



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et d'Hydraulique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Travaux publics
Voies et Ouvrages d'Art (VOA)

Réf. : V 02.2018

Présenté et soutenu par :
Zakaria BERREHOUMA

Le : lundi 25 juin 2018

Recherche bibliographique sur l'effet de la réaction alcali-granulaire sur la durabilité des bétons

Jury :

Pr.	Abdelhamid GUETTALA	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Sadok FEIA	MCB	Université de Biskra	Président
Dr.	Nabil HOUHOU	MCA	Université de Biskra	Examineur

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Je voudrais présenter mes remerciements à mon encadreur Pr. **Abdelhamid GUETTALA**. Je voudrais également lui témoigner ma gratitude pour sa patience et son soutien qui m' a été précieux afin de mener mon travail à bon port.

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents .Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler.
Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à mes frères **ALI , BOUBAKER , HAMZA, REDHOUANE** et ma sœur **IMANE** ,
je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis, collègues d'étude, et frères de cœur: **SOUHEIL, BOUBAKER , RACHID , AMINE , CHERIF** et **SAYEH**.
Et mes proches .

A mes très chers amis

Résumé

La réaction alcaline est plus fréquente dans le diagnostic des structures endommagées. Des recherches significatives ont été menées dans le monde sur l'interaction des agrégats alcalins depuis que leurs premiers effets nocifs ont été identifiés sur des structures en béton. Bien que la réaction soit connue depuis longtemps, il est difficile d'obtenir une image claire des mécanismes de ce phénomène.

Ce mémoire vise une étude bibliographique de la réaction alcali granulat et les effets qui génèrent une interaction sur le béton, afin de mieux étudier l'effet de ce phénomène sur les structures, et d'acquérir une compréhension supplémentaire. La base du mémoire était la définition de la réaction alcali granulat, les conditions nécessaires à sa réalisation, ses mécanismes de travail et autres informations qui nous aident à connaître ce phénomène qui est considéré parmi les maladies affectant le béton et ce que les chercheurs appellent "cancer béton".

Et où ils n'ont pas trouvé une solution claire pour le suivre afin de réduire cette interaction lorsqu'ils ont heurté des structures en béton, mais d'un autre côté essayé de fournir un moyen de prévenir cette interaction, comme discuté dans ce mémoire.

ملخص

رد الفعل القلوي هو أكثر تواترا في تشخيص الهياكل التالفة. حيث تم إجراء بحث هام في جميع أنحاء العالم على تفاعل الركام القلوي منذ أن تم تحديد آثاره الضارة الأولى على الهياكل الخرسانية بالرغم من أن التفاعل كان معروفاً لبعض الوقت ، إلا أنه من الصعب الحصول على صورة واضحة لآليات هذه الظاهرة في تفاعل البنى المتأثرة .

و تهدف هذه المذكرة إلى دراسة ببيوغرافية لرد الفعل القلوي والآثار التي تولد التفاعل على الخرسانة ، من أجل دراسة أفضل لتأثير هذه الظاهرة على الهياكل ، والحصول على فهم إضافي. وكان أساس المذكرة تعريف رد الفعل القلوي والشروط اللازمة لتحقيقه وآليات عمله وغيرها من المعلومات التي تفيدنا ، في معرفة هذه الظاهرة التي تعتبر من بين الامراض التي تصيب الخرسانة وكما يطلق عليها لدى الباحثين انها " سرطان الخرسانة . "

وحيث لم يجدوا لها حلا واضح لاتباعه لتقليل هذا التفاعل عند اصابته للهياكل الخرسانية ، ولكن من جهة اخرى حاولوا تقديم طريقة لكيفية الوقاية من هذا التفاعل ، كما تطرقنا اليها في هذه المذكرة .

Sommaire

Listes des Figures.....	I
Liste des Tableaux.....	IV
Introduction générale.....	1

Chapitre 01 : Etude bibliographie sur la réaction alcali granulat

1	Ciment.....	3
1.1	Définition.....	3
1.2	Différents types de ciments	3
2	Béton	5
2.1	Définition.....	5
2.2	La composition du béton	5
2.3	Les types du béton dans le commerce	6
2.4	Les avantages du béton.....	6
3	Réaction alcali granulats	7
3.1	Introduction	7
3.2	Questions fréquentes.....	8
3.2.1	Est-ce qu'un ouvrage présentant des fissures est automatiquement atteint de RAG ?.....	8
3.2.2	Est-ce qu'il y a un risque d'effondrement d'un ouvrage atteint de RAG ?.....	8
3.2.3	Pourquoi les ouvrages ont-ils été construits avec du béton présentant un potentiel de développement de la RAG ?	8
3.2.4	Est-ce que la population doit craindre pour sa sécurité ?.....	8
3.3	Définition du phénomène:	9
3.4	Différents types de réaction.....	9
3.4.1	Réaction Alcali Silice.....	10
3.4.1.1	La silice.....	11
3.4.1.2	Attaque de la silice	12
3.4.1.3	Les alcalins	12
3.4.1.4	Source des alcalins dans les bétons	12
3.4.1.5	Dissolution de la silice dans les solutions alcalines	13
3.4.1.6	La chaux	13
3.4.2	Réaction Alcali-silicate	14

3.4.3	Réaction Alkali-Carbonate	14
3.5	Les conditions de la Réaction alcali granulat	14
3.5.1	Réactivité des granulats.....	14
3.5.2	Une teneur suffisante en alcalins.....	14
3.5.3	Taux d'humidité interne du béton suffisant	15
3.6	Les mécanismes réactionnels et les modèles d'expansion	15
3.6.1	Le processus topochimique	16
3.6.1.1	Mécanisme de Pool.....	16
3.6.1.2	Mécanisme de Dent-Glasser et Kataoka.....	17
3.6.1.3	Mécanisme de Wang et Gillott :	18
3.6.2	Le processus de dissolution-précipitation	19
3.6.3	Hypothèses sur l'origine du gonflement	20
3.6.3.1	Hypothèse des pressions osmotiques.....	20
3.6.3.2	Hypothèse de la double couche électrique	20
3.6.3.3	Hypothèse des potentiels chimiques.....	21
3.6.3.4	Hypothèse de la dissipation du gel	21
3.6.3.5	Hypothèse du gonflement des corps poreux	22
3.6.3.6	Unification de ces Hypothèses	23
3.7	Modèles relatifs à l'alcali-réaction	23
3.7.1	Le modèle de Nielsen.....	24
3.7.2	Le modèle de Sellier.....	25
3.7.3	Le modèle U.F.O.....	25
3.7.4	Le modèle de Xi	26
3.7.5	Le modèle de Bažant et Steffens	26
3.7.6	Le modèle de Capra.....	27
3.7.7	Le modèle de Suwito et al.2002	27
3.7.8	Le modèle de Li.....	27
3.8	La réaction alcali granulat sur les structures de génie civil.....	28
4	Conclusion	29

Chapitre 02 : Les paramètres influençant et les conséquences de la RAG

1	Introduction.....	30
2	Influences des matériaux sur la réaction alcali granulat	31
2.1	Influence des granulats	31
2.2	Influence de l'eau	33
2.3	Influence de la porosité.....	33
2.4	Influence de rapport E/C.....	34
2.5	Influence de la température	34
2.6	Influence les additions minérales	35
2.6.1	Fumées de silice	35
2.6.2	Cendres volantes	36
2.6.3	Brique pilée	37
2.6.4	Pouzzolanes naturelles	37
2.6.5	Fines minérales obtenues par broyage des granulats réactifs.....	37
2.7	Influence des contraintes sur l'expansion du béton.....	37
2.8	Conséquences mécaniques pour le béton	39
3	Connaissances relatives à la structure.....	39
3.1	Rôle du ferrailage sur le gonflement de la structure.....	39
3.2	Conséquences mécaniques pour la structure	41
4	Pathologie et manifestations externes.....	43
4.1	Description des désordres.....	43
4.2	Fissuration caractéristique due à la réaction alcalis-granulats.....	44
4.2.1	Fissuration superficielle	46
4.2.2	Micro –fissures	46
4.2.3	Macro-fissures	47
4.3	Effets visuels de la réaction alcali granulat.....	48
4.3.1	Expansion du béton et désordres associés.....	48
4.3.2	Gonflement du béton.....	48
4.3.3	Exsudations de gels siliceux.....	49
4.3.4	Éclatements ponctuels	49
4.3.5	Dégradation généralisée des parements	49
4.4	Diagnostic.....	49
5	Conclusion	50

Chapitre 03 : L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

1	La méthodologie de conduite d'une opération de qualification des granulats.....	51
1.1	Généralité.....	51
1.2	Recherche d'espèces réactives.....	51
1.3	Vérification de la potentialité de réactivité.....	52
1.4	Les essais rapides.....	52
1.5	Les essais à moyen terme	53
2	Méthodes et essais adopté.....	54
2.1	Principes ayant guidé nos choix expérimentaux.....	54
3	Justification du choix des matériaux.....	55
3.1	Ciment	55
3.2	Granulats.....	55
3.3	Eau	56
4	Mode opératoire.....	56
4.1	L'essai Barre de mortier Accélérer (AMBT)	56
4.2	Méthode des prismes miniature en béton accélérées (MCPT)	59
5	Calcul du changement de longueur pour l'ASTM et le MCPT	60
6	Caractéristiques des matériaux	61
6.1	Composition chimique du ciment.....	61
6.2	Granulats.....	62
6.2.1	Origine des granulats.....	62
6.2.1.1	Andésite	63
6.2.1.2	Quartzite	64
6.2.2	Influence de la granulométrie.....	65
6.2.2.1	Les résultats pour la méthode AMBT.....	65
6.2.2.2	Les résultats pour la méthode MCPT	66
6.3	Composition chimique des agrégats	66
6.3.1	La spectrométrie de fluorescence à rayons X (SFX / FX)	66
6.3.2	Résultats de la spectrométrie de fluorescence à rayons X	66
6.3.2.1	Andésite	66
6.3.2.2	Quartzite	67
6.3.3	Caractéristique cristalline des agrégats	67

6.3.3.1	-Caractérisation structurale (DRX).....	67
6.3.3.2	Les résultats de la DRX	68
7	Résultats des essais d'expansion	70
7.1	ASTM C 1260 (AMBT)	70
7.2	AASHTO TP 110-14 (MCPT)	71
8	Observations	72
9	Prévention des désordres.....	73
9.1	Principes de la prévention.....	73
9.1.1	Catégorie de l'ouvrage	74
9.1.2	Classe d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement	74
9.1.3	Choix du niveau de prévention.....	74
9.2	Caractérisation de la réactivité potentielle des granulats.....	76
9.3	Limitation de la teneur en alcalins du béton.....	77
9.3.1	Alcalins des ciments.....	77
9.3.2	Alcalins des granulats.....	78
9.3.3	Alcalins des adjuvants	78
9.3.4	Alcalins de l'eau de gâchage.....	78
9.3.5	Limitation de la teneur en alcalins	78
10	Les paramètres de la durabilité des structures.....	79
11	Conclusion.....	80
	Conclusion générale.....	81
	Références Bibliographiques.....	82

Listes des Figures

Figure 1.1 : phénomène de la RAG	9
Figure 1.2 : Les conditions pour réaliser ce phénomène	15
Figure 1.3 : Potentiels chimiques du système CaO-KOH-SiO ₂ -H ₂ O.....	19
Figure 1.4 : Gonflement résultant de la pression osmotique.....	20
Figure 1.5 : Gonflement engendré par la double couche électrique.....	21
Figure 1.6 : Gonflement par la dissipation du gel.....	22
Figure 1.7 : gonflement des corps poreux.....	22
Figure 1.8 : influence de l'humidité relative sur le gonflement.....	24
Figure 1.9 : représentation graphique du modèle de Sellier.....	25
Figure 1.10 : Modèle proposé par Bažant et Steffen.....	27
Figure 2.1 : Tests siliceux à la surface d'un grain de quartz donnant la qualification PR, voire PRP.....	32
Figure 2.2: Grès à ciment siliceux microcristallin. La qualification sera PR.....	32
Figure 2.3 : Lame mince de granite, feldspaths altérés et quartz à bordures microcristallines réactivité lente (qualification PR).....	32
Figure 2.4 : Observation au microscope électronique à balayage (MEB) de joints de grain élargis dans un granite altéré circulation facile.....	32
Figure 2.5 : Calcaire siliceux réactif SiO ₂ 15 à 20 % (qualification PR).....	32
Figure 2.6 : Calcaire à quartz non réactif SiO ₂ 15 à 20 % (qualification NR).....	32
Figure 2.7 : Comparaison des gonflements libres de cylindres à 23 °C et à 38 °C.....	34
Figure 2.8 : Influence de deux fumées de silice sur l'expansion à 1 an de mortiers renfermant un granulats siliceux réactif.....	35
Figure 2.9 : Influence du taux de cendres volantes sur l'expansion de mortier.....	36

Figure 2.10 : Influence des contraintes sur l'expansion d'éprouvettes en béton prélevées dans un ouvrage affecté par l'alcali-réaction.....	38
Figure 2.11 : Flèche moyenne mesurée à mi- travée des cinq poutres	40
Figure 2.12 : Déformations longitudinales globales mesurées à mi-hauteur des cinq poutres.....	41
Figure 2.13 : Illustration de désordres visibles sur les parements des structures atteintes d'alcali-réaction.....	44
Figure 2.14 : Fissuration caractéristique en faïençage causée par la réaction alcalis-silice dans un mur de soutènement à Ottawa (Ontario).....	45
Figure 2.15 Fissuration en faïençage et éjection du matériau de remplissage de joints causée par l'expansion du béton soumis à la réaction.....	45
Figure 2.16. Fissuration importante parallèle aux barres d'armature dans le mur de soutènement d'un pont de la Ville de Québec (Québec).....	45
Figure 2.17 : Fissuration à la limite de l'agrégat, pâte de ciment, causées par l'expansion de la réaction alcali granulat.....	46
Figure 2.18 : Endommagement de la culé par apparition de fissuration >25 mm d'ouvertures sur le pont Golden à Jobourg, Sud Afrique, et l'image de droite montre des fissurations au joints de deux voussoirs.....	47
Figure 2.19 : L'image de gauche est une structure auxiliaire au barrage Belesar en Espagne, et l'image de droite montre le modèle de fissures caractéristique affectant une barrière de sécurité sur une autoroute aux États-Unis.....	47
Figure 3.1 : Moules d'une barre de mortier.....	57
Figure 3.2 : Support de mesure d'élongation.....	57
Figure 3.3 : Les récipients pour les barres de mortier.....	57
Figure 3.4: Réservoir à bain d'eau chaud à 80°C.....	58
Figure 3.5: Moules à prisme miniature à béton.....	59

Figure 3.6 : Texture du granulat d'Andésite.....	64
Figure 3.7 : Texture du granulat de Quartzite.....	65
Figure 3.8 : Résultat de l'analyse granulométrique des agrégats fines pour l'andésite et le quartzite.....	65
Figure 3.9 : Résultat de l'analyse granulométrique des agrégats pour l'andésite et le quartzite..	66
Figure 3.10 : Profile de la diffraction à rayons-X de l'andésite.....	68
Figure 3.11: Profile de la diffraction à rayons-X du quartzite.....	69
Figure 3.12: Expansion des agrégats selon la méthode AMBT (ASTM C1260).....	70
Figure 3.13: Expansion des agrégats selon la méthode MCPT (AASHTO TP 110-14).....	71
Figure 3.14 : Calcul de la teneur en alcalins actifs du béton.....	78

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : Composition de différent types de ciment	4
Tableau 1.2 : Rayon hydraulique, distance cation-oxygène et énergie électrostatique.....	17
Tableau 3.1 : Proportions de mélange pour la formulation des prismes de béton miniature. [Latifee.2015].....	56
Tableau 3.2: Évaluation de la réactivité de granulats par ASTM C 1260 [ASTM C 1260- 07.2007].....	58
Tableau 3.3: Granulométrie exigé par MCPT. [Latifee.2015].....	59
Tableau 3.4: Proportions de mélange pour la formulation des prisme de béton miniature. [Latifee.2015].....	60
Tableau 3.5 : composition chimique du ciment CEM 1 52.5N.....	62
Tableau 3.6 : composition chimique de l'andésite.....	66
Tableau 3.7 : composition chimique de le quartzite.....	67
Tableau 3.8 : Catégorie de l'ouvrage.....	74
Tableau 3.9 : Classe d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement.....	74
Tableau 3.10 – Choix du niveau de prévention en fonction de la catégorie de l'ouvrage et de la classe d'environnement.....	75
Tableau 3.11 : le bilan des alcalins actifs apportés par le ciment.....	77

Introduction générale

La durabilité de l'ouvrage en béton caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers), et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement .

La durabilité du maintien de ses fonctions doit être assortie d'une durée, temps minimal et raisonnable pour lequel l'ouvrage est conçu, qui est appelé la durée de service de l'ouvrage (ou durée d'utilisation de projet). La prise en compte de cette durabilité permet de valider et de justifier la rentabilité de l'investissement .

La seule durabilité intrinsèque du béton ne suffit plus à garantir la durée de service de l'ouvrage. Prescrire un béton durable nécessite donc d'apprécier, dès sa conception, l'ensemble des contraintes environnementales, des agressions et des attaques potentielles, qu'il aura à subir pendant toute sa durée de service, et de respecter et mettre en œuvre les recommandations en vigueur.

Nous savons bien qu'un certain nombre d'ouvrages en béton armé nécessitent l'entretien, des réparations ou des reconstructions. La nature et l'origine des défauts sont multiples. Ainsi des erreurs peuvent être commises dès la conception ou la construction de l'ouvrage. D'autres dommages peuvent apparaître lors de chargement accidentel. Il reste enfin l'endommagement « normal » du béton au cours de la vie de la structure du aux charges d'utilisation, aux conditions climatiques, à l'environnement industriel et chimique. Des «maladies» du béton peuvent être aussi à l'origine de graves détériorations (réaction alcali-granulats, attaque au sulfate...). Sur les structures à réparer, on pourra alors relever un endommagement allant du défaut local (fissures, épaufrures...), à des délaminages importants et des attaques chimiques en profondeur.

Il faut comprendre l'origine de la dégradation pour éviter à nouveau leur apparition ou en réduire la gravité, et on peut considérer ces dégradations comme une sorte de maladie et c'est ce qui a été découvert vers 1940, STANTON a découvert la pathologie parmi ces maladies. Réaction alcaline , qui affecte le béton et est appelée "cancer du béton" des chercheurs. Après quelques décennies, les structures en béton commencent à se fissurer à cause d'une réaction chimique qui est une maladie importante. La réaction granulaire alcaline (RAG) se produit lorsque le béton est exposé à l'eau ou à l'humidité, ce qui se manifeste par l'apparition de petits agrégats dans lesquels une nouvelle substance se forme. Ce dernier peut absorber

Introduction générale

l'humidité et gonfler avec le temps, provoquant des fissures gonflées et après quelques décennies, affaiblissant l'ensemble du bâtiment. C'est ce que nous allons expliquer dans cette recherche d'une définition détaillée de la maladie et de ses types et aussi mécanismeetc. .
À la fin, nous allons essayer de fournir comment éviter la réaction alcali granulat .

Chapitre 01

Etude bibliographie sur la réaction alcali granulat

1 Ciment

1.1 Définition

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. [1]

Son emploi le plus habituel est sous forme de poudre utilisée avec de l'eau pour agréger du sable fin et des graviers (granulats) pour donner le béton. Le mot «ciment» peut désigner différents matériaux comme par exemple :

- Le plâtre .
- La chaux commune .
- La pouzzolane naturelle .
- Le ciment prompt .
- Le ciment Portland ou ciment artificiel .

1.2 Différents types de ciments

- ❖ Ciment Portland : CEM I – Il contient au moins 95 % de clinker.
- ❖ Ciment Portland composé : CEM II/A ou B – Il contient au moins 65 % de clinker et au plus 35 % d'autres constituants : laitier de haut fourneau, fumée de silice (limitée à 10 %), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires.
- ❖ Ciment de haut fourneau : CEM III/A ou B – Il contient entre 36 et 80 % de laitier et 20 à 64 % de clinker.
- ❖ Ciment de haut fourneau : CEM III/C (ex. ciment de laitier au clinker) – Il contient au moins 81 % de laitier et 5 à 19 % de clinker.
- ❖ Ciment au laitier et aux cendres CEM V/A ou B – Il contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50 % de cendres volantes et de 18 à 50 % de laitier. [1]

Tous ces types de ciment sont utilisés dans la fabrication du béton . Quel est le béton?

2 Béton

2.1 Définition

Le béton est un mélange de liant hydraulique (du ciment le plus souvent ou du plâtre ou de la chaux) et de granulats (sable et gravillons). Il est employé dans la plus grande partie des travaux de maçonnerie. [2]

2.2 La composition du béton

Le béton est un matériau de construction composite. Cela signifie qu'il est le résultat de différents composants mélangés dans des proportions variées. De manière générale, les principaux ingrédients employés dans sa composition sont les suivants :

- L'eau douce.
- Le liant hydraulique qui durcit au contact de l'eau en immobilisant les matériaux qui peuvent être
 - la chaux hydraulique obtenue par cuisson de calcaire argileux qui mélangée avec du ciment, en améliore la plasticité et assainit les matériaux jointoyés ;
 - le Ciment Portland Artificiel qui est le résultat du broyage d'une roche naturelle argilo-calcaire, à laquelle on ajoute du gypse.
- Les granulats qui sont les particules immobilisées entre elles par la prise du ciment :
 - Le sable de rivière (eau douce uniquement) à granulométrie contrôlée (0,6 mm) .
 - Le gravier extrait du lit des rivières ou obtenu par concassage de la pierre. Le gravier est calibré selon une norme NF de 6,3 à 25 mm de diamètre.

