

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie Civil et Hydrauliques
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة مدنية و الري
المرجع :

Thèse présentée en vue de l'obtention

Du diplôme de

Doctorat Formation 3^{eme} cycle LMD

Spécialité (Option) : Modélisation des matériaux et structures

**Contribution à l'étude de la réaction alcali-
granulaire par modélisation numérique et
expérimental du phénomène.**

Présentée par :

TABET Mohamed

Soutenue publiquement le : 15/12/2016

Devant le jury composé de :

Dr. MEZGHICHE Bouzid	Maitre de Conférences 'A'	Président	Université de Biskra
Pr. GUETTALA Abdelhamid	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Pr. CHABIL Houcine	Professeur	Examineur	Université de Constantine
Pr. BOUDCHICHA Abdelaziz	Professeur	Examineur	Université d'Oum El Bouaghi

Je dédie ce travail,

A mes parents, à mon frère et sœurs, à mes amis, à ma femme qui m'ont accompagné et soutenu durant ces années de formation.

Remerciements

Je voudrais exprimer ma gratitude pour les nombreux commentaires utiles et suggestions que j'ont reçu au cours des cinq dernières années en ce qui concerne l'expérimentation et l'analyse des données de ma thèse, et en particulier pour les commentaires qui portent directement sur divers arguments centraux de la thèse. Je suis redevable à plusieurs gens à cet égard.

Plus important encore, je tiens à remercier mon superviseur professeur Guettala Abdelhamid pour ses près de cinq ans de supervision, et surtout pour son engagement à me guider à travers mes recherches doctorales, ainsi que sa patience sans fin à améliorer ma formation comme chercheur. Ses commentaires critiques sur mon travail ont joué un rôle majeur à la fois dans le contenu, la présentation de ma discussion et arguments.

Je tiens également à exprimer ma gratitude au professeur Yunus Ballim pour m'avoir donné la possibilité de faire mon programme expérimental au sein du laboratoire de génie civil à l'université de Wits au Sud d'Afrique.

Je voudrais adresser des remerciements particuliers à Dr. Mike Otieno pour sa prestance à m'aider tout le long de mon séjour au sein de l'université de Wits, son soutien et conseils mais très cher.

Je tiens à remercier Dr. Peter.E.Graham de me donner des techniques et des outils très utiles pour l'analyse pétrographique et à la caractérisation des agrégats, ainsi qu'au dizaine d'heures à discuter les possibilités de ma recherche.

J'exprime mes vifs remerciements à Monsieur Dr. MEZGHICHE Bouzid président de jury, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance, je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être membre de jury et de bien vouloir juger ce travail.

Pr. CHABIL Houcine

Pr. BOUDCHICHA Abdelaziz

Résumé

La réaction alcali granulaire est de plus en plus fréquente dans le diagnostics des structures endommagées. Bien que la réaction soit connue depuis un certain temps, il est difficile d'avoir une image claire sur les mécanismes du phénomène à échelle granulaire (mésoscopique) sur les structures affectées.

Cette thèse vise à étudier le rapport entre l'avancement de la réaction et les effets générés de la réaction sur béton afin de mieux étudier l'effet de la RAG sur les structures, et y avoir une compréhension additionnelle. La base du programme de notre mémoire était ainsi de caractériser la microstructure et les propriétés mécaniques du béton affecté par une réaction alcali granulaire.

Les caractéristiques microstructurales de quelques granulats ont été étudiées et mesurées en utilisant des techniques microscopiques. Des échantillons de barres de mortier et de prismes béton miniature ont été confectionnés avec ces granulats et soumis à la réaction alcali granulaire. L'analyse des images microscopiques obtenues à partir des échantillons polis a été utilisée pour comprendre le mécanisme et le degré de réaction.

L'approche multidisciplinaire a été faite pour la caractérisation microstructurale et essai accéléré pour trouver une combinaison des techniques qui peuvent être employées pour évaluer la réaction.

La modéliser par une approche mésoscopique en prenant en compte l'effet des taille agrégats réactifs, la teneur en alcalin, ainsi que la fraction des tailles de particule a été faite. Une clarification a été examinée au microscope en ce qui concerne le mécanisme de la réaction. Une modélisation de la cinétique de la réaction a été prise en compte pour voir les mécanismes de la réaction sur la base d'une caractérisation chimique.

Les résultats montrent une relation prometteuse entre la réactivité observée et les expansions dans les prismes de béton et les barres de mortiers. L'approche de modélisation mésoscopique présentée a pu reproduire les résultats de laboratoire.

Mots-clés : réaction alcali granulaire, RAG, gel de silice formé, analyse pétrographique, expansion, alcalinité, modélisation mésoscopique, mécanisme réactionnel.

Abstract

The alkali aggregate reaction is more frequent in the diagnostic of damaged structures. Although the reaction has been known for some time, it is difficult to have a clear picture of the mechanisms of the phenomenon in granular scale (mesoscopic) in the reaction of the affected structures.

This thesis aims to study the relationship between the progress of the reaction and the effects that generate the reaction on concrete, to better study the effect of the AAR on structures, and have an additional understanding. The base of our thesis and the program was to characterize the microstructure and mechanical properties of concrete affected by alkali aggregate reaction.

The microstructural characteristics of some aggregates were studied and measured using microscopic techniques;- mortar bars samples and miniature concrete prisms were made with these aggregates and subjected to alkali aggregate reaction.

The analysis of microscopic images obtained from samples was used to understand the mechanism and the degree of reaction. The multidisciplinary approach was used with the microstructural characterization and accelerated test to find a combination of techniques that can be used to assess the reaction.

The mesoscopic modeling approach adopted in the thesis take into account the effect of size reactive aggregates, the alkali content and the fraction of particle sizes. Kinetics modeling was done to address the mechanisms of the reaction on the basis of a chemical characterization.

The results show a promising relationship between the observed response and the expansions in the concrete and mortar prisms bars. A clarification has been discussed using microscope image processing regarding the mechanism of the reaction.

The mesoscopic modeling approach presented was able to reproduce the results of laboratory.

Keywords: alkali aggregate reaction, AAR, silica gel formed, petrographic analysis, expansion, alkalinity, mesoscopic modeling, reaction mechanism.

ملخص

رد الفعل الركام القلوي هو الأكثر شيوعا في تشخيص الهياكل التالفة. على الرغم من أن الظاهرة كانت معروفة منذ بعض من الوقت، فإنه من الصعب الحصول على صورة واضحة لآليات هذه الظاهرة في نطاق الحجم الحبيبي في الهياكل المتضررة. وتهدف هذه الأطروحة إلى دراسة العلاقة بين التقدم من رد فعل والآثار التي تولد رد فعل على الخرسانة، لدراسة أفضل لتأثير الظاهرة على الهياكل، والحصول على فهم إضافي.

قاعدة الأطروحة وبرنامجنا لوصف الظاهرة مجهريا والخواص الميكانيكية للخرسانة المتضررة من رد الفعل الركام القلوي. تم دراسة الخصائص المجهرية لبعض عينات من ركام وقيست باستخدام التقنيات المجهرية. عارضة خرسانة وמושور خرسانة مصغر صنعت من عينات ركام و عرضت على الرد الفعل القلوي. تم استخدام تحليل الصور المجهرية التي تم الحصول عليها من عينات لفهم آلية ودرجة التفاعل.

تم إتخاذ نهج متعدد التخصصات قد تم إجراءه مع التوصيف المجهرى مع اختبار التسارع رد الفعل القلوي للعثور على مجموعة من التقنيات التي يمكن استخدامها لتقييم رد فعل. نهج النمذجة في نطاق الحجم الحبيبي المعتمدة في الأطروحة تأخذ في الاعتبار تأثير حجم الركام ، والمحتوى القلوي و كسر من أحجام جسيمات الركام. تمت نمذجة حركية التفاعل لعرض آليات رد الفعل على أساس الخواص الكيميائية.

وأظهرت النتائج وجود علاقة واعده بين استجابة الملاحظة في التجربة والتوسع في عارضة الخرسانة وמושور الخرسانة المصغر . وقد نوقش توضيح باستخدام المجهر معالجة الصور المتعلقة بآلية رد الفعل. كان نهج النمذجة في نطاق الحجم الحبيبي قادرة على إعادة نتائج المختبر بشكل صحيح.

كلمات البحث: رد الفعل الركام القلوي ، هلام الركام القلوي ، البتروغرافيا ، التوسع، القلوية، نهج النمذجة في نطاق الحجم الحبيبي.

Sommaire

I-INTRODUCTION GENERAL.....	I
I-1 CADRE D'ETUDE	I
I-2 METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE	II
I-3 OBJECTIVES DE LA THESE	IV
I-4 TRACE DE NOTRE MEMOIRE	VI

PARTIE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : MECANISMES ET MODELISATION NUMERIQUE DE LA REACTION ALCALI GRANULAIRE

I-INTRODUCTION GENERAL.....	1
<i>I-1-Qu'est-ce que la Réaction Alkali Granulaire RAG ?.....</i>	<i>3</i>
<i>I-2-Pourquoi la RAG est une préoccupation ?</i>	<i>3</i>
<i>I-3-Différents type de réaction Alkali Granulaire</i>	<i>4</i>
I-3-1-Réaction Alkali Silice RAS	4
I-3-2-Réaction Alkali-silicate	4
I-3-3-Réaction Alkali-Carbonate RAC	4
<i>II-Incidence de la RAG sur les structures de génie civil.....</i>	<i>5</i>
II-1-Structures endommagée dans le terrain.....	5
II-2-La RAG dans le laboratoire.....	6
III-FISSURES DANS LE BETON DU A LA RAG.....	7
<i>III-1-Micro-fissures</i>	<i>7</i>
<i>III-2-Macro-fissures</i>	<i>8</i>
IV-PRINCIPAUX MODELES DU MECANISME REACTIONNEL.....	9
<i>IV -1-Réactivité des agrégats</i>	<i>9</i>
<i>IV -2-La minéralogie des roches d'agrégats réactives</i>	<i>9</i>
<i>IV-3-Nomenclature structurale de la silice.....</i>	<i>11</i>
<i>IV-4-Les mécanismes.....</i>	<i>12</i>
IV-4-1-Le processus topochimique	12
IV-4-1-1-Mécanisme de Dent-Glasser et Kataoka.....	12
IV-4-1-2-Mécanisme de Pool	13
IV-4-1-3-Mécanisme de WANG et GILLOT	14
IV-4-2-Le processus de dissolution-précipitation	16
IV-4-3-Processus mixte	17
IV-4-3-1-Modèle de CHATTERJI et al.....	17
IV-4-3-2-Modèle de BULTEEL et al.....	18
IV-4-4-Les modèles de gonflement.....	18
IV-4-5-Hypothèses sur l'origine du gonflement.....	19
IV-4-5-1-Gonflement engendré par la double couche électrique.....	19
IV-4-5-2-Gonflement résultant de la pression osmotique	19
IV-4-5-2-Gonflement par pression de cristallisation.....	20
IV-4-5-3-Gonflement granulaire	20
<i>V-Synthèse sur le mécanisme de la réaction alcali-silice</i>	<i>23</i>
V-1-Les produits de la réaction.....	24
VI-NOTRE VISION SUR LES MECANISMES REACTIONNELS	25
VII-FACTEURS AFFECTANT LA RAG.....	27
<i>VII -1-Les alcalins</i>	<i>28</i>

VII -2-Humidité.....	32
VII -3-La silice réactive	34
VII-4-Effets de l'environnement	37
VIII-UNE CRITIQUE SUR LES MODELISATIONS DE LA RAG.....	38
VIII -1-Modèles Microscopiques.....	40
VIII -1-1-Lemarchand et Dormieux 2000	40
VIII -1-2-Les modèles d'agrégats expansives	43
VIII -1-3-Les modèles de gel de poche	44
VIII -1-4-Effet de forme sur la RAG	49
VIII -2-Modélisation mésoscopique.....	51
VIII -2-1-Furusawa et al. 1994.....	51
VIII -2-2-Xi et al. 1999	51
VIII -2-3-Sellier et Capra 1997.....	52
VIII -2-4-Bazant et Steffens 2000	53
VIII -3-Modèles Macroscopiques.....	54
VIII -3-1-Simulation thermique	55
VIII -3-2-Chatterji et Christensen 1990.....	55
VIII -3-3-Leger et al. 1995	56
VIII -3-4-Huang et Pietrusczak 1999	56
VIII -3-5-Sellier et Capra 1997.....	57
VIII -3-6-Coussy et Larive 1996	58
VIII -3-7-Les modèles phénoménologiques	59
VIII -3-8-Les modèles Poro-mécaniques	63
VIII -3-9-Les modèles ITZ	66
IX-CONCLUSIONS	68

CHAPITRE 2 : ETUDES ET METHODES EXPERIMENTALES DE LA REACTION ALCALI GRANULAIRE

I-GENERALITE.....	70
II-LES METHODES ET ESSAIS EXISTANTS.....	70
II-1-Les essais Barre de mortier Accélérer (AMBT).....	71
II-1-1-ASTM C 1260 (ASTM C 1567)	71
II-1-2-AASHTO T 303	73
II-1-3-CSA A23.2-25A	73
II-1-4-RILEM TC 106-2 (RILEM AAR-2).....	75
II-1-5-Essais Barre de mortier Accélérer Chinois (CAMBT)	75
II-1-6-Limitation des essais Barre de mortier Accélérer	77
II-2-Les méthodes de prismes de béton (Concrete Prism Test CPT)	80
II-2-1-ASTM C 1293.....	80
II-2-2-CSA A23.2-14A	82
II-2-3-RILEM TC 106-3 (RILEM AAR-3).....	83
II-2-4-Limitation des méthodes de prismes de béton (CPT)	84
II-2-Méthode des prismes miniature en béton accélérées (Minature Concrete Prism Test MCPT).....	86
II-2-1-AASHTO TP 110-14.....	86
II-3-Durabilité.....	88
II-3-1-Perméabilité	88
II-3-2-Porosité.....	88
III-METHODE DE DIAGNOSTIC DE LA RAG	89
III-1-Site inspection	90
III-1-1-Mesure des fissurations [Fasseu et al. 2003], [Godart et al. 1992].....	90

