



HAL
open science

Méthodologie d'évaluation de la durabilité des matériaux cimentaires hors normes pour le bâtiment

Pierre Pimienta, Blandine Albert, Bruno Huet, Michaël Dierkens, Philippe Francisco, Patrick Rougeau

► **To cite this version:**

Pierre Pimienta, Blandine Albert, Bruno Huet, Michaël Dierkens, Philippe Francisco, et al..
Méthodologie d'évaluation de la durabilité des matériaux cimentaires hors normes pour le bâtiment.
CSTB Editions, 2017, Collection Recherche - Expertise, 978-2-86891-672-3. hal-03752754

HAL Id: hal-03752754

<https://cstb.hal.science/hal-03752754>

Submitted on 17 Aug 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Méthodologie - Évaluation

**Méthodologie d'évaluation
de la durabilité des matériaux cimentaires
hors normes pour le bâtiment**

**Méthodologie d'évaluation
de la durabilité des matériaux
cimentaires hors normes
pour le bâtiment**

Établissement public au service de l'innovation dans le bâtiment, le CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment exerce quatre activités clés : la recherche, l'expertise, l'évaluation, et la diffusion des connaissances, organisées pour répondre aux enjeux de développement durable dans le monde de la construction. Son champ de compétences couvre les produits de construction, les bâtiments et leur intégration dans les quartiers et les villes.

Avec plus de 900 collaborateurs, ses filiales et ses réseaux de partenaires nationaux, européens et internationaux, le CSTB est au service de l'ensemble des parties prenantes de la construction pour faire progresser la qualité et la sécurité des bâtiments.

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'Exploitation du droit de copie (3, rue Hautefeuille, 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1^{er} juillet 1992 - art. L 122-4 et L 122-5 et Code Pénal art. 425).

COLLECTION RECHERCHE – EXPERTISE

Méthodologie d'évaluation de la durabilité des matériaux cimentaires hors normes pour le bâtiment

Pierre Pimienta, CSTB

Blandine Albert LafargeHolcim, R&D

Bruno Huet, LafargeHolcim R&D

Michael Dierkens, CEREMA

Philippe Francisco, CERIB

Patrick Rougeau, CERIB

CSTB
ÉDITIONS

Couverture : photographies – Bâtiments de logements collectifs BBC à la Courneuve, Seine Saint Denis - Crédits photos : Lafarge médialibrary - Gérard Morand - Grahane - Olivier de Boismenu (architecte) - Agence Arc/Pole

Remerciements

Les auteurs remercient Michel Delort et Laurent Izoret, en tant que présidents du comité de normalisation CEN/TC51 - Ciments et chaux de construction, pour leur contribution au sein du groupe de travail ainsi que pour la rédaction du document.

Les auteurs remercient également les relecteurs suivants pour les améliorations significatives portées au document :

Charles Baloche, CSTB

François Boutin, CSTB

Anca Cronopol, CSTB

David Henriques, CSTB

Yannick Lemoigne, CSTB

Nicolas Ruaux, CSTB

Rémi Barbarulo, LafargeHolcim R&D

Eric Brouard, LafargeHolcim R&D

François Delarrard, LafargeHolcim R&D

Edouard Gengembre, LafargeHolcim R&D

Gabriel Pham, LafargeHolcim R&D

François Jacquemot, CERIB

Jonathan Mai-Nhu, CERIB

Marjorie Petitpain, CERIB

Sommaire

1. Résumé	7	ANNEXE : Fiches pathologie	19
2. Introduction	7	Fiche 1 : Risque de corrosion des aciers induite par carbonatation	21
2.1 L'innovation dans le secteur du bâtiment.....	7	Fiche 2 : Risque de corrosion des aciers induite par les ions chlorure	27
2.2 Problématique de l'assurabilité	8	Fiche 3 : Corrosion d'éléments métalliques.....	33
2.3 Précisions sur l'évaluation de la durabilité	9	Fiche 4 : Risque de dégradation des bétons par gel interne.....	37
3. Démarche générale	9	Fiche 5 : Risque de dégradation par écaillage des bétons soumis au gel en présence de sels de déverglaçage	41
4. Le contexte normatif actuel (octobre 2015).....	10	Fiche 6 : Risque de dégradations par une Réaction Sulfatique Externe (RSE)	45
5. Les procédures pour l'évaluation des produits non traditionnels	11	Fiche 7 : Risque de dégradations par une Réaction Sulfatique Interne (RSI)	49
6. Méthode pour la définition des risques et choix des essais à réaliser	13	Fiche 8 : Risque de dégradations par une Réaction Alcali-Granulat (RAG).....	53
6.1 Étape 1 : description de l'invention	13	Fiche 9 : Attaques chimiques : solutions acides...	57
6.2 Étape 2 : les propriétés à vérifier	14		
6.3 Étape 3 : les risques de dégradation	14		
6.4 Étape 4 : éléments de preuve pour l'évaluation	15		
6.5 Étape 5 : méthodes d'essais pour chaque couple propriété et mode de dégradation	16		
6.6 Étape 6 : méthode d'évaluation	16		
7. Références	17		

1. Résumé

Cet article porte sur l'évaluation technique de nouveaux produits ou systèmes dans le domaine du bâtiment, avant leur mise sur le marché. Il traite en particulier de l'aspect durabilité de l'évaluation, et ce pour des produits ou systèmes innovants à base de matériaux cimentaires. Après un bref rappel du contexte normatif et des procédures d'évaluation existantes, une démarche est proposée. Elle consiste en six étapes successives, depuis la description de l'invention jusqu'au choix des méthodes d'essais pertinentes et les critères d'évaluation. Des fiches thématiques présentant les différents types d'altérations connues pour les matériaux cimentaires, et les moyens d'évaluation de la performance associée sont présentées. Le demandeur et l'évaluateur sont invités à élargir leur champ d'investigation en cas de saut technologique important pour lequel les fiches proposées ne permettraient pas de couvrir l'usage du produit/système dans le domaine d'emploi visé.

2. Introduction

2.1 L'innovation dans le secteur du bâtiment

Le bâtiment est un secteur dynamique dont les différents acteurs innovent en permanence pour relever les défis de leur époque et anticiper ceux à venir. Depuis les grands plans de construction de l'après-guerre et jusqu'à récemment, les innovations concernaient surtout l'amélioration des qualités architecturales, la diminution des coûts, l'amélioration de la sécurité des travailleurs, etc. Les nouveaux enjeux pour lesquels le secteur se mobilise sont la lutte contre le réchauffement climatique, l'économie des ressources naturelles, la santé et le confort des usagers. Dans ces domaines, les progrès récents ont permis de réduire l'impact environnemental global des bâtiments (diminution de l'empreinte carbone des matériaux et des procédés de construction et de rénovation, amélioration des performances énergétiques des bâtiments, systèmes de chauffage alternatifs aux énergies fossiles, etc.). La sécurité et la santé des usagers sont des préoccupations constantes (évaluation des COV...). Enfin, le recours aux nouvelles technologies facilite le quotidien avec des bâtiments plus connectés, plus « intelligents ».

Les efforts de Recherche et Développement sont importants et cette accélération de l'innovation dans beaucoup de domaines de la construction génère un grand nombre de matériaux ou de systèmes constructifs nouveaux. Par ailleurs, les attentes étant fortes, ces innovations doivent être rapidement disponibles sur le marché.

Dans de nombreux cas, ces nouveaux produits ou systèmes peuvent répondre aux spécifications des normes existantes. Mais, lorsque le saut technologique est significatif, les normes, les codes de calculs des ouvrages et les textes de référence actuels traitant de leur mise en œuvre ne permettent pas toujours de couvrir l'usage du produit/système dans le domaine d'emploi visé.

La rédaction de nouvelles normes ou l'adaptation de normes existantes à ces nouveaux produits est une voie possible, mais elles impliquent la plupart du temps des durées non compatibles avec les besoins de commercialisation rapide. Aussi, afin de faciliter la mise sur le marché des produits non normalisés, les industriels peuvent recourir à des procédures volontaires d'évaluation nationale (Avis Technique par exemple) et/ou européenne (Evaluation Technique Européenne complétée par des référentiels de dimensionnement et d'exécution des travaux appropriés).

Ce travail d'évaluation technique spécifique contribue également, à plus long terme, à la rédaction ou la révision des normes.

2.2 Problématique de l'assurabilité

Les compagnies d'assurances analysent et assurent les ouvrages du point de vue du risque que ceux-ci peuvent entraîner sur la sécurité des usagers et leur pérennité compte tenu des procédés de construction, innovants ou non, utilisés pour les réaliser.

Les textes utilisés comme base pour cette analyse ont, pour certains, un caractère réglementaire s'imposant à tous les acteurs ; pour d'autres, il s'agit de textes contractualisables établis suite à consensus d'experts.

Les produits/procédés répondant aux spécifications de ces textes sont considérés comme des « techniques courantes » et présentent donc un « risque normal ». Ils ne devraient pas connaître de restriction sur leur assurabilité sous réserve de la confirmation par les compagnies d'assurance, pour le périmètre de l'aptitude à l'usage du produit défini par le domaine d'emploi.

Les autres produits/procédés relèvent des « techniques non courantes » et font l'objet d'une procédure particulière de la part des compagnies d'assurances pour l'établissement des contrats d'assurance prévus par la loi du 4 janvier 1978 dite « Loi Spinetta ».

Le lien, tel que défini par la C2P (Commission Prévention Produits mis en œuvre) de l'Agence Qualité Construction (AQC, www.qualiteconstruction.com), entre domaine traditionnel ou non et techniques courantes ou non est présenté dans la Figure 1.

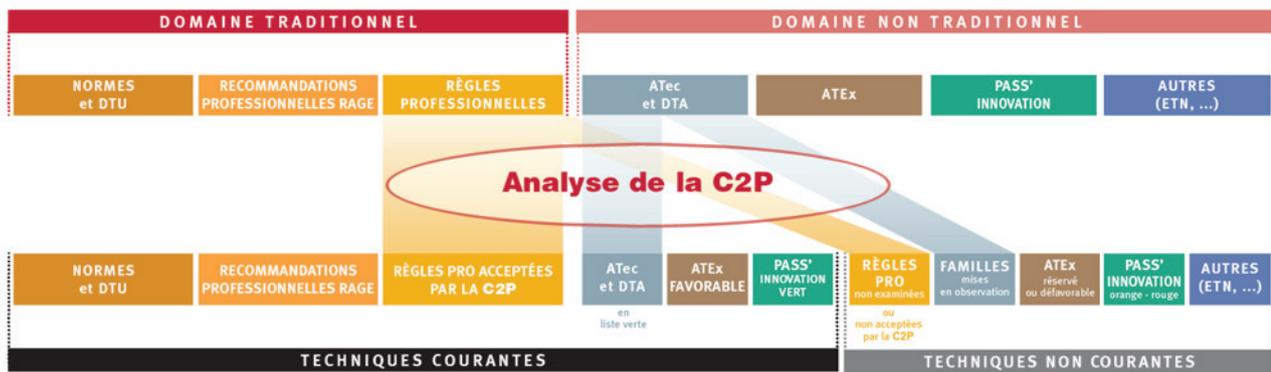


Figure 1 : Lien entre domaine traditionnel ou non et techniques courantes ou non tel que défini par la C2P (Commission Prévention Produits mis en œuvre) de l'AQC

2.3 Précisions sur l'évaluation de la durabilité

Alors que les processus d'évaluation peuvent être perçus comme complexes, ce document, à vocation pédagogique, propose une vision claire des possibilités existantes. Il concerne les nouveaux matériaux cimentaires (les nouveaux bétons, les nouveaux produits en béton, les nouveaux constituants, etc.). Tous les aspects ne pouvant pas être abordés, le document apporte un éclairage spécifique sur l'évaluation de la **durabilité**.

Ce travail a été initié en 2014 par le groupe Lafarge (aujourd'hui LafargeHolcim). Un travail de réflexion a pu être réalisé entre le CSTB, pour la compétence « Évaluation » et Lafarge, pour la compétence « Innovation technologique », avec le concours du CERIB et du CEREMA, notamment pour l'expertise sur l'évaluation de la durabilité des matériaux visés ainsi que pour les références aux travaux normatifs.

Au travers de cette publication, les auteurs souhaitent contribuer à une accélération du déploiement de l'innovation pour le développement durable, dans le secteur du bâtiment, et ce au bénéfice de l'industrie dans son ensemble et des usagers des constructions.

3. Démarche générale

Ce document se propose de guider le demandeur et l'évaluateur dans la démarche d'évaluation de la durabilité des nouveaux matériaux cimentaires. Les différents cas possibles sont évoqués selon que ces produits rentrent dans un cadre normatif ou pas.

Il est particulièrement destiné aux industriels et aux organismes d'évaluation. Il vise à fournir des éléments techniques qui permettront :

- d'aider à l'identification des risques auxquels ces produits pourraient être exposés ;
- d'aider à définir les conséquences de ces risques sur les propriétés futures des matériaux ;
- d'aider à sélectionner ou élaborer les méthodes pour évaluer les conséquences de ces risques spécifiques à chaque nouveau produit.

Les normes auxquelles le demandeur d'évaluation pourra se référer sont rappelées au *paragraphe 4*. Les différentes procédures d'évaluation nationale et européenne sont définies au *paragraphe 5*. Pour ce qui est de la méthodologie de l'évaluation vis-à-vis de la durabilité, il n'existe pas de canevas unique, du fait de la multiplicité des aspects des nouveaux produits ou systèmes pour le bâtiment. Lorsqu'une démarche d'évaluation est engagée, une partie du travail des organismes en charge de l'évaluation est de bâtir la démarche d'évaluation à adopter avant de procéder à sa mise en œuvre. Par exemple, il peut être nécessaire d'adapter des modes opératoires au matériau à évaluer et à son domaine d'emploi prévu.

Il est souhaitable pour les demandeurs d'avoir une idée la plus précise possible de la façon dont leur invention pourra être évaluée. Ceci permet d'optimiser les échanges entre l'organisme d'évaluation et le demandeur. L'intérêt est également d'éclairer un demandeur potentiel sur la façon dont il pourrait tester son invention dès la phase de développement, en préliminaire à une demande formelle d'évaluation, qui risque de ne pas aboutir si elle n'est pas adaptée. La démarche proposée (voir *paragraphe 6*) peut convenir aussi bien aux solutions qui présentent une rupture technologique qu'à celles qui restent proches du domaine traditionnel. Il est conseillé au demandeur potentiel de se rapprocher d'un organisme évaluateur le plus en amont possible de la démarche.

Cette démarche s'appuie sur des fiches thématiques (voir les fiches 1 à 9 en annexe) qui abordent différents types d'altérations, ainsi que les principaux essais actuellement utilisés pour évaluer la gravité de leurs conséquences. À travers ces fiches les acteurs pourront élaborer leur propre stratégie d'évaluation, choisir parmi les essais proposés, décider d'employer une variante ou même concevoir de nouveaux essais répondant au mieux aux propriétés à évaluer.

4. Le contexte normatif actuel (octobre 2015)

Ce document a été rédigé en l'état actuel des documents publiés en lien avec la durabilité des bétons et des matériaux cimentaires dans le contexte normatif.

Le contexte normatif associé aux applications structurales en béton est présenté succinctement à la Figure 2. D'autres représentations de ce contexte sont proposées dans les normes NF EN 206/CN [1] ou NF EN 13670 [2]. La réalisation des ouvrages en béton pour le bâtiment s'appuie sur un ensemble cohérent de textes couvrant les exigences à satisfaire, les performances des produits, leurs conditions de fabrication et d'intégration à l'ouvrage ainsi que les aspects de dimensionnement et de réalisation de l'ouvrage. Pour certaines applications, les normes spécifient très précisément les exigences relatives au produit fini, y compris celles relatives à la durabilité. Pour d'autres, les normes se réfèrent généralement à des textes contenant des exigences communes tels que les normes NF EN 206/CN [1] et NF EN 13369 [3].

Pour les applications relevant des normes NF EN 206/CN [1] et NF EN 13369 [3], l'atteinte des performances de durabilité repose, pour l'essentiel, sur des spécifications de composition par classe d'exposition (des critères additionnels basés sur des « guides » ou bien des « recommandations » peuvent être demandés en sus dans les cahiers des charges). L'utilisation en France de méthodes performantielles n'est pas pleinement intégrée au contexte normatif. En cas de besoin, le fascicule de documentation FD CEN/TR 16563 [4] « Principes de la procédure de durabilité équivalente » fournit des lignes directrices pour établir une procédure de durabilité équivalente. L'application de cette procédure au niveau français nécessite un document d'application national (DAN) qui n'existe pas à ce jour. Les résultats du projet national Perfdub pourraient constituer l'ossature de ce futur document. L'objectif principal du projet national Perfdub est de définir une méthodologie à l'échelle nationale de justification de la durabilité des bétons (et des structures en béton) par une approche performantielle, incluant la méthode « absolue » et la méthode « comparative » [5].