En fonction de la quantité et de la nature de ces composants, le béton présentera un aspect et des caractéristiques différentes. [2]

2.3 Les types du béton dans le commerce

- Le Béton Prêt à l'Emploi (BPE).
- Le béton armé.
- Le béton fibré.
- Le béton précontraint.
- Les Bétons Hautes Performances (BHP). [2]

2.4 Les avantages du béton

Le béton fait partie si intégrante de nos collectivités parce qu'il est le seul matériau capable de produire de façon économique les avantages suivants :

- plus faible empreinte carbone sur le cycle de vie d'une structure ou d'un pavage
- résistance, durabilité, longévité et résilience sans égal
- efficacité énergétique maximisée grâce à sa masse thermique
- durabilité dans tout environnement
- un matériau de construction qui ne brûle pas, ne rouille pas ou ne pourrait pas
- sûreté et sécurité
- versatilité — il peut être moulé sous toutes formes, couleurs et motifs imaginables
- n'émet pas de gaz
- excellente isolation aux vibrations et aux sons
- faibles coûts d'entretien
- De plus, les matériaux nécessaires pour fabriquer le béton sont abondants dans presque toutes les régions de la planète. [3]

Comme il y a des aspects positifs au béton, il y a aussi des aspects négatifs de ces négatifs, comme nous le verrons dans cette mémoire , qui est une maladie des maladies qui affectent le béton .

Les ouvrages d'art du réseau autoroutier suisse (ponts, murs de soutènement, tunnels, etc.) sont constitués en majeure partie de béton, matériau qui offre bien des avantages en termes de géométrie, de choix des formes et de réalisation .Depuis quelques années, la réaction alcali-granulats, appelée RAG, a été observée sur certains ouvrages d'art en Suisse. Ce phénomène a notamment été identifié sur les viaducs de Chillan, dont les travaux de renforcement sont actuellement en cours. Phénomène encore peu connu en Suisse, il se traduit par un mécanisme de dégradation du béton, qui peut affecter de manière significative le comportement structural de l'ouvrage. Depuis les premières observations, les recherches

se poursuivent afin de mieux appréhender le phénomène et d'y apporter des solutions constructives. C'est Réaction alcali –granulat .

Quel est ce phénomène ? et quels sont ses types et ses causes et d'autres ? . Tout cela sera expliqué dans cette recherche .

3 Réaction alcali granulats

3.1 Introduction

Pendant longtemps, on a cru que les granulats utilisés pour la fabrication du béton étaient chimiquement inertes.

Depuis que le phénomène d'expansion et de détérioration précoce du béton cette réaction est à présent décelée dans la plupart des régions du monde. Ce fut probablement R.J. Holden qui observa pour la première fois aux États-Unis, en 1935, la présence de réactions chimiques dans les bétons, entre les ciments et certains granulats. Puis, Kammer et Carlson constatèrent également l'existence de désordres, mais c'est Stanton qui le premier précisa (en 1940) la nature des réactifs en cause dans les dégradations observées sur des chaussées en Californie. En France, il faut attendre la fin des années 1970 pour certifier la présence d'alcali-réaction au sein de quelques barrages , et 1987 pour découvrir que plusieurs ponts sont atteints par cette maladie .C'est aujourd'hui un sujet très étudié qui est à la 12^{ème} place au classement des causes de détériorations des ouvrages en béton.

Les structures les plus touchées sont celles qui sont en contact avec l'eau ou celles qui se situent dans des environnements humides ; ce sont donc essentiellement les ouvrages de génie civil et certaines pièces humides de bâtiments qui sont les plus vulnérables.

Après avoir expliqué le mécanisme de la réaction puis avoir passé en revue les dernières connaissances acquises sur le sujet, nous aborderons la pathologie des structures atteintes d'alcali-réaction et les problèmes de gestion qui en découlent.

3.2 Questions fréquentes**3.2.1 Est-ce qu'un ouvrage présentant des fissures est automatiquement atteint de RAG ?**

Non. La fissuration d'un ouvrage en béton est quelque chose de normal qui peut apparaître dès la prise du béton ou la mise en charge de l'ouvrage et qui n'a de manière générale aucune incidence sur la durabilité ou la sécurité structurale si la fissuration est maîtrisée. Les fissures dues à la RAG sont très spécifiques et se manifestent souvent sous forme de faïençage. [4]

3.2.2 Est-ce qu'il y a un risque d'effondrement d'un ouvrage atteint de RAG ?

En théorie si on laisse la RAG se développer sans intervenir il y aura à long terme une perte de résistance du béton si importante que cela pourrait aboutir dans un cas extrême à la ruine de l'ouvrage. Cela prend toutefois beaucoup de temps et les signes de détérioration sont visibles bien avant un effondrement. L'OFROU (Office fédéral des routes) inspecte actuellement tous les ouvrages sous l'angle RAG et une telle issue est quasi impossible. [4]

3.2.3 Pourquoi les ouvrages ont-ils été construits avec du béton présentant un potentiel de développement de la RAG ?

le phénomène de la RAG n'est connu que depuis une dizaine d'années. Ainsi, lors de la construction de la plupart des ouvrages d'art, ce phénomène n'étant pas identifié, aucune mesure préventive n'a été prise quant au choix des granulats ou du ciment. Aujourd'hui, une directive a été mise en vigueur pour définir les moyens de prévention appropriés pour maîtriser les risques dus à la RAG lors de la conception de nouveaux ouvrages ou lors de la remise en état d'ouvrages existants. [4]

3.2.4 Est-ce que la population doit craindre pour sa sécurité ?

Non. L'OFROU (Office fédéral des routes) prend ce sujet très au sérieux et entreprend toutes les investigations et mesures nécessaires. La durée du développement du phénomène exclut tout risque à court terme. [4]

3.3 Définition du phénomène:

L'alcali-réaction est une réaction chimique entre certaines formes de silice et de silicate pouvant être présentes dans les granulats du béton, et les alcalins de la solution interstitielle. Elle correspond à une attaque du granulat par la solution basique du béton et provoque la formation d'un gel de réaction (silicate alcalin), dont l'expansion engendre, sous certaines conditions, un ensemble de désordres. [5]



Figure 1.1 : phénomène de la RAG [7]

3.4 Différents types de réaction

Dans leur globalité, ces réactions constituent une réponse des minéraux constitutifs des granulats (qui se trouvaient avant leur extraction dans un environnement de pH voisin de 7) à un déséquilibre avec le milieu du béton dans lequel règne un pH souvent supérieur à 13.

Ce sont des réactions chimiques solide-liquide dans lesquelles la phase solide est constituée par les granulats et la phase liquide par la solution interstitielle fortement alcaline du béton. Ces réactions se caractérisent par le fait que la partie réactive des granulats est le plus souvent en faible quantité et irrégulièrement distribuée, et que la solution agressive contenue dans la microporosité du matériau est distribuée de façon hétérogène.

On est donc conduit à admettre que les dégradations observées sur les ouvrages sont le résultat moyen des effets localisés de la réaction. On admet également que la réaction

observée en un point donné de l'ouvrage peut être dans un état d'avancement bien différent de celui observé en un autre point. [6]

Les conditions qui gouvernent la réaction sont l'abondance et la réactivité des espèces minérales, la quantité d'alcalins et la présence d'eau. En effet, rien ne se passerait sans eau, et une humidité relative d'au moins 80 % semble indispensable au développement de la réaction.

Il existe trois grands types d'alcali-réaction :

Le premier type est de loin le plus répandu. Si l'on met à part la réaction alcali-carbonate dont la cause reste encore controversée, le mécanisme de ces réactions passe par une dissolution de la silice sous l'action des ions OH^- de la solution interstitielle, suivie de la précipitation d'un gel silico-calco-alcalin. Pour cette réaction, la présence de chaux est nécessaire, et les alcalins sont le sodium et le potassium. Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer le processus d'attaque de la silice et le gonflement du matériau.

3.4.1 Réaction Alcali Silice

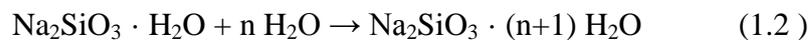
Les granulats réactifs de SiO_2 amorphe gonflent suite à leur attaque par les hydroxydes alcalins présents dans le béton (KOH et NaOH) produisant un gel hygroscopique de silicate de sodium et de de potassium. Si l'on considère le seul cas du silicate de sodium ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$) afin de simplifier le système, le principe fondamental de la réaction chimique alcali-silice peut s'écrire schématiquement de la façon suivante dans l'ancienne notation industrielle des silicates (par analogie avec le comportement chimique de l'anion carbonate) [6] :



Il s'agit de la dissolution en conditions hyper-alcalines ($\text{pH} \geq 13.5$) de la silice hydratée (acide silicique, suivant la notation choisie: H_2SiO_3 , H_4SiO_4 ou $\text{Si}(\text{OH})_4$) contenue dans le granulat. Ce sont les ions hydroxydes (OH^-) responsables du haut pH en solution qui sont les principaux agents responsables de la réaction alcali-granulats, car il s'agit bien ici d'une réaction acide-base (échange de protons H^+) entre l'acide silicique et les ions OH^- . Les anions hydroxydes hydrolysent donc en tout premier lieu le réseau de la silice amorphe et la dissolvent. Sans eux, la réaction de dissolution de la silice ne serait pas possible: il faut un haut pH (donc des conditions très basiques) pour dissoudre la silice ou le verre. Le rôle des

cations alcalins (Na^+ et K^+) solubles et mobiles qui accompagnent les OH^- (électro-neutralité) est toutefois nettement moins bien compris: [en effet, les ions Li^+ ayant un très petit rayon ionique à l'état nu et étant donc très hydratés sont connus pour inhiber la réaction alcali-silice, mais ce mécanisme fait toujours l'objet de débats.] [6]

Etant hydratés, les cations alcalins contribuent probablement aussi à retenir l'eau dans le gel de silice soluble obtenu. Le silicate de sodium produit est donc très hygroscopique, tout comme le silica gel d'ailleurs souvent utilisé comme agent de dessiccation. Le silicate de sodium attire à lui les molécules d'eau pour lesquelles il présente une grande affinité et s'hydrate fortement suivant la réaction suivante:



La réaction alcali-silice diffère cependant de la réaction pouzzolanique par le fait qu'elle est constamment catalysée par la présence de NaOH et de KOH dans le béton. En cela, elle ressemble également à la réaction de la chaux sodée avec le CO_2 de l'air. Le NaOH y joue également le rôle de catalyseur et sert à améliorer la vitesse et l'efficacité de la réaction de piégeage du CO_2 . [6]

Un des moyens pour éviter, ou minimiser, la réaction alcali-silice en présence de granulats potentiellement réactifs est de veiller à maintenir la concentration en NaOH et KOH (les agents catalyseurs de la réaction) dans l'eau interstitielle aussi basse que possible. En général, les normes pour les ciments Portland (CEM I) à faible alcalinité (Low Alkalinity, LA) prescrivent moins de 0.6 % en poids de Na_2O équivalent (par rapport au poids du ciment).

3.4.1.1 La silice

La silice est la forme naturelle du dioxyde de silicium (SiO_2) qui entre dans la composition de nombreux minéraux. [7]

La silice existe à l'état libre sous différentes formes cristallines ou amorphes et à l'état combiné dans les silicates, les groupes SiO_2 étant alors liés à d'autres atomes (Al : aluminium, Fe : fer, Mg : magnésium, Ca : calcium, Na : sodium, K : potassium, etc.). [7]

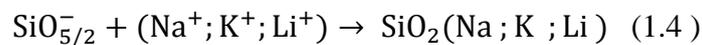
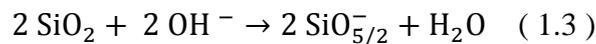
3.4.1.2 Attaque de la silice

Concernant le processus d'attaque de la silice, on admet que la composition de la solution interstitielle dépend prioritairement de la nature du ciment, mais aussi des granulats susceptibles de libérer des alcalins, des adjuvants et de l'eau. Tous les composants du béton vont donc influencer sur le pH et la concentration en alcalins, ces paramètres jouant à leur tour un rôle déterminant sur la quantité et la cinétique de la silice dissoute. [8]

R. Dron a réalisé une étude *in vitro* montrant que la formation du gel était conditionnée par l'existence dans le milieu de rapports de concentrations [silice]/[alcalins] déterminés. En dehors de ces rapports, il ne se forme pas de gels nocifs. [8]

3.4.1.3 Les alcalins

Le processus de découpe des liaisons siloxanes par les ions hydroxyles induit la formation de sites ionisés $\text{SiO}_{5/2}^-$ que les alcalins vont neutraliser [Dent-Glasser et Kataoka, 1981 ; Wang et Gillot, 1991 ; Poole, 1992]. [9]



En fonction du type d'alcalin utilisé un gonflement des bétons sera ou non observé. Ainsi, le gonflement est constaté avec le sodium et le potassium alors que le gonflement est absent en présence de lithium [McCoy et Caldwell, 1951]. Le lien entre neutralisation par les cations des espèces $\text{SiO}_{5/2}^-$ et l'expansion des éprouvettes reste aujourd'hui encore méconnu. [9]

3.4.1.4 Source des alcalins dans les bétons

Les alcalins peuvent provenir du clinker et des additions. Les alcalins dans le clinker de ciment Portland peuvent être présents, d'une part sous forme de sulfates alcalins (langbeinite $\text{Ca}_2\text{K}_2(\text{SO}_4)_3$, arcanite K_2SO_4 ou aphtitalite $\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$), d'autre part sous forme de solutions solides dans le réseau des silicates et aluminates de calcium (principalement dans le C_3A pour K_2O et Na_2O). Ils peuvent aussi provenir des adjuvants, de l'eau et des granulats. Enfin, il ne faut pas oublier les possibles apports extérieurs comme les alcalins de l'eau de mer par exemple. [10]

3.4.1.5 Dissolution de la silice dans les solutions alcalines

Le principe et les conditions opératoires sont celles du test ASTM C 289-71, dont on a fait varier trois paramètres (temps de contact, température et concentration en soude) par rapport à la version standard. On fait agir 50 ml de la solution de soude sur 25 g de grains 160-315 μm du granulat testé. Un dispositif original de retournement continu permet le maintien en suspension. La mesure repose sur la détermination analytique de la quantité de silice passée en solution pendant un temps donné. Nous avons opéré sur diverses variétés de silice, notamment une opale provenant du centre de la France. Sa grande réactivité nous a permis de cerner en 24 h la totalité du processus, la composition de la solution n'évoluant plus au-delà de ce temps. [11]

La vitesse de dissolution, mesurée à l'inflexion de la courbe représentant l'évolution de la concentration de la silice solubilisée en fonction du temps (Dron et Brivot. 1993a), est approximativement proportionnelle à la concentration de la soude (ordre cinétique voisin de 1). Elle est divisée par 2,8 quand on passe de 67 à 57 $^{\circ}\text{C}$, ce qui correspond d'après la loi d'Arrhénius à une énergie d'activation de 96 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. On en déduit que l'essai ASTM standard, pratiqué à 80 $^{\circ}\text{C}$ est accéléré d'un facteur d'environ 400 par rapport à ce qu'il serait à 25 $^{\circ}\text{C}$. [11]

Cette vitesse dépend essentiellement de la variété de silice. Pour la solution de soude à 1 $\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$, la vitesse, exprimée en mole par litre $\cdot\text{l}^{-1}$ et par heure et ramenée à 25 $^{\circ}\text{C}$, a été trouvée égale à $7\cdot 10^{-7}$ pour le quartz, $9\cdot 10^{-5}$ pour le silex et $5\cdot 10^{-3}$ pour l'opale, soit une progression d'un facteur de l'ordre de 100. [11]

3.4.1.6 La chaux

Les récents travaux de Riche ont mis en évidence le rôle important joué par la chaux. En son absence, aucune expansion significative des éprouvettes n'est observée. Par contre en présence de chaux, les variations volumiques sont conséquentes. La chaux est un acteur important dans la réaction et dans la littérature elle est considérée comme [10] :

- un réservoir à ions hydroxydes.
- un réservoir à ions calcium favorisant la formation d'une barrière de diffusion.

3.4.2 Réaction Alkali-silicate

La différence essentielle avec la réaction alcali-silice réside dans le fait que les granulats réactifs ne sont pas formés de silice libre mais sont des silicates variés (phyllo-silicates, tecto-silicates, sains ou altérés). En ce qui concerne les produits de la réaction, on admet qu'ils sont voisins de ceux apparus dans la réaction alcali-silice ; des études plus anciennes signalaient que l'on n'observe pas la production de gels siliceux. [12]

3.4.3 Réaction Alkali-Carbonate

La réaction alcali-carbonate est plutôt mal nommée et se rapporte en fait à la réaction alcali magnésium. La présence de dolomie ou de magnésite dans les agrégats peut engendrer une réaction entre le carbonate de magnésium et la chaux qui donne lieu à la cristallisation de brucite, un hydroxyde de magnésium dont le gonflement différé peut endommager le béton. [13]



3.5 Les conditions de la Réaction alcali granulat

Ces réactions ont lieu sous trois conditions:

3.5.1 Réactivité des granulats

Dont le type peut faire varier la réaction. Certains granulats ont une composition minéralogique plus réactive que d'autres. Un granulat concassé sera plus réactif qu'un granulat roulé car ses parties fraîchement mises à nu par le concassage présentent plus de matière réactive qu'un granulat roulé qui aura été poli. 85 à 90% des granulats utilisés en Suisse pour du béton sont considérés comme réactifs. [14]

3.5.2 Une teneur suffisante en alcalins

Dont la plus grande part est contenue dans le ciment mais que l'on peut également retrouver dans certains granulats (comme les verres volcaniques, les feld spats et les Micas), dans les ajouts (comme les laitiers et les cendres volantes qui contiennent beaucoup moins d'alcalin actif que le ciment) et les adjuvants qui sont peu actifs. [14]

3.5.3 Taux d'humidité interne du béton suffisant

De 70 à 80% qui va permettre le transport des alcalins vers les phases réactives. On entend par là que seuls les ouvrages en béton qui sont constamment en contact avec de l'eau comme les piscines, les murs de soutènement, les tunnels, les barrages et autres ouvrages hydrauliques contiennent assez d'humidité pour que la réaction puisse se produire. On peut rajouter à ces ouvrages, tous les éléments en béton qui ne sont pas en contact avec l'eau, mais qui ont une grande épaisseur, dont l'humidité ne descend pas en général en dessous de 70%. [14]

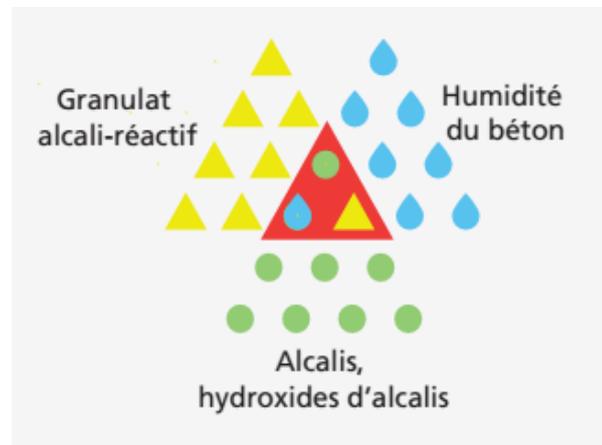


Figure 1.2 : Les conditions pour réaliser ce phénomène [14]

3.6 Les mécanismes réactionnels et les modèles d'expansion

Les mécanismes de l'alcali-réaction consistent, généralement, en la dissolution de la silice par la solution interstitielle alcaline du béton suivie de la formation d'un gel gonflant.

L'alcali-réaction dépend de plusieurs facteurs conditionnant les particularités de certains de ses mécanismes, à savoir :

La structure : c'est-à-dire les facteurs dépendant de la structure cristalline des minéraux réactifs dont le réseau peut avoir des défauts. Ces derniers sont en général dus à la destruction des liaisons siloxanes $Si - O - Si$. Ces anomalies constituent un site des réactions pour les ions présents dans la solution (Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , OH^-).

La texture : les facteurs liés à cet aspect concernent essentiellement la granularité, la microfissuration et la microporosité. Ils conditionnent plus la cinétique des réactions. Les surfaces d'échange des granulats en relation avec l'état de microfissuration sont en croissance en fonction de leur classe granulaire.

La composition chimique: on cite ici les facteurs : pH, concentrations en K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , et la quantité de la silice réactive.

La vitesse des réactions : dépend essentiellement des facteurs structuraux, texturaux et des facteurs de composition.

A partir des recherches menées depuis les années 40, il ressort deux principaux mécanismes réactionnels. Le premier est dit topo-chimique car il ne nécessite pas la mise en solution de la silice ; le second est dit de « dissolution-précipitation » car il implique un passage impératif de la silice en solution. Ces deux mécanismes sont à la base de plusieurs modèles d'expansion dont nous parlerons.

3.6.1 Le processus topo-chimique

La réaction est dite topo-chimique car elle consiste en la découpe du réseau siliceux par les ions hydroxyles sans passer nécessairement par la mise en solution de la silice.

3.6.1.1 Mécanisme de Pool

Le mécanisme présenté par Poole prend ses racines de celui de Dent-Glasser et Kataoka mais cette fois le double rôle des ions calcium est pris en compte Ce mécanisme ajoute une étape faisant intervenir les ions calcium. La chaux a un double rôle, d'une part fournir des ions calcium pour régénérer les alcalins, d'autre part apporter des ions hydroxyles pouvant ainsi remplacer les ions hydroxyles consommés par la réaction. [9]

▪ un rôle de compensateur en substituant le sodium par le calcium dans les produits formés :



- un rôle de réservoir d'ions hydroxyles pouvant remplacer ceux consommés par la réaction:



La chaux entretient donc la réaction en régénérant les ions sodium et en comblant le manque en ions hydroxyles.

