

Guide d'évaluation et de gestion des ouvrages d'art affectés de réactivité alcalis-granulats

M.A. Bérubé¹, N. Smaoui², B. Fournier³ et B. Bissonnette⁴

¹ CRIB, Département de géologie et de génie géologique, Université Laval

² Service d'Expertise en Matériaux (SEM) Inc.

³ ICON-CANMET, EMR-Canada

⁴ CRIB, Département de génie civil, Université Laval

Résumé – Dans le cadre de deux ententes conclues depuis 1999 entre l'Université Laval et Transports Québec, un important projet de recherche a été réalisé sur l'évaluation structurale des ouvrages d'art affectés de réactivité alcalis-silice (RAS). Ce projet a impliqué d'importants travaux sur trois ponts de la région de Québec affectés de RAS ainsi que sur les échantillons prélevés dans ces ouvrages. Il a aussi comporté un important volet expérimental portant sur différents aspects pertinents au sujet d'étude. Le projet de recherche a pris fin avec la production d'un guide sur la reconnaissance, l'évaluation et le suivi des ouvrages d'art affectés de RAS. Le principal critère d'intervention retenu dans ce guide est le nombre d'années au rythme où vont les choses avant que les aciers d'armatures excèdent leur limite d'élasticité, limite considérée comme atteinte lorsque l'expansion atteint 0.2%. Ce délai est calculé à partir de l'expansion déjà atteinte (estimée à partir de la fissuration superficielle ou, mieux encore, d'un essai de fatigue sur carottes) et du taux d'expansion en cours (estimé pour sa part à partir de la fissuration superficielle et de l'âge de l'ouvrage ou, mieux encore, d'essais d'expansion sur carottes ou, encore bien mieux, de relevés d'expansion in situ). L'importance et la fréquence des travaux d'investigation dépendent du nombre d'années avant plastification, selon trois catégories : >15 ans, 5 à 15 ans et <5 ans. Selon le cas, la stratégie d'évaluation/intervention peut comprendre différentes étapes d'investigation plus ou moins poussées et un suivi plus ou moins assidu par la suite, tout en étant constamment réévaluée.

1 – Introduction

Un grand nombre d'ouvrages d'art et de structures hydrauliques situées en territoire québécois sont affectées de réactivité alcalis-granulats de type alcalis-silice (RAS), à un degré toutefois fort variable d'une région à une autre, d'un ouvrage à un autre et même d'une composante à une autre du même ouvrage. Dans le cas particulier des ouvrages d'art, le plus important critère d'intervention demeure la chute de la capacité portante et la stabilité structurale des ouvrages affectés. Dans le cadre de deux ententes conclues respectivement en 1999 et en 2001 entre l'Université Laval et le Ministère des transports du Québec, un important projet de recherche a porté sur l'évaluation structurale des ouvrages d'art affectés de RAS, et ce, dans le but principal d'établir les véritables relations qui existent entre l'apparence visuelle, l'état réel d'endommagement et la stabilité structurale des ouvrages affectés de ce problème.

Ce projet, réalisé par des chercheurs de l'Université Laval en collaboration très étroite avec plusieurs intervenants du MTQ ainsi que d'autres chercheurs de CANMET-ICON et de l'IREQ, a impliqué d'importants travaux sur trois ponts de la région de Québec affectés de RAS (monitoring, carottage, réparations) ainsi que sur les échantillons prélevés dans ces ouvrages (essais mécaniques, essais d'expansion résiduelle, contenus en alcalis,...). Les trois ouvrages retenus sont les viaducs Du-Vallon/Charest, Du-Vallon/Père-Lelièvre et De-la-Capitale/St-David, tous situés dans la région de Québec. Le projet a aussi comporté un très important volet expérimental portant sur différents aspects pertinents au sujet d'étude (influence de la géométrie,

de l'orientation du plan de coulée et du mode de consolidation du béton sur l'expansion engendrée par la RAS ; influence de la RAS sur le comportement mécanique du béton ; évaluation de l'expansion atteinte à ce jour par le béton en service affecté de RAS ; contraintes induites dans le béton armé affecté de RAS ; comparaison entre différentes méthodes de mesure de l'expansion,...). Le projet de recherche a pris fin avec la production de deux rapports finaux soumis dans le cadre des deux ententes et portant respectivement sur les travaux réalisés sur les ouvrages (Bérubé et al. 2004a) et sur les études expérimentales (Bérubé et al. 2004b).

L'objectif ultime de la recherche était toutefois la production d'un guide sur la reconnaissance, l'évaluation et le suivi des ouvrages d'art affectés de RAS (Bérubé et al. 2004c). La méthodologie proposée dans ce guide repose à la fois sur l'ensemble des informations issues des travaux sur les ouvrages et des études expérimentales. Le présent document en présente les grandes lignes. Pour le bénéfice des lecteurs, nous avons toutefois cru bon de rappeler au préalable les principales conclusions du projet de recherche.

2 – Principales conclusions du projet de recherche

Influence de la géométrie, du plan de coulée et du mode de consolidation du béton – En l'absence de contraintes, l'expansion due à la RAS est toujours nettement plus importante dans la direction perpendiculaire au plan de coulée et cet effet est amplifié par la vibration du béton au moment de sa mise en place ainsi qu'en présence de granulats plats et allongés. Lors de l'évaluation d'un ouvrage déjà affecté de RAS, il est donc important de noter l'orientation des carottes soumises à des essais mécaniques ou à des essais d'expansion résiduelle ainsi que l'orientation des mesures de gonflement in-situ par rapport à celle du plan de coulée. Dans le cas particulier d'essais d'expansion résiduelle sur carottes, il est recommandé de procéder à des mesures axiales et diamétrales selon les trois directions, tout en s'assurant que des mesures soient réalisées perpendiculairement au plan de coulée.

Influence de la RAS sur les propriétés mécaniques du béton – Les résistances en compression, en fendage et en traction pure ainsi que le module élastique du béton sont affectés par la RAS, et ce, d'une façon plus ou moins graduelle au fur et à mesure de l'avancement de la RAS. Les propriétés les plus rapidement affectées sont le module élastique et la résistance en traction, alors que les résistances en compression et en fendage sont affectées beaucoup plus tardivement. En d'autres mots, la RAS est déjà très avancée dans un béton qui présente des chutes de résistance en compression et en fendage associées à cette réaction. L'étude a aussi permis de démontrer que le module élastique n'est pas plus affecté en compression qu'en traction pure.

Influence de la RAS dans le cas du béton armé – Dans un béton armé comportant des armatures longitudinales ceinturées d'étriers relativement espacés, comme dans le cas de plusieurs colonnes et de poutres de ponts, la présence d'armatures longitudinales fait diminuer l'expansion parallèlement à celles-ci, mais jamais complètement, et cette diminution est d'autant plus importante que le pourcentage d'acier longitudinal est élevé. Les armatures longitudinales peuvent devenir très fortement sollicitées en traction, jusqu'à 280 MPa dans l'étude expérimentale, et le sont d'autant plus que le pourcentage d'acier longitudinal est faible et que le granulat utilisé est plus réactif. En contrepartie, le béton est mis en précontrainte, jusqu'à 3.3

MPa, celle-ci étant d'autant plus importante que l'expansion est élevée. En présence de granulats hyper-réactifs et de faibles pourcentages d'armature, l'effort de traction générée par la RAS dans les barres longitudinales pourrait éventuellement entraîner leur plastification. Les déformations générées dans les étriers sont semblables aux déformations du béton dans leur direction, suggérant une bonne liaison béton/étriers, et ces déformations sont plus faibles lorsque le diamètre des étriers augmente. Les étriers sont fortement sollicités à la fois en traction et en flexion. En présence des granulats hyper-réactifs testés, les déformations mesurées indiquent qu'ils ont dépassé leur limite d'élasticité, ce qui n'est pas toutefois encore survenu en présence du calcaire relativement moins réactif de Québec.

Évaluation de l'expansion atteinte à ce jour – L'expansion déjà atteinte à ce jour par le béton affecté de RAS peut être raisonnablement estimée à partir de la **fissuration superficielle** observée à la surface des ouvrages en cause, ce qui est déjà pratique courante en Europe (ISE 1992, LCPC 1997). Toutefois, les résultats ne sont valables que dans la mesure où les relevés sont effectués sur les sections les plus exposées de ces ouvrages, et ce, selon 2 ou 3 directions. Tel qu'attendu, cette fissuration et l'expansion qu'elle permet d'estimer dépendent grandement de l'orientation des contraintes principales dans ces ouvrages (armatures, précontrainte, chargement,...).

L'expansion à ce jour peut également être estimée à partir de l'**essai de fatigue SDT modifié**, i.e. en utilisant un chargement maximal de 10 MPa lors des cycles de chargement/déchargement uniaxial, au lieu de 5.5 MPa tel que recommandé par les concepteurs de l'essai (Chrisp et al. 1989). Les paramètres utiles à cette fin sont la déformation résiduelle après 5 cycles de chargement/déchargement et, mieux encore, l'énergie dissipée (hystérésis) lors du premier cycle; ces deux paramètres croissant progressivement à mesure qu'augmente la microfissuration interne et l'expansion du béton, comme on peut le constater à la Figure 1 dans le cas de bétons expérimentaux fabriqués avec un calcaire réactif de la région de Québec. Les résultats sont d'ailleurs considérés comme plus fiables que ceux issus de la fissuration de surface et sont moins sensibles que cette fissuration aux conditions d'exposition du béton. Si l'information générée demeure toutefois limitée à la direction des carottes testées par rapport aux ouvrages étudiés, cette direction n'en demeure pas moins presque toujours la plus critique, i.e. celle selon laquelle l'expansion est la plus importante (perpendiculaire aux armatures principales et/ou aux câbles de précontrainte).

Quoique utile pour confirmer la présence de la RAS, l'**indice d'endommagement interne DRI** («Damage Rating Index»), proposé par Grattan-Bellew et Danay (1992), lequel a pour but d'évaluer quantitativement l'endommagement interne du béton, et ce, sur la base d'un examen pétrographique, n'a pas permis pour sa part de distinguer les bétons les plus visuellement et les plus mécaniquement affectés par la RAS de ceux qui le sont moins, des valeurs très élevées étant obtenus pour tous les bétons des ouvrages examinés, pourtant différemment affectés par la RAS. Cet indice peut donc difficilement être utilisé pour estimer l'état d'avancement de la réaction, i.e. l'expansion atteinte à ce jour.

