



# Méthodologie d'application du concept de performance équivalente des bétons

RECOMMANDATIONS PROFESSIONNELLES  
PROVISOIRES



**Document élaboré sous l'égide  
de la Fédération Nationale des Travaux Publics**

**par le groupe de travail**

**Animateur**

François CUSSIGH - VINCI Construction France

**Membres**

Myriam CARCASSES - LMDC  
Christine MARY-DIPPE - CEBTP  
Philippe FRANCISCO - CERIB  
Philippe GEGOUT - BOUYGUES Construction  
Michel GUERINET - EIFFAGE Construction  
Lionel LINGER - VINCI Construction Grands Projets  
Ahmed LOUKILI - GeM, Ecole Centrale de Nantes  
Hugues HORNAIN - Ingénieur Conseil  
Nicolas MUSIKAS - Ecocem  
Jean-Pierre OLLIVIER - LMDC  
Wilfried PILLARD - CEBTP puis FFB/UMGO  
Patrick ROUGEAU - CERIB  
Emmanuel ROZIERE - GeM, Ecole Centrale de Nantes

**Rédacteurs**

Emmanuel ROZIERE et François CUSSIGH

# Sommaire

---

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>DOMAINE D'APPLICATION</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>RÉFÉRENCES NORMATIVES</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>SPÉCIFICATIONS SUR LES CONSTITUANTS</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>APPLICATION DU CONCEPT DE PERFORMANCE ÉQUIVALENTE</b>	<b>8</b>
1	COMPOSITION DU BÉTON DE RÉFÉRENCE	8
2	RÉALISATION DES ESSAIS	9
3	EXIGENCES SUR LA COMPOSITION DU BÉTON À QUALIFIER	10
3-1	Classes d'exposition XC. Corrosion induite par carbonatation	
3-2	Classes d'exposition XS. Corrosion induite par les chlorures de l'eau de mer	
3-3	Classes d'exposition XD. Corrosion induite par les chlorures autres que l'eau de mer	
3-4	Classes d'exposition XF. Attaque gel/dégel	
3-5	Classes d'exposition XA. Environnements chimiquement agressifs	
4	COMPTE-RENDU ET CONTRÔLE DES PERFORMANCES	17
<b>6</b>	<b>RÉFÉRENCES</b>	<b>18</b>
	<b>ANNEXE</b>	<b>23</b>
	<b>Mode opératoire d'essai de lixiviation à pH constant</b>	

# 1 Introduction

Le présent document établit des méthodologies de qualification de compositions de béton du point de vue de la durabilité selon une approche comparative fondée sur des essais performantiels et des indicateurs de durabilité. Ces méthodes sont autorisées – sans être explicitées – par la norme NF EN 206-1 au même titre que des valeurs limites pour la composition du béton (aux articles 5.3.2 et 5.3.3 de la norme), et visent le même objectif de durabilité, pour des actions environnementales données. Pour cet objectif de durabilité de 50 ans (cf. article 5.3.2 de NF EN 206-1), l'approche prescriptive et l'approche performantielle sont deux alternatives possibles : les critères performantiels donnés ne s'ajoutent pas aux valeurs limites donnés par les tableaux NA.F.1 ou NA.F.2 mais ils les remplacent en termes de garantie de durabilité.

Les recherches réalisées par Emmanuel Rozière entre 2005 et 2007 dans le cadre de la thèse « Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle » ont montré la variabilité des caractéristiques de durabilité des bétons conformes aux obligations de moyens de la norme NF EN 206-1 (tableaux NA.F.1 et NA.F.2) et l'intérêt d'une caractérisation plus directe de la durabilité des bétons en fonction de leur exposition.

Les méthodologies de qualification d'une composition de béton énoncées dans ce document sont fondées sur le concept de performance équivalente du béton, défini dans l'article 5.2.5.3 de la norme, et alternatif au concept du coefficient  $k$  (article 5.2.5.2). Le concept de performance équivalente permet de modifier les prescriptions de composition des bétons, en montrant, à l'aide d'essais performantiels et d'indicateurs de durabilité, que le béton à qualifier « a une équivalence de performance avec celle d'un béton de référence ».

Ce guide a pour objectif de permettre le développement de formulations de béton optimisées dans le contexte général du développement durable (l'approche performantielle autorise plus de liberté dans la composition des bétons et donc une meilleure prise en compte de l'impact environnemental) ou dans le contexte local d'ouvrages présentant des contraintes techniques particulières.

L'approche développée dans le 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, Etat de l'art et Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base*

*d'indicateurs de durabilité* » (2004) repose essentiellement sur l'identification d'un certain nombre d'indicateurs de durabilité auxquels des valeurs seuils sont associées, en fonction du niveau de durabilité potentielle visé.

Les présentes recommandations utilisent certains de ces indicateurs de durabilité comme la porosité accessible à l'eau et le coefficient de diffusion des chlorures. Elles ne font pas référence à des seuils (tels que ceux définis dans le guide AFGC précité) mais font appel à une démonstration d'équivalence de performance qui devrait permettre d'enrichir les résultats disponibles en matière d'indicateurs de durabilité et d'essais performantiels et d'ajuster ainsi les seuils proposés par le guide AFGC.

Les présentes recommandations sont provisoires en l'attente de l'évolution des travaux français et européens sur le sujet. Elles pourraient à l'avenir être intégrées à un document de synthèse plus complet qui utiliserait de façon optimale les apports des deux approches performantielles complémentaires que sont l'approche comparative du présent document et l'approche du futur guide pratique du LCPC pour l'application de la démarche AFGC aux ouvrages de génie civil courants.

## Domaine d'application

Le domaine d'application de ce document est identique à celui de la norme NF EN 206-1. Les classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement sont également définies dans la norme NF EN 206-1, section 4.1. Les actions environnementales considérées ici excluent l'alcali-réaction et les attaques sulfatiques internes, dont l'origine est interne aux bétons. De façon générale, ce document s'applique aux bétons dont les constituants sont conformes aux spécifications de la norme NF EN 206-1. Il est applicable également aux produits de structure préfabriqués (normes de produit, dont la norme NF EN 13369). Pour les classes XA, correspondant aux environnements chimiquement agressifs, les démarches de qualification proposées concernent la lixiviation et les attaques sulfatiques externes. Les expositions à certains agents agressifs ne sont pas couvertes par le présent guide du fait de l'absence d'essai performantiel confirmé à l'époque de sa rédaction.