III-1-2-Mesure de déformation.....	91
III-1-3-Analyser des résultats de mesure de fissuration et de déformation	91
III-1-4-Essai de fluorescence d'uranyle.....	91
III-1-5-L'expansion résiduelle.....	93
IV-LA PETROGRAPHIQUE	94
IV-1-Introduction.....	94
IV-2-Analyse pétrographique.....	95
IV-3-Équipement et méthode pétrographique.....	96
IV-3-1-Le microscope polarisant.....	96
IV-3-2-Composants caractéristiques d'un microscope polarisant	96
IV-3-3-Procédures et méthodes	99
IV-4-Pétrographie des granulats.....	101
IV-4-1-Aspect général	101
IV-5-Pétrographie du béton	102
IV-5-1-Aspect général.....	102
IV-6-Examen pétrographique du béton dans les sections minces.....	103
IV-6-1-Caractéristiques générales	103
IV-6-2-Caractéristique Spécificités.....	103
V-CONCLUSION	105

PARTIE 2 : ETUDE DE LA REACTION ALCALI SILICE

CHAPITRE 3 : ETUDE EXPERIMENTAL DE LA RAG

I-METHODES ET ESSAIS ADOPTE	106
I-1-PRINCIPES AYANT GUIDE NOS CHOIX EXPERIMENTAUX	106
II-JUSTIFICATION DU CHOIX DES MATERIAUX	107
II-1-Ciment	107
II-2-Granulats.....	107
II-3-Eau.....	107
III-MODE OPERATOIRE	108
III-1-L'essai Barre de mortier Accéléreur (AMBT).....	108
ASTM C 1260	108
III-2-Méthode des prismes miniature en béton accélérées (MCPT)	111
AASHTO TP 110-14	111
IV-CALCUL DU CHANGEMENT DE LONGUEUR POUR L'ASTM ET LE MCPT	113
V-CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX	114
V-1-Composition chimique du ciment.....	114
V-2-Granulats.....	115
V-2-1-Origine des granulats.....	115
V-2-1-1-Andésite.....	117
V-2-1-2-Quartzite.....	117
V-2-2-Influence de la granulométrie	118
V-2-2-1-Les résultats pour la méthode AMBT	119
V-2-2-2-Les résultats pour la méthode MCPT.....	120
V-3-Composition chimique des agrégats	120
V-3-1-La spectrométrie de fluorescence à rayons X (SFX / FX).....	120
V-3-2-Résultats de la spectrométrie de fluorescence à rayons X	121
V-3-2-1-Andésite.....	121
V-3-2-2-Quartzite.....	121

V-3-3-Caractéristique cristalline des agrégats	122
V-3-3-1-Caractérisation structurale (DRX)	122
V-3-3-2-Les résultats de la DRX.....	123
V-3-3-2-1-Andésite.....	123
V-3-3-2-2-Quartzite.....	124
VI-RESULTATS DES ESSAIS D'EXPANSION	125
VI-1-ASTM C 1260 (AMBT)	125
VI-2-AASHTO TP 110-14 (MCPT)	126
VII-DURABILITE	127
VII-1-Essais de perméabilité à l'oxygène, et porosité à l'hydroxyle de calcium Préparation des échantillons.....	128
VII-1-1-Préparation des enchantions à partir des cubes	129
VII-1-2-Résultats de l'essai de perméabilité	132
VII-1-2-1-AMBT (ASTM C1260)	132
VII-1-2-2-MCPT (AASHTO T110-14).....	133
VII-2-Essai de Porosité.....	134
VII-2-1-Résultats de l'essai de la porosité.....	136
VII-2-1-1-AMBT (ASTM C1260)	136
VII-2-1-2-MCPT (AASHTO T110-14).....	137
VII-3-Réduction de la résistance à la compression.....	138
VII-3-1-ABMT (ASTMC1260)	139
VII-3-2-MCPT (AASHTO T110-14).....	140
VII-4-Niveau pH dans la réaction alcali granulaire	141
VII-4-1-Procédure d'essai utilisant un pH mettre	141
VII-4-2-Résultats	144
VII-4-2-1-AMBT (ASTM C1260)	144
VII-4-2-2-MCPT (AASHTO 110-14)	146
VIII-ANALYSE PETROGRAPHIE	146
VIII-1-Pétrographie des granulats.....	148
VIII-1-1-Quartzite.....	148
VIII-1-2-Andésite.....	150
VIII-2-Pétrographie du béton	152
VIII-2-1-Pont Golden.....	152
VIII-3-Pétrographie des échantillons de l'essai AMBT (ASTM C1260).....	154
VIII-3-1-AMBT (ASTM C1260) avec des quartzite	154
VIII-3-2-AMBT (ASTM C1260) avec des andésites	156
VIII-4-Pétrographie des échantillons de l'essai MCPT (AASHTO-110.14).....	159
VIII-4-1-MCPT (AASHTO-110.14) avec quartzite.....	159
VIII-4-2-MCPT (AASHTO-110.14) avec andésite.....	161
IX-CONCLUSION	164

CHAPITRE 4 : MODELISATION DE LA REACTION ALCALI GRANULAIRE

I-PRINCIPE DE LA MODELISATION	166
II-Les hypothèses de la modélisation	168
III-Géométrie.....	168
IV-Modèle adopté	169
V-Validation du modèle par rapport l'expérimental.....	174
V-1-Comparaison des résultats de notre modèle avec l'expérimentation	174
V-1-1-Parametres de modélisation	175

V-1-1-AMBT (ASTM C1260).....	176
V-1-2-MCPT (AASHTO 110.14)	177
<i>VI-Implémentation du modèle dans un FEM application.....</i>	<i>178</i>
VI-1-L'analyse de l'expansion dans VER.....	178
<i>VII-Limite de notre modèle.....</i>	<i>180</i>
<i>VIII-Mécanisme d'avancement de la réaction alcali granulaire.....</i>	<i>181</i>
VIII-1-Les Hypothèses	185
VIII-2-La caractérisation chimique des réactifs et produits de la réaction	186
VIII-3-Résultats asymptotiques.....	188
VIII-3-1-ASTM	188
VIII-3-2-MCPT	192
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	197
BIBLIOGRAPHIE.....	200
LISTES DES PUBLICATIONS & COMMUNICATIONS ISSUES DE LA THESE.....	215

Introduction général

i-Introduction général

i-1 Cadre d'étude

L'usage de certains agrégats peut résulter dans un processus chimique avec des constituants particulier des agrégats, ou ils réagissent avec les dérivées des hydroxyles de potassium ou de sodium dissous dans les pores de la solution interstitielle.

Ces hydroxyles alcalins sont issus principalement du sodium et du potassium dans le ciment et d'autres matériaux à base de ciment, et certains composants de roche de source alcaline.

Les produits de réaction sont des gels hydratés dont la composition chimique comprend de la silice dérivée d'agrégats réactifs. Les dommages dans le béton est associée à l'expansion du produit en présence d'eau.

La réaction alcali granulaire a d'abord été observé en Californie en 1940 par (Staton), mais ont par la suite été reconnu dans de nombreux pays.

L'occurrence de la réaction alcali granulaire RAG dans un béton donné comprend l'expansion et le développement de la fissuration de façon polygonale ou un faïençage de fissure comme un trait caractéristique, en particulier lorsqu'ils sont accompagnés par des dépôts de gel exsudant de fissures.

Les statistiques du bilan d'activités des minières du ministère de l'énergie et des mines qui reflète que dans ses dernier années le ministère registre une consommation nationale en matière d'agrégats d'une augmentation de production de +32.9% et plus entre 1994 et 2008, et on juge plus que cela vue la croissance qu'a viques l'Algérie dans les 10 dernières années.

L'absence des procédées de classification des agrégats au près des directions des mines des willaya, ou aucune mines ou gisement n'a subi une étude approprier pour déterminer les agrégats à nature potentiellement réactifs à une réaction alcali granulaire.

Le présent travail fait partie d'un programme pour développer des outils pour l'étude du béton atteint par une réaction alcali granulaire. Cette étude établit un lien microscopique et macroscopique pour étudier le phénomène plus profondément.

En dépit de la poursuite des recherches, aucune des méthodes de diagnostic de la RAG peut

être invoqué indépendamment ou collectivement à apporter une réponse définitive en particulier à la question de savoir si la réaction est délétère de façon sérieuse si des quantités mineures d'agrégats réactifs sont découverts.

Les méthodes de réactivité potentielle des agrégats sont principalement effectuées comme indiqué dans le chapitre 3.

La modélisation de la RAG est complexe, car il existe plusieurs procédés couplés qui déterminent la cinétique de la réaction. Pour l'instant il n'a pas été possible de lier les conséquences mécaniques des dommages microscopiques.

La complexité de l'interconnexion physico-chimiques et mécaniques du phénomène nécessite le développement de micro-modèles et de macro-modèles.

Les effets induits par la réaction alcali-granulat sont également difficiles à modéliser en raison de la distribution aléatoire des sites réactifs et le manque de connaissance du comportement des produits de réaction lorsqu'il est confiné. Le produit reste la plus importante propriété de béton de structure, d'un point de vue technique.

i-2 Méthodologie de la recherche

Le développement de notre recherche sur l'étude de la réaction alcali granulaire dans le béton se fera en plusieurs étapes. Ces étapes peuvent être classés comme suit :

1-Étude expérimentale :

- Des essais de caractérisation.
- Des essais d'expansion.

2-Étude théorique :

- Corrélation entre l'approche théorique et les résultats expérimentaux.

i-2 -1 Étude expérimentale

La RAG dépend fortement de la taille de l'échantillon ou la dimension caractéristique d'une structure en béton. En général, il n'y a pas de corrélation simple entre les échantillons de

béton examinées en laboratoire avec la structure en béton ou les conditions limites de terrain sont déficient. Néanmoins, il serait d'intérêt théorique et pratique pour étudier un béton affecté par la RAG à l'aide des mesures en laboratoire.

Les principales tâches qui peuvent être obtenus par des essais de laboratoire sont les suivantes :

- L'identification de la RAG, son étendue et l'évolution du potentiel résiduel éventuellement du béton touché par approche théorique.

Les essais d'examinations et de prédiction de comportement mécanique qui sera utilisé sur les barres de mortier et prismes de béton, une analyse à Diffraction des Rayons X (DRX), Fluorescence à Rayons X (FRX), et Microscope Polarisant (MP).

Dans de différents niveaux de réaction, l'utilisation d'une combinaison de plusieurs essais permet des résultats plus complets et précis pour une vision plus claire sur le phénomène.

Les premiers concepts sur lesquels les tests sont basés sur, comprennent le déroulement de la réaction et le comportement mécanique lié.

Les essais mortier de barres et prismes de béton ont été réalisée dans les conditions normalisées pour montrer les limites des agrégats potentiellement réactif en comparaison avec des essais de contrôle vérifier par le Microscope Polarisant.

Les barre et les prismes ont été testé à plusieurs températures de 60, et 80 °C afin d'obtenir la vitesse et l'ampleur de l'expansion à différentes températures illustrées par le Microscope Polarisant.

i-2 -2 La modélisation

Après avoir obtenu les résultats de l'étude expérimentale, une approche théorique est utilisée pour mieux comprendre le comportement du phénomène du béton affecté par la RAG. L'intérêt d'un modèle basé sur la cinétique et la diffusion des réactifs, la taille des agrégats, et la fraction de taille est d'établir le lien entre les contraintes internes provoquées par les conséquences de la RAG et la présence ou l'absence des agrégats réactifs. Le modèle devrait

servir de base pour :

- Prédire le taux d'évolution de la réaction.
- La prédiction du comportement de la structure affectée par la RAG dans le futur.

Dans ce travail, la modélisation est abordée au niveau matériel afin d'établir des liens entre les études de durabilité du béton et les structures réelles affectés.

Avant de développer le modèle à échelle macroscopique, il est important de le définir dans un plus petite (échantillonnage pour laboratoire).

La modélisation se fera à échelle microscopique en identifiant et en décrivant les phénomènes topochimique qui constituent la RAG à échelle mésoscopique en définissant une loi de comportement qui prend la RAG en compte.

i-3 Objectives de la thèse

Les déformations retardées, ainsi que la perte de propriétés mécaniques jouent une règle très importante dans le dimensionnement des structures en béton et en la détermination de leur comportement à long terme. Les désordres peuvent apparaître dans différentes manières :

Variation de la répartition des contraintes, augmentent dans les déformations, apparition et propagation des fissures, ce qui affecte directement l'état du service et la durabilité de la structure en béton.

Les essais en laboratoire est contrôlée à une température élevée qui provoque un début d'expansion plus rapide et une plus grande expansion finale. Il en résulte un problème pour la bonne exploitation des résultats obtenus dans le niveau des structures où les phénomènes se produisent à des températures ambiantes.

Le quasi absence d'une procédure plus fiable pour évaluer les effets de la RAG induites dans les structures concernées, il est courant de considérer les résultats donnés à partir de l'évaluation de laboratoire (propriétés mécaniques des matériaux) pour la conception de nouvelles structures en béton incorporant des agrégats réactifs.

La performance et la durabilité à long terme des structures en béton déjà touché est l'un des aspects les plus importants de la gestion de l'ingénierie. En utilisant les données des essais en laboratoire et leur extrapolation aux structures affectées. Cette étude permet de tirer quelques recommandations qui pourraient être de l'utilisation efficace dans les structures.

Ce programme de recherche vise à étudier la réaction alcali granulaire de façon plus profonde par corrélation entre l'expansion accélérer du phénomène par un modèle mathématique plus simple, avec un programme expérimental pour une vision plus élargit sur les comportement et identification du phénomène.

Le principe de base du notre recherche est de revoir la caractérisation de la nature des agrégats réactives, la microstructure et le degré d'expansion, vue la complexité du phénomène cela est assez difficile pour les raisons suivantes :

- Sur le terrain, l'induction et la durée de réaction sont très longues, de sorte qu'ils doivent être accélérés en laboratoire, vue savoir l'accélération nécessaire.
- La quantité de agrégats réactif dans l'ensemble de la composition du béton est généralement difficile à quantifier.
- La relation entre le degré de la réaction, l'expansion et le changement de propriétés mécaniques est non-linéaire.

