

IV-Alcali-Réaction

1. Présentation du phénomène

La réaction alcali-granat est une pathologie des bétons qui se caractérise par une réaction chimique entre la silice amorphe ou mal cristallisée contenue dans les granulats réactifs et certains ions de la solution interstitielle. Le phénomène de l'alcali-réaction est maintenant bien connu et qui n'est visible dans les ouvrages qu'après une période de 2 à 10 ans après leur construction. En l'absence de précaution, cette pathologie peut apparaître dans les parties d'ouvrages, les plus sévèrement exposées à l'humidité. On observe la formation d'un gel gonflant qui peut provoquer, en particulier, au cœur du béton, des déformations et une microfissuration du matériau. Les contraintes expansives génèrent, si elles dépassent la résistance en traction du béton, un décollement à l'interface pâte-granulats et la formation de microfissures qui se matérialise en surface par une fissuration à multi orientation (figure 1).

Le phénomène d'alcali-réaction résulte de l'action des alcalins solubles (oxyde de sodium Na_2O et oxyde de potassium K_2O) du béton sur une certaine forme de silice réactive, en présence d'eau. Il correspond à un ensemble de réactions chimiques complexes qui peuvent se déclencher entre certaines phases minérales contenues dans les granulats et la solution interstitielle fortement basique du béton, lorsque plusieurs conditions sont réunies simultanément : présence d'une forme de silice des granulats dite « potentiellement réactive », des alcalins du béton et de l'eau en quantité suffisante.

Ces phénomènes sont préoccupants pour les gestionnaires des structures atteintes car ils mettent en péril la sécurité des personnes et l'exploitation des ouvrages. De plus, il n'existe aucun moyen d'arrêter la réaction. Ainsi, la prédiction de l'évolution du gonflement et des dégradations des ouvrages atteints et l'évaluation de l'efficacité et de la périodicité des opérations d'entretien sont des points cruciaux.



Figure 1: Exemple de béton dégradé par l'alcali-réaction

2. Mécanismes réactionnels :

Trois conditions doivent être réunies simultanément pour que l'alkali-réaction se développe dans un béton :

- La présence d'un granulat potentiellement réactif ;
- Des alcalins (Na^+ , K^+) en quantités suffisantes dans la solution interstitielle ($\text{pH} > 12,5$) pour maintenir une concentration en ions hydroxydes élevée ;
- Les conditions d'humidité relative excèdent 80-85%.

Il existe 3 types de réactions alkali-granulats :

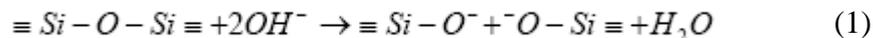
- Réaction alkali-silice
- Réaction alkali-carbonate
- Réaction alkali-silicate

1- Réaction Alkali-Silice :

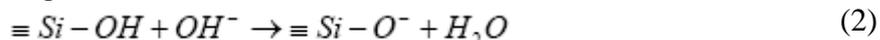
C'est le cas de réaction le plus courant qui consiste en l'attaque et la destruction du réseau siliceux dans le granulat par les ions hydroxydes contenus dans la solution interstitielle suivies de la création d'un gel silico-alkalin.

Initialement le réseau siliceux se compose de liaisons silanols (élément $\equiv \text{Si} - \text{OH}$) et de ponts siloxanes (élément $\equiv \text{Si} - \text{O} - \text{Si} \equiv$). Son attaque par les ions OH^- se décompose en deux phases. La figure 2 illustre ce mécanisme [Mécanisme de Dent-Glasser et Kataola, 1981].

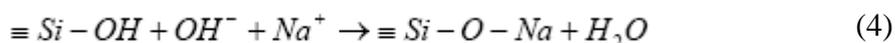
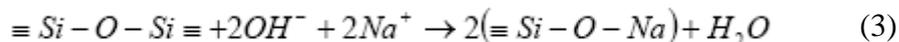
- La rupture des ponts siloxanes,



- L'attaque des liaisons silanols,



Les charges négatives engendrées par l'attaque des liaisons silanols et des ponts siloxanes sont contrebalancées par des alcalins (Na^+ ou K^+). Cela conduit à la formation d'un gel silico-alkalin de la forme **Si-O-Na**.