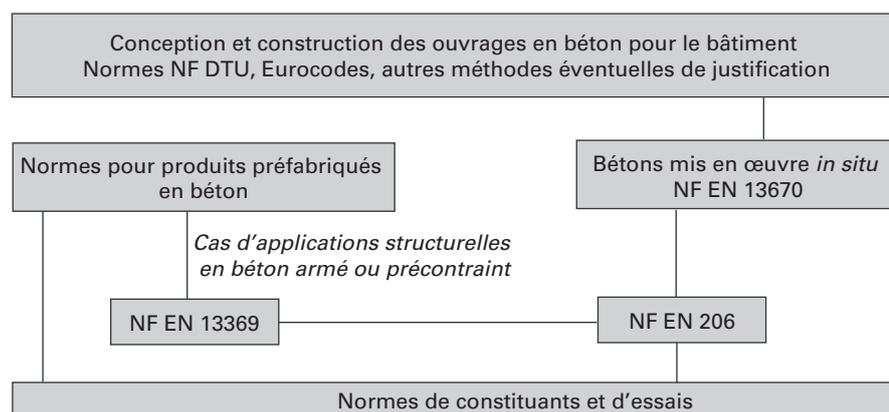


Figure 2 : Contexte normatif français des bétons de bâtiment

5. Les procédures pour l'évaluation des produits non traditionnels

Les produits ou systèmes innovants pour le bâtiment se placent parfois en dehors du domaine d'application des normes en vigueur. Le développeur peut alors faire appel à des procédures d'évaluation technique qui permettront de faciliter leur mise sur le marché français ou européen. Deux grandes familles de procédures peuvent être distinguées : les procédures nationales volontaires et les procédures européennes qui sont régies par le règlement des produits de construction (RPC). Nous décrivons ci-dessous les principales procédures nationales, ETPM (Évaluation Technique Préalable sur Matériau), ATE_x (Appréciation Technique d'Expérimentation) et ATec (Avis Technique) et la procédure européenne ETE (Évaluation Technique Européenne). Ces procédures intègrent l'évaluation de la durabilité des produits en fonction du domaine d'emploi considéré. Elles sont exploitées en France par le CSTB dans le domaine du bâtiment et par le CEREMA dans le domaine du génie civil.

L'**ETPM** s'applique aux matériaux ou aux semi-produits de construction non normalisés. Ces matériaux et semi-produits sont des composants des produits finis ou de systèmes qui seront mis en œuvre dans la construction (exemple : ciment pour la fabrication de produits préfabriqués en béton, plaque de verre pour la fabrication de fenêtres). Le fabricant de ces matériaux n'est généralement pas en relation directe avec l'entreprise de construction. Le domaine d'emploi final est généralement large et parfois mal cerné.

Les ETPM sont réalisés à la demande des industriels sur une base volontaire. Ils ne sont pas couverts par la réglementation.

L'**ETPM** a principalement pour but d'examiner et de faire la synthèse des éléments de preuve les plus pertinents vis-à-vis d'un domaine d'emploi envisagé, souvent large. L'**ETPM** se prononce sur les caractéristiques du matériau ou du semi-produit. Il ne peut pas traiter de l'aptitude à l'emploi, puisque le produit ou procédé et le domaine d'emploi associé ne sont pas clairement définis. Le document est préparé de façon conjointe par le CSTB et le demandeur. Il est constitué de deux parties : le dossier technique préparé par le demandeur et l'évaluation technique proprement dite préparée par le CSTB. Les procédés élaborés sur la base des matériaux ou semi-produits innovants ainsi évalués sont présumés faire l'objet en aval des procédures d'Atex et/ou d'Avis Technique. C'est pourquoi, le document est présenté à un Groupe Spécialisé (GS) de la Commission chargée de formuler des Avis Techniques bien que traité en dehors de la procédure d'Avis Technique. Contrairement à l'Avis Technique, le document n'est pas publié. Il est remis au demandeur qui est responsable de sa diffusion.

L'**ATE_x** s'applique aux procédés innovants qui ne bénéficient pas de références de chantier. Elle se situe en amont de l'Avis Technique. L'**ATE_x** est prononcée pour une application limitée à une seule opération de construction déjà identifiée ou pour un domaine d'emploi limité de constructions similaires. Par suite, le champ d'examen est plus restreint que celui visé par l'Avis Technique. La durée de la procédure est également plus courte (de l'ordre de deux à trois mois).

L'**Avis Technique** est la procédure d'évaluation technique la plus connue et la plus employée. Il est régi par un arrêté qui la place sous l'égide d'une Commission (CCFAT : Commission Chargée de Formuler des Avis Techniques). Il est destiné à fournir, à tous les participants à l'acte de construire, une opinion autorisée sur les produits, procédés et équipements nouveaux, pour un emploi défini.

Il indique notamment dans quelles mesures le procédé ou produit :

- satisfait à la réglementation en vigueur ;
- est apte à l'emploi en œuvre ;
- dispose d'une durabilité en service.

Les Avis Techniques sont des documents d'information. Ils ne sont pas obligatoires et n'ont aucun caractère réglementaire particulier. Ils sont délivrés par des experts techniques regroupés en Groupes Spécialisés, constitués par la CCFAT.

L'Avis Technique est constitué de deux parties : une synthèse du dossier technique établi par le demandeur et l'avis proprement dit. Il est délivré par la CCFAT après examen par l'un des Groupes Spécialisés nommés par elle. L'examen de la validité des preuves constitutives du dossier de demande établi par le demandeur est confié au CSTB. Les conclusions de cet examen sont présentées au Groupe Spécialisé en charge de la formulation de l'Avis. Celui-ci est ensuite publié par le CSTB sur son site Internet.

L'Avis Technique s'applique à des produits, procédés et équipements nouveaux. Les systèmes et ouvrages dont les constituants, les caractéristiques et la mise en œuvre répondent au domaine traditionnel ne relèvent pas de la procédure.

Pour les produits couverts par le marquage CE, la CCFAT peut délivrer un Avis Technique sous la forme de Document Technique d'Application (DTA).

L'Évaluation Technique Européenne (ETE) est une procédure européenne. Elle est définie par le règlement (UE) n° 305/2011 concernant les produits de construction (RPC) entré pleinement en vigueur le 1^{er} juillet 2013. La déclaration des performances (DoP – Declaration of Performance), nouveau document qui remplace la déclaration de conformité CE de la directive produits de construction (DPC), en est le nouveau concept clé. En fonction du (des) usage(s) prévu(s) pour son produit, le fabricant choisit les caractéristiques essentielles de son produit pour lesquelles il veut déclarer une performance. Désormais, pour mettre sur le marché ses produits de construction couverts par une norme harmonisée, le fabricant doit établir une déclaration de performance(s), puis apposer le marquage CE sur les produits conformes à la déclaration de performance(s). Pour un produit qui n'est pas ou pas complètement couvert par une norme harmonisée, le fabricant peut faire une demande d'ETE à des fins de déclaration de performance(s) et de marquage CE. L'ETE est établie sur la base d'un référentiel, le DEE (Document d'Évaluation Européen). Le DEE, ou European Assessment Document (EAD) en anglais, est établi de manière coordonnée avec l'ensemble des autres organismes européens d'évaluation technique compétents avant d'être adopté par l'EOTA (European Organisation for Technical Assessment : www.eota.eu). Lorsque le produit innovant fait partie d'une famille de produits qui a déjà fait l'objet d'un DEE (ciment à prise rapide, ciment à base de sulfoaluminat de calcium, etc.), les dispositions établies dans ces DEE devront être prises en compte.

L'évaluation de nouveaux produits ou systèmes ne diffère pas fondamentalement de la démarche adoptée dans le contexte normatif. Par exemple, pour un nouveau produit, la caractérisation comprend en général des caractéristiques de leur composition, de leurs propriétés et de leur durabilité. Les méthodes d'évaluation des produits innovants peuvent s'écarter des méthodes normalisées dans le cas où, par exemple, il est nécessaire d'évaluer un risque nouveau ou une propriété nouvelle non couverte dans une norme. Il est également parfois nécessaire d'adapter les méthodes d'essais du fait des propriétés particulières de l'innovation proposée. Il appartient alors à l'organisme d'évaluation de valider la méthode d'essai la plus pertinente.

6. Méthode pour la définition des risques et choix des essais à réaliser

L'évaluation de la durabilité se déroule en plusieurs étapes. Les deux premières étapes consistent à prendre connaissance de l'invention (voir *Étape 1*) et des propriétés dont la pérennité est à évaluer pour le domaine d'utilisation envisagé (voir *Étape 2*). L'étape suivante consiste à recenser le ou les types de dégradations potentielles (voir *Étape 3*). Pour cela, une liste des principales dégradations connues pour les matériaux cimentaires est proposée dans ce document. Des fiches synthétiques décrivant ces dégradations sont données en annexe. Selon la particularité du produit ou du système, d'autres types de dégradation seront éventuellement à considérer.

Le demandeur fournit des éléments de preuve permettant de qualifier la tenue dans le temps des performances du produit ou du système. Différents moyens sont à sa disposition, comme des retours d'expérience de terrain, des essais de vieillissement en laboratoire (voir *Étape 4*). Pour ce qui est des essais en laboratoire, des critères de sélection et de réalisation de méthodes sont proposés (voir *Étape 5*), ainsi que les critères d'évaluation (*Étape 6*). Une démarche est proposée si un mode d'altération spécifique est à prendre en compte. Enfin, la dernière étape pour l'organisme d'évaluation est de statuer globalement sur la durabilité du produit en compilant les différentes données à sa disposition. Il convient notamment de tenir compte des conditions d'exposition et de la durée de vie de l'ouvrage dans lequel le produit sera incorporé.

6.1 Étape 1 : description de l'invention

L'objectif de cette étape est de préciser la nature de l'innovation : la composition du produit, le domaine d'emploi et la durée de service visée, les spécificités éventuelles de fabrication, de mise en œuvre, et toute autre information utile à l'organisme d'évaluation.

Cette étape permet de vérifier que le nouveau produit ou système proposé n'est pas déjà couvert par des dispositions normatives en vigueur (la durabilité pour le domaine d'emploi et la durée visées sont alors généralement présumées acquises) et si une évaluation de la durabilité est à envisager.

6.1.1 Le produit

Les questions suivantes permettent de définir le produit et d'identifier ses particularités éventuelles :

1. Comment se caractérise le produit (constituant, mélange, géométrie, etc.) ?
2. Le produit relève-t-il d'une norme ?
3. Les constituants du produit sont-ils tous normalisés ou bien décrits dans une norme produit ?
4. Si oui, la combinaison et les dosages des constituants sont-ils normalisés ?
5. La matrice cimentaire formée est-elle similaire à celles issues de liants conventionnels normalisés (assemblages d'hydrates, porosité, etc.) ?
6. Le produit intègre-t-il des inclusions (granulats, fibres) qui ne sont pas conventionnelles pour les matériaux cimentaires ?
7. Les propriétés ou caractéristiques du produit final sont-elles normalisées ?

6.1.2 Le domaine d'emploi

Le domaine d'emploi est précisé en répondant aux questions suivantes :

- Le domaine d'emploi est-il traditionnel ?
- Quelles sont les fonctions premières du produit ?
- Quelle est la durée de vie envisagée ?
- Un rôle structurel est-il prévu ?
 - Si oui, les propriétés mécaniques sont-elles compatibles avec une méthode de justification existante (Eurocodes, etc.) utilisée pour le dimensionnement ?
- Y a-t-il des risques d'incompatibilité entre le produit et un autre composant ou matériau en contact ?
- Des éléments métalliques sont-ils utilisés ?
- Quelles sont les sollicitations envisagées ?
 - Quelles sont les caractéristiques du climat (T, HR, gel, etc.) ?
 - Quels sont les agents chimiques qui pourraient être en contact permanent ou occasionnel avec le produit (eau naturelle, sel, sulfates, CO₂) ?
 - Quelles sont les autres sollicitations envisagées (abrasion, charge mécanique permanente ou cyclique, etc.) ?
 - Le produit est-il en contact direct avec l'environnement (revêtement de protection) ?

6.1.3 La mise en œuvre

Enfin, la mise-en-œuvre de référence pour ce produit doit être décrite. Ces éléments alimentent les réponses aux questions suivantes :

- Les conditions de mise en œuvre sont-elles traditionnelles (comme par exemple celles spécifiées par le DTU 21 [6]) ou sont-elles particulières ?
- Est-il nécessaire d'agréer des applicateurs ?

6.2 Étape 2 : les propriétés à vérifier

Dans tous les cas, la durabilité des propriétés relatives à la stabilité mécanique doit être vérifiée. Le demandeur peut en outre revendiquer la durabilité d'autres propriétés, s'il le souhaite.

6.3 Étape 3 : les risques de dégradation

L'inventaire des risques de dégradation qui entraîneraient une perte significative des performances est à réaliser de façon exhaustive, en fonction des spécificités du produit, de l'usage et de l'environnement prévus. Le *Tableau 1* constitue un support pour cet inventaire. Il regroupe les dégradations connues pour les bétons traditionnels. Il convient également d'envisager, au besoin, des risques supplémentaires spécifiques à l'invention.

Remarque

L'innocuité vis-à-vis des personnes (intervenants de la construction, usagers) et de l'environnement aux différentes étapes de la vie du produit n'est pas incluse dans ce guide et doit être examinée selon la réglementation en vigueur.

Tableau 1 : Recensement des risques de perte de performance pour l'invention

		Processus de dégradation physico-chimique									
		1 – Corrosion des armatures induite par carbonatation	2 – Corrosion des armatures induite par pénétration de chlorure	3 – Corrosion d'éléments métalliques noyés	4 – Expansion/fissuration en présence de cycles de gel/dégel	5 – Écaillage en présence de sel et de cycles de gel/dégel	6 – Attaque chimique (réaction sulfatique externe)	7 – Expansion/fissuration due à une réaction sulfatique interne	8 – Expansion/fissuration due à l'alcali – réaction	9 – Attaque chimique (milieu acide)	10 – Autres *?
Propriétés	Intégrité mécanique	O/N ?	O/N ?	O/N ?	O/N ?	O/N ?	O/N ?	O/N ?	O/N ?	O/N ?	O/N ?
	Autres propriétés	O/N ?	O/N ?	O/N ?	O/N ?	O/N ?	O/N ?	O/N ?	O/N ?	O/N ?	O/N ?

O : Risque à prendre en compte. N : Non concerné.
 * il peut par exemple s'agir d'instabilité dimensionnelle due au contact de l'eau.

Les mécanismes d'altération des matériaux cimentaires sont souvent complexes. Ces mécanismes sont décrits dans des fiches (cf. fiches 1 à 9 en annexe) afin de fournir une aide à leur compréhension et de décider de leur éventuelle prise en compte. Ces fiches concernent les mécanismes de dégradation potentielle connus pour les matériaux cimentaires et menant à un risque de perte d'intégrité mécanique. Dans le cas d'altération non couverte par ces fiches, une fiche spécifique peut être construite en suivant la structure de celles proposées dans ce document. Cette démarche peut également être utilisée pour décrire l'évolution d'autres propriétés. Par exemple, l'instabilité dimensionnelle menant à la fissuration du matériau dans son environnement pourra être considérée.

La structure des fiches pathologie est la suivante :

1. Introduction
2. Conséquences
3. Mécanismes physico-chimiques
4. Principaux modèles
5. Paramètres influents
6. Étapes des méthodes d'essais
7. Méthodes d'essais de référence
8. Évaluation de la performance
9. Références

6.4 Étape 4 : éléments de preuve pour l'évaluation

L'évaluation des conséquences liées au risque identifié peut s'appuyer sur :

- des essais de qualification décrits dans le *paragraphe 6.5* ci-dessous ;
- des retours d'expérience de site(s) (ouvrages existants ou corps d'épreuves) ;
- des résultats d'essais antérieurs (documents techniques, publication) ;
- l'analyse de mécanismes physico-chimiques (voir *paragraphes 3 et 4* des fiches pathologie) ;
- des résultats de calcul ;
- etc.

6.5 Étape 5 : méthodes d'essais pour chaque couple propriété et mode de dégradation

Une démarche pour sélectionner les essais de laboratoire qui sont pertinents est proposée ci-après et illustrée en *Figure 3* :

1. la première étape consiste à vérifier s'il existe un essai pertinent dans les dispositions en vigueur sur le lieu d'utilisation et utilisable pour évaluer cette durabilité. Si c'est le cas, celui-ci doit être privilégié. Une liste non exhaustive d'essais possibles est présentée dans le *paragraphe 7* des fiches pathologie « Méthodes d'essais de référence » ;
2. si ce n'est pas le cas, il est envisageable de rendre un essai de référence pertinent à condition de ne pas remettre en cause son principe. Les adaptations des conditions d'essai doivent être mineures et ne doivent pas modifier les mécanismes de dégradation mis en jeu. Il convient notamment de consulter le *paragraphe 5* « Paramètres influents » des fiches pathologie pour déterminer quelles conditions d'essai pourraient être adaptées ;
3. si aucune des deux solutions précédentes n'est envisageable, il est possible de sélectionner un essai développé et utilisé par un seul laboratoire par exemple. Cet essai doit être adapté et crédible. Le *paragraphe 7* des fiches pathologie propose également des essais spécifiques et documentés ;
4. enfin, en dernier recours, un nouvel essai devra être proposé. Cet essai pourra être élaboré à l'aide des fiches pathologie sur la base des « mécanismes physico-chimiques » (*paragraphe 3*) et des « Paramètres influents » (*paragraphe 5*). Ce nouvel essai devra être décrit de façon exhaustive ;
5. les essais doivent être réalisés selon la méthode sélectionnée.