Les aspects importants de notre recherche sont :

- Une approche multidisciplinaire pour la caractérisation chimique, de la microstructure et mécanique pour augmenter les chances de trouver une combinaison de techniques qui peuvent être utilisées pour évaluer le degré de réaction.
- L'utilisation de la modélisation théorique pour comprendre le lien entre les changements observer, qui peuvent être utilisés pour extrapoler l'évolution des propriétés dans le long terme.

i-4 Tracé de notre mémoire

La thèse contient deux parties. La première partie se définit dans une étude bibliographique ayant le 1er chapitre l'état de l'art sur la modélisation numérique et mécanismes réactionnelles de la réaction alcali granulaire. Dans le 2ème chapitre comprend une lecture des méthodes et essais expérimentales dans la littérature pour définir une réaction alcali granulaire.

La deuxième partie comprennent un 3ème chapitre présente la composition chimique et la caractérisation cristalline des matériaux utilisées, les résultats expérimentales des essais accélérer et les méthodes d'investigation par analyse pétrographique, ainsi que l'effet de la RAG sur la durabilité du béton affecter. Le 4ème chapitre va se focaliser dans la modélisation du modèle et sa validation vis-à-vis l'expérimentale par illustration d'exemples, se terminer par une conclusion générale et des recommandations de futurs travaux

i-4-1- Partie 1 : Étude bibliographique

Chapitre 1

Dans ce chapitre, certains principes sont présentés dont les mécanismes réactionnels, et les modèles numérique de la RAG.

Chapitre 2

Ce chapitre, examine l'aspect générale de l'expérimentation du phénomène, par une étude bibliographique des méthodes long termes et accélérer pour des agrégats définit comme potentiellement réactives ou réactives, et un avant-propos sur l'analyse pétrographique.

i-4-2-Partie 2 : Étude la réaction alcali granulaire

Chapitre 3

Les résultats de l'étude expérimentale de l'expansion de la RAG ; une analyse pétrographique sur les différents composants de béton utilisé sont effectuées.

Les essais expérimentaux ont été menées sur 2 types de granulats, un réactif et un classé potentiellement non réactive, le béton et les mortiers sont subis à 2 températures différentes.

Ceci permet l'expansion et d'autres propriétés mécaniques de se développer.

Chapitre 4

Dans le chapitre 4, nous essayons de modéliser à la fois l'effet de la concentration totale sur l'expansion à travers une approche micro-cinétique pour l'agrégat touché, et l'effet de la fraction de taille des agrégats sur l'expansion total du spécimen. Le document de thèse se termine par des conclusions et des recommandations pour les travaux futurs.

Listes des Figures

Fig.1.II.1 : Barrages endommagés. [Charlwood 2009]	5
Fig.1.II.2 : Mesure d'un prisme de béton.....	7
Fig.1.III.1 : Fissuration à la limite de l'agrégat, pâte de ciment, causées par l'expansion de de la RAG. [López et al.2011]	7
Fig.1.III.2 : 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.....	8
Fig.1.III.3 : 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. [Winter.2001]....	8
Fig.1.IV.1 : Influence du type de granulats sur la RAG [Sibbick, 1992].....	9
Fig.1.IV.2 : Définitions des Q3 Q4. [Monnin. 2006]	11
Fig.1.IV.3 : Schéma réactionnel présenté par [Dent-Glasser et al.1981]	12
Fig.1.IV.4: Mécanisme de Wang et Gillot. [Wang et all. 1991]	16
Fig.1.IV.5 : Diagramme des potentiels chimiques du système CaO-KOH-SiO ₂ -H ₂ O d'après [Dron.1990].....	17
Fig.1.IV.6 : Modèle de gonflement dû à la R.A.S. [Ichikawa et al. 2009]	23
Fig.1.VII.1 : Trois éléments essentiels pour les dommages induits par la RAG en béton.....	28
Fig.1.VII.2 : Le tableau périodique montrant la position des alcalins (le site web du ptable).....	29
Fig.1.VII.3 : Effet de l'humidité relative sur l'expansion de la RAG. [Chang.2008].....	34
Fig.1.VII.4 : Une structure tétraédrique de silice. [Chang.2008]	35
Fig.1.VII.5 : Microphotographie d'un grain (cryptocristalline) calcédoine agrégat très fin dans le béton. Notez les cristaux aciculaires caractéristiques de calcédoine indiqué par la flèche. [Chang.2008]	35
Fig.1.VII.6 : Quartz non réactif. Le grain de quartz ensemble est soit uniformément lumineux (a) ou totalement sombre (b) sous lumière polarisée croisée lorsque la platine du microscope est une rotation de 360 °.[Chang.2008]	36
Fig.1.VII.7 : Réactif ou tendues quartz présentant foncé (A) et des bandes de lumière (B) dans un Seul grain. [Chang.2008]	37
Fig.1.VII.8 : Influence de la température sur l'expansion de la RAG. [Chang.2008].....	38
Fig.1.VIII.1: Influence de l'emplacement des poches de gel sur un modèle de fissure obtenue avec le modèle de [Çopuroglu et al.2007]	45
Fig.1.VIII.2: Modèle d'endommagement obtenue avec le modèle de [Dunant et al.2010] comparé par rapport l'image obtenu par le microscopie semi-électronique (à droite).	46
Fig.VIII.3: Comparaison en expérimentale et le modèle proposé par [Dunant.2009]	47
Fig.1.VIII.4: Illustration de l'influence de la charge sur l'orientation des fissures selon les estimations du modèle de [Dunant et al.2012]	47
Fig.1.VIII.5: Comparaison entre l'expansion expérimentales et simulées sous contrainte uniaxiale obtenu avec le modèle de [Dunant et al.2012].	48
Fig.1.VIII.6: Influence de la forme d'agrégat sur l'anisotropie de l'expansion libre (à gauche) en comparaison avec les données expérimentales de.[Giorla.2013]	49
Fig.1.VIII.7: Influence de la forme globale sur le modèle de fissuration à deux de différents degré réaction. Comparaison avec endommagement expérimentale obtenue à des degrés élevés de réaction. [Giorla.2013].....	50
Fig.1.VIII.8: Expansion modélisée comme une fonction sigmoïde de temps (unités arbitraires).	60
Fig.1.VIII.9: Réduction de l'expansion final en fonction de la contrainte appliquée dans la modèle de microstructure [Leger et al.1995].....	62
Fig.2.II.1 : Corrélation entre les résultats d'AMBT et les résultats CPT pour un agrégat spécifique [Folliard et al.2008].	80
Fig.2.III.1 : processus de diagnostic et de requalification de la structure endommagée [Fasseu et al. 2003].....	90
Fig.2.III.2 : Essai avec l'acétate d'uranyle à la lumière UV [Fasseu et al. 2003].....	92
Fig.2.III.3: gel de silice et cristaux d'ettringite différé a l'aide du MEB [Fasseu et al. 2003]	93
Fig.2.III.4: courbe d'expansion résiduel (à 38 ° C, humidité relative> 95%) [LPC 1997].	93
Fig.2.IV.1: Les composants d'un microscope polarisant.[mircscopuyo.com]	98
Fig.2.IV.2 : Une section mince de béton sous un microscope polarisant à éclairage UV. [Poole et al.2016]	98

Fig.2.IV.3 : Un schéma illustrant les étapes d'enquête pétrographique en fonction de l'information et le détail qui est requis.[Poole et al.2016]	100
Fig.2.IV.4 : Vue de sous-grains de quartz microcristallines formés par recristallisation, (a) observée en utilisant avec des polarisant croisés, (b) observée en utilisant la lumière polarisée dans le plan. (qtz = quartz, plg = plagioclase, mcl = microcline, car = carbonate, ser = sericite, cl = chlorite, opc = opaque minerals, ep = epidote).[Neto et al.2014]	102
Fig.2.IV.5 : Visualisation à l'aide du microscope polarisant d'un béton atteint par la RAG dans différents degrés de détérioration. [Vega.2014]	104
Fig.3.III.1: Moules d'une barre de mortier.....	109
Fig.3.III.2: Support de mesure d'élongation	109
Fig.3.III.3: Les récipients pour les barres de mortier.	110
Fig.3.III.4: réservoir à bain d'eau chaud à 80°C.	110
Fig.3.III.5: Moules à prisme miniature à béton.	111
Fig.3.V.1: texture du granulat d'Andésite.....	117
Fig.3.V.2 : Texture du granulat de Quartzite	118
Fig.3.V.3 : Résultat de l'analyse granulométrique des agrégats fines pour l'andésite et le quartzite	119
Fig.3.V.4 : Résultat de l'analyse granulométrique des agrégats fines pour l'andésite et le quartzite	120
Fig.3.V.5 : Profile de la diffraction à rayons-X de l'andésite.	123
Fig.3.V.6 : Profile de la diffraction à rayons-X du quartzite.	124
Fig.3.V.7 : Expansion des agrégats Andésite et Quartzite selon la méthode AMBT (ASTM C1260)	126
Fig.3.V.8 : Expansion des agrégats Andésite et Quartzite selon la méthode MCPT (AASHTO TP 110-14)	127
Fig.3.VII.1 : (a) Stockage pour 28 jours à 23 ± 2 C°. (b) Stockage pour 28 jours à température et HR ambiante. (c) Stockage pour 28 jours à 80 ± 2 C° et 60 ± 2 C°.	128
Fig.3.VII.2 : (a) Appareil a carottage. (b) Scie mécanique pour béton	129
Fig.3.VII.3 : (a) Equipement pour mesuré la perméabilité.....	130
Fig.3.VII.4 : Enregistrements de la chute de pression de l'oxygène pendant l'essai de perméabilité.	131
Fig.3.VII.5 : Variation du coefficient de perméabilité des bétons en fonction du milieu de stockage pour l'ASTM.	132
Fig.3.VII.6 : Variation du coefficient de perméabilité des bétons en fonction du milieu de stockage pour le MCPT. ...	133
Fig.3.VII.7 : (a) Equipements saturation à vide. (a') Scie mécanique pour béton. (b) Des échantillons arranger pour la saturation. (c) pesé électronique à 0.001 g de prés.....	135
Fig.3.VII.8 : Variation du pourcentage de la porosité des cubes de mortiers en fonction du milieu de stockage pour le ASTM.	136
Fig.3.VII.9 : Variation du pourcentage de porosité des cubes de bétons en fonction du milieu de stockage pour le MCPT.	137
Fig.3.VII.10 : Variation du pourcentage de porosité des cubes de bétons en fonction du milieu de stockage pour le MCPT.	139
Fig.3.VII.11 : Variation du pourcentage de porosité des cubes de bétons en fonction du milieu de stockage pour le MCPT.	139
Fig.3.VII.12 : Variation du pourcentage de porosité des cubes de bétons en fonction du milieu de stockage pour le MCPT.	140
Fig.3.VII.13 : Le pH d'un échantillon de poudre de béton obtenu après 60 secondes de ponçage de surface en utilisant du papier de verre relevée par un pH-mètre.....	142
Fig.3.VII.14 : Effect of pH on Dissolution of Amorphous Silica [Tang and al, 1980].	143
Fig.3.VII.15 : Variation du pourcentage de porosité des cubes de bétons en fonction du milieu de stockage pour le MCPT.	144
Fig.3.VII.16: Variation du pourcentage de porosité des cubes de bétons en fonction du milieu de stockage pour le MCPT.	146
Fig.3.VIII.1 :Section mince de quartzite à analyser.	148
Fig.3.VIII.2 :Imagerie d'une section mince de quartzite à une amplification de 50x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)	149
Fig.3.VIII.3: Imagerie d'une section mince de quartzite à une amplification de 100x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)	149
Fig.3.VIII.4 :Imagerie d'une section mince de quartzite à une amplification de 200x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)	150
Fig.3.VIII.5:Section mince d'andésite à analyser.	150

Fig.3.VIII.6 : Imagerie d'une section mince d'andésite à une amplification de 50x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)	151
Fig.3.VIII.7 : Imagerie d'une section mince d'andésite à une amplification de 100x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)	151
Fig.3.VIII.8: Section mince du béton affété du pont de Golden.....	152
Fig.3.VIII.9: Imagerie d'une section mince de béton altéré à une amplification de 50x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)	153
Fig.3.VIII.10: Imagerie d'une section mince de béton altéré à une amplification de 50x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)	153
Fig.3.VIII.11: Imagerie d'une section mince de béton altéré à une amplification de 200x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)	154
Fig.3.VIII.12: Section mince du barre de mortier à base de quartzite (ASTM).	155
Fig.3.VIII.13: Imagerie d'une section mince de la barre de mortier tester altéré à une amplification de 50x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)	155
Fig.VIII.14 : Imagerie d'une section mince de la barre de mortier tester altéré à une amplification de 100x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)	155
Fig.3.VIII.15: Imagerie d'une section mince de la barre de mortier tester altéré à une amplification de 200x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b).	156
Fig.3.VIII.16: Section mince du barre de mortier à base de andésite (ASTM).	157
Fig.3.VIII.17: Imagerie d'une section mince de la barre de mortier tester altéré à une amplification de 50x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)	157
Fig.3.VIII.18: Imagerie d'une section mince de la barre de mortier tester altéré à une amplification de 100x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)	158
Fig.3.VIII.19: Imagerie d'une section mince de la barre de mortier tester altéré à une amplification de 200x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)	158
Fig.3.VIII.20: Section mince du prisme de béton à base de quartzite (MCPT).....	159
Fig.3.VIII.21: Imagerie d'une section mince de prisme à béton altéré tester à une amplification de 50x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)	159
Fig.3.VIII.22: Imagerie d'une section mince de prisme à béton tester à une amplification de 100x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)	160
Fig.3.VIII.23: Imagerie d'une section mince de prisme de béton tester altéré à une amplification de 200x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b).	160
Fig.3.VIII.24: Imagerie d'une section mince de prisme de béton tester altéré à une amplification de 400x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b).	161
Fig.3.VIII.25: Section mince du prisme de béton miniature à base d'andésite (MCPT).	162
Fig.3.VIII.26: Imagerie d'une section mince de prisme de béton tester altéré à une amplification de 50x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b).	162
Fig.3.VIII.27: Imagerie d'une section mince de prisme de béton tester altéré à une amplification de 100x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b).	163
Fig.3.VIII.28: Imagerie d'une section mince de prisme de béton tester altéré à une amplification de 400x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b).	163
Fig.4.III.1 : Définition du volume élémentaire relatif (VER) de plusieurs tailles d'agrégats réactifs [Poyet et al. 2007]	168
Fig.4.V.1: expansion et calcul du volume de gel formé pour la taille d'agrégats 4.75mm	174
Fig.4.V.2 : Fraction des tailles d'agrégats pour la méthode AMBT (ASTM C1260)	176
Fig.4.V.3 : Expansion des agrégats Andésite et Quartzite selon la méthode AMBT (ASTM C1260)	177
Fig.4.V.4 : Fraction des tailles d'agrégats pour la méthode MCPT (AASHTO 110.14).....	177
Fig.4.V.5 : Expansion des agrégats Andésite et Quartzite selon la méthode AMBT (ASTM C1260)	178
Fig.4.VI.1 : une coupe transversale du VER.....	179
Fig.4.VI.2 : (a, b, c) Réponse des contraintes générer par l'expansion du gel de silice	179
Fig.4.VI.3 : (a, b, c) réaction de la déformation de l'expansion du gel de silice formé.	180
Fig.4.VIII.1: Fissure à l'intérieur de la nucléation des granulats suivi par la propagation à l'intérieur de la pâte de ciment [Katayama.2012]	183
Fig.4.VIII.1 : Evolution du produit CNH pour le ASTM dans une période de 21 jours	188
Fig.4.VIII.2 : Evolution du produit CSH pour le ASTM dans une période de 356 jours	189