La diffusion des ions dans le granulat dépend de leur rayon ionique auquel s'ajoutent les molécules d'eau de solvation (Tableau 1.2). D'après, la diffusion des alcalins à l'intérieur du granulat est donc plus facile que celle des ions calcium. Par conséquent, il faut que la dégradation du granulat soit suffisamment avancée pour que les ions calcium solvatés puissent pénétrer dans le granulat. Pour d'autre auteurs, le calcium diffuse mieux que les alcalins et notamment lorsque le granulat possède une microporosité élevée ou une microfissuration. [9]

Cations	Rayon Hydraulique en Å	Distance cation-oxygène en Å	Energie Electrostatique (Z1Z2/d)
Na ⁺	3.3	4.65	0.21
K ⁺	3.1	4.45	0.22
Ca ²⁺	4.2	5.55	0.36

Tableau 1.2 : Rayon hydraulique, distance cation-oxygène et énergie électrostatique. [9]

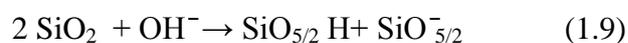
3.6.1.2 Mécanisme de Dent-Glasser et Kataoka

Initialement le réseau siliceux se compose de liaisons silanols (élément ≡Si – OH) et de ponts siloxanes (≡Si – O – Si ≡). Son attaque par les ions OH se décompose en deux phases

- L'ionisation des groupements silanols [10] :



- La rupture des ponts siloxanes :



Les charges négatives, engendrées par l'ionisation des groupements silanols et la rupture des ponts siloxanes, sont neutralisées par des alcalins (Na^+ ou K^+) :



Ces réactions conduisent à la découpe du réseau siliceux, à la formation d'un gel silico alcalin et au passage en solution de la silice réactive sous la forme de $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ ou H_3SiO_4^- selon la valeur du pH. [10]

Toutefois le modèle de Dent-Glasser et Kataoka ne fait pas intervenir la chaux qui semble jouer un rôle important dans la réaction. [10]

3.6.1.3 Mécanisme de Wang et Gillott :

D'après Wang et Gillott le mécanisme réactionnel se déroule en quatre étapes :

➤ Etape 1 :

L'échange cationique a lieu en surface du granulat entre les protons des groupes silanols et les cations (K^+ , Na^+ , Ca^{2+}). [10]

➤ Etape 2 :

Les liaisons siloxanes sont rompues par l'attaque des ions hydroxydes. Dans le même temps, la chaux dissoute libère des ions hydroxydes en quantité suffisante pour permettre la poursuite de la découpe. [10]

➤ Etape 3 :

L'échange cationique entre les protons des silanols et les alcalins forme des complexes alcali-silice expansifs susceptibles d'absorber l'eau. Deux raisons peuvent être invoquées pour expliquer une meilleure diffusion des ions alcalins par rapport aux ions calcium. La solubilité des hydroxydes alcalins est bien plus importante que celle de la chaux ce qui les rend plus disponibles. [10]

Le rayon hydraulique affectant la diffusion des cations vers les sites réactionnels est plus petit pour les alcalins que pour le calcium.

➤ Etape 4 :

L'échange cationique entre les alcalins et les ions calcium se déroule une fois l'expansion réalisée. En effet, l'espace créé après gonflement accroît la possibilité pour les ions calcium de diffuser vers les sites des complexes alcali-silice. Les alcalins sont ainsi régénérés dans le milieu et la réaction peut se poursuivre. [10]

3.6.2 Le processus de dissolution-précipitation

Dans la littérature, le principal modèle est celui de Dron qui débute par la mise en solution de la silice issue de la rupture des liaisons siloxanes par les ions hydroxyles. Les ions siliceux et les ions calcium vont précipiter dans le milieu riche en base alcaline. Dron s'appuyant sur une approche thermodynamique, a établi le diagramme des potentiels chimiques du système CaO-KOH-SiO₂-H₂O . [10]

En fonction de la concentration en ions siliceux, calcium et potassium, les produits formés sont du type C-S-H et/ou C-K-S-H . [10]

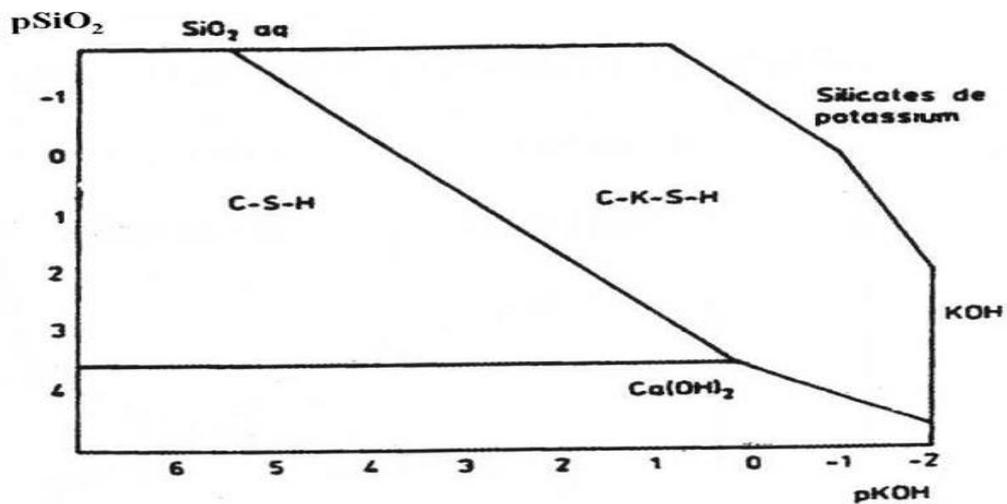


Figure 1.3 : Potentiels chimiques du système CaO-KOH-SiO₂-H₂O [10]

3.6.3 Hypothèses sur l'origine du gonflement

Plusieurs hypothèses sont avancées pour expliquer le gonflement des gels, sans cependant que l'une d'entre elles ne fasse référence au niveau international. [8]

3.6.3.1 Hypothèse des pressions osmotiques

Le gel formé au contact pâte-granulat va drainer la solution interstitielle et voir son volume augmenter. Le flux liquide, source du gonflement, génère des pressions qui provoquent la fissuration (figure 1.4). [8]

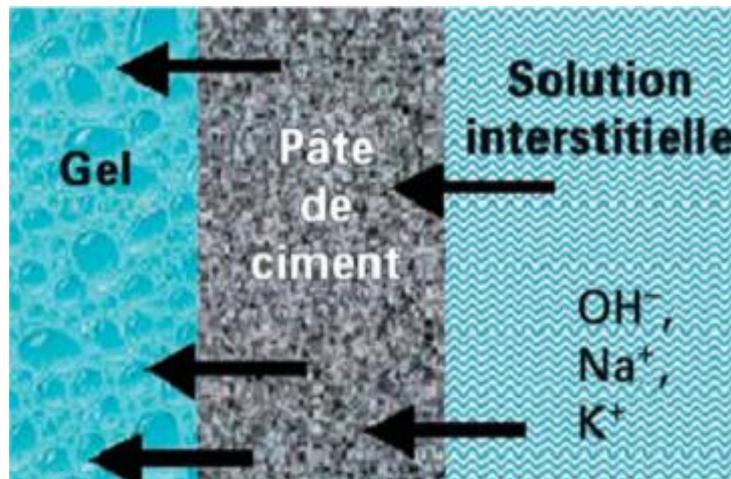


Figure 1.4 : Gonflement résultant de la pression osmotique [8]

3.6.3.2 Hypothèse de la double couche électrique

L'attaque du réseau siliceux engendre la création de charges négatives qui sont compensées par les cations disponibles localement (alcalins et ions calcium). Selon Prezzi ce phénomène conduit à la formation d'une double couche ionique située à la surface des grains (« double layer »). Le gonflement serait alors engendré par les forces de répulsion électrique entre les couches. Les efforts dépendent des ions, du pH et des forces ioniques. [13]

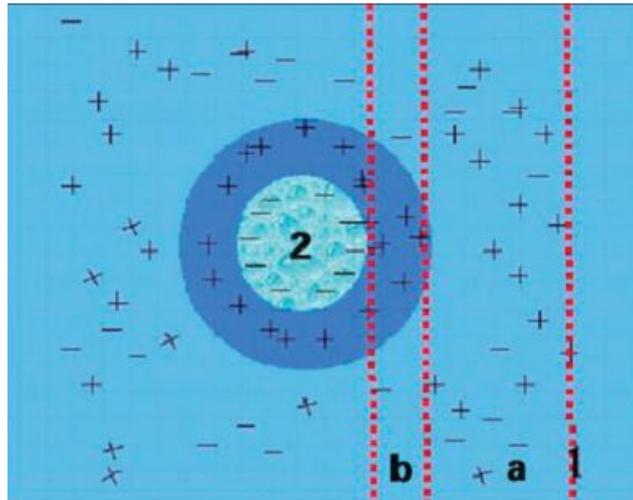


Figure 1.5 : Gonflement engendré par la double couche électrique [8]

a : la couche diffuse.

b : la couche rigide de Stern.

3.6.3.3 Hypothèse des potentiels chimiques

D'après Dron, deux domaines à potentiels chimiques différents sont à considérer dans un béton siège d'une réaction alcali-silice : le granulat entouré par une solution saturée en silice et la pâte de ciment contenant de la portlandite. La rupture d'équilibre entre ces deux phases fait avec une variation d'énergie libre et se traduit par la coagulation d'un gel et la dissolution de la portlandite. [12]

3.6.3.4 Hypothèse de la dissipation du gel

Les deux étapes principales retenues par Jones sont l'hydratation du gel et le gonflement, puis la dissipation dans la pâte de ciment. Si la vitesse de dissipation est inférieure à la cinétique de formation, il se produit une expansion. La vitesse de dissipation est fonction de la porosité de la pâte (figure 1.6). [8]

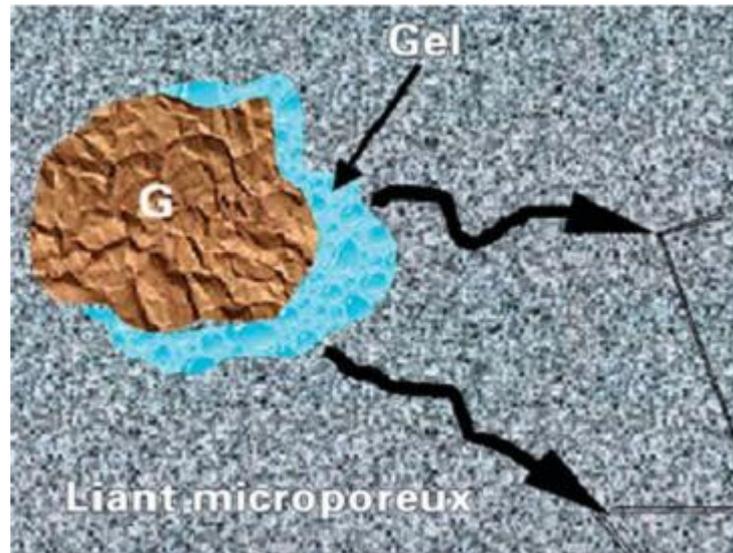


Figure 1.6 : Gonflement par la dissipation du gel [8]

3.6.3.5 Hypothèse du gonflement des corps poreux

Dans la (figure 1.7) qui schématise cette hypothèse du gonflement des corps poreux : 1 représente le cœur du granulat encore sain, 2 la partie externe du granulat devenue poreuse, 3 l'augmentation de volume de la zone 2, et 4 la pâte de ciment. Les zones 2 et 3 sont injectées par le gel qui va progresser dans la pâte et générer des fissures qui rejoindront un granulat proche. [8]

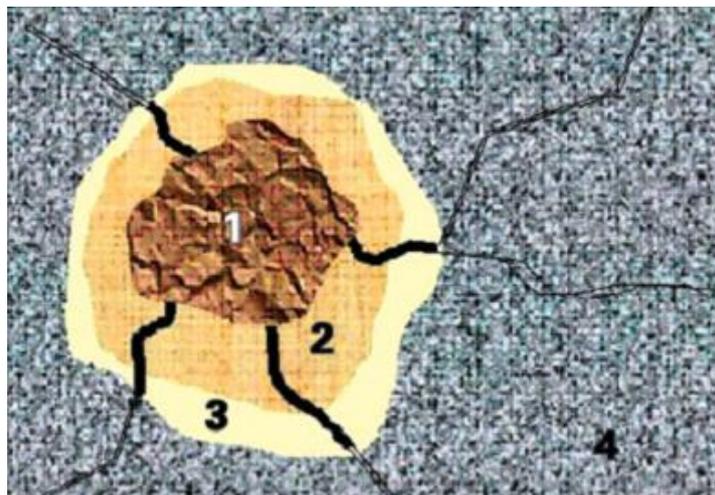


Figure 1.7 : gonflement des corps poreux [8]

3.6.3.6 Unification de ces Hypothèses

En définitive, dans l'état actuel (2018) de nos connaissances, il semble que les conclusions formulées par Couty soient encore d'actualité. Il est raisonnable de penser qu'un mécanisme unique ne peut pas rendre compte des phénomènes observés. [12]

C'est ainsi que Hornain a proposé le schéma suivant :

- diffusion des ions OH^- , Na^+ et K^+ dans le réseau siliceux du granulat .
- pseudomorphose du granulat par un gel très visqueux, poreux .
- gonflement de cette région suivant un mécanisme de gonflement de corps poreux et début de microfissuration .
- dissolution de la silice et formation d'un sol silico-alcalin .
- gélification de ce sol au contact des ions Ca^{++} apportés par la portlandite .
- dissipation du gel visqueux dans la pâte de ciment et propagation de microfissures sous l'action des poussées engendrées par ce gel.

3.7 Modèles relatifs à l'alcali-réaction

Les modèles présents dans la littérature peuvent être séparés en deux classes distinctes. Les modèles « chimiques » et les modèles « phénoménologiques ». Les premiers se basent sur des mécanismes réactionnels probables pour prédire l'évolution des espèces ioniques dans le matériau et l'avancement de la réaction. Ils caractérisent la réaction au niveau local (microscopique) et le gonflement au niveau du matériau. [15]

Les seconds se basent sur des phénomènes physiques observés expérimentalement pour décrire l'évolution du gonflement interne (ou des contraintes générées) induit par la réaction en fonction de données observables (chargement ,température, humidité relative...) sans pour autant en connaître l'origine. Ils sont couplés avec des modèles de comportement et ont pour vocation l'évaluation des effets structuraux de la réaction sur des ouvrages réels. [15]

Où nous allons discuter de quelques exemples de modèles :

3.7.1 Le modèle de Nielsen

Ce modèle propose de calculer les déformations et les contraintes induites par le gonflement d'un granulat réactif sphérique placé au centre d'un volume élémentaire représentatif. Le gonflement est dû à la pénétration d'ions et d'eau dans le granulat, cela génère des fissures dans le mortier et donc l'expansion du béton. Les fissures sont supposées être radiales.

La cinétique de gonflement est la donnée d'entrée du modèle. L'expansion est directement reliée à l'humidité relative dans les pores par l'intermédiaire d'une loi empirique basée sur les observations de Nilsson et al. (voir Figure 1.8). Cette dernière est déterminée par un calcul hydrique. [15]

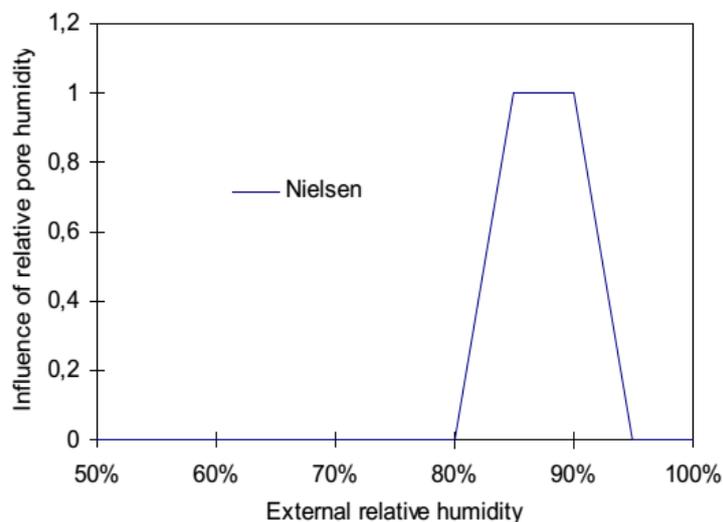


Figure 1.8 : influence de l'humidité relative sur le gonflement [15]

Les contraintes et les déformations générées par le gonflement interne et l'extension de la zone fissurée sont calculées au moyen d'un modèle géométrique. L'influence du chargement extérieur est prise en compte. [15]

Ce modèle ne prédit pas le gonflement interne généré par la réaction, mais la conséquence macroscopique de ce gonflement interne. Ce dernier est une entrée du modèle et pas un résultat. Le gonflement est directement relié à l'humidité relative dans les pores. Le calcul des contraintes et des déformations est donc couplé à un calcul hydrique. Le modèle permet de mettre en évidence la grande importance des transferts hydriques sur le gonflement et les contraintes engendrées par la réaction. Il ne prend en compte qu'un seul granulat réactif.

3.7.2 Le modèle de Sellier

La modélisation proposée par Sellier se compose de deux parties. La première modélise les mécanismes de la réaction (réactions chimiques et diffusion des espèces), la seconde décrit les effets mécaniques induits par le gonflement du gel. Ces deux parties utilisent des notions probabilistes. Les mécanismes réactionnels retenus sont ceux proposés par Dent-Glasser et al. Les différentes hypothèses sont les suivantes :

- Les granulats sont supposés sphériques, homogènes et tous de même diamètre .
- Les ions Na^+ et K^+ sont supposés avoir le même effet, ils sont confondus dans le modèle .
- L'attaque est uniforme sur la surface des granulats. [15]

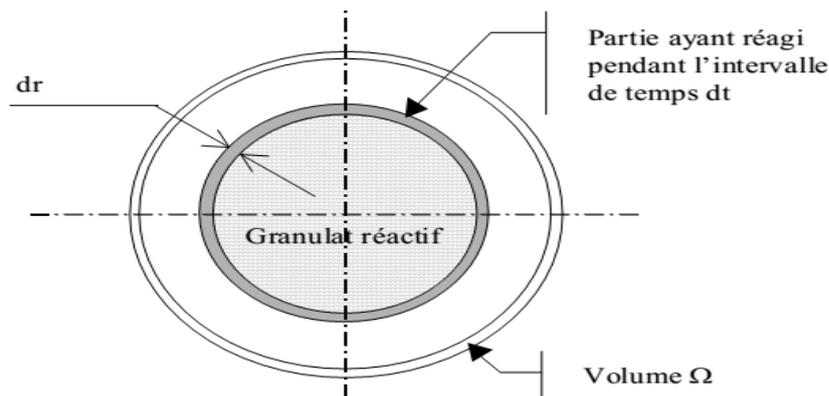


Figure 1.9 : représentation graphique du modèle de Sellier [15]

3.7.3 Le modèle U.F.O.

Le modèle proposé par Uomoto et al. puis par Furusawa et al. permet de prédire la cinétique et l'amplitude des gonflements engendrés par la réaction alcali-silice. Les mécanismes réactionnels retenus pour ce modèle sont : [15]

- Diffusion des alcalins dans les granulats réactifs .
- Réaction entre la silice réactive et les alcalins .
- Formation de produits autour des granulats.

Les différentes hypothèses constitutives du modèle sont :

- Les granulats sont sphériques et entièrement constitués de silice réactive .
- Il existe une zone poreuse entourant les granulats dans laquelle les produits se forment.
- La couche de gel entourant les granulats est fine devant le diamètre des granulats et son épaisseur est uniforme . [15]

3.7.4 Le modèle de Xi

Cette modélisation est inspirée du modèle U.F.O. , elle est basée sur une description hétérogène biphasique du béton (granulats et matrice cimentaire). Le modèle s'applique sur une sphère de pâte de ciment entourant un granulat sphérique placé en son centre. Granulats et pâte de ciment sont isotropes et homogènes. Les mécanismes réactionnels sont les mêmes que pour le modèle U.F.O. plus la perméation du gel dans la porosité connectée sous l'effet de la pression générée. [15]

3.7.5 Le modèle de Bažant et Steffens

Le modèle proposé par Bažant et Steffens s'applique aux bétons incorporant des granulats de verre broyé. Ces derniers sont constitués de silice amorphe, le béton ainsi formulé est fortement susceptible de voir se développer la réaction alcali-silice. Les mécanismes réactionnels retenus sont les suivants :

- Diffusion des espèces réactives vers le granulat de verre .
- Dissolution de la silice réactive et réaction avec les ions .
- Formation d'un « gel sec » autour du granulat .
- Imbibition du gel et expansion .
- Apport d'eau vers le site de réaction par macro-diffusion .