Pour les bétons coulés en place, l'étude de justification de l'équivalence de performance relève de la responsabilité de l'entreprise.

Pour les produits préfabriqués en usine, l'étude de justification de l'équivalence de performance relève de la responsabilité de l'entreprise ou du préfabricant qui doit alors en informer son client.

## Références normatives

Ce document a pour objet la qualification de compositions de béton, pour une classe d'exposition ou une combinaison de classes d'exposition données. Les méthodes de conception performantielles exposées ne concernent donc que la durabilité du béton soumis aux actions environnementales. Pour garantir la durabilité de l'ouvrage, il est nécessaire que les règles de conception et d'exécution soient respectées.

L'application de l'approche comparative du concept de performance équivalente n'est possible que si les mêmes précautions que celles supposées par l'approche prescriptive sont prises par ailleurs. En particulier, les constituants du béton, et les méthodes d'essais sur les constituants et le béton frais ou durci, doivent respecter les normes citées en référence dans la norme NF EN 206-1.

Les modes opératoires des essais performantiels utilisés dans le présent guide sont donnés dans les documents ci-après :

- Norme XP P 18-458, Essai de carbonatation accéléré, Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté.
- Projet de norme prNF P 18-459, Essai de porosité et de masse volumique sur béton durci.
- NF EN 13369 « Règles communes pour les produits préfabriqués en béton » - Annexe G « Essai d'absorption d'eau ».
- GranDuBé, (2007) Grandeurs associées à la Durabilité des Bétons, sous la direction de G. Arliguie et H. Hornain, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2007.
- NT Build 492, Essai de migration pour la détermination du coefficient de migration des chlorures en régime non stationnaire.
- XP P 18-420, Béton – Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline.
- NF P 18-424, Bétons – Essai de gel sur béton durci – Gel dans l'eau – Dégel dans l'eau.
- NF P 18-425, Bétons – Essai de gel sur béton durci – Gel dans l'air – Dégel dans l'eau.
- Norme ASTM C 457-98 – Détermination au microscope des vides d'air et des paramètres du réseau de vides d'air dans le béton durci, Partie 2 – méthode modifiée de comptage par point.

Le mode opératoire de l'essai de lixiviation à pH constant est donné en Annexe.

## Spécifications sur les constituants

# 4

L'aptitude générale à l'emploi est établie pour les constituants conformes aux dispositions de l'article 5.1. « Exigences de base relatives aux constituants » de la NF EN 206-1.

# Application du concept de performance équivalente

Pour chaque classe d'exposition, il s'agit de démontrer par un ou plusieurs essais performantiels, que la composition du béton à qualifier lui confère une durabilité potentielle au moins équivalente à celle d'un béton de référence conforme aux tableaux NA.F.1 ou NA.F.2 de la norme NF EN 206-1. La démonstration est réalisée selon les méthodologies exposées ci-après pour les classes d'expositions correspondantes.

Dans les cas où les actions environnementales correspondent à une combinaison de classes d'exposition, l'équivalence de performances doit être démontrée pour chacune des classes d'exposition pour lesquelles la composition de béton à qualifier déroge aux prescriptions de l'annexe NA.F de la norme NF EN 206-1.

## 1 COMPOSITION DU BÉTON DE RÉFÉRENCE

Le béton de référence est conforme à l'annexe NA.F de la norme NF EN 206-1 pour la classe d'exposition considérée.

Il est défini de façon prescriptive et sa composition doit répondre :

- À des exigences générales, qui sont les prescriptions et valeurs limites des tableaux NA.F.1 ou NA.F.2.
- À des exigences spécifiques, définies en fonction de la classe d'exposition. Ces exigences spécifiques visent à garantir un niveau de performance du béton de référence tel que l'application du concept de performance équivalent conduise globalement à une durabilité améliorée des ouvrages en comparaison avec l'approche prescriptive traditionnelle.

Ainsi dans tous les cas, le béton de référence répond aux deux critères supplémentaires ci-dessous :

- Le rapport  $E_{\text{eff}}/\text{Liant}_{\text{éq}}$  est inférieur ou égal au rapport  $E_{\text{eff}}/\text{Liant}_{\text{éq}}$  maximal autorisé par la norme NF EN 206-1 pour la classe d'exposition considérée diminué de 0,05.

- Le dosage en Liant<sub>eq</sub> est supérieur de 5 % au dosage minimal requis pour la classe d'exposition considérée (tableau NA.F.1) ou bien l'absorption d'eau est inférieure de 0,5 % (en valeur absolue) à l'absorption maximale autorisée pour la classe d'exposition considérée (tableau NA.F.2).

En général, les granulats du béton de référence sont les mêmes que ceux du béton à qualifier.

Toutefois, pour les classes d'exposition XF4 et XA3, les granulats du béton de référence doivent être de code indicé B avec une absorption d'eau correspondant au code A selon les dispositions de la norme XP P18-545. Si les granulats du béton à qualifier ne respectent pas ces clauses, on choisira donc pour le béton de référence des granulats différents.

## 2 RÉALISATION DES ESSAIS

Toutes les gâchées de la composition de référence et de la composition à qualifier nécessaires à la démonstration d'une équivalence de performances sont réalisées par le même laboratoire.

Le laboratoire doit pouvoir justifier de références probantes pour la réalisation des essais de démonstration de l'équivalence de performance. Des résultats cohérents obtenus lors d'essais croisés avec des laboratoires référencés lors de projets de recherche participatifs (par exemple GranDuBé) constituent des références probantes.

Les bétons frais des compositions de référence et à qualifier doivent appartenir à la même classe de consistance.

Les éprouvettes sont fabriquées selon les normes et modes opératoires cités en référence. Les conditions de cure (et le cas échéant de thermomaturation) doivent être représentatives de ce qui est pratiqué sur le terrain, et conformes aux règlements sur l'exécution des ouvrages concernés.

