

Intérêt de l'approche performantielle pour la durabilité des produits préfabriqués en béton

Application aux attaques acides

P. Rougeau, P. Francisco et C. Badoz

CERIB (Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton),
Division Matériaux, Rue des Longs Réages, 28230 – Epernon, France

Résumé :

Des préoccupations sans cesse plus nombreuses et complexes doivent être prises en compte à juste titre lors de la conception des produits et ouvrages en béton. Il s'agit notamment d'intégrer une meilleure utilisation des ressources naturelles, la diminution des émissions de gaz à effet de serre, une durée de vie des infrastructures plus élevée, l'évolution de la fonctionnalité de l'ouvrage, la durée des chantiers... Dans ce contexte, l'approche performantielle de la durabilité des bétons apparaît aujourd'hui comme un des principaux outils permettant de répondre à ces nombreuses attentes qu'elles soient fonctionnelles, techniques, environnementales, sociétales, économiques ou esthétiques. Un exemple de démarche illustrant l'intérêt de l'approche performantielle pour les produits préfabriqués en béton et destinée aux attaques acides est présenté.

Mots-clés : Approche performantielle – indicateurs – lixiviation – attaques acides

1. Introduction

Selon C. Andrade [1], les méthodologies mises en œuvre afin de maîtriser la durabilité des ouvrages en béton peuvent revêtir quatre niveaux de complexité :

- le niveau 1 correspond à une approche prescriptive essentiellement basée sur des obligations de moyen ;
- le niveau 2 repose sur l'utilisation d'indicateurs de durabilité ou d'essais performantiels ; à ce stade, la durée de vie n'est pas encore quantifiée ;
- le niveau 3 implique l'utilisation de modèles de durabilité déterministes ;
- le niveau 4 correspond à l'utilisation de modèles probabilistes.

La durabilité du béton a longtemps été appréhendée sur le plan normatif en adoptant une approche de niveau 1, c'est-à-dire en ne considérant principalement que les paramètres liés à la formulation du béton et certaines propriétés mécaniques telle que la résistance caractéristique à la compression. L'application de valeurs limites à des paramètres de formulation constitue des obligations de moyen. Celles-ci portent le plus souvent sur le rapport Eau/Ciment (ou $E_{eff}/Liant_{eq}$ dans la norme NF EN 206-1 « Béton – Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité »), le dosage en ciment ou $Liant_{eq}$, la nature et la proportion d'additions par rapport à la quantité de ciment. Le principal avantage de l'approche basée sur des obligations de moyen est de bénéficier d'un retour d'expérience conséquent. Par ailleurs, les paramètres pour lesquels des exigences sont requises sont compatibles avec le suivi effectué lors de la fabrication des bétons tels que les pesées des constituants, l'acquisition des données sur leur teneur en eau et les contrôles sur le béton durci.

L'approche basée sur des obligations de moyen ne facilite pas la mise en application rapide de solutions innovantes. Contrairement à l'approche performantielle, elle ne permet pas de prendre en compte l'ensemble des facteurs liés aux formules de béton et aux procédés de fabrication. Enfin, le domaine d'application de ce type d'approche concerne essentiellement les ouvrages traditionnels pour lesquels des durées de vie conventionnelles s'appliquent, c'est-à-dire au plus égales à 50 ans. Dans le cas des ouvrages soumis à des sollicitations particulières ou lorsqu'une durée de vie significativement plus importante est souhaitée par le maître d'ouvrage, il est nécessaire de mettre en œuvre une démarche plus complète s'appuyant sur une approche performantielle. Des textes majeurs couramment cités dans les cahiers des charges des maîtres d'ouvrage utilisent déjà des outils performantiels en complément d'une approche plus classique [2, 3].

L'objectif de la présente communication est d'une part de préciser les raisons pour lesquelles l'approche performantielle apparaît aujourd'hui incontournable et d'autre part de présenter un exemple de démarche performantielle destinée aux attaques acides.