Les auteurs se ramènent à l'étude d'un Volume Élémentaire Représentatif (voir Figure 1.10) dont les dimensions sont déterminées d'après la proportion de granulats dans le béton. [15]

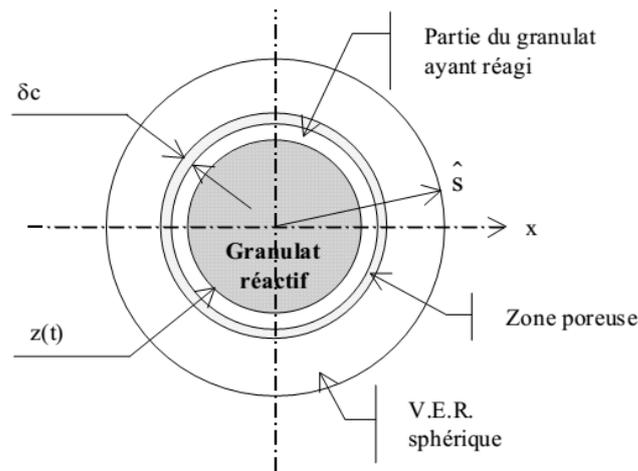


Figure 1.10 : modèle proposé par Bažant et Steffen [15]

3.7.6 Le modèle de Capra

Le modèle proposé par Capra et Bournazel permet de calculer la déformation engendrée par la réaction alcali-silice en tout point d'une structure. [15]

3.7.7 Le modèle de Suwito et al.2002

Ce modèle suppose également que le gel de silice forme une couche autour des agrégats. Le volume de gel formé est calculé en utilisant un modèle de cinétique chimique représente la minéralogie du granulat, la composition de la solution interstitielle du béton, et la diffusion des réactifs à travers l'ensemble. La composition chimique du gel est déduite de ce modèle pour estimer la pression qu'elle applique. [13]

3.7.8 Le modèle de Li

Le modèle proposé par Li a pour vocation l'évaluation des conséquences de la réaction alcali-silice sur des ouvrages réels. La réaction est supposée produire un « gel sec » non gonflant selon un avancement. Ce dernier possède la propriété de s'imbiber d'eau en fonction du temps et de l'humidité relative dans les pores pour former un « gel mouillé ». [15]

3.8 La réaction alcali granulat sur les structures de génie civil

En 1985, un rapport de la ICOLD (Commission internationale des grands barrages) a résumé les dommages aux barrages causés par la réaction alcali-granulat, qui impliquait 24 structures aux Etats-Unis, 5 barrages en France, 3 barrages en Espagne, 2 en Inde, 2 au Brésil etc. [Corneille et al. 1991]. [Charlwood.2009] fournit des données statistiques sur les barrages endommagés par la RAG. [13]

D'autres pays ont également fait état de l'incidence de RAG. [Gilks et al.2003] ont rapporté sur le barrage de Mactaquac au Canada ; [Jabarooti et al.2003] sur un barrage iranien ; [Malla et al.1999] un barrage en Suisse. En France, parmi les 130 grands barrages en béton examinés sont affectés par la RAG, 30% présentent des effets de gonflement, 10 nécessitent une attention particulière (déformation > 10 microns / m /année), 3 ont de grands problèmes : Le Chambon, Maury et Temple-sur-Lot, et des centaines de ponts sont également touchés par la RAG [Larive, 1997]. [13]

Certains auteurs donnent des résumés de cette incidence, [Fu et al. 2004] et [Li.2004] présentent les structures touchées en Chine ; [Durand et al. 2004] résumant l'histoire de la RAG au Québec, Canada ; [Leemann et al. 2004] présentent les structures souterraines touchées en Suisse, [Richardson.2004] donne un aperçu des cas récents de la recherche dans la République d'Irlande. [13]

Outre les cas mentionnés ci-dessus, les nouveaux cas semblent être explorés et publiés chaque année partout dans le monde. Cette tendance indique que la RAG n'est pas un phénomène se produisant seulement dans certains endroits ou dans certains pays ; il y a un problème universel impliquant de nombreux types de structures. [13]

L'effet d'endommagement dus à la RAG des structures typiques inclues plusieurs fonctionnalités, telles que :

- Exsudation de gels dans le fissure de surface .
- Signes d'expansion, un mouvement relatif entre les éléments de structure .
- Apparition de fissures et / ou carte de fissure (le dessin de craquage aléatoire) longitudinales.
- Déformation ou déplacement des structures.

4 Conclusion

On a présenté dans ce chapitre une étude bibliographique de la réaction alcali granulat. Dans lequel nous présentons une définition du phénomène étudié, Il existe trois grands types d'alcali-réaction : réaction alcali silice , réaction alcali silicate et la réaction alcali carbonate .

Et Comme nous avons également fait face à des mécanismes réactionnels et les modèles d'expansion.

Chapitre 02

Les paramètres influençant et les conséquences de la RAG

1 Introduction

L'alcali-réaction (ou réaction alcalis-granulats) constitue un problème majeur au plan de la durabilité des bétons. Un très grand nombre de recherches ont été réalisées sur le sujet depuis les premières observations, au début des années 40, reliant la fissuration du béton et l'utilisation de certains granulats .

L'alcali-réaction est une réaction physico-chimique impliquant certaines phases siliceuses réactives des granulats et les ions hydroxydes alcalins en solution dans le béton. La silice est généralement stable en milieu neutre ou acide mais le béton (dont le pH de la solution interstitielle est généralement supérieur à 13) constitue un environnement particulièrement agressif vis-à-vis de certaines phases siliceuses. Ces phases sont la silice microcristalline (silex, chert), ou la silice faiblement cristallisée (opale). Suite à la dissolution de la silice, des produits de réaction potentiellement gonflants, appelés gels d'alcali-réaction, sont formés. En présence d'une quantité suffisante d'eau, les gels provoquent l'expansion du béton et la détérioration précoce de celui-ci. Les désordres peuvent apparaître dans les ouvrages en béton entre 2 et plus de 10 ans après leur construction. Le déclenchement et le développement de la réaction dépendent de plusieurs influences.

Dans ce chapitre, nous présenterons l'influence contrôlée de la réaction alcali granulat, son diagnostic et avec quelques exemples des troubles causés par ce phénomène.

2 Influences des matériaux sur la réaction alcali granulat

2.1 Influence des granulats

- La réaction alcali-silice, la plus banale, implique des granulats contenant en proportions variables une ou plusieurs des espèces minérales suivantes : opale, calcédoine, cristobalite, quartz microcristallins ou tectonisés, phase vitreuse... Ces espèces minérales peuvent être présentes dans tous types de roches : [8]

- ✓ magmatiques : granites, pegmatites, aplites .
- ✓ volcaniques : rhyolites, basaltes, trachytes .
- ✓ métamorphiques : quartzites gneiss, micaschistes...ect
- ✓ sédimentaires : grès, quartzites, calcaires siliceux, silex.

- La réaction alcali-silicate, elle, implique des roches poly minérales contenant des minéraux silicatés présents dans des roches de type granite, rhyolite, andésite et basalte, où la silice est sous forme microcristalline, ou vitreuse, mais où les minéraux silicatés peuvent intervenir en libérant des alcalins et une partie de la silice de leur réseau. De telles roches peuvent se rencontrer dans les gisements alluvionnaires pourvu que la géologie, les conditions de transport et de sédimentation soient favorables. [8]

- Quant à la réaction alcali-carbonate, elle implique les calcaires dolomitiques.

Cette réaction bien identifiée au Canada par exemple n'a pas été formellement reconnue lors des études entreprises en France. Dans la démarche française, la classification vis-à-vis de l'alcali-réaction est obtenue à partir d'essais dont la mise en œuvre . [8]

Cette classification permet de qualifier les granulats en :

- ✓ non réactifs (NR) ;
- ✓ potentiellement réactifs (PR) ;
- ✓ potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP)

CHAPITRE 02 Les paramètres influençant et les conséquences de la RAG

Les images suivantes illustrent observations pétrographiques d'échantillons de roche :

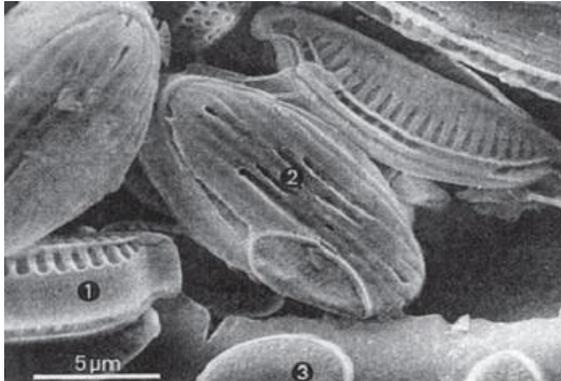


Figure 2.1 : tests siliceux à la surface d'un grain de quartz donnant la qualification PR, voire PRP [8]

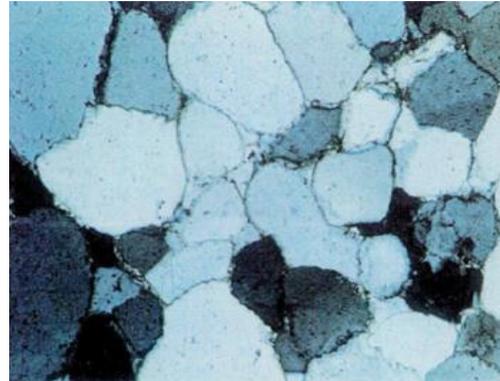


Figure 2.2: grès à ciment siliceux microcristallin. La qualification sera PR [8]

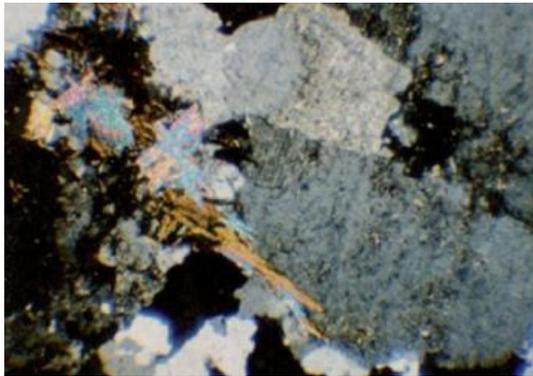


Figure 2.3 : lame mince de granite, feldspaths altérés et quartz à bordures microcristallines réactivité lente (qualification PR) [8]

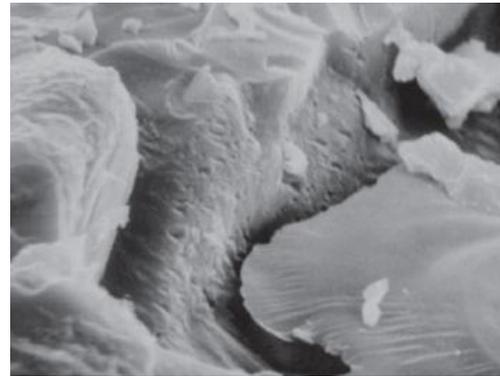


Figure 2.4 : observation au microscope électronique à balayage (MEB) de joints de grain élargis dans un granite altéré circulation facile [8]



Figure 2.5 : calcaire siliceux réactif SiO_2 15 à 20 % (qualification PR) [8]

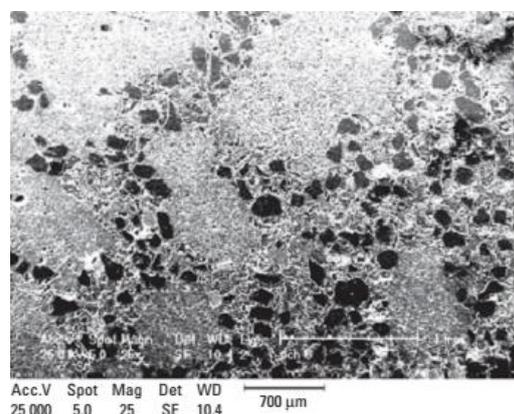


Figure 2.6 : calcaire à quartz non réactif SiO_2 15 à 20 % (qualification NR) [8]

2.2 Influence de l'eau

Larive a montré que l'eau (en tant que réactif) influence l'amplitude du gonflement qui dépend de la quantité d'eau localement disponible au moment de la formation des gels d'alcali-réaction. S'il existe une forte interaction entre le gonflement et le flux d'eau présente, l'étude des variations de poids des éprouvettes de béton montre qu'il n'y a pas de relation directe et linéaire entre ce flux d'eau et l'expansion. Par ailleurs, il semble que, lorsque la réaction est en pleine phase de développement, le gonflement augmente d'autant plus rapidement que de l'eau arrive en quantité importante. [8]

Cela est confirmé par les observations réalisées in situ lorsque nous constatons que les parties des structures en contact avec l'eau montrent toujours plus de désordres que les autres parties.

Il a également été démontré, sur la base d'expériences menées sur des éprouvettes complètement enveloppées dans des feuilles d'aluminium et conservées à 100 % d'humidité relative et à une température de 38 °C, que l'eau libre contenue initialement dans les pores du béton lors de sa fabrication suffisait à développer et alimenter la réaction. [8]

2.3 Influence de la porosité

La viscosité du gel dépend de sa composition chimique, et en particulier du rapport Ca/Si. La viscosité du gel, sa vitesse de formation, sa capacité de gonflement et surtout l'espace poreux disponible qui l'entoure sont des paramètres importants de l'expansion du béton. L'espace poreux inclut la porosité propre des granulats, la porosité de la pâte de ciment, l'auréole de transition située entre les granulats et la pâte de ciment, ainsi que les bulles et fissures préexistantes du béton (fissures de retrait et fissures créées par les gradients thermiques au jeune âge). [8]

C'est pourquoi il est extrêmement difficile de modéliser le gonflement du béton à l'échelle de la microstructure car il est nécessaire de connaître une grande quantité de paramètres qui s'avèrent difficilement accessibles par la mesure. [8]

2.4 Influence de rapport E/C

Un faible rapport E/C accroît les performances mécaniques du béton et densifie sa structure, ce qui le protège mieux contre les agressions exogènes. Concernant l'influence de E/C sur le comportement du béton vis-à-vis de l'alcali-réaction on peut noter qu'un abaissement de E/C :

- accroît la concentration des alcalins dans la solution interstitielle (son volume étant réduit) et donc l'agressivité de cette dernière .
- diminue la porosité, donc l'espace disponible pour l'expansion des gels .
- diminue la perméabilité, donc la vitesse de diffusion ionique et en conséquence la vitesse d'alcali-réaction .
- accroît la résistance et la rigidité du béton qui est alors plus apte à s'opposer aux efforts d'expansion. [12]

2.5 Influence de la température

Sur la base des résultats publiés par Larive , le gonflement asymptotique est pratiquement identique aux températures de 23 °C et 38 °C (moins de 10 % d'écart sur la valeur de l'asymptote). [8]

La forme des courbes d'expansion est similaire, et seule la cinétique est modifiée (voir figure 2.7). Des conclusions identiques peuvent être étendues jusqu'à une température de 60 °C. Il est donc nécessaire de prendre en compte ce paramètre pour la modélisation des structures, puisque les conditions thermiques dans lesquelles a vécu la structure ont une influence directe sur le développement de la réaction. En outre, les effets de la température sur la cinétique de la réaction peuvent être modélisés par la loi d'Arrhenius. [8]

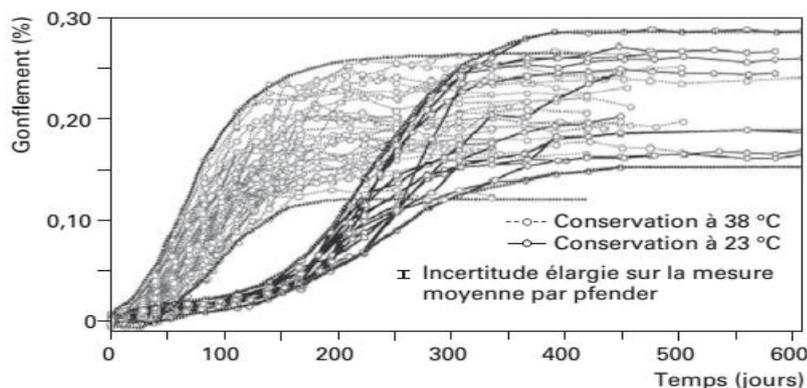


Figure 2.7 : Comparaison des gonflements libres de cylindres à 23 °C et à 38 °C [8]

2.6 Influence des additions minérales

On remarquera que ces additions minérales, qu'elles entrent ou non dans un cadre normatif, sont toutes des pouzzolanes. Les pouzzolanes artificielles résultent du traitement thermique, suivi de broyage, de produits naturels ou de déchets industriels ; les pouzzolanes naturelles sont des matériaux naturels ayant subi un simple broyage. [12]

2.6.1 Fumées de silice

Dès lors que ces matériaux (pouzzolanes artificielles) sont pauvres en alcalins (moins de 1 % de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{éq.}}$) et que leur dosage est suffisant, leur emploi conduit à de bons ou très bons résultats. Le dosage optimal est généralement compris entre 10 et 15 % mais cette fourchette peut être déplacée vers des valeurs plus faibles ou plus fortes, essentiellement en fonction des granulats réactifs. C'est ainsi que l'emploi de ciment renfermant 7,5 % de fumées de silice s'est révélé un moyen bénéfique en Islande, depuis 1979, pour empêcher l'apparition de toute alcali réaction nocive dans les bétons de bâtiment alors que le clinker est riche en alcalins et que certains granulats sont réactifs. (figure 2.8) montre qu'à ce même dosage de 7,5 % de fumée de silice, dans d'autres situations, la réduction du gonflement est négligeable. [12]

Toutefois, quelques réserves ont été formulées quant à l'efficacité des fumées de silice pour contrer l'alcali-réaction dans des cas particuliers.

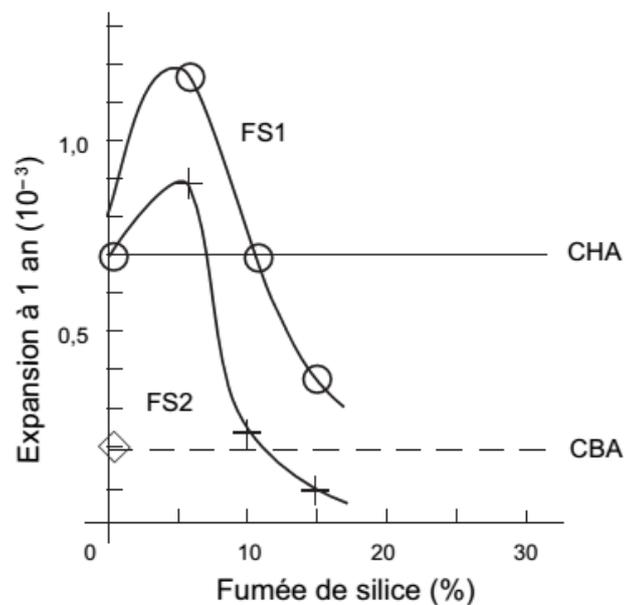


Figure 2.8 : influence de deux fumées de silice sur l'expansion à 1 an de mortiers renfermant un granulat siliceux réactif. [12]

2.6.2 Cendres volantes

Là aussi l'efficacité de ces matériaux (pouzzolanes artificielles) dépend de plusieurs paramètres : dosage, finesse, composition chimique, teneur en alcalins mais aussi nature du granulat réactif. On peut retenir deux cas de figure où les cendres volantes sont inopérantes : la réaction alcali-carbonate et l'utilisation de certaines variétés de cendres volantes très riches en alcalins qui peuvent augmenter l'expansion due à une réaction alcali-silice. [12]

Ceci étant dit, on reconnaît généralement que les cendres volantes, surtout celles de composition silico-alumineuse, dès lors qu'elles sont de bonne qualité, que leur teneur en alcalins est inférieure à 2 ou 3 % en $\text{Na}_2\text{O}_{\text{éq}}$ et que leur dosage est d'au moins 30 %, constituent un bon moyen de prévention de l'alcali-réaction. [12]

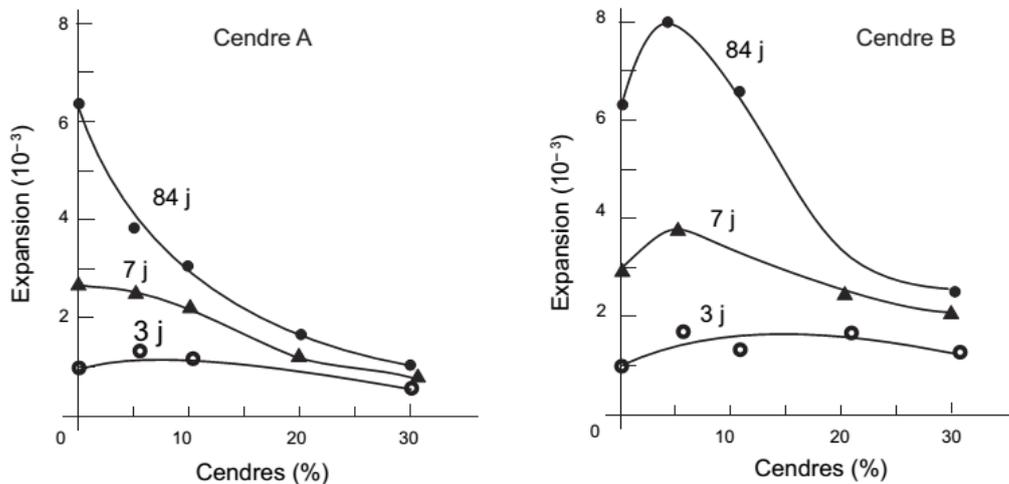


Figure 2.9 : Influence du taux de cendres volantes sur l'expansion de mortier. [12]

Des publications récentes indiquent que des cendres volantes silico-alumineuses même si elles ne sont pas de « bonne qualité » sont efficaces. Mais dans le même temps, le suivi des performances des bétons employés dans les tunnels suisses du Alptransit Gotthard et du Lötschberg amène à conclure que les critères de qualité, concernant les cendres volantes, ne sont pas suffisants. [12]

2.6.3 Brique pilée

Bektas et al. ont montré que ce matériau, déjà utilisé par les Romains comme pouzzolane artificielle, est également apte à contrecarrer les effets de l'alcali réaction : les remplacements de 35% du ciment par de la brique broyée dans des mortiers renfermant des sables réactifs ont provoqué des réductions de gonflement de 78 à 81 %.[12]

2.6.4 Pouzzolanes naturelles

Les pouzzolanes naturelles proviennent de roches consolidées ou non, d'origine volcanique pour la plupart, dont la composition est essentiellement silico alumineuses et la structure majoritairement amorphe. Il en existe une grande variété : tufs, terre de Santorin, Trassrhéan, rhyotites, zéolite, etc. [12]

2.6.5 Fines minérales obtenues par broyage des granulats réactifs

En partant de la constatation qu'un granulat réactif aux alcalins peut devenir une pouzzolane très active lorsqu'il est finement broyé, des tentatives ont été faites pour réduire ou supprimer le gonflement provoqué par un granulat réactif en ajoutant dans le béton des fines résultant d'un broyage poussé de ce même granulat. Bian et al. sur des mortiers, Guedon-Dubied et al. sur des bétons, Pedersen. Moisson, Moisson et al. ont montré que cette piste était probablement intéressante : sur des bétons confectionnés avec cinq types de granulats (opale, quartzite, calcaire siliceux, gravier du Nouveau Mexique, verre à vitre), ils ont noté, consécutivement à l'introduction de fines de broyage des granulats respectifs, des réductions importantes de l'expansion, comprises entre 30 et 100 %, pour 4 granulats avec un seul échec (Nouveau-Mexique). [12]

2.7 Influence des contraintes sur l'expansion du béton.

En première approximation, on peut admettre que les contraintes d'origine mécanique n'ont pas d'influence sur le développement et la cinétique de la réaction chimique. Dans le cas d'un chargement uniaxial, il n'existe pas de couplage entre la réaction chimique et la pression appliquée. L'expansion, qui est empêchée suivant la direction de la pression appliquée, est compensée par une plus forte expansion selon les directions non contraintes. La campagne