Évaluation du taux d'expansion en cours – En première analyse, dans le cas d'ouvrages comparables en âge et en composition (i.e. même type de granulats réactifs) à ceux étudiés, une relation empirique peut être utilisée afin d'estimer le taux d'expansion en cours à partir de la **fissuration superficielle** (voir ci-après).

Ce taux peut aussi être évalué, et ce, de façon plus scientifique, à partir d'**essais d'expansion sur carottes** dans l'air humide ou en solution de NaOH 1N à 38°C, couplés au contenu en alcalis solubles du béton et à un certain nombre de corrections relativement aux conditions de température, d'humidité et de contraintes en service. Dans le cas des ouvrages étudiés, les paramètres de correction préconisés par Bérubé et al. (2002) tendent toutefois à surestimer d'environ 65% l'expansion réellement en cours, mais ceci pourrait être facilement corrigé en modifiant à la baisse le coefficient de correction pour la température (lequel tient compte du fait que les essais sur carottes sont effectués à 38°C alors que la température moyenne annuelle en service est nettement plus faible, notamment de 4°C dans la région de Québec). Pour sa part, le coefficient de correction utilisé pour tenir compte des contraintes en service (nulles dans le cas des carottes) semble également trop faible dans le cas du béton contenant de fortes quantités d'acier d'armature ou fortement précontraint.

Il n'en demeure pas moins que l'information la plus fiable concernant le taux d'expansion en cours provient de **mesures in situ**. À cet égard, des **relevés manuels périodiques** à l'aide de plots métalliques a fourni des résultats raisonnablement fiables après seulement 3 années, et ce, à raison de 3 à 4 relevés par saison (entre mai et octobre). L'installation de jauges de déformation LVDT et de capteurs pour des **mesures automatiques en continu** d'expansion, d'humidité et de température au sein de colonnes témoins et de colonnes réparées du viaduc Du-Vallon n'a toutefois pas fourni les résultats escomptés. Les jauges de déformations ont enregistré des contractions importantes, et ce, même pour les colonnes témoins, alors que les résultats de température et d'humidité internes sont tout à fait inacceptables. Des mesures périodiques manuelles à l'aide d'une sonde commerciale insérée le long de petits trous ont toutefois fourni des résultats d'humidité très satisfaisants, même si les mesures sont relativement longues (plus d'une heure avant que l'équilibre soit atteint).

Évaluation de l'expansion ultime – Des essais d'expansion résiduelle sur carottes ne permettent pas de déterminer l'expansion ultime que peut présenter en service le béton affecté par la RAS, ceci en raison d'un important lessivage d'alcalis que ces carottes subissent en cours d'essai et du plafonnement conséquent de l'expansion. Ce lessivage étant d'autant plus faible que les carottes testées sont grosses, il y aurait tout intérêt à tester en routine des carottes de 150 mm \varnothing .

Performance des réparations – L'application en 2000 d'un scellant à base de silane sans enduit de surface sur plusieurs composantes des trois ouvrages étudiés a permis de réduire le taux d'expansion du béton de la plupart de ces composantes, de 25 à 75% selon le cas. La performance est meilleure sur du béton moins endommagé par la RAS et moins exposé aux intempéries, performance d'ailleurs toujours proportionnelle à la chute des conditions d'humidité relative au sein des éléments scellés par rapport aux éléments témoins non scellés (mesures à l'aide d'une sonde commerciale). Un enduit de surface aurait sans doute permis d'améliorer cette performance. Quant aux différents types de réparations effectuées en 2001 sur d'autres colonnes du viaduc Du-Vallon (scellant avec enduit de surface, matériaux composites, encapsulation des bases de colonnes avec du béton normal, projeté ou autonivelant, armé ou non et contenant ou non un adjuvant à base de lithium), on ne peut rien conclure en raison de certains artéfacts associés, d'une part, à l'instrumentation mise en place et, d'autre part, au retrait des bétons de réparation.

Conclusion générale – Les résultats obtenus sont d’autant plus intéressants que l’étude a porté sur une grande variété de composantes, de différentes géométries, massives et non massives, faiblement armées à très armées, très exposées à non exposées, et même sur des éléments précontraints. Toutes les composantes étudiées contenaient des granulats réactifs de composition calcaire, mais il s’agit là du type de granulats réactifs de loin le plus répandu au Québec, entre La Malbaie et Aylmer, en passant par Québec, Trois-Rivières et Montréal, sans oublier le Saguenay. Les travaux expérimentaux réalisés auront permis pour leur part d’améliorer très significativement les connaissances dans le domaine de l’évaluation des ouvrages d’art affectés de RAS et de développer ou d’améliorer plusieurs procédures utiles à cet effet. Plusieurs des conclusions issues de ces travaux sont d’ailleurs d’application immédiate et font l’objet de recommandations très précises dans le guide d’évaluation et de gestion des ouvrages d’art affectés de RAS, dont on discutera ci-après.

3 – Description et justification de la méthodologie proposée

Le principal objectif du projet de recherche sur la RAS était la production d’un guide sur la reconnaissance, l’évaluation et le suivi des ouvrages d’art affectés de RAS (Bérubé et al. 2004c). Ce guide tient compte des résultats des travaux effectués sur les trois viaducs Du-Vallon/Charest, Père-Lelièvre/Du-Vallon et St-David/de-la-Capitale (Bérubé et al. 2004a) ainsi que sur ceux issus des études expérimentales (Bérubé et al. 2004b).

3.1 – Stratégie globale

Tel que mentionné dans la littérature (ISE 1992), le principal critère d’intervention sur un ouvrage structural affecté de RAS demeure l’expansion que le béton de cet ouvrage présente aujourd’hui. En effet, si le lien béton/armature n’est pas affecté et que l’expansion dans les deux matériaux est alors la même, tel que d’ailleurs observé en laboratoire (Bérubé et al. 2004b), la connaissance de ce paramètre permet d’évaluer où en sont rendues les armatures par rapport à leur limite de plastification. Dans le guide, nous avons considéré que cette limite est atteinte lorsque l’expansion atteint 0.2%.

Dans la méthode proposée par l’ISE (1992), la fréquence du suivi d’un ouvrage affecté de RAS est déterminée en tenant compte d’un certain nombre de paramètres dont : (1) l’expansion ultime que le béton risque d’atteindre, ce qui inclut l’expansion déjà atteinte et celle qui reste à venir (cette dernière étant évaluée par un essai d’expansion sur carottes à 100% HR et 38°C) ; (2) les conditions d’exposition (essentiellement les conditions d’humidité) ; (3) le niveau de ferrailage (e.g. variant d’un réseau 3D bien lié jusqu’à un seul lit d’armatures), et (4) le risque que les dommages générés présentent pour la sécurité des biens ou des personnes. Toutefois, si les trois derniers paramètres sont relativement faciles à évaluer, un essai d’expansion sur carottes tend à sousestimer l’expansion ultime en raison du lessivage important que le béton des carottes testées subit en cours d’essai (Rogers et Hooton 1993, Bérubé et al. 2004b). D’autre part, la prise en compte des conditions d’humidité et du niveau de ferrailage a d’abord pour but de tenir compte de la rapidité avec laquelle l’expansion se poursuit, expansion évidemment très influencée par ces deux paramètres mais aussi en nature par d’autres facteurs (e.g. cycles de gel/dégel,...). Enfin, le risque pour la sécurité des biens et des personnes, lequel n’est pas nécessairement de nature

structurale (e.g. chute de blocs vs. effondrement de l'ouvrage), doit toujours être pris en compte, quel que soit l'importance des dommages actuels.

Dans la méthodologie proposée dans le guide, la fréquence d'intervention et son importance tiennent compte : (1) de l'expansion atteinte à ce jour ; (2) du taux d'expansion en cours (au lieu de l'estimer à partir des conditions d'humidité et de ferrailage comme le fait l'ISE), et (3) du nombre d'années qu'il reste avant que les aciers d'armatures deviennent plastifiés. Bien sûr, ce dernier paramètre dépend directement des deux premiers. En d'autres mots, on interviendra plus rapidement sur un ouvrage dont les armatures sont sur le point d'être plastifiées, quel que soit son âge. Par exemple, on interviendra plus rapidement sur un jeune ouvrage peu affecté aujourd'hui mais qui se dégrade à un rythme très rapide que sur un vieil ouvrage qui se dégrade très lentement même s'il a déjà atteint un niveau plus élevé d'expansion.

3.2 – Méthodologie proposée

La stratégie d'évaluation/intervention sur un ouvrage d'art potentiellement affecté de RAS peut comprendre différentes étapes d'investigation plus ou moins poussées et un suivi plus ou moins assidu par la suite, selon le cas, tout en étant constamment réévaluée. Le tout est schématisé à la Figure 2.

ÉTAPE 1 – Inspection visuelle et évaluation de la présence de RAS (re : signes visuels)

Une première visite a pour principal objectif de déterminer s'il est possible que la RAS soit présente dans l'ouvrage étudié, et ce, sur la base des **défauts visuels** caractérisant cette réaction. Le tout se fera à l'aide d'une **fiche technique** légèrement modifiée à partir de celle déjà utilisée par le Laboratoire des chaussées. Cette fiche fait état du type de composantes inspectées (re : géométrie, rôle structural, armatures,...), de la nature, de l'importance et de la distribution des défauts observés (e.g. ouverture, longueur et orientation des fissures, superficie ou longueur atteinte,...), des conditions environnementales, des conséquences possibles pour la sécurité des biens et des personnes, le tout appuyé au besoin par des photographies (numériques).

Sur la base des signes visuels observés et des autres informations disponibles (e.g. dossiers de construction, expérience antérieure avec le type de granulats présent dans le béton, état d'ouvrages voisins,...), l'inspecteur aura à déterminer s'il y a ou non une certaine **possibilité que l'ouvrage soit affecté par la RAS**. Si oui, il pourra réaliser immédiatement ou revenir plus tard réaliser l'étape 2. Si non, et si l'ouvrage est malgré tout détérioré, il faudra chercher ailleurs les causes de cette détérioration. Dans un cas comme dans l'autre, il faudra intervenir s'il y a risque imminent pour la **sécurité des biens ou des personnes**.

ÉTAPE 2 – Premiers relevés de fissuration et estimé de l'expansion atteinte

Procédure – Cette étape consiste à procéder à des relevés de fissures à la surface des composantes ou des sections de composantes les plus exposées. C'est en effet à ces endroits que la fissuration superficielle se développe préférentiellement et qu'elle a le plus de probabilité de fournir les valeurs d'expansion les plus fiables. Un béton enfoui, par exemple, montre peu de fissuration superficielle, et ce, même s'il prend beaucoup d'expansion. En raison des variations climatiques modifiant à la hausse ou à la baisse l'ouverture des fissures, les premiers relevés

devraient être réalisés au coeur de l'été et idéalement précédés d'au moins 2 jours d'ensoleillement (comme tous les autres relevés subséquents, d'ailleurs).