Fig.4.VIII.3 : Evolution du produit CNSH pour le ASTM dans une période de 21 jours	190
Fig.4.VIII.4 : Evolution du produit CNSH pour le ASTM dans une période de 356 jours	191
Fig.4.VIII.5 : Evolution du produit CSH pour le MCPT dans une période de 56 jours	192
Fig.4.VIII.6 : Evolution du produit CSH pour le MCPT dans une période de 356 jours	193
Fig.4.VIII.7 : Evolution du produit CNSH pour le MCPT dans une période de 56 jours	194
Fig.4.VIII.8 : Evolution du produit CNSH pour le MCPT dans une période de 356 jours	195

Listes des Tableaux

Tab.1.IV.1 : Principales roches réactives [Le Roux et al., 1999]	10
Tab.1.IV.2: Rayon hydraulique, distance cation-oxygène et énergie électrostatique. [Wang et all. 1991].	14
Tab.2.II.1 : Analyse granulométrique exigé par la norme ASTM C 1260.	73
Tab.2.II.2 : Analyse granulométrique exigé par la norme CSA A23.2-25A.	74
Tab.2.II.3 : Analyse granulométrique exigé dans RILEM TC 106-2.	75
Tab.2.II.4 : Comparaison des différentes méthodes d'AMBT [Jun.2010]	78
Tab.2.II.5 : Analyse granulométrique dans la norme [ASTM C 1293-08.2008].	81
Tab.2.II.6 : Classification de la réactivité des agrégats.	82
Tab.2.II.7 : Analyse granulométrique exigence par [CSA A23.2-14A.2004a].	83
Tab.2.II.8 : Comparaison des différentes méthodes de CPT [Jun.2010]	85
Tab.2.II.9 : Analyse granulométrique du MCPT.....	87
Tab.3.III.1 : Proportions de mélange pour la formulation des prismes de béton miniature. [Latifee.2015]	108
Tab.3.III.2 : Évaluation de la réactivité de granulats par	111
Tab.3.III.3: Granulométrie exigé par MCPT. [Latifee.2015]	112
Tab.3.III.4: Proportions de mélange pour la formulation des prisme de béton miniature. [Latifee.2015].....	113
Tab.3.V.1: composition chimique du ciment CEM 1 52.5N	115
Tab.3.V.1 : composition chimique de l'andésite.....	121
Tab.3.V.2 : composition chimique de le quartzite	121
Tab.4.VIII.1 : Concentration initial des réactants de la réaction chimique.	186
Tab.4.VIII.2 : Réacculatifs des concentrations initiales et du volume d'eau.	187

Glossaire

RAG : réaction alcali-granulat

Diffusion : Le mouvement des particules à partir d'un potentiel chimique plus élevée à un plus faible.

Expansion : Est la tendance de la matière d'augmenter de volume (%).

Pétrographie : Est la science ayant pour objet la description des roches et l'analyse de leurs caractères structuraux, minéralogiques et chimiques.

DRX : est une technique d'analyse fondée sur la diffraction des rayons X sur la matière.

FRX : est une technique d'analyse fondée sur la fluorescence des rayons X sur la matière.

Modélisation mésoscopique : est une analyse théorique d'un phénomène précis à échelle granulaire.

Partie 1

Etude Bibliographique

Chapitre 1

Mécanismes et modélisation numérique de la Réaction Alkali Granulaire

Partie 1 : Etude bibliographique

Chapitre 1 : Mécanismes et modélisation numérique de la Réaction Alcali Granulaire

I-Introduction général

Une grande variété de types d'agrégats est utilisée couramment dans le monde entier, en particulier ceux avec une composition siliceuse. Ces agrégats sont vulnérables aux alcalins contenant dans les pores interstitiels du béton. Ces composants dans des conditions humides produit un gel hygroscopique expansive. Le mécanisme de dégradation est appelé réaction alcali granulaire (RAG) ou, plus précisément, pour les granulats siliceux, réaction alcali silice (RAG).

Les composants réactifs peuvent être trouvés dans différentes agrégats tels que ; les roches magmatiques sédimentaires ou métamorphiques. On peut définir les roches sédimentaires par des granite, calcaire, micas, quartzite, basalte, andésite... etc. Le constituant réactif est du quartz finement pulvérisé ou la silice amorphe dans la roche, ou la RAG peut également impliquer des minéraux argileux ou des composants de mica.

Malgré les améliorations continues de la recherche, aucune des méthodes de diagnostic ou de prévention de la RAG peut être invoqué indépendamment ou collectivement pour fournir une réponse définitive en particulier à la question de l'évolution future de la réaction dans les structures.

La RAG est une réaction chimique néfaste se produisant dans tous les types de structures de béton : barrages, ponts, routes, etc., contenant des agrégats réactifs.

Trois facteurs principaux sont considérés comme étant nécessaires pour cette réaction :

(i) la teneur en alcalis élevée dans la solution interstitielle du béton, (ii) la silice réactive dans les agrégats et (iii) l'humidité. Ces trois facteurs sont des éléments indispensables stimulant la réaction alcali-silice. L'histoire de la RAG débute en 1935, où Holde a exploré la réaction entre les ciments et certains agrégats [Comby-Peyrot 2006], et en 1940 Stanton décrit la nature des réactifs de la RAG et a observé les désordres structurels.

En 1941, la structure hydraulique "Parker Dam" (Etats-Unis) a été identifiée comme étant affecté par la réaction alcalin granulaire [Corneille et al. 1991]. Par la suite, de nombreuses structures ont été progressivement révélés être affectés par la réaction.

Dans les structures massives existantes, il est impossible d'arrêter la réaction elle-même. L'expansion et la dégradation peuvent être atténués par la réparation de la structure. Il est alors essentiel du point de vue gestionel de prédire quand la structure doit être réparé et comment il va évoluer après les réparations. Dans les cas extrêmes, il peut même être nécessaire de remplacer la structure plutôt que de le réparer.

La prédiction de la durée de vie des structures affectées par la RAG nécessite le développement de modèles numériques en mesure de représenter avec précision le phénomène. La construction de ces modèles nécessite une compréhension de la physique sous-jacente et de la morphologie de la matière concernée, complétées par des études paramétriques pour évaluer l'influence des différents paramètres et des modèles d'alimentation avec des valeurs réalistes.

La RAG est un phénomène chimico-physico-mécanique complexe, la nature du gel varie avec différents ions d'alcalins [Tambelli et al.2006] ; la perméabilité du béton influe sur le transport de l'eau, et par conséquent le processus de gonflement du gel [Poyet et al.2006]; la nature des granulats change la morphologie de la dégradation mécanique [Ponce et al.2006]; l'orientation des micro-fissures induites peut affecter la répartition spatiale de l'expansion [Dunant et al. 2012].

Des études antérieures suggèrent une séparation entre les processus chimiques, d'une part, et les conséquences mécaniques d'autre part. Ben Haha à quantifier avec une analyse d'imagerie le degré de réaction des mortiers de bétons affectées par la RAG, avec différents types d'agrégats et conditions chimiques [[Ben Haha.2006], [Ben Haha et al.2007]].

Ceci indique qu'une relation entre la dégradation et l'expansion peut être étudiée et modélisée indépendamment des conditions environnementales. Cela est essentiel car les structures massives sont soumises à diverses conditions de stress qui affecte l'expansion et la

dégradation de la structure.

L'effet de chargement sur la RAG a été étudiée dans les travaux successifs de [Le Roux et al.1992], [Larive.1997], [Multon et al.2006] et [Dunant et al.2010]. Ils ont montré que l'application d'une charge uni-axial sur un échantillon réduit l'expansion dans la direction de la charge, et même annule la réaction si la charge est suffisamment élevée. Cependant, l'expansion dans la direction latérale change de façon non linéaire en fonction de la charge et les conditions aux limites.

I-1-Qu'est-ce que la Réaction Alcali Granulaire RAG ?

Les résultats de la RAG donnent des fissurations délétères dans le béton à un âge plus avancé après la construction. Bien que la plupart du temps les agrégats classés comme inerte, peuvent réagir dans un milieu fortement alcalin résultant l'expansion du béton provoquant des fissuration interne. [ACI.2008]

Les alcalins comprennent du sodium et/ou du potassium qui sont des constituants mineurs dans le ciment portland, mais qui peut être de sources externes. L'expansion due à la RAG est un processus lent et les résultats de détérioration visible de 10 à 15 ans après la construction de la structure. Dans des cas rares de dégradation on peut l'observer à jeune âge. [AASHTO.2015]

I-2-Pourquoi la RAG est une préoccupation ?

La détérioration de structures en béton par réaction alcali granulaire ne conduit pas généralement à des catastrophiques. Où la stabilité dimensionnelle de la structure est important, comme les barrages, les ponts, ...etc., l'expansion engendré par la RAG peut influencer sur le fonctionnement de la structure. Dans la plupart des cas, la synergie avec d'autres processus de dégradation comme les cycles de gel -dégel et la corrosion des armatures exacerbe le taux de détérioration des structures. La RAG dans les chaussées de béton et infrastructure de transport peut entraîner l'effritement des sections fissurées, l'humidité, et le sel de déglacasse supplémentaire, et la charge de trafic accélèrent le processus. [ASTM.2015]

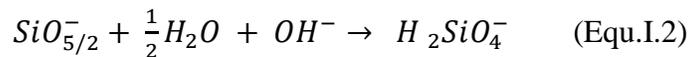
I-3-Différents type de réaction Alcali Granulaire

En reconnaissent trois formes de RAG [Chaprin.2013] :

I-3-1-Réaction Alcali Silice RAS

Les granulats, composés essentiellement de silice : la silice mal cristallisée est la plus altérable et réagit avec les ions alcalins de la solution interstitielle des pores du béton, forment un gel qui gonfle par absorption d'eau. La cinétique de l'attaque est gérée par un ensemble de paramètres tel que le pH, l'alcalinité (concentration en ions OH⁻), la concentration en ions calcium (Ca²⁺), la qualité de la structure du granulat SiO₂.

Le seul point du mécanisme réactionnel sur lequel la plupart des auteurs semblent s'accorder est l'attaque hydraulique de la silice provoquant la formation de sites ionisées (Equ.I.1) puis la coupure des liaisons siloxanes (Equ.I.2).



I-3-2-Réaction Alcali-silicate

La réaction alcali-silicate survient lorsque les agrégats du béton sont contaminés par la présence de minéraux argileux (argile, terre...).

I-3-3-Réaction Alcali-Carbonate RAC

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 [Chaprin.2013].



II-Incidence de la RAG sur les structures de génie civil

II-1-Structures endommagée dans le terrain

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 (Fig.1.II.1).

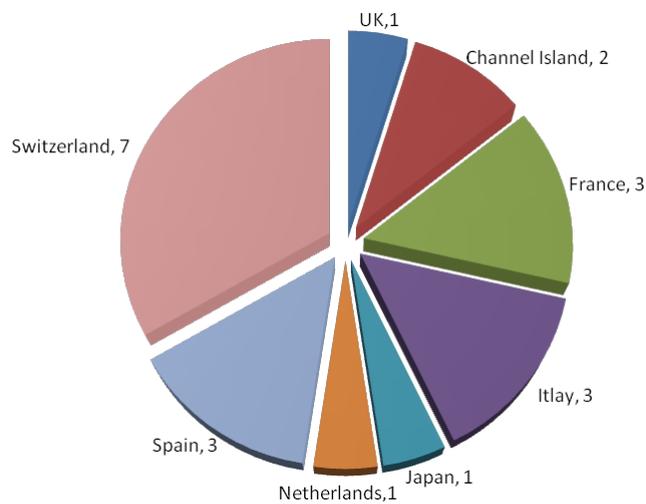


Fig.1.II.1 : Barrages endommagés. [Charlwood 2009]

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 examiné sont affétés 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].

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.

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.

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

- Exsudation de gels dans la 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.

II-2-La RAG dans le laboratoire

L'effet de la RAG est étudié sur les prismes de béton ou barres de mortier dans les laboratoires (Fig.1.II.2) ainsi que dans les études sur terrain. Le même type de fissures ont été observées :

- 1) Carte de fissures apparaissent dans les éléments libres de contrainte,
- 2) Pour le béton armé ou dans les éléments soumis à une contrainte de chargement, les fissures reflètent la disposition des barres d'armature sous-jacente ou la direction de la contrainte majeure [Fan et al 1998], [Rivard et al 2009].