CHAPITRE 02 Les paramètres influençant et les conséquences de la RAG

expérimentale menée au LCPC par Larive a montré que le gonflement volumique moyen reste globalement constant lorsque la valeur de la contrainte uniaxiale appliquée sur les éprouvettes reste en dessous de 10 MPa . [8]

À partir de niveaux de contraintes de l'ordre de 20 MPa, le fluage joue un rôle significatif sur les déformations des éprouvettes et il devient bien plus difficile de tirer des conclusions sur les effets des contraintes sur le gonflement dû à l'alcali-réaction. [8]

Une expérimentation conduite par le LCPC a consisté à prélever des carottes dans un pont fortement endommagé et à les immerger dans l'eau sous différents taux de contraintes (0, 1, 3 et 5 MPa). Les résultats ont montré qu'il fallait appliquer des contraintes de l'ordre de 5 à 10 MPa afin de contrecarrer le gonflement du béton selon la direction d'application de l'effort (voir figure 2.10). Vers la fin de l'expérimentation, l'éprouvette précédemment chargée à 5 MPa a été déchargée jusqu'à 1 MPa et il a été observé que cette éprouvette commençait à gonfler et que ce gonflement atteignait une valeur proche de celle de l'éprouvette qui avait été chargée à 1 MPa. Nous avons alors conclu que les contraintes s'opposaient au gonflement dans la direction chargée, mais qu'elles ne bloquaient pas la réaction chimique. [8]

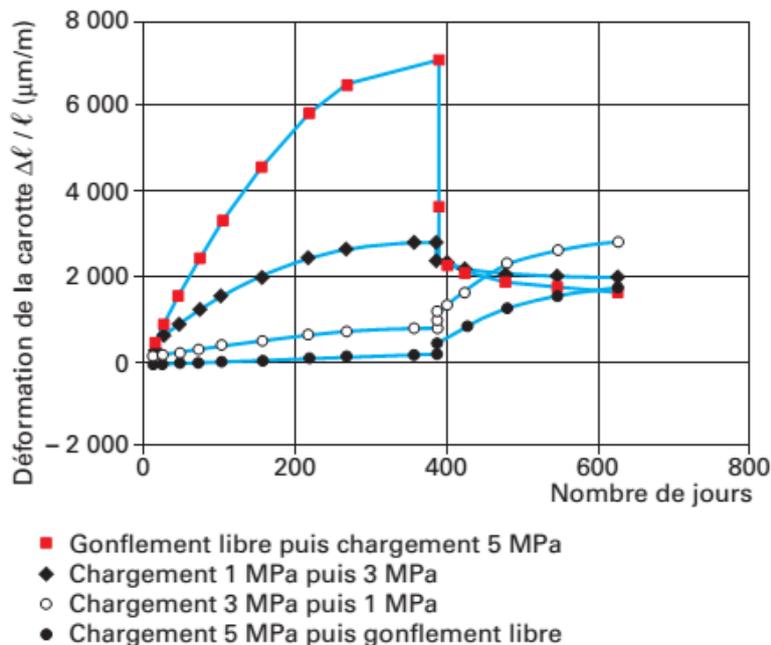


Figure 2.10 : Influence des contraintes sur l'expansion d'éprouvettes en béton prélevées dans un ouvrage affecté par l'alcali-réaction [8]

2.8 Conséquences mécaniques pour le béton

Le gel d'alcali-réaction qui se développe au sein d'un matériau rigide crée à l'échelle microstructurale des désordres comme des fissures transgranulaires et intragranulaires, des microfissurations autour des particules réactives, et surtout des décollements à l'interface pâte de ciment – granulats bien visibles au microscope électronique à balayage.

La première caractéristique mécanique affectée par la microfissuration qui se développe progressivement est le module de déformation qui subit assez rapidement une baisse significative. La seconde est la résistance à la traction directe du béton qui peut chuter de moitié pour des déformations de l'ordre de 3 à 5 mm/m. Quant à la résistance à la compression, elle se maintient généralement bien au début de la réaction, et il faut atteindre des déformations de l'ordre de 2 à 3 mm/m pour que celle-ci commence à diminuer sensiblement. [8]

3 Connaissances relatives à la structure

3.1 Rôle du ferrailage sur le gonflement de la structure

La (figure 2.11) montre la flèche moyenne mesurée à mi-travée de cinq poutres où B1, B3 et B4 sont des poutres réactives respectivement :

- ✓ non armée pour B1.
- ✓ armée avec deux aciers HA 16 situés à 50 mm de la fibre inférieure et deux aciers HA10 situés à 45 mm de la fibre supérieure pour B3.
- ✓ armée avec deux aciers HA 32 situés à 80 mm de la fibre inférieure et deux aciers HA20 situés à 50 mm de la fibre supérieure pour B4.

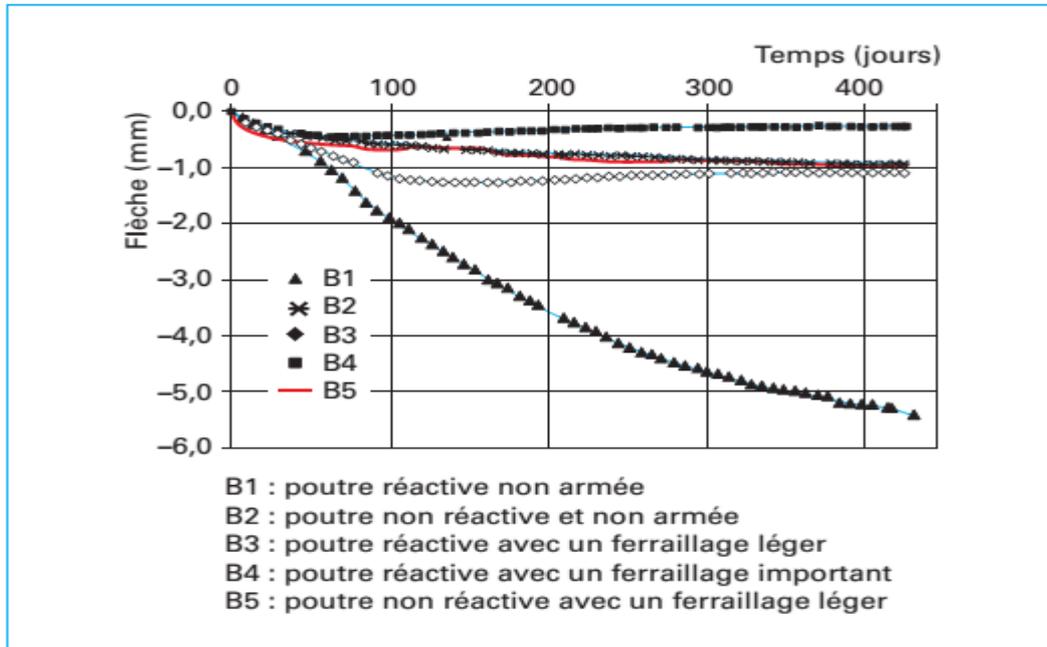


Figure 2.11 : Flèche moyenne mesurée à mi- travée des cinq poutres [8]

Les effets des armatures peuvent clairement être visualisés sur la (Figure 2.11), avec une réduction de la flèche de 80 % pour B3 et de 95 % pour B4. Les armatures s'opposent à l'expansion longitudinale du béton dans la partie basse de la poutre et y engendrent des contraintes de compression. Cela crée un moment de flexion négatif qui diminue la flèche de la poutre, comme s'il y avait une précontrainte ajoutée dans le bas de la poutre. [8]

La (figure 2.12) présente les déformations longitudinales globales mesurées à mi-hauteur des cinq poutres. Après 400 jours, la déformation de la poutre non armée atteint 0,11 %, tandis qu'elle atteint 0,08 % pour B3 et 0,04 % pour B4. La diminution de la déformation longitudinale globale est en gros proportionnelle aux efforts de traction développés dans les armatures. La fissuration en face inférieure des poutres B3 et B4 est plutôt orientée longitudinalement, suivant ainsi les armatures de renfort.

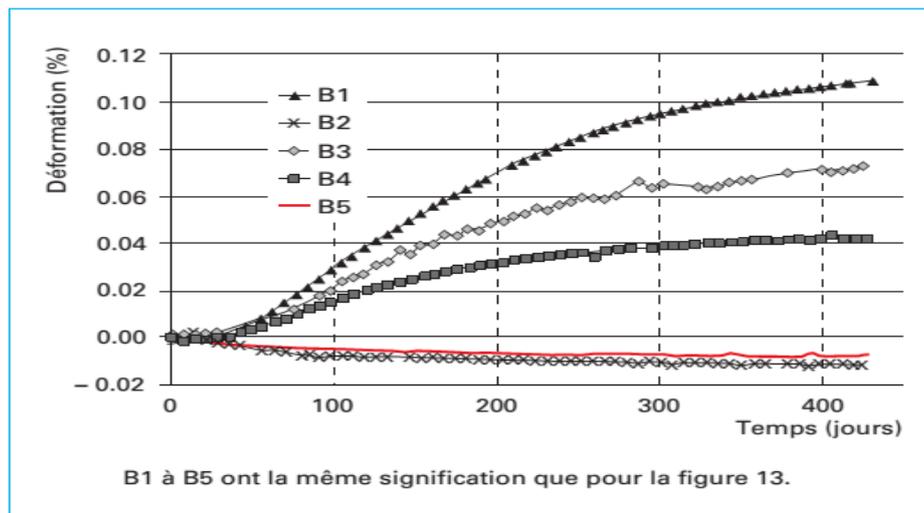


Figure 2.12 : Déformations longitudinales globales mesurées à mi-hauteur des cinq poutres[8]

Le ferrailage constitue donc un élément clé à prendre en compte lors d'une évaluation de l'état limite de service d'une structure. Plus la structure est armée dans les trois directions, plus elle peut supporter le gonflement du béton. Les constatations effectuées sur certains ponts nous enseignent que si le ferrailage est insuffisant, alors il ne peut pas résister au gonflement du béton et des armatures peuvent se rompre. [8]

3.2 Conséquences mécaniques pour la structure

L'alcali-réaction provoque une expansion hétérogène des différentes parties d'une structure. L'hétérogénéité des déformations longitudinales, transversales et verticales engendre des contraintes très élevées et auto équilibrées qui induisent une forte fissuration de la partie de structure, même si cette dernière est isostatique. [8]

Il est important de noter que, parce que le ferrailage passif n'a pas d'expansion propre, des contraintes spécifiques auto équilibrées sont générées : les armatures sont soumises à des contraintes de traction et le béton à des contraintes de compression. Les contraintes Auto équilibrées résultantes peuvent être très élevées, puisqu'une barre de limite d'élasticité de 400 MPa entre dans le domaine plastique quand elle est soumise à une élongation moyenne de $2 \cdot 10^{-3}$, une valeur qui n'est pas si rare avec l'expansion du béton. [8]

Ces contraintes auto équilibrées très importantes donnent lieu à une fissuration en réseau qui est caractéristique d'une réaction de gonflement interne. De plus, il semble que dans les cas extrêmes, elles peuvent aussi causer le délaminage du béton dans des plans parallèles à l'axe

CHAPITRE 02 Les paramètres influençant et les conséquences de la RAG

longitudinal des poutres, et cela se concrétise notamment par un décollement du béton d'enrobage autour des armatures. [8]

En outre, des gonflements différentiels peuvent exister entre la surface et le cœur des structures, comme le démontre la forme en « V » assez typique des fissures qui apparaissent très ouvertes en surface. Le cœur gonfle davantage que la surface, principalement à cause des gradients d'humidité existants (la surface est plus sèche que le cœur et le retrait peut même y exister), et aussi à cause de la lixiviation des alcalins et de la carbonatation (réduction du pH) existant à la surface des structures. [8]

Les principales conséquences mécaniques sont :

a) Des contraintes normales et de cisaillement auto équilibrées qui apparaissent sur toutes les facettes et génèrent une fissuration en réseau ; cette dernière tend cependant à disparaître à l'état limite ultime par ouverture des fissures et plastification des matériaux (aciers et béton). Mais il est souhaitable de vérifier que l'ouverture des fissures ne remet pas en question la durabilité de la structure et que l'allongement des armatures reste acceptable au droit des fissures les plus ouvertes. [8]

b) Des contraintes normales et de cisaillement résultant des déformations empêchées dans les structures hyperstatiques. Contrairement au développement des contraintes internes auto équilibrées, celles-ci sont libérées seulement en partie par la fissuration et la plastification lorsque l'on s'approche de l'état limite ultime dans certaines sections. En fait, comme les effets hyperstatiques résultent d'un « blocage » des déformations globales de la structure, la plastification locale d'une seule section n'est pas suffisante pour les libérer complètement, sauf lorsque l'on atteint de très hauts niveaux de déformation plastique (généralement inacceptable pour des matériaux). D'un autre côté, elles devraient être faciles à calculer, si l'on connaissait les déformations globales des sections (allongement au niveau de l'axe neutre et rotations des sections) malheureusement, ce n'est généralement pas le cas. [8]

4 Pathologie et manifestations externes

4.1 Description des désordres

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 (figure 2.13), 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, etc. Dans certains cas extrêmes et heureusement rares comme le cas des structures insuffisamment ferrillées, le gonflement du béton peut provoquer la rupture d'armatures passives. Le « Manuel d'identification des réactions de dégradation interne du béton dans les ouvrages d'art » publié par le LCPC en février 1999 apporte une aide utile pour l'identification des diverses manifestations pouvant traduire l'existence d'une telle réaction. [8]

En l'absence d'un recensement exhaustif, on estime à environ 400 le nombre d'ouvrages d'art atteints en France par une réaction de gonflement interne du béton, que celle-ci ait pour origine une alcali-réaction ou une réaction sulfatique interne. Les ouvrages concernés sont des ponts, des murs de soutènement et une petite dizaine de barrages. La plupart ont été construits dans les années 1970 à 1980. Ils sont atteints à des degrés très divers, et il ressort des différentes enquêtes menées que beaucoup d'ouvrages sont peu affectés, et qu'à l'inverse un faible nombre le sont gravement ; à ce jour, une dizaine d'ouvrages atteints d'alcali-réaction ont été démolis. Les régions les plus touchées par l'alcali-réaction sont le nord de la France et la Bretagne, et les désordres sont souvent observés entre 3 et 10 ans après la construction de l'ouvrage. [8]



maillage de fissures sur un mur en aile



fissuration orientée horizontalement sur une poutre précontrainte



déformation excessive (flèche d'une travée de pont-dalle en béton armé)



rejet de 2 mm d'une fissure (gonflement différentiel)

Figure 2.13 : Illustration de désordres visibles sur les parements des structures atteintes d'alcali-réaction [8]

4.2 Fissuration caractéristique due à la réaction alcalis-granulats

Une fissuration dont les motifs sont relativement équi-dimensionnels, comme celle illustrée aux figures 2.14 et 2.15, est caractéristique du béton non armé ou légèrement armé qui subit une réaction alcalis-granulats. [16]

Cependant, lorsque l'armature du béton comporte une quantité importante d'acier, la fissuration a tendance à être plus marquée parallèlement aux barres d'armature (figure 2.16). Toutefois, d'autres causes peuvent aussi être à l'origine de la fissuration en faïençage, comme la contraction lors du séchage (parfois appelé fissuration avant la prise), particulièrement dans des dalles de béton en pente, coulées par temps chaud et venteux sans mûrissement adéquat.

CHAPITRE 02 Les paramètres influençant et les conséquences de la RAG

Ce type de fissuration se produit dans les heures ou les jours qui suivent le coulage du béton. Par contre, la fissuration causée par la réaction alcalis-granulats ne devient manifeste généralement qu'après 5 à 10 ans. [16]

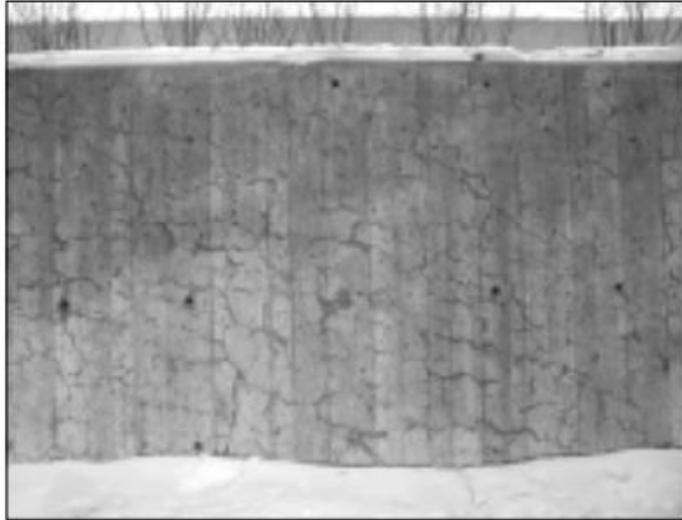


Figure 2.14 : Fissuration caractéristique en faïençage causée par la réaction alcalis-silice dans un mur de soutènement à Ottawa (Ontario) [16]



Figure 2.15 Fissuration en faïençage et éjection du matériau de remplissage de joints causée par l'expansion du béton soumis à la réaction [16]

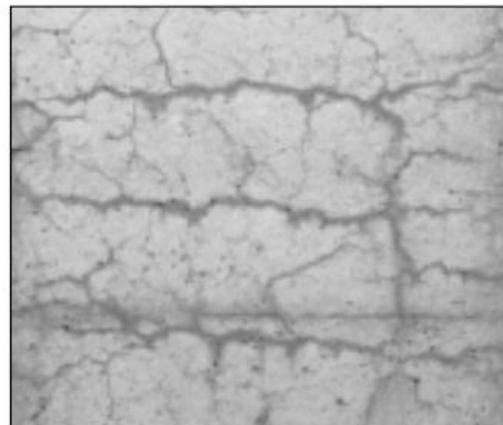


Figure 2.16. Fissuration importante parallèle aux barres d'armature dans le mur de soutènement d'un pont de la Ville de Québec (Québec) [16]

4.2.1 Fissuration superficielle

Un motif de fissuration est presque toujours observé à la surface des parties exposées et atteintes par l'alcali-réaction. La plupart du temps, il consiste en un réseau polygonal de fissures, plus grossier que ceux qui résultent de retrait de dessiccation ou de l'action de cycles gel-dégel. Parfois, les contraintes imposées aux ouvrages induisent une orientation préférentielle des fissures. [12]

L'ouverture des fissures demeure le plus souvent inférieure à 10 mm. Elle progresse à un rythme variable qui peut dépasser 1 mm/an. Les fissures pénètrent rarement de plus de 5 cm à l'intérieur du béton. Les bétons massifs de barrage, par contre, peuvent être affectés par des fissures jusqu'à 45 cm de la surface. [12]

4.2.2 Micro-fissures

Comme le processus de la réaction alcali granulat est expansive, une pression est exercée sur la pâte cimentaire du béton environnant et tend à provoquer des microfissures qui se propagent radialement autour de la zone affectée. (Figure 2.17). [13]

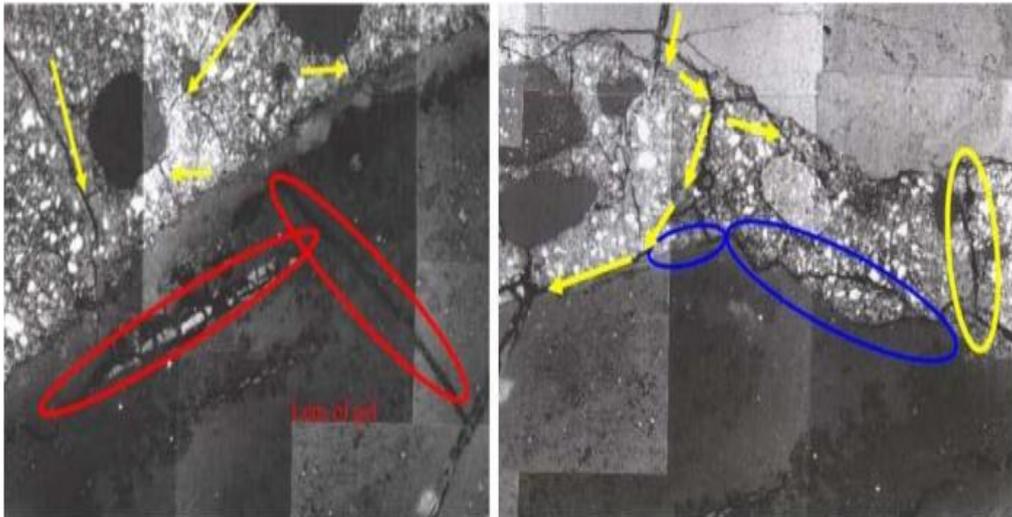


Figure 2.17 : Fissuration à la limite de l'agrégat, pâte de ciment, causées par l'expansion de la réaction alcali granulat [13]

4.2.3 Macro-fissures

Ce sont des fissures sur une plus grande échelle qui peuvent souvent être visible à la surface du béton structures affectées par la réaction alcali granulat (Figure 2.18/(Figure 2.19).

Les fissures ont une caractéristique de "carte de faïençage".[13]



Figure 2.18 : Endommagement de la culé par apparition de fissuration >25 mm d'ouvertures sur le pont Golden à Jobourg, Sud Afrique, et l'image de droite montre des fissurations au joints de deux voussoirs. [13]



Figure 2.19 : L'image de gauche est une structure auxiliaire au barrage Belesar en Espagne, et l'image de droite montre le modèle de fissures caractéristique affectant une barrière de sécurité sur une autoroute aux États-Unis. [13]

4.3 Effets visuels de la réaction alcali granulats

Plusieurs types de désordres peuvent être générés par l'alcali-réaction. Il s'agit essentiellement de déformations et de mouvements différentiels, de fissurations et de dégradation généralisée des parements. De plus, ces désordres sont presque toujours limités aux composantes ou aux parties de composantes les plus sévèrement exposées. [12]

4.3.1 Expansion du béton et désordres associés

L'expansion du béton est l'une des principales conséquences de l'alcali-réaction.