Ces réactions conduisent à la découpe du réseau siliceux, à la formation d'un gel silico-alkalin et au passage en solution de la silice réactive (sous la forme d'un triacide :

H_3SiO_4^- , $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ ou HSiO_4^{3-} selon la valeur du pH.

Les ions calcium [Ca^{++}] ont un rôle important dans la réaction, provenant de l'hydroxyde de calcium [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], entraîne un gonflement plus important. Le fort pH de la portlandite maintient la concentration en ions OH^- élevée et entretient la réaction.

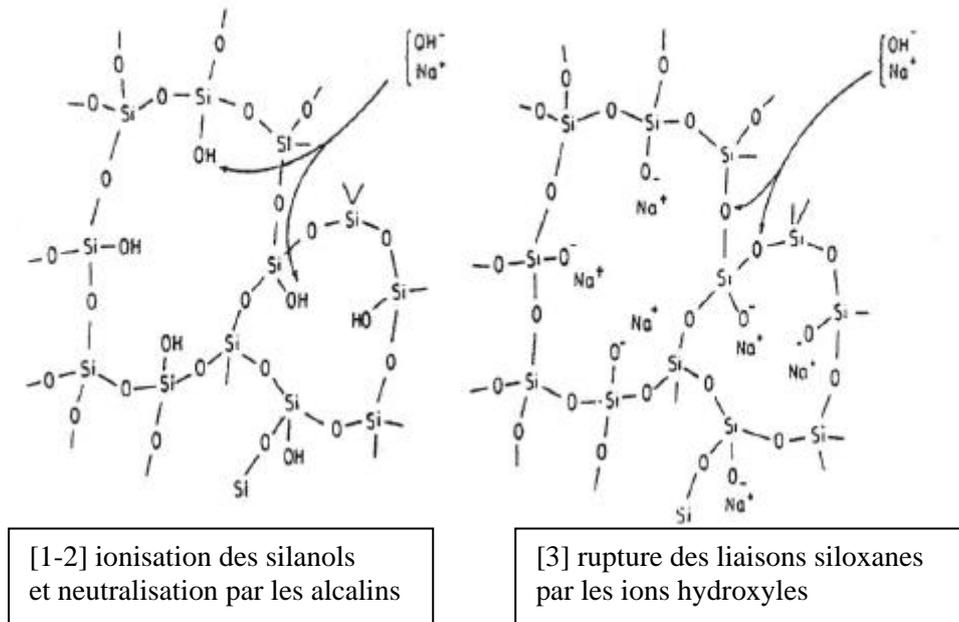


Figure 2: Schéma réactionnel proposé par Dent-Glasser et Kataoka

2- Réaction Alkali-Carbonate

Cette réaction n'est observée que pour quelques calcaires dolomitiques et les alcalis du ciment. Les mécanismes de détérioration sont différents de ceux observés dans la réaction alcali-silice. Les gels qui se forment gonflent d'une manière similaire à l'argile.

La réaction qui se produit pour ce type de cas, c'est une **dédolomérisation**, c'est-à-dire une modification de la dolomie $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$:



Cependant, ces réactions ne sont pas bien élucidées, surtout le rôle de l'argile dans les granulats n'est pas bien clair, bien que l'expansion semble toujours être associée à sa présence.

3- Réaction Alkali-Silicate

Cette réaction est semblable à celle de la réaction alcali-silice, mais de cinétique plus lente. Le produit de la réaction est semblable aussi à un gel silico-alcalin gonflant capable de se diffuser dans la pâte de ciment voisine d'où extension du phénomène puis fissuration et dès fois une exsudation de gel en surface du béton.