Chacun des essais performantiels est réalisé à la même échéance sur le béton de référence et le béton à qualifier. En général, cette échéance est fixée à 28 jours dans le but de permettre une acquisition suffisamment rapide (et donc plus facilement exploitable) des résultats. Si le planning de l'opération le permet, il est loisible d'effectuer les essais à l'échéance de 90 jours. Toutefois, cette échéance doit être pertinente du point de vue de l'évaluation de la durabilité et compatible avec l'échéance d'exposition, en particulier dans les cas d'une exposition précoce aux agents agressifs.

Chaque essai doit être effectué dans un même laboratoire pour l'ensemble des compositions, selon les modes opératoires cités en référence.

### 3 EXIGENCES SUR LA COMPOSITION DU BÉTON À QUALIFIER

Les exigences générales sur la composition du béton à qualifier consistent en l'aptitude générale à l'emploi des constituants. Les exigences spécifiques à chaque classe d'exposition sont énoncées ci-après.

Chaque essai performantiel donne lieu au calcul de la moyenne des résultats obtenus. Les valeurs étant données avec un nombre pertinent de chiffres significatifs, la performance moyenne du béton à qualifier (qual.) doit vérifier les inégalités données, relativement à la composition de référence (réf.).

#### 3.1 Classes d'exposition XC. Corrosion induite par carbonatation

L'essai performantiel est l'essai de carbonatation accéléré, selon la norme XP P 18-458.

#### Note

Un mode opératoire d'essai de carbonatation accélérée est en cours d'élaboration au niveau européen et pourrait être utilisé à la place de l'essai français.

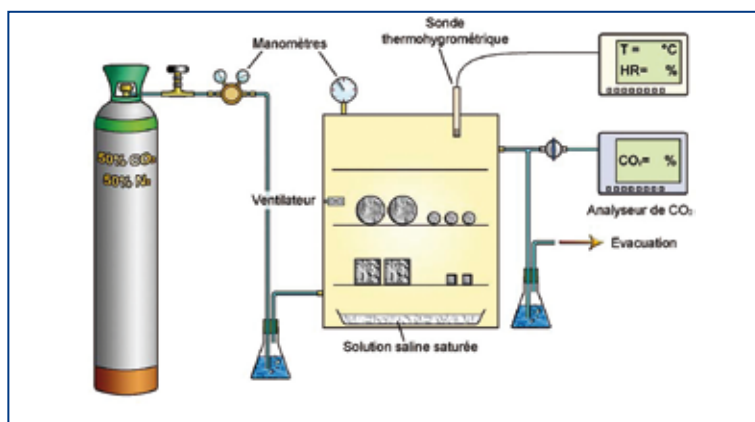


Figure 1 : Exemple de schéma d'un essai de carbonatation accélérée

Le résultat de l'essai est la profondeur carbonatée moyenne après 28 jours passés dans l'enceinte de carbonatation, exprimée en mm, et arrondie à l'unité près. La profondeur carbonatée est mesurée selon le mode opératoire cité en référence. Les moyennes obtenues doivent vérifier les inégalités suivantes :

$$\text{Profondeur carbonatée (qual.)} \leq \text{Profondeur carbonatée (réf.)}$$

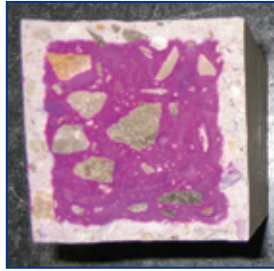


Figure 2 : Section d'éprouvette partiellement carbonatée, avec mise en évidence de la zone carbonatée (incolore) par la phénolphtaléine

### 3.2 Classes d'exposition XS. Corrosion induite par les chlorures de l'eau de mer

La démonstration de l'équivalence de performances s'appuie sur un indicateur déterminé sur béton à partir d'un essai de diffusion des ions chlorures. On peut utiliser la norme NT Build 492 (essai de migration) ou des modes opératoires alternatifs conformes aux recommandations du projet GranDuBé. Le résultat de l'essai est le coefficient de diffusion des chlorures DCI ns en régime non stationnaire. Il est déterminé selon la procédure donnée dans les documents précités. Les moyennes obtenues, exprimées en  $10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s et arrondies à l'unité près, doivent vérifier l'inégalité suivante :

$$\text{DCI ns (qual.)} \leq \text{DCI ns (réf.)}$$

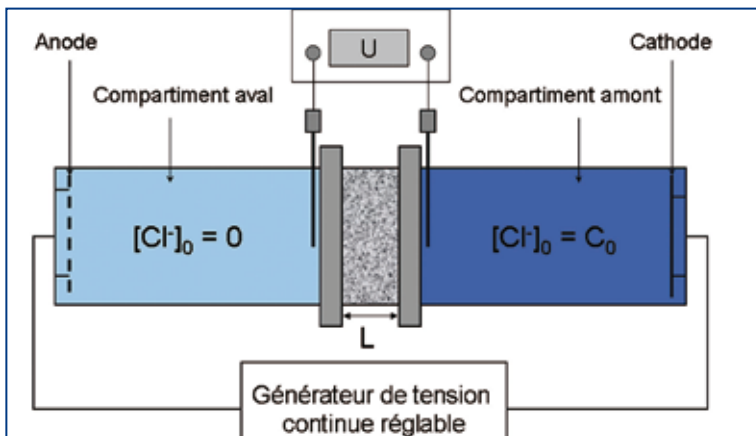


Figure 3 : Schéma de l'essai de migration des ions chlorures sous champ électrique

Si la moyenne du béton de référence est inférieure à  $10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s, les résultats sont arrondis à la demi-unité supérieure près.

Pour les classes d'exposition XS2 et XS3, dans l'attente d'un essai performantiel reconnu permettant de mesurer la résistance à l'attaque chimique par l'eau de mer, la composition du liant utilisé doit être telle qu'il respecte les exigences de la norme NF P 15-317 (PM).