La déformation ne se trouve pas seulement en raison de trois facteurs principaux citer auparavant (teneur en alcalis, silice réactive et eau), mais aussi tiens compter des états de contrainte et donc la présence d'armature.



Fig.1.II.2 : Mesure d'un prisme de béton.

III-Fissures dans le béton dû à la RAG

III-1-Micro-fissures

Comme le processus de la RAG 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. (Fig.1.III.1)

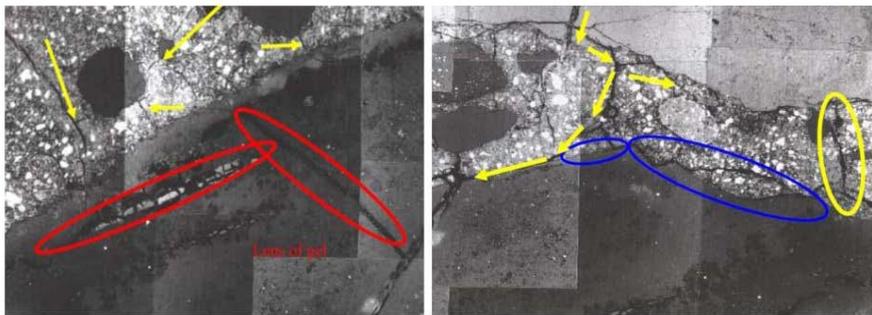


Fig.1.III.1 : Fissuration à la limite de l'agrégat, pâte de ciment, causées par l'expansion de de la RAG. [López et al.2011]

III-2-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 RAG (Fig.1.III.2/(Fig.1.III.3). Les fissures ont une caractéristique de "carte de faïençage".[Winter.2001]



Fig.1.III.2 : 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.



Fig.1.III.3 : 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. [Winter.2001]

Ce modèle de la fissure tend à se produire dans des structures non chargées. La RAG se

comporte différemment sous chargement, comme détaillé ultérieur de cette thèse. Les fissures peuvent encore se produire, mais sa forme sera influencée par la charge.

IV-Principaux modelés du mécanisme réactionnel

IV -1-Réactivité des agrégats

Les agrégats sont issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives (calcaire, granite ...). Le type de granulats à une grande influence sur l'amplitude du gonflement généré par la réaction alcali-granulaire. Cas d'exemple, différents éprouvettes de même dimensions, fabriquées avec différents granulats, est présenté par la figure (Fig.IV.1.1) [Sibbick, 1992]. L'amplification varie entre 0,02 et 0,28% pour des mesures réalisées entre 1 et 12 mois. La cinétique de la réaction initiale varie entre 0,005%/m à 0,06%/m. Ainsi, la minéralogie d'un granulat induit une cinétique rapide ou lente de la réaction [Ponce et Batic, 2005].

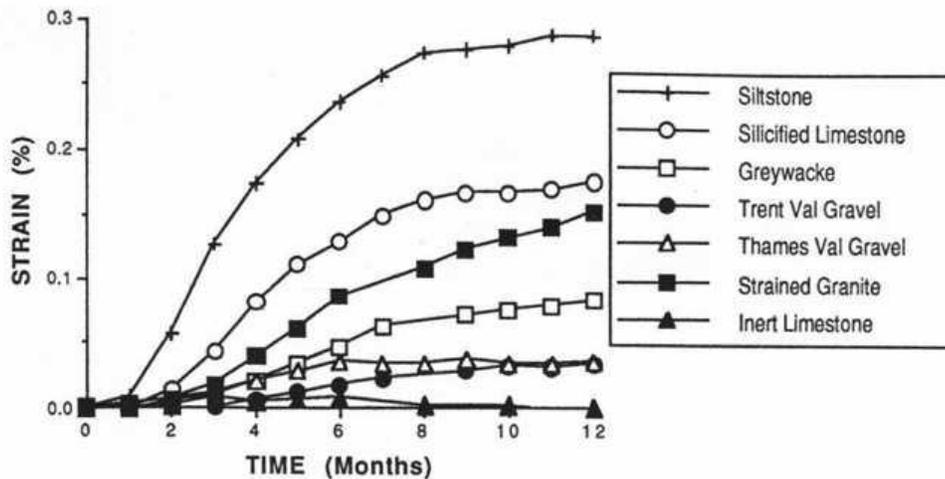


Fig.1.IV.1 : Influence du type de granulat sur la RAG [Sibbick, 1992].

IV -2-La minéralogie des roches d'agrégats réactives

Dans la nature, la silice est une phase minérale qui entre dans la composition de nombreux minéraux, que l'on retrouve dans des roches dont Le Roux a synthétisé les roches à base minéralogique sensibles à l'alcali-réaction (Tab.1.IV.1) [Le Roux et al., 1999].

Tab.1.IV.1 : Principales roches réactives [Le Roux et al., 1999]

Roches		Minéraux sensibles en milieu alcalin
Magmatiques	Granite , Granidiorites.	Quart à réseau déformé présentant une extinction ondulante. Minéraux feldspathiques altérés, joints de grains ouverts.
	Rhyolites, Dacites, Andésites, Trachuandésites, Basaltes.	Présence de verres silicieux ou des verres basaltiques plus ou moins dévitrifiés, présence de tridymite, cristobalite, et opale.
	Osidiennes, Tufs volcaniques, Rétinites.	verres riches en silice plus ou moins dévitrifiés souvent microfissurés.
Métamorphiques	Gneiss, Mica- sgistes	Quartz à extinction ondulante. Micro quartz de seconde génération; joints de grains ouverts, minéraux feldspatiques et micacés altérés.
	Quartzites, Cornéennes.	Quartz associés à un ciment quartzeux et opalin. Présence de micro quartz de seconde génération. Présence de phyllosilicates. Présence de quartz à extinction ondulante ou de quartz microfissurés.
Sédimentaires	Grés, Quartzite.	Ciment silicieux mal cristallisé, joints de grains élargis.
	Grauwackers, Sililites, Shistes quartzeux.	Minéraux phylliteux associés, Présence d'opale, de quartz micro cristallins.
	Chailles, Silex.	Présence de calcédoine , et d'opale.
	Calcaires, Calcaires dolomotiques.	Présence de silice de type opale en micronodulesou il diffuse en réseau, associé ou non à des sulfures sédimentaires et des phylites.

IV-3-Nomenclature structurale de la silice

La silice a une système tridimensionnelle composé de tétraèdres SiO₄ liés entre eux par des pics, chaque atome d'oxygène est en commun avec deux tétraèdres ; la formule chimique générale est : SiO₂.

Ces tétraèdres correspondent à une succession de modèle de type « Q_n » où « n », compris entre 4 et 0, indiquant le nombre de liaisons siloxanes (-Si-O-Si-) existant par atome de silicium.

Par exemple, le type Q₄ correspond à un tétraèdre SiO₂ constitué de 4 liaisons siloxanes (Fig.1.IV.2).

De même, en fonction du pH, les oxygènes non pontants des tétraèdres peuvent être sous forme ionique Si-O⁻ (en milieu basique) ou sous forme hydroxylée Si-OH encore appelée silanol. Ainsi, le tétraèdre Q₃ est constitué de 3 liaisons siloxanes et d'un atome d'oxygène non pontant. Et ainsi de suite jusqu'au tétraèdre Q₀ correspondant à la silice dissoute sous forme de monomère avec 4 oxygènes non pontants.

En milieu basique, plusieurs monomères Q₀ sont à distinguer en solution : $H_2SiO_4^-$ ou $H_3SiO_4^-$ selon la valeur du pH. [Monnin.2006]

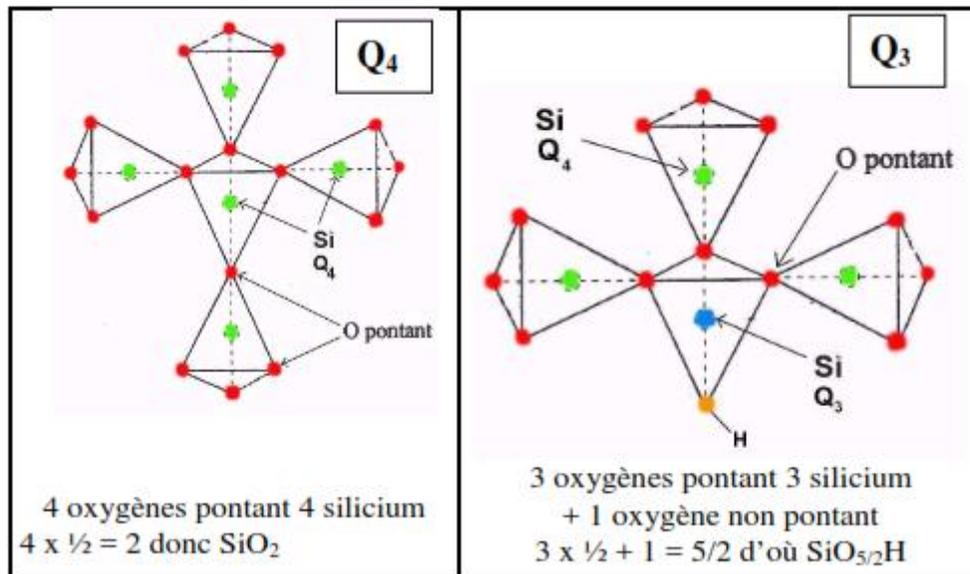


Fig.1.IV.2 : Définitions des Q₃ Q₄. [Monnin. 2006]

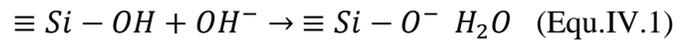
IV-4-Les mécanismes

IV-4-1-Le processus topochimique

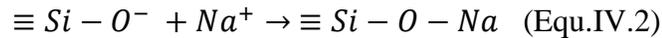
IV-4-1-1-Mécanisme de Dent-Glasser et Kataoka

Le mécanisme réactionnel proposé par [Dent-Glasser et al, 1981] pour expliquer l'altération des silices mal cristallisées est le suivant:

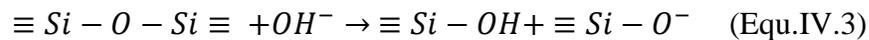
Ionisation des groupements silanols par les ions hydroxyles.



Neutralisation des sites ionisés par les alcalins (Na⁺ ou K⁺)



Coupage des ponts siloxanes par les ions hydroxyles.



Les groupements silanols formés par la coupure des ponts siloxanes sont ensuite ionisés par les ions hydroxydes et neutralisés par des contre-ions comme le montrent respectivement les deux équations précédentes. La figure (Fig.1.IV.3) illustre le mécanisme réactionnel.

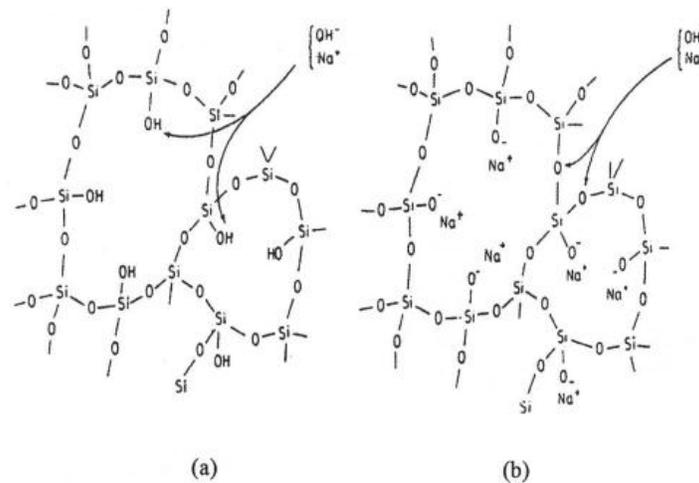


Fig.1.IV.3 : Schéma réactionnel présenté par [Dent-Glasser et al.1981]

- a) : ionisation des silanols et neutralisations par les alcalins.
- b) : coupure des ponts siloxanes par les ions hydroxydes.

Si la basicité est suffisante, la découpe des ponts siloxanes se poursuit entraînant une dissolution de la silice. D'après [Dent-Glasser et al.1981] les silanols de la silice résiduelle sont totalement ionisés. Pour [Fernandez.1992] la proportion de silanols ionisés est fonction du pH. Selon lui, le degré d'ionisation augmente avec le pH de la solution en équilibre avec le silicagel. A titre d'exemple, un silanole sur quatre est ionisé pour un pH de 10.9 et un silanol sur deux pour un pH de 11,15.

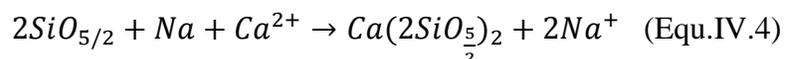
Ces premières étapes sont admises par une très large majorité des auteurs. Notamment [Prince et al.1993] ont montré que l'attaque de la silice se faisait bien par les ions hydroxydes. Toutefois, certains auteurs comme [Wilson et al.1994] attribuent la coupure des ponts siloxanes aux ions alcalins et non aux ions hydroxydes.

Le rôle des alcalins et des ions hydroxydes est bien défini dans ce type de mécanisme réactionnel. Cependant, il n'est pas fait état du rôle de la portlandite, or celle-ci joue un rôle puisqu'en son absence l'alcali-réaction n'est pas observée selon [Chatterji et al.1986].

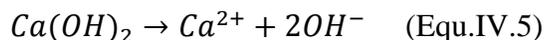
IV-4-1-2-Mécanisme de Pool

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 [Poole, 1992]. 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 hydroxydes pouvant ainsi remplacer les ions hydroxydes consommés par la réaction.

- 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 (Tab.1.IV.2). D'après [Poole et al, 1992], 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'autres auteurs, le calcium diffuse mieux que les alcalins et notamment lorsque le granulat possède une microporosité élevée ou une microfissuration.

Tab.1.IV.2: Rayon hydraulique, distance cation-oxygène et énergie électrostatique. [Wang et al. 1991].

