DIAGNOSTIC DE L'ÉTAT DU BÉTON SOUMIS À UNE RÉACTION SULFATIQUE EXTERNE

CONTEXTE

1) Les différents types de réaction

Les agents chimiquement agressifs peuvent être classés en quatre catégories :

– 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 s'agresse le plus facilement).

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

Nous allons à présent examiner le diagnostic et le pronostic d'évolution du béton soumis aux attaques sulfatiques externes.

2) Mécanismes et modélisation de la réaction sulfatique externe

2.1) Mécanisme de dégradations par réaction sulfatique externe

La réaction sulfatique est due à l'action des sulfates du milieu extérieur sur les aluminates contenus dans la pâte de ciment ou dans les granulats. Ces sulfates proviennent des milieux suivants :

– eau de mer ;
– eaux séléniteuses ;
– sols gypseux ;
– remblais contenant des sulfates (comme certains remblais constitués de schiste houiller) ;
– eaux usées conduisant à des attaques par de l'acide sulfurique biogénique ;
– sels de déverglaçage contenant des sulfates ;
– etc.

Cette action se concrétise par la formation d'ettringite qui, en raison de son caractère expansif, peut altérer les caractéristiques mécaniques du béton [1-4].

Dans certains cas d'attaques sulfatiques (dans le cas d'une exposition à une solution à faible pH), il peut se former localement de l'acide sulfurique qui attaque la chaux contenue dans le béton pour former du gypse qui a son tour réagit avec les aluminates de la pâte de ciment pour former de l'ettringite, comme le montre l'exemple suivant :

Exemple de l'action d'acide sulfurique :

– dissolution de la portlandite

$$H_2SO_4 + Ca(OH)_2 \longrightarrow (CaSO_4, 2H_2O)$$

Acide sulfurique Porlandite Gypse en solution aqueuse

- réaction du gypse avec les aluminates de la pâte de ciment

$$3\,(CaSO_4, 2H_2O) + (3CaO, A1_2O_3, 6H_2O) + (20\,H_2O) \longrightarrow 3CaO, A1_2O_3, 3CASO_4, 32\,H_2O \text{ ettringite}$$

Deux modèles de mécanismes du gonflement ettringitique coexistent :

– une expansion globale du gel d'ettringite par absorption d'eau, provoquant des pressions osmotiques ;
– une expansion provoquée par la croissance en extrémité des aiguilles d'ettringite et liée à des pressions de cristallisation.

À noter que l'oxydation des pyrites (sulfures de fer) contenus dans certains granulats ou la présence de granulats contenant des pyrrothites ou le gâchage de bétons avec de l'eau de mer (opération interdite !) peut amener à une source de sulfates internes au béton qui donneront lieu à des réactions sulfatiques internes avec formation d'ettringite gonflante.

Dans certains cas rares, la présence de gypse en quantité importante dans les granulats, ou une pollution de granulats par du plâtre peut provoquer la formation d'ettringite et/ou de thaumasite sous certaines conditions qui présentent des propriétés expansives et aboutit rapidement à un gonflement et/ou un pourrissement du béton.

Ces réactions sont des réactions internes et ne sont donc pas l'objet de la présente procédure.

2.2) Mécanismes physico-chimiques de la réaction sulfatique externe

La série de réactions chimiques se produisant entre les sulfates et les produits d'hydratation du ciment peut être liée aux endommagements causés par l'attaque sulfatique externe [5]. La formation de produits gonflants et les contraintes internes provoquées par la cristallisation de ces produits sont deux facteurs importants causant de graves conséquences sur le béton pendant cette attaque.

Une fois que les ions diffusent à travers les pores du béton, une série de réactions chimiques entre les ions sulfates entrants et le ciment hydraté (phases contenant de l'aluminium et/ou de l'hydroxyde de calcium) se produit dans la matrice cimentaire et provoque une expansion attribuée à la formation de produits expansifs tels que l'ettringite et/ou du gypse. Ces produits entraînent une augmentation globale du volume solide de la pâte de ciment. Au fil du temps, l'attaque devient plus agressive car l'existence de produits de réaction à l'intérieur du matériau peut entraîner des fissures. Par conséquent, la perméabilité de la structure augmente et les ions sulfates peuvent pénétrer à une vitesse et à un volume plus élevés après une fissuration significative. Enfin, on observe une perte des propriétés mécaniques suite à la décalcification des C-S-H, ainsi qu'une perte progressive de masse.