Figure 4 : Corps d'épreuve après essai NT Build 492. Le front de coloration indique la profondeur de pénétration des ions chlorures (Photo CEBTP)

### 3.3 Classes d'exposition XD. Corrosion induite par les chlorures autres que l'eau de mer

La démonstration de l'équivalence de performances s'appuie sur un indicateur déterminé sur béton à partir d'un essai de diffusion des ions chlorures. On peut utiliser la norme NT Build 492 (essai de migration), ou des modes opératoires alternatifs conformes aux recommandations du projet GrandDuBé. Le résultat de l'essai est le coefficient de diffusion des chlorures DCI ns en régime non stationnaire. Il est déterminé selon la procédure donnée dans les documents précités. Les moyennes obtenues, exprimées en  $10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s et arrondies à l'unité près, doivent vérifier l'inégalité suivante :

$$\text{DCI ns (qual.)} \leq \text{DCI ns (réf.)}$$

Si la moyenne du béton de référence est inférieure à  $10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s, les résultats sont arrondis à la demi-unité supérieure près.

Pour la classe XD3, en cas d'utilisation de sels de déverglçage dont la teneur en sulfates solubles est supérieure ou égale à 3 %, la composition du liant utilisé doit être telle qu'il respecte les exigences de la norme NF P 15-317 (PM) ou de la norme NF P 15-319 (ES).

### 3.4 Classes d'exposition XF. Attaque gel/dégel

Pour la classe d'exposition XF1, on considère généralement qu'un béton bien formulé avec une bonne compacité présente une durabilité satisfaisante (voir « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel », LCPC 2003). L'indicateur retenu est donc la mesure de la porosité à l'eau  $\varepsilon$  ou de l'absorption d'eau  $\alpha$ , ramenée à la fraction volumique de pâte  $v_p$  du béton (définie comme le rapport entre la somme des volumes de l'air, de l'eau efficace et de l'ensemble des constituants solides inférieurs à 63  $\mu\text{m}$  d'une part et le volume total d'autre part).

Les valeurs de porosité à l'eau sont arrondies à l'unité près.

Les valeurs d'absorption d'eau sont arrondies à une demi-unité près.

Les fractions volumiques de pâte sont calculées à 0,01 près.

Les moyennes obtenues, exprimées en %, doivent vérifier l'une ou l'autre des inégalités suivantes :

$$\begin{aligned}\varepsilon / v_p (\text{qual.}) &\leq \varepsilon / v_p (\text{réf.}) \\ \alpha / v_p (\text{qual.}) &\leq \alpha / v_p (\text{réf.})\end{aligned}$$

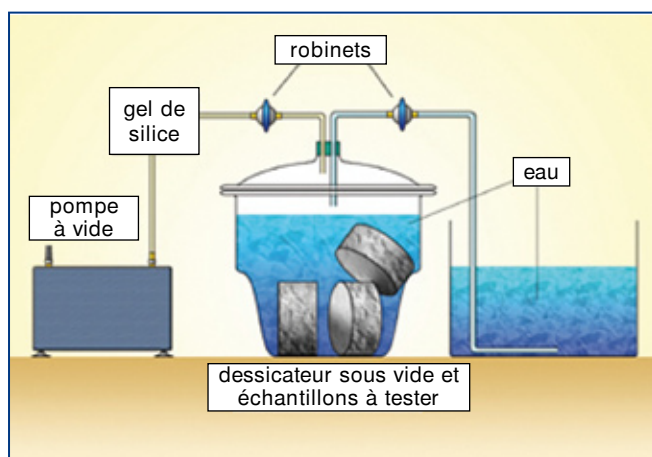


Figure 5 : Schéma de l'essai de porosité à l'eau

Pour la classe XF2, il n'existe pas à ce jour d'essai performantiel reconnu représentatif de ce type d'exposition (l'essai d'écaillage XP P18-420 est trop sévère par rapport à l'agression par les sels en zone de gel modéré). Par contre, il est admis que les bétons qui ne sont pas les plus exposés aux sels de déverglaçage (les ouvrages les plus exposés sont les éléments saturés en eau et soumis aux projections directes de sels de déverglaçage)

et qui répondent aux critères de composition de la classe XD3 (selon tableaux NA.F.1 ou NA.F.2) procurent une durabilité satisfaisante pour cette exposition. Si le béton à qualifier est justifiable de la classe XD3 selon les dispositions du § 5.3.3 ci-avant, la conformité aux exigences de durabilité de la classe XF2 peut donc être validée.

Pour les classes XF3 et XF4, la démonstration de l'équivalence de performances peut être menée selon des méthodologies performantielles données dans les Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel (LCPC 2003). Cette démarche peut s'appliquer directement au béton à qualifier, sans nécessaire comparaison de performances avec un béton de référence.

### **3.5 Classes d'exposition XA. Environnements chimiquement agressifs**

#### **3.5-1 *Attaques acides et eaux faiblement minéralisées***

La démonstration d'équivalence de performance ci-après concerne les bétons exposés à un pH inférieur à 6,5 ou à la lixiviation, mais exclut les attaques dues aux acides organiques et au nitrate d'ammonium.

L'essai performantiel est l'essai de lixiviation à pH constant cité en référence et décrit avec plus de détails dans l'annexe. Il est mené sur une éprouvette de chaque composition, à la valeur de pH la plus faible du domaine correspondant à la classe d'exposition (NF EN 206-1, 4.1, tableau 2) :

- pH =  $5,5 \pm 0,1$  pour la classe XA1.
- pH =  $4,5 \pm 0,1$  pour la classe XA2.
- pH =  $4,0 \pm 0,1$  pour la classe XA3.

L'essai consiste à immerger un échantillon de béton dans une solution chimiquement agressive (acide nitrique dilué).

Des échantillons de béton partiellement recouverts d'un mastic époxy sont immergés dans  $1,5 \pm 0,1$  l d'une solution (eau déminéralisée et acide nitrique) maintenue sous agitation et à la température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Deux indicateurs sont quantifiés après 60 jours d'essai :

- L'épaisseur dégradée équivalente ( $\text{EPD}_{\text{eq}}$ ) correspondant à la quantité de calcium lixivié.

$\text{EPD}_{\text{eq}}$  est exprimée en mm à 0,05 mm près.

- L'épaisseur dégradée mesurée ( $EPD_{pH}$ ) correspondant au front de coloration observé après pulvérisation d'une solution de phénolphtaléine.

$EPD_{pH}$  est exprimée en mm à 0,5 mm près.

