DIAGNOSTIC DE L'ÉTAT DU BÉTON ATTAQUÉ PAR DES EAUX ACIDES

CONTEXTE

1) Les différents types de réaction

Les agents chimiquement agressifs pour le béton peuvent être rencontrés dans quatre types d'environnement :

– les gaz, les liquides, les solides, les milieux biologiques.

C'est toujours l'association de ces agents avec de l'eau (en phase liquide ou vapeur) qui constitue la solution agressive pour le béton.

Les solutions agressives rencontrées le plus fréquemment sont les eaux sulfatées (encore appelées eaux séléniteuses), les eaux de mer, les eaux pures et les eaux acides.

Les solides les plus agressifs sont les sols gypseux (en présence d'eau).

D'un point de vue chimique, les trois types de réactions les plus courantes sont :

a) Les réactions entraînant la dissolution des composés de la pâte de ciment.

Le béton est un solide poreux qui a un caractère basique très accentué dû à la nature de la pâte de ciment qui renferme entre autres une base forte (la portlandite $Ca(OH)_2$ avec un pH proche de 12,5) et une base faible (les silicates de calcium hydratés notés C-S-H avec un pH proche de 10). Par conséquent pour ce type de réaction dans le béton, il s'agit de la dissolution d'une base forte ou d'une base faible. Pour une base forte, cette dissolution est complète, elle est partielle pour une base faible.

La dissolution conduit à une lixiviation plus ou moins prononcée de la chaux des composés de la pâte de ciment durcie provoquant ainsi l'accroissement de la porosité et une destruction progressive du liant (la chaux est le composant qui est attaqué le plus facilement). Cette dissolution entraîne aussi une diminution du pH pouvant conduire à une dépassivation des aciers.

b) Les réactions d'échange entre le fluide agressif et les constituants de la pâte de ciment durcie.

Deux types de réaction d'échanges sont là aussi considérés :

– les déplacements des ions calcium Ca^{2+} en produits insolubles non expansifs (par exemple, l'action des ions carbonate se traduit par la formation de $CaCO_3$) ;
– la substitution des ions calcium Ca^{2+} dans les composés silicates hydratés C-S-H ou dans la portlandite (par exemple, l'action de l'eau de mer contenant des ions Mg^{2+} se traduit par la formation de MgOH et de M-S-H).

Les principales conséquences peuvent être :

– une diminution de l'alcalinité ;
– un accroissement de la porosité ;
– une perte des propriétés liantes de la pâte de ciment ;
– la baisse, voire la chute des résistances mécaniques.

c) les réactions entraînant la cristallisation de produits expansifs

Lorsque la concentration d'une solution dépasse la limite de saturation pour une espèce donnée, des cristaux se forment. Suivant les conditions de sursaturation, la formation de cristaux peut engendrer des pressions suffisantes pour provoquer la fissuration d'un matériau (par exemple, l'action des sulfates sur certaines pâtes de ciment peut générer la formation de cristaux d'ettringite ayant des propriétés expansives).

Différents modèles existent pour évaluer les valeurs de pression de cristallisation. La relation de Winkler permet notamment de calculer la pression de cristallisation p d'un sel à partir d'une solution de concentration C, sachant que la saturation est atteinte à une concentration Cs. :

$$p = \frac{RT}{Vs} \cdot \log\frac{C}{Cs}$$

avec R : constante des gaz parfaits
T : température en Kelvin
Vs : volume molaire du sel

2) Mécanismes et modélisation dans les environnements à tendance acide

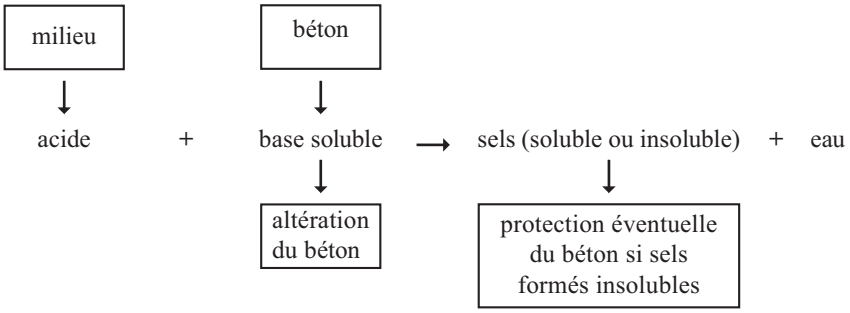
2.1) Mécanisme de dégradations par les eaux pures et acides