Cations	Rayon Hydraulique en Å	Distance cation-oxygène en Å	Energie Electrostatique (Z_1Z_2/d)
Na ⁺	3.3	4.65	0.21
K ⁺	3.1	4.45	0.22
Ca ²⁺	4.2	5.55	0.36

IV-4-1-3-Mécanisme de WANG et GILLOT

Le modèle de [Wang et al. 1991] est basé sur le même principe que les précédents modèles. Il accorde un rôle important aux ions calcium et le mécanisme réactionnel peut être décomposé selon quatre étapes comme expliquer dans la figure (Fig.1.IV.4) :

-Étape 1 : Échange cationiques des protons des groupes silanols par des cations K⁺, Na⁺ et Ca²⁺. Cette étape forme des complexes alcalis-silices ou chaux-alcali-silices.

Dans cette phase initiale, les composés sont principalement localisés à la surface du granulat et ne sont pas responsable de l'expansion.

-Étape 2 : Rupture interne des ponts siloxanes Si-O-Si par attaques des ions hydroxyles. La dissolution de la chaux libérée des ions hydroxyles assurant une concentration suffisamment élevée pour permettre la formation de nouveaux groupes silanols.

-Étape 3 : Echanges des protons des groupes silanols internes par des alcalins. Les produits formés sont des complexes alcalis-silices, capable d'absorber de l'eau, désignés comme étant gonflants. Le fait que les ions alcalins diffusent vers les sites de réactions avant les ions calcium est attribué aux deux facteurs suivants :

- 1- la solubilité de NaOH et de KOH est beaucoup plus importante que celle de Ca(OH)₂. Une forte concentration en alcalins empêche la solubilisation de la chaux. Les alcalins sont donc plus disponibles que la chaux pour la réaction ;
- 2- Le rayon hydraulique est un facteur qui affecte la diffusion des cations vers les sites réactionnels. Le rayon hydraulique de Na⁺ et K⁺ étant plus petit que celui de Ca²⁺, ceux-ci diffusent plus facilement dans le granulat.

-Étape 4 : Échanges cationiques entre les alcalins et les ions calcium. Une fois que l'expansion a eu lieu au sein du complexe alcali-silice, l'espace créé accroît la possibilité pour les ions calcium de diffuser vers les sites du complexe alcali-silice.

Or, la dissociation des groupes de Si-O-Na est plus forte que celle des groupes Si-O-Ca [Greenberg.1956] car les liaisons des groupes Ca-O ont une énergie électrostatique plus importante que les liaisons des groupes Na-O et K-O (Tab.1.IV.2). Les complexes chaux-alcalis-silices ainsi formés sont jugés non gonflant. Partiellement remplacés par les ions calcium, les alcalins sont à nouveau disponibles pour poursuivre la réaction.

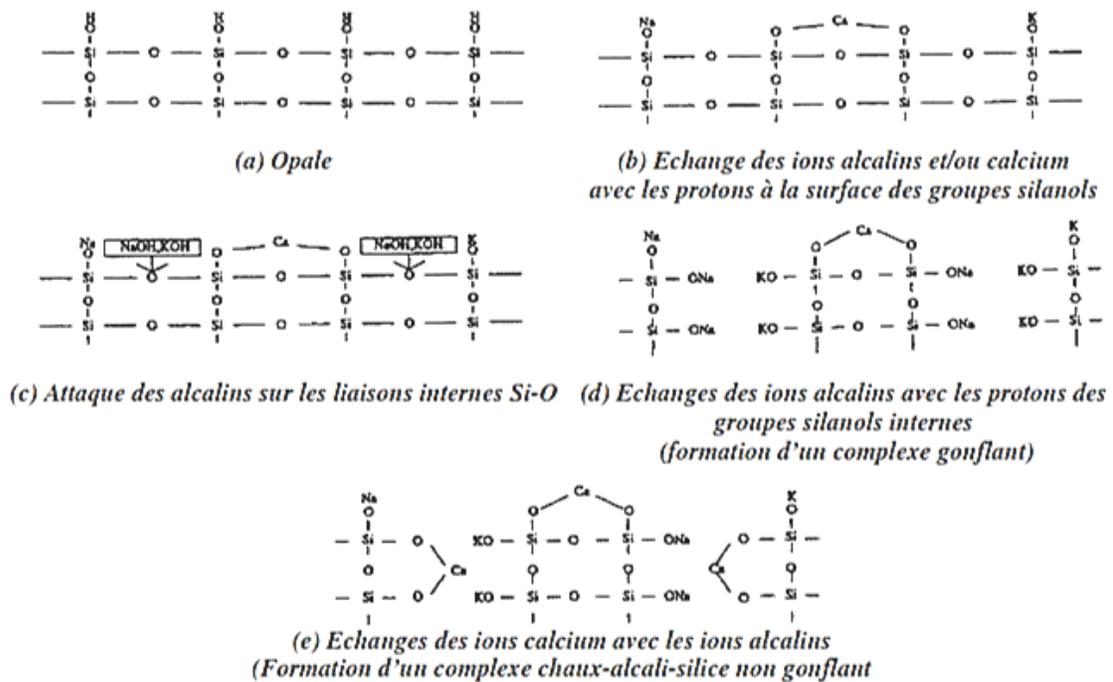


Fig.1.IV.4: Mécanisme de Wang et Gillot. [Wang et al. 1991]

IV-4-2-Le processus de dissolution-précipitation

Le Processus de dissolution-précipitation est basé sur l'idée que les réactions chimiques se produisent dans la solution interstitielle après à l'état ionique des différentes espèces nécessaire.

Le modèle de [Dron.1990] débute par la mise en solution de la silice selon le processus topochemiques. Cette dissolution se fait par rupture des ponts siloxanes suite à l'attaque des ions hydroxyles. Avec la dissolution de la chaux, les espèces en solution :

Les ions silicates et calcium dans un milieu riche en hydroxyles de sodium ou de potassium vont précipiter. [Dron.1990] établit le digramme des potentiels chimique du systèmes CaO-KOH-SiO₂-H₂O (Fig.1.IV.5).

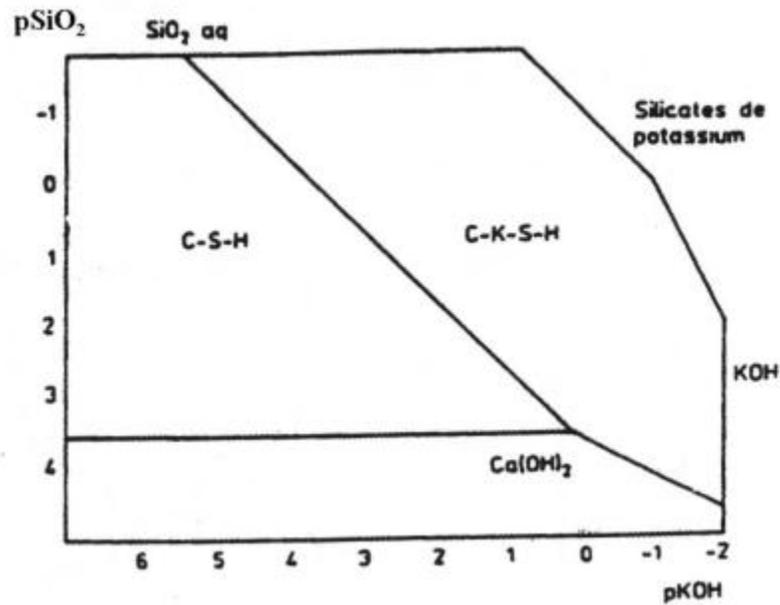


Fig.1.IV.5 : Diagramme des potentiels chimiques du système CaO-KOH-SiO₂-H₂O d'après [Dron.1990].

C'est une approche thermodynamique chimique qui permet de préciser les conditions de formation des gels. La nature des produits de la réaction dépend des concentrations en silice, calcium et alcalins de la solution [Way et al.1993] et [Dron et al 1996]. En fonction de ces concentrations les produits formés sont du type C-S-H ou C-K-S-H.

IV-4-3-Processus mixte

IV-4-3-1-Modèle de CHATTERJI et al

Le mécanisme de [Chatterji et al.1986] suit le modèle de [Dent-Glasser et al.1981] et donne comme [Poole et al, 1992] une grande importance au rôle des ions calcium.

La réaction débute par l'attaque de la silice par les ions hydroxyles accompagnés par les cations K⁺, Na⁺ et Ca²⁺. Toutefois les ions sodium et potassium plus petits diffusent plus facilement que les ions calcium dans le granulat.

La réaction entraîne une dissolution partielle de la silice qui tend à migrer vers l'extérieur. La concentration en ions calcium dans l'environnement du granulat conditionne le taux de diffusion de la silice hors des grains.

En effet, la diffusion de la silice est ralentie par la précipitation de cette silice avec les ions calcium pour former des gels de type C-S-H ou C-N-S-H/C-K-S-H.

Plus la concentration en ions calcium est élevée, plus faible sera le taux de diffusion de la silice hors du granulats et plus élevé sera le taux de diffusion des cations à l'intérieur du granulats [Chatterji et al.2000].

IV-4-3-2-Modèle de BULTEEL et al

Le modèle proposé par [Bulteel et al.2002] repose sur une attaque hydroxylique de la silice. Ce modèle décompose la réaction en deux étapes :

- 1) Formation de silanols due à la coupure des ponts siloxanes par attaque des ions hydroxyles.
- 2) Dissolution de la silice due à la poursuite de la découpe des ponts siloxanes par attaque des ions hydroxyles.

Avec l'avancement de la réaction, la formation de silanols devient prépondérante sur la réaction de dissolution.

IV-4-4-Les modèles de gonflement

Plusieurs mécanismes d'expansion sont proposés afin d'expliquer l'origine du gonflement. Nombre d'entre eux mettent en jeu des gels ; cependant, la distinction entre un gel issu d'un processus de dissolution/précipitation et un gel issu d'un processus topochimiques n'est pas explicitement précisée.

Par contre ces gels sont des produits de la réaction alcali-silice que l'on retrouve dans les structures en béton dégradées que ce soit autour des granulats, dans les fissures et les pores de la pâte de ciment, voire même dans les veines et les plans de clivage des granulats [Regourd et Hornain.1986] ; [Moranville-Regourd.1989].

La caractérisation de ces gels a fait l'objet de nombreuses études démontrant qu'ils étaient plus ou moins riches en chaux et/ou alcalins en fonction du milieu réactionnel et des conditions de formation [Regourd et al.1981] ; [Louarn et Larive.1993].

Intéressons-nous maintenant plus en détails aux différents modèles de gonflement extraits de la littérature dont la diversité est en grande partie issue des conditions opératoires et des matériaux utilisés [Taguishi et al.1992] ; [Breton et al., 1994].

IV-4-5-Hypothèses sur l'origine du gonflement

S'il existe un consensus sur les mécanismes réactionnels locaux, il n'en existe pas en revanche en ce qui concerne l'origine du gonflement engendré par la réaction. Nous faisons ici un rappel de quelques modèles d'expansion rencontrés dans la littérature.

IV-4-5-1-Gonflement engendré par 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 [Prezzi et al.1997] ; [Chatterji et al.2000].

IV-4-5-2-Gonflement résultant de la pression osmotique

La théorie de la pression osmotique ou pression d'imbibition est initialement proposée par Dent-Glasser, puis par d'autres auteurs dont Diamond [Dent-Glasser, 1979, 1980, 1981 ;Diamond, 1989 ; Poole, 1992].

Cette théorie est liée au mécanisme topochimiques. L'attaque des groupements silanols et des ponts siloxanes par les ions hydroxyles produit une altération du granulat et la formation de gels accompagnées par l'apparition de charges négatives.

Afin de respecter l'électro neutralité, des ions alcalins solvatés diffusent dans les gels. L'eau contenue dans les gels ayant un potentiel chimique plus faible que l'eau de la solution environnante, une pression d'imbibition produit une migration de l'eau vers les gels.

Cette absorption d'eau par les gels serait à l'origine du gonflement dans le cas où les

contraintes générées seraient localisées dans un milieu confiné comme le granulat et la pâte de ciment.

IV-4-5-2-Gonflement par pression de cristallisation

Dron s'est basé sur une approche thermodynamique. Selon lui, la pression de cristallisation générée par la formation des produits de la réaction (C-S-H/C-N-S-H/C-K-S-H) issus du processus de dissolution-précipitation est à l'origine du gonflement. La pression induite par la précipitation des C-S-H/C-N-S-H/C-K-S-H est donnée par la formule de Riecke :

$$P = \frac{-\Delta G}{V_{mol}} \quad (\text{Equ.IV.6})$$

Où ΔG est la variation d'enthalpie libre de la réaction de précipitation et V_{mol} le volume molaire du précipité [Dron et al., 1990 ; 1993 ; 1998].

IV-4-5-3-Gonflement granulaire

Le modèle de gonflement granulaire fait l'objet de trois approches à savoir :

- un mécanisme basé sur le bilan matière au sein du granulat [Chatterji et al.1984,1986, 1987, 1988];

(a) un processus de gonflement structural [Garcia-Diaz et al.2006];

(b) la formation de gels hydratés expansifs conditionnée par l'existence d'une barrière semi-perméable [Ichikawa et al.2007 ; Ichikawa.2009].

a) Gonflement et bilan matière au sein du granulat

Ce mécanisme d'expansion est initialement l'œuvre de Chatterji [Chatterji et al.1984,1986, 1987, 1988]. Il est fondé sur la coexistence de deux flux de matière opposés :

- (i) -un flux « entrant » dans le grain réactif constitué d'ions alcalins, d'ions hydroxyles et de molécules d'eau. Ces ions neutralisent les silanols internes des granulats et contribuent à la formation des ions siliceux par découpe des liaisons

siloxanes ;

- (ii) -un flux « sortant » du grain réactif constitué d'ions siliceux provenant de la dissolution interne de la silice des granulats.

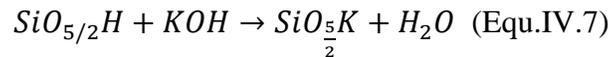
Si le flux « entrant » d'ions est supérieur au flux « sortant », il y a accumulation d'espèces au sein du granulat réactif conduisant à son expansion [Chatterji et al. 2000].