Les résultats obtenus doivent vérifier les inégalités suivantes :

$$EPD_{\text{éq}} (\text{qual.}) \leq EPD_{\text{éq}} (\text{réf.})$$

et

$$EPD_{pH} (\text{qual.}) \leq EPD_{pH} (\text{réf.})$$

Dans le cas de granulats contenant des éléments calcaires ou de liant incorporant du filler calcaire, dans l'attente de la parution d'une version révisée de la méthode d'essai donnée en annexe intégrant spécifiquement ce cas particulier, la durée de l'essai est portée à 120 jours et l'interprétation est basée uniquement sur l'indicateur lié au front de pH. (1)

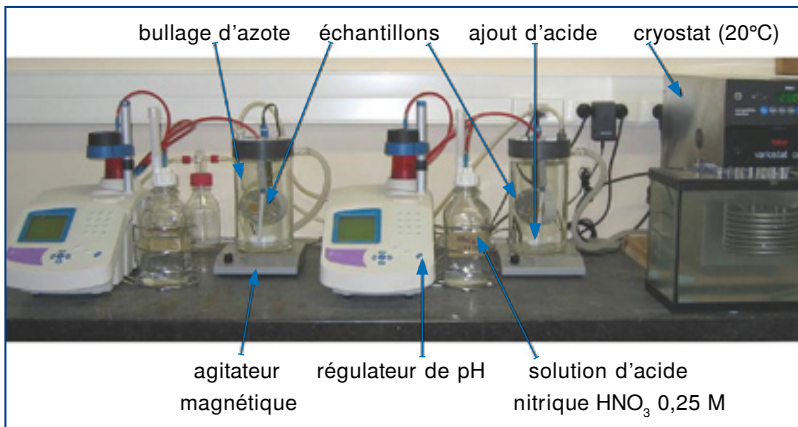


Figure 6 : Deux dispositifs expérimentaux d'essai de lixiviation à pH constant (Photo GeM)

(1) Le groupe de travail GEF 8 Lixiviation a réalisé à ce jour des essais croisés sur des bétons à base de granulats siliceux et a prévu des essais complémentaires sur des bétons contenant des granulats calcaires ou silico-calcaires. Il n'a pas encore rendu de conclusions sur ce sujet à la date de parution du présent guide.

### 3-5-2 *Attaques sulfatiques externes*

En l'absence d'essai performantiel spécifique reconnu représentatif, la démonstration de l'équivalence de performances s'appuie sur deux critères, le premier caractérisant la compacité du béton et le deuxième évaluant la résistance du liant aux attaques sulfatiques.

La première démonstration concerne les bétons dérogeant à l'obligation de moyens en termes de rapport Eau efficace / Liant<sub>eq</sub> maximal ou de teneur minimale en Liant<sub>eq</sub>.

La deuxième démonstration concerne les bétons qui dérogent aux prescriptions sur la nature du liant (ciment non PM ES par exemple).

**1)** L'essai performantiel sur les bétons est un essai de diffusion des ions chlorures (cet essai est adapté à la caractérisation de la diffusivité des ions dans le milieu poreux). On peut utiliser la norme NT Build 492 (essai de migration) ou des modes opératoires alternatifs conformes aux recommandations du projet GranDuBé. Le résultat de l'essai est le coefficient de diffusion des chlorures DCI ns en régime non stationnaire. Il est déterminé selon la procédure donnée dans les documents cités. Les moyennes obtenues, exprimées en  $10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s et arrondies à l'unité près, doivent vérifier l'inégalité suivante :

$$\text{DCI ns (qual.)} \leq \text{DCI ns (réf.)}$$

Si la moyenne du béton de référence est inférieure à  $10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s, les résultats sont arrondis à la demi-unité supérieure près.

**2)** Le liant doit être qualifié par rapport au liant du béton de référence, par exemple selon l'essai de tenue à l'eau à haute teneur en sulfates défini dans la norme NF P 18-837 modifiée. Par rapport à ce dernier mode opératoire, les variantes sont les suivantes :

- La solution de sulfate de magnésium est remplacée par une solution de sulfate de sodium de même concentration – sauf dans le cas d'une exposition au sulfate de magnésium.
- Le préconditionnement comprend : 14 jours de cure humide (HR ≥ 95 %), 14 jours de séchage à 40°C, retour à température (24 h), conservation (4 h) puis saturation (20 h) sous vide en solution agressive (sulfate de sodium) ou solution témoin (eau du robinet).

Les déformations longitudinales (DLsulfate) après six mois d'immersion doivent alors vérifier l'inégalité suivante :

$$DL_{\text{sulfate}} (\text{qual.}) \leq DL_{\text{sulfate}} (\text{réf.})$$



Figure 7 : Photos d'éprouvettes prismatiques (2x2x16 et 4x4x16 cm<sup>3</sup>) après 4 mois d'immersion en solution agressive de sulfate de sodium

## 4 COMPTE-RENDU ET CONTRÔLE DES PERFORMANCES

Le compte-rendu de la démonstration d'équivalence de performance doit comporter les fiches techniques des constituants des bétons, les compositions des bétons de référence et à qualifier, la liste des essais réalisés et les résultats détaillés des essais.

L'analyse des résultats doit conclure sur l'équivalence de performance de la composition du béton à qualifier par rapport à la composition du béton de référence.

Cette équivalence, évaluée au stade de l'essai initial, est contrôlée pendant la durée de l'opération par la vérification du respect de la composition nominale du béton qualifié et de la conformité des différents constituants.

## Références

NF EN 206-1, Béton – Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité, AFNOR, avril 2004.

NF EN 13369, Règles communes pour les produits préfabriqués en béton.

NF P 18-837, Produits de calage et/ou scellement à base de liants hydrauliques, Essai de tenue à l'eau de mer et/ou à l'eau à haute teneur en sulfates, AFNOR, 1993.

NBN B15-100 : Méthodologie pour l'évaluation et l'attestation de l'aptitude à l'emploi de ciments et d'additions de type II destinés au béton, Projet pour la rédaction d'un document normatif - version du 20 décembre 2005.

BRL 9340, Nationale beoordelingsrichtlijn 9340, Combinatie van gemalen hoogovenslak en portlandcement voor toepassing als bindmiddel en beton, Pays-Bas, mars 2004.

E 464-2005, Betões – Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais, Documentação normativa especificação LNEC, Portugal, 2005.