Les composés hydratés de la pâte de ciment forment un milieu basique prononcé (pH initial de la solution interstitielle du béton de l'ordre de 13 à 14). De ce fait, la plupart des milieux fluides présente un caractère « acide » vis-à-vis du béton.

Les milieux « acides » susceptibles d'être agressifs pour le béton sont donc :

– les eaux pures ;
– les eaux douces : pH : 5,5 à 6,5 ;
– les eaux chargées en CO_2 agressif ;
– les pluies acides : pH 4 (voire moins) à 5 ;
– les acides minéraux et organiques.

Le mécanisme de dégradation peut être décrit de la manière suivante :



L'agressivité d'une eau est fonction de trois paramètres :

– le pH ;
– la dureté : somme des concentrations des cations métalliques, à l'exception de ceux de l'hydrogène et des métaux alcalins ;
– la teneur en dioxyde de carbone « agressif ».

Les eaux pures sont des eaux très faiblement minéralisées issues le plus souvent des massifs granitiques ou de la fonte des neiges pour lesquelles le titre alcalimétrique complet (TAC) est inférieur à 1 méq./l. La norme NF EN 206/CN établit trois classes d'agressivité chimique (XA1, XA2 et XA3) en fonction de la valeur du TAC de l'eau.

Le titre alcalimétrique complet (TAC) est la grandeur utilisée pour mesurer le taux d'hydroxydes, de carbonates et de bicarbonates présents dans une eau (elle s'exprime en milliéquivalent par litre (méq/l), en milliéquivalent par gramme (méq/g) ou en degré français).

Les solutions acides sont caractérisées par un pH inférieur à 7. L'agressivité des acides minéraux et organiques dépend de la solubilité des sels formés. Les acides minéraux (HCl, HNO_3 et H_2SO_4) sont des acides forts ayant un effet dissolvant sur le ciment et les granulats calcaires. L'acide sulfurique (H_2SO_4) est doublement agressif par son acidité et par la formation de sulfate qui donne naissance à de l'ettringite ayant des propriétés expansives. La norme NF EN 206/CN établit également trois classes d'agressivité chimique en fonction de la valeur du pH.

Le CO_2 agressif représente le surplus de dioxyde de carbone libre par rapport au dioxyde de carbone équilibrant. Ce dernier correspond à la quantité de dioxyde de carbone libre nécessaire pour maintenir les bicarbonates en solution. La présence de CO_2 agressif se traduit principalement par une dissolution de la portlandite contenue dans la pâte de ciment. Là aussi, la norme NF EN 206/CN définit trois classes d'agressivité chimique en fonction de la teneur en CO_2 agressif de l'eau.

Le mécanisme de dégradation est identique pour les eaux pures, douces ou acides. Il est plus intense pour les eaux acides. La base soluble principalement attaquée est la chaux (la portlandite). Les silicates et les aluminates de calcium, moins solubles, sont attaqués plus tardivement.

2.2) Influence des caractéristiques du béton

Les principaux paramètres pouvant influer sur l'importance des attaques d'un béton par les eaux à tendance acide sont :

– la porosité (rapport E/C, dosage en ciment) ;
– la nature du ciment et la teneur en chaux (un béton est d'autant plus sensible que sa teneur en chaux est importante) ;
– si présence d'additions minérales : leur nature et dosage ;
– la cure du béton.