Puisque l'expansion varie selon l'orientation des contraintes, du moins dans le cas des éléments armés, il faut mesurer séparément les fissures selon les 3 (e.g. colonne, poutre,...) ou les 2 directions accessibles (e.g. dalle, mur de culée,...). Des schémas sont proposés à la Figure 3 de manière à totaliser au moins 2 mètres pour chacune des directions considérées. Les segments mesurés doivent être marqués (plots métalliques,...) pour qu'ils puissent être facilement retrouvés lors d'une prochaine visite. Il est aussi recommandé de subdiviser les segments mesurés en longueurs de 0.1 m, comme le fait le LCPC (1997), ce qui permet de suivre plus finement l'évolution des fissures et de les relocaliser plus facilement lors de relevés subséquents.

L'ouverture des fissures devrait être idéalement mesurée à l'aide d'un oculaire gradué spécialement dédié à cette fin et dont la plus fine graduation est de 0.05 mm ou moins. À défaut, on peut utiliser une carte en plastique transparent également dédiée à cette fin et sur laquelle des traits de différentes largeurs sont tracés. L'expansion atteinte par le béton étudié selon chacune des 2 ou 3 directions prises en compte est estimée à partir de l'ouverture totale des fissures intersectées le long de tous les segments de mesure correspondant à cette direction. On doit aussi noter séparément l'ouverture de chacune des fissures observées puisqu'un critère d'intervention basé sur l'ouverture moyenne des fissures (>0.3 mm) est proposé (re : nettoyage au jet de sable + scellant pénétrant + enduit de surface).

Calcul du taux d'expansion en cours (%/année) – Nous avons pu constater dans le cas des ouvrages étudiés qu'un estimé du taux d'expansion en cours à partir de l'expansion atteinte, elle même déterminée à partir de la fissuration superficielle, pouvait mener à une forte sous-estimation de ce taux par rapport à la réalité, et ce, même en considérant qu'il ne se passe rien pendant les 5 premières années suivant la construction. Ainsi, le rapport entre l'expansion mesurée (plots) et l'expansion estimée à partir de la fissuration de surface selon la direction la plus critique (i.e. la moins contrainte et la plus expansive) varie entre 1.6 et 4.3 (moyenne de 3.1) d'un type de composante à un autre (voir Tableau 29 de Bérubé et al. 2004a). En fait, le calcul effectué fournit un taux d'expansion moyen pour toutes les années antérieures (moins les 5 premières) alors que l'expansion en cours s'avère beaucoup plus rapide qu'elle l'a été en moyenne depuis la construction. Par mesure de prudence et faute d'informations plus fiables sur le taux de gonflement en cours (i.e. faute de résultats d'essais d'expansion sur carottes ou, beaucoup mieux, de relevés d'expansion in situ), nous suggérons d'estimer ce taux de la manière suivante :

$$\text{Taux d'expansion en cours (\%/année)} \approx 4 \cdot \text{expansion atteinte à ce jour, en \%} / (\text{âge} - 5)$$

Il s'agit bien sûr d'une relation tout à fait empirique qui n'est utilisée qu'en début d'évaluation afin de déterminer s'il peut y avoir ou non un problème de plastification des aciers à plus ou moins court terme. Si un tel risque existe, le taux d'expansion en cours devra être évalué plus justement par le biais de relevés in situ ou d'essais d'expansion sur carottes.

Calcul du nombre d'années avant d'atteindre la plastification des aciers – Le calcul suivant consiste à estimer le nombre d'années qu'il faut au rythme où vont les choses pour que l'expansion du béton atteigne une valeur de 0.2%, niveau où on peut considérer que les aciers d'armatures ont atteint leur limite d'élasticité :

$$\text{Années avant 0.2\%} = (0.2\% - \text{expansion atteinte, en \%}) / \text{expansion en cours, en \%/année}$$

Analyse des résultats et suite à donner – La poursuite de l'évaluation dépend principalement du résultat précédent. Trois éventualités sont considérées quant au nombre d'années avant d'atteindre la «plastification» :

- Si > 15 ans (> 10 pour un élément non structural) => **Programme de suivi I**
- Si 5 à 15 ans (3 à 10 pour un élément non structural) => **Étape 3A et programme de suivi II**
- Si < 5 ans (< 3 pour un élément non structural) => **Étape 3B et programme de suivi II**

Les Figures 4 (éléments structuraux critiques tels que poutres et colonnes) et 5 (autres éléments non critiques tels que dalles, culées, parapets, fondations,...) montrent les zones correspondant à ces trois éventualités en fonction de l'âge de l'ouvrage et de l'expansion déjà atteinte. De plus, dans le cas d'éléments structuraux critiques, si l'ouverture moyenne des fissures excède 0.3 mm et si la corrosion est encore limitée, on doit envisager un nettoyage au **jet de sable** suivi par l'application d'un **scellant pénétrant** de type silane puis d'un **enduit de surface**, ceci afin de prévenir la corrosion des armatures et la détérioration au gel, tout en permettant en même temps de réduire la progression de la RAS. Comme toujours, il faudra intervenir s'il y a risque imminent pour la **sécurité des biens ou des personnes**.

SUIVI I – Inspection visuelle aux 5 ans (3 ans dans le cas d'un ouvrage âgé de moins de 10 ans) avec relevés de fissuration

Ce programme de suivi s'applique lorsqu'on prévoit qu'une expansion de 0.2% ne sera pas atteinte avant 15 ans (pas avant 10 ans dans le cas d'éléments non critiques). Il s'agit en fait de reprendre l'étape 2. Le suivi comprend une **inspection visuelle** au moins tous les 5 ans avec **relevés de fissuration** au moins sur les mêmes sites que ceux mesurés lors de l'étape 2 et à peu près au même moment de l'année. Suite à ces travaux, il y a **reprise des calculs de l'étape 2** (i.e. expansion atteinte, taux d'expansion en cours et délai avant 0.2%) et **réajustement du programme** s'il y a lieu (i.e. passage lorsque requis à l'étape 3A ou 3B et/ou au suivi II; voir Figure 2). L'étape 3A ou 3B (pose de plots et carottage), si requise, peut être réalisée immédiatement. L'application d'un **scellant avec enduit de surface** après nettoyage au jet de sable est toujours recommandée si le critère d'ouverture des fissures est dépassé et si la corrosion est encore limitée, et il faudra toujours intervenir s'il y a risque imminent pour la **sécurité des biens ou des personnes**.

ÉTAPE 3A – Installation de plots et relevé initial; carottage (pétrographie, essais SDT, compression, module élastique)

Cette étape s'applique lorsqu'on prévoit qu'une expansion de 0.2% sera atteinte d'ici 5 à 15 ans (3 à 10 ans dans le cas d'éléments non critiques). Elle peut se faire le même jour que les étapes 1 et 2 dont les conclusions peuvent être tirées en quelques minutes à l'aide d'une simple

calculatrice. Dans tous les cas, l'étape 3A devrait se faire quelques semaines tout au plus après l'étape 2. Elle implique : (1) l'**installation de plots** métalliques au moins à la surface des mêmes sections que celles utilisées pour les relevés de fissuration (voir étape 2) et idéalement aussi sur des sections moins exposées. Les plots sont installés à une distance de 250 mm l'un de l'autre selon un réseau régulier orthogonal (typiquement en groupes de 3 x 3 plots à chaque site d'intérêt permettant ainsi 6 mesures selon chacune des deux directions); (2) un **premier relevé d'expansion** (i.e. distances initiales entre les plots), et (3) le **carottage** d'au moins trois carottes de 100 mm \varnothing et d'au moins 300 mm de longueur, prélevées sous les armatures dans le cas des éléments armés, pour chaque type de composantes montrant des signes de RAS et considérées comme les plus critiques et/ou les plus affectées, et ce, au moins aux endroits les plus exposés.

Les carottes prélevées serviront à un **examen pétrographique** détaillé dont l'objectif est de déterminer sans l'ombre d'un doute s'il y a présence ou non de RAS dans le béton de l'ouvrage à l'étude, ainsi qu'à des **essais SDT**, dont on a déjà discuté à la section 2 (voir Figure 1). Après avoir procédé aux 5 cycles de chargement/déchargement à 10 MPa prévus dans le cadre de l'essai SDT, les mêmes carottes seront alors menées jusqu'à la rupture (**résistance à la compression**) avec mesure simultanée du **module élastique**.

Si l'examen pétrographique indique que la RAS est définitivement absente ou négligeable, il faudra chercher ailleurs les causes de la dégradation de l'ouvrage en cause. Pour leur part, les essais SDT permettent d'estimer, plus justement que la fissuration de surface, l'expansion atteinte à ce jour. Lorsque jugé utile, on pourra aussi procéder dès cette étape à l'analyse du réseau d'air (% et L_{barre}) et des contenus en alcalis solubles et en chlorures. Un carottage plus important peut aussi être réalisé dans le but de procéder à d'autres essais mécaniques (e.g. traction pure) et à des essais d'expansion résiduelle.

SUIVI II – Inspection annuelle avec relevés de fissures et d'expansion au moins 3 fois par année

À la suite de l'étape 3A (ou 3B, décrite ci-après), le suivi comprend une **inspection visuelle annuelle** et des **relevés de fissuration et d'expansion au moins 3 fois par année**, si possible aux mêmes périodes de l'année (e.g. entre mai et septembre), ceci afin de s'affranchir le plus possible des fluctuations climatiques saisonnières qui ont pour effet de modifier l'ouverture des fissures et le volume (expansion) du béton. Si nécessaire, on pourra décider de prélever d'autres carottes pour des analyses physiques (réseau d'air) et chimiques (alcalis, chlorures), ainsi que pour des essais mécaniques (dont le SDT) et d'expansion résiduelle. Chaque fois, il y a **reprise des calculs de l'étape 2** (i.e. expansion atteinte, taux d'expansion en cours et délai avant 0.2%) et **réajustement du programme** s'il y a lieu (i.e. passage lorsque requis au suivi I ou à l'étape 3B, si non réalisée) (voir Figure 2). L'application d'un **scellant avec enduit de surface** après nettoyage au jet de sable est toujours recommandée si le critère d'ouverture des fissures est dépassé et si la corrosion est encore limitée, et il faudra toujours intervenir s'il y a risque imminent pour la **sécurité des biens ou des personnes**.