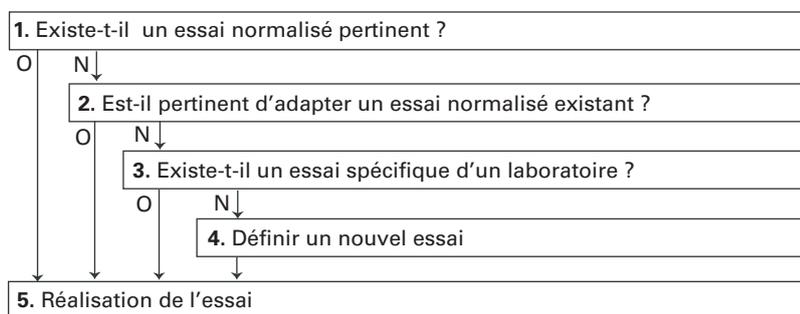


Figure 3 : Démarche proposée pour sélectionner les essais de laboratoire à réaliser

6.6 Étape 6 : méthode d'évaluation

L'objectif de cette étape est de définir les différentes méthodes disponibles pour conclure sur le maintien des propriétés du produit ou du système.

Deux méthodes principales sont possibles :

- approche « absolue » ;
- approche comparative.

L'approche « absolue » se base sur une comparaison entre des valeurs seuils et les valeurs des grandeurs mesurées suivant les mêmes méthodes d'essais afin de statuer sur le niveau de performance.

Deux choix sont possibles :

1. en premier lieu, il convient d'utiliser des valeurs seuils disponibles dans les dispositions en vigueur sur le lieu d'utilisation. Le *paragraphe 7* des fiches pathologie présente des documents techniques. Ceux-ci précisent des seuils dans certains cas ;
2. en deuxième lieu, des valeurs seuils définies par des codes de calculs peuvent être utilisées. Le *paragraphe 4* des fiches pathologie présente les principaux modèles.

L'approche comparative se base sur une comparaison entre des grandeurs mesurées sur le produit et celles mesurées sur un matériau de référence. Il convient de préciser la démarche de choix du matériau de référence. Il convient également de tenir compte de l'incertitude sur les résultats des essais.

Au final, il convient de conclure sur la conformité de l'invention par rapport à sa description telle que fournie par le demandeur, ainsi que sur l'absence d'incompatibilité.

7. Références

- [1] NF EN 206/CN:2014. Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206, 2014.
- [2] AFNOR, NF EN 13670:2013 Exécution des structures en béton, 2013.
- [3] NF EN 13369:2013. Règles communes pour les produits préfabriqués en béton, 2013.
- [4] FD CEN/TR 16563:2014. Principes de la procédure de durabilité équivalente, 2014.
- [5] Irex, Le Projet National de recherche PERFDUB, Irex, 2015, pp. <http://www.perfdub.fr/>.
- [6] NF P 18-201:2004. DTU 21 - Travaux de bâtiment - Exécution des ouvrages en béton - Cahier des clauses techniques, 2004.

ANNEXE
Fiches pathologie

- la dissolution des hydrates et la formation de carbonate de calcium, CaCO_3 , sont rapides par rapport au transport. Ceci entraîne un front raide de carbonatation,
- le pH du milieu diminue, à des valeurs inférieures à 9, c'est pourquoi le front de carbonatation est localisé par un indicateur coloré (Figure 1a) ;
- la vitesse apparente de carbonatation du béton dépend de la diffusivité du $\text{CO}_{2(g)}$ et de la quantité d'hydrates « carbonatables » (Figure 1b) :
 - la quantité d'hydrates carbonatables augmente avec le degré d'hydratation, la qualité de la cure et le dosage en ciment,
 - le taux de conversion maximum des hydrates en CaCO_3 diminue en fonction de l'humidité relative. Ces réactions n'ont pas lieu en l'absence d'eau liquide (cf. courbe rouge de la Figure 1b),
 - la vitesse de diffusion du dioxyde de carbone diminue lorsque la compacité de la matrice cimentaire augmente,
 - la vitesse de diffusion du dioxyde de carbone diminue lorsque le taux de saturation en eau des pores augmente,
 - la concentration en $\text{CO}_{2(g)}$ augmente la vitesse apparente de carbonatation et peut influencer la nature des phases néo-formées.

3.2 Corrosion de l'acier dans le béton carbonaté

La corrosion des armatures est un ensemble de réactions électrochimiques qui met en jeu le fer des armatures avec l'oxygène de l'air en présence d'eau. En l'absence de chlorures, la vitesse de corrosion devient significative uniquement après la carbonatation du béton et la modification de la composition de la solution interstitielle. Elle est influencée par deux processus concomitants, le transport d'oxygène et l'oxydation du fer par l'oxygène :

- la vitesse de diffusion du dioxygène est aussi fonction de la microstructure du béton carbonaté ; elle diminue avec la teneur en eau ;
- les vitesses des réactions électrochimiques à l'interface entre armature et béton augmentent avec l'humidité régnant du matériau.

Le taux de saturation en eau des pores du matériau, qui se traduit par un certain niveau d'humidité, détermine un optimum des vitesses de carbonatation et de corrosion spécifique à chacun des deux processus (voir Figure 1b). La teneur en eau est influencée par les propriétés de transport d'eau (écoulement capillaire et par diffusion de vapeur), par la capacité de sorption de l'eau du réseau poreux ainsi que par les conditions climatiques (humidité relative, pluie, vent, ensoleillement). En environnement très sec ou très humide, les vitesses de corrosion sont très faibles.

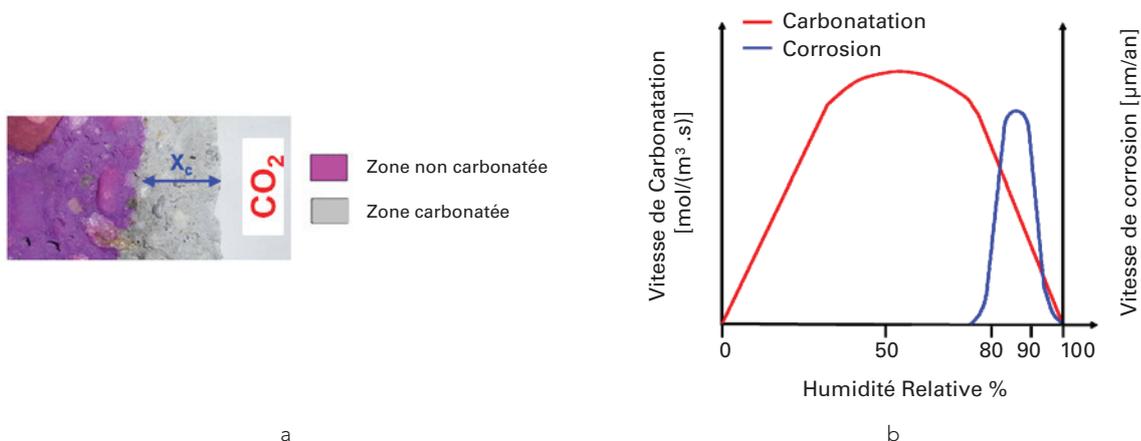


Figure 1 : Mesure de la profondeur de carbonatation par indicateur coloré (a), et vitesse de carbonatation et de corrosion en fonction de l'humidité relative (b)

La corrosion provoque la formation d'une couche d'oxydes expansifs à la surface de l'acier. Cette expansion provoque des contraintes internes pouvant aboutir à la fissuration du béton autour des armatures. Les fissures qui émergent à la surface du béton accélèrent notablement la diffusion de l'oxygène, du dioxyde de carbone et de l'eau.

Cette deuxième étape du phénomène, la corrosion même des armatures, n'est généralement pas utilisée dans le dimensionnement de la performance. Néanmoins, elle pourra l'être si des vitesses de corrosion très faibles sont justifiées.

4. Principaux modèles

Il n'existe pas (en 2015) de modèle complet couplé et normalisé pour prédire la profondeur de carbonatation d'un béton (x_c), mais de nombreux modèles ont été publiés.

Le modèle de Papadakis AIChE 1989 [2] est un exemple de modèles analytiques publiés pour analyser la profondeur de carbonatation (X_c) d'essais de laboratoire dans une atmosphère constante en fonction du temps (t) :

$$D_a = \frac{D_g \times C_{CO_2,g}}{C_{Ca,s}} \quad \text{eq. 1}$$

$$x_c = \sqrt{D_a \cdot t} \quad \text{eq. 2}$$

où D_a est le coefficient de diffusion apparent du front de carbonatation, D_g est le coefficient de diffusion du CO_2 dans la zone carbonatée, $C_{CO_2,g}$ est la concentration CO_2 dans l'atmosphère, et $C_{Ca,s}$ est la concentration totale en calcium des hydrates carbonatables par unité de volume de béton. Des modèles numériques ont également été publiés [3-5] et intègrent l'humidité relative variable de l'environnement ou bien le séchage simultané du matériau. Le lien avec le comportement sur site peut se faire avec le modèle Duracrete du Model Code Fib de 2010 [6]. Le lecteur pourra se référer à la thèse de J. Mai-Nhu [7] pour une revue plus exhaustive des modèles existants.

5. Paramètres influents

Paramètres « matériau » :

- **propriétés de transport** du matériau ;
- la quantité de **matière carbonatable** du produit (quantité de portlandite notamment) ;
- **durée et conditions de cure**. Une cure humide et suffisamment longue amène à un produit bien hydraté à la porosité et aux propriétés de transport réduites.

Paramètres « environnement » :

- **humidité relative, pluie, cycle, vent, ensoleillement et température** : ces paramètres influencent la vitesse de séchage du béton et la vitesse d'hydratation ;
- **concentration en CO_2 et en O_2** dans l'atmosphère ambiante.

6. Étapes des méthodes d'essais

Les essais consistent à exposer les échantillons à une humidité et une pression partielle de CO_2 .

Les étapes clés sont :

- durée et conditions de cure (température, sous eau, en sac étanche ou à 100 % d'humidité relative) ;
- durée et conditions de séchage initial (T , HR) ; cette étape permet de réduire la teneur en eau du béton et ainsi accélérer la diffusion du CO_2 . Ce séchage peut ne pas être suffisant pour atteindre un profil homogène de teneur en eau ;

- durée et conditions de l'essai de carbonatation proprement dit (T, HR, % CO_{2(gaz)}) ;
- aux échéances de temps choisies, le front de carbonatation est révélé par pulvérisation d'une solution de phénolphthaléine à 0,5 % sur une cassure fraîche du matériau, la cassure étant perpendiculaire aux faces de pénétration du CO₂.

Les grandeurs d'intérêt sont la profondeur de carbonatation à une échéance donnée ou bien le coefficient de diffusion apparent du front de carbonatation (voir *paragraphe 4*).

Remarque : la phénolphthaléine pure (n° CAS 77-09-8) est classée comme produit CMR (Cancérogène Mutagène Reprotoxique) de catégorie 1B (forte présomption (tests probants sur animaux)) et doit être utilisée en milieu professionnel et selon la réglementation en vigueur. Une solution à 0,5 % de phénolphthaléine commandée chez un fournisseur permet d'éviter de manipuler cette substance à l'état pur, le mélange est suffisamment dilué et n'est pas classé comme CMR. Des produits de substitution peuvent aussi être envisagés.

7. Méthodes d'essais de référence

Tableau 1 : Essais reconnus dans les dispositions en vigueur sur le lieu d'utilisation pour les bétons traditionnels

Nom	Cure	Séchage	Carbonatation	Durée	Commentaire
DD CEN/TS 12390-10: 2007 [8]	Sous eau => Rc,max/2	-	[CO ₂] naturelle HR = 65 %	2 ans	Utilisé dans DEE* (ex.CUAP)
NF EN 13295:2004 [9]	Sous eau, durée non spécifiée	-	[CO ₂] = 1 %, HR = 55 %	> 80 j.	Essai pour mortier de réparation
XP P 18-458: 2008 [10]	Sous eau 2 j.	14 j ; 45 °C	[CO ₂] = 50 %, HR = 65 %	44 j.	
Cur - Recommandation 48 [11]	Sous eau 3 j.	-	[CO ₂] = 2 %, HR = 65 %	entre 91 j. et 365 j.	
GBJ82-85 [12]	dans l'air 28 j. HR = 70 %, T = 20 °C	-	[CO ₂] = 20 %, HR = 70 %	56 j.	
ISO/DIS 1920-12: 2014 [13]	Sous eau 28 j.	14 j ; HR = 50 -70 %	[CO ₂] = 3 %, HR = 55 %, T = 22 °C	70 j.	

* DEE : Document d'Evaluation Européen (voir *paragraphe 5*).

Tableau 2 : Essai alternatif

FPr CEN/TS 12390-12: 2012 [14]	Sous eau 28 j.	14 j ; HR = 50 à 65 %, 20 °C	[CO ₂] = 4 %, HR = 55 %	112 j.	Projet de norme (en cours)
--------------------------------	----------------	------------------------------	--	--------	----------------------------

La profondeur de carbonatation peut être mesurée selon les normes NF EN 14630:2007 [15] ou RILEM CPC 18 [16]. À partir des mesures de la profondeur de carbonatation à différentes échéances, la vitesse d'avancée du front de carbonatation peut être calculée (voir le *paragraphe 4*).

8. L'évaluation de la performance

Mode d'évaluation :

- évaluation **comparative** : la profondeur de carbonatation est mesurée sur le béton candidat puis est comparée avec les valeurs obtenues sur un produit de référence normalisé suivant la même méthode d'essai ;
- évaluation « **absolue** » : à ce jour aucune valeur absolue de seuil n'est définie pour les méthodes d'essais listées dans le *paragraphe 7*.

9. Références

- [1] J.-P. Ollivier, A. Vichot, La durabilité des bétons, ATILH, 2008.
- [2] V.G. Papadakis, C.G. Vayenas, M.N. Fardis, A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation, *AIChE Journal*, 35 (1989) 1639-1650.
- [3] B. Bary, A. Sellier, Coupled moisture-carbon dioxide-calcium transfer model for carbonation of concrete, *Cement and Concrete Research*, 34 (2004) 1859-1872.
- [4] T. Ishida, C.-H. Li, Modeling of carbonation based on thermo-hygro physics with strong coupling of mass transport and equilibrium in micro-pore structure of concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6 (2008) 303-316.
- [5] M. Thiery, G. Villain, P. Dangla, G. Platret, Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics, *Cement and Concrete Research*, 37 (2007) 1047-1058.
- [6] fib, fib Model Code for Concrete Structures, 2010.
- [7] J. MAI-NHU, Corrosion des armatures du béton : couplage carbonatation/chlorures en présence de cycles hydriques Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2013.
- [8] DD CEN/TS 12390-10:2007, Testing hardened concrete - Part 10: Determination of the relative carbonation resistance of concrete, 2007.
- [9] NF EN 13295:2004, Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de la résistance à la carbonatation, 2004.
- [10] XP P 18-458:2008. Essai pour béton durci - Essai de carbonatation accélérée - Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté, 2008.
- [11] CUR-aanbevelingen 048:2010 Procedures, criteria en beproevingsmethoden voor de toetsing van de geschiktheid van nieuwe cementen voor toepassing in beton en voor de gelijkwaardige prestatie van beton met vulstoffen, 2010.
- [12] GBJ 82-85 Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete, 1986.
- [13] ISO/DIS 1920-12:2014, Essais du béton - Partie 12 : détermination de la résistance du béton à la carbonation - Méthode de carbonation accélérée, 2014.
- [14] ONR CEN/TS 12390-12:2010. Testing hardened concrete — Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method, 2010.
- [15] NF EN 14630:2007, Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Mesurage de la profondeur de carbonatation d'un béton armé par la méthode phénolphtaléine, 2007.
- [16] RILEM, CPC-18, Measurement of hardened concrete carbonation depth, *Materials and Structures*, 21 (1988) 453-455.

Fiche 2 : Risque de corrosion des aciers induite par les ions chlorure

1. Introduction

Ce risque concerne les bétons avec renforts métalliques en acier ordinaire, qui sont exposés à des milieux dont la teneur en ions chlorure est élevée (milieu marin, sels de déverglaçage, eaux riches en chlorure (piscine), etc.). Lorsqu'un seuil critique de concentration en ions chlorure est dépassé au niveau des renforts métalliques, ceux-ci peuvent se corroder par piqûre.

2. Conséquences

- Épaufrement, éclatement du béton d'enrobage.
- Perte d'adhérence entre l'armature et le béton, réduction de la section des armatures puis perte de capacité portante de la structure armée (dans les cas ultimes).

Remarque

D'autres conséquences sont possibles si le milieu est chimiquement agressif pour le béton considéré. Par exemple, dans le cas de l'eau de mer, on se reportera à la fiche « Attaque en milieu chimiquement agressif – Attaque sulfatique externe ».

3. Mécanismes physico-chimiques

Les mécanismes décrits ci-après sont ceux connus pour les bétons à base de ciment Portland, dont l'enrobage n'a pas été modifié par d'autres types d'attaques. Pour des chimies différentes, ou bien pour des matériaux affectés de façon notable par la carbonatation ou autre, certains mécanismes sont à préciser.

Dans un béton courant, à base de ciment Portland, les armatures sont passivées en raison du pH généralement élevé de la solution interstitielle (12,5 à 13,5) et la faible teneur en chlorure du béton à sa fabrication [1].