2. Nécessité d'une approche performantielle de la durabilité

Le fait de devoir mieux utiliser les ressources naturelles, de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, d'accroître la durée de vie des infrastructures, de réaliser des ouvrages dont la fonctionnalité peut être amenée à évoluer en fonction des besoins, nous imposent d'imaginer et de déployer de nouveaux concepts afin de rendre possible l'émergence de solutions à la hauteur des enjeux. L'approche performantielle de la durabilité des bétons est aujourd'hui un des outils qui permet de concevoir des éléments préfabriqués et des ouvrages répondant à ces nombreuses attentes qu'elles soient fonctionnelles, techniques, environnementales, sociétales, économiques ou esthétiques.

L'approche performantielle doit permettre à terme une meilleure gestion des risques afférant au matériau. Considérons, à titre illustratif, les réponses apportées aujourd'hui pour appréhender les risques de corrosion des armatures dans le cas des éléments de structure. On les trouve notamment dans les tableaux NA.F.1 et NA.F.2 des normes NF EN 13369 et NF EN 206-1. Les spécifications qui figurent dans ces tableaux reposent sur l'expérience acquise et donne satisfaction aujourd'hui. Il ne s'agit pas de les remettre en cause. Néanmoins, la nature du liant n'est pas suffisamment prise en compte. Or, le risque de corrosion des armatures dépend également des caractéristiques de la matrice cimentaire et en particulier de la réserve en portlandite (Ca(OH)_2) qui constitue une barrière contre la diminution du pH. Un béton à base de CEM V se carbonate plus vite qu'un béton à base de CEM I constitué des mêmes granulats et possédant un rapport Eau/Ciment identique [4]. L'approche actuelle basée sur les obligations de moyen ne permet pas de prendre en compte ces différents niveaux de risques. Une approche performantielle telle que celle développée dans le guide AFGC « Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages » [5] apparaît plus pertinente. Un des indicateurs de durabilité est précisément la teneur en portlandite. Il est proposé d'utiliser cet indicateur en complément avec d'autres aussi bien pour appréhender la corrosion des armatures que pour se prémunir des risques liés à l'alcali-réaction.

L'approche performantielle répond aux attentes des industriels réalisant des éléments préfabriqués en béton. En effet, il est nécessaire que l'industrie puisse disposer d'une diversité de solutions en rapport avec la complexité des demandes auxquelles elle est amenée à répondre. L'approche performantielle de la durabilité permet de prendre en compte l'ensemble des facteurs liés aux formules de béton et aux procédés de fabrication (effets de parois liés à la présence du moule et à la méthode de compactage du béton, traitement thermique, cure,...). Les facteurs liés au procédé de fabrication s'avèrent déterminants pour la durabilité. Par exemple, la face des produits préfabriqués correspondant au fond du moule se carbonate en général moins vite que la face arasée [6, 7]. L'utilisation d'un ensemble d'indicateurs de durabilité ou d'un essai performantiel permet de caractériser le béton durci et donc de prendre en compte les effets liés au procédé de fabrication.

3. Exemple d'approche performantielle pour les attaques acides

3.1. Contexte normatif

Les environnements chimiquement agressifs correspondent dans la norme NF EN 206-1 aux classes XA1, XA2 et XA3. La norme renvoie au fascicule de documentation FD P 18-011 « Bétons – Classification des environnements agressifs ». Ce fascicule, actuellement en cours de révision, spécifie les types de ciment à utiliser en fonction de la nature de l'attaque chimique (acides, sulfates, eau de mer). Il ne prend pas en compte explicitement l'apport des bétons très compacts réalisés par exemple avec des ultrafines telles que des fumées de silice.

Il est possible d'évaluer la performance d'un nouveau béton, qui dérogerait aux spécifications du fascicule de documentation FD P 18-011 concernant la nature du ciment, en utilisant une approche performantielle. L'approche performantielle proposée relève, selon la classification proposée par C. Andrade [1], du niveau 2.