N.B. : Dès que des essais SDT ont été réalisés, l'expansion atteinte à ce jour est estimée à partir des résultats obtenus et la nouvelle valeur est utilisée en remplacement de la valeur déterminée à partir de la fissuration de surface. Cette remarque s'applique à tout moment au cours de l'évaluation d'un ouvrage, et ce, quel que soit le programme de suivi sélectionné (i.e. I ou II).

Également, dès que les résultats de relevés d'expansion (plots) deviennent statistiquement exploitables, le taux d'expansion en cours ainsi mesuré remplace celui déterminé à partir de la fissuration superficielle et de l'âge de l'ouvrage, et le nombre d'années avant d'atteindre la plastification est alors déterminé à partir de ce taux et de l'expansion déjà atteinte. On peut aussi utiliser à cette fin les tables présentées aux Figures 6 (éléments structuraux critiques) et 7 (autres éléments).

ÉTAPE 3B – Installation de plots et relevé initial; carottage (pétrographie, contenu en alcalis, essais mécaniques dont le SDT, essais d'expansion résiduelle)

Cette étape s'applique lorsqu'on prévoit qu'une expansion de 0.2% sera atteinte d'ici 5 ans (3 ans dans le cas d'éléments non critiques), c'est à dire lorsque le risque de plastification des aciers d'armatures est imminent. Elle peut également se faire immédiatement après les étapes 1 et 2 et est semblable à l'étape 3A si ce n'est qu'on doit ici analyser le béton pour son contenu en alcalis solubles et prélever un nombre suffisant de carottes pour des essais mécaniques (fatigue SDT, compression, module élastique et traction pure), ainsi que pour des essais d'expansion résiduelle (dans l'air à 100% HR et en solution de NaOH 1N). L'étape 3B implique donc l'**installation de plots** métalliques, un **premier relevé d'expansion** et le **carottage** d'au moins 2 m de carottes de 100 mm \varnothing par type de composantes jugées critiques (e.g. éléments structuraux critiques), et ce, au moins aux endroits les plus exposés (équivalent de 9 carottes de 200 mm de longueur) et selon la direction de plus faible contrainte. L'essai SDT permet d'évaluer, de manière plus fiable que la fissuration, l'expansion atteinte à ce jour alors que des essais d'expansion sur carottes combinés au contenu en alcalis solubles du béton permettent, après environ un an, d'estimer, plus justement que la fissuration superficielle, le taux d'expansion en cours (dans l'attente de résultats statistiquement utilisables et alors plus fiables issus des relevés d'expansion in situ). Les essais à réaliser sur les carottes sont les suivants :

- 3 carottes : **essais SDT** (expansion à ce jour) puis poursuite jusqu'à la rupture (**résistance à la compression**) avec mesure simultanée du **module élastique** (une des propriétés mécaniques les plus affectées par la RAS).
- 2 carottes : essais de **résistance à la traction pure** (également une des propriétés mécaniques les plus affectées par la RAS).
- 3 carottes : **essais d'expansion** à 38°C (1 dans NaOH 1N, 2 dans l'air humide à 38°C) d'une durée minimale de 1 an => taux d'expansion en cours (combiné avec le contenu en alcalis soluble, mesuré sur une autre carotte, ainsi que les conditions de température, d'humidité et de contraintes en service).
- 1 carotte : autres essais (**examen pétrographique, alcalis solubles, \pm chlorures, \pm réseau d'air,...**).

L'examen pétrographique a pour but de déterminer sans l'ombre d'un doute s'il y a présence ou non de RAS dans le béton à l'étude. Si la RAS est définitivement absente ou négligeable, il faudra chercher ailleurs les causes de la détérioration du béton. À la suite de l'étape 3B, on passe normalement au programme de suivi II déjà expliqué.

3.3 – Annexes informatives

Le document constituant le guide contient une annexe présentant des **notions de base** sur différents aspects pertinents à la RAS et à la gestion des ouvrages qui en sont affectés : définitions, historique au Québec, conditions nécessaires, autres conditions favorisant la RAS ou ses effets, reconnaissance (diagnose), prévision du comportement futur (prognose), interventions, programmes de gérance déjà existants,... Cette section permettra à l'inspecteur de mieux comprendre le comment et le pourquoi du travail qu'on lui demande d'exécuter, en particulier en ce qui concerne la reconnaissance des défauts caractéristiques de la RAS.

Tous les types de composantes étudiées dans le cadre du projet de recherche ont servi comme **exemples d'application** de la méthodologie proposée. Ces exemples sont présentés en annexe du rapport final de Bérubé et al. (2004a) et quelques uns d'entre-eux sont également présentés en annexe du guide (Bérubé et al. 2004c).

4 – Conclusion

Le projet de recherche poursuivi depuis 1999 sur la RAS a pris fin avec la production d'un guide d'évaluation et d'intervention sur les ouvrages d'art affectés de ce problème (Bérubé et al. 2004c). Le principal critère d'intervention retenu est le nombre d'années au rythme où vont les choses avant que les aciers d'armatures excèdent leur limite d'élasticité, limite considérée comme étant atteinte lorsque l'expansion atteint 0.2%, dans la mesure toutefois où la liaison béton/acier demeure intègre. Ce délai est calculé à partir de l'expansion déjà atteinte (estimée à partir de la fissuration superficielle ou, mieux encore, de l'essai de fatigue SDT) et du taux d'expansion en cours (estimé pour sa part à partir de la fissuration superficielle ou, mieux, des essais d'expansion sur carottes ou, encore bien mieux, de relevés d'expansion in situ). L'importance et la fréquence des travaux d'investigation (inspection, carottage, essais, relevés in situ de fissuration et d'expansion, etc.) dépendent donc du nombre d'années avant d'atteindre la plastification, selon trois catégories : >15 ans, 5 à 15 ans et <5 ans (>10 ans, 3 à 10 ans et <3 ans dans le cas des éléments non critiques). En d'autres mots, on interviendra plus rapidement sur un ouvrage dont les armatures sont sur le point d'être plastifiées, quel que soit son âge. Par exemple, on interviendra plus rapidement sur un jeune ouvrage peu affecté aujourd'hui mais qui se dégrade à un rythme très rapide que sur un vieil ouvrage qui se dégrade très lentement même s'il a déjà atteint un niveau plus élevé d'expansion. La stratégie d'évaluation et d'intervention comprend différentes étapes d'investigation plus ou moins poussées et un suivi plus ou moins assidu par la suite, selon le cas, tout en étant constamment réévaluée.

Le guide comprend aussi une annexe informative présentant des notions de base sur différents aspects pertinents à la RAS et à la gestion des ouvrages qui en sont affectés, ceci de façon à permettre à l'inspecteur de mieux comprendre le comment et le pourquoi du travail qu'on lui demande d'exécuter, en particulier en ce qui concerne la reconnaissance des défauts caractéristiques de la RAS. Quelques exemples d'application concernant certaines composantes des ouvrages étudiés dans le cadre du projet de recherche sont également présentés en annexe du guide.

Remerciements

Somme toute, le projet de recherche sur la RAS aura fait grandement progresser les connaissances sur le comportement des ouvrages d'art québécois affectés de réactivité alcalis-silice, et ce, grâce à la collaboration de nombreux intervenants provenant de différents milieux (Université Laval, CANMET, Hydro Québec) et de différents services au sein même du MTQ (Direction des structures, Laboratoire des chaussées, Direction territoriale de Québec). Tous ces gens ont chacun à leur façon contribué au succès d'une telle aventure et nous les en remercions très sincèrement.

Références

Bérubé, M.A., Smaoui, N., Bissonnette, B. & Fournier, B. (2004a) : Évaluation du comportement structural des infrastructures routières affectées de réactions alcalis-granulats – Phase I – Rapport final (No. 5). Soumis au Ministère des transports du Québec, Mars 2004, 163 p. + annexes.

Bérubé, M.A., Smaoui, N., Bissonnette, B. & Fournier, B. (2004b) : Évaluation du comportement structural des infrastructures routières affectées de réactions alcalis-granulats – Phase II – Rapport final (No. 2). Soumis au Ministère des transports du Québec, Mars 2004, 230 p. + annexes.

Bérubé, M.A., Smaoui, N., Bissonnette, B. & Fournier, B. (2004c) : Reconnaissance, évaluation et suivi des ouvrages d'art affectés de RAS - Guide méthodologique. Soumis au Ministère des transports du Québec, Mai 2004.

Bérubé, M.A., Frenette, J., Pedneault, A. & Rivest, M. (2000) : Laboratory assessment of the potential rate of ASR expansion of field concrete. Comptes-rendus 11th Int. Conf. on AAR, Québec, Canada, pp. 821-830.

Chrisp, T.M., Wood, J.G.M. et Norris, P. (1989) : Towards quantification of microstructural damage in AAR deteriorated concrete. Comptes-rendus Int. Conf. on Recent Developments on the Fracture of Concrete and Rock, University of Wales, Cardiff.

Grattan-Bellew, P.E. et Danay, A. (1992) : Comparison of laboratory and field evaluation of AAR in large dams. Comptes-rendus Int. Conf. on Concrete AAR in Hydroelectric Plants and Dams, CEA, Fredericton, Canada, 23 p.

ISE (1992) : Structural effects of alkali-silica reaction - Technical guidance on the appraisal of existing structures. The Institution of Structural Engineers, London, U.K.

LCPC (1997) : Détermination de l'indice de fissuration d'un parement de béton – Méthode d'essai LPC No. 47, Publication LCPC 1997.

Rogers, C.A. et Hooton, R.D. (1993) : Reduction in mortar and concrete expansion with reactive aggregates due to alkali leaching. Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 13, pp. 42-49.