Lorsque les sulfates pénètrent à travers une structure en béton, il existe un risque de dissolution de la portlandite (CH) suivi de la décalcification de C-S-H qui permettent d'avoir un excès de calcium dans la solution interstitielle. Ce calcium, en réagissant avec les sulfates, conduit à la formation du gypse qui à son tour réagit avec des sources d'aluminate pour produire de l'ettringite [6] (figure 1).

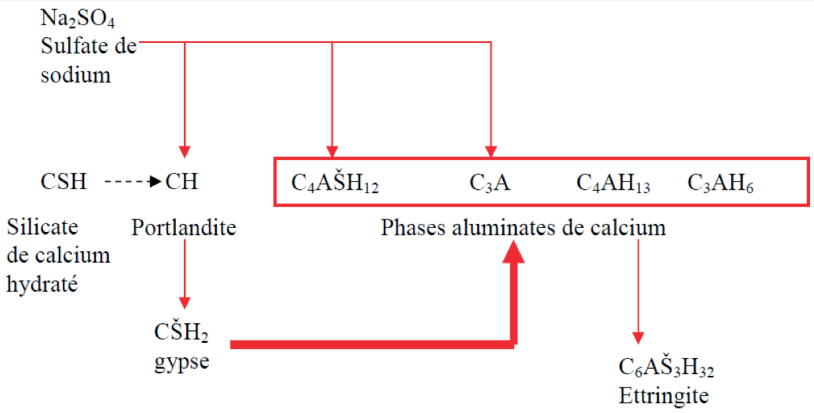


Figure 1 : Mécanismes chimiques de l'attaque sulfatique externe [6]

2.3) Influence des caractéristiques du béton

Les paramètres pouvant influer sur l'apparition de réactions sulfatiques externes dans un béton sont :

– la porosité (rapport E/C) ;
– la nature du ciment (il existe des ciments dénommés SR (résistant aux sulfates) conformes à la norme NF EN 197-1, et des ciments dénommés ES conformes à la norme NF P 15-319 qui résistent aux eaux sulfatées) ;
– la teneur en chaux et en C3A ($3CAO_,.Al_2O_3$)
– la teneur en aluminates (ils proviennent du C3A et du C4AF du ciment) ;
– la nature et le dosage des additions minérales éventuellement présentes ;
– la cure du béton ;
– les interactions matériau cimentaire/microorganismes dans le cas des milieux biologiques.

2.4) Influence des paramètres extérieurs

Il s'agit essentiellement d'évaluer la présence de sulfates dans l'environnement de l'ouvrage. C'est notamment le cas des environnements suivants :

– sols riches en sulfates, en gypse, en engrais, etc. ;
– environnement industriel ;
– pollution par des eaux usées, attaque sulfo-bactérienne ;
– eau de mer ;
– sels de déverglaçage contenant des sulfates.

D'autres facteurs peuvent influencer l'apparition de réaction sulfatique. 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 présentation du béton et de son environnement vis à vis du mécanisme de dégradations par réaction sulfatique.

ENVIRONNEMENT

– sols riches en sulfates, en gypse, engrais, etc.
– environnement industriel,
– pollution par eaux usées, attaque sulfo-bactérienne,
– eau de mer.

BÉTON



– Ciment : teneur en chaux et en C_3A
  – Granulats, source de sulfate
  – Eau de gâchage
– Température du béton pendant son durcissement
– Cure du béton
– Porosité, E/c, dosage en ciment

OBSERVATIONS VISUELLES DU PAREMENT

fissuration, gonflement, expansion, parement tacheté, etc.