3. Essai de réactivité des granulats

Il n'y a pas de méthode simple pour déterminer si un granulat occasionne une dilatation excessive en raison d'une réaction avec les alcalis du ciment. En absence de donnée sur le comportement en service d'un granulat, il est néanmoins possible de déterminer la réactivité potentielle du granulat, mais non de prouver qu'une réaction destructrice se produira. Un essai chimique rapide est prescrit dans la norme ASTM C 289-94, qui consiste à déterminer la réduction de l'alcalinité d'une solution NaOH en contact avec granulat pulvérisé à 80°C et l'on mesure la quantité de silice dissoute. La réaction alcali-silice est possible (réaction potentielle) avec les risques de désordres, si les résultats se situent à droite de la courbe représentée à la figure 3 tirée de la norme ASTM C 289-94.

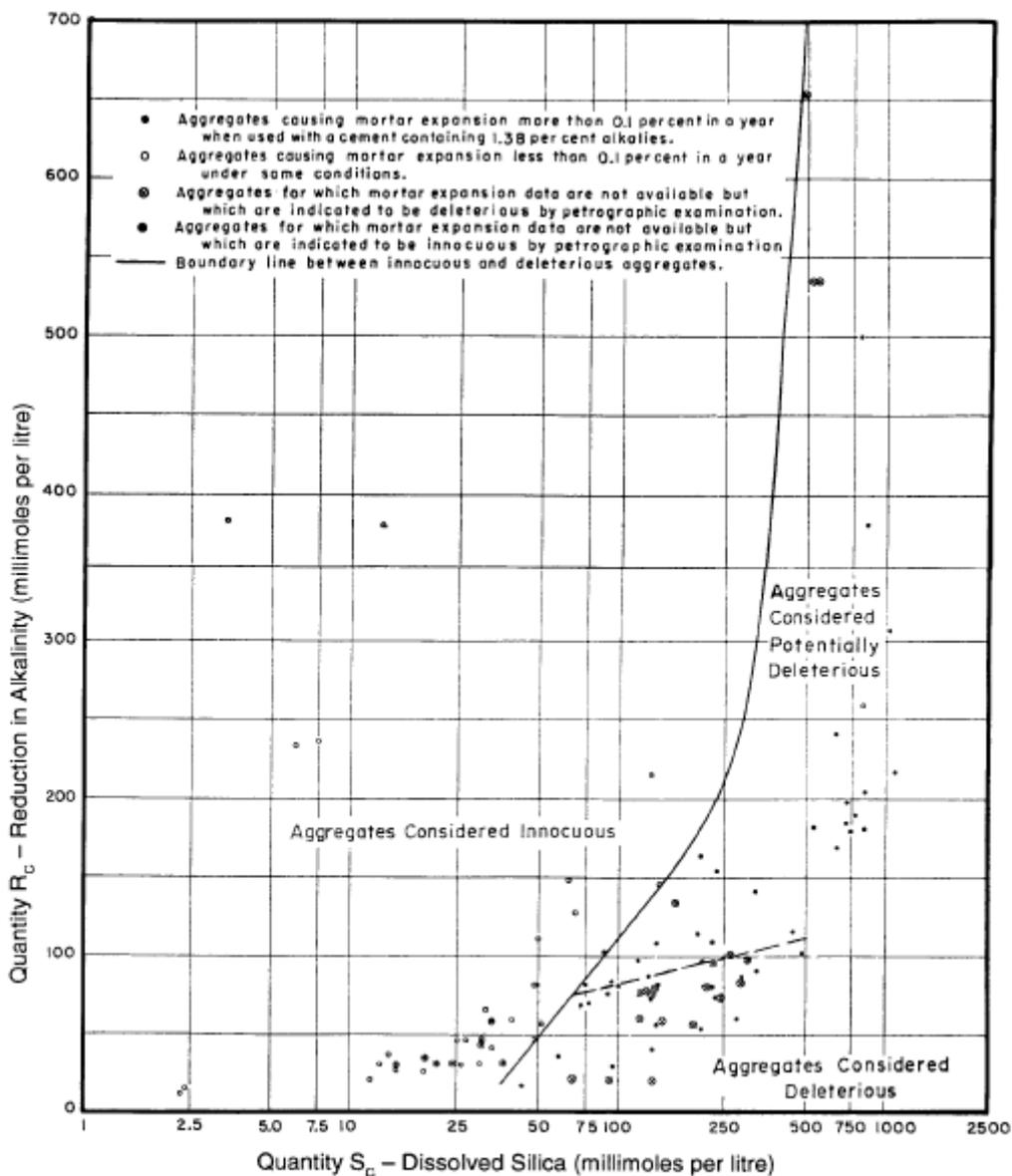


FIG. X1.1 Illustration of Division Between Innocuous and Deleterious Aggregates on Basis of Reduction In Alkalinity Test

Figure 3: résultats de l'essai chimique ASTM C 289-94

Cette courbe sépare en deux zones les valeurs trouvées lors des essais, l'une correspondant à des granulats potentiellement réactifs et l'autre à des granulats ne présentant aucun risque.

On peut aussi déterminer par l'essai sur prisme de mortier destiné à la détermination de la réactivité physique des granulats, telle que décrite par la norme ASTM C 227-90, le granulats suspect, qui est concassé et recombinaé suivant une granulométrie définie, sert à confectionner des prismes en ciment-sable en utilisant un ciment présentant une teneur équivalente en alcalis supérieure de 0,6% à 0,8%. Les prismes sont conservés dans l'eau à 38°C, température à laquelle la dilatation est plus rapide et habituellement plus élevée qu'à des températures inférieures ou supérieures. Les mesures de dilatation sont relevées après 14 jours puis à 1, 2, 3, 4, 6, 9 et 12 mois et au besoin ensuite tous les 6 mois. La réaction est également accélérée par l'utilisation d'un rapport eau/ciment élevé.

4. Pathologie et gestion des ouvrages malades