3.2. Principe de l'approche performantielle proposée

Le principe est de prendre comme référence un béton répondant intégralement aux normes actuelles. Le niveau de risque associé à ce béton est donc a fortiori considéré comme acceptable. La démarche a pour objectif de positionner, en terme de niveau de risque, l'autre béton qui lui déroge à l'obligation de moyen concernant la nature du ciment. Cette démarche est applicable pour d'autres environnements. Des travaux sont menés dans ce sens notamment par l'Ecole Centrale de Nantes [8].

Si l'on considère que le risque lié à la cure est traité dans les normes d'exécution (par exemple la norme EN 13670 en préparation), le risque lié au béton devant être géré dans les normes matériau pourrait être caractérisé selon la relation suivante :

$$\text{Risque (béton)} = \text{Risque (liant, squelette granulaire, porosité)}$$

L'approche doit donc permettre de gérer les contributions des différents facteurs vis-à-vis du niveau de risque : la nature du liant (déterminante pour les caractéristiques

des hydrates de la matrice cimentaire), le squelette granulaire (la nature des granulats a une influence notamment sur les caractéristiques de l'auréole de transition) et la porosité (étroitement liée au rapport $Eau_{eff}/Liant$ et à la nature du liant). Bien entendu, ces facteurs ne sont pas strictement indépendants les uns des autres, c'est le cas pour la porosité qui est la résultante des caractéristiques de la formule de béton.

L'approche proposée repose sur la réalisation et la caractérisation de deux bétons :

- Béton 1 (pour lequel la validation est recherchée) : le béton est conforme aux exigences des tableaux NA.F.1 ou NA.F.2 des normes NF EN 13369 et NF EN 206-1 exceptée la nature du ciment qui déroge aux exigences du fascicule FD P 18-011 ; les seuils concernant le rapport $Eau_{eff}/Liant_{eq}$, le dosage en $Liant_{eq}$ ou l'absorption d'eau sont donc respectés ; le béton répond également à la classe de résistance à la compression minimale ;
- Béton 2 : le béton est conforme à l'ensemble des exigences des tableaux NA.F.1 ou NA.F.2 et du fascicule FD P 18-011.

Les caractéristiques du béton 1 répondent également aux conditions suivantes :

- Condition 1 :
 $Rapport\ Eau_{eff}/Liant_{eq}\ (béton\ 1) \leq Rapport\ Eau_{eff}/Liant_{eq}\ (béton\ 2)$;
- Condition 2 : $f_{ck}\ (béton\ 1) \geq f_{ck}\ (béton\ 2)$;
- Condition 3 : les granulats des deux bétons sont identiques.

On cherche à vérifier que :

$$Risque\ (béton\ 1) \leq Risque\ (béton\ 2)$$

La condition 1 et dans une moindre mesure la condition 2 permettent de prendre en compte les facteurs liés à la porosité du matériau. Il est important de noter que le facteur porosité est géré également par l'essai performantiel. En effet, pour un liant fixé, une plus grande porosité se traduit par une diffusion plus rapide des éléments agressifs dans la matrice cimentaire, une lixiviation plus rapide des éléments constituant la matrice cimentaire (calcium notamment) et donc par une détérioration des indicateurs EPD_{eq} et EP_{pH} décrits ci-après.

Le respect de la condition 3 est important car cela permet de neutraliser la contribution des granulats à l'écart de niveau de risque entre les deux bétons, ces derniers ayant les mêmes granulats.

Les deux bétons sont soumis à un essai performantiel [9]. Le principe de l'essai est d'immerger des éprouvettes de béton dans une solution d'acide nitrique dont le pH est maintenu constant ($pH = 5$ par exemple). La régulation du pH est réalisée par des ajouts de petites quantités d'acide nitrique dilué ($0,5\ mol/l$). La solution est renouvelée lorsque le volume total d'acide nitrique ajouté représente 30 ml. L'essai est réalisé dans une salle climatisée (régulée à $20 \pm 2\ ^\circ C$). Un bullage à l'azote permet d'éviter la carbonatation de la matrice cimentaire.