Baroghel-Bouny V. et al., AFGC (2004), *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, Etat de l'art et Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité*, Association Française de Génie Civil.

GranDuBé, (2007) *Grandeurs associées à la Durabilité des Bétons*, sous la direction de G. Arliguie et H. Hornain, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2007.

LCPC (2003) *Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel, Guide technique*, déc. 2003.

AFPC-AFREM (1997) *Mode opératoire recommandé, essai de carbonatation accéléré, mesure de l'épaisseur de béton carbonaté, dans Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM Durabilité des bétons, « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité », 11 et 12 décembre 1997, Toulouse, pp 153-158.*

Assié S., (2004) *Durabilité des bétons autoplaçants*, Thèse de doctorat, INSA Toulouse. Baron J., Gagne R. et Ollivier J.-P. (1996) Chapitre 11 – Viser la durabilité, dans ATILH, sous la direction de J. Baron et J.-P. Ollivier, Les Bétons, Bases et données pour leur formulation, Ed. Eyrolles, Chapitre 11, pp 307-363.

Baroghel-Bouny V., Gawsewitch J., Belin P., Ounoughi K., Arnaud S., Olivier G., Bissonnette B., (2004) *Vieillessement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI<sup>e</sup> siècle – IV. Résultats issus des prélèvements effectués sur les corps d'épreuve de différents sites aux premières échéances de mesure*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées (249), mars-avril 2004, pp 49-100.

Baroghel-Bouny V., Cussigh F., Rougeau P. (2008) *Approche performantielle de la durabilité des bétons*, Livre " La durabilité des bétons ", Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Chaussadent T. (1997) *Analyse des mécanismes de carbonatation du béton, dans Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM Durabilité des bétons, « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité »*, pp 75-87.

De Schutter G., and Audenaert K. (2004) *Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration*, Materials and structures 37, 591-596.

Khokhar M.I.A., Rozière E., Grondin F., Loukili A. (2007) Effect of mineral additives on some of durability parameters of concrete, *International conference on advances in cement based materials and applications to civil infrastructure (ACBM-ACI)*, Lahore, Pakistan, 12-14 décembre 2007, pp 289-299.

Miragliotta R. (2000) *Modélisation des processus physico-chimiques de la carbonatation des bétons préfabriqués – Prise en compte des effets de parois*. Thèse de l'Université de La Rochelle.

Papadakis V. G., (2000) *Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress*, Cement and Concrete Research 30, 291-299.

Rougeau P., et al. (1997), *Les résultats d'essais croisés AFREM : « Essai de carbonatation accéléré »*, dans *Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM Durabilité des bétons, « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité »*.

Rozière E., Loukili A., Cussigh F. (2008) A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation, *Construction and Building Materials*, In press.

Thiery M., Dangla P., Villain G., Platret G., Massieu E., Druon M., Baroghel-Bouny V. (2004) *Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 252-253, septembre-octobre-novembre-décembre 2004, pp 153-187.

Truc O., Ollivier J.-P., Carcassès M. (2000) *A new way for determining the chloride diffusion coefficient in concrete from steady state migration*, Cement and Concrete Research 30, pp 217-226.

Villain G., Platret G. (2006) *Two experimental methods to determine carbonation profiles in concrete*, ACI Materials Journal, V. 103, No. 4, July-August 2006.

Amiri O., Aït-Mokhtar K. (2007) *Rapport synthétique sur les méthodes de calcul des coefficients de diffusion  $D_{app}$  et  $D_{eff}$  dans GranDuBé*, Grandeurs associées à la Durabilité des Bétons, 2007.

Chloritest (2006) *Resistance of concrete to chloride ingress. From laboratory tests to infield performance. Testing Resistance of concrete to chloride ingress : a proposal to CEN for consideration as EN standard*, 2006, 22 p, cité dans (GranDuBé, 2007).

Djerbi A., Bonnet S., Khelidj A. (2006) *Effect of mechanical damage on chloride migration into high performance concrete*, 7th CANMET/ACI International conference on durability of concrete, Montréal, Canada.

Nordtest Method NT Build 443 (1995) *Essai d'immersion pour la détermination du coefficient de diffusion des chlorures en régime non stationnaire par mesure du profil de pénétration*.

Nordtest Method NT Build 492 (1999) *Concrete, mortar and cement-based repair materials : Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*.

Tang L., Nilsson L. (1992) *Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field*, ACI Materials Journal, V. 89, No. 1, Jan.-Feb. 1992, pp 49-53.

Zhang T. et Gjorv O. E. (2005) *Effect of chloride source concentration on chloride diffusivity in concrete*, ACI Materials Journal, V. 102, September-October 2005.

Francisco P., Badoz C., Rougeau P. (2007) *A performance approach for durability of concrete exposed to acid attacks and aggressive water*, Proceeding Consec 07.

Bertron A., Duchesne J., Escadeillas G. (2005) *Accelerated tests of hardened cement pastes alteration by organic acids : analysis of the pH effect*, Cement and Concrete Research 35, 155-166.

Bourdette B. (1994) *Durabilité du mortier : prise en compte des auréoles de transition dans la caractérisation et la modélisation des processus physiques et chimiques d'altération*, Thèse INSA Toulouse.

Le Bellego C. (2001) *Couplage chimie mécanique dans les structures en béton armé attaquées par l'eau – Etude expérimentale et analyse numérique*, Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan.

Rozière E., Loukili A. (2007) Evaluation of durability of concrete exposed to leaching through a performance-based test, *International conference on advances in cement based materials and applications to civil infrastructure (ACBM-ACI)*, Lahore, Pakistan, 12-14 décembre 2007, pp 551-559.

ASTM C 1012- 95a (2000) *Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution*, Annual Book of ASTM Standards, volume 04.01 cement; lime; gypsum, 2000.

Duval R., Hornain H. (1992) *Chapitre 9 : La durabilité du béton vis-à-vis des eaux agressives, dans La durabilité des bétons*, sous la direction de J. Baron et J.-P. Ollivier, Presses de l'ENPC, 1992.

Irassar E.F., Bonavetti V.L., Gonzalez M. (2003) *Microstructural study of sulphate attack on ordinary and limestone Portland cements at ambient temperature*, Cement and Concrete Research 33, 31-41.