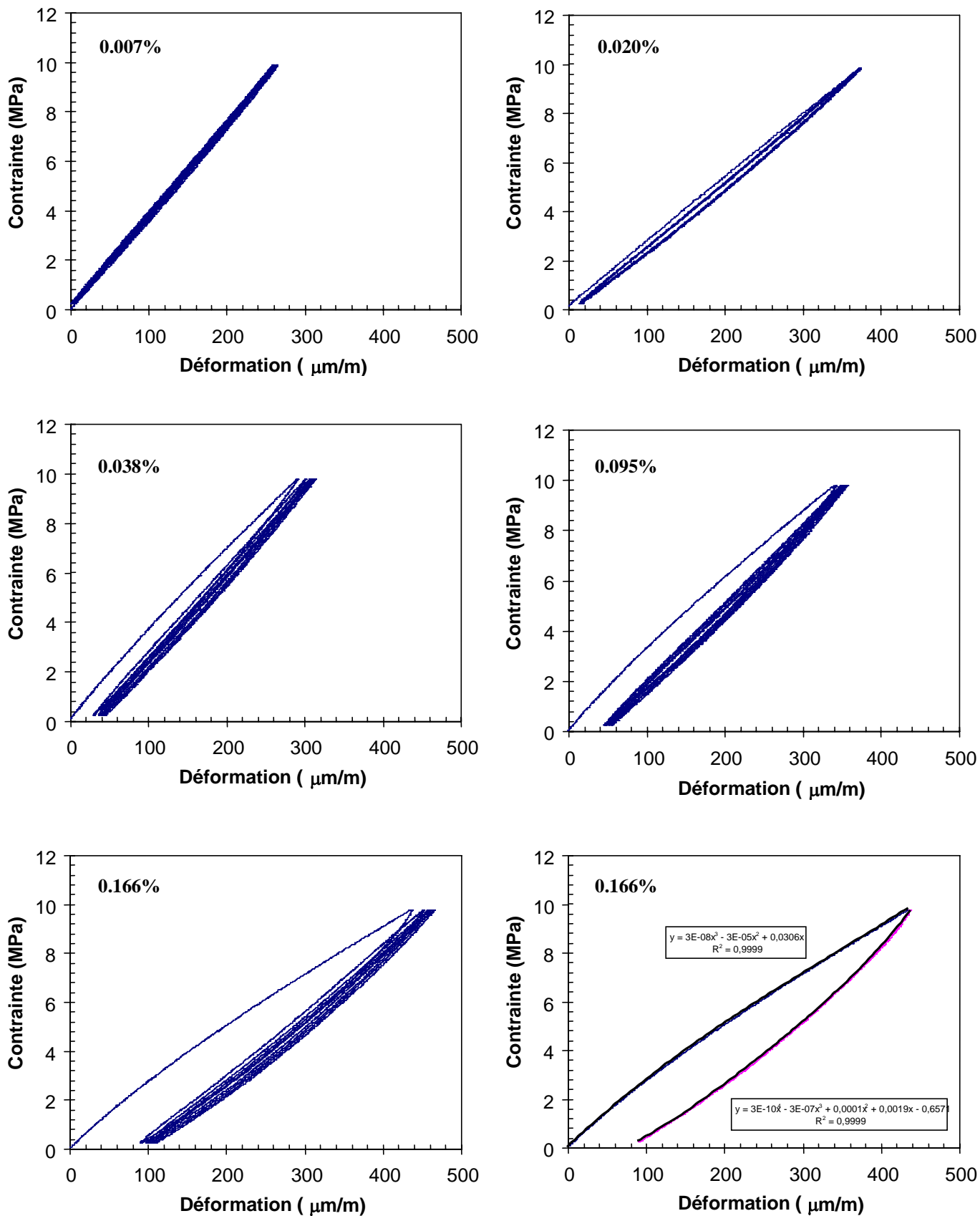


Fig. 1 – Résultats de l’essai SDT modifié obtenus pour différentes expansions dans le cas de cylindres de béton fabriqués avec le calcaire de Québec.

Reconnaissance, évaluation et suivi des ouvrages d'art affectés de RAS *Guide méthodologique*

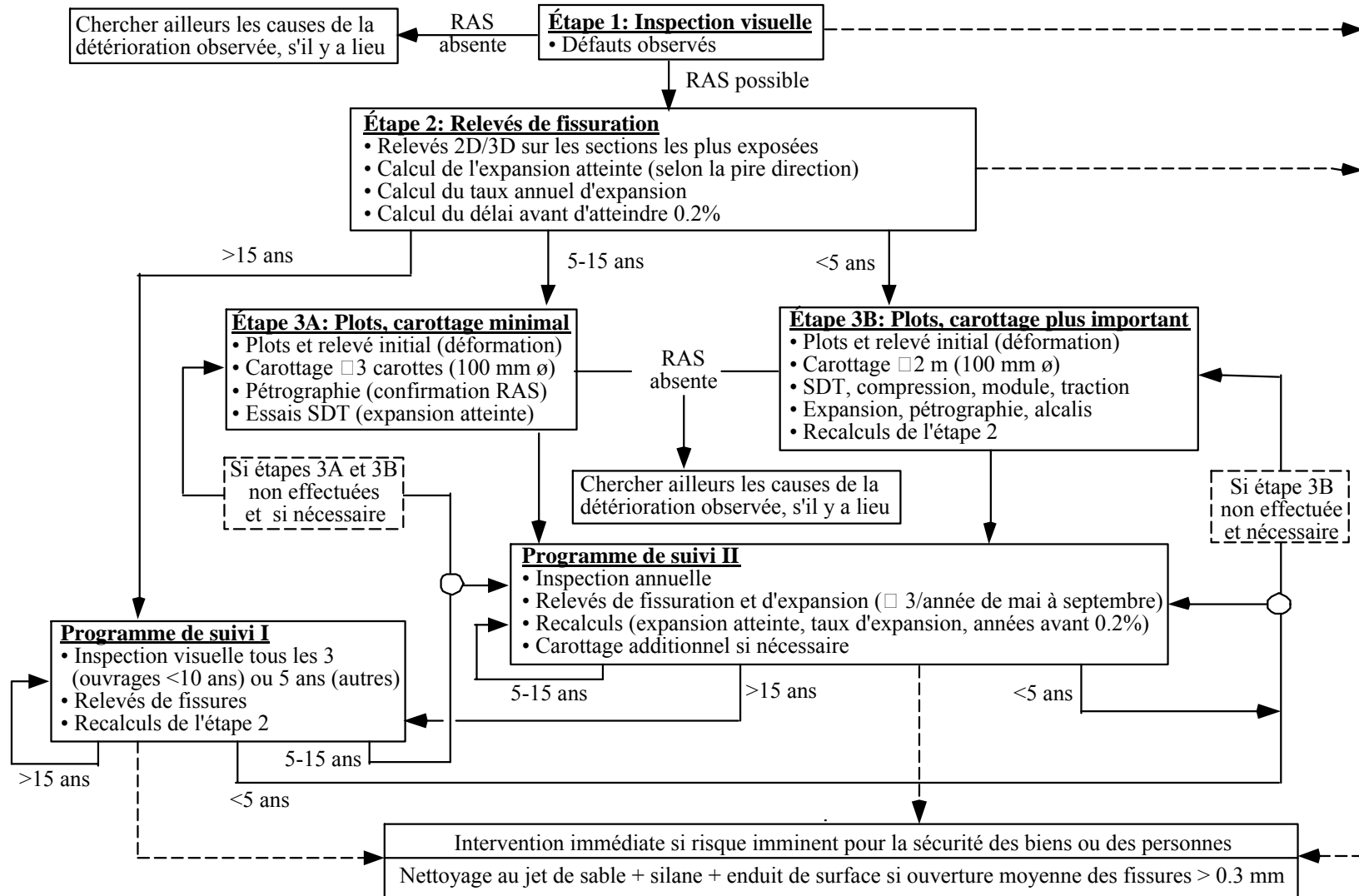


Fig. 2 - Organigramme proposé pour la gestion des ouvrages d'art affectés de r'activit' alcalis-silice.

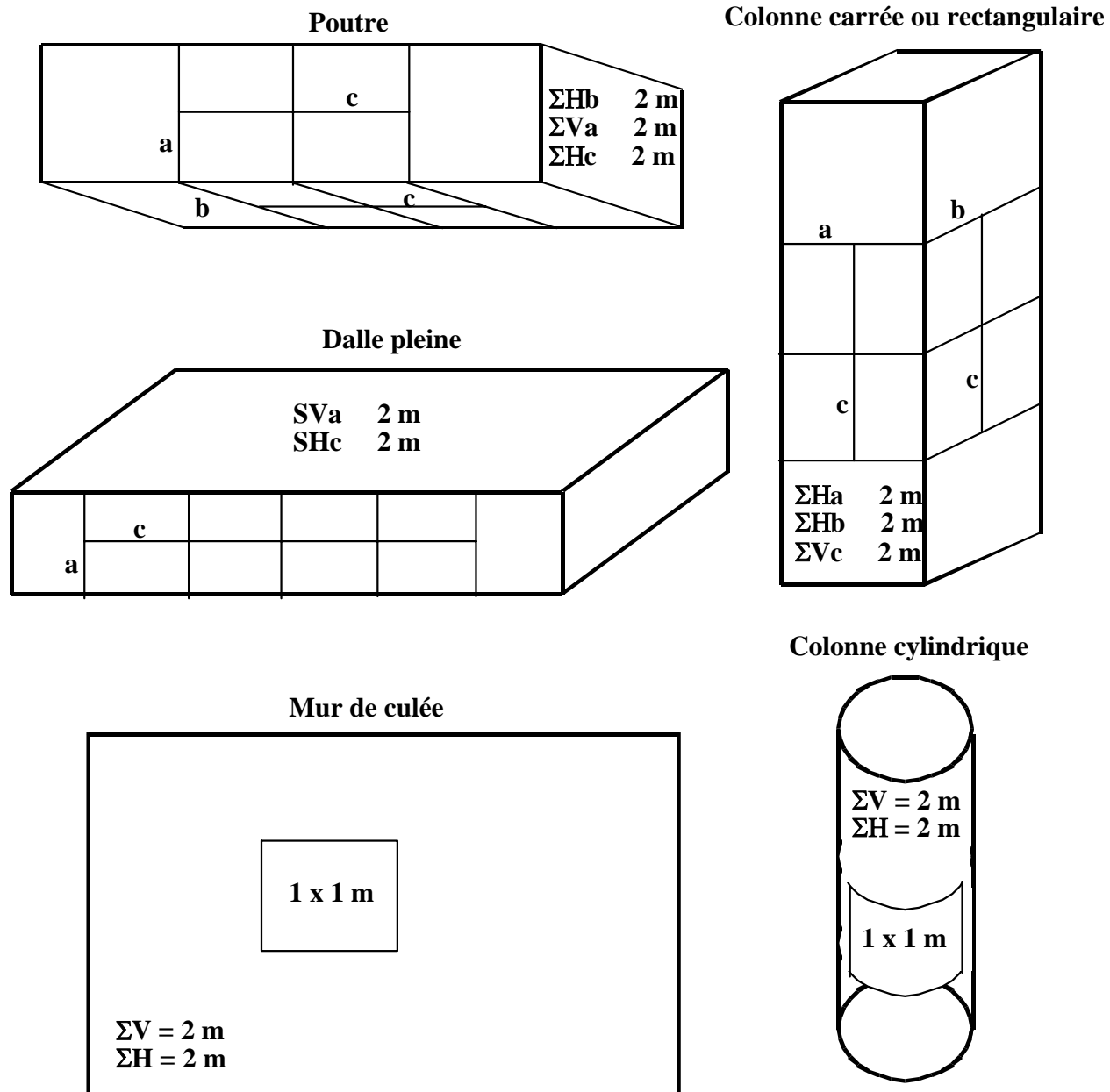


Fig. 3 – Schémas proposés pour les relevés de fissuration superficielle. (Le nombre de lignes horizontales et verticales selon les 2 ou 3 directions considérées varie de manière à totaliser au moins 2 m par direction).