Les ciments contenant une forte proportion de constituants (laitier de haut fourneau, cendres volantes, pouzzolane, fumées de silice) qui réagissent avec la portlandite, permettent de fabriquer des bétons adaptés pour résister aux eaux agressives. Il s'agit en particulier des ciments de type CEM III, CEM IV, CEM V et CSS. Une bonne résistance aux solutions fortement acides peut être obtenue en utilisant du ciment d'aluminates de calcium principalement constitué de monoaluminates de calcium (CAC). Le fascicule de documentation NF FD P18 011 donne des recommandations dans le choix du ciment en fonction de la nature et du degré d'agressivité du milieu environnant.

2.3) Influence des paramètres extérieurs

Il s'agit essentiellement de caractériser l'environnement vis-à-vis de l'existence et de la nature des milieux fluides :

– ruissellements d'eau, contact avec de l'eau, immersion, etc.
– environnement industriel, pollution, pluies acides, etc.
– nature des sols : présence d'acides humiques, etc.
– eaux usées : acides minéraux et organiques.

D'autres facteurs peuvent influer sur l'importance des attaques par les eaux à tendance acide. Il s'agit souvent de facteurs entraînant des désordres dans le matériau béton et diminuant ainsi sa résistance et son aptitude à s'opposer à l'intrusion d'agents agressifs :

– fissuration au jeune âge ;
– fissuration de fonctionnement ;
– expansion due à des gels aboutissant à de la fissuration (alcali-réaction, etc.) ;
– faïençage, fissuration, écaillage, épaufrure, etc.

À partir des éléments énoncés ci-avant, nous pouvons proposer une représentation du béton et de son environnement vis-à-vis du mécanisme de dégradations par les eaux acides.

ENVIRONNEMENT

– ruissellements d'eau, contact avec de l'eau, immersion, etc.
– environnement industriel, pollution, pluies acides, etc.
– nature des sols : présence d'acides humiques, etc.
– eaux usées : acides minéraux et organiques
– pH, dureté, teneur en CO_2 agressif des eaux

OBSERVATIONS VISUELLES DU PAREMENT

– érosion, effritements, dissolution, lixivation, efflorescences, traces de calcite, stalactites,etc.

BÉTON



– Porosité, E/C, dosage en ciment
– Ciment : teneur en portlandite
– Cure du béton

Peu de modèles ont été réalisés pour ce type d'agression. Néanmoins, on peut citer le code DIFFUZON développé par le CEA [1, 2] ainsi que le modèle développé par le CERIB [3].

Ces modèles reposent sur les hypothèses d'un transport par diffusion et d'équilibres chimiques. Le matériau dégradé se traduit par des fronts de dissolution et de précipitation des phases minérales. Un système d'équations composé de la combinaison des équations de diffusion, d'équilibres chimiques et de bilan de matière est alors résolu numériquement.

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC

Avertissement : Cette méthodologie doit faire appel à un ingénieur spécialisé en chimie des bétons.

ÉTAPE 1 ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE	On identifiera dans le dossier de l'ouvrage tous les éléments utiles au diagnostic : – formulation du béton (nature et dosage du ciment, rapport E/C, nature des granulats, nature et dosage des additions, etc.) ; – essais de durabilité sur le béton ; – conditions de mise en œuvre du béton et notamment durée de la cure ; – conditions d'exposition climatique ou environnementale et analyses des risques (environnement industriel, sols et eaux pollués, présence de bactéries, etc.) ; – analyses des eaux en contact avec le béton (nappe, cours d'eau, effluents, etc.) ; – analyse des matériaux en contact avec le béton ; – nature, diamètre et position des aciers ; – etc.
ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE	Cette inspection détaillée a pour objectif de repérer les désordres susceptibles d'indiquer une attaque du béton par les eaux extérieures agressives comme : – du faïençage ou de la fissuration ; – des éclatements de béton ; – des érosions ou effritements de la peau du béton ; – une dissolution ou lixiviation du béton ; – une désagrégation de la surface du béton ; – des expansions ou déformations ; – des parements tachetés ; – des efflorescences, traces de calcite, stalactites ; – etc. Ces désordres correspondent généralement à une attaque du béton qui se produit de l'extérieur vers l'intérieur de l'élément en béton, et peuvent avoir pour origine l'action des eaux agressives du milieu ambiant. Pour pouvoir repérer les désordres dans les parties enterrées ou immergées, il est respectivement nécessaire de faire procéder à des fouilles et à des inspections subaquatiques. Le chargé d'étude responsable de la conclusion de l'inspection détaillée doit être en mesure d'analyser les risques sur la base des désordres précédemment évoqués : – si la partie d'ouvrage dégradée a une importance faible vis-à-vis de la stabilité générale de l'ouvrage, on peut se contenter de faire un suivi et l'on observera l'évolution des désordres lors d'une prochaine visite. Si lors de cette prochaine visite, on constate une évolution significative des désordres, il faudra proposer d'engager une auscultation ;

ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE	– si, au contraire, la partie d'ouvrage dégradée a une importance forte vis-à-vis de la stabilité générale de l'ouvrage, alors il faut déterminer si les désordres sont bien dus à une agression par des eaux acides et l'on procède à une auscultation.
ÉTAPE 3 AUSCULTATION	Avant de procéder à l'auscultation, le chargé d'études en ouvrages d'art assisté par un expert en agression chimique des bétons établit le programme d'auscultation en prenant en compte les conclusions de l'inspection détaillée et les éléments utiles du dossier d'ouvrage. Ce programme peut être mené en suivant les trois sous-étapes suivantes : – une visite complémentaire par l'expert en agression chimique ; – un diagnostic de l'attaque acide du béton ; – un pronostic de l'évolution des désordres. Ce programme est à valider par le maître d'ouvrage en terme d'accès, de conditions d'intervention et de coûts. Le programme est notamment conçu pour optimiser les prélèvements. **3.1 Visite complémentaire par un expert en agression chimique** Cette sous-étape commence par une visite complémentaire d'un expert en agression chimique des bétons afin d'examiner les conditions extérieures telles que : – présence d'eaux présumées acides ; – environnement industriel, pollution, pluies acides, etc. ; – nature des sols : présence d'acides humiques, etc. ; – eaux usées : acides minéraux et organiques. L'objectif de cette visite d'expert est de confirmer la présence d'un environnement de type « à tendance acide » ; cela se fait en prélevant des échantillons d'eaux, de sols et en les analysant. À l'issue de cette sous-étape : – si l'environnement n'est pas à tendance acide, alors il faut chercher d'autres causes (voir notamment la procédure D1-6) ; – si la présence de milieux acides est confirmée, alors il convient de passer à la sous-étape 3.2. **3.2 Diagnostic de l'attaque acide** Cette sous-étape consiste à prélever des carottes de béton, puis à effectuer une analyse minéralogique du béton (analyse chimique élémentaire, microscope électronique à balayage, etc.) et des essais de résistance sur ces carottes pour évaluer l'ampleur de l'attaque. Il est aussi intéressant d'effectuer un profil d'attaque du béton lorsque l'on a identifié la nature de l'agent agressif, et de mesurer également les profondeurs de carbonatation. À noter que ces deux sous-étapes peuvent être menées en même temps, surtout si les prélèvements sont onéreux (conditions d'accès à l'ouvrage difficiles). À l'issue de cette sous-étape, il est possible d'établir un diagnostic de l'attaque par l'environnement acide qui inclut une détermination de la ou des causes probables de l'attaque, une détermination des zones dégradées et de l'ampleur des dégradations, la fourniture d'éléments pour pouvoir évaluer la criticité vis à vis de la stabilité de l'ouvrage. **3.3 Pronostic de l'évolution des désordres** Cette sous-étape vise à formuler un pronostic afin de pouvoir décider des actions à mener sur l'ouvrage. Le pronostic peut porter sur l'évolution prévisible des désordres, leurs conséquences sur la structure et les possibilités de réparation ou de protection. L'évolution prévisible des désordres peut être appréhendée par : – l'état d'avancement des dégradations en réalisant des profils (attaques des hydrates) ; – l'estimation du dosage en éléments agressifs dans le béton en fonction de la profondeur ; – l'agressivité du milieu extérieur et les possibilités d'actions sur ce milieu ; – un essai de lixiviation à pH constant ; – les modèles de lixiviation évoqués précédemment. Concernant l'essai de lixiviation, deux protocoles d'essai sont actuellement testés [4, 5] dans le cadre du projet national PERFDUB : – le premier essai dit « Essai de lixiviation à pH constant » (voir mode opératoire PERFDUB version V1) consiste à immerger des corps d'épreuve en béton dans une solution d'eau déminéralisée et d'acide nitrique et à mesurer leur dégradation en fin d'essai. Les ions calcium et hydroxyde, provenant des hydrates de la matrice cimentaire et des granulats, sont lixiviés, ce qui entraîne une augmentation de la valeur du pH de la solution. La valeur du pH est maintenue constante par des ajouts répétés d'acide nitrique de concentration 0,25 mol/l. L'épaisseur dégradée est mesurée à partir de la quantité de calcium lixiviée.