Mary-Dippe C., Coquillat G. (2006) *Concept d'équivalence de performance, Etude de l'environnement marin, Classe d'exposition XS3, Rapport 2.2 du 15 juin 2006*, CEBTP.

Neville A. (2004) *The confused world of sulfate attack on concrete*, Review, Cement and Concrete Research 34, 1275-1296.

Planel D. (2002) *Les effets couplés de la précipitation d'espèces secondaires sur le comportement mécanique et la dégradation chimique des bétons*, Thèse de doctorat, Université de Marne la Vallée.

Planel D., Sercombe J., Le Bescop P., Adenot F., Torrenti J.-M. (2006) *Long-term performance of cement paste during combined calcium leaching-sulfate attack : kinetics and size effect*, Cement and Concrete Research 36, 137-143.

Vichot A., Ollivier J.P. (2008) Livre "*La durabilité des bétons : bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement*", Presses de l'ENPC.

FIB-Code Model Bulletin 34.

Adenot F. (1992), *Durabilité du béton : Caractérisation et modélisation des processus physiques et chimiques de dégradation du ciment*, Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans, France, 238 pages.

# Annexe

## Mode opératoire d'essai de lixiviation à pH constant

**Note**  
Des essais croisés sont en cours pour préciser le domaine d'application de l'essai, permettre une plus large utilisation, et aboutir à une norme.

### 1 PRINCIPE

L'essai consiste à immerger un échantillon de béton dans une solution chimiquement agressive (acide nitrique dilué).

Des échantillons de béton partiellement recouverts d'un mastic époxy sont immergés dans  $1,5 \pm 0,1$  l d'une solution (eau déminéralisée et acide nitrique) maintenue sous agitation et à la température de  $20^\circ \pm 2^\circ\text{C}$ .

Le pH de la solution dépend de la classe d'exposition retenue :

- pH =  $5,5 \pm 0,1$  pour la classe XA1.
- pH =  $4,5 \pm 0,1$  pour la classe XA2.
- pH =  $4,0 \pm 0,1$  pour la classe XA3.

Les ions calcium et hydroxyle, provenant des hydrates de la matrice cimentaire, sont lixiviés ce qui entraîne une augmentation de la valeur du pH. La valeur du pH est maintenue constante par des ajouts répétés de petites quantités d'acide nitrique de concentration  $0,25$  mol/l. La température de la solution est maintenue constante par l'utilisation d'un réacteur double paroi, entre lesquelles circule de l'eau à  $20^\circ \pm 1^\circ\text{C}$ . Un flot continu de  $\text{N}_2$  traverse la solution pour éviter la carbonatation.

L'épaisseur dégradée est mesurée à partir de la quantité de calcium lixiviée et du front de pH.

### 2 DOMAINE D'APPLICATION PROVISOIRE

Un groupe de travail a été mis en place en 2006 (au sein du GEF8/P18B Commission béton) afin de mener des essais croisés, d'identifier les indicateurs à utiliser et de rédiger une norme expérimentale.

A ce jour, les essais croisés ont porté sur des bétons à base de granulats siliceux. Pour cette raison le domaine d'application provisoire de cette

méthode d'essai se limite actuellement à des bétons formulés avec des granulats siliceux. Le groupe de travail GEF8 a convenu de réaliser des essais complémentaires sur des bétons formulés avec des granulats calcaires et silico-calcaires.

### **3 MATÉRIAUX ET SUBSTANCES CHIMIQUES**

- Acide nitrique.
- Mastic époxy.
- Azote pur.
- Eau déminéralisée.
- Oxyde de calcium.

### **4 APPAREILLAGE**

- Récipient double paroi de 2 l.
- Système d'agitation magnétique, de préférence sans moteur pour éviter le dégagement de chaleur.
- Couverture pour le récipient permettant la suspension de l'échantillon, l'addition d'acide nitrique, l'arrivée d'azote, l'immersion de l'électrode pour la mesure du pH, l'utilisation du système de pompage.
- Pied à coulisse gradué avec une précision de 0,1 mm.
- Entonnoir.
- Baguette de verre, fil en nylon, tubulures en plastique.
- Deux flacons laveurs pour la purification et l'arrivée d'azote et une bouteille en verre pour l'acide nitrique de concentration 0,25 mol/l.
- Cryostat maintenu à  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ .
- Système de pompage.
- Balance avec une précision de 0,1 g.
- Epruvettes graduées de 1000 ml et 500 ml, flacons de 1000 ml, béchers de 100 ml, pipette graduée de 10 ml.
- Hotte, gants, lunettes de protection, masque.
- Système régulateur de pH qui indique la température de la solution et le volume d'acide nitrique ajouté et qui régule le pH.

## 5 PRÉPARATION DE L'ÉCHANTILLON DE BÉTON

- L'échantillon est issu d'un cylindre de diamètre  $80 \pm 5$  mm et de hauteur  $100 \pm 20$  mm. Le cylindre est prélevé par carottage à partir d'une éprouvette de béton fabriqué selon la norme NF EN 12390-2 ou à partir d'un produit préfabriqué. Les échantillons sont conservés dans l'eau de chaux.
- Fixer le fil en nylon au milieu du cylindre.
- Appliquer le mastic époxy (type Resolcoat 3030).
- Prélever par sciage l'échantillon à partir du cylindre juste avant de lancer l'essai. L'échantillon soumis à l'essai de lixiviation est un cylindre de diamètre  $80 \pm 5$  mm et d'épaisseur  $30 \pm 5$  mm âgé au minimum de 28 jours. Le diamètre et l'épaisseur de l'échantillon sont mesurés avec le pied à coulisse.
- Replacer l'échantillon dans l'eau saturée de chaux.

## 6 MODE OPÉRATOIRE D'ESSAI

### 6.1 Préparation et mise en place de l'essai

- Préparer le système d'agitation magnétique et le récipient double paroi.
- Préparer les flacons laveurs avec 500 ml d'eau déminéralisée et 5 g d'oxyde de calcium dans le premier flacon (D) et 500 ml d'eau déminéralisée dans le second (C). Utiliser des tubulures en plastique appropriées pour connecter les éléments comme illustré en figure 1.
- Connecter avec des tubulures appropriées le cryostat maintenu à  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  et le récipient double paroi comme illustré en figure 1.
- Préparer le système régulateur de pH connecté à la bouteille d'acide nitrique de concentration 0,25 mol/l comme illustré en figure 1.
- Préparer 1500 ml d'une solution d'acide nitrique au pH requis.