1. Description des désordres et dépistage

La présomption initiale de l'existence d'une alcali-réaction dans un ouvrage est généralement fondée sur la présence de symptômes visuels détectés lors d'une visite ou d'une inspection. Parmi les manifestations les plus connues, sont souvent citées les fissurations sous forme de maillage, plus ou moins denses selon le degré d'évolution de la réaction, ou orientées lorsque des efforts de compression s'opposent au gonflement interne (cas des ouvrages précontraints, ou des poteaux par exemple). Mais une réaction de gonflement peut aussi engendrer bien d'autres formes de désordres apparents sur un ouvrage, tels que mouvements, déformations, gonflements différentiels, petits cratères (*pop-out*), etc. Dans certains cas extrêmes et qui sont rares comme le cas des structures insuffisamment ferraiillées, le gonflement du béton peut provoquer la rupture d'armatures passives.

2. Diagnostic

Il n'existe pas de défaut ou de désordre observable sur un ouvrage qui soit caractéristique d'une alcali-réaction. Il est donc nécessaire d'avoir recours à des prélèvements d'échantillons de béton pour pouvoir porter un diagnostic fiable de la maladie.

Un premier diagnostic rapide de l'alcali-réaction peut être tenté avec un essai de fluorescence des ions uranyle. Ce test, simple et rapide, consiste à pulvériser sur un échantillon de béton une solution d'acétate d'uranyle puis à soumettre l'échantillon à un éclairage sous UV. La présence de produits issus de l'alcali-réaction se traduit par une fluorescence jaune-verte. Des artefacts pouvant aussi conduire à une fluorescence, il convient donc de confirmer systématiquement le test par des examens au microscope électronique à balayage (MEB). Cet essai est surtout utile pour donner une information sur l'étendue de la réaction alcali-silice, et pour orienter le choix des échantillons soumis à l'examen au MEB. Le MEB, associé à la microanalyse élémentaire reste actuellement la seule technique permettant d'identifier des produits résultant d'une alcali-réaction.