2.5) Modélisation du comportement du matériau

Il existe relativement peu de modèles pour représenter l'attaque des sulfates sur un béton. Marchand et Samson [7, 8] ont développé un modèle numérique de transport appelé STADIUM. Cet outil a permis d'analyser l'influence des solutions de sulfate de sodium sur la durabilité des bétons. Plusieurs formulations, en terme de type de ciment, de rapport E/C et de concentration en sulfates ont été simulées. De même, d'autres calculs destinés à modéliser l'agression du béton par des sulfates d'origine externe ont été menés par Planel [9] avec le code de géochimie HYTEC [10].

Avec la diffusion des ions sulfates, plusieurs zones de détérioration en couches sont créées de l'extérieur vers l'intérieur du béton. La section de béton endommagée par les sulfates peut donc être divisée en trois couches allant de la surface exposée au cœur du matériau. L'épaisseur totale des couches dégradées s'appelle la profondeur de diffusion des ions sulfate. La vitesse de la réaction de diffusion, la profondeur de la diffusion des sulfates et les contraintes de gonflement dues à la génération des produits expansifs sont les principaux indices utilisés pour caractériser quantitativement les zones de détérioration en couches, influencées à la fois par l'environnement externe du sulfate et la composition du béton (par exemple, la concentration, la température, le cycle humidification-séchage, la teneur en C_3A). Selon les résultats expérimentaux, une analyse de régression est effectuée et un modèle empirique (équation 1) est proposé pour la prédiction de la profondeur de diffusion [11].

$$X = \frac{4.2}{5} \cdot \frac{C_{C_3A}}{8} \cdot \frac{(c_{Mg^{2+}} + c_{SO_4^{2-}})}{0.19} \cdot t \quad \textbf{(Eq. 1)}$$

avec :

X : la profondeur de diffusion (en cm) ;

C_{C_3A} : la teneur en C_3A dans le ciment (en %) ;

$c_{Mg}^{2+} + c_{SO4}^{2-}$: la concentration de la solution agressive (en mol/l) ;

t : le temps (en année).

Le modèle d'Atkinson's (Eq. 1) est modifié par Schuman & *al.* en introduisant le coefficient de diffusion initial des sulfates dans le béton D [12] :

$$X = 1.86 \times 10^6 C_{C_3A}(c_{Mg^{2+}} + c_{SO_4^{2-}})D \cdot t \quad \textbf{(Eq. 2)}$$

Cependant, ce coefficient de diffusion est considéré comme une constante de 3,4 $.10^{-11}$ m^2/s, en négligeant le fait que les pores du béton sont susceptibles d'être progressivement obstrués par les produits de la réaction. De plus, ce modèle n'a pas été vérifié expérimentalement et doit encore être confirmé.

D'autre part, un modèle de prédiction de la profondeur de diffusion en fonction de l'analyse expérimentale réalisée sur un béton avec différentes teneurs en C_3A (9-13%) dans différentes solutions de sulfate de sodium est proposé par Marchand [13]. Les relations linéaires entre la profondeur de diffusion, le temps et la concentration de la solution externe sont modifiées. Cependant, l'effet du coefficient de diffusion sur la vitesse de pénétration n'est pas révélé et les relations entre la profondeur de la diffusion et la réaction de diffusion ne sont pas prises en compte (Eq. 3).

$$X = [0.11\ c_{SO_4^{2-}}^{0.45}] \cdot [0.143\ t^{0.33}] \cdot [0.204\ e^{0.145\ C_{C_3A}}] \quad \textbf{(Eq. 3)}$$

t étant le temps d'immersion (en jours) et C_{C3A} la teneur en C_3A dans le ciment (en %).

En se basant sur la première loi de Fick, la prédiction de la profondeur de diffusion par dérivation théorique est proposée dans [14] (Eq. 4). Cependant, ce modèle n'a encore jamais été vérifié expérimentalement.

$$X = \sqrt{\frac{2D_0 c_{SO_4^{2-}} t}{a}} \quad \textbf{(Eq. 4)}$$

Avec :

X : la profondeur de diffusion (en cm) ;

D_0 : le coefficient de diffusion initial des sulfates dans le béton ;

c_{SO4}^{2-} : la concentration de la solution sulfatique à la surface du béton (en mol/l) ;

a : la capacité du béton à absorber les sulfates ;

t : le temps (en année).