L'éclatement de joints de dilatation ou de construction, l'extrusion des scellants de joints, le bris de cornières métalliques, la déformation du béton (déflexion, distorsion, gonflement...), les mouvements différentiels entre éléments structuraux, le blocage de machines (turbines, portes d'écluses...), voilà autant d'évidences de cette expansion. De nombreux exemples sont cités dans la littérature. Mentionnons également que d'autres phénomènes peuvent produire des déformations ou des mouvements différentiels entre composantes de béton, comme les cycles de gel-dégel, l'attaque des sulfates, les chargements, les variations d'humidité et de température, les vibrations, le fluage, etc. Il s'agit donc de manifestations importantes de l'alcali-réaction, mais pas nécessairement limitées à ce phénomène. De plus, précisons qu'elles n'altèrent que rarement le fonctionnement de l'ouvrage. [12]

4.3.2 Gonflement du béton

Les réactions alcalis-silice et alcalis-carbonate entraînent le gonflement du béton. L'importance du gonflement ou de l'expansion dépend de la réactivité des granulats, de l'alcalinité de la solution interstitielle du béton et de l'humidité ambiante du milieu où se trouve la structure. Une expansion de plus de 0,1 % n'est pas rare. Une expansion de 0,1 % entraînerait une augmentation en longueur de 1 cm pour chaque 10 m dans une structure non armée. Dans de nombreuses structures, ce degré d'expansion peut ne pas poser de problème, mais dans les longs trottoirs ou les murets disposés entre les voies de circulation par exemple, cette expansion peut provoquer une compression et un gonflement. L'expansion dans les

CHAPITRE 02 Les paramètres influençant et les conséquences de la RAG

grandes constructions comme les barrages et les centrales peut gêner le fonctionnement des vannes et des turbines. [16]

4.3.3 Exsudations de gels siliceux

La présence d'exsudats est un indice caractéristique de réaction alcali-silice dans la mesure où on ne les a pas confondus avec des concrétions de chaux carbonatée : pour éviter la confusion on peut être conduit à des vérifications en laboratoire (analyse chimique, MEB-EDS, DRX...).[12]

4.3.4 Éclatements ponctuels

Certains granulats en réagissant près de la surface peuvent produire des éclatements ponctuels. Il s'agit toutefois d'un phénomène accessoire, plus généralement associé à la présence de particules gélives. [12]

4.3.5 Dégradation généralisée des parements

On en arrive à des parements pratiquement méconnaissables lorsque y coexistent un motif de fissuration relativement dense, une coloration brunâtre des bords de fissures, des exsudats, des éclatements locaux. [12]

4.4 Diagnostic

Structures affectées par la RAG manifeste habituellement trois signes :

- a)* L'expansion du béton .
- b)* Des fissures sur surface .
- c)* Et des produits qui peuvent exsuder à la surface du béton, en particulier au niveau des joints.

Cependant, la RAG ne peut pas être identifié par (a) et (b) seul car il y a beaucoup de raisons qui pourraient provoquer les fissurations du béton et l'expansion. La présence de gel, ne peut être confirmée que par l'utilisation de d'un microscope électronique à balayage (MEB). [13]

5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons expliqué les conséquences et les paramètres influençant du phénomène ont été examinés et le plus important :

- L'influence des granulats est très importante pour l'alcali réaction. De leur réactivité dépendent la cinétique et l'amplitude du gonflement engendré.
- L'eau est un ingrédient essentiel pour l'alcali réaction. Elle est à la fois un ingrédient des produits de réaction et le milieu réactionnel et de transport des espèces ioniques. Plus la perte d'eau est forte et plus le gonflement est faible. Il est même possible d'inhiber le gonflement par un séchage approprié du matériau.
- La réaction alcali se compose de plusieurs réactions chimiques. Elle est sensible à la température. Une augmentation de température entraîne une augmentation de la cinétique globale de la réaction par effet d'activation. En revanche, la température ne semble pas avoir d'effet sur la valeur maximale de l'expansion.
- La teneur en alcalins a une grande influence sur la réaction. Plus il y a d'alcalins dans la solution interstitielle, plus la concentration en ions hydroxydes est forte et plus la cinétique et l'amplitude de la réaction sont importantes.

En ce qui concerne les conséquences, ils sont en forme :

- Le gonflement des ouvrages atteints.
- La fissuration et la chute des caractéristiques mécaniques du béton.

Chapitre 03

L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

1 La méthodologie de conduite d'une opération de qualification des granulats

1.1 Généralité

La démarche de qualification des granulats impose d'identifier le type de granulats auquel on a à faire et les espèces réactives qui sont contenues dans ce granulat. Cela implique, d'une part la recherche d'espèces réactives par une identification pétrographique du granulat au sens large et d'autre part par la vérification de la potentialité de réactivité qui implique des essais rapides et à long terme. [18]

1.2 Recherche d'espèces réactives

On procède à une identification pétrographique du granulat au sens large qui peut s'appuyer, soit uniquement sur une analyse chimique, soit par des examens pétrographiques plus poussés utilisant tout ou partie de méthodes telles que [18] :

- l'analyse pétrographique sur lame mince.
- la diffraction X.
- la spectrographie infra-rouge.
- des essais de réactivité par examen au microscope électronique à balayage après traitement alcalin, etc.

Après identification pétrographique du granulat :

- ✓ soit le granulat ne contient pas d'espèces réactives en quantité néfaste et il est directement classé non réactif (NR).
- ✓ soit le granulat contient des espèces réactives en quantité supposée critique ou néfaste, et dans ce cas là, on vérifie que la présence et la teneur de ces espèces réactives confèrent au granulat une potentialité de réactivité (PR) qui peut être testée par l'un des essais normalisés.

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

1.3 Vérification de la potentialité de réactivité

Pour cela, on procède à des essais qui sont [18]:

- soit des essais rapides donnant des résultats, dans un délai de l'ordre d'une semaine :
 - essais Microbar P 18-588.
 - test cinétique P 18-589.
 - autoclave P 18-590.

- soit des essais à plus long terme, qui sont aussi des essais accélérés, mais qui donnent des résultats en quelques mois :
 - essais sur mortier P 18-585.
 - essais sur béton P 18-587.

Ces essais peuvent être classés en deux familles d'essais :

- d'une part, les essais de gonflement dans des conditions d'accélération qui utilisent l'alcanisation du milieu et la température. Si le gonflement est inférieur à un seuil déterminé, le granulat est classé "non réactif", si le gonflement est supérieur au seuil déterminé, le granulat est classé "potentiellement réactif" avec une plage d'incertitude de 10 % autour de la valeur du seuil. [18]
- d'autre part, un essai chimique basé sur la mesure de l'évolution du rapport $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ en fonction du temps d'une solution de soude dans laquelle le granulat broyé est conservé à 80°C. [18]

1.4 Les essais rapides

Trois essais permettent d'obtenir un résultat de qualification en moins d'une semaine. Les trois normes proposées sont expérimentales. [18]

L'essai Microbar P 18-588

Cet essai utilise des micro-éprouvettes 1 x 1 x 4 cm qui sont soumises successivement à une cure humide, à la vapeur d'eau bouillante, puis à une cure alcaline en milieu KOH à 10 % et à 150°C et dont on mesure les variations dimensionnelles pour trois rapports C/G (ciment - granulats). [18]

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

L'essai de cinétique chimique P 18-589

Cet essai est une optimisation déterminante de l'ASTM C 289 ou de la norme P 18-584 par introduction notamment de la notion de cinétique de dissolution et du suivi de l'évolution du rapport $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de la solution. [18]

Aux échéances de 24, 48, 72 heures, le point représentatif de l'évolution du rapport $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ est reporté sur un diagramme qui permet le classement non réactif, potentiellement réactif ou potentiellement réactif à effet de pessimum. [18]

L'essai P 18-590

Cet essai s'appuie sur le suivi dimensionnel d'éprouvettes 4 x 4 x 16 sur alcanisées à 4 % en équivalent Na_2O par rapport au ciment, qui après cure humide et une conservation pendant 24 heures, sont soumises à un autoclavage à une pression de 0,15 MPa durant 5 heures. [18]

Les essais P 18-588 et P 18-589 sont actuellement les seuls qui permettent le classement (PRP) (potentiellement réactifs à effets de pessimum). Il existe dans le projet de fascicule de documentation P 18-542 un diagramme de classement des essais P 18-589 et P 18-588 qui permet le classement des granulats en (NR), (PR), (PRP) suivant leur appartenance à une des trois zones définies. [18]

1.5 Les essais à moyen terme

Les deux normes proposées sont expérimentales.

Dans les essais à moyen terme, il s'agit d'optimisation extrêmement importante des essais ASTM C 227 d'une part, et de l'essai canadien ACNOR, optimisation qui porte sur l'alcanisation du milieu (1,25 % en équivalent Na_2O par rapport au ciment) et sur le maintien de conditions strictes d'hygrométrie et de température (38°C et saturation d'humidité) qui sont extrêmement importantes pour la fiabilité de ces essais. [18]

Pour la norme P 18-585

Les essais sont réalisés sur mortier (prismes 2,5 x 2,5 x 28,5 cm) et concernent les sables. Les résultats sont obtenus à six mois avec une mesure indicative à trois mois. [18]

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

Pour la norme P 18-587

Les essais sont réalisés sur béton (prismes 7 x 7 x 28 cm) et concernent les gravillons ; le sable utilisé pour la confection des prismes étant un sable non réactif.

Les résultats sont obtenus à huit mois. [18]

Nous avons pris ce que l'étudiant a fait (TABET Mohamed) d'essais de comment diagnostiquer la réaction alcali granulat dans le troisième chapitre de sa thèse , sous le titre « Contribution à l'étude de la réaction alcali granulaire par modélisation numérique et expérimental du phénomène » . Et nous avons considéré comme un exemple pour nous d'expliquer ce phénomène dans ce chapitre.

2 Méthodes et essais adopté

2.1 Principes ayant guidé nos choix expérimentaux

Ils ont choisi de prendre deux sources de granulats l'un réactifs et l'autre connu pour être non réactive, et comme nous partons d'une hypothèse que les agrégats quoi qu'il soit leur nature ils ont un niveau de réactivité qui selon les méthodes citer auparavant, on peut y savoir. Vue que les deux types d'agrégats choisis sont bien différentes par leur composition mais dont le caractère réactif était bien établi.

Les deux granulats entrent dans la catégorie des granulats réactifs et non réactifs susceptibles d'entraîner des réactions alcali-silice ; ils ont été sélectionnés car ils représentent les classes pétrographiques les plus communes, à savoir les siliceux et les calcaires siliceux. Ces deux granulats ont été choisis, depuis plus de 20 ans, par l'Institut du Ciment & Béton (CCI), Afrique du Sud comme étalons réactifs et non réactifs : il s'agit des quartzites et andésite du groupe Witwatersand de Johannesburg.

Le quartzite référencé comme granulat réactif (R) et l'andésite référence comme non réactif (NR). Il a été décidé de conduire le programme expérimental sur des mortiers de barre en utilisant la méthode AMBT proposé par ASTM [ASTM C 1260-07.2007] car ce dernier exige moins de quantité de matériaux que les bétons et un essai de durée extrêmement rapide, permettant ainsi des manipulations plus rapides.

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

Pour accélérer la réaction nous avons privilégié des essais à température élevée et hygrométrie voisine de 100% mais sans entrer dans le domaine hydrothermal qui est celui des traitements à l'autoclave, ou le NBRI (méthode Sud-Africain) se considère d'être la première méthode accélérer pour prouver la potentialité d'un agrégat à une réaction alcali granulaire (alcali silice).

La nécessité pour accumuler le maximum de données sur tous les aspects que pouvait prendre l'expansion, nous avons opté pour une série deuxième de test qui corrige les inconvénients des méthodes AMBT qui considérés comme trop sévère en raison de leurs conditions d'essai extrêmes, y compris l'utilisation d'une température d'exposition élevée, des granulats fins, et des échantillons avec grande surface de rapports de volume, l'extension de notre programme expérimental par l'utilisation par l'essai MCPT [AASHTO TP 110-14.2014] qui prend en compte l'effet de taille des échantillons et tailles des agrégats utilisé et les conditions agressive de l'essai.

3 Justification du choix des matériaux

3.1 Ciment

Ils ont choisi un seul et même ciment pour la totalité de leurs essais. Nous avons tout d'abord considéré qu'un ciment contenant une quantité limitée d'additions minérales s'imposait, faute de quoi ces dernières pourraient manifester une activité parasite dans le déroulement des phénomènes de réaction alcali-granulaire (RAG). En second lieu ce ciment doit apporter une quantité suffisante d'alcalins de façon naturelle. Nous avons donc sélectionné un ciment CEM I 52,5N Afrisam ciment à durcissement rapide sans ajout minérales.

3.2 Granulats

Leur choix a été guidé par le souci de couvrir un large éventail des granulats parmi ceux dont les multiples études antérieures ont montré qu'ils étaient potentiellement réactifs ou réactifs. Notre est basé sur des agrégats réactifs (Quartzite) qu'on sait leur réactivité avec certitude et l'autre type d'agrégats (Andésite) que sa réactivité est encore en question, pour que notre modélisation expérimental et numérique du phénomène il fallait tester notre modèle sur des résultats concrets.

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

3.3 Eau

Vue le rôle majeur qu'il porte, le choix de la qualité d'eau est essentiel dans notre cas d'étude, ou [Dent-Glasser et al.1981], [Larive et al.2000], [Steffens et al.2003] et beaucoup d'autre auteurs en rapporter l'influence colossale du pourcentage requis pour l'occuration d'une réaction. On a opté pour une eau distillée pour éviter le possible interaction chimique avec les minéraux d'eau de robinet, qui par la suite peut nous donner une lecture assez douteuse.

4 Mode opératoire

4.1 L'essai Barre de mortier Accéléreur (AMBT)

ASTM C 1260

ASTM C 1260 est un essai standardisé utilisé par les chimistes de ciment, les technologues en béton, et l'industrie pour déterminer la susceptibilité d'un agrégat à la réaction alcali silice [ASTM C 1260-07.2007] ou on confectionnent 3 barres de mortier et 3 prisme de béton miniature pour chaque essais. Les agrégats qui sont utilisés dans ce test sont des agrégats concassés pour y avoir un sable, et classés avec une granulométrie spécifique au test.

Un rapport agrégat/ciment de 2,25 est utilisé avec un rapport eau/ciment de 0,47. On a mélangé assez de mortier pour faire trois barres de mortier pour chaque type d'agrégats utilisé avec les dimensions de 25 x 25 x 285 mm. Les barres de mortier sont ensuite durcies pendant 24 heures à une température de $23 \pm 1,7$ ° C, démoulés et immergés dans l'eau dans un récipient fermé.

Les proportions et formulation du mélange des ingrédients utilisés dans la préparation des échantillons ASTM C1260 sont résumé comme suit :

Ciment (Kg/m ³)	420
E/C	0,47
A/C	2,25
Eau (L)	194,4
Agrégats fins (Kg)	945

Tableau 3.1 : Proportions de mélange pour la formulation des prismes de béton miniature.

[Latifee.2015]

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention



Figure 3.1 : Moules d'une barre de mortier.



Figure 3.2 : Support de mesure d'élongation

Les récipients sont placés dans un bain d'eau maintenu à 80 ° C. Au bout de 24 heures, la longueur initial (zero-mesure) des éprouvettes sont mesurées, et ensuite replacé dans des récipients avec 1 N (1 Mole) d'une solution d'hydroxyde de sodium maintenue à 80 ° C.



Figure 3.3 : Les récipients pour les barres de mortier.

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention



Figure 3.4: réservoir à bain d'eau chaud à 80°C.

Le volume de la solution d'hydroxyde est compris entre 3,5 à 4,5 fois le volume des barres de mortier. Des lectures ultérieures de la longueur d'élongation sont périodiquement prélevés à des intervalles périodiques de 3, 7, 10, 14, 21 jours. On a opter de poursuivre l'essai jusqu'à 21 jours pour voir l'effet résiduel de la réaction.

Pour chaque lecture les échantillons sont enlevés brièvement avec attention et mesurés avant un refroidissement significatif qui pourrait se produire.

L'expansion moyenne des trois barres de mortier, après 14 jours d'immersion dans la solution d'hydroxyde, est utilisée pour estimer la réactivité de l'agrégat.

Comme cela est illustré dans le tableau une expansion de 0,0% à 0,01% signifie que l'agrégat spécifique testé ne réagit pas, de 0,01% à 0,02% est considérée comme inoffensif et peu concluantes et nécessitent d'autres essais, et supérieure à 0,02% est considérée comme réactif.

Expansion (%)	Réactivité des agrégats
0.0-0.01	Non réactive
0.01-0.02	Inoffensif
>0.02	réactive

Tableau 3.2: Évaluation de la réactivité de granulats par ASTM C 1260 [ASTM C 1260-07.2007].

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

4.2 Méthode des prismes miniature en béton accélérées (MCPT)

AASHTO TP 110-14

Dans ce procédé, trois prismes miniatures en béton (50 mm x 50 mm x 285 mm) sont utilisés comme échantillons d'essai afin d'évaluer la réactivité des deux agrégats grossiers et fins pour chaque type d'agrégats utilisé (Quartzite, Andésite). Des moules en acier pour concevoir des éprouvettes sont utilisés.



Figure 3.5: Moules à prisme miniature à béton.

Comme on l'avons expliqué au chapitre précédent ma méthode MCPT. Dans ce procédé, des prismes de béton de dimensions (50 mm x 50 mm x 285 mm) sont utilisés. Un dosage en ciment de (420 kg / m³) dans le béton est utilisé. Les exigences de la granulométrie des gros agrégats sont présentées dans le Tableau 3.3.

Taille des tamis		Masse %
Passant	Retenue	
12.5 mm	9.5 mm	57.5
9.5 mm	4.75 mm	42.5

Tableau 3.3: Granulométrie exigé par MCPT. [Latifee.2015]

Pour la détermination des proportions des agrégats fin a utilisé vue l'avantage Les agrégats de taille fine sont déterminé sur la base de la méthode ACI 211 [ACI 211.2011] méthode de volume absolu, à savoir soustraire les proportions de tous les autres ingrédients de 1m³ de béton.

Les éprouvettes prismatiques de béton préparés en utilisant les matériaux et procédés décrits précédemment sont démoulées 24 heures après le coulage. Après avoir pris la première lecture de la longueur, les prismes sont durcis dans l'eau à (60 ° C) pendant 24

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

heures. Au bout de 48 heures à compter du moment de la coulée, la lecture du zéro-jour est effectuée.

Par la suite, les prismes sont transférés dans une solution de NaOH 1N qui a déjà été pré-conditionné à (60 ° C) Température. Les lectures ultérieures de la longueur d'élongation sont périodiquement prélevés à des intervalles de 3, 7, 10, 14, 21, 28, 42, 56 jours. Nous arrêterons notre lecture au bout 56 jours vue l'absence d'une élongation continue.

Les proportions du mélange des ingrédients utilisés dans la préparation des échantillons MCPT sont normalisé comme suit :

Contenue du ciment/ kg/m ³	420
E/C	0,45
Fraction des agrégat gros	0,65
Taille maximal des agrégats gros/mm	12,5
Agrégats fins	Déterminé par la méthode du volume absolue (ACI 211)

Tableau 3.4: Proportions de mélange pour la formulation des prisme de béton miniature.

[Latifee.2015]

5 Calcul du changement de longueur pour l'ASTM et le MCPT

Les mesures de changement de longueur des éprouvettes suivre la procédure [ASTM C157.2008] pour les des méthodes utilisées. Les éprouvettes doivent être démoulés à 24 ± 1 heures après la coulée.

Après avoir pris la lecture de la longueur initiale. Les trois prismes doivent ensuite être immergé dans un volume d'eau qui est deux fois le volume des trois éprouvettes d'essai (ce qui équivaut à environ 4,5 litres) dans un récipient de stockage étanche à l'air et l'ensemble de stockage dans son intégralité doit être placé dans un four ou un autre dispositif capable de maintenir une température constante de $60 \text{ ° C} \pm 2 \text{ ° C}$ pour le MCPT et $80 \text{ ° C} \pm 2 \text{ ° C}$ pour l'ASTM pour toute la durée des essais.

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

Des lectures de changement de longueur pour les prismes de béton et les barre à mortiers d'essai doivent être prises après la lecture du zéro-jour entre 3, 7, 10, 14, 21 pour l'ASTM et à 3, 5, 7, 10 à 12, 14, 21, 28, 42, 56 jours.

Avant de prendre des mesures de changement de longueur à tout âge, il est important de calibrer l'appareil de mesure en utilisant la barre de référence, selon la pratique courante observée dans la norme ASTM C 490. [ASTM C490.2011].

Le changement de longueur pour cent des échantillons d'essai à tout âge (X jours) est calculé comme suit :

$$L\% = \frac{L_x - L_i G}{G} \times 100$$

Ou :

L = changement de longueur à x jours, %

Lx = lecture du comparateur à x jours moins la lecture de comparateur de la barre de référence à x jours.

Li = lecture du comparateur de l'échantillon en vigire à Zero jour moins la lecture de comparateur de la barre de référence à Zéro jour.

G = Longueur de la Jauge nominale.

Calculer les valeurs de changement de longueur pour chaque échantillon à 0,001% et rapporter les moyennes à 0,001%.

6 Caractéristiques des matériaux

6.1 Composition chimique du ciment

Ils ont adopté le ciment CEM 1 52,5 formuler d'après les normes Sud-Africain SANS 50197. L'analyse chimique par Fluorescence à Rayons X (FRX) montre la composition chimique des minéraux majeurs dans le ciments utilisé comme il est indiquée dans le Tableau 3.5 :

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

CEM1 52.5N	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O _{equ}	TiO ₂	P ₂ O ₅	Tot.	LOI
Minéraux majeurs par masse. %	21,6	5,35	2,35	0,1	1,9	65,1	0,03	0,5	0,38	0,44	0,08	97,49	4,44
CEM 1 52.5N de référence													
Minéraux majeurs par masse. %	20,8	4,64	2,69	0,1	1,7	65,7	0,15	0,5	0,46	0,39	0,07	97,21	2,79

Tableau 3.5 : composition chimique du ciment CEM 1 52.5N

On constate que la teneur en Na₂O équivalent est assez basse : 0,4% et largement inférieure au plafond des ciments classifiés « low alkali » par la norme [ASTM C 150] d'une teneur en alcalins de 0,6%.