Éléments structuraux critiques (poutres, colonnes,...)

Taux annuel d'expansion estimé à partir de l'expansion atteinte (fissuration de surface et/ou essai SDT) et l'âge de l'ouvrage

Âge (ans)	Expansion atteinte (%)																								
	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	0.060	0.070	0.080	0.090	0.100	0.110	0.120	0.130	0.140	0.150	0.160	0.170	0.180	0.190	0.200	0.210	0.220	0.230	0.240	0.250
6	0.0400	0.0800	0.1200	0.1600	0.2000	0.2400	0.2800	0.3200	0.3600	0.4000	0.4400	0.4800	0.5200	0.5600	0.6000	0.6400	0.6800	0.7200	0.7600	0.8000	0.8400	0.8800	0.9200	0.9600	1.0000
10	0.0080	0.0160	0.0240	0.0320	0.0400	0.0480	0.0560	0.0640	0.0720	0.0800	0.0880	0.0960	0.1040	0.1120	0.1200	0.1280	0.1360	0.1440	0.1520	0.1600	0.1680	0.1760	0.1840	0.1920	0.2000
15	0.0040	0.0080	0.0120	0.0160	0.0200	0.0240	0.0280	0.0320	0.0360	0.0400	0.0440	0.0480	0.0520	0.0560	0.0600	0.0640	0.0680	0.0720	0.0760	0.0800	0.0840	0.0880	0.0920	0.0960	0.1000
20	0.0027	0.0053	0.0080	0.0107	0.0133	0.0160	0.0187	0.0213	0.0240	0.0267	0.0293	0.0320	0.0347	0.0373	0.0400	0.0427	0.0453	0.0480	0.0507	0.0533	0.0560	0.0587	0.0613	0.0640	0.0667
25	0.0020	0.0040	0.0060	0.0080	0.0100	0.0120	0.0140	0.0160	0.0180	0.0200	0.0220	0.0240	0.0260	0.0280	0.0300	0.0320	0.0340	0.0360	0.0380	0.0400	0.0420	0.0440	0.0460	0.0480	0.0500
30	0.0016	0.0032	0.0048	0.0064	0.0080	0.0096	0.0112	0.0128	0.0144	0.0160	0.0176	0.0192	0.0208	0.0224	0.0240	0.0256	0.0272	0.0288	0.0304	0.0320	0.0336	0.0352	0.0368	0.0384	0.0400
35	0.0013	0.0027	0.0040	0.0053	0.0067	0.0080	0.0093	0.0107	0.0120	0.0133	0.0147	0.0160	0.0173	0.0187	0.0200	0.0213	0.0227	0.0240	0.0253	0.0267	0.0280	0.0293	0.0307	0.0320	0.0333
40	0.0011	0.0023	0.0034	0.0046	0.0057	0.0069	0.0080	0.0091	0.0103	0.0114	0.0126	0.0137	0.0149	0.0160	0.0171	0.0183	0.0194	0.0206	0.0217	0.0229	0.0240	0.0251	0.0263	0.0274	0.0286
45	0.0010	0.0020	0.0030	0.0040	0.0050	0.0060	0.0070	0.0080	0.0090	0.0100	0.0110	0.0120	0.0130	0.0140	0.0150	0.0160	0.0170	0.0180	0.0190	0.0200	0.0210	0.0220	0.0230	0.0240	0.0250
50	0.0009	0.0018	0.0027	0.0036	0.0044	0.0053	0.0062	0.0071	0.0080	0.0089	0.0098	0.0107	0.0116	0.0124	0.0133	0.0142	0.0151	0.0160	0.0169	0.0178	0.0187	0.0196	0.0204	0.0213	0.0222
55	0.0008	0.0016	0.0024	0.0032	0.0040	0.0048	0.0056	0.0064	0.0072	0.0080	0.0088	0.0096	0.0104	0.0112	0.0120	0.0128	0.0136	0.0144	0.0152	0.0160	0.0168	0.0176	0.0184	0.0192	0.0200
60	0.0007	0.0015	0.0022	0.0029	0.0036	0.0044	0.0051	0.0058	0.0065	0.0073	0.0080	0.0087	0.0095	0.0102	0.0109	0.0116	0.0124	0.0131	0.0138	0.0145	0.0153	0.0160	0.0167	0.0175	0.0182
65	0.0007	0.0013	0.0020	0.0027	0.0033	0.0040	0.0047	0.0053	0.0060	0.0067	0.0073	0.0080	0.0087	0.0093	0.0100	0.0107	0.0113	0.0120	0.0127	0.0133	0.0140	0.0147	0.0153	0.0160	0.0167
70	0.0006	0.0012	0.0018	0.0025	0.0031	0.0037	0.0043	0.0049	0.0055	0.0062	0.0068	0.0074	0.0080	0.0086	0.0092	0.0098	0.0105	0.0111	0.0117	0.0123	0.0129	0.0135	0.0142	0.0148	0.0154
75	0.0006	0.0011	0.0017	0.0023	0.0029	0.0034	0.0040	0.0046	0.0051	0.0057	0.0063	0.0069	0.0074	0.0080	0.0086	0.0091	0.0097	0.0103	0.0109	0.0114	0.0120	0.0126	0.0131	0.0137	0.0143

Estimé du nombre d'années avant d'atteindre une expansion de 0.20% et programme de suivi

Âge (ans)	Expansion atteinte (%)																								
	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	0.060	0.070	0.080	0.090	0.100	0.110	0.120	0.130	0.140	0.150	0.160	0.170	0.180	0.190	0.200	0.210	0.220	0.230	0.240	0.250
6	4.8	2.3	1.4	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	23.8	11.3	7.1	5.0	3.8	2.9	2.3	1.9	1.5	1.3	1.0	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	47.5	22.5	14.2	10.0	7.5	5.8	4.6	3.8	3.1	2.5	2.0	1.7	1.3	1.1	0.8	0.6	0.4	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	71.3	33.8	21.3	15.0	11.3	8.8	7.0	5.6	4.6	3.8	3.1	2.5	2.0	1.6	1.3	0.9	0.7	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	95.0	45.0	28.3	20.0	15.0	11.7	9.3	7.5	6.1	5.0	4.1	3.3	2.7	2.1	1.7	1.3	0.9	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	118.8	56.3	35.4	25.0	18.8	14.6	11.6	9.4	7.6	6.3	5.1	4.2	3.4	2.7	2.1	1.6	1.1	0.7	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	142.5	67.5	42.5	30.0	22.5	17.5	13.9	11.3	9.2	7.5	6.1	5.0	4.0	3.2	2.5	1.9	1.3	0.8	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	166.3	78.8	49.6	35.0	26.3	20.4	16.3	13.1	10.7	8.8	7.2	5.8	4.7	3.8	2.9	2.2	1.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	190.0	90.0	56.7	40.0	30.0	23.3	18.6	15.0	12.2	10.0	8.2	6.7	5.4	4.3	3.3	2.5	1.8	1.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	213.8	101.3	63.8	45.0	33.8	26.3	20.9	16.9	13.8	11.3	9.2	7.5	6.1	4.8	3.8	2.8	2.0	1.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
55	237.5	112.5	70.8	50.0	37.5	29.2	23.2	18.8	15.3	12.5	10.2	8.3	6.7	5.4	4.2	3.1	2.2	1.4	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60	261.3	123.8	77.9	55.0	41.3	32.1	25.5	20.6	16.8	13.8	11.3	9.2	7.4	5.9	4.6	3.4	2.4	1.5	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
65	285.0	135.0	85.0	60.0	45.0	35.0	27.9	22.5	18.3	15.0	12.3	10.0	8.1	6.4	5.0	3.8	2.6	1.7	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
70	308.8	146.3	92.1	65.0	48.8	37.9	30.2	24.4	19.9	16.3	13.3	10.8	8.8	7.0	5.4	4.1	2.9	1.8	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
75	332.5	157.5	99.2	70.0	52.5	40.8	32.5	26.3	21.4	17.5	14.3	11.7	9.4	7.5	5.8	4.4	3.1	1.9	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Suivi I (>15 ans) Inspection visuelle aux 5 ans Relevés de fissures aux 5 ans										Étape 3A/Suivi II (5-15 ans) Installation de plots Carottage (pétrographie, SDT) Inspection visuelle annuelle Relevés de fissures (≥ 3 fois/an) Relevés d'expansion (≥ 3 fois/an)					Étape 3B/Suivi II (<5 ans) Installation de plots Carottage (pétrographie, alcalis, essais mécaniques, SDT, expansion) Inspection visuelle annuelle Relevés de fissures (≥ 3 fois/an) Relevés d'expansion (≥ 3 fois/an)									

Fig. 4 - Grille d'intervention pour les éléments critiques basée sur l'expansion atteinte (fissuration ou SDT) et l'âge de l'ouvrage.

Éléments non critiques (dalles, culées, parapets, fondations,...)