3. Surveillance et évaluation de l'état des ouvrages

La surveillance des ouvrages atteints d'alcali-réaction constitue en premier lieu un moyen d'assurer un suivi quantifié de l'évolution des désordres afin de pouvoir prendre des décisions adéquates pour la gestion des ouvrages. Elle permet également d'obtenir des données d'entrée pour la modélisation qui s'avère indispensable pour l'évaluation de leur capacité portante.

▪ Suivi de la fissuration

La méthode la plus courante pour suivre une fissuration consiste à relever à l'aide d'un fissuromètre ou d'une loupe, et de façon exhaustive, toutes les fissures interceptant un repère constitué de quatre axes tracés dans une zone d'un mètre carré sur la partie de parement à

étudier (figure 4). Compte tenu de la précision requise dans l'application de cette méthode, il est conseillé de mesurer la largeur des fissures avec une précision de 0,05 mm. L'emploi d'un appareil photographique numérique, équipé d'une loupe de grossissement ($\times 10$), facilite cette opération.

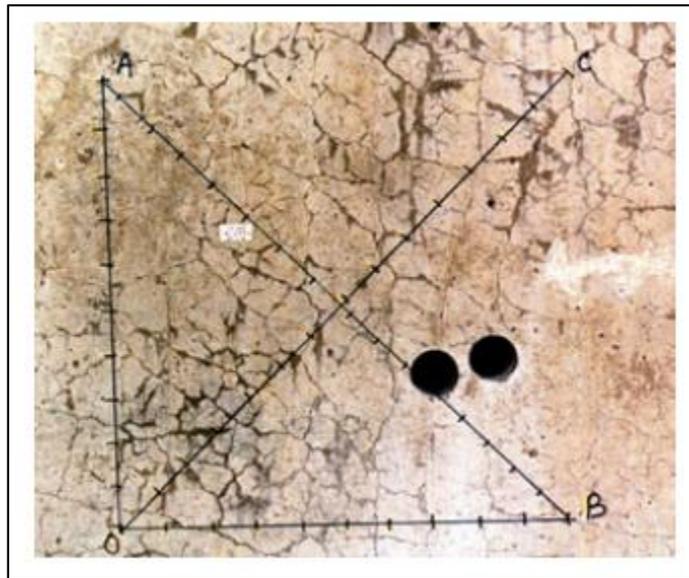


Figure 4 : Exemple d'implantation d'un repère de suivi de fissuration sur un ouvrage

▪ Suivi des déformations globales

La mesure des déformations globales constitue le meilleur moyen de suivre l'expansion d'une structure. Outre les mesures géodésiques et topographiques, ainsi que les mesures d'inclinaison à l'aide d'inclinomètres ou de pendules (comme dans le cas des barrages), les mesures d'élongation à l'aide de distancemètres sont les mieux adaptées.

Ce type de suivi permet de connaître précisément l'évolution future de l'ouvrage sous l'effet de l'alkali-réaction et sert aussi, le cas échéant, à paramétrer les modèles de recalcul de la structure ou encore à évaluer l'influence d'un éventuel traitement ultérieur.

Un exemple de suivi des déformations globales par distancemètres à fil d'invar est illustré sur la figure 5 qui représente l'évolution de l'expansion d'un piédroit d'un pont portique en béton armé. Pendant six ans, il a pu être mesuré une évolution significative de l'expansion du piédroit réactif (0,35 mm/m par an) qui était 3 fois plus importante dans la direction horizontale que dans la direction transversale (0,12 mm/m par an), et plus importante dans le bas (base L1) que dans le haut (base L2), ce qui était en adéquation avec le développement de la fissuration et en relation avec la gêne apportée par la dalle non réactive encastrée en tête sur le piédroit. On peut aussi noter que la déformation globale croît de façon relativement linéaire pendant quatre ans et que cette quasi-linéarité a été observée plusieurs fois sur d'autres ouvrages.