Le risque de corrosion induit par les chlorures est lié à deux mécanismes physico-chimiques successifs. **Le premier mécanisme est la pénétration d'ions chlorure dans le béton**, de la surface exposée vers les aciers (voir Figure 1a). Cette progression se fait plus ou moins vite, selon l'épaisseur et les propriétés de transport du béton, et les conditions environnementales (les mécanismes en jeu sont décrits plus loin). **Le second mécanisme est la corrosion active de l'acier**, une fois que le seuil « critique » de teneur en chlorure est atteint au niveau des armatures (la valeur du seuil critique fait l'objet de débats dans la communauté scientifique). Cette deuxième phase se caractérise par une perte du pouvoir protecteur de la couche passive et des vitesses de corrosion significative des armatures. Après une phase d'amorçage, la corrosion se propage dans certaines conditions (décrites plus loin) et peut entraîner des dégâts plus ou moins importants (voir Figure 1b).

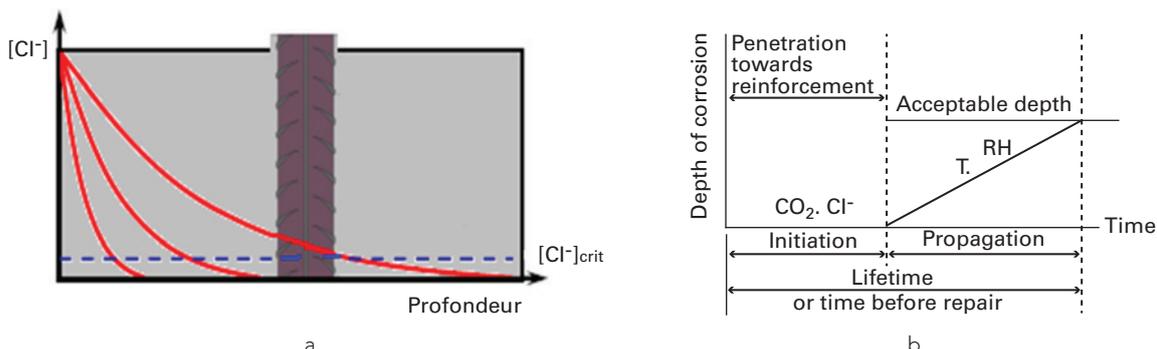


Figure 1 : Évolution du profil de concentration en chlorure en fonction du temps et de la profondeur (a) et les différentes phases de corrosion de l'acier d'après Tuutti [2] (b)

3.1 Pénétration des ions chlorure dans les matériaux cimentaires

La pénétration des ions chlorure dans le béton est influencée par deux processus concomitants :

- le transport des ions chlorure libres dans le béton d'enrobage :
 - par diffusion, ce mode de transport est favorisé lorsque le matériau est saturé d'eau,
 - par advection, ce mode de transport est favorisé par la fréquence des cycles d'humidification/séchage ;
- la fixation des chlorures par les hydrates :
 - l'adsorption à la surface des C-S-H,
 - l'intégration dans le réseau cristallin (sel de Friedel),
 - il est admis que ce sont les ions chlorure restés libres en solution qui diffusent et sont actifs dans le processus de dépassivation puis de corrosion active.

La vitesse apparente de pénétration des ions chlorure dans le béton dépend de leur diffusivité dans le matériau et de la quantité d'hydrates pouvant les fixer. Cette dernière augmente avec le degré d'hydratation, la qualité de la cure et le dosage en ciment.

3.2 La corrosion de l'acier dans les bétons en présence d'ions chlorure

La corrosion des armatures résulte d'un ensemble de réactions électrochimiques qui met en jeu le fer des armatures et le dioxygène de l'air en présence d'eau. La vitesse de corrosion devient significative uniquement après le dépassement du seuil critique de teneur en chlorures au niveau de l'acier. Seuls les chlorures libres sont actifs dans le processus de dépassivation puis de corrosion active. Celle-ci est influencée par deux processus concomitants : le transport d'oxygène et l'oxydation du fer par l'oxygène.

La vitesse de diffusion du dioxygène est aussi fonction de la microstructure du béton ; elle diminue avec la teneur en eau.

Les vitesses des réactions électrochimiques à l'interface entre armature et béton augmentent avec la teneur en eau.

La corrosion est significative en présence d'humidité et de dioxygène, l'optimum correspondant à une humidité relative comprise entre 80 % et 95 %.

Remarques

La teneur en chlorures dite « critique » ($[Cl]_{crit}$) est la quantité de chlorures au-delà de laquelle la couche de passivation est déstabilisée. Du point de vue opérationnel, les seuils portent sur les chlorures totaux et sont exprimés par rapport à une quantité de ciment Portland ou bien par rapport à la masse de béton (pour information, les limites normatives de l'EN 206 sont 0,4 % par rapport à la masse de ciment pour les bétons avec des armatures courantes, 0,1 % pour les bétons avec des armatures de précontrainte).

Pour un matériau cimentaire avec une chimie très différente de celle de ciments Portland, la question de la valeur du seuil critique en chlorures peut se poser.

La corrosion induite par les chlorures ne conduit pas à une corrosion généralisée comme c'est le cas avec la carbonatation. Il s'agit d'une attaque du métal localisée en des points particuliers, les piqûres, au niveau desquelles la vitesse de dissolution du fer est importante.

La corrosion induite par les chlorures peut engendrer des désordres de plus grande ampleur que la corrosion induite uniquement par carbonatation du béton.

La durée de vie des ouvrages est généralement associée à la période d'amorçage, c'est-à-dire de pénétration des ions chlorure jusqu'à atteindre un seuil critique au niveau des aciers. Néanmoins, la phase de « propagation de la corrosion », décrite dans la fiche « Corrosion des armatures métalliques », pourra être prise en compte dans la durée de vie si une vitesse de corrosion active très faible peut être justifiée.

4. Principaux modèles

Il n'existe pas (en 2015) de modèle complet couplé et normalisé pour prédire la pénétration des ions Cl^- d'un produit cimentaire, mais de nombreux modèles de prédiction ont été publiés.

Le guide AFGC 2004 [3] propose deux familles de modèles :

- **modèles empiriques** : l'évolution dans le temps du profil de concentration des ions chlorure dans le béton d'enrobage est prédit par la résolution de la seconde loi de Fick avec la fonction Erreur (exemples : modèle Life 365 disponible en ligne ou Duracrete, mis à jour dans le modèle Code Fib 2010 [4]) après un calage du coefficient de diffusion apparent sur une base de résultat d'essais de laboratoire ;
- **modèles physiques** : le transport d'ions et les interactions sont décrits par des équations, basées sur les mécanismes physiques. Par exemple, le modèle du LERM [5] fonctionne en conditions saturées, Stadium [6] est capable de prédire le comportement en milieu partiellement saturé, ou encore SDR_{ea}M-CRETE [7], le modèle du CERIB estime une durée de vie basée sur l'initiation de la corrosion des armatures par les chlorures, la carbonatation, ou le couplage des deux phénomènes, dans un milieu partiellement saturé, en intégrant la notion de variabilité.

La plupart des modèles utilisent un coefficient de diffusion déterminé en laboratoire en conditions saturées, ou bien évalué en fonction de la composition du béton, lorsque cette composition est conventionnelle. Certains modèles peuvent prendre en compte une loi d'évolution du coefficient de diffusion dans le temps, du fait de l'hydratation.

5. Paramètres influents

Paramètres « matériau » :

- **propriétés de transport** du béton (sorption, diffusivité, etc.) ;
- capacité de **fixation des chlorures** dans les hydrates de la pâte de ciment.

Paramètres « environnement » :

- accélération de la pénétration des chlorures en présence de cycles d'humidification/séchage ;
- **température** ;
- **concentration en Cl^- et en O_2** du milieu extérieur.

6. Étapes des méthodes d'essais

Les essais de laboratoire consistent généralement à établir le coefficient de diffusion des ions chlorure dans les bétons. Les principales étapes sont :

- la cure préalable ;
- un préconditionnement éventuel (saturation sous vide dans une solution diluée de soude par exemple) ;
- l'étape de pénétration des ions Cl^- ; plusieurs modes sont possibles :
 - diffusion en milieu saturé, la pénétration des ions chlorure étant accélérée du fait de la concentration élevée de ces derniers ; l'essai dure alors quelques mois,
 - migration sous champ électrique ; la durée de l'essai peut ainsi être réduite à une durée de un à quelques jours ;
- pour chaque mode de transport des ions, deux régimes sont possibles :
 - régime transitoire (le front de pénétration des ions chlorure n'a pas traversé tout l'échantillon de béton) ;
 - régime permanent (le front de pénétration des ions chlorure a pénétré tout le béton, et l'écart de concentration entre les deux milieux est maintenu constant de façon à maintenir un flux stationnaire).

Les grandeurs d'intérêt mesurées peuvent être :

- le front de pénétration pour un essai sous champ électrique en régime transitoire ;
- le profil de concentration pour un essai de diffusion pure en régime transitoire ;
- le flux de pénétration d'ions chlorure pour un essai en régime permanent.

Remarque

Pour des systèmes bien connus, on peut se limiter à la mesure d'indicateurs comme le RCPT (« Rapid Chloride Permeability Test »).

7. Les référentiels d'essais

Tableau 1 : Référentiels d'essais

Nom	Cure	Conditions	Accélération	Durée de l'essai	Commentaire
Pr CEN/TS 12390-11: 2010 [8]	Cure humide 28 j.	Régime transitoire une face d'échantillon immergée dans solution à 30 g/l NaCl	-	91 j.	Coefficient de diffusion calculé avec profil [Cl]
ASTM C 1556a: 2011 [9]	Cure humide 28 j.	Régime transitoire une face d'échantillon immergée en solution 150 g/l à NaCl	-	35 j.	Coefficient de diffusion calculé avec profil [Cl]
NT Build 443: 1995 [10]	Cure humide 28 j.	Régime transitoire solution à 165 g/l de NaCl	-	35 j.	Coefficient de diffusion calculé avec profil [Cl]
XP P 18-462: 2012 [11]	Cure humide 91 j.	Régime transitoire disque de béton placé entre deux compartiments de solution (0,1M NaOH + 0,5 ou 1M NaCl et 0,1M NaOH)	Migration sous champ électrique (20-30 V)	24 h ou plus selon béton	Coefficient de diffusion apparent calculé selon front de pénétration [Cl]
XP P 18-461: 2012 [12]	Cure humide 91 j.	Régime permanent Montage identique à XP P 18-462	Migration sous champ électrique (20-30 V)	Au moins 7 j.	Coefficient de diffusion effectif calculé selon flux
NT Build 492: 1999 [13]	Cure humide 91 j.	Régime transitoire, Montage spécifique. 100 g/kg NaCl (cathode) et 12 g/l NaOH (anode)	Migration sous champ électrique (10 à 60 V)	6 h à 3 j.	Coefficient de diffusion apparent calculé selon front de pénétration [Cl]
NT Build 355: 1997 [14]	Cure humide 91 j.	Régime permanent disque de béton placé entre deux compartiments de solution (100 g/kg NaCl, 12 g/l NaOH)	Migration sous champ électrique (12 V)	Au moins 7 j.	Coefficient de diffusion effectif calculé selon flux
(RCPT) ASTM C 1202 :2012 [15], AASHTOT277 [16]	Cure humide 28 j.	Régime transitoire disque de béton placé entre deux compartiments de solution (3 % NaCl, 0,3N NaOH)	Migration sous champ électrique (60 V)	6 h	Conductivité

8. L'évaluation de la performance

Mode d'évaluation :

- évaluation comparative : la grandeur d'intérêt est mesurée sur le béton candidat puis est comparée avec les valeurs obtenues sur un produit de référence normalisé suivant la même méthode d'essai ;
- évaluation « absolue » : à ce jour aucune valeur absolue de seuil n'a été définie de façon consensuelle pour les méthodes d'essais listées dans le *paragraphe 7*.

9. Références

- [1] J.-P. Ollivier, A. Vichot, La durabilité des bétons, ATILH, 2008.
- [2] K. Tuutti, Corrosion of Steel in Concrete, in: Department of Building Materials, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1982, pp. 469.
- [3] 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, in: État de l'art et Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité, 2004.
- [4] fib, fib Model Code for Concrete Structures, 2010.
- [5] O. Houdusse, H. Hornain, G. Martinet, Prediction of long term durability of Vasco Da Gama Bridge in Lisbon (SP 192-63), in: 5th CANMET/ACI International conference on durability of Concrete, Barcelona, 2000.
- [6] E. Samson, J. Marchand, Modeling the transport of ions in unsaturated cement-based materials, Computers & Structures, 85 (2007) 1740-1756.
- [7] J. Mai-Nhu, Corrosion des armatures du béton : couplage carbonatation/chlorures en présence de cycles hydriques in, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2013.
- [8] XP CEN/TS 12390-11:2010, Essai sur béton durci - Partie 11 : détermination de la résistance du béton à la pénétration des chlorures, diffusion unidirectionnelle, in, 2010.
- [9] ASTM C 1556a:2011, Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion, in, 2011.
- [10] NT BUILD 443:1995, Concrete, hardened: accelerated chloride penetration, in, 1995.
- [11] XP P 18-462:2012, Essai sur béton durci - Essai accéléré de migration des ions chlorure en régime non-stationnaire - Détermination du coefficient de diffusion apparent des ions chlorure, in, 2012.
- [12] XP P 18-461 Juin 2012, Essai sur béton durci - Essai accéléré de migration des ions chlorure en régime stationnaire - Détermination du coefficient de diffusion effectif des ions chlorure, in, 2012.
- [13] NT BUILD 492:1999, Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, in, 1999.
- [14] NT BUILD 355:1997, Concrete, mortar and cement based repair materials: chloride diffusion coefficient from migration cell experiments, in, 1997.
- [15] ASTM C 1202:2012, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, in, 2012.
- [16] AASHTO T277:2007, Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, in, 2007.

Fiche 3 : Corrosion d'éléments métalliques

1. Introduction

Cette fiche concerne des matériaux cimentaires dont la capacité à protéger des éléments métalliques (renforts, inserts) de la corrosion est à vérifier. On se place en dehors du domaine traditionnel pour lequel les connaissances actuelles sont suffisantes pour déterminer la passivation d'éléments métalliques noyés. Peuvent être concernés les métaux dont on ne connaît pas précisément le comportement dans les bétons traditionnels, ou bien des aciers ordinaires dans des matrices cimentaires avec une chimie particulière (bétons bas pH, etc.). Il convient alors de caractériser directement le risque de corrosion.

Remarque

On considère le matériau à son état initial, qui n'est pas modifié par une carbonatation éventuelle ou bien par la pénétration de chlorures. Pour les risques de corrosion induite par carbonatation ou pénétration des ions chlorure, il convient de se référer aux fiches pathologie spécifiques.

2. Conséquences

- Réduction de la section des armatures.
- Épaufrure, éclatement du béton d'enrobage.
- Perte d'adhérence entre l'armature et le béton.
- Perte de capacité portante de la structure armée (dans les cas ultimes).

3. Mécanismes physico-chimiques

La corrosion des armatures découle d'une interaction chimique entre le métal conducteur et son environnement aqueux. Les principaux mécanismes (*Figure 1*) sont décrits ci-dessous.

- La corrosion découle de la présence simultanée d'une réaction d'oxydation (anodique) du métal et d'une réaction de réduction (cathodique) de l'oxygène.
- Les vitesses des réactions électrochimiques à l'interface entre armature et béton augmentent avec la teneur en eau et diminuent au-delà d'une certaine valeur du fait de la diminution de la diffusion de l'oxygène.
- Les réactions d'oxydoréduction sont suivies par des réactions secondaires de formation de produits de corrosion (oxydes et oxyhydroxydes) à la surface du métal.
- La nature du milieu environnant les armatures (pH, température, résistivité de la solution interstitielle du béton, teneur en chlorures, en oxygène, en agents agressifs ou inhibiteurs, etc.) modifie les équilibres thermodynamiques et les vitesses des réactions d'oxydoréduction.
- Les produits de corrosion sont plus ou moins stables et peuvent dans certains cas continuer à se former jusqu'à la corrosion complète de l'armature.

Dans le cas de l'acier, les produits de corrosion du fer formés à la surface de l'acier sont expansifs. Cette expansion provoque des contraintes internes pouvant aboutir à la fissuration du béton autour des armatures.

Les fissures qui émergent à la surface du béton accélèrent notablement la diffusion de l'oxygène et de l'eau.

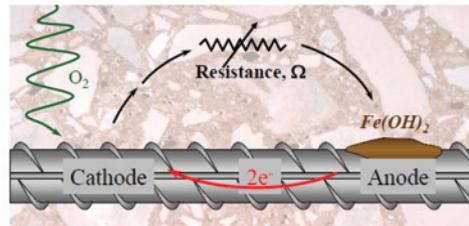


Figure 1 : Les mécanismes élémentaires de la corrosion de l'acier dans le béton

4. Principaux modèles

Il n'existe pas (en 2015) de modèle consensuel pour prédire la corrosion des armatures.

À titre d'exemple le modèle Cordoba [1] intègre le transport d'eau, d'oxygène, l'oxydation de l'acier et les aspects mécaniques.