Taux annuel d'expansion estimé à partir de l'expansion atteinte (fissuration de surface et/ou essai de fatigue SDT) et de l'âge de l'ouvrage

Âge (ans)	Expansion atteinte (%)																								
	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	0.060	0.070	0.080	0.090	0.100	0.110	0.120	0.130	0.140	0.150	0.160	0.170	0.180	0.190	0.200	0.210	0.220	0.230	0.240	0.250
6	0.0400	0.0800	0.1200	0.1600	0.2000	0.2400	0.2800	0.3200	0.3600	0.4000	0.4400	0.4800	0.5200	0.5600	0.6000	0.6400	0.6800	0.7200	0.7600	0.8000	0.8400	0.8800	0.9200	0.9600	1.0000
10	0.0080	0.0160	0.0240	0.0320	0.0400	0.0480	0.0560	0.0640	0.0720	0.0800	0.0880	0.0960	0.1040	0.1120	0.1200	0.1280	0.1360	0.1440	0.1520	0.1600	0.1680	0.1760	0.1840	0.1920	0.2000
15	0.0040	0.0080	0.0120	0.0160	0.0200	0.0240	0.0280	0.0320	0.0360	0.0400	0.0440	0.0480	0.0520	0.0560	0.0600	0.0640	0.0680	0.0720	0.0760	0.0800	0.0840	0.0880	0.0920	0.0960	0.1000
20	0.0027	0.0053	0.0080	0.0107	0.0133	0.0160	0.0187	0.0213	0.0240	0.0267	0.0293	0.0320	0.0347	0.0373	0.0400	0.0427	0.0453	0.0480	0.0507	0.0533	0.0560	0.0587	0.0613	0.0640	0.0667
25	0.0020	0.0040	0.0060	0.0080	0.0100	0.0120	0.0140	0.0160	0.0180	0.0200	0.0220	0.0240	0.0260	0.0280	0.0300	0.0320	0.0340	0.0360	0.0380	0.0400	0.0420	0.0440	0.0460	0.0480	0.0500
30	0.0016	0.0032	0.0048	0.0064	0.0080	0.0096	0.0112	0.0128	0.0144	0.0160	0.0176	0.0192	0.0208	0.0224	0.0240	0.0256	0.0272	0.0288	0.0304	0.0320	0.0336	0.0352	0.0368	0.0384	0.0400
35	0.0013	0.0027	0.0040	0.0053	0.0067	0.0080	0.0093	0.0107	0.0120	0.0133	0.0147	0.0160	0.0173	0.0187	0.0200	0.0213	0.0227	0.0240	0.0253	0.0267	0.0280	0.0293	0.0307	0.0320	0.0333
40	0.0011	0.0023	0.0034	0.0046	0.0057	0.0069	0.0080	0.0091	0.0103	0.0114	0.0126	0.0137	0.0149	0.0160	0.0171	0.0183	0.0194	0.0206	0.0217	0.0229	0.0240	0.0251	0.0263	0.0274	0.0286
45	0.0010	0.0020	0.0030	0.0040	0.0050	0.0060	0.0070	0.0080	0.0090	0.0100	0.0110	0.0120	0.0130	0.0140	0.0150	0.0160	0.0170	0.0180	0.0190	0.0200	0.0210	0.0220	0.0230	0.0240	0.0250
50	0.0009	0.0018	0.0027	0.0036	0.0044	0.0053	0.0062	0.0071	0.0080	0.0089	0.0098	0.0107	0.0116	0.0124	0.0133	0.0142	0.0151	0.0160	0.0169	0.0178	0.0187	0.0196	0.0204	0.0213	0.0222
55	0.0008	0.0016	0.0024	0.0032	0.0040	0.0048	0.0056	0.0064	0.0072	0.0080	0.0088	0.0096	0.0104	0.0112	0.0120	0.0128	0.0136	0.0144	0.0152	0.0160	0.0168	0.0176	0.0184	0.0192	0.0200
60	0.0007	0.0015	0.0022	0.0029	0.0036	0.0044	0.0051	0.0058	0.0065	0.0073	0.0080	0.0087	0.0095	0.0102	0.0109	0.0116	0.0124	0.0131	0.0138	0.0145	0.0153	0.0160	0.0167	0.0175	0.0182
65	0.0007	0.0013	0.0020	0.0027	0.0033	0.0040	0.0047	0.0053	0.0060	0.0067	0.0073	0.0080	0.0087	0.0093	0.0100	0.0107	0.0113	0.0120	0.0127	0.0133	0.0140	0.0147	0.0153	0.0160	0.0167
70	0.0006	0.0012	0.0018	0.0025	0.0031	0.0037	0.0043	0.0049	0.0055	0.0062	0.0068	0.0074	0.0080	0.0086	0.0092	0.0098	0.0105	0.0111	0.0117	0.0123	0.0129	0.0135	0.0142	0.0148	0.0154
75	0.0006	0.0011	0.0017	0.0023	0.0029	0.0034	0.0040	0.0046	0.0051	0.0057	0.0063	0.0069	0.0074	0.0080	0.0086	0.0091	0.0097	0.0103	0.0109	0.0114	0.0120	0.0126	0.0131	0.0137	0.0143

Estimé du nombre d'années avant d'atteindre une expansion de 0.20% et programme de suivi

Âge (ans)	Expansion atteinte (%)																								
	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	0.060	0.070	0.080	0.090	0.100	0.110	0.120	0.130	0.140	0.150	0.160	0.170	0.180	0.190	0.200	0.210	0.220	0.230	0.240	0.250
6	4.8	2.3	1.4	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	23.8	11.3	7.1	5.0	3.8	2.9	2.3	1.9	1.5	1.3	1.0	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	47.5	22.5	14.2	10.0	7.5	5.8	4.6	3.8	3.1	2.5	2.0	1.7	1.3	1.1	0.8	0.6	0.4	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	71.3	33.8	21.3	15.0	11.3	8.8	7.0	5.6	4.6	3.8	3.1	2.5	2.0	1.6	1.3	0.9	0.7	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	95.0	45.0	28.3	20.0	15.0	11.7	9.3	7.5	6.1	5.0	4.1	3.3	2.7	2.1	1.7	1.3	0.9	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	118.8	56.3	35.4	25.0	18.8	14.6	11.6	9.4	7.6	6.3	5.1	4.2	3.4	2.7	2.1	1.6	1.1	0.7	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	142.5	67.5	42.5	30.0	22.5	17.5	13.9	11.3	9.2	7.5	6.1	5.0	4.0	3.2	2.5	1.9	1.3	0.8	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	166.3	78.8	49.6	35.0	26.3	20.4	16.3	13.1	10.7	8.8	7.2	5.8	4.7	3.8	2.9	2.2	1.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	190.0	90.0	56.7	40.0	30.0	23.3	18.6	15.0	12.2	10.0	8.2	6.7	5.4	4.3	3.3	2.5	1.8	1.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	213.8	101.3	63.8	45.0	33.8	26.3	20.9	16.9	13.8	11.3	9.2	7.5	6.1	4.8	3.8	2.8	2.0	1.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
55	237.5	112.5	70.8	50.0	37.5	29.2	23.2	18.8	15.3	12.5	10.2	8.3	6.7	5.4	4.2	3.1	2.2	1.4	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60	261.3	123.8	77.9	55.0	41.3	32.1	25.5	20.6	16.8	13.8	11.3	9.2	7.4	5.9	4.6	3.4	2.4	1.5	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
65	285.0	135.0	85.0	60.0	45.0	35.0	27.9	22.5	18.3	15.0	12.3	10.0	8.1	6.4	5.0	3.8	2.6	1.7	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
70	308.8	146.3	92.1	65.0	48.8	37.9	30.2	24.4	19.9	16.3	13.3	10.8	8.8	7.0	5.4	4.1	2.9	1.8	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
75	332.5	157.5	99.2	70.0	52.5	40.8	32.5	26.3	21.4	17.5	14.3	11.7	9.4	7.5	5.8	4.4	3.1	1.9	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Suivi I (>10 ans) Inspection visuelle aux 5 ans Relevés de fissures aux 5 ans												Étape 3A/Suivi II (3-10 ans) Installation de plots Carottage (pétrographie, SDT) Inspection visuelle annuelle Relevés de fissures (≥ 3 fois/an) Relevés d'expansion (≥ 3 fois/an)						Étape 3B/Suivi II (<3 ans) Installation de plots Carottage (pétro., alcalis, essais méc., SDT, expansion) Inspection visuelle annuelle Relevés de fissures (≥ 3 fois/an) Relevés d'expansion (≥ 3 fois/an)							

Fig. 5 - Grille d'intervention pour les éléments non critiques basée sur l'expansion atteinte (fissuration ou SDT) et l'âge de l'ouvrage.

Éléments structuraux critiques (poutres, colonnes,...)