ÉTAPE 3 AUSCULTATION	– le second essai dit « Essai de lixiviation dynamique » (voir mode opératoire Leachcrete), consiste à suivre le comportement d'un béton lorsqu'il est placé dans un environnement chimiquement agressif composé d'eau pure et/ou d'acides minéraux. Le montage permet de maintenir des conditions de température, d'acidité et de pureté du réacteur dans lequel est plongé l'échantillon de béton. Le suivi du relargage d'ions par le béton se fait via des prélèvements réguliers dans le ballon d'ébullition. Celui-ci va concentrer les ions dissous et assurer le renouvellement de l'eau pure du réacteur. Selon la prévision de cette évolution, le risque d'évolution rapide ou non, l'ampleur des désordres et le caractère vital ou non des éléments atteints, on procède à des réparations, à des protections, à une limitation des venues d'eaux, à une surveillance renforcée ou à une surveillance classique, ou à des combinaisons de ces diverses interventions, comme indiqué sur le logigramme ci-après. On peut également être amené à traiter d'autres pathologies comme des aciers corrodés, ou à surveiller la structure jusqu'au remplacement des éléments atteints si cette solution s'avère plus économique.

RÉFÉRENTIEL

[1] Adenot F. Durabilité du béton : caractérisation et modélisation des processus physiques et chimiques de dégradation du ciment, Thèse de doctorat de l'université d'Orléans, 17 décembre 1992.

[2] Richet C., Gallé C., Le Bescop P., Peyceton H., Bejaoui I., Tovena I., Pointeau I. L'Hostis V., Lovera P. Synthèse des connaissances sur le comportement à long terme des bétons. Applications aux colis cimentés. Rapport technique CEA, CEA-R-6050, 2004, 47p.

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

[4] Jacquemot, F. Leaching performance test assessing durability of concrete exposed to chemical attack. In: Alexander, M.G., Bertron, A. (eds.) Proceedings of the RILEM TC 211-PAE Conference Concrete in Aggressive Aqueous Environments: Performance, Testing and Modeling, pp. 372–379. RILEM Publications SARL, Toulouse (2009).

[5] Moudilou E. Cinétique et mécanismes de relargage des métaux lourds présents en traces dans les matrices cimentaires. Thèse de doctorat, Géologie appliquée. Université d'Orléans, Dec. 2002.

Liste des méthodes d'auscultation

A1-1 : Carottage de béton

A1-2 : Analyse minéralogique du béton

B1-2 : Auscultation sonique des bétons

B2-2 : Mesure de la profondeur de carbonatation

LOGIGRAMME

Un logigramme ou un schéma décisionnel, visualisant de façon séquentielle et logique les actions à mener et les décisions à prendre pour aboutir au diagnostic résume la méthodologie de diagnostic.

D1-5 : DIAGNOSTIC DE L'ÉTAT DU BÉTON ATTAQUÉ PAR DES EAUX ACIDES