5. Paramètres influents

Paramètres « matériau » :

- la capacité pour le béton à maintenir dans le temps sa solution interstitielle à un **pH élevé** maintenant le métal dans un état stationnaire avec une couche de surface protectrice (film « passif ») ;
- la microstructure (**perméabilité et diffusivité**) du béton pilote la pénétration d'eau, d'oxygène et d'autres espèces accélérant la corrosion ;
- la **nature du métal**.

Paramètres « environnement » :

- l'humidité relative, la pluie, le vent, l'ensoleillement, la température et plus généralement la nature de l'environnement conduisent des fluctuations de l'**humidité relative** à l'interface métal/béton ;
- la concentration en **oxygène** et en autres espèces tels que les chlorures peut accélérer la corrosion (il en est de même pour la conductivité de la solution interstitielle).

6. Étapes des méthodes d'essais

Les étapes clés des méthodes d'essais sont :

- préparation des électrodes (état de corrosion initial, état de propreté, soin apporté aux jonctions électriques, respect des distances d'enrobage) ;
- contrôle de l'humidité relative et de la teneur en oxygène de l'environnement (proche de la teneur en oxygène atmosphérique en général) ;
- composition du milieu gazeux ou liquide représentative de l'environnement (teneur en anions tels que les chlorures ou les sulfates, etc.).

Les grandeurs d'intérêt peuvent être :

- les indicateurs tels que le potentiel de corrosion [2] et la résistivité du béton [3] ; ils nécessitent de disposer de seuils calibrés ;
- la résistance de polarisation permet de calculer des vitesses de corrosion afin de remonter à des calculs de durée de vie [4] ;
- les analyses de surface afin de caractériser l'homogénéité de l'état de corrosion des armatures immergées dans le béton en fin d'essai.

7. Méthodes d'essais de référence

Les essais consistent généralement en des mesures électrochimiques en fonction de la durée de vieillissement dans leur environnement de bétons armés. Ces méthodes sont rapides (de l'ordre de quelques minutes). La durée des essais est contrôlée par la durée de vieillissement choisie.

En complément, les éléments métalliques noyés peuvent être extraits du matériau cimentaire, après un certain laps de temps, et être observés ou analysés pour vérifier l'absence de produits de corrosion (les expérimentateurs parlent alors d'« autopsie » des éprouvettes).

Tableau 1 : Méthodes d'essais de référence

Nom	Environnement	Laboratoire ou <i>in situ</i>	Grandeur mesurée	Commentaire
NF EN 480-14 [5]	20 ± 2 °C, solution saturée d'hydroxyde de calcium	Laboratoire	Densité de courant maximale ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) après application d'un potentiel constant et inspection visuelle de l'armature en fin d'essai	L'éprouvette renfermant l'adjuvant est comparée avec une éprouvette témoin non adjuvantée afin d'évaluer l'effet que l'adjuvant a sur le processus de corrosion
ASTM C876 [6]	Environnement atmosphérique naturel	Laboratoire ou <i>in situ</i>	Potentiel de corrosion. Mesure de la différence de potentiel entre l'armature et l'électrode de référence posée au contact de la surface du béton	Nécessite l'intervention de spécialistes voire des données supplémentaires (teneur en chlorures, profondeur de carbonatation, etc.) pour formuler des conclusions sur la durée de vie des ouvrages. Des travaux mettent en défaut cette méthode en cas de bétons aux laitiers
RILEMTC-154 EMC [3]	Mesure en environnement atmosphérique	Laboratoire ou <i>in situ</i>	Résistivité du béton. Différents principes sont présentés dans ces recommandations : méthode 4 points, méthode équivalente à ASTM C876 et autres cas	La mesure de la résistivité du béton est généralement corrélée à la teneur en chlorures. L'information relative à l'état de corrosion des armatures doit être obtenue par d'autres méthodes
Protocole CERIB [7]	Reproduction de l'environnement (humidité, séchage, carbonatation et/ou chlorures...) L'armature, l'électrode de travail et l'électrode de référence sont immergées dans le béton	Laboratoire	Potentiel de corrosion et résistance de polarisation	Essai comparatif avec un béton témoin normalisé

8. Évaluation de la performance

Mode d'évaluation :

- évaluation **comparative** : la grandeur d'intérêt est mesurée sur le béton candidat, elle est comparée avec les valeurs obtenues sur un produit de référence normalisé suivant la même méthode d'essai ;
- évaluation « **absolue** » : à ce jour aucune valeur absolue de seuil n'est définie de façon suffisamment robuste, certains documents (ASTM C876 [6], RILEM TC-154 EMC [2-4]) précisent des seuils qui ne font pas l'objet de consensus pour tous les liants.

9. Références

- [1] A. Millard, V. L'Hostis, Modelling the effects of steel corrosion in concrete, induced by carbon dioxide penetration, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16 (2012) 375-391.
- [2] B. Elsener, C. Andrade, J. Gulikers, R. Polder, M. Raupach, Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures, *Materials and Structures*, 36 (2003) 461-471.
- [3] R. Polder, C. Andrade, B. Elsener, O. Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert, M. Raupach, Rilem TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion - Test methods for on site measurement of resistivity of concrete, *Materials and Structures*, 33 (2000) 603-611.
- [4] C. Andrade, C. Alonso, J. Gulikers, R. Polder, R. Cigna, O. Vennesland, M. Salta, A. Raharinaivo, B. Elsener, Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method, *Materials and Structures*, 37 (2004) 623-643.
- [5] NF EN 480-14:2006. Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Méthodes d'essais - Partie 14 : détermination de l'effet sur la tendance à la corrosion de l'acier pour armature au moyen d'un essai électrochimique potentiostatique, 2006.
- [6] ASTM C 876:2009. Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 2009.
- [7] J. Mai-Nhu, Corrosion des armatures du béton : couplage carbonatation/chlorures en présence de cycles hydriques Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2013.

Fiche 4 : Risque de dégradation des bétons par gel interne

1. Introduction

Ce type de dégradation concerne les bétons durcis soumis à des conditions de gel dit « sévère » ou « modéré ». Pour la France, les zones géographiques concernées sont définies dans le fascicule FD P 18-326:2004 [1]. De façon générale, on adoptera la définition du guide de Recommandations du LCPC de 2003 [2] : les zones de gel sévère atteignent une température inférieure à -10 °C plus de dix jours par an, et les zones de gel modéré une température inférieure à -5 °C plus de deux jours par an. La présente fiche n'aborde que les dégradations liées au gel pur encore appelé « gel interne », c'est-à-dire en l'absence d'utilisation de sels de déverglaçage (voir Fiche dédiée dans ce cas).

2. Conséquences

- Gonflement du béton.
- Micro-fissuration interne.
- Dégradation des performances mécaniques (module de compressibilité, résistance en compression).
- Déchaussement des granulats par décohesion de la pâte de ciment hydraté avec destruction de la pièce (dans les cas extrêmes).

3. Mécanismes physico-chimiques

On est dans le cas où un matériau cimentaire (solide poreux partiellement saturé d'une solution interstitielle) est soumis, en présence d'humidité, à des variations de température pouvant entraîner des séquences de gel et de dégel. Le risque de dégradation est alors lié aux mouvements de fluides consécutifs au gel d'une partie de l'eau contenue dans le réseau poreux. Il existe plusieurs théories pour décrire le phénomène, aucune ne donnant entièrement satisfaction pour expliquer tous les phénomènes. La plus communément adoptée est détaillée ci-après.

• Théorie des pressions hydrauliques de Powers [3]

Lorsque la température diminue, l'eau contenue dans le réseau poreux gèle progressivement en fonction du diamètre des capillaires (d'abord dans les pores de plus grandes dimensions, puis dans les plus petits). En gelant, cette eau augmente de volume, induisant ainsi des pressions hydrauliques au sein de l'eau restée sous phase liquide (voir *Figure 1a*). Cette augmentation de pression génère des contraintes dans la pâte cimentaire, pouvant conduire à sa fissuration, si les contraintes générées dépassent la résistance en traction du matériau.

Pour les bétons courants, il a été constaté que la présence de bulles d'air dispersées dans la pâte permettait d'améliorer la tenue aux cycles de gel/dégel. Le rôle des bulles serait de diminuer les pressions hydrauliques en facilitant la circulation des volumes de solution n'ayant pas gelé. Powers [3] avait pu déterminer, en appliquant la loi de Darcy au fluide en circulation, la répartition idéale des bulles d'air pour limiter les contraintes générées. C'est pourquoi les bétons sont souvent formulés avec un agent dit entraîneur d'air qui stabilise l'air entraîné lors du malaxage. La répartition des bulles d'air est caractérisée par le « facteur d'espacement » (L_{barre}) qui est la demi-distance moyenne entre les bulles dans la pâte (voir *Figure 1b* et la méthode d'essais dans le *paragraphe 6*). Le respect d'un seuil « critique » est une condition favorable à la bonne tenue aux cycles de gel/dégel. Il est à noter que des bétons peuvent résister sans ce réseau de bulles dans des cas spécifiques (par exemple BFUP, BHP de rapport E/C inférieur à 0,32). *A contrario*, le respect de ce seuil ne garantit pas à lui tout seul le bon comportement du béton au gel pour des formulations atypiques (granulats gélifs, résistance en traction de la pâte insuffisante, etc.).

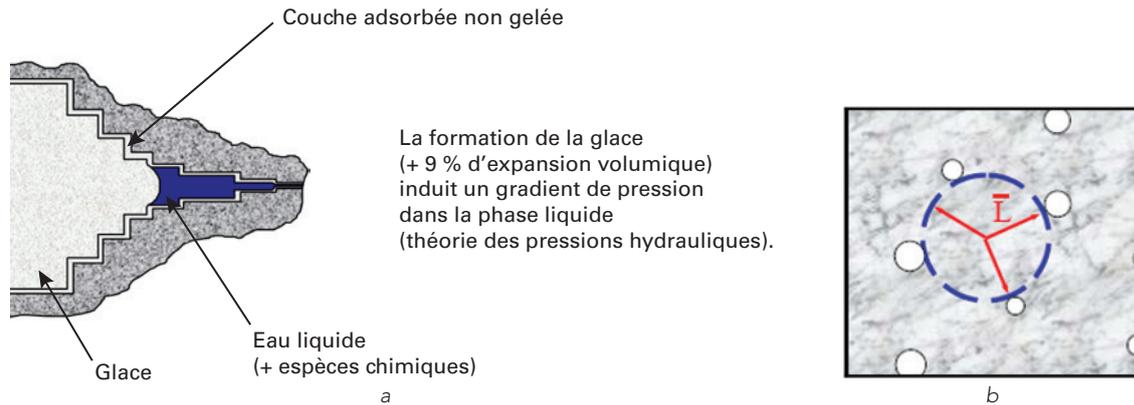


Figure 1 : Formation de glace dans un pore (a) [13] et notion de facteur d'espacement (L_{barre}) (b)

4. Principaux modèles

Il n'existe pas (en 2015) de modèle prédictif consensuel. La thèse de Zeng Q. [4] présente une synthèse bibliographique sur le sujet.

5. Paramètres influents

Paramètres « matériau » :

- **composition du béton** : nature et gélivité des granulats (le béton doit être formulé avec des granulats ou autre type d'inclusion non gélifs), présence d'un réseau de bulles d'air ou pas, et si oui, caractéristiques de ce réseau, structure du réseau poreux avec notamment distribution des pores en espace et en taille ;
- **âge du produit** – Impact fort sur les bétons évoluant après 28 jours.
Un béton peut être sensible au gel dès les premiers cycles d'exposition. L'âge du matériau peut modifier la sensibilité au gel (dégradation en cas d'exposition trop précoce par exemple) ;
- **modalités de mise en place du béton** (mauvaise compacité en cas de serrage insuffisant, mauvais réseau de bulles d'air selon les conditions pompage, la hauteur de chute, la vibration si elle est excessive) ;
- **résistance mécanique en traction** (généralement évaluée via la résistance en compression) ;
- **taux de saturation en eau du produit** : plus il est élevé, plus le matériau est sensible au gel.

Paramètres « environnement » :

- **nature des cycles** (conditions thermiques et hydriques).
En fonction de la nature des cycles (amplitude, fréquence) et de la diffusivité thermique, le produit peut être impacté jusqu'à cœur par le gel ;
- **degré de saturation de la partie d'ouvrage** (surface horizontale, drainage, surface inclinée).

6. Étapes des méthodes d'essais

- Modalités de serrage des corps d'épreuve (influent fortement sur la structure du réseau poreux, en particulier lorsque les bétons contiennent des entraîneurs d'air).
- Âge du béton.
- Durée et conditions de cure (température, conservation généralement en eau) : une cure de 28 jours est usuelle pour les matériaux cimentaires. Les modalités peuvent être adaptées en fonction des spécificités du matériau et de son application, en particulier la durée de stabilisation des propriétés. Dans tous les cas, cette durée doit être compatible avec l'âge de la première exposition du béton au gel.

- Mise en place des plots de mesure pour un suivi des déformations (le cas échéant).
- **Respect des cycles de gel-dégel** des référentiels d'essai ou spécifiés par l'usage.
- Aux échéances de mesure :
 - conditions de dégel des éprouvettes avant mesure ;
 - mesures du rapport des fréquences de résonance et de l'allongement relatif.

Les grandeurs d'intérêt peuvent être :

- facteur d'espacement (si nécessaire) ;
- expansion (mesure non destructive) évolution de la fréquence de résonance ou de la vitesse du son (mesures non destructives) ;
- perte de masse (mesure non destructive) ;
- propriétés mécaniques résiduelles (mesures destructives).

7. Méthodes d'essais de référence

À part les tests de caractérisation du réseau de bulles d'air, les essais de test de la performance consistent généralement à exposer des échantillons de béton à des cycles de gel/dégel, puis à détecter des dégradations éventuelles après un certain nombre de cycles. Il existe d'autres normes spécifiques, applicables à des produits industriels en béton particuliers (par exemple, la norme NF P 98-052:2002 [5] pour les appuis de fenêtre monoblocs).

À noter l'existence d'un test de résistance aux cycles de gel/dégel spécifiques aux granulats, qui peut être appliqué à un nouveau produit de ce type.

Tableau 1 : Essais reconnus dans les dispositions en vigueur sur le lieu d'utilisation pour les bétons traditionnels

Nom	Cure	Cycle thermique	Durée	Commentaire
ASTM C 457M :2012 [6]	Sous eau. Durée de sciage et polissage	-	Délai total : environ 1 semaine, dont 2 h de comptage	Mesure d'indicateur : facteur d'espacement
NF EN 480-11 :2006 [7]	Sous eau. Durée de sciage et polissage	-	Délai total : environ 1 semaine	Mesure d'indicateur : facteur d'espacement par analyse d'image Utilisée pour caractériser l'efficacité des adjuvants
NF P 18 424 [8]	28 j. sous eau, T = 20 °C ± 2	300 cycles [- 18 °C ; + 9 °C] 4 cycles / 24 h ; gel dans l'eau et dégel dans l'eau	3,5 mois	Test performantiel pour béton
NF P 18 425 [9]	28 j. sous eau, T = 20 °C ± 2	300 cycles [- 18 °C ; + 9 °C] 4 cycles/24 h ; gel dans l'air et dégel dans l'eau	3,5 mois	Test performantiel pour béton
PD CEN/TR 15177 :2006 [10]	En système fermé 6 jours puis sous eau 21 jours T = 20 °C ± 2	56 cycles [- 20 °C ; + 20 °C] 2 cycles/24 h ; gel dans l'air et dégel dans l'eau	56 jours	Test performantiel pour béton
NF EN 1367-1 :2007 [11]	Lavage puis séchage à 110 °C ± 5. Puis imbibition sous eau à 20 °C ± 5 pendant 24 h ± 1	10 cycles [- 17,5 °C ; 20 °C] 1 cycle/24 h ; sous eau	≈ 13 jours	Test pour granulats

8. Évaluation de la performance

Mode d'évaluation :

- évaluation « absolue » binaire : le matériau résistant au gel doit respecter les valeurs seuils.

Pour les normes NF P 18-424 [8], NF P 18-425 [9] et ASTM C 457M [6] mentionnées dans le tableau précédent, les seuils d'interprétation de la conformité sont définis dans le guide des Recommandations LCPC de 2003 [2].

9. Références

- [1] FD P 18-326:2004, Béton - Zones de gel en France, in, 2004.
- [2] L.-LCDPE, Chaussées, Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel, 2003.
- [3] T.C. Powers, Void Spacing as a Basis for Producing Air-Entraining Concrete, Highway Research Board, 29 (1949) 184–211.
- [4] Q. Zeng, Poromechanical behavior of cement-based materials subjected to freeze-thaw actions with salts modeling and experiments, in: Laboratoire Navier, Université Paris–Est, 2011, pp. 298.
- [5] NF P 98-052:2002. Produits préfabriqués en béton - Appuis de fenêtre préfabriqués en béton, 2002.
- [6] ASTM C 457M:2012. Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, in, 2012.
- [7] NF EN 480-11:2006, Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Méthodes d'essai - Partie 11 : détermination des caractéristiques des vides d'air dans le béton durci, in, 2006.
- [8] NF P 18-424:2008, Bétons - Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'eau - Dégel dans l'eau, 2008.
- [9] NF P 18-425:2008, Bétons - Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'air - Dégel dans l'eau, 2008.
- [10] PD CEN/TR 15177:2006, Testing the freeze-thaw resistance of concrete. Internal structural damage, in, 2006.
- [11] NF EN 1367-1:2007, Essais de détermination des propriétés thermiques et de l'altérabilité des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance au gel-dégel, 2007.