De ce fait on peut être confiant que la seule source quasi-permanente des alcalins sera l'ajout des hydroxydes de sodium durant le test (1M NaOH).

La masse volumique réelle est de 3,1 g/cm³ et la surface spécifique qui vaut 350 m²/kg, avec qu'un taux de chaux mesuré pour notre échantillon est inférieur légèrement aux valeurs moyennes usines (65,7%).

6.2 Granulats

6.2.1 Origine des granulats

Les propriétés minéralogiques, physiques et chimiques des roches sont déterminées en grande partie par les événements de leur histoire géologique. Dans une certaine mesure aussi, les caractéristiques physiques des granulats obtenus par broyage sont influencées par les processus et les méthodes utilisées pour briser la roche à une taille appropriée pour une utilisation dans la fabrication du béton.

La connaissance de la façon dont les roches sont formées, et des différents processus naturels de sorte que leur caractéristique d'origine sont modifiées, peuvent conduire à une meilleure

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

compréhension de ces propriétés intrinsèques qui déterminent l'aptitude d'une roche comme source d'agrégats de béton.

Les roches sont généralement classées comme magmatiques, sédimentaires ou métamorphique, selon la méthode de leur formation.

Une proportion importante du quartzite utilisé historiquement pour la fabrication du béton à l'intérieur de l'Afrique du Sud a été dérivée à partir des décharges de déchets résultant de l'exploitation des couches aurifères du Witwatersrand groupe.

Le quartzite de ce groupe se compose essentiellement de particules de quartz de différentes tailles ainsi que les micas interstitielle, l'ensemble étant solidement cimentés par de la silice secondaire. Alors que certains effets de recristallisation sont en évidence cette caractéristique ne soit pas marqué. [Fulton et al.2009]

Les dépôts d'andésite au sud de Johannesburg sont maintenant largement utilisés. D'excellents résultats ont été obtenus avec des primes cohérentes sur la résistance à la compression sont rapportés. [Fulton et al.2009]

Deux type granulats ont été utilisés au cours de cette étude : l'un à une réactivité potentielle et le second en tant que granulats réactif utilisé comme tel pour la confection d'éléments témoins dans de nombreux laboratoires de sa réactivité en vers une réaction alcali granulaire.

6.2.1.1 Andésite

L'andésite nous a été fournie par la cimenterie Afrisam à Johannesburg au sein du laboratoire de génie civil dans l'université de Wits.

L'andésite est une roche sédimentaire extrusive intermédiaire de composition entre la rhyolite et basalte. Le mot andésite est dérivé de la Cordillère des Andes en Amérique du Sud, où andésite est commun. Andésite est l'équivalent volcanique de diorite.

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention



Figure 3.6 : texture du granulat d'Andésite

Elle a une composition minéralogique généralement de pyroxène (augite) et plagioclase, éventuellement avec des quantités mineures d'amphibole et de verre ; phénocristaux de plagioclase et souvent pyroxène, parfois olivine ou amphibole.

6.2.1.2 Quartzite

Le quartzite (B) provient de la région Nigel dans le sud de Johannesburg fournie Afrisam obtenue des carrières Witwatersand Group.

Le quartzite est une roche métamorphique formée lorsque le grès ou chert riche en quartz a été exposé à des températures et des pressions élevées. Ces conditions fusionnent les grains de quartz formant un ensemble dur, et dense. Le nom de quartzite implique non seulement un haut degré d'induration (dureté), mais aussi une forte teneur en quartz.

Le quartzite comprend généralement plus de 90% de quartz, et quelques exemples, contenant jusqu'à 99% de quartz, et sont les concentrations les plus importantes et les plus pures de la silice dans la croûte terrestre. Bien qu'un grès riche en quartz peut ressembler à quartzite, une surface fraîche cassée de quartzite montrera la rupture dans les grains de quartz, alors que le grès cassera autour des grains de quartz. Le quartzite a aussi tendance à avoir une apparence sucrée et le lustre vitreux.

La variété des couleurs affichées par quartzite est une conséquence de petites quantités d'impuretés incorporées avec le quartz au cours du métamorphisme. Bien que le quartzite peut parfois sembler superficiellement similaire au marbre, un morceau de quartzite ne sera pas en mesure d'être rayé par une lame de métal.

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention



Figure 3.7 : Texture du granulat de Quartzite

La couleur distingué du quartzite pur est le blanc, mais le quartzite existe dans une grande variété de couleurs avec une minéralogie qui se constitue de quartz avec différents source minéralogique qui donneront la couleur du granulat.

6.2.2 Influence de la granulométrie

Plusieurs recherches ont mis en avant l'influence de la distribution granulométrique des granulats réactifs dans l'expansion d'éprouvettes de mortiers [Zhang et al., 1999] ;[Monnin, 2005] ; [Cyr et al., 2009] ; [Multon et al., 2009] ; [Ishikawa, 2009]. De ce fait une analyse granulométrique des agrégats ciblé a été faite.

6.2.2.1 Les résultats pour la méthode AMBT

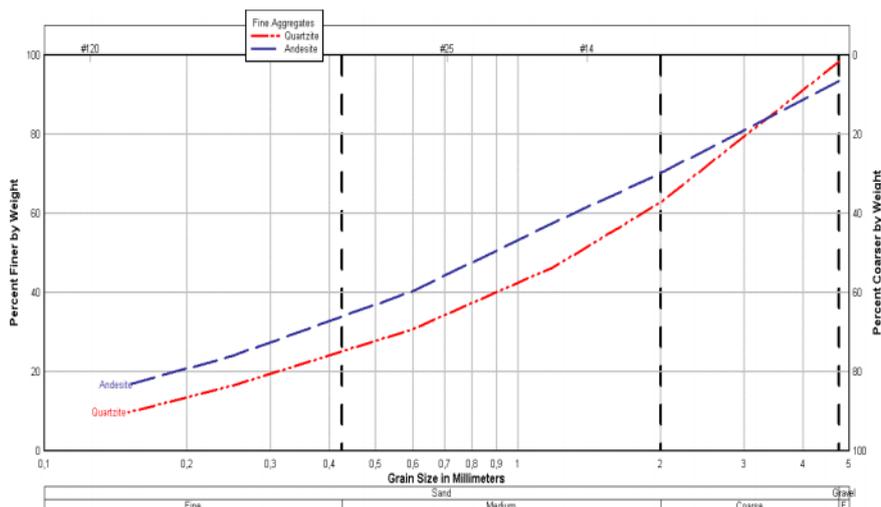


Figure 3.8 : Résultat de l'analyse granulométrique des agrégats fines pour l'andésite et le quartzite.

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

6.2.2.2 Les résultats pour la méthode MCPT

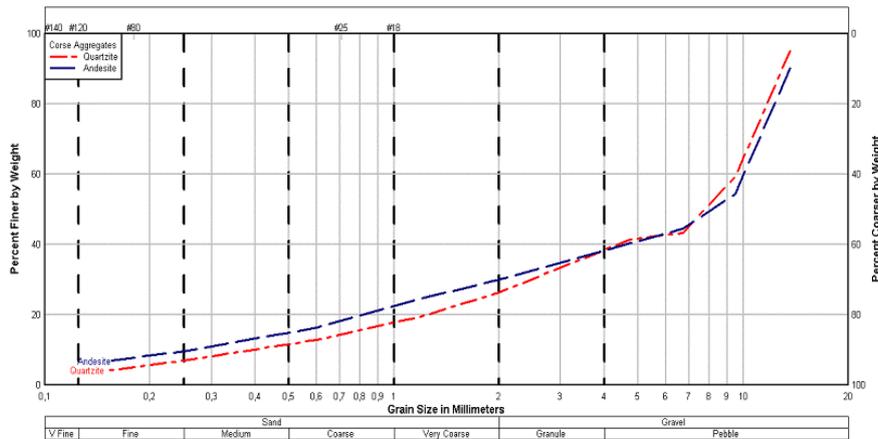


Figure 3.9 : Résultat de l'analyse granulométrique des agrégats pour l'andésite et le quartzite

6.3 Composition chimique des agrégats

6.3.1 La spectrométrie de fluorescence à rayons X (SFX / FX)

La spectrométrie de fluorescence à rayons X (SFX ou FX, ou en anglais XRF pour X-ray fluorescence) est une méthode d'analyse chimique utilisant une propriété physique de la matière, la fluorescence de rayons X.

Lorsque l'on bombarde la matière avec des rayons X, la matière réémet de l'énergie sous la forme, entre autres, de rayons X ; ou émission secondaire de rayons X.

Le spectre des rayons X émis par la matière est caractéristique de la composition de l'échantillon, en analysant ce spectre, on peut en déduire la composition élémentaire, c'est à dire les concentrations massiques en éléments.

6.3.2 Résultats de la spectrométrie de fluorescence à rayons X

6.3.2.1 Andésite

Andésite	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O
Minéraux majeurs par masse. %	71,5	13,5	0,24	1,95	0,05	0,9	2,75	3,19
	K ₂ O	Na ₂ O _{equ}	TiO ₂	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	NiO	TOTAL	LOI
	4,98	6,46684	0,299	0,13	0,01	0,0016	99,75	1,95

Tableau 3.6 : composition chimique de l'andésite

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

L'analyse chimique de l'andésite indique que la présence de la silice n'est à prendre à la légère, vue une teneur en alcalin équivalent très grande ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{equ}}$ 6.45%) ($>0.6\%$ (selon la norme ASTM C150)) et un pourcentage de chaux ($< 30\%$) qui ne peut équilibrer cet excès durant le déclenchement de la réaction alcali silice .

6.3.2.2 Quartzite

Quartzite	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O
Minéraux	77,4	11,21	0,54	4,38	0,04	1,04	0,43	0,09
majeurs	K_2O	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{equ}}$	TiO_2	P_2O_5	Cr_2O_3	NiO	TOTAL	LOI
par masse. %	2,49	1,73	0,74	0,08	0,08	0,038	98,55	2,37

Tableau 3.7 : composition chimique de le quartzite

Le quartzite indique qu'un pourcentage de silice l'égerment plus grand que celui de l'andésite, et une teneur en alcalin équivalent très grande aussi ($1.7\% >0.6\%$ (selon la norme ASTM C150)) et un pourcentage de chaux inférieur à celui de l'andésite, ou la réaction aura une source abondante en alcalin.

6.3.3 Caractéristique cristalline des agrégats

6.3.3.1 -Caractérisation structurale (DRX)

La réaction alcali-granat se produisent généralement dans les agrégats par un mécanisme de dissolution- procédé par précipitation, au cours de laquelle la silice amorphe et mal cristallisé, et un gel de silice se cris par précipitation. L'analyse par diffraction des rayons X nous a permet de connaître la première composition des agrégats. L'analyse DRX a été faite pour des poudres obtenues par analyse granulométrique des granulats fins pour des tamis inférieur à 75 μm .

Les résultats de l'analyse ont été indexées en la comparant ensuite avec le (COD), base de données contenant des dizaines de milliers de motifs de référence pour identification des phase chimiques qui constitue chaque agrégat.

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

6.3.3.2 Les résultats de la DRX

6.3.3.2.1 Andésite

Les résultats de la DRX pour l'andésite sont présentés dans la figure suivante :

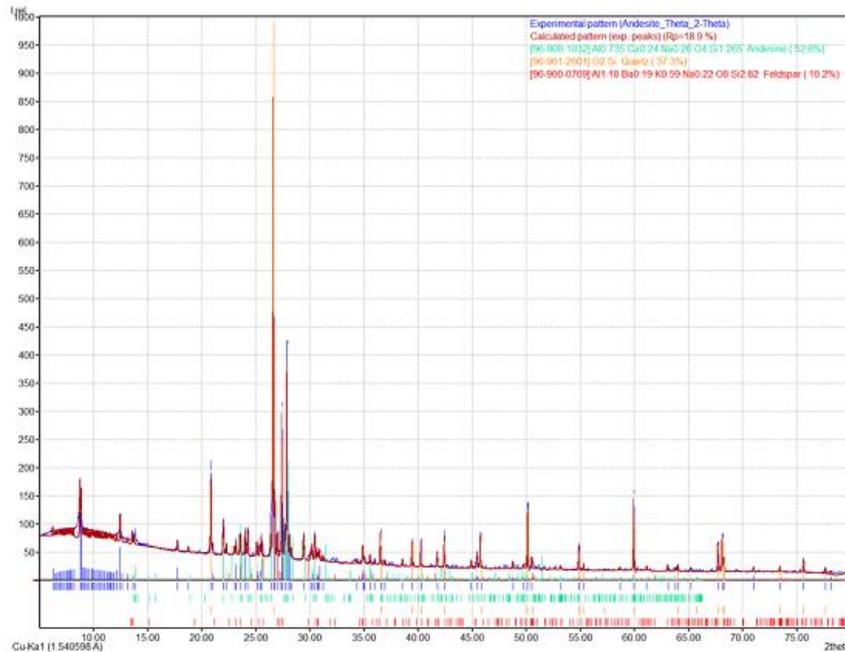


Figure 3.10 : Profile de la diffraction à rayons-X de l'andésite.

Le motif ou profile dans la (figure 3.10) montre les principales phases chimiques de l'andésite. Il montre une prépondérance d'andésine ainsi que des phases de Felds par et de quartz ou la présence du premier peut servir comme source d'alcalin déclencheur et approvisionnement pour le début de la réaction alcali silice qui contient du potassium (K_2O) et du sodium ($NaOH$), et comme le second représente une source de silice.

L'infiltration de l'eau facilement entre les couches par échange d'ions qui libère les alcalin à la solution interstitielle. Depuis les analyses chimiques discuter ultérieurement et l'analyse des profile des phases chimiques qui constitue l'agrégat on peut le classer comme agrégat potentiellement réactifs. Cela peut être confirmé par les essais expliquant précédemment par réalisation des mortiers de barres et des prismes béton. Les résultats de ses essais seront discutés au fur et à mesure dans ce chapitre.

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

6.3.3.2.2 Quartzite

Le motif ou profile dans la (figure 3.11) montre les principales phases chimiques du quartzite. La prépondérance du quartzite ainsi que des phases de quartz et d'annite ainsi qu'une présence de periclase avec du fer peut accélérer la phase d'hydratation est cela augmente la présence des alcalins qui survivra comme source d'alcalin pour le début de la réaction alcali silice qui contient du potassium

Depuis les analyses chimiques discuter ultérieurement et l'analyse des profile des phases chimiques qui constitue l'agrégat on peut le classer comme agrégats très réactifs. Cela peut être confirmé par les essais expliquant précédemment par réalisation des barres de mortier et prismes béton.

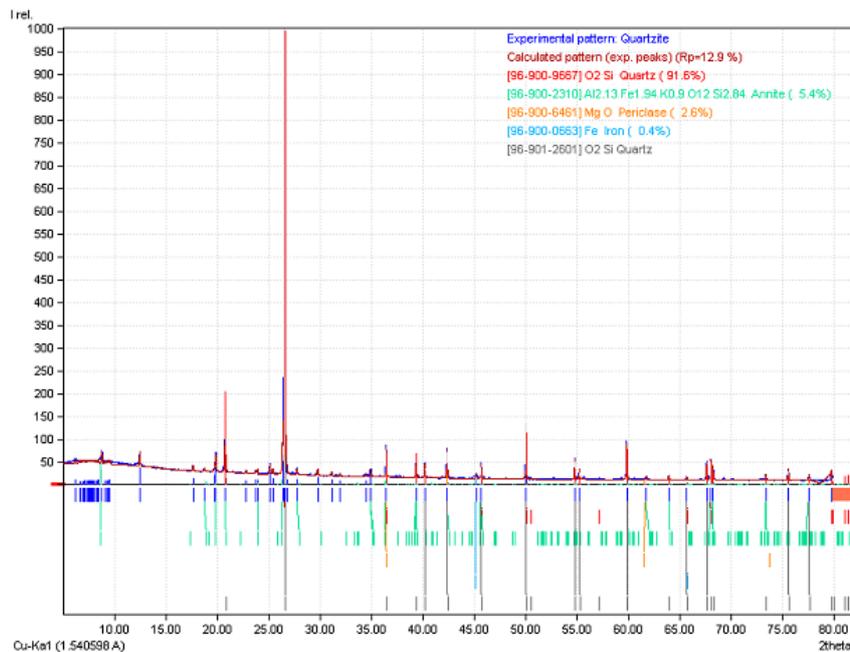


Figure 3.11: Profile de la diffraction à rayons-X du quartzite.

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

7 Résultats des essais d'expansion

7.1 ASTM C 1260 (AMBT)

D'après la (figure 3.12) l'allure sigmoïdale de l'expansion des barres de mortiers confirme d'une part l'aspect primaire de la réaction comme [Larrive.1997] et d'autre l'ont montré. Les résultats des tests barrent de mortier effectués sur les granulats choisis, montrent que le diagnostic de qualification pour l'Andésite est d'être réactifs de manière inoffensif car la valeur moyenne maximale est supérieur au seuil de 0,01 % fixer comme zone de limite des agrégats classer non réactifs. Le quartzite en outre le résultat d'expansion montre qu'il confirme sa position comme agrégats réactif, car la valeur moyenne maximale est supérieure au seuil de 0.02% fixer comme zone de limite pour les agrégats juger potentiellement réactifs inoffensifs.

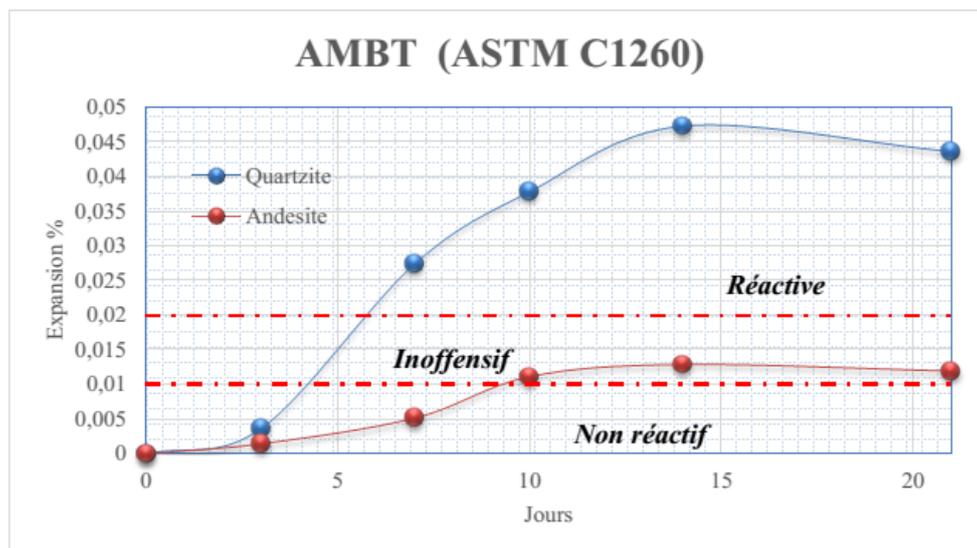


Figure 3.12: Expansion des agrégats selon la méthode AMBT (ASTM C1260)

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

7.2 AASHTO TP 110-14 (MCPT)

L'allure sigmoïdale de l'expansion des prismes de béton miniature est présent de façon répétitif pour deux paliers (figure 3.13) : pour le quartzite le premier palier à une durée de 14 jours avant qu'il le reprenne de façon moins brusque comme au début de la réaction, étalait pour une deuxième durée de 16 jours, ou à la fin l'expansion se stabilise et l'effet sigmoïdale de la réaction se réduit au point d'être quasi-linéaire, cela confirme d'une part l'aspect primaire de la réaction comme [Larrive.1997] et d'autre l'ont montrés et d'autre part suggère que la réaction a un seuil limite sous conditions extrême et constant.

Cependant l'effet sigmoïdale de l'expansion pour l'andésite est moins apparent due à sa lente réactivité ou en peut le voir de façon claire seulement pour le premier palier dans une durée de 20 jours, après la réaction reprenne d'ampleur mais avec un taux moins faible qu'au début, jusqu'à se stabilisé de manière linéaire.

Les résultats des tests prismes de béton miniature effectués sur les granulats choisis, montrent que le diagnostic de qualification pour l'andésite est d'être réactifs de manière inattendus car la valeur moyenne maximale est inférieure au seuil de 0,04 % fixé comme zone de limite des agrégats classer non réactifs par [Latifee.2015]. Le quartzite en outre le résultat d'expansion montre qu'il confirme sa position comme agrégats réactif, car la valeur moyenne maximale est supérieure au seuil de 0.04% fixé comme zone de limite pour les agrégats juger potentiellement non réactifs.

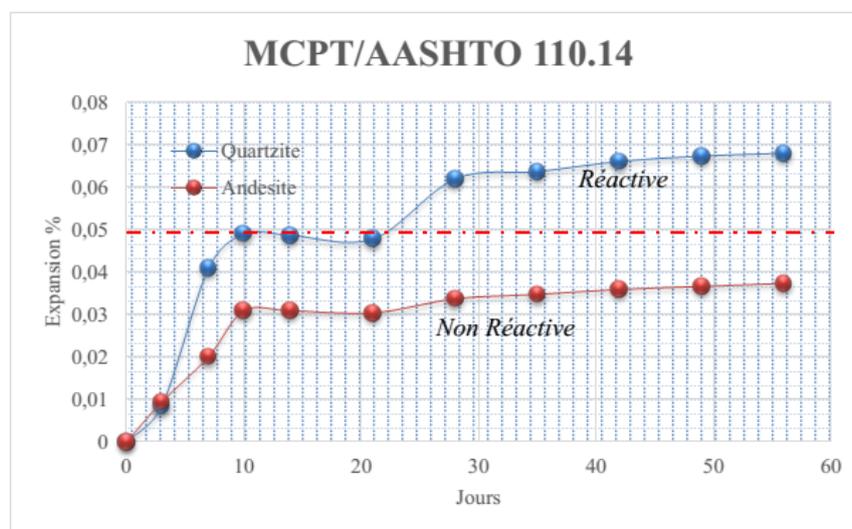


Figure 3.13: Expansion des agrégats selon la méthode MCPT (AASHTO TP 110-14)

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

8 Observations

Dans cette étude, les enquêtes sur la réactivité des granulats utilisés pour une éventuelle réaction alcali granulaire par justifications des matériaux et méthodes utilisés, et caractérisation chimiques, granulométriques, et morphologique pour être en images des facteurs influent sur la RAG comme expliqué dans les chapitres auparavant.

