue très faible. La figure 12 montre également la bonne concordance entre les profils simulés et les profils réels. En outre, la figure 12 indique que la concentration critique en chlorures supposée égale à 0,4 % (par rapport à la masse de ciment, cf. § 2.2) ne sera pas atteinte à la profondeur de 7 cm (enrobage) après 120 ans d'exposition. L'exigence de durée de vie (120 ans) apparaît donc satisfaite *a priori*, à condition bien entendu que le béton ne subisse pas de dégradation mécanique ni physico-chimique d'ici cette échéance.

3. Conclusions et applications : « boîte à outils » proposée

Cet article a illustré l'intérêt de l'approche performantielle et prédictive décrite, basée sur la notion d'indicateurs de durabilité. Celle-ci se décline en une seule méthodologie générale, structurée en différentes étapes ou modules (processus). Cette approche novatrice a le mérite de clarifier et d'introduire plus de rigueur scientifique dans l'évaluation de la durabilité des ouvrages en béton armé, tout en restant très souple (adaptable). Elle propose des critères performantiels sûrs et objectifs pour maîtriser la durabilité du béton armé et de ses constituants. Cette nouvelle approche de la durabilité a en outre été validée par l'ensemble de la communauté scientifique et professionnelle. On peut penser qu'elle permettra au minimum une homogénéisation des pratiques opérationnelles.

Il est désormais possible de fournir à l'ingénieur et au concepteur, fort démunis jusqu'à présent, une « boîte à outils » pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité, sur la base d'un petit nombre de propriétés du matériau béton. Ces propriétés ont une signification physique précise et sont facilement accessibles par des méthodes bien définies et validées. Cette « boîte à outils » inclut :

- les indicateurs de durabilité (généraux, spécifiques ou de substitution) et des paramètres complémentaires optionnels, accompagnés des méthodes d'essais correspondantes et d'un système de classes (et de valeurs limites) directement utilisable pour l'évaluation de la durabilité « potentielle » (et de là pour la comparaison et le classement de différentes formules de béton). La sélection de ces différents paramètres devra s'effectuer en fonction

des dégradations prévisibles, de l'environnement et du cas pratique étudié ;

- **des spécifications types** relatives aux indicateurs de durabilité sélectionnés, en fonction de la durée de vie exigée pour la structure et de son type d'environnement. Ainsi, les « recommandations » proposées ici permettent de spécifier des durées de vie (par exemple 30, 50, 100, 120 ans ou plus) pour les ouvrages en béton, sur la base de 1, 2, 3 ou 4 grandeurs physiques mesurées ;

- **des modèle(s) prédictif(s) ;**

- **des témoins de durée de vie** accompagnés des méthodes d'essais correspondantes.

Cette « boîte à outils » aidera les différents acteurs de la construction et de la conservation du patrimoine à faire les choix adéquats, sur la base d'une analyse de risques pertinente. Elle est à même d'apporter d'ores et déjà des solutions concrètes, fiables et à faible coût à divers problèmes, dans les deux situations suivantes :

- **la conception des bétons et des ouvrages (prévention) :** par exemple, dans le cadre de la rédaction du cahier des charges d'ouvrages (de bâtiment ou de génie civil), afin de concevoir des bétons aptes à prémunir les ouvrages vis-à-vis d'une dégradation donnée, en fonction de la durée de vie exigée et du type d'environnement (lui-même fonction notamment de la température, de l'humidité relative et des espèces potentiellement agressives présentes). Des exigences précises (performantielles) en matière de durabilité pourront être incluses dans le cahier des charges, de façon complémentaire aux spécifications relatives à la résistance mécanique. La méthodologie proposée permet ainsi la qualification de formules de béton destinées à un ouvrage à construire. En outre, si les valeurs des indicateurs de durabilité sont introduites en tant que données d'entrée dans un modèle, il est possible de prédire la durée de vie de l'ouvrage ;

- **le suivi des ouvrages existants :** il s'agit ici d'évaluer l'état d'ouvrages existants, dégradés ou non, à une échéance donnée (diagnostic), et de prédire leur évolution future (durabilité rési-

duelle), dans le cadre notamment du contrôle opérationnel et de la gestion du parc d'ouvrages, et dans un objectif d'aide à la décision.

Cette nouvelle approche de la durabilité permettra de plus de faire évoluer les textes existants (modes opératoires, recommandations, règlements, normes...).

Toutefois, ayant été élaborée sur la base des connaissances actuelles, acquises en France et à l'étranger, cette approche pourra naturellement être améliorée ou complétée au cours du temps, en fonction des avancées scientifiques, techniques et technologiques.

Il est important de souligner que ce type de démarche et les spécifications correspondantes, aussi élaborés, rigoureux et précis soient-ils, ne pourront porter leurs fruits que si les recommandations pour une mise en œuvre correcte du béton et le contrôle d'exécution sont appliqués avec la même rigueur. Ceci est particulièrement critique dans la mesure où la qualité du béton d'enrobage, qui est celui que l'on considère ici, y est particulièrement sensible.

Il sera en outre nécessaire de sensibiliser les différents acteurs qui seront impliqués dans cette démarche aux critères économiques globaux (incluant les coûts de construction, d'entretien et de réparation) et sociaux (impact sur l'environnement et le cadre de vie de l'esthétique en particulier de l'aspect des parements, de la réduction des périodes de travaux de réparation, ..., insertion dans le tissu urbain) liés à ces exigences de durabilité, afin de mettre en évidence tout l'intérêt de cette approche globale et de généraliser cette dernière à tous les ouvrages.

L'auteur tient à remercier les membres du groupe de travail de l'Association Française de Génie Civil (AFGC) : « *Conception des bétons en vue d'une durée de vie donnée des ouvrages – Indicateurs de durabilité* », et tous ceux qui ont contribué à ce travail. L'auteur remercie également l'AFGC pour fournir l'opportunité de telles instances.