Considérant la réaction de diffusion, un modèle similaire est proposé dans [15] (Eq. 5) :

$$X = \sqrt{\frac{2D_0 c_{SO_4^{2-}} t}{C_{C_3A}}} \quad \textbf{(Eq. 5)}$$

Enfin, un modèle de diffusion chimique pour la profondeur de diffusion du sulfate prenant en compte la réaction d'équilibre chimique, la distribution des ions sulfates et le coefficient de diffusion variant dans le temps est proposé dans [16] (Eq. 6). Une équation empirique du coefficient de diffusion variant dans le temps est également proposée dans l'Eq. 7.

$$X = \sqrt{\frac{2D_e(c_{SO_4^{2-}} - c^0_{SO_4^{2-}}) \cdot q}{C_{C_3A}}} \cdot \sqrt{t} \quad \text{(Eq. 6)}$$

$$D_e = D_0(\frac{1}{t})^m \quad \text{(Eq. 7)}$$

avec :

X : la profondeur de diffusion (en cm) ;

C_{C3A} : la teneur en C_3A dans le ciment (en %) ;

c_{SO4}^{2-} : la concentration de la solution sulfatique (en mol/l) ;

$c^0_{SO4}^{2-}$: la concentration initiale des sulfates dans le béton (en mol/l) ;

m : le coefficient d'atténuation de la diffusivité dans le temps, lié au rapport eau/ciment du béton ;

t : le temps (en année).

Dans le cas très spécifique des attaques par de l'acide sulfurique biogénique (par exemple les réseaux d'égouts avec formation d'hydrogène sulfuré H_2S), des modèles ont été proposés par Yuan et *al.* [17-18] et sont basés sur le transport réactif de l'acide sulfurique dans le réseau poreux du béton avec sa dégradation par dissolution et formation de gypse et/ou d'ettringite induisant des pressions dans cette porosité. Ce modèle a été repris par Grandclerc et *al.* en 2018 [19] pour introduire une variété importante de ciment et analyser l'importance de leur nature sur leur stabilité thermodynamique.

À ce jour, il n'existe pas de modèle reconnu et faisant consensus au plan opérationnel, et l'avis d'expert en modélisation reste requis pour pouvoir faire de la prédiction d'évolution.