Les résultats des tests basés sur l'évaluation des 02 différents agrégats présente la viabilité de nos soupçons sur la réactivité des agrégats par différentes formulations par essais AMBT et MCPT comme une alternative à la norme de longue durée qui prend en considération l'effet de grande taille d'agrégats, mais aussi par confrontation à l'essai AMBT utilisé qui est un test extrême rapide qui tient en compte l'effet des petites particules sur l'évolution rapide de la RAG. Une expansion mesurée pour l'AMBT (ASTM C1260) de 0.043% à 21 jours pour le quartzite, qui dépasse la limite posée par la norme pour un agrégats réactifs de 0.02%. En revanche l'andésite enregistre une expansion de 0.011% à 21 jours d'expansion est classé potentiellement réactifs car les expansions bornées entre 0.01%-0.02% sont jugé inoffensif. Pour le MCPT (ASHTOO 110-14) une limite d'expansion de 0,067% à 56 jours semble caractérise la réactivité globale du quartzite et selon la norme proposée par [Latifee.2015] ou la limite d'un agrégats réactifs est limité à 0.04%, par contre l'andésite enregistre une limite de 0.037% à 56 jours, à cet effet l'andésite est classé comme non réactifs selon la norme ou le quartzite est classé comme réactifs.

L'effet de la RAG sur la durabilité d'un béton affecter a été étudié pour le voir sur une période de temps ou la RAG prend un taux de croissance exponentielle, le produit de la réaction présenté comme un gel a caractéristique expansive influent directement sur la perméabilité, porosité, et résistance à la compression du béton, ou en enregistre des diminution considérable pour le coefficient de perméabilité des cubes de béton et de mortier, vu qu'en note pour l'essai AMBT (ASTM C1260) pour l'andésite une réduction de 37% pour les cubes conserver dans de l'eau ou les cubes conserver dans milieu favorable pour une RAG enregistre une réduction de 75%, en revanche pour le quartzite ou la réduction du coefficient K pour les cubes conserver dans (1M NaOH/80C°) est de 85% vu l'amplitude la réaction. Pour l'essai MCPT/ Andésite la réduction a été plus importante vu en note une réduction de 53% pour les cubes conserver dans l'eau mais une diminution de 89% pour ceux conserver dans (1M NaOH/60C°).

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

La réduction pour les cubes confectionner à base de quartzite est plus grandes à comparer avec l'andésite ou en note 93% pour ceux dans (1M NaOH/60C°) devant 66% pour ceux conserver dans l'eau. De même pour la porosité une réduction est registrar mais de façon inversée par rapport à la perméabilité, ou en note pour l'AMBT (ASTM C1260) andésite une réduction de 11% pour les cubes conserver dans l'eau, devant 8% pour ceux conserver dans (1M NaOH/80C°). De la même manière pour l'AMBT quartzite ou en remarque une réduction de 19% pour les cubes conserver dans l'eau, devant 6% pour ceux conserver dans (1M NaOH/80C°). Pour l'essais MCPT andésite en note 7% de réduction pour les cubes conserver dans l'eau devant 30% pour ceux conserver dans (1M NaOH/60C°). De même pour le quartzite ou en note 30% pour ceux conserver dans l'eau devant 48% pour ceux conserver dans (1M NaOH/60C°).

9 Prévention des désordres

Les difficultés à mettre en œuvre des traitements efficaces, capables de redonner aux ouvrages malades une durée de vie conforme à celle prévue initialement ainsi qu'une aptitude au service adéquate, rendent indispensable une politique de prévention des désordres dus à ces réactions. Les recommandations éditées par le LCPC et le guide pour l'élaboration du dossier carrière établissent les principes de cette prévention dont la philosophie de la démarche préventive peuvent se résumer en trois points [8] :

- responsabiliser les acteurs de la construction .
- gérer au mieux les ressources naturelles (développement durable) .
- construire durablement au meilleur coût.

9.1 Principes de la prévention

L'alcali-réaction, comme il apparaît dans ce qui précède, trouve un de ses moteurs dans la présence d'alcalins au-delà d'une valeur seuil associée à l'existence de granulats réactifs et d'eau. Les réactions, quant à elles, seront plus ou moins développées suivant la nature des granulats, le type de ciment, mais aussi suivant l'environnement du béton .

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

Si l'on veut réduire les risques, la solution se trouve donc dans la gestion de ces paramètres, mais également dans le niveau de risque que l'on est prêt à accepter, celui-ci prenant en compte des critères techniques, économiques, environnementaux et sociaux. Alors d'abord choisir :

9.1.1 Catégorie de l'ouvrage

Catégories représentatives du niveau de risque vis-à-vis de l'alcali réaction que l'on est prêt à accepter pour un ouvrage donné (ou des parties d'ouvrage) [17]

Catégorie	Exemples d'ouvrages ou parties d'ouvrages
I	ouvrages provisoires, éléments aisément remplaçables, ...
II	la plupart des bâtiments et des ouvrages du génie civil
III	les ouvrages exceptionnels (barrages, centrales nucléaires, ...)

Tableau 3.8 : Catégorie de l'ouvrage [17]

9.1.2 Classe d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement

Classes d'exposition représentatives des conditions environnementales jouant un rôle important dans l'initiation et le développement de l'alcali-réaction . [17]

Classe	Environnement
Classe XAR1	environnement sec ou peu humide (hygrométrie $\leq 80\%$)
Classe XAR2	environnement avec hygrométrie $> 80\%$ sans fondants salins ou en contact avec l'eau hors environnement marin
Classe XAR3	environnement avec hygrométrie $> 80\%$ Et avec fondants salins ou en environnement marin

Tableau 3.9 : Classe d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement[17]

9.1.3 Choix du niveau de prévention

Le choix du niveau de prévention dépend du type d'environnement dans lequel se situe l'ouvrage et de la catégorie dont il relève, cette catégorie prenant en compte son importance stratégique et économique, sa dimension, sa destination, les contraintes qui seraient générées par des interventions de maintenance, etc. [8]

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

Du choix de ce niveau dépendra le type d'étude réalisé et la réponse de la formulation retenue aux agressions du milieu . [8]

Le tableau 3.10 présente les trois niveaux de prévention retenus. À chaque niveau de prévention A, B ou C est associé le type de précaution suivant :

Classe d'exposition Catégorie d'ouvrage	XAR1	XAR2	XAR3
I	A	A	A
II	A	B	B
III	C	C	C

Tableau 3.10 – Choix du niveau de prévention en fonction de la catégorie de l'ouvrage et de la classe d'environnement [17]

• **Niveau A** : pas de précautions particulières, les seules règles sont les pratiques habituelles de construction d'ouvrages

• **Niveau B** : cas général des ouvrages de génie civil, cinq solutions possibles, toutes équivalentes quant à leur efficacité ; quatre d'entre elles sont adaptées à l'utilisation de granulats potentiellement réactifs, et il suffit que l'une d'elles soit satisfaite pour se mettre à l'abri du risque. Ces solutions sont les suivantes :

- utilisation de granulats non réactifs ;
- utilisation de granulats PRP avec les conditions afférentes ;
- satisfaction au bilan des alcalins ;
- satisfaction au critère de performance (essai de gonflement sur la formule de béton) ;
- utilisation d'additions inhibitrices en quantité suffisante.

• **Niveau C** : précautions maximales, il est recommandé d'utiliser des granulats non réactifs (NR) et éventuellement pour des raisons techniques, économiques ou environnementales, il sera possible de mettre en œuvre des granulats caractérisés comme potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP), soient respectées. Dans l'hypothèse où l'approvisionnement en matériaux NR ou PRP est particulièrement difficile, les recommandations autorisent l'emploi de granulats potentiellement réactifs, à la condition qu'il soit procédé à une étude approfondie

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

de la formulation de béton envisagée, sur des bases expérimentales définies contractuellement. La procédure utilisée peut être un essai de performance sur formule réelle ou une série d'essais sur éprouvettes de béton réalisées avec des teneurs croissantes en alcalins encadrant le seuil des 3 kg/m^3 d'alcalin par exemple.

La démarche préventive implique, pour les ouvrages de catégorie B ou C une connaissance des granulats envisagés (gisement, homogénéité, pétrographie) et une qualification de leur réactivité au moyen d'un essai normalisé adapté. Le dossier carrière constitue un élément du plan qualité du fournisseur de granulats. Il donne les informations suffisantes pour que la qualification du matériau vis-à-vis de l'alcali-réaction soit connue. [8]

9.2 Caractérisation de la réactivité potentielle des granulats

Dans la démarche française, cette caractérisation est obtenue à partir d'essais dont la mise en œuvre et le déroulement sont présentés dans la norme XP P18-594, les spécifications faisant l'objet du fascicule de documentation associé P18-542. [8]

Norme XP P18-594

Dans son article 5, elle offre la possibilité de recourir à une procédure rapide dite essai crible. Elle propose un essai crible de référence (autoclavage) et deux essais cribles alternatifs. Ces différents essais autorisent tous la qualification en NR, PR ou PRP. Comme toutes les normes d'essai, elle précise la procédure opératoire, les matériels et produits, les calculs et les incertitudes qui sont associés à l'essai utilisé. Dans son article 6, elle décrit un essai à long terme qualifiant sable ou gravillons. Cet essai est inspiré de l'essai décrit dans l'ancienne norme P18-587. [8]

Fascicule P18-542

Il propose une méthodologie et fixe des spécifications. Une qualification directe est possible si la teneur en silice est inférieure à 4 %. Dans la suite des opérations, il est possible de mettre en œuvre un essai crible rapide (essai de référence ou un essai alternatif). Il faut savoir que le diagnostic issu de l'essai crible peut être tempéré par le recours à l'essai long terme ; cette approche offre une double garantie à la fois pour le producteur de granulats et pour le maître d'ouvrage. [8]

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

Cette évolution dans la normalisation est un pas significatif vers une saine gestion de la ressource. Outre le recours à ces deux normes, il est possible de mettre en œuvre un essai dit de performance sur béton. [8]

9.3 Limitation de la teneur en alcalins du béton

La teneur totale en alcalins du béton est la somme des quantités apportées par chacun des constituants. Elle est exprimée en kg/m³ de béton. [8]

9.3.1 Alcalins des ciments

Suivant le type de ciment utilisé, le calcul de la quantité d'alcalins apportée se fera différemment. Pour connaître le bilan des alcalins actifs apportés par le ciment, il est nécessaire d'avoir une analyse chimique complète de tous les constituants du ciment. [8]

Dans l'état actuel de nos connaissances (au niveau international), nous pouvons dire que la proportion d'alcalins actifs rapportée aux alcalins totaux est égale à :

le clinker	AK = 100 % des alcalins équivalents totaux aK
les laitiers granulés de haut fourneau	AS = 50 % des alcalins équivalents totaux aS
les cendres volantes	AV = 17 % des alcalins équivalents totaux aV
les pouzzolanes	AZ = 17 % des alcalins équivalents totaux aZ
pour les fillers calcaires	AL = 100 % des alcalins équivalents totaux aL
le gypse	AG = 100 % des alcalins équivalents totaux aG

Tableau 3.11 : le bilan des alcalins actifs apportés par le ciment[8]

Le bilan des alcalins actifs A est alors obtenu en sommant les contributions de chacun des constituants du ciment proportionnellement à leur teneur respective (K, S, V, Z, L et G), comme l'indique la formule ci-dessous :

$$A = (1-G)(K.AK + V.AV + S.AS + L.AL + Z.AZ) + G.AG$$

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

9.3.2 Alcalins des granulats

Il est indispensable de séparer les alcalins en :

- alcalins totaux : ils représentent la totalité des alcalins du granulat dosés par l'analyse chimique et exprimés en oxydes Na_2O et K_2O .

- alcalins actifs : ils représentent les alcalins qui sont extraits du granulat et viennent enrichir la solution interstitielle du béton ; ils sont évalués sur la base du mode opératoire LPC n° 37. [8]

9.3.3 Alcalins des adjuvants

Les adjuvants, bien qu'utilisés à des dosages voisins de 2 % du poids du ciment, apportent, du fait de leur composition, une quantité importante d'alcalins facilement libérables. Ils sont donc comptabilisés en totalité. Leur teneur est donnée par le fournisseur. [8]

9.3.4 Alcalins de l'eau de gâchage

Ils sont le plus souvent en très faible quantité. [8]

9.3.5 Limitation de la teneur en alcalins

La teneur en alcalins actifs du béton est évaluée en sommant les teneurs en alcalins actifs apportés par chacun des constituants (figure 3.14) . [8]

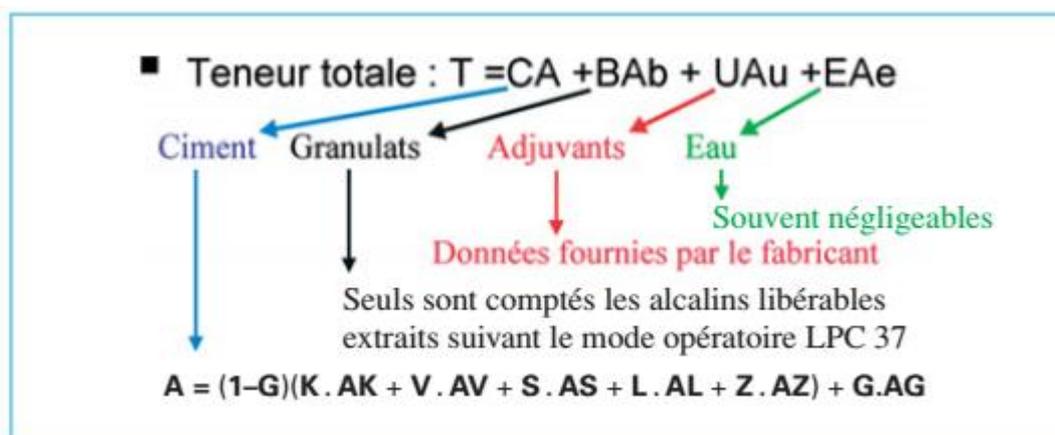


Figure 3.14 : Calcul de la teneur en alcalins actifs du béton [8]

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

- Pour les bétons incorporant des ciments CEM I, CEM II ou CEM V

$$T_m < \frac{3.5}{1+2V_c} \text{ et } T_{max} < 3.5 \text{ Kg/m}^3$$

T_m : les teneurs moyenne .

T_{max} : les teneurs maximale .

V_c : est le coefficient de variation de la teneur en alcalins du ciment.

En l'absence de données sur les dispersions des teneurs en alcalins, les teneurs moyenne et maximale en alcalins sont respectivement limitées aux valeurs suivantes :

$$T_m < 3.0 \text{ Kg/m}^3 \text{ et } T_{max} < 3.3 \text{ Kg/m}^3$$

- Pour les bétons incorporant des ciments CEM III a,b, c

On s'assure que le laitier est en quantité suffisante et on vérifie que la teneur moyenne en alcalins totaux du ciment a_m reste en dessous d'un seuil donné par les formules suivantes :

- pour les CEM III a,b : $a_m < 1,1 \%$ et $60 \% < L < 80 \%$.
- pour les CEM III c : $a_m < 2 \%$ et $L > 80 \%$.

10 Les paramètres de la durabilité des structures

Les indicateurs de durabilité sont des paramètres fondamentaux pour l'évaluation et la prévision de la durabilité du matériau vis-à-vis du processus de dégradation considéré, mais aussi des paramètres mesurables par des essais (souvent accélérés) selon des modes opératoires bien définis. [8]

Cette démarche, dans sa méthodologie, reprend en partie les recommandations et demande de suivre le cheminement suivant les 9 points ci-dessous [8] :

- Définition de la catégorie de l'ouvrage, ou de l'élément préfabriqué.
- Examen des conditions environnementales.
- Définition des risques de dégradation.
- Choix des indicateurs de durabilité.

CHAPITRE 03 L'étude bibliographique sur l'étude expérimentale portée à la RAG et prévention

Pour ce qui concerne l'alcali-réaction, les trois indicateurs spécifiques retenus sont :

- la quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps .
 - la concentration en alcalins équivalents actifs de la solution interstitielle .
 - les déformations de gonflement d'éprouvettes de béton.
- Sélection des spécifications relatives à ces indicateurs.
 - Formulation des bétons.
 - Qualification des formules de béton.

Lorsque la durée de vie demandée est particulièrement importante :

- Choix d'un modèle prédictif de durée de vie.
- Suivi de l'évolution du béton sur site.

11 Conclusion

La prévention des risques dus à l'alcali-réaction, nécessite d'une part, un dépistage fiable et si possible rapide des granulats réactifs et d'autre part, une démarche générale de choix de matériaux et de composition du béton.

Ces recommandations permettent d'effectuer les choix de matériaux et de composition, en fonction du type d'ouvrage, de son environnement et du niveau de prévention requis.

Conclusion générale

De nos jours, il n'y a encore aucun ouvrage dans le monde qui se soit effondré parce qu'il était touché par l'une des réactions alcali-granulats.

Les désordres dus à l'alcali-réaction, attaquant les grands ouvrages, ont suscité un grand intérêt dans les milieux de recherches scientifiques. Au niveau de la compréhension des phénomènes des recherches fondamentales sont encore nécessaires pour bien comprendre les mécanismes de formation et d'expansion des gels du gonflement et les fissurations. Il faut aussi tenir compte que la réaction peut causer des dégâts de l'ordre esthétique sur les surfaces visibles des ouvrages.

La modélisation au niveau du matériau et de la structure reste un champ de recherches très ouvert.

Des études ont confirmé que la principale cause de ce phénomène est l'ions Des alcalins (Na^+ , K^+). Nous avons vu dans cette recherche qu'il fallait absolument trois conditions nécessaires pour qu'il puisse y avoir une réaction: granulats réactifs ; teneur en alcalin élevé ; humidité relative minimum 70 à 80%), donc si une seule de ces conditions n'est pas satisfaite, il ne sert à rien de s'alarmer.

En matière de pathologie, il convient de noter que la situation est plutôt rassurante en termes de sécurité. Les techniques de diagnostic de l'alcali-réaction sont maintenant bien assises ; une méthodologie d'aide à la gestion des ouvrages touchés par l'alcali-réaction existe et demande encore à être utilisée le plus souvent possible de façon à accroître sa pertinence. Sur la base de l'expérience acquise, on sait qu'il n'existe pas de solution éprouvée et pérenne pour réparer les ouvrages, mais il semble que la méthode de traitement la plus appropriée dans la majorité des cas soit en premier lieu de rétablir les systèmes d'évacuation des eaux pluviales si ceux-ci sont défectueux, et en second lieu de mettre en œuvre un revêtement d'étanchéité. À défaut de constituer un traitement définitif, cette méthode permet de ralentir la progression des désordres. Nous pouvons également suivre des méthodes préventives pour préserver l'intégrité des futures structures en termes de : Catégorie de l'ouvrage, Classe d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement et Choix du niveau de prévention.

Références Bibliographiques

- [1] Joseph ABDO. Article « Les ciments » . Date de publication : 2004. Réf. : TBA1010
- [2] <http://www.ecocem.fr/beton/> : site internet de ECOCEM
- [3] <http://www.redcouvrirlebeton.ca/fr/developpement-durable/un-meilleur-materiau-de-construction/les-avantages-du-beton/> : site internet de REDRCOUVRIRLEBETON
- [4] Office fédéral des routes (OFROU) « La réaction alcali granulat dans le béton ».
- [5] Azddine KAROUIE . mémoire d'ingénieur. « Utilisation des cendres volantes pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction » . Ecole HASSANIA des Travaux publics . 2003
- [6] https://wikivisually.com/lang-fr/wiki/R%C3%A9action_alcali-granulat : site internet de WIKIVISUALLY
- [7] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Silice> : site internet de WIKIPEDIA
- [8] Bruno GODART, André LE ROUX . Article « Alcali-réaction dans les structures en béton - Mécanisme, pathologie et prévention » . Date de publication : 2008
- [9] Yann Monnin . THESE de DOCTORAT . « Méthodologie pour décrire le gonflement multi échelle de calcaires siliceux soumis à la réaction alcali-silice dans le matériau béton . » . Ecole Doctorale de l'Université d'Artois.2005
- [10] MOUNDOUNGOU Idriss . THESE de DOCTORAT . « Une étude de faisabilité pour une meilleure utilisation dans le matériau béton de granulats « potentiellement réactifs » vis-à-vis de la réaction alcali-silice. » UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE DE LILLE. 2010
- [11] Roger DRON. Thierry CHAUSSADEN T. Françoise BRIVOT . Article « Mécanisme de la réaction alcali-silice » . DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES- Paris . 1998
- [12] CARLES-GIBERGUES, H. HORNAIN. « LA DURABILITÉ DES BÉTONS » pages (487-611).
- [13] TABET Mohamed. THESE de DOCTORAT. « Contribution à l'étude de la réaction alcali granulaire par modélisation numérique et expérimental du phénomène. » . Université Mohamed Khider – Biskra.2016
- [14] Steve Lesquereux .Article « Réactions alcali-granulats dans le béton ». Date de publication : 2006.

- [15] Stéphane POYET. THESE de DOCTORAT. « Etude de la dégradation des ouvrages en béton atteints par la réaction alcali-silice : Approche expérimentale et modélisation numérique multi-échelles des dégradations dans un environnement hydro-chemo-mécanique variable. » Université de Marne-La-Vallée.2003
- [16] Grattan-Bellew et Lyndon Mitchell. Article « Prévention de la détérioration du béton due à la réaction alcalis-granulats » . Conseil national de recherches du Canada.2002
- [17] Stéphane LAVAUD ,DIERKENS Michaël,. Article « réactions de gonflement interne ». Date de publication : 2017.
- [18] « Note n°3 - L'alcali-réaction dans les bétons » . Le portail de l'Économie, des Finances, de l'Action et des Comptes publics .1998