- Immerger l'échantillon dans les 1500 ml de solution d'acide nitrique. Connecter le système de courant d'azote comme illustré en figure 1. Connecter la tubulure destinée aux ajouts d'acide nitrique.

## 6-2 Essai

- Mettre en route le système de courant continu d'azote. Immerger l'électrode de pH. Mettre en route le système régulateur de pH. Mettre en route le système d'agitation magnétique. Noter l'heure correspondant au début d'essai.
- Noter, au moins une fois par jour, le volume d'acide nitrique ajouté et l'heure. La solution est renouvelée lorsque 30 ml d'acide nitrique ont été ajoutés.

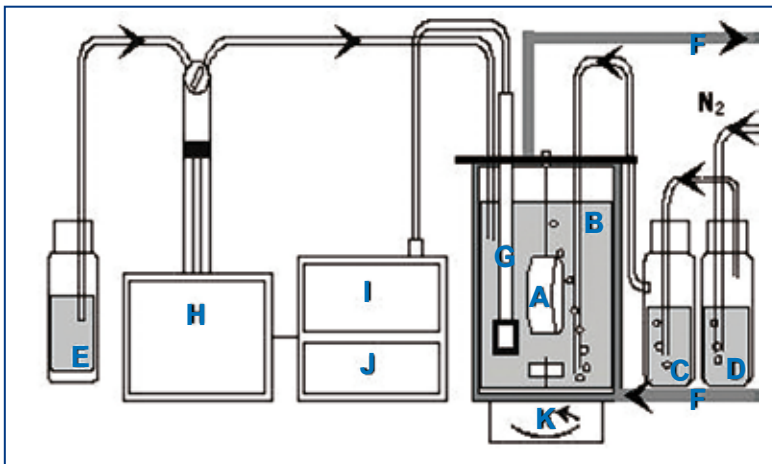


Figure 1 : Schéma du dispositif d'essai

### Légende

- A Echantillon.
- B Solution d'essai.
- C Eau déminéralisée.
- D Solution d'oxyde de calcium.
- E Acide nitrique à une concentration de 0,25 mol/l.
- F Circulation du cryostat maintenue à  $20^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .
- G Electrode de pH.
- H Système régulateur de pH.
- I Valeur de pH et de température.
- J Valeur d'acide nitrique ajouté.
- K Système d'agitation magnétique.

## 6.3 Renouvellement de la solution au cours de l'essai

- Préparer 1500 ml de solution d'acide nitrique au pH requis.
- Arrêter le système régulateur de pH et noter l'heure. Arrêter le système d'agitation magnétique. Arrêter le système de courant continu d'azote. Pomper la totalité de la solution et la peser.
- Ajouter les 1500 ml de solution d'acide nitrique au pH requis. Mettre en route le système de courant continu d'azote. Immerger l'électrode de pH. Mettre en route le système régulateur de pH. Mettre en route le système d'agitation magnétique.
- Mettre la solution dans un flacon et ajouter environ 0,2 % d'acide nitrique concentré. Agiter le flacon et noter dessus la date, l'heure et le numéro de renouvellement. Conserver le flacon à la température de  $6^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$  jusqu'à la mesure de la concentration en calcium par spectroscopie d'absorption atomique selon la norme EN ISO 7980 ou une autre méthode équivalente.
- Après 60 jours au minimum, pomper la solution et la peser. Conserver l'échantillon en condition étanche dans un sachet.
- L'électrode est étalonnée une fois par semaine.
- Après une durée maximale de 24 heures, pulvériser une solution de phénolphtaléine (1 % phénolphtaléine dans une solution de 70 % d'éthyle alcool et 30 % d'eau déminéralisée) sur une fracture longitudinale fraîche pour mesurer l'épaisseur dégradée en utilisant le gradient de pH (selon les recommandations AFPC AFREM [1997]).

## 7 EXPRESSION DES RÉSULTATS

Deux indicateurs sont quantifiés :

- L'épaisseur dégradée équivalente ( $\text{EPD}_{\text{eq}}$ ) correspondant à :

$$\text{EPD}_{\text{eq}} = \text{Ca}_{\text{lixivié}} / \text{Ca}_{\text{Initial}}$$

avec :

$Ca_{initial}$  la quantité de calcium initialement présente dans le béton et provenant du liant (exprimée en mol/m<sup>3</sup>). Cette valeur est calculée à partir de la teneur en oxyde de calcium du liant utilisé (calculée d'après les indications des fiches techniques).

$Ca_{lixivié}$  la quantité totale de calcium lixivié pendant l'essai rapportée à la surface de béton exposée (exprimée en mol/m<sup>2</sup>).

- La distance ( $EPD_{pH}$ ) correspondant au front de coloration observée après pulvérisation d'une solution de phénolphtaléine.

## 8 RAPPORT D'ESSAI

Le rapport d'essai doit contenir les informations suivantes :

- Le lieu et la date de l'essai, le laboratoire d'essai et la personne responsable de l'essai.
- La classe d'exposition retenue.
- La composition du béton exprimée en kg/m<sup>3</sup>.
- L'âge du béton au démarrage de l'essai.
- La teneur en calcium du liant exprimée en mol/kg.
- La valeur de  $Ca_{initial}$  exprimée en mol/m<sup>3</sup>.
- L'identification de l'échantillon.
- L'épaisseur de l'échantillon exprimée en mm à 0,1 mm près.
- La surface de béton exposée exprimée en mm<sup>2</sup> à 1 mm<sup>2</sup> près.
- La date et l'heure de début d'essai.
- Le nombre de renouvellements effectués.
- La date et l'heure de fin d'essai.
- La valeur de  $Ca_{lixivié}$  exprimée en mol/mm<sup>2</sup>.
- La valeur de  $EPD_{eq}$  exprimée en mm à 0,05 mm près.
- La valeur de  $EPD_{pH}$  exprimée en mm à 0,5 mm près, éventuellement des photos des surfaces de béton.
- Tout écart par rapport à la méthode d'essai normalisée.