La quantité de calcium lixivié dans la solution est mesurée sur une durée minimale de deux mois. L'échantillon est ensuite retiré de la solution. Une solution de

phénolphthaléine est pulvérisée sur une fracture fraîche longitudinale de l'échantillon pour visualiser le front correspondant à la diminution du pH.

Deux indicateurs sont quantifiés :

- l'épaisseur dégradée équivalente (EPD_{eq}) correspondant à :

$$EPD_{eq} = Ca_{lixivié} / Ca_{initial}$$

avec :

$Ca_{initial}$: la quantité de calcium initialement présente dans le béton et provenant du ciment (exprimée en mol/m^3),

$Ca_{lixivié}$: la quantité totale de calcium lixivié pendant l'essai rapportée à la surface de béton exposée (exprimée en mol/m^2) ;

- la distance (EP_{pH}) correspondant au front de coloration observé après pulvérisation d'une solution de phénolphthaléine sur une surface de béton perpendiculaire à la face exposée et obtenue par fracturation de l'échantillon.

Le nouveau béton est déclaré satisfaisant si les deux conditions suivantes sont réunies :

- $EPD_{eq} (\text{béton 1}) \leq EPD_{eq} (\text{béton 2})$;
- $EP_{pH} (\text{béton 1}) \leq EP_{pH} (\text{béton 2})$.

3.3. Utilisation de l'approche performantielle pour valider de nouvelles formules

L'approche proposée a été utilisée pour caractériser le comportement de quatre bétons : deux bétons traditionnels (l'un composé de CEM V/A, l'autre de CEM I) et deux BHP (l'un composé de CEM II/A-D donc à base de fumée de silice, l'autre de CEM I). Les caractéristiques des compositions sont données dans le tableau 1. Le béton BT1 répond aux exigences du fascicule de documentation FD P 18-011 pour ce qui concerne la classe XA2. Ce n'est pas le cas des BHP.

Tableau 1. Caractéristiques des bétons étudiés

Constituants (kg/m^3)	BT 1	BT 2	BHP 1	BHP 2
Gravillons siliceux 3/6	1165	1162	1195	1139
Sable siliceux 0/3	572	571	585	570
Filler siliceux ($D_{50}=24,5 \mu m$)	0	0	0	153
Ciment	409	408	405	356
Type de ciment	CEM V/A 32,5	CEM I 52,5	CEM II/A-D 52,5R	CEM I 52,5
E/C	0,39	0,33	0,24	0,31
Superplastifiant (%/Ciment)	0	0	3	3
Type de superplastifiant	-	-	polycarboxylate	mélamine
Résistance moyenne sur cylindres à 90 jours (MPa)	61 ± 1	60 ± 1	91 ± 2	72 ± 1
Porosité* moyenne à 90 jours (%)	$13,7 \pm 0,7$	$11,3 \pm 0,5$	$7,4 \pm 0,4$	$8,5 \pm 0,5$

* mesurée selon la méthode AFPC AFREM [10]

Des prismes de dimensions 100 x 100 x 400 mm ont été préparés, puis conservés en salle humide après démoulage à 24 heures. Quelques jours avant le démarrage des essais de lixiviation (pH = 5) réalisés à 90 jours, des échantillons (diamètre 74 mm, hauteur 100 mm) sont prélevés par carottage. La circonférence des cylindres est recouverte d'une résine de manière à ce que la dégradation s'effectue uniquement à partir des faces planes. Des cylindres d'une épaisseur de 30 mm sont ensuite prélevés par sciage.

Les quantités de calcium lixivié au cours de l'essai sont présentées en figure 1. L'évolution de la quantité de calcium lixivié suit une loi en racine carré du temps ce qui est caractéristique d'une dégradation limitée par un phénomène de diffusion [11]. Le rapport entre les quantités d'ions hydroxydes lixiviés et les quantités de calcium est proche de 2 ce qui résulte du fait que le calcium provient essentiellement de la dissolution des cristaux de portlandite.