Les ions siliceux précipitent pour former en périphérie du grain une barrière de diffusion constituée de C-S-H et/ou C-N-S-H et/ou C-K-S-H. Lorsque l'épaisseur de la barrière de diffusion sera suffisante, la diffusion des ions siliceux vers l'extérieur sera ralentie.

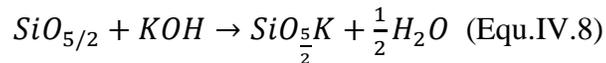
b) Gonflement structural

Ce modèle est décrit par Garcia-Diaz [Garcia-Diaz et al.2006]. D'après l'auteur le processus réactionnel est constitué des étapes suivantes :

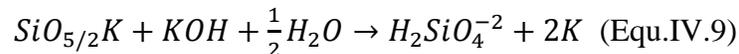
- Etape 1 : neutralisation des silanols par les alcalins :



- Etape 2 : rupture des ponts siloxanes par les ions hydroxyles



- Etape 3 : dissolution de la silice due à la poursuite de l'attaque des Q3 par les ions hydroxyles et formation des ions siliceux dans la solution des pores du béton :



Il a été montré que l'étape 2 du processus forme des produits silico-alcalins constitué d'abondants tétraèdres Q3 à l'origine de l'augmentation du volume granulaire dans un milieu modèle et au sein d'une matrice de type mortier [Garcia-Diaz et al.2006].

c) Formation de gels hydratés expansifs conditionnée par l'existence d'une barrière semi-perméable

Le mécanisme de gonflement décrit par Ichikawa est illustré par la figure (Fig.1.IV.6) [Ichikawa, 2009]. D'après l'auteur la réaction [Equ.IV.9] conduit à la précipitation de deux types de phases C-S-H et/ou C-N-S-H à la surface du grain de silice :

- des silicates alcalins hydratés « matures » directement en contact avec la pâte de ciment ;
- des silicates alcalins hydratés « immatures » entre les C-N-S-H « matures » et le grain de silice formant ainsi une barrière fine et rigide.

Le gonflement va dépendre de la formation d'une barrière semi-perméable constituée de silicates alcalins hydratés « immatures ». Celle-ci tolérerait la diffusion des alcalins et des ions hydroxydes dans le grain réactif afin de poursuivre l'étape 2 du mécanisme réactionnel illustrée par l'équation [Equ.IV.8], mais limiterait leur extrusion du grain attaqué.

Par la suite, l'accumulation de gels hydratés expansifs issus de la réaction 2 permettrait de générer une augmentation de la pression dans le granulat. La pression générée serait à l'origine du gonflement et de la fissuration [Ichikawa et al.2007 ; Ichikawa.2009].

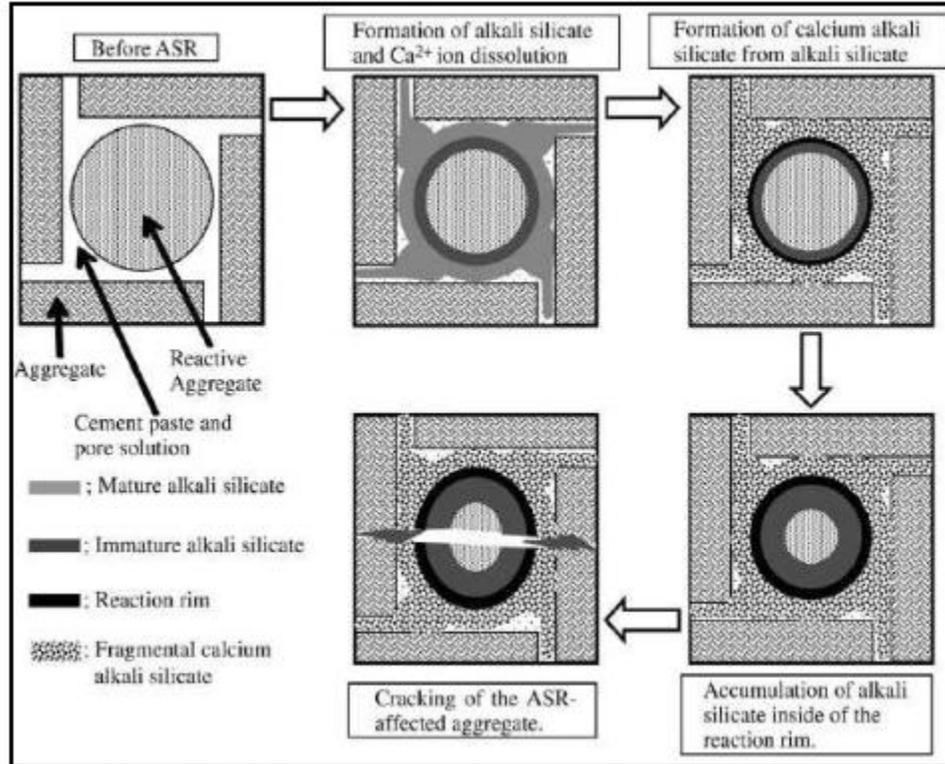
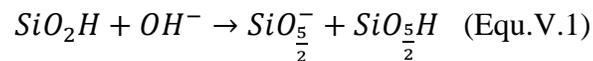


Fig.1.IV.6 : Modèle de gonflement dû à la R.A.S. [Ichikawa et al. 2009]

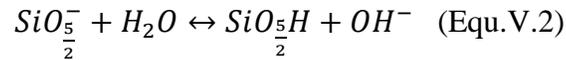
V-Synthèse sur le mécanisme de la réaction alcali-silice

Comme nous venons de le voir la réaction alcali-silice est un processus complexe. Les mécanismes de gonflement et de fissuration qu'elle entraîne font encore l'objet de controverse alors que le mécanisme réactionnel est bien adopté par l'ensemble des chercheurs. [Mounin.2005] le résumer de la façon suivante :

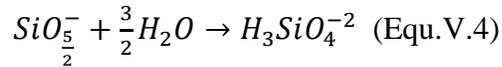
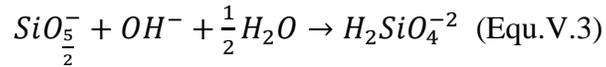
Etape 1 : Formation des tétraèdres Q3 par l'attaque des ions hydroxyles sur les tétraèdres Q4:



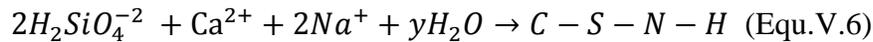
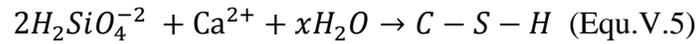
La rupture d'une liaison siloxane induit la formation de deux tétraèdres Q3. En fonction du pH, les sites Q3 sont soit sous forme ionisée soit sous forme protonée:



Etape 2 : Dissolution des tétraèdres Q3 sous la forme de tétraèdres Q0 suite à la poursuite de la découpe des liaisons siloxanes par les ions hydroxydes :



- Etape 3 : La silice dissoute peut diffuser dans la solution interstitielle et former avec les alcalins et la chaux des silicates de calcium hydratés et/ou des silicates calco-sodiques hydratés :



V-1-Les produits de la réaction

La réaction alcali-silice forme des produits couramment appelés gels d'alcali-réaction. Ces gels, nous les retrouvons dans toutes les structures en béton dégradées autour des granulats, dans les fissures et pores de la pâte de ciment, dans les veines ou plans de clivage des granulats, à la surface du béton sous forme d'exsudats [Regoud et al 1986].

Ils peuvent être liés ou dissociés du granulat et présenter des compositions chimiques très variables. En fonction du milieu réactionnel et des conditions de formation, ces gels sont plus ou moins riches en portlandite et/ou en alcalins.

D'ailleurs, [Taylor.1997] et d'autres différencient les produits de la dissolution internes au granulat (gels internes silico-alcalins) plutôt fluide, des produits de la dissolution externe au granulat plus visqueux (gels silico-calco-alcalins).

Pour [Lombardi et al.1996], les gels précipités présentent un continuum de leur rapport CaO/SiO_2 qui croit de l'intérieur du granulat vers la pâte de ciment.

Pour [Helmut.1992], le produit précipité est un mélange de deux phases de composition bien définie :

Un silicate alcalin hydraté et un silicate calco-alcalin hydraté. Pour certains auteurs [Diamond.1981 ; Uhan. 1987 ; Wiecker et al.1998, 2000], ce sont plutôt les gels silico-alcalins qui par absorption d'eau induisent le gonflement.

Pour d'autres auteurs [Lombardi et al.1996 ; Perruchot et al.2000], ce sont les gels silico-calco-alcalins qui en fonction de leur rapport C/S sont responsables du gonflement.

VI-Notre Vision sur les mécanismes réactionnels

Il ressort de cette étude bibliographique que, même si des avancées importantes ont été faites dans la compréhension des phénomènes, le sujet reste très controversé.

Par exemple, pour Wieker, Hubert et Ebert [Wieker et al. 1996], le produit responsable du gonflement est un silicate alcalin ;

pour Lombardi, Massard, Perruchot, c'est un gel silico-calcique ;

pour la majorité des auteurs, c'est un produit silico-calco-alcalin.

Dans d'autres cas, il est plus difficile d'avoir une opinion définitive juste par une vue de la littérature.

De l'ensemble des observations et des mécanismes mentionnés, on retient qu'il peut y avoir deux sources principales de gonflement, qui entraînent des gonflements plus ou moins rapides, comme expliqué dès 1992 par Grattan-Bellew [Grattan-Bellew.1992] et par exemple par Ponce [Ponce et al. 2006].

Dans son article, Ponce étudie un certain nombre de granulats dans lesquelles la silice se trouve sous des formes différentes, et dont la stabilité varie. Il distingue un premier groupe d'espèces très amorphes, comme le verre et l'opale, qui réagissent donc vite, de telle sorte que les effets de la réaction peuvent être visibles au bout d'un an si les conditions s'y prêtent.

Le second groupe regroupe des roches plus cristallines, comme les quartz. L'attaque de ce type de roches est beaucoup plus lente, on n'en voit pas les effets avant une dizaine d'années. Les conclusions de son étude sont que les granulats rapides subissent une dissolution graduelle depuis la surface, qui fragilise l'interface avec la pâte de ciment en augmentant sa porosité.

Une microfissuration est visible dans les grains et s'étend progressivement à l'interface ou à la pâte de ciment. Les granulats lents eux, subissent une dissolution plus localisée. Le gel a tendance à rester coincé dans les poches réactives des granulats, entraînant la fissuration des grains, qui semble prendre une importance plus grande.

Giaccio a également étudié des granulats des deux types [Giaccio et al. 2008]. Ses granulats rapides, orthoquartzite siliceux réactif et sable contenant du verre volcanique, semblent être principalement attaqués à la surface. Il observe des décohésions à l'interface et des fissures dans la pâte de ciment. Pour ce qui est de ses granulats à réactivité lente, granite contenant du quartz, l'endommagement est plus difficile à observer et l'endommagement semble plutôt confiné aux granulats.

Jensen propose d'ailleurs une nouvelle classification de l'ensemble des RAG en fonction de la vitesse d'endommagement en trois catégories : une réaction très rapide, une réaction rapide, et une réaction lente [Jensen.2012]. La première catégorie, RAG très rapide, correspond à un endommagement en quelques jours en laboratoire, et englobe des roches contenant des inclusions microscopiques d'opale, quartz, calcédoine ou encore verre de silice volcanique.

Le second groupe, RAG rapide, regroupe des minéraux comme l'opale, calcédoine, dans divers types de roches. Le mécanisme de gonflement principal est alors l'absorption d'eau par des gels.

Les troisième groupe, RAG lente (endommagement observé à partir d'au moins 10 ans), qui contient des minéraux tels que des quartz micro-cristallins, quartz recristallisés dans diverses roches. Le mécanisme de gonflement n'est pas le même, il semble que le gonflement provienne de l'intérieur des granulats où se produisent des cristallisations.

Nous disposons d'une procédure pour nous forger une opinion, ou sa consiste par de nombreuses observations microscopiques qui ont été réalisées, sur les échantillons de notre étude ; de mesure des variations macroscopiques d'éprouvettes de béton soumises à

différentes conditions de conservation.

Nous allons anticiper légèrement sur l'exposé de notre programme expérimental en faisant référence à quelques résultats au niveau microscopique liés directement aux mécanismes réactionnels.

VII-Facteurs Affectant la RAG

Les mécanismes qui gouvernent la RAG et l'expansion sont assez complexes. Il est largement admis que trois conditions essentielles nécessaires pour l'occurrence de la RAG dans les structures en béton (Fig.1.VII.1). En distingue trois facteurs principaux :

- (i) La disponibilité suffisante d'alcalis (Na^+ et / ou K^+),
- (ii) la silice ou de silicate réactive dans l'agrégat,
- et (iii) une humidité suffisante (au moins 80% HR).

La combinaison optimale de conditions (i) et (ii) est essentiel d'initier la RAG alors que la troisième est essentiel de déclencher l'expansion.