Fiche 5 : Risque de dégradation par écaillage des bétons soumis au gel en présence de sels de déverglaçage

1. Introduction

Le risque de dégradation par écaillage concerne les bétons soumis à des cycles de gel/dégel en présence de sels de déverglaçage (NaCl, CaCl₂). Toutefois, l'écaillage de bétons soumis au gel-dégel mais sans sels de déverglaçage, ainsi que l'écaillage de bétons soumis à des sels (eau de mer) mais sans cycles de gel-dégel, sont parfois observés. Ces deux cas ne sont pas traités dans cette fiche.

La prévention des désordres liés à l'écaillage nécessite de se prémunir au préalable des désordres liés au gel pur (voir fiche pathologie gel interne). Cette fiche traite des cas de salage dit fréquent (entre 10 et 30 jours par an) et très fréquent (plus de 30 jours par an).

2. Conséquences

- Dégradation du béton depuis la surface vers l'intérieur.
- Faciès en forme d'écaillés, avec parfois éclatement/déchaussement de granulats considérés comme non gélifs.

3. Mécanismes physico-chimiques

Comme toutes les pathologies d'écaillage ne sont pas expliquées de manière homogène et font toujours l'objet de recherche, la communauté scientifique et technique n'est pas en mesure de donner un modèle explicatif consensuel, ne serait-ce que pouvant permettre de hiérarchiser les paramètres influents. Une synthèse des différents mécanismes proposés dans la littérature est donnée en [8] et [9].

Néanmoins, les mécanismes ci-dessous sont souvent proposés :

- le cœur du béton, qui contient moins d'ions chlorure en solution, gèle en effet plus facilement que sa surface. Il en résulte une expansion du béton à cœur sous l'effet du gel, associée à un retrait thermique en surface : les contraintes différentielles résultantes génèrent alors une rupture dans la pâte par traction ;
- la température de gel de l'eau est directement fonction du diamètre des pores et de la concentration en sels dissous.

Comme suggéré dans [9], la sévérité des dommages résultant de l'action combinée des cycles de gel-dégel et des sels fondants résulte principalement de la plus grande gélivité de la zone superficielle (volume de pâte plus élevée et donc porosité plus élevée) et des conditions hivernales qui renforcent ces défauts en la maintenant saturée, en la soumettant à des chocs thermiques et en créant des gradients de concentration saline (osmose, gel par couche).

4. Principaux modèles

Il n'existe pas (en 2015) de modèle prédictif consensuel. Cependant des modèles ont été publiés, comme par exemple celui de Valenza et Scherer [1, 2] pour expliquer le comportement des bétons lors d'essais en laboratoire.

5. Paramètres influents

Paramètre « matériau » :

- **composition du produit** (résistance à la traction de la pâte, gélinivité des granulats) ;
- **propriétés de transport** (eau liquide, chlorures) ;
- **structure du réseau poreux** :
 - air entraîné, air occlus (quantité et distribution spatiale),
 - distribution en taille des pores.

Paramètre « environnement » :

- nature des **cycles** (conditions thermiques et hydriques) ;
- **degré de saturation** de la partie d'ouvrage (surface horizontale, drainage, surface inclinée) ;
- présence de **sels** (nature, concentration, fréquence).

6. Étapes des protocoles d'essai à examiner

Les essais consistent généralement à exposer à des cycles de gel/dégel des échantillons dont une surface est en contact avec un volume de saumure :

- modalités de confection des éprouvettes. Les modalités de serrage influent fortement sur la structure du réseau poreux. La surface d'essai doit être intègre et peut être influencée par la nature et la préparation du moule (choix de la cire) ;
- durée et conditions de cure :
 - âge du béton : impact fort sur les bétons évoluant après 28 jours ;
 - conservation en eau (température) ;
 - conservation dans l'air : impact de la carbonatation (teneur en $\text{CO}_{2(\text{g})}$) et des conditions hydriques (température et humidité relative) ;
- respect des cycles thermiques : réglage de l'enceinte climatique, emplacement des sondes thermiques, épaisseur de la lame de saumure ;
- saumure : effet pessimum de la concentration en chlorures sur les masses écaillées. Impact de la saumure (concentration, homogénéité et épaisseur de la saumure) sur la régulation thermique ;
- respect de la surface d'exposition réelle car la perte de la masse d'écaillage est rapportée à la surface.

La grandeur d'intérêt est le cumul des masses écaillées ramenées à la surface d'essai ; celle-ci est influencée par les modalités de récupération de l'ensemble des écailles aux échéances de mesure et par la surface d'essai effective.

7. Méthodes d'essais de référence

Tableau 1 : Méthodes d'essais de référence

Nom	Cure	Cycle thermique	Durée	Commentaire
XP P 18-420:2012 [3]	Cube 150 x 150 x 150 mm 14 j. dans l'eau Sciage des cubes entre 7 et 14 j. Jusqu'à 28 j. dans l'air (20 °C, 65 % HR). À 28 j. resaturation pendant 3 j avec 3 mm d'eau du robinet À 31 j. remplacer l'eau par une solution saline à 3 % NaCl et début de l'essai	- 20 / + 20 °C	3 mois	En France, l'essai est réalisé sur la face coffrée. Des seuils sont disponibles [4]
DD EN 12390-9:2006 [5], Slab test	Cube 150 x 150 x 150 mm 7 j. dans l'eau à 20 °C puis jusqu'à 25 j. dans l'air (20 °C, 65 % HR, 45 g/m ² /h et CO ₂ 300-1100 ppmv) Sciage du bloc à 21 j, configuration du bloc à 25 j. À 28 j. resaturation pendant 3 j. avec 3 mm d'eau du robinet À 31 j. remplacer l'eau par une solution saline à 3 % NaCl et début de l'essai	- 20 / + 20 °C	3,3 mois	Surface d'essai : face sciée
EN 12390-9:2006 [5], Cube test	Cubes 100 x 100 x 100 mm 7 j. dans l'eau à 20 °C puis jusqu'à 27 j. dans l'air (20 °C, 65 % HR, 45 g/m ² /h et CO ₂ 300 - 1100 ppmv) À 27 j. mise en place des cubes dans les containers et remplissage des containers avec la solution à 3 % NaCl (immersion complète) À 28 j. début de l'essai	- 15 / +20 °C	3 mois	
EN 12390-9:2006 [5], CF/CDF Test	Cubes 150 x 150 x 150 mm et plaque de séparation 7 j. dans l'eau à 20 °C puis jusqu'à 28 j. dans l'air (20 °C, 65 % HR, 45 g/m ² /h et CO ₂ 300 - 1100 ppmv) Resaturation à 28 j. par absorption capillaire et début des essais Milieu gélif : - CFTest : eau déminéralisée - CDFTest : solution à 3 % NaCl	- 20 / + 20 °C	CDF Test : 2 mois CFTest : 3 mois	

8. Évaluation de la performance

Pour valider les compositions, il est nécessaire de valider à la fois la résistance au gel interne et à l'écaillage.

Pour les aspects liés au gel pur, il convient de se reporter à la fiche pathologie gel interne.

Pour le gel pur, le mode d'évaluation est absolue binaire.

Le mode d'évaluation pour l'écaillage est également absolue binaire.

Pour la norme XP P 18-420:2012 [3] mentionnée dans le *Tableau 1*, on pourra se reporter aux valeurs-seuils des recommandations pour la durabilité des bétons soumis au gel [4].

9. Références

- [1] J.J. Valenza, II, G.W. Scherer, A review of salt scaling: I. Phenomenology, *Cement and Concrete Research*, 37 (2007) 1007-1021.
- [2] J.J. Valenza, II, G.W. Scherer, A review of salt scaling: II. Mechanisms, *Cement and Concrete Research*, 37 (2007) 1022-1034.
- [3] XP P 18-420:2012, Béton - Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline, 2012.
- [4] Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel : Guide technique, in : LCDPEC.-. LCPC (Ed.), *Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées*, 2003, pp. 167.
- [5] DD CEN/TS 12390-9:2006, Testing hardened concrete. Freeze-thaw resistance. Scaling, 2006.
- [6] SS 137244:2005, Concrete testing - Hardened concrete - Scaling at freezing, 2005.
- [7] NF EN 13369:2013, Règles communes pour les produits préfabriqués en béton, 2013.
- [8] S. Bouteille, Outils de caractérisation et analyse du comportement des matériaux cimentaires soumis à des cycles de gel-dégel en présence de sels, Université Paris-Est, 2013, pp. 303.
- [9] J.-P. Ollivier, A. Vichot, *La durabilité des bétons*, ATILH, 2008.

Fiche 6 : Risque de dégradations par une Réaction Sulfatique Externe (RSE)

1. Introduction

Ce risque de dégradation concerne les bétons exposés à un environnement riche en sulfates solubles.

Il existe plusieurs types de réaction sulfatique externe. La première réaction conduit à la formation d'ettringite secondaire expansive. La seconde, beaucoup plus rare, mène à la formation de thaumasite. Peut également se rajouter une dégradation purement physique due à la cristallisation de sels. Seule la première réaction sera traitée dans ce document.

2. Conséquences

Les désordres liés à cette dégradation sont assez variés :

- gonflement ;
- fissuration à plusieurs échelles : écaillage, desquamation de surface ou encore formation de « pustules » (cratères avec des éclatements localisés) ;
- décohésion du béton dans les cas ultimes.

Beaucoup de désordres concernent des parties d'ouvrages peu ou pas accessibles (fondations, canalisations, etc.) ce qui nous en fait probablement sous-estimer son importance.

3. Mécanismes physico-chimiques

Les vitesses d'apparition et d'évolution des désordres ainsi que leur localisation sont souvent très variables. Les désordres restent souvent relativement superficiels (quelques centimètres) mais ils peuvent affecter une grande partie de la couche de protection des armatures métalliques du béton. Il est souvent difficile de stopper une dégradation en cours et de réparer des matériaux dégradés par cette réaction.

Les mécanismes associés à la RSE ne sont pas encore établis avec certitude, dans l'état actuel de nos connaissances. Nous pouvons avancer les étapes suivantes pour les bétons à base de ciment Portland :

1. dans les premiers jours de l'hydratation du matériau, des macro-cristaux et des cristallites de mono-sulfoaluminate de calcium se forment au sein des C-S-H à partir du C3A et des sulfates présents dans le liant ;
2. au contact d'un environnement riche en ions sulfate, ceux-ci pénètrent dans le matériau selon deux modes de transport : par diffusion lorsque le matériau est saturé en eau ou par advection lorsque le matériau est soumis à un gradient de pression hydraulique ou à des cycles de désaturation/saturation hydriques. Une fissuration de la surface du béton accélère également la pénétration des ions ;
3. ces ions sulfate réagissent avec les cristallites de monosulfoaluminate de calcium qui se transforment lentement en cristallites d'ettringite (trisulfoaluminate de calcium). Selon les niveaux de sursaturation atteints localement et les conditions de confinement, la néoformation d'ettringite génère des contraintes pouvant entraîner l'endommagement de la pâte et la désolidarisation de la pâte et des granulats. Les macro-cristaux de monosulfoaluminate de calcium se transforment aussi en ettringite mais sans provoquer semble-t-il de désordre. Avec le temps, certaines cristallites d'ettringite se dissolvent et de l'ettringite massive se forme dans les auréoles pâte/granulats ouvertes par l'étape précédente ce qui accentue les désordres. Aux fortes concentrations en sulfates, la formation de gypse est également observée.

La présence d'additions minérales hydrauliques ou pouzzolaniques, en quantités suffisantes, permet souvent de réduire les désordres. Pour une raison encore mal expliquée les fillers calcaires accélèrent les dégradations. La finesse du ciment, la taille de l'élément en béton et sa géométrie semblent influencer également sur la cinétique de gonflement. La résistance du matériau à l'eau de mer ne garantit en rien sa résistance aux sulfates.

L'eau de mer ou les sels de déverglaçage chlorés contiennent des sulfates solubles mais il existe une compétition entre la fixation des sulfates et celle des chlorures dans les phases aluminates. Les sulfates solubles peuvent résulter de l'oxydation de sulfures de fer.

4. Principaux modèles de prévision

Il n'existe pas (en 2015) de modèle prédictif consensuel.

5. Paramètres influents

Paramètres « matériau » :

- la minéralogie du ciment : taux de C_3A pour les ciments Portland (le taux de C_4AF pourrait avoir un rôle également), taux de C_3S et d'alcalins ;
- la nature et le taux de constituants principaux hydrauliques ou pouzzolaniques dans le ciment ou d'additions minérales dans le béton ;
- le rapport eau/liant du béton, ainsi que les autres paramètres pouvant affecter la compacité du matériau final (la compacité du squelette granulaire, le mode de mise en place et la cure, etc.) ;
- taille et géométrie des éprouvettes d'essai.

On pourra se référer à la revue bibliographique du groupe de travail « Réactions endogènes » de Grandube [9] pour plus de détails sur les paramètres d'influence dans le cas des bétons traditionnels.

Paramètres « environnement » :

- la concentration en ions sulfate en surface du béton ainsi que la nature du cation associé (Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+}).
Les dégradations en présence de sulfate de magnésium sont généralement plus prononcées pour les matériaux à base de ciment Portland (dégradation des C-S-H en « M-S-H » qui ne présentent aucune propriété liante) ;
- le taux de renouvellement des ions sulfates en surface du béton ;
- la fréquence des cycles d'humidification/séchage de la surface du béton, si ces cycles ont un impact notable sur le taux de saturation en eau des premiers centimètres de la surface du béton ;
- la température.

6. Étapes des méthodes d'essais

Les essais peuvent être classés en **essais de qualification du liant**, réalisés en général sur mortier (éprouvettes $2 \times 2 \times 16$ ou moins, plaques minces, etc.) et **essais de performance sur béton** réalisés sur prismes, cylindres ou carottes. Plus l'éprouvette est petite plus rapide est l'essai.

Les essais suivent en général le même schéma :

- cure humide des corps d'épreuve ;
- immersion dans une solution de sulfate à 20 ou 23 °C selon les pays.

Ces essais sont souvent longs (plusieurs mois sur mortier, parfois plusieurs années sur béton). Pour accélérer le processus de dégradation certains essais incluent :

- des cycles séchage/immersion des éprouvettes ;
- une phase de séchage suivi d'une saturation sous vide unique avec la solution de sulfate en début d'essai.

La plupart des essais utilisent des solutions de Na₂SO₄ avec des concentrations allant de 16 à 33 g de SO₄ /l. Certains essais utilisent une solution moins concentrée ce qui rallonge l'essai si un autre moyen d'accélération n'est pas mis en œuvre. Le sulfate de magnésium est plus agressif. Le gypse est nettement moins soluble et mène à des essais plus longs. **Le sel à utiliser peut être choisi en fonction des conditions environnementales prévues pour le matériau à tester.**

Pour certains essais, le pH de la solution de sulfate est régulé, ce qui accélère l'essai et les rendent plus représentatifs de milieu de composition constante. Dans beaucoup d'essais, afin de maintenir un taux de sulfate le plus constant possible tout au long de l'essai (en raison de la consommation de sulfate par le matériau), la solution de sulfate est renouvelée régulièrement (souvent à l'occasion des mesures). Un rapport volumique solution/matériau important est également préconisé.

Les grandeurs d'intérêt mesurées sont :

- la déformation longitudinale et la masse des éprouvettes ;
- mais aussi parfois la masse d'écaillage produite, la densité, la résistance mécanique, le module d'élasticité dynamique ou le flux d'espèces lixiviées.

7. Méthodes d'essais de référence

Il existe aujourd'hui un large choix d'essais mais très peu ont abouti à un consensus.

Tableau 1 : Essais reconnus dans les dispositions en vigueur sur le lieu d'utilisation pour les bétons traditionnels

Nom	Cure	Échantillon	Condition d'immersion	Durée essai	Grandeur	Commentaire
CSA A3004-C8 - Procédure A [1] et ASTM C1012 :2013 [3]	Cure sous eau jusqu'à Rc > 20 MPa	Barrettes de mortier 2.5*2.5*28.5 cm	[SO ₄ ²⁻] = 2,8 g/l (solution de Na ₂ SO ₄) à 20 °C	12 ou 24 mois	Expansion	
SIA 262/1:2013 [4] annexe D	Cure sous eau 28 jours	Carotte de béton 150 m diamètre 28 mm	4 cycles de 2 j de séchage et 5 j dans une solution 33 g SO ₄ ²⁻ /l de solution de Na ₂ SO ₄	56 jours	Expansion et masse	Essai performance béton
NF P 18-837 [5]	Cure sous eau 28 jours	Barrettes de mortier 2*2*16 cm	[SO ₄ ²⁻] = 19,5 g/l (solution de MgSO ₄) à 20 °C	56 semaines	Expansion	

Tableau 2 : Méthodes d'essais alternatifs

Cure recommandation 48 [6]	Cure sous eau 28 jours	Barrettes de mortier 2*2*16 cm	[SO ₄ ²⁻] = 16 g/l (solution de Na ₂ SO ₄) à 20 °C	56 semaines	Expansion	
Essai Wittenkind [7]	Démoulage à 2 jours puis 14 jours sous eau de chaux	Barrettes de mortier 1*4*16 cm	[SO ₄ ²⁻] = 29,5 g/l (solution de Na ₂ SO ₄) à 20 °C et 5 °C	≥ 7 mois	Expansion et module d'élasticité dynamique	Échantillon de référence sous eau de chaux recommandé

D'autres méthodes peuvent être trouvées dans l'état de l'art du document PD CEN/TR 15697:2008 [8].