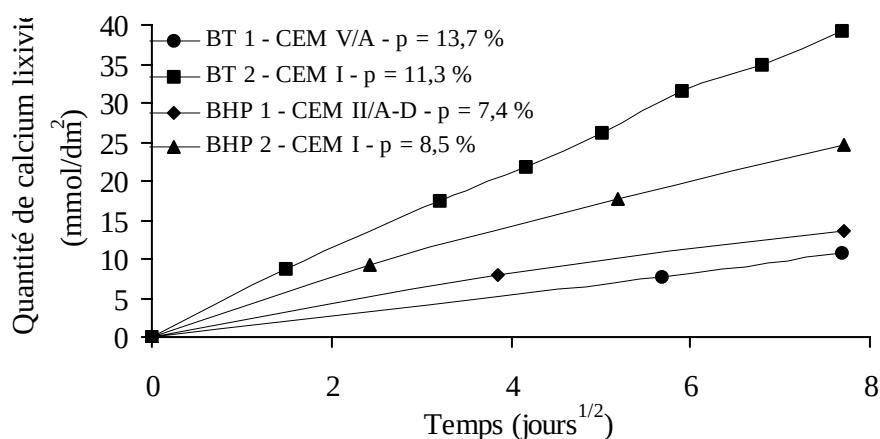


Figure 2. Quantités de calcium lixivié en fonction du temps pour les quatre bétons étudiés.

Tableau 2. Valeurs des indicateurs EPD_{eq} et EP_{pH} pour les quatre bétons

Béton	BT 1	BT 2	BHP 1	BHP 2
Quantité totale de calcium lixivié à 60 jours ($mmol/dm^2$)	10,9	39,2	13,5	24,7
Quantité initiale de calcium dans le liant (mol/dm^3)	3,1	4,6	4,4	4,1
Epaisseur dégradée équivalente (EPD_{eq}) en mm	0,35	0,85	0,30	0,60
Distance correspondant au front de coloration (EP_{pH}) en mm	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5

Les valeurs des indicateurs EPD_{eq} et EP_{pH} sont données dans le tableau 2. Les valeurs de l'indicateur EP_{pH} sont inférieures au seuil de détection de la méthode considérée comme étant égal à 0,5 mm. On constate que selon les critères définis au paragraphe 3.2, le BHP 1 peut être considéré comme au moins aussi durable que le béton BT 1. La plus faible porosité et la présence de la fumée de silice est à l'origine du bon comportement du BHP 1. Les réactions pouzzolaniques conduisent à une diminution de la teneur en portlandite et à la précipitation d'hydrates secondaires proches des C-S-H qui densifient la matrice cimentaire. Les mêmes critères sur les indicateurs EPD_{eq} et EP_{pH} conduisent à rejeter les deux bétons formulés à base de CEM I. Du fait d'une compacité plus grande, le BHP 2 se comporte néanmoins mieux que le béton BT 2.

4. Conclusion

L'intérêt de l'approche performantielle de la durabilité des structures en béton est croissant. C'est le cas notamment pour les éléments préfabriqués en béton pour lesquels cette approche permet de prendre en compte l'apport des nouveaux bétons particulièrement compacts, les spécificités des process de fabrication et les contrôles de la qualité effectués aux différents stades de leur fabrication. L'optimisation de la durabilité des bétons face aux attaques acides peut ainsi être appréhendée par une approche performantielle.

On dispose de la plupart des outils nécessaires à l'utilisation de l'approche performantielle. Les modes opératoires existent aujourd'hui et certains indicateurs de durabilité ont déjà été identifiés. Un des points clé correspond à la rédaction de normes pour les modes opératoires utilisés avec satisfaction depuis une dizaine d'années. Parallèlement, les modèles prédictifs deviennent plus élaborés et tendent vers une approche probabiliste permettant de prendre en compte la diversité des valeurs que peut prendre un paramètre d'entrée d'un modèle (par exemple la porosité, le rapport E/C, la quantité de portlandite,...).