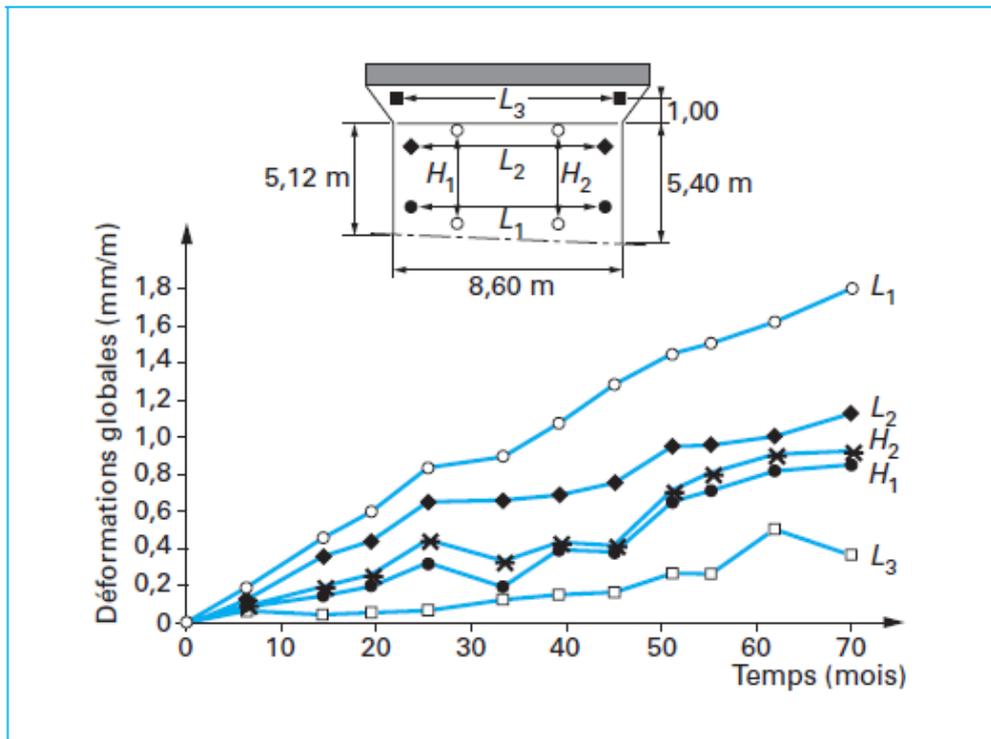


Figure 5 : Évolution des déformations globales fournies par des distancemètres à fil d'invar

▪ Gestion des ouvrages

Une méthode d'aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne a été mise au point par le LCPC. Cette méthode s'adresse au gestionnaire d'un parc d'ouvrages qui cherche à optimiser sa gestion sous des contraintes budgétaires significatives. Compte tenu du coût des différentes techniques d'investigations, et sachant que le gonflement est un phénomène qui évolue en général assez lentement, du moins dans les conditions climatiques, il ne saurait être question de les mettre en œuvre toutes, systématiquement et de manière identique, sur l'ensemble des ouvrages atteints ou supposés atteints d'une réaction de gonflement.

Le guide propose donc d'adopter une démarche progressive en fonction de l'état apparent de l'ouvrage et de la vitesse d'évolution de ses désordres. Hormis le cas des ouvrages très atteints, pour lesquels l'ensemble des moyens d'investigation sera simultanément mis en œuvre, la démarche proposée privilégie le suivi dimensionnel des ouvrages, relativement facile à réaliser, non destructif et permettant de bien observer l'évolution des phénomènes dans le temps pour en mesurer la rapidité, plutôt que le recours systématique à des carottages, destructifs, aux fins d'analyses en laboratoire coûteuses. La méthodologie proposée consiste tout d'abord à effectuer un tri entre :

- d'une part, les ouvrages présentant des **désordres avancés affectant une zone vitale de l'ouvrage** : ouvrages classés en **priorité de niveau 1** ;
- d'autre part, les ouvrages présentant des **désordres moins prononcés ou dont les désordres n'affectent pas une partie vitale** : ouvrages classés en **niveau 2**.