8. Évaluation de la performance

Certains de ces essais possèdent des seuils pour une évaluation « absolue » ; le lecteur est invité à consulter les méthodes d'essais ou les fascicules de documents associés pour trouver ces seuils. **Ces seuils sont spécifiques à chaque essai qui en possède, ils ne peuvent en aucun cas être utilisés pour d'autres essais avant validation préalable par une étude adéquate.**

9. Références

- [1] CAN/CSA-A3000-13, Cementitious materials compendium, 2013, pp. 282.
- [2] ASTM C 452/C 452M:2010, Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate., 2010.
- [3] ASTM C 1012/C 1012M:2013, Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, 2013.
- [4] SIA 262/1:2013, Construction en béton - Spécifications complémentaires, 2013.
- [5] NF P 18-837:1993, Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique - 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, 1993.
- [6] CUR-aanbevelingen 048:2010, Procedures, criteria en beproevingsmethoden voor de toetsing van de geschiktheid van nieuwe cementen voor toepassing in beton en voor de gelijkwaardige prestatie van beton met vulstoffen, 2010.
- [7] Wittekind, Sulphate-resistant cements and their testing, Zement Kalk Gyps, (1960) 565 - 572.
- [8] PD CEN/TR 15697:2008, Ciment. Essais de performances relatifs à la résistance aux sulfates. État de l'art - Cement. Performance testing for sulfate resistance. State of the art report, 2008.
- [9] GranDuBé, (2007), Grandeurs associées à la Durabilité des Bétons, sous la direction de G. Arliguie et H. Hornain, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 2007.

Fiche 7 : Risque de dégradations par une Réaction Sulfatique Interne (RSI)

1. Introduction

Ce risque concerne les bétons ayant subi un échauffement supérieur à 65 °C pendant plusieurs heures ou plusieurs jours après leur mise en place, et qui sont composés d'une matrice cimentaire dont les caractéristiques physico-chimiques sont favorables à la RSI. La survenue de dommages est à craindre si ces bétons sont ensuite exposés à un environnement très humide.

Ce type de scénario peut concerner des pièces dont la chaleur générée lors de l'hydratation du liant est élevée et n'est que partiellement évacuée vers l'extérieur (éléments massifs, formules avec des ciments à chaleur d'hydratation élevée, utilisation de coffrages relativement isolants), ou bien soumises à des températures élevées au jeune âge (coulages par temps très chaud, traitement thermique excessif). La dégradation est liée à la formation tardive (plusieurs années), en milieu humide, d'ettringite secondaire massive et très expansive qui peut mener à la ruine de l'ouvrage.

Remarque

Pour les bétons à base de ciment Portland, les paramètres primordiaux sont l'eau, la température maximale atteinte et sa durée de maintien, les teneurs en sulfates et en aluminates du ciment ainsi que la teneur en alcalins du béton. Il a été montré en laboratoire que si la température dépasse 65 °C et que si les autres paramètres primordiaux sont présents, on se trouve généralement dans une situation où peut se développer une RSI. Même pour un matériau non concerné par la formation d'ettringite, l'échauffement excessif au jeune âge est à éviter pour éviter l'apparition de fissurations de retrait thermique lors de l'abaissement de la température succédant à l'échauffement du béton.

2. Conséquences

- Fissuration très importante et profonde des massifs de béton affectés.
- Très importantes pertes de propriétés mécaniques.
- Risque accru de corrosion et de rupture des armatures en raison de la fissuration du béton d'enrobage.

3. Mécanismes physico-chimiques

Les conditions de déclenchement d'un gonflement délétère par RSI ne sont pas encore complètement cernées. Il s'agit d'un phénomène identifié récemment par rapport aux autres pathologies connues pour les bétons (années 1980), et le lien entre les essais en laboratoire et le comportement sur le terrain des ouvrages reste ténu. Tous les mécanismes ne sont pas encore clairement établis mais les travaux actuels font apparaître que la dégradation résulte de l'enchaînement des mécanismes suivants :

- **si la température du béton est supérieure à 65 °C** pendant les jours qui suivent le début de son hydratation, l'ettringite primaire, qui se forme habituellement, ne se forme pas ou est déstabilisée et disparaît. Les **ions sulfate et aluminate** qui ne se sont pas combinés sous forme d'ettringite primaire forment d'une part des microcristaux de monosulfoaluminate de calcium dispersés parmi les C-S-H et se fixent d'autre part sur les C-S-H (cas des sulfates) ou sont intégrés dans le réseau des C-S-H (cas de l'aluminium) [5].

Un effet pessimum du couple température/durée d'échauffement est apparu à la suite de certaines expériences en laboratoire [6], [7]. Cela signifie qu'il n'existe pas de température seuil unique mais plutôt une température seuil spécifique à chaque cas. À titre d'exemple, c'est la raison pour laquelle, les traitements thermiques courts utilisés en préfabrication, à des températures pouvant dépasser 65 °C, sont permis par les recommandations RSI [3] ;

- si dans les mois et les années qui suivent sa mise en place le matériau est en **contact fréquent avec de l'eau libre** (eau stagnante, zone immergée, etc.), les microcristaux de monosulfoaluminate de calcium réagissent avec les ions sulfates et aluminates libérés par les C-S-H pour former de l'ettringite secondaire massive à caractère très expansif. La pâte de ciment subit alors une expansion généralisée qui conduit à la fissuration du béton. Cette réaction est en général très lente, les premiers signes de dégradation n'apparaissent souvent qu'après une dizaine d'années sur ouvrage. Les **cycles d'humidification/séchage** semblent accélérer la formation d'ettringite secondaire.

4. Principaux modèles

Des modèles existent pour prédire l'élévation en température de parties d'ouvrages en béton, et prendre ainsi des dispositions préventives. Le plus complet est le modèle CESAR-LCPC [1] développé par l'IFSTTAR (cartographie 2D ou 3D des températures atteintes dans une pièce de béton en fonction du temps). Le module RGIB [2] de ce modèle permet d'estimer l'expansion résultant d'une réaction interne (réaction alcali-granulats et réaction sulfatique interne).

En première approche, on peut utiliser l'annexe IV des Recommandations LCPC [3] qui donne un calcul d'estimation de la température maximale atteinte au cœur d'une pièce de béton.

5. Paramètres influents

Paramètres « matériau » qui participent à la montée en température du béton :

- dimensions de la pièce de béton ;
- type et dosage en liant du béton :
 - chaleur d'hydratation du ciment,
 - la présence d'une ou plusieurs additions réactives (laitier, cendres volantes, pouzzolanes naturelles, métakaolin et fumées de silice) dans des proportions adaptées, peut diminuer la montée en température lorsque l'addition est en substitution au clinker ;
- nature des granulats.

Paramètres « matériau » qui favoriseraient la RSI en cas de température élevée à jeune âge :

Pour les matériaux répondant aux normes Bétons actuelles, les paramètres identifiés à ce jour sont donnés ci-dessous :

- les ciments riches en aluminates, sulfates et alcalins sont les plus sensibles à ce phénomène (néanmoins, l'emploi d'un ciment CEM I SR n'est pas une garantie suffisante pour éviter la RSI) ;
- la présence d'une ou plusieurs additions peut, selon leur nature, favoriser la fixation des sulfates sous des formes non expansives (augmentation du seuil de température critique [3]).

Paramètres « environnement » qui participent à la montée en température du béton :

- température des constituants du béton au moment de leur utilisation et température du béton au moment du coulage ;
- température extérieure au moment du coulage et dans les jours qui suivent ;
- nature isolante du coffrage ;
- traitement thermique (il convient d'éviter des températures maximales trop élevées associés à des paliers de température trop longs [3]).

Paramètres « environnement » qui favoriseraient la RSI en cas de température élevée à jeune âge :

- contacts fréquents (cycles d'humidification/ séchage) ou permanents avec de l'eau libre.

6. Étapes des méthodes d'essais

Le lien entre les essais de laboratoire et la réalité du terrain reste à approfondir du fait que ce type de dégradation a été identifié récemment, et reste exceptionnel. On peut citer le test de laboratoire mis au point et publié par l'IFSTTAR en 2007 [4]. Il consiste à établir si le phénomène de RSI peut se développer **pour une formule de béton donné et pour un échauffement thermique donné** :

- des échantillons de béton (équipés de plots pour un suivi de variation dimensionnelle) sont fabriqués, puis rapidement exposés à un traitement thermique qui se caractérise par une vitesse d'échauffement, la durée de maintien de la température maximale et une vitesse de refroidissement. Il n'y a pas de traitement type suggéré par l'essai. Il faut que ce traitement reflète un scénario d'exposition réel connu ou estimé comme indiqué au *paragraphe 4* ;
- les échantillons subissent ensuite des cycles de séchage/humidification. Ces cycles permettent d'accélérer les mécanismes de dégradation de plusieurs semaines ;
- les corps d'épreuve sont ensuite conservés dans l'eau. Des mesures de variations dimensionnelles et pondérales sont effectuées régulièrement sur au moins un an. En fonction des tendances obtenues, la durée totale de l'essai est comprise entre 12,5 et 15,5 mois, traitement initial inclus. Un examen au MEB (microscope électronique à balayage) est conseillé en fin d'essai pour vérifier que la dégradation résulte bien de la formation d'ettringite secondaire expansive.

Les grandeurs d'intérêt sont :

- les variations dimensionnelles et pondérales des corps d'épreuve ;
- la formation d'ettringite massive dans le matériau à l'issue des essais (observée par exemple au microscope électronique à balayage).

7. Méthodes d'essais de référence

Pour la France, le test a été mis au point par l'IFSTTAR et publié en 2007.

Tableau 1 : Test mis au point par l'IFSTTAR

Nom	Traitement initial	Pré-conditionnement	Mesures	Durée totale essai	Seuil	Commentaire
LCPC-ME66: 2007 [4]	Traitement thermique représentant l'histoire thermique du béton sur ouvrage jusqu'à température ambiante.	2 cycles (7 jours chacun) de séchage (HR < 30 %, [38 ± 2] °C)/ humidification (HR = 100 %, [20 ± 2] °C) Puis conservation dans l'eau à [20 ± 2] °C.	Variations dimensionnelles et pondérales tous les 7 jours pendant 2 mois, puis tous les 15 jours pendant 4 mois, puis tous les mois	Entre 12,5 et 15,5 mois avec le traitement initial	Critères selon [4]	Cet essai de qualification est en général jugé conservateur. Ecart-type assez élevé.

8. Évaluation de la performance

Mode d'évaluation :

- évaluation « absolue » : respect des seuils recommandés dans le guide du LCPC sur la RSI [3] et de la méthode d'essai des LPC n° 66 [4].

9. Références

- [1] P. Humbert, A. Dubouchet, G. Fezans, D. Remaud, CESAR-LCPC, un progiciel de calcul dédié au génie civil, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, (2005) 7-37.
- [2] N. Baghdadi, Modélisation du couplage chimico-mécanique d'un béton atteint d'une réaction sulfatique interne, ENPC, 2008, pp. 248.
- [3] LCPC, Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne - Guide technique, 2007.
- [4] LCPC, A. Pavoine, L. Divet, ME66, Réactivité d'un béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne. Essai de performance, 2007.
- [5] Barbarulo, R. 2002. Comportement des matériaux cimentaires : actions des sulfates et de la température, Ph.D. thesis, École Normale Supérieure de Cachan, Université Laval. [Barbarulo et al., 2005]
- [6] Barbarulo, R., Peycelon, H., Prené, S., & Marchand, J. 2005, Delayed ettringite formation symptoms on mortars induced by high temperature due to cement heat of hydration or late thermal cycle. Cement and Concrete Research, 35(1), 125 – 131
- [7] Brunetaud, X. 2005. Étude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton, Ph.D. thesis, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et le laboratoire MSSMat.

Fiche 8 : Risque de dégradations par une Réaction Alkali-Granulat (RAG)

1. Introduction

L'alcali-réaction désigne un ensemble de réactions entre certaines formes de silice ou de silicates solubles en milieu basique et les alcalins du béton, en présence d'eau. Il y a alors formation d'un gel expansif pouvant conduire, dans les cas extrêmes, à la destruction des parties d'ouvrages concernées. La démarche générale de prévention est exposée dans le FD P 18464 [1].

2. Conséquences

- Fissuration très importante et profonde des massifs de béton affectés.
- Très importantes pertes de propriétés mécaniques.
- Risque accru de corrosion et de rupture des armatures en raison de la fissuration.

3. Mécanismes physico-chimiques

Les travaux actuels font apparaître l'importance des mécanismes décrits ci-dessous.

Solubilité de certaines formes de silice ou de silicates instables en milieu basique.

Le fascicule de documentation FD P 18 542 [2] détaille les modalités de classement des granulats en trois catégories : non réactif (NR), potentiellement réactif (PR) et potentiellement réactif à effet de pessimum (PRP). Pour cette dernière catégorie, le risque n'existe que lorsque la teneur en silice soluble est dans certaines plages de valeurs critiques dites pessimales.

Le classement est effectué sur la base de tout ou partie des éléments suivants :

- teneur en silice ;
- analyse pétrographique ;
- essai de performance (essai crible ou essai à long terme).

Quantité d'alcalins mobilisables. Le risque existe à partir de ~3 kg d'alcalins équivalents par m³ de béton (prise en compte de K et Na). Les alcalins susceptibles de contribuer aux réactions sont ceux présents dans la solution interstitielle et ils peuvent provenir de tous les constituants (liant, addition minérale, adjuvant, granulat, etc.).

Certains environnements, tels que les environnements marins ou ceux conduisant à l'utilisation de sels de déverglaçage, sont plus agressifs car ils conduisent à enrichir la solution interstitielle du béton en alcalins.

Si dans les mois et les années qui suivent sa mise en place, le matériau est au **contact très fréquent avec de l'eau libre (eau stagnante, zone immergée, etc.)**, il y a formation d'un gel silico-calco-alcalin à caractère expansif. La pâte de ciment subit alors une expansion généralisée qui conduit à sa fissuration. Cette réaction est en général très lente, les premiers signes de dégradation n'apparaissent souvent qu'après 10 ans sur les ouvrages.

4. Principaux modèles

Le modèle RGIB [3] intégré dans le code de calcul César-LCPC [4] est un exemple de modèle décrivant les expansions de structure associées à la RAG.

5. Paramètres influents

Paramètres « matériau » :

- quantité et stabilité de la silice des granulats en milieu basique : classement des granulats NR, PR ou PRP.
- somme des alcalins équivalents issus de tous les constituants qui pourront se retrouver en solution, et être disponibles pour réagir (bilan calculé selon les indications données dans le FD P 18 464 [1]) ;
- dosage en liant, principal contributeur des alcalins généralement ;
- la présence d'additions minérales permet, selon la nature et la teneur de celles-ci, d'atténuer, voire de contrecarrer le phénomène. Les plus efficaces sont les cendres volantes silico-alumineuses à teneur faible en calcium, les laitiers de haut fourneau, les métakaolins.

Paramètres « environnement » :

- contacts très fréquents (cycles d'humidification/séchage) ou permanent avec de l'eau libre ;
- apport d'alcalins par le milieu extérieur (projections de sels de déverglaçage, environnement marin).

6. Étapes des méthodes d'essais

Deux cas de figure sont à distinguer : la qualification de la réactivité d'un granulat (ou de tout autre type d'inclusion) vis-à-vis de l'alcali-réaction, ou bien l'évaluation de la stabilité dimensionnelle d'un matériau cimentaire élaboré avec des granulats alcali-réactifs. La grandeur d'intérêt est la variation dimensionnelle des corps d'épreuve (gonflement).

6.1 Qualification d'un granulat

Les principes retenus pour la qualification des granulats sont décrits dans le FD P 18 542 [2]. Ce fascicule propose deux méthodologies, l'une basée sur une caractérisation physico-chimique du granulat (méthodes pétrographiques associées à des analyses chimiques, l'autre sur des essais de stabilité dimensionnelle. Les essais de stabilité dimensionnelle comprennent un essai long sur béton normalisé (voir *Tableau 1*), auquel on peut substituer deux essais cribles qui permettent de statuer plus rapidement si le résultat d'essai est conforme. Dans le cas de matériaux standards, on peut privilégier les essais cribles. En cas de matériaux innovants, il est préférable de réaliser l'essai à long terme sur béton.

6.2 Qualification d'un matériau cimentaire

Un matériau peut contenir des granulats alcali-réactifs, mais être néanmoins formulé de telle sorte que le processus d'alcali-réaction soit négligeable, et n'entraîne pas de gonflement préjudiciable. Il est possible de valider un nouveau produit directement par un essai de stabilité dimensionnelle (*Tableau 2*). Les tests consistent à suivre dans le temps les variations dimensionnelles d'échantillons du matériau. Après démoulage, les échantillons sont conservés en milieu humide pour favoriser le phénomène, et généralement à une température supérieure à 20 °C pour accélérer le processus s'il doit se produire. L'essai à 38 °C (RILEM [6]) est celui qui sert de référence et doit être utilisé dans les cas où l'on a un doute quant aux mécanismes impliqués. Lorsque les mécanismes sont conventionnels, il est possible d'utiliser l'essai accéléré à 60 °C (NF P 18 454 [7]).