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC	
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 contenant des sulfates, 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 deuxième étape a pour objectif de repérer les désordres susceptibles d'indiquer une attaque du béton par les sulfates comme : – du faïençage ou de la fissuration ; – des éclatements de béton ; – des érosions ou effritements de la peau du béton ; – une désagrégation de la surface du béton (notamment en présence d'acide sulfurique) ; – des expansions ou déformations ; – des parements tachetés ; – des efflorescences, traces de calcite, stalactites ; – etc. Ces désordres, qui correspondent généralement à une attaque du béton qui se produit de l'extérieur vers l'intérieur de l'élément en béton, peuvent avoir pour origine une attaque du béton par des sulfates. Cependant, les désordres les plus fréquents sont la fissuration et l'expansion du béton ; lorsque la réaction sulfatique s'accompagne localement d'une formation d'acide sulfurique, on observe alors un pourrissement du béton. 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. À l'issue de cette inspection détaillée, il convient alors d'évaluer les risques : – si la partie d'ouvrage dégradée semble avoir peu d'impact sur la stabilité générale et la durabilité de l'ouvrage (par exemple peau du béton dégradé sur un élément massif et n'atteignant pas les aciers passifs), 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 (par exemple atteinte des aciers passifs qui peuvent se corroder), 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 sulfates et l'on procède à une auscultation.
ÉTAPE 3 AUSCULTATION	Cette étape peut être menée en deux sous-étapes : **3.1 Auscultation pour le diagnostic** Celle-ci consiste à : – confirmer la présence d'un environnement contenant des sulfates en prélevant des échantillons d'eaux, de sols et en les analysant pour évaluer les teneurs en sulfates ; – prélever des carottes de béton et effectuer une analyse minéralogique du béton destinée à détecter la présence d'ettringite et à évaluer la pénétration des sulfates à l'intérieur du béton. Un profil de la teneur en sulfates sera également réalisé sur une carotte. À noter que ces deux actions peuvent être menées en même temps, surtout si les prélèvements sont onéreux (conditions d'accès à l'ouvrage difficiles). **3.2 Auscultation pour le pronostic** Le pronostic peut porter sur l'évolution prévisible des désordres, leur conséquence sur la structure et les possibilités de réparation ou de protection. L'évolution prévisible des désordres peut être appréhendée par : – l'état d'avancement et l'ampleur des dégradations ; – l'estimation du gradient de sulfates dans le béton ; – l'agressivité du milieu extérieur et les possibilités d'actions sur ce milieu ; – deux essais accélérés de résistance aux sulfates sur béton [20-22] qui sont actuellement testés dans le cadre du projet national PERFDUB ; – les modèles de prédiction de la profondeur de diffusion présentés précédemment. Le premier essai accéléré est basé sur la norme SIA 262/1 Annexe D de 2013 [22]. Dans cet essai, des carottes de béton conservées à 100% d'humidité relative pendant 28 jours sont soumises à 4 cycles successifs de séchage à 50°C / imbibition à 20°C dans une solution à 50 g de Na_2SO_4 / l (soit 33,8 g de SO_4 /l), suivis d'une conservation de 56 jours supplémentaires dans cette solution. La longueur et la masse de chaque carotte sont mesurées régulièrement. L'essai dure 4 mois avec une cure de 28 jours. Les corps d'épreuve sont constituées de deux cubes 150 x 150 x 150 mm prélevés dans l'ouvrage ; 6 carottes traversantes de 28 mm de diamètre sont ensuite prélevées dans les cubes. Le résultat final de l'essai est la moyenne de l'allongement des 6 éprouvettes à l'issue de la conservation permanente dans la solution de sulfate. Le second essai est basé sur le protocole de l'essai de Réaction Sulfatique Externe selon S. Messad [23]. Les éprouvettes pré-saturées sont placées dans des bacs puis immergées dans une solution de sulfate de sodium dont la concentration est de 8,9 g/l. Le pH et la température de la solution sont contrôlés tout au long de l'essai avec un pH maintenu à 7 (±1) et une température devant rester supérieure à 25°C. Le renouvellement de la solution d'attaque doit être effectué tous les mois. La durée de l'essai a été fixée à 12 semaines. 3 éprouvettes 7×7×28 cm et 3 cylindres ø11× h22 cm sont utilisés pour le suivi de l'expansion et de la masse. Les résultats sont représentés graphiquement en fonction de la durée d'immersion. Selon la prévision de cette évolution, 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 sulfatées, 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 réparer d'autres pathologies comme des aciers corrodés (surtout en présence d'eau de mer), ou à surveiller la structure jusqu'au remplacement des éléments atteints si cette solution s'avère plus économique.

RÉFÉRENTIEL

[1] Y. Gu. Experimental pore scale analysis and mechanical modelling of cement-based materials submitted to delayed ettringite formation and external sulfate attack. PhD dissertation, Ifsttar, Marne La Vallée, 2018.

[2] R. Ragoug. Attaque sulfatique externe des matériaux cimentaires – Impacts de l'âge, de la composition du liant et de la présence de chlorures, PhD dissertation, Ifsttar, Marne La Vallée, 2016.

[3] Y. Gu, R-P. Martin, O. Omikrine-Metalssi, T. Fen-Chong and P. Dangla, Pore size analyses of cement paste exposed to external sulfate attack and delayed ettringite formation, Cement and Concrete Research, 120 (2019).

[4] R. Ragoug, O. Omikrine-Metalssi, F. Barberon, J-M. Torrenti, L. Divet, N. Roussel & J-B d'Espinose de Lacaillerie, Durability of cement pastes exposed to external sulfate attack and leaching: physical and chemical aspects, Cement and Concrete Research, 116 (2019), pp. 134-145.