Nombre d'années avant d'atteindre une expansion de 0.20% et programme de suivi

Taux (%/an)	Expansion atteinte (%)																								
	0,010	0,020	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,090	0,100	0,110	0,120	0,130	0,140	0,150	0,160	0,170	0,180	0,190	0,200	0,210	0,220	0,230	0,240	0,250
0,030	6,3	6,0	5,7	5,3	5,0	4,7	4,3	4,0	3,7	3,3	3,0	2,7	2,3	2,0	1,7	1,3	1,0	0,7	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,029	6,6	6,2	5,9	5,5	5,2	4,8	4,5	4,1	3,8	3,4	3,1	2,8	2,4	2,1	1,7	1,4	1,0	0,7	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,028	6,8	6,4	6,1	5,7	5,4	5,0	4,6	4,3	3,9	3,6	3,2	2,9	2,5	2,1	1,8	1,4	1,1	0,7	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,027	7,0	6,7	6,3	5,9	5,6	5,2	4,8	4,4	4,1	3,7	3,3	3,0	2,6	2,2	1,9	1,5	1,1	0,7	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,026	7,3	6,9	6,5	6,2	5,8	5,4	5,0	4,6	4,2	3,8	3,5	3,1	2,7	2,3	1,9	1,5	1,2	0,8	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,025	7,6	7,2	6,8	6,4	6,0	5,6	5,2	4,8	4,4	4,0	3,6	3,2	2,8	2,4	2,0	1,6	1,2	0,8	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,024	7,9	7,5	7,1	6,7	6,3	5,8	5,4	5,0	4,6	4,2	3,8	3,3	2,9	2,5	2,1	1,7	1,3	0,8	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,023	8,3	7,8	7,4	7,0	6,5	6,1	5,7	5,2	4,8	4,3	3,9	3,5	3,0	2,6	2,2	1,7	1,3	0,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,022	8,6	8,2	7,7	7,3	6,8	6,4	5,9	5,5	5,0	4,5	4,1	3,6	3,2	2,7	2,3	1,8	1,4	0,9	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,021	9,0	8,6	8,1	7,6	7,1	6,7	6,2	5,7	5,2	4,8	4,3	3,8	3,3	2,9	2,4	1,9	1,4	1,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,020	9,5	9,0	8,5	8,0	7,5	7,0	6,5	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,019	10,0	9,5	8,9	8,4	7,9	7,4	6,8	6,3	5,8	5,3	4,7	4,2	3,7	3,2	2,6	2,1	1,6	1,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,018	10,6	10,0	9,4	8,9	8,3	7,8	7,2	6,7	6,1	5,6	5,0	4,4	3,9	3,3	2,8	2,2	1,7	1,1	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,017	11,2	10,6	10,0	9,4	8,8	8,2	7,6	7,1	6,5	5,9	5,3	4,7	4,1	3,5	2,9	2,4	1,8	1,2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,016	11,9	11,3	10,6	10,0	9,4	8,8	8,1	7,5	6,9	6,3	5,6	5,0	4,4	3,8	3,1	2,5	1,9	1,3	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,015	12,7	12,0	11,3	10,7	10,0	9,3	8,7	8,0	7,3	6,7	6,0	5,3	4,7	4,0	3,3	2,7	2,0	1,3	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,014	13,6	12,9	12,1	11,4	10,7	10,0	9,3	8,6	7,9	7,1	6,4	5,7	5,0	4,3	3,6	2,9	2,1	1,4	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,013	14,6	13,8	13,1	12,3	11,5	10,8	10,0	9,2	8,5	7,7	6,9	6,2	5,4	4,6	3,8	3,1	2,3	1,5	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,012	15,8	15,0	14,2	13,3	12,5	11,7	10,8	10,0	9,2	8,3	7,5	6,7	5,8	5,0	4,2	3,3	2,5	1,7	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,011	17,3	16,4	15,5	14,5	13,6	12,7	11,8	10,9	10,0	9,1	8,2	7,3	6,4	5,5	4,5	3,6	2,7	1,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,010	19,0	18,0	17,0	16,0	15,0	14,0	13,0	12,0	11,0	10,0	9,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,009	21,1	20,0	18,9	17,8	16,7	15,6	14,4	13,3	12,2	11,1	10,0	8,9	7,8	6,7	5,6	4,4	3,3	2,2	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,008	23,8	22,5	21,3	20,0	18,8	17,5	16,3	15,0	13,8	12,5	11,3	10,0	8,8	7,5	6,3	5,0	3,8	2,5	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,007	27,1	25,7	24,3	22,9	21,4	20,0	18,6	17,1	15,7	14,3	12,9	11,4	10,0	8,6	7,1	5,7	4,3	2,9	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,006	31,7	30,0	28,3	26,7	25,0	23,3	21,7	20,0	18,3	16,7	15,0	13,3	11,7	10,0	8,3	6,7	5,0	3,3	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,005	38,0	36,0	34,0	32,0	30,0	28,0	26,0	24,0	22,0	20,0	18,0	16,0	14,0	12,0	10,0	8,0	6,0	4,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,004	47,5	45,0	42,5	40,0	37,5	35,0	32,5	30,0	27,5	25,0	22,5	20,0	17,5	15,0	12,5	10,0	7,5	5,0	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,003	63,3	60,0	56,7	53,3	50,0	46,7	43,3	40,0	36,7	33,3	30,0	26,7	23,3	20,0	16,7	13,3	10,0	6,7	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,002	95,0	90,0	85,0	80,0	75,0	70,0	65,0	60,0	55,0	50,0	45,0	40,0	35,0	30,0	25,0	20,0	15,0	10,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,001	190,0	180,0	170,0	160,0	150,0	140,0	130,0	120,0	110,0	100,0	90,0	80,0	70,0	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Suivi I (>15 ans) Inspection visuelle aux 5 ans Relevés de fissures aux 5 ans										Étape 3A/Suivi II (5-15 ans) Installation de plots Carottage (pétrographie, SDT) Inspection visuelle annuelle Relevés de fissures (≥ 3 fois/an) Relevés d'expansion (≥ 3 fois/an)					Étape 3B/Suivi II (<5 ans) Installation de plots Carottage (pétrographie, alcalis, essais mécaniques, SDT, expansion) Inspection visuelle annuelle Relevés de fissures (≥ 3 fois/an) Relevés d'expansion (≥ 3 fois/an)									

Fig. 6 - Grille d'intervention pour les **éléments structuraux critiques** basée sur un estimé de l'expansion atteinte (fissuration et/ou SDT) et le taux d'expansion mesuré.

Éléments non critiques (dalles, culées, parapets, fondations,...)
Nombre d'années avant d'atteindre une expansion de 0.20% et programme de suivi

Taux (%/an)	Expansion atteinte (%)																								
	0,010	0,020	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,090	0,100	0,110	0,120	0,130	0,140	0,150	0,160	0,170	0,180	0,190	0,200	0,210	0,220	0,230	0,240	0,250
0,030	6,3	6,0	5,7	5,3	5,0	4,7	4,3	4,0	3,7	3,3	3,0	2,7	2,3	2,0	1,7	1,3	1,0	0,7	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,029	6,6	6,2	5,9	5,5	5,2	4,8	4,5	4,1	3,8	3,4	3,1	2,8	2,4	2,1	1,7	1,4	1,0	0,7	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,028	6,8	6,4	6,1	5,7	5,4	5,0	4,6	4,3	3,9	3,6	3,2	2,9	2,5	2,1	1,8	1,4	1,1	0,7	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,027	7,0	6,7	6,3	5,9	5,6	5,2	4,8	4,4	4,1	3,7	3,3	3,0	2,6	2,2	1,9	1,5	1,1	0,7	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,026	7,3	6,9	6,5	6,2	5,8	5,4	5,0	4,6	4,2	3,8	3,5	3,1	2,7	2,3	1,9	1,5	1,2	0,8	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,025	7,6	7,2	6,8	6,4	6,0	5,6	5,2	4,8	4,4	4,0	3,6	3,2	2,8	2,4	2,0	1,6	1,2	0,8	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,024	7,9	7,5	7,1	6,7	6,3	5,8	5,4	5,0	4,6	4,2	3,8	3,3	2,9	2,5	2,1	1,7	1,3	0,8	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,023	8,3	7,8	7,4	7,0	6,5	6,1	5,7	5,2	4,8	4,3	3,9	3,5	3,0	2,6	2,2	1,7	1,3	0,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,022	8,6	8,2	7,7	7,3	6,8	6,4	5,9	5,5	5,0	4,5	4,1	3,6	3,2	2,7	2,3	1,8	1,4	0,9	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,021	9,0	8,6	8,1	7,6	7,1	6,7	6,2	5,7	5,2	4,8	4,3	3,8	3,3	2,9	2,4	1,9	1,4	1,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,020	9,5	9,0	8,5	8,0	7,5	7,0	6,5	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,019	10,0	9,5	8,9	8,4	7,9	7,4	6,8	6,3	5,8	5,3	4,7	4,2	3,7	3,2	2,6	2,1	1,6	1,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,018	10,6	10,0	9,4	8,9	8,3	7,8	7,2	6,7	6,1	5,6	5,0	4,4	3,9	3,3	2,8	2,2	1,7	1,1	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,017	11,2	10,6	10,0	9,4	8,8	8,2	7,6	7,1	6,5	5,9	5,3	4,7	4,1	3,5	2,9	2,4	1,8	1,2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,016	11,9	11,3	10,6	10,0	9,4	8,8	8,1	7,5	6,9	6,3	5,6	5,0	4,4	3,8	3,1	2,5	1,9	1,3	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,015	12,7	12,0	11,3	10,7	10,0	9,3	8,7	8,0	7,3	6,7	6,0	5,3	4,7	4,0	3,3	2,7	2,0	1,3	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,014	13,6	12,9	12,1	11,4	10,7	10,0	9,3	8,6	7,9	7,1	6,4	5,7	5,0	4,3	3,6	2,9	2,1	1,4	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,013	14,6	13,8	13,1	12,3	11,5	10,8	10,0	9,2	8,5	7,7	6,9	6,2	5,4	4,6	3,8	3,1	2,3	1,5	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,012	15,8	15,0	14,2	13,3	12,5	11,7	10,8	10,0	9,2	8,3	7,5	6,7	5,8	5,0	4,2	3,3	2,5	1,7	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,011	17,3	16,4	15,5	14,5	13,6	12,7	11,8	10,9	10,0	9,1	8,2	7,3	6,4	5,5	4,5	3,6	2,7	1,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,010	19,0	18,0	17,0	16,0	15,0	14,0	13,0	12,0	11,0	10,0	9,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,009	21,1	20,0	18,9	17,8	16,7	15,6	14,4	13,3	12,2	11,1	10,0	8,9	7,8	6,7	5,6	4,4	3,3	2,2	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,008	23,8	22,5	21,3	20,0	18,8	17,5	16,3	15,0	13,8	12,5	11,3	10,0	8,8	7,5	6,3	5,0	3,8	2,5	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,007	27,1	25,7	24,3	22,9	21,4	20,0	18,6	17,1	15,7	14,3	12,9	11,4	10,0	8,6	7,1	5,7	4,3	2,9	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,006	31,7	30,0	28,3	26,7	25,0	23,3	21,7	20,0	18,3	16,7	15,0	13,3	11,7	10,0	8,3	6,7	5,0	3,3	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,005	38,0	36,0	34,0	32,0	30,0	28,0	26,0	24,0	22,0	20,0	18,0	16,0	14,0	12,0	10,0	8,0	6,0	4,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,004	47,5	45,0	42,5	40,0	37,5	35,0	32,5	30,0	27,5	25,0	22,5	20,0	17,5	15,0	12,5	10,0	7,5	5,0	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,003	63,3	60,0	56,7	53,3	50,0	46,7	43,3	40,0	36,7	33,3	30,0	26,7	23,3	20,0	16,7	13,3	10,0	6,7	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,002	95,0	90,0	85,0	80,0	75,0	70,0	65,0	60,0	55,0	50,0	45,0	40,0	35,0	30,0	25,0	20,0	15,0	10,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,001	190,0	180,0	170,0	160,0	150,0	140,0	130,0	120,0	110,0	100,0	90,0	80,0	70,0	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

<p>Suivi I (>10 ans) Inspection visuelle aux 5 ans Relevés de fissures aux 5 ans</p>	<p>Étape 3A/Suivi II (3-10 ans) Installation de plots Carottage (pétrographie, SDT) Inspection visuelle annuelle Relevés de fissures (≥ 3 fois/an) Relevés d'expansion (≥ 3 fois/an)</p>	<p>Étape 3B/Suivi II (<3 ans) Installation de plots Carottage (pétrographie, alcalis, essais mécaniques, SDT, expansion) Inspection visuelle annuelle Relevés de fissures (≥ 3 fois/an) Relevés d'expansion (≥ 3 fois/an)</p>
--	--	---

Fig. 7 - Grille d'intervention pour les éléments non critiques basée sur un estimé de l'expansion atteinte (fissuration et/ou SDT) et le taux d'expansion mesuré.