Afin d'intégrer encore davantage l'approche performantielle dans la conception des produits et ouvrages en béton, trois étapes paraissent nécessaires.

La **première étape** concerne les acteurs de la normalisation puisqu'elle a comme finalité d'intégrer dès à présent dans les normes des approches performantielles de niveau 2 reposant sur le principe comparatif. Dans un premier temps et quand nécessaire, il n'est pas exclu que ces approches soient mixtes, c'est-à-dire couplant des obligations de moyen et des indicateurs de durabilité ou des essais performantiels. Bien entendu, il ne s'agit pas d'ajouter des obligations de performance aux obligations de moyen existantes. L'objectif est d'identifier judicieusement parmi les obligations de moyen qui ne facilitent pas l'innovation celles qui pourraient être remplacées par des indicateurs de durabilité ou des essais performantiels, tout en maintenant un niveau de risque au moins équivalent. Ainsi, les dosages minimaux en $L_{ant_{eq}}$ ou les limites fixées sur les quantités d'addition entrant dans le calcul du $L_{ant_{eq}}$ sont en général plus pénalisants que le rapport $Eau_{eff}/L_{ant_{eq}}$, qui constitue lui aussi une obligation de moyen.

La **seconde étape** serait de constituer une base de données comportant deux volets. Le premier ensemble correspondrait au recueil et à l'analyse des propriétés des bétons utilisés aujourd'hui. On aurait ainsi une idée de la valeur des indicateurs de durabilité à utiliser ultérieurement. Cette base de données s'étofferait notamment au fur et à mesure du déploiement de la première étape. L'autre volet concernerait l'identification des modèles de durabilité les plus adaptés à la quantification des indicateurs de durabilité en vue d'une durée de vie donnée.

La **troisième étape** serait d'élaborer des normes basées sur des approches performantielles complètes, au sens où elles utiliseraient des modèles de durabilité pour spécifier des valeurs pour chaque indicateur de durabilité en fonction de l'importance stratégique de l'ouvrage et de la durée de vie souhaitée. La confiance accordée à ces valeurs dépendra entre autres de la représentativité de la base de données, de l'analyse du retour d'expérience et de la pertinence des modèles.

5. Références bibliographiques

- [1] Andrade C. (2006), Multilevel (four) methodology for durability design, International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability, 19-21 mars 2006, Madrid.
- [2] Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, LCPC décembre 2003.
- [3] Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction, LCPC juin 1994.
- [4] Papadakis V.G., Fardis M.N. et Vayenas C.G. (1992) « Hydration and carbonation of pozzolanic cements », ACI Materials journal n°89.
- [5] Guide AFGC « Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction », juillet 2004.
- [6] Bernander K.G. et Oberg S.M. (1996) « Field surveys on carbonation depths in precast concrete elements », Concrete precasting plant and technology, n°11.
- [7] Miragliotta R. (2000) « Modélisation des processus physico-chimiques de la carbonatation des bétons préfabriqués - Prise en compte des effets de parois ». Thèse de doctorat de l'Université de la Rochelle.
- [8] Rozière E., Loukili A., Cussigh F. et Vincent B. (2006), Etude des bétons soumis au risque de carbonatation par le concept d'équivalence de performances. 24^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil organisées par l'Association Universitaire de Génie Civil, La Grande Motte
- [9] Badoz C., Francisco P. et Rougeau P. (2005), A performance test for the durability of concrete products exposed to chemical attacks, Proceedings du congrès international BIBM 2005.
- [10] Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Comptendu des journées techniques AFPC-AFREM des 11 et 12 décembre 1997.
- [11] Torrenti J.M., Didry O., Ollivier J.P. et Plas F. (1999) « La dégradation des bétons – Couplage fissuration – dégradation chimique », édition Hermès Science, 214 p.