[5] Y. Gu, O. Omikrine-Metalssi, R-P. Martin, T. Fen-Chong and P. Dangla. Locating ettringite due to DEF at pore scale of cement paste by heat-based dissolution tests, Construction and Building Materials, 258 (2020).

[6] A. Chabrelie. Mechanisms of degradation of concrete by external sulfate ions under laboratory and field conditions. PhD dissertation, EPFL, Lausanne, 2010.

[7] Marchand J., Modeling the behaviour of unsaturated cement systems exposed to agressive chemical environment, Materials and Structures, vol. 34, 2001.

[8] Marchand J., Sanson E., Maltais Y., Beaudoin J.J., Theorical analysis of the effect of weak sodium sulfate solutions on the durability of concrete, Cement and Concrete Composites, vol. 24, 2002, p. 317-319.

[9] Planel D., Les effets couplés de la précipitation d'espèces secondaires sur le comportement mécanique et la dégradation chimique des bétons, Thèse de l'université de Marne la Vallée, 4 juin 2002.

[10] Van Der Lee J., De Windt L., Lagneau V., Goblet P., Module-oriented modelling of reactive transport with HYTEC, Computers And Geosciences, vol. 29, 2003, p. 265-275.

11] A. Atkinson, D.J. Goult, and J.A. Hearne. An assessment of the long-term durability of concrete in radioactive waste repositories. In MRS Proceedings, volume 50, page 239. Cambridge University Press, 1985.

[12] R. Shuman, V.C. Rogers, and R.A. Shaw. The barrier code for predicting long term concrete performance. In Waste processing, transportation, storage and disposal, technical programs and public education. 1989.

[13] J. Marchand, I. Odler, and J.P. Skalny. Sulfate attack on concrete. 2003.

[14] S.W. Li, Y.F. Wang, and S.N. Wang. Research on the prediction model of the concrete damage in the sulfate aggressive environment. Journal of Wuhan University of Technology, 32(14):36-44, 2010.

[15] H. Lee, M.S. Cho, J.S. Lee, and D. Kim. Prediction model of life span degradation under sulfate attack regarding di_usion rate by amount of sulfate ions in seawater. International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, 1(3):251-255, 2013.

[16] Y. Zhou, H. Tian, H. Cui, F. Xing, and L. Sui. Model for sulfate diffusion depth in concrete under complex aggressive environments and its experimental verification. Advances in Materials Science and Engineering, 2015, 2015.

[17] Yuan H., Dangla P., Chatellier P., Chaussadent T., Degradation modeling of concrete submitted to sulfuric acid attack, Cement and Concrete Research, Cement and Concrete Research, 53, 267-277, 2013.

[18] Yuan H., Dangla P., Chatellier P., Chaussadent T., Degradation modeling of concrete submitted to biogenic acid attack, Cement and Concrete Research, 70, 29-38, 2015.

[19] Grandclerc A., Dangla P., Gueguen-Minerbe M., Chaussadent T., Modelling of the sulfuric acid attack on different types of cementitious materials, Cement and Concrete Research, 105, 126-133, 2018.

[20] AFNOR NF EN 197-1 Ciment - Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.

[16] AFNOR, NF P 15-317 (1995), Liants hydrauliques – Ciments pour travaux à la mer.

[21] AFNOR, NF P 15-319 (1995), Liants hydrauliques - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates.

[22] SIA 262/1 (2013), Norme Suisse: "Construction en béton - Spécifications complémentaires", Annexe D.

[23] Messad S. (2008) Mise au point d'un essai de vieillissement accéléré de l'attaque sulfatique externe pour l'application du concept de performance équivalente dans le cadre de la norme NF EN 206. Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse.

Liste des méthodes d'auscultation

A1-1 : Carottage de béton

A1-2 : Analyse minéralogique du bêton

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.

D1-6: DIAGNOSTIC DE L'ÉTAT DU BÉTON SOUMIS À UNE RÉACTION SULFATIQUE EXTERNE