Dans les deux cas de figure, les variations dimensionnelles d'éprouvettes sont influencées par :

La nature des échantillons :

- taille des prismes à adapter selon l'essai ;
- composition (mortier ou béton).

Les conditions d'essais :

- selon l'essai, dopage ou correction de la teneur en alcalins ;
- conservation des corps d'épreuve dans des conditions spécifiques (température, humidité, pression) ;
- suivi de l'évolution dimensionnelle des échantillons ;
- durée de l'essai à adapter le cas échéant en fonction de la composition du matériau testé.

La grandeur d'intérêt est la variation dimensionnelle des corps d'épreuve.

7. Méthodes d'essais de référence

Tableau 1 : Essais de qualification des granulats

Nom	Traitement initial	Conservation	Durée essai	Seuil	Commentaire
NF P 18-594 [5] Essai accéléré à l'autoclave	24 h Hr 90 % 20 °C + 48 h immergé H ₂ O 20 °C	5 heures à 127 °C, Hr = 100 % P = 0,15 MPa	5 jours	Valeur moyenne de déformation	40 x 40 x 160 mm essai sur mortier normalisé essai crible de référence
NF P 18-594 [5] Essai Microbar	Cure à la vapeur : 4 h vapeur 100 °C	Cure alcaline : 6 h à 150 °C dans KOH à 10 %	1 jour	Valeur moyenne de déformation	10 x 10 x 40 mm essai sur mortier normalisé essai crible
NF P 18-594 [5] Essai sur béton		38 °C Hr 100 %	8 mois	Valeur moyenne de déformation	70 x 70 x 280 mm essai à long terme sur béton normalisé dopage en alcalins (ajout de NaOH pour obtenir 1,25 % Na ₂ O équivalent)

Tableau 2 : Essais sur béton

Nom	Traitement initial	Conservation	Durée essai	Seuil	Commentaire
NF P 18 454 [7] FD P 18 456 [8]	Dans les moules à 20 ± 2 °C pendant 24 ± 2 h Immersion pendant 30 ± 5 min dans de l'eau à 20 ± 2 °C.	60 ± 2 °C Dans des réacteurs avec atmosphère saturée d'humidité.	Entre 3 et 12 mois selon la nature des constituants et les résultats d'essai intermédiaires	Évolution des valeurs moyenne, et individuelle de la déformation selon la nature des constituants	70 x 70 x 280 mm Prise en compte de la variabilité de la teneur en alcalins dans les constituants
AAR-3 RILEM Method [6, 9, 10]		38 °C Hr = 100 %	12 mois	Mesure d'expansion	75 x 75 x 250 mm dopage en alcalins (5,5 kg de Na ₂ O _{eq} /m ³)

8. Évaluation de la performance

Mode d'évaluation :

- évaluation « absolue » : respect des seuils de l'essai NF P 18 454 [7] avec interprétation selon FD P 18 456 [8].

9. Références

- [1] FD P 18-464:2014, Béton - Dispositions pour prévenir les phénomènes d'alcali-réaction, 2014.
- [2] FD P 18-542:2015, Granulats - Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction, 2004.
- [3] N. Baghdadi, Modélisation du couplage chimico-mécanique d'un béton atteint d'une réaction sulfatique interne, ENPC, 2008, pp. 248.
- [4] P. Humbert, A. Dubouchet, G. Fezans, D. Remaud, CESAR-LCPC, un progiciel de calcul dédié au génie civil, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, (2005) 7-37.
- [5] NF P 18-594:2015, Granulats - Méthodes d'essai de réactivité aux alcalis, 2015.
- [6] B - TC 106-3, Detection of potential alkali-reactivity of aggregates - Method for aggregate combinations using concrete prisms, Materials and Structures, 33 (2000) 290-293.
- [7] NF P 18-454:2004, Béton - Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction - Essai de performance, 2004.
- [8] FD P 18-456:2004, Béton - Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction - Critères d'interprétation des résultats de l'essai de performance, 2004.
- [9] A - TC 106-2, Detection of potential alkali-reactivity of aggregates - The ultra-accelerated mortar-bar test, Materials and Structures, 33 (2000) 283-289.
- [10] Rilem TC 106-AAR: Alkali-aggregate reaction, Materials and Structures, 33 (2000) 283-283.

Fiche 9 : Attaques chimiques : solutions acides

1. Introduction

Cette fiche concerne les bétons exposés à des eaux ou des sols saturés d'eau qui contiennent des espèces chimiques qui réagissent avec le béton, et entraînent la dissolution partielle ou totale des constituants. Il peut s'agir de solutions faiblement minéralisées, ou bien acides (acides minéraux, acides organiques), ou encore comprenant des espèces qui vont entraîner des réactions de dissolution des constituants du béton (nitrate d'ammonium, par exemple). La définition des environnements agressifs considérée est celle du fascicule FD P 18-011:2016 [1] qui complète la norme NF EN 206/CN [2].

Dans le cas des eaux riches en sulfates, il convient de consulter la fiche RSE.

Cette fiche ne traite pas des environnements acides dus à la présence de gaz en milieu humide tel que l'H₂S, ni des attaques d'origine bactérienne associées.

2. Conséquences

- Perte de matière.
- Déchaussement des granulats.
- En cas de présence d'armatures, réduction des épaisseurs d'enrobage, perte d'adhérence entre le béton et les armatures, puis perte de capacité portante dans les cas de dégradations avancées.

3. Mécanismes physico-chimiques

Les bétons à base de ciment Portland sont des milieux basiques par excellence (pH de 13,5 environ pour un béton traditionnel à base de CEM I). S'ils se trouvent en contact avec un milieu plus acide, des échanges ioniques se produisent par diffusion, au niveau des surfaces exposées.

Au sein des bétons, des variations de la solution interstitielle entraînent une déstabilisation des hydrates de la pâte et/ou des autres phases des constituants du béton (granulats, additions, fibres). Ce sont les constituants les moins stables, c'est-à-dire les plus solubles, qui se dissolvent prioritairement. Pour les bétons traditionnels, parmi les hydrates, c'est la portlandite (Ca(OH)₂) qui se dissout en premier, puis les C-S-H décalcifient ; les granulats calcaires sont également susceptibles d'être dissous en fonction de l'agressivité des acides.

Selon la nature des espèces apportées par le milieu extérieur et celles présentes dans le béton, des réactions peuvent se produire suite à ces réactions de dissolution :

- neutralisation de l'acide avec les espèces issues des réactions de dissolution ;
- précipitation de phases dites « secondaires », qui peuvent ralentir la vitesse de lixiviation (formation d'une couche protectrice, constituée de calcite par exemple), ou l'accélérer (cas de phases expansives).

À l'échelle de la microstructure, ces types d'attaques font apparaître des zones de composition et propriétés mécaniques différentes, généralement dégradées, et délimitées par des fronts de dissolution/précipitation. Dans les zones où les réactions de dissolution sont prépondérantes (zones les plus superficielles, zones comprenant les constituants les plus vulnérables), on constate une perte de matière totale ou partielle. Ces zones apparaissent d'abord en surface puis se propagent vers le cœur du matériau.

L'épaisseur de béton dégradée dépend :

- de la facilité pour la solution à pénétrer dans le béton considéré (propriétés de transfert du matériau) ;
- de l'endommagement du matériau en cas de précipitation de phases expansives ;

- de la capacité du matériau à réagir avec les espèces agressives pour limiter les réactions de dissolution (neutralisation des acides, précipitation de phases secondaires peu solubles qui peut entraîner une réduction de la diffusivité du matériau) ;
- de la capacité du milieu extérieur à maintenir un certain degré d'agressivité (par exemple, des solutions qui circulent sont plus agressives que des eaux stagnantes ou bien un sol en place).

Lorsque des bétons traditionnels sont en contact avec des eaux très faiblement minéralisées, on considère généralement qu'il convient d'adopter un niveau de prévention similaire à celui requis pour se prémunir contre les attaques par les solutions acides.

Le fascicule FD P 18-011:2016 [1] décrit les réactions associées à chaque espèce, en particulier les sections « 5.1.2 Solutions acides » et « 5.1.4 Solutions salines ». Les approches varient selon les pays (cf BRE-SD1:2005 [3]).

4. Principaux modèles

Il n'existe pas de modèle normalisé. Néanmoins, des travaux de recherche ont porté sur ces sujets et des modèles sont disponibles dans la littérature :

- les modèles spécifiques aux bétons : Adenot [4], Carde [5], de Larrard [6] ;
- les modèles hydrogéochimiques généraux tels que HYTEC [7, 8] ou TOUGHREACT [9].

5. Paramètres influents

Paramètres « matériau » :

- présence de constituants du béton de sensibilité variable vis-à-vis de la solution agressive ; ceci peut amener une avancée hétérogène du front de dégradation selon par exemple que le liant se solubilise plus rapidement que les granulats ou réciproquement ;
- propriétés de transfert du matériau ;
- réserve de matière soluble ;
- capacité à former des minéraux secondaires dans l'environnement considéré.

Paramètres « environnement » :

- solution en contact avec le béton :
 - nature des espèces présentes : se reporter au fascicule FD P 18-011 [1] pour la classification de l'agressivité des milieux et les recommandations de compositions de bétons et d'éventuelles protections additionnelles,
 - concentration de ces espèces jugées agressives : plus la concentration est élevée, plus grande sera l'épaisseur de béton dégradée,
 - fréquence de renouvellement de la solution agressive : conditionne le maintien dans le temps du niveau d'agressivité de la solution, en évitant l'épuisement des espèces agressives et en évitant une accumulation des espèces lixiviées ; plus la fréquence est élevée, plus l'épaisseur de béton dégradée est importante ;
- température : son augmentation accélère la diffusion des espèces dissoutes.

6. Étapes des méthodes d'essais

Les essais consistent généralement à immerger un échantillon du béton considéré dans un réacteur rempli d'une solution proche des conditions d'exposition envisagées. Les étapes importantes sont :

- durée et conditions de cure des échantillons ;
- atmosphère gazeuse inerte régnant dans le réacteur (par exemple, courant d'azote injecté dans la solution préalablement purifiée à l'eau de chaux puis à l'eau déminéralisée pour limiter la calcification du béton au cours de l'essai) ;

- rapport de la surface de béton exposé sur le volume de la solution ;
- nature et conditions de renouvellement de la solution d'essai visant à maintenir des conditions de lixiviation accélérée (réacteur fermé dont la solution est renouvelée complètement à des échéances précises, ou bien réacteur ouvert) ;
- température (une augmentation de la température accélère le processus) ;
- système d'agitation de la solution (les agitateurs magnétiques sans moteur sont à privilégier pour éviter les gradients thermiques) ;
- durée de l'essai.

Les grandeurs d'intérêt mesurées peuvent être :

- profondeur de dégradation après une certaine durée d'exposition ;
- quantité d'acide consommé à pH constant ;
- quantité de matière dissoute (par exemple : quantité totale de calcium lixivié, perte de masse, etc.) ;
- homogénéité de la dégradation (en complément des autres grandeurs), par exemple par des observations au microscope.

7. Méthodes d'essais de référence

Il n'existe pas d'essai normalisé en 2015. Le *Tableau 1* mentionne un projet d'essai.

Des essais de lixiviation sur déchets stabilisés [10, 11] peuvent être adaptés en modifiant la nature de la solution.

Il est possible d'utiliser l'essai de lixiviation à pH constant tel que décrit dans le *Tableau 1*.

Tableau 1 : Projet d'essai

Nom	Cure	Solution	Grandeur	Durée	Commentaire
Essai de lixiviation à pH constant [12, 13]	Dans de l'eau saturée en chaux jusqu'à au moins 28 jours et à 20 ± 2 C.	Acide nitrique à 0,25 mol/l (solution renouvelée au minimum tous les 30 ml d'acide ajouté). Le rapport surface de béton exposé/ solution est fixé par la méthode d'essai.	Épaisseur dégradée mesurée en fin d'essai. Quantité d'acide ajoutée. Quantité de calcium lixivié	2 ou 4 mois selon la nature des granulats utilisés	Projet d'essai d'évaluation de résistance des matériaux cimentaires aux eaux pures et aux acides. Précautions à prendre lors de l'évaluation de bétons avec granulats calcaires.

8. Évaluation de la performance

Mode d'évaluation :

- évaluation **comparative** : la grandeur d'intérêt est mesurée sur le béton candidat puis est comparée avec les valeurs obtenues sur un béton de référence normalisé suivant la même méthode d'essai ;
- évaluation « **absolue** » : il n'existe pas à ce jour de valeur seuil pour la méthode d'essai citée ci-dessus.

9. Références

- [1] FD P 18-011:2016, Béton - Définition et classification des environnements chimiquement agressifs - Recommandations pour la formulation des bétons, 2009.
- [2] NF EN 206/CN:2014, Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206, 2014.
- [3] BRE SD1:2005, Concrete in aggressive ground, 2005.
- [4] F. Adenot, M. Buil, Modelling of the corrosion of the cement paste by deionized water, *Cement and Concrete Research*, 22 (1992) 489-496.
- [5] C. Carde, R. Francois, J.M. Torrenti, Leaching of both calcium hydroxide and C-S-H from cement paste: Modeling the mechanical behavior, *Cement and Concrete Research*, 26 (1996) 1257-1268.
- [6] T. de Larrard, F. Benboudjema, J.B. Colliat, J.M. Torrenti, F. Deleruyelle, Concrete calcium leaching at variable temperature: Experimental data and numerical model inverse identification, *Computational Materials Science*, 49 (2010) 35-45.
- [7] J. van der Lee, L. DeWindt, V. Lagneau, Application of reactive transport models in cement-based porous media, in: *Proceedings of the International RILEM Symposium, Delft, The Netherlands, 2008*, pp. 463-470.
- [8] V. Lagneau, J. van der Lee, Operator-splitting-based reactive transport models in strong feedback of porosity change: The contribution of analytical solutions for accuracy validation and estimator improvement, *Journal of contaminant hydrology*, 112 (2010) 118-129.
- [9] T.F. Xu, N. Spycher, E. Sonnenthal, G.X. Zhang, L.E. Zheng, K. Pruess, TOUGHREACT Version 2.0: A simulator for subsurface reactive transport under non-isothermal multiphase flow conditions, *Computers & Geosciences*, 37 (2011) 763-774.
- [10] ASTM C1308 - 08, Standard Test Method for Accelerated Leach Test for Diffusive Releases from Solidified Waste and a Computer Program to Model Diffusive, Fractional Leaching from Cylindrical Waste Forms, 2008.
- [11] ASTM C1220 - 10, Standard Test Method for Static Leaching of Monolithic Waste Forms for Disposal of Radioactive Waste, 2010.
- [12] F. Jacquemot, Leaching performance test assessing durability of concrete exposed to chemical attack., in: M.G. Alexander, A. Bertron (Eds.), *RILEM Publications SARL, 2009*, pp. 372 - 379.
- [13] Méthodologie d'application du concept de performance équivalente des bétons, FNTP - FFB - CERIB - FIB, 2009, pp. 28.

Méthodologie - Évaluation

Méthodologie d'évaluation de la durabilité des matériaux cimentaires hors normes pour le bâtiment

Cet ouvrage concerne les nouveaux matériaux cimentaires : bétons, produits en béton, constituants, etc. Il apporte un éclairage spécifique sur l'évaluation de la durabilité.

Initié en 2014 par le groupe Lafarge (aujourd'hui LafargeHolcim), un travail de réflexion a été réalisé entre le CSTB, pour la compétence « Évaluation », et Lafarge, pour la compétence « Innovation technologique », avec le concours du CERIB et du CEREMA, notamment pour l'expertise sur l'évaluation de la durabilité des matériaux visés ainsi que pour les références aux travaux normatifs.

Ce document se propose de guider le demandeur et l'évaluateur dans la démarche d'évaluation de la durabilité des nouveaux matériaux cimentaires. Les différents cas possibles sont évoqués selon que ces produits rentrent dans un cadre normatif ou pas. Particulièrement destiné aux industriels et aux organismes d'évaluation, il vise à fournir des éléments techniques qui permettront :

- d'aider à l'identification des risques auxquels ces produits pourraient être exposés ;
- d'aider à définir les conséquences de ces risques sur les propriétés futures des matériaux ;
- d'aider à sélectionner ou élaborer les méthodes d'évaluation pour évaluer les conséquences de ces risques spécifiques à chaque nouveau produit.

Alors que les processus d'évaluation peuvent être perçus comme complexes, cet ouvrage, à vocation pédagogique, propose une vision claire des possibilités existantes.

Au travers de cette publication, les auteurs souhaitent contribuer à une accélération du déploiement de l'innovation pour le développement durable, dans le secteur du bâtiment, et ce au bénéfice de l'industrie dans son ensemble et des usagers des constructions.

SIÈGE SOCIAL

84, AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2
TÉL. (33) 01 64 68 82 82 | FAX (33)01 60 05 70 37 | www.cstb.fr

CSTB
le futur en construction