Pour les premiers (niveau 1), il y a lieu d'engager simultanément le suivi sur site et l'analyse de carottes en laboratoire. En outre, il convient, dans les cas les plus graves d'ouvrages particulièrement endommagés, de s'interroger sur l'aptitude au service et, le cas échéant, de mettre en œuvre les mesures de sauvegarde qui s'imposent.

Pour les seconds (niveau 2), il suffit d'initier dans un premier temps un suivi de l'ouvrage faisant appel à la fois à de la distancemétrie et à un suivi de la fissuration. Ce n'est que si

l'évolution du gonflement ou de la fissuration dans le temps s'avère rapide que le prélèvement de carottes doit alors être réalisé pour des analyses.
La figure 6 résume la procédure à entreprendre dans la gestion d'un ouvrage atteint.

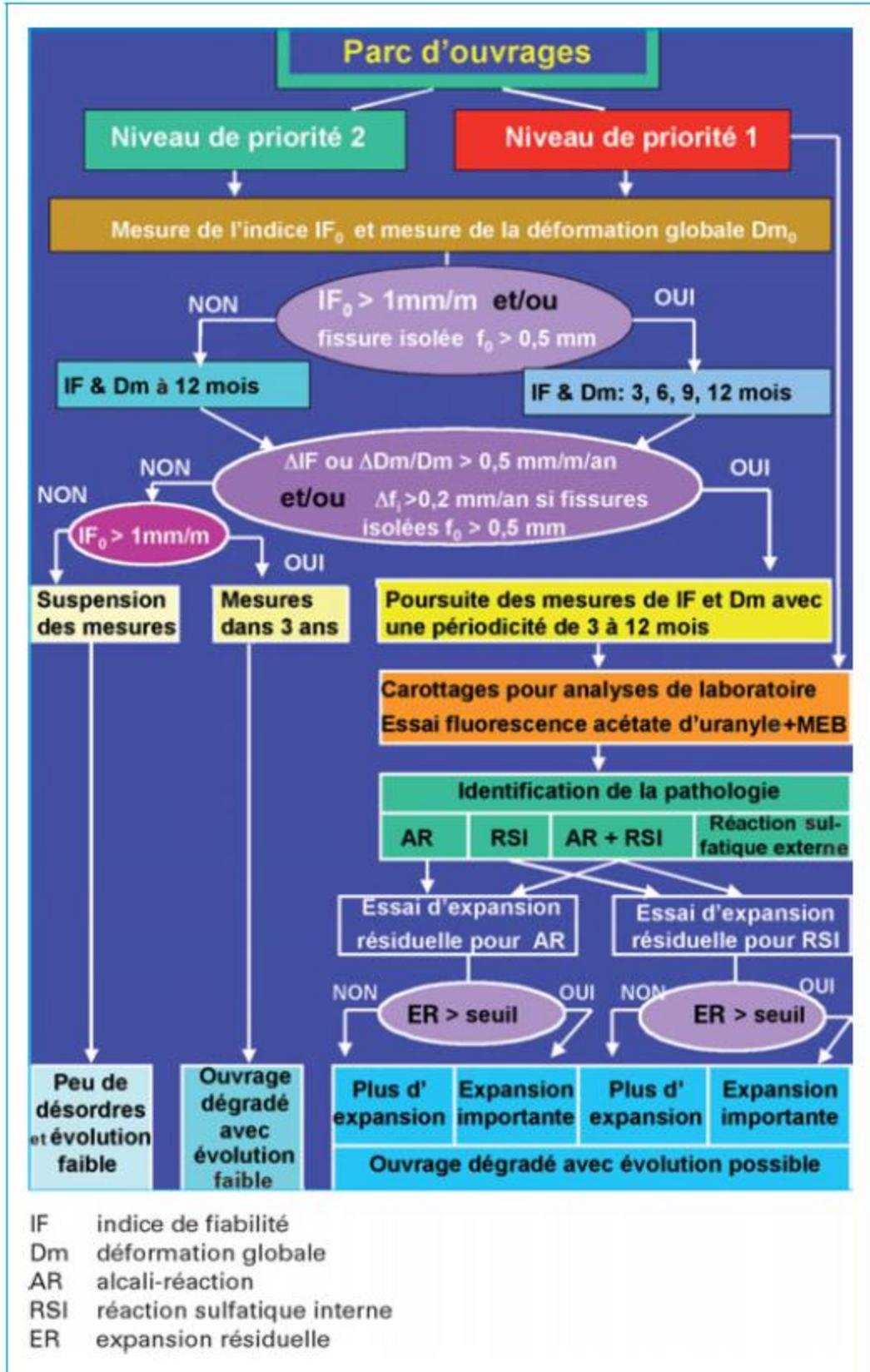


Figure 6 : Logigramme décisionnel

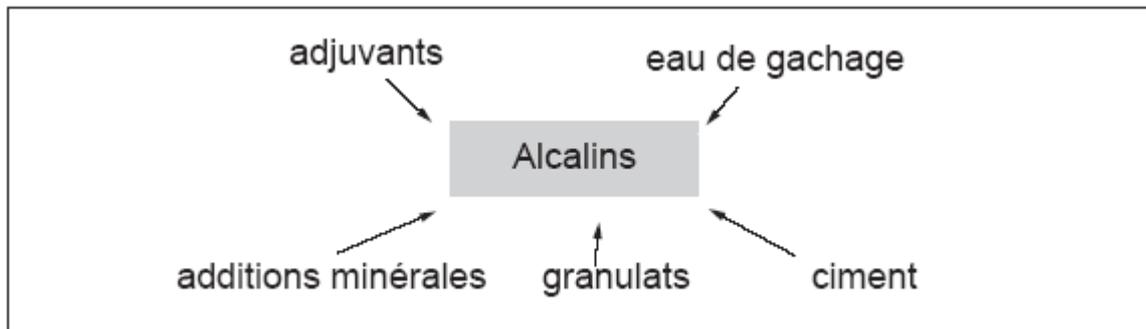
5. Bilans des Alcalins

Le critère analytique consiste à déterminer le taux d'alcalins actifs dans le béton et à le comparer à une valeur limite. En effet, si le béton contient peu d'alcalins actifs, la réaction alcali-silice ne peut pas se développer, quelle que soit la réactivité des granulats. La détermination de la quantité totale d'alcalins actifs contenus dans tous les constituants du béton et la comparaison à un taux limite, permet de s'assurer du non-déclenchement de la réaction.

Détermination de la quantité d'alcalins

Les alcalins ne sont pas apportés uniquement par le ciment. Il convient de déterminer la quantité totale d'alcalins actifs (c'est-à-dire capables de passer en solutions) contenus dans tous les constituants du béton :

La teneur en alcalins actifs du béton est égale à la somme des alcalins actifs apportés par chaque constituant.



Taux limites

- Valeur maximale à ne pas dépasser $T_{max} < 3,5 \text{ kg/m}^3$ de béton
- Valeur moyenne à ne pas dépasser : $Tm < \frac{3,5}{1+2Vc}$ en Kg/m^3 de béton

avec Vc coefficient de variation de la teneur en alcalin actif du ciment,

$$Vc = \frac{T}{m}, \text{ avec } T = \text{écart type}, m = \text{moyenne}$$