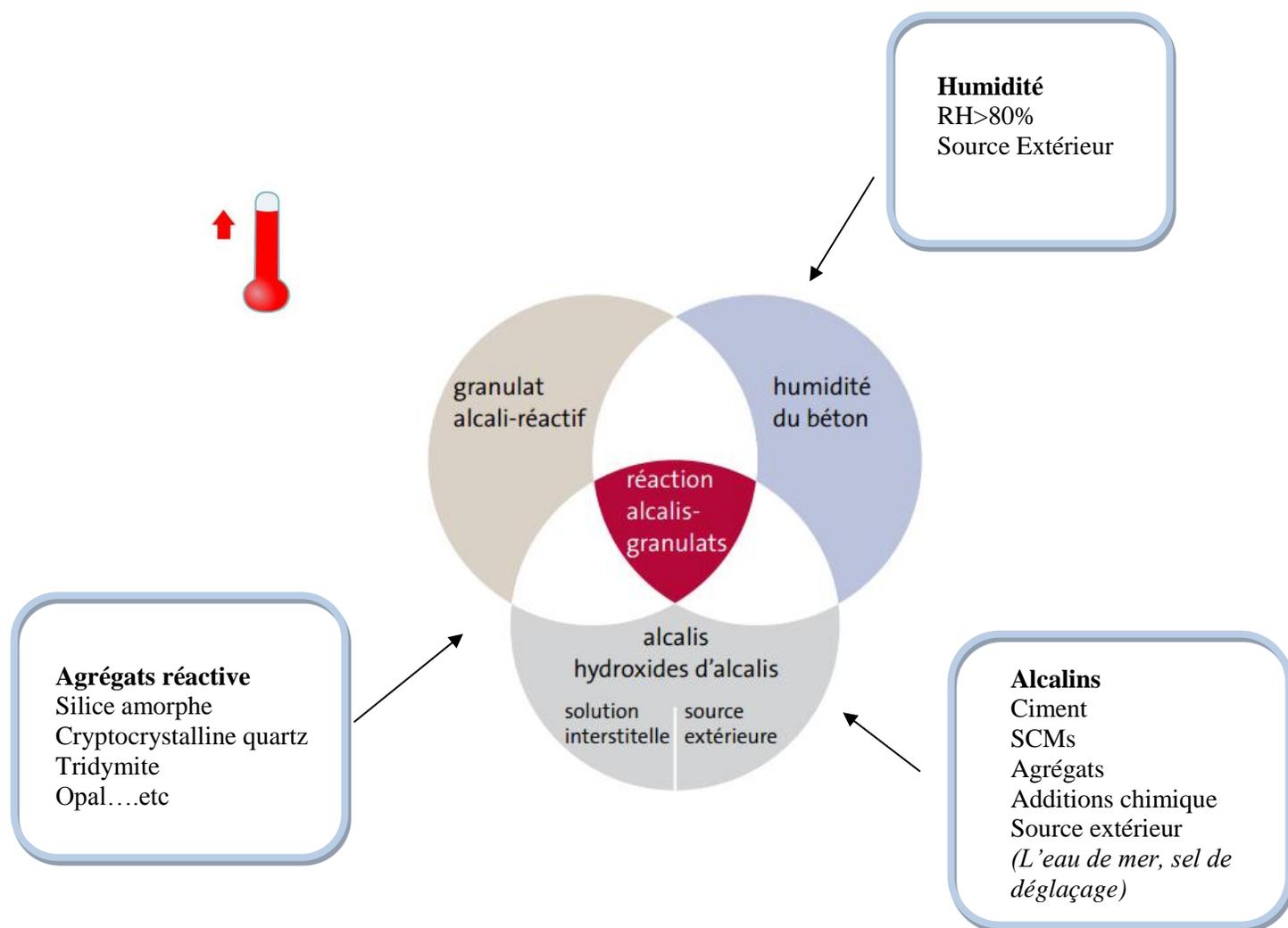


Fig.1.VII.1 : Trois éléments essentiels pour les dommages induits par la RAG en béton.

VII -1-Les alcalins

En chimie, une substance alcaline est un sel ionique basique d'un métal alcalino-terreux ou un métal alcalin élément. Le tableau périodique montre la position des alcalins, à savoir, troisième - quatrième éléments du groupe I et II (Fig.1.VII.2). Les alcalins sont connus pour être des bases quand ils sont dissous dans l'eau et leurs valeurs de pH sont au-dessus de 7. Les composons alcalins se dissolvent facilement dans l'eau et produisent des hydroxydes d'alcalins.

Le béton est constitué d'innombrables pores remplis de solution alcaline (Na^+ , K^+ et Ca^{2+}) et des ions hydroxyle (OH^-).

L'alcalinité (concentration en ion hydroxyle) de la solution de pore est principalement influencée par les sodiums et de potassium des métaux alcalins dans le ciment. D'autres sources, telles que les matériaux cimentaires supplémentaires (SCMs), agrégats, adjuvants, et l'eau de mer peuvent également contribuer d'alcalins supplémentaires.

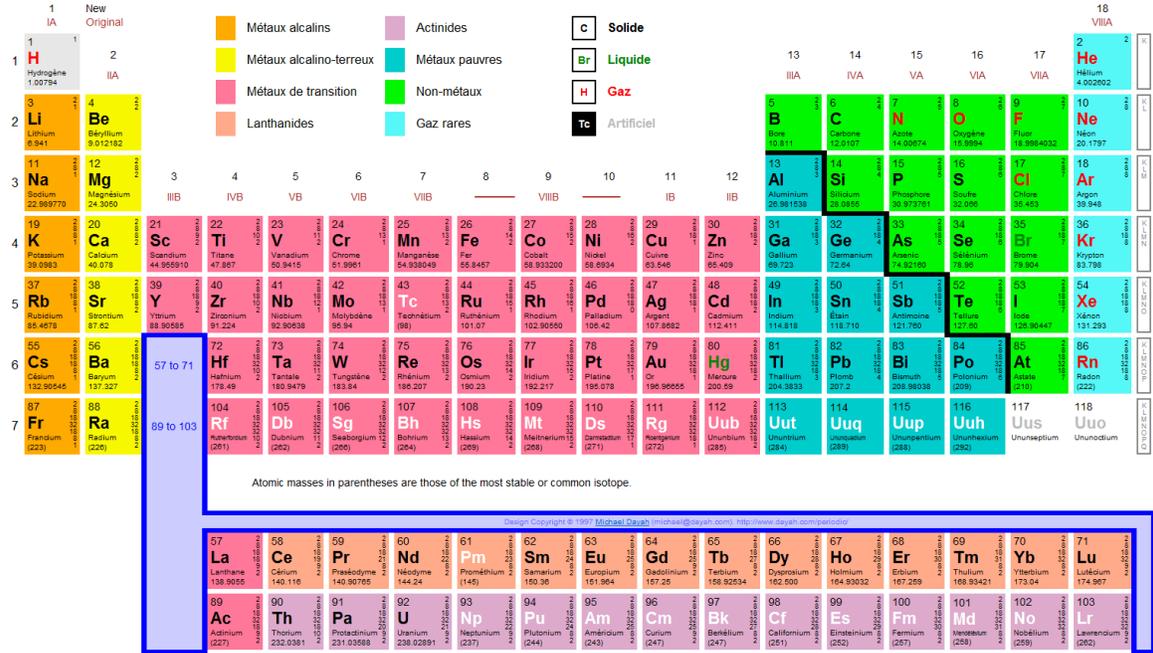


Fig.1.VII.2 : Le tableau périodique montrant la position des alcalins (le site web du ptable)

Pour la RAG, la teneur en alcalin de béton doit être déterminée de la somme des alcalins contribué à partir des sources ci-dessus:

$$[Alcalin]_{\text{béton}} = \sum ([a]_{\text{ciment}} + [a]_{\text{SCMs}} + [a]_{\text{agrégats}} + [a]_{\text{source exterieur}})$$

$$[Alcalin]_{\text{béton}} = \text{Teneur en Alcalins du béton (Kg/m}^3\text{)}$$

$$[a]_{\text{ciment}} = [\%Na_2O_{\text{equ}} \times \text{Ciment}]/100$$

$$[a]_{\text{SCMs}} = [\%Na_2O_{\text{equ}} \times \text{SCMs}]/100$$

$$[a]_{agrégats} = [a]_{sable} + [a]_{gravier}$$

$$[a]_{source\ exterieur} = [a]_{eau\ de\ mer} + [a]_{sel\ de\ déglacage} + [a]_{sulfure\ souterraines}$$

$[a]$ = montant d'alcalins

La présente d'alcalins dans le ciment portland est représenté par l'équivalent teneur en oxyde de sodium ou cette valeur est calculée par une sommation de l'oxyde de sodium (Na₂O) et d'oxyde de potassium (K₂O) :

$$Na_2O_{equ} = Na_2O + 0.658 K_2O \quad (\text{Equ.VII.1})$$

où, Na₂O_e est l'équivalent total de l'oxyde de sodium en pour cent;

Na₂O est la teneur en oxyde de sodium en pour cent ;

K₂O est la teneur en oxyde de potassium en pour cent ;

et 0,658 = le rapport en poids de Na₂O de K₂O.

Selon la norme ASTM C 150, un ciment ayant une Na₂O_e inférieure à 0,6% est généralement considérée comme un ciment à faible alcalin. Cependant, il est indiqué que même cette valeur peut être élevée lorsqu'il est utilisé avec un agrégat juger réactif.

Bien qu'une combinaison de ciment à faible alcalin ($\leq 0,6\%$) et un agrégat potentiellement réactif est considéré d'être en abris de la RAG (i.e., pas d'expansion), il convient de noter que cette approche en utilisant ciment à faible alcalin ne contrôle pas le contenu alcalin du mélange de béton pour empêcher la RAG, car cette valeur suppose que la contribution de l'alcali provenant d'autres sources est faible.

La contribution à la teneur en alcalis active totale du béton de l'agrégat dans le mélange ou même de sources externes (par exemple, sels de déglacage) a donné lieu à l'apparition de la RAG avec un ciment à faible teneur en alcalin tel que rapporté par plusieurs auteurs [Nixon et al.1992] et [Folliard et al.2002].

En général, les ajouts cimentaires comme les cendres volantes, le litier (GGBS), et fumée de silice sont utilisés pour réduire l'expansion provoquée par la RAG. Les mécanismes ne sont pas bien compris, mais il est convenu que la silice réactive dans SCMs se combine avec les alcalins du ciment (NaOH et KOH) plus facilement que la silice dans l'ensemble.

Par conséquent, les alcalins sont rapidement consommés et le niveau d'ions hydroxyles est réduit à un seuil auquel les agrégats réagissent très lentement ou pas du tout [Carrasquillo et al.1988] ; [Diamond et al.1992].

En outre, cette réaction conduit à la formation d'hydrates-alcali-calcium-silicate, qui est non expansive, à la différence des gels expansives en présence d'eau générés par la RAG. Cependant, tous les SCMs augmentent la résistance du béton à la RAG.

Certains ajouts cimentaires peuvent être une source d'alcalis. [Diamond et al.1981] ensuite [Shehata et al.1999 ;2000] et [Shon et al.2003 ;2004] ont rapporté que les cendres volantes de classe F est plus efficace dans le contrôle de la RAG que les cendres de classe C.

Certains agrégats eux-mêmes peuvent être une source potentielle d'alcalis. Par exemple, les agrégats de mer seraient une source évidente de chlorure de sodium. [Poulsen et al.2000] ont signalé des agrégats potentiellement réactifs avec la libération des bases de feldspath.

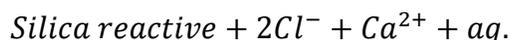
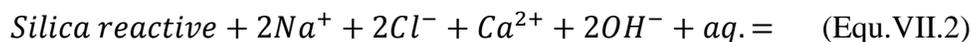
[Stark et al.1983] et [Thomas et al.1992] ont rapporté que certains agrégats peuvent libérer des bases équivalentes à 10% de la teneur en ciment dans des conditions extrêmes, ce qui augmente la teneur en alcalins du béton.

Typiquement, les alcalins sont libérés lorsque la lattice des agrégats commence à se dégrader au cours de la RAG. Ces nouveaux alcalins offrent plus tard une source supplémentaire.

[Nixon et al.1987] et [Hobbs.1988] décrivent une variété d'alcalis comme sources externes qui comprennent des sels de déglacage, l'eau de mer, et les bases industrielles, ou l'ajout de chlorure de sodium à la pâte de ciment transforme rapidement en hydroxyde d'alcalins, ce qui augmente la concentration en ions hydroxyles. Par conséquent, enflamme d'avantage la

menace de la RAG.

[Oberholster.1992] a signalé que des études utilisant la pulvérisation de l'eau de mer sur des blocs de béton indique deux fois plus d'expansion en comparaison avec un jet d'eau du robinet. [Chatterji .1989a ;1989b] a déclaré que la présence de chlorure de sodium (NaCl) contribue au processus suivant :



Ou *aq* est une solution aqueuse.

Les ions Na⁺ plus petits et des ions OH⁻ de sels pénètrent l'agrégat réactif et répartition des des liaisons Si-O-Si. Cette réaction ouvre les grains réactifs pour de nouvelles attaques par d'autres ions Na⁺ et ions OH⁻.

VII -2-Humidité

L'humidité est un ingrédient essentiel pour la RAG, ou elle joue principalement deux rôles dans la réaction. Ces rôles sont les suivants :

- un moyen de transport pour les espèces ioniques impliqués dans la RAG.
- une source pour le gonflement du gel de silice produit par la RAG.

L'humidité minimum est généralement présente dans le béton en raison de l'eau résiduelle suffisante après l'hydratation complète. Cette humidité interne joue un rôle dans tous les processus de dissolution, la réaction et la formation de gel et précipités amorphes ; car il met en contact tous les réactifs impliqués dans le mécanisme de la RAG.

Avec une humidité interne modérée, la diffusion des réactifs et des produits de réaction serait limité au réseau inter-connecté de réseau interstitielle autour des particules d'agrégats réactifs, par conséquent, la réaction est limitée principalement à l'interface agrégats-pâte de ciment [Dent-Glasser et al.1981].

Si l'humidité interne augmente, cependant, la silice dissoute peut diffuser loin des granulats réactifs et la réaction ultérieure du gel amorphe ou précipités peut alors avoir lieu n'importe où dans le béton [Steffens et al.2003].

Par conséquent, un rapport Eau/Ciment (E/C) élevé dans le béton pourrait conduire à une expansion élevée et cela due à :

- (i) un rapport porosité / perméabilité, plus élevé,
- (ii) une plus grande mobilité ionique qui engendre plus de réaction,
- et (iii) une grande disponibilité d'eau libre donnant a une connexion capillaire vaste pour obtenir le gel plus expansive.

Si l'humidité est suffisante, le gel produit sera imbibé d'eau qui provoquera une expansion au sein du béton, conduisant finalement à des contraintes de traction et des fissurations.

Il est généralement admis qu'un minimum d'humidité relative (HR) de 80% est nécessaire pour provoquer la RAG, bien qu'il existe diverses opinions sur la valeur minimum d'humidité pour l'occuration de la RAG. [Vivian.1981], [Olafsson.1986], [Kurihara et al.1989], et [Larive et al.2000] ont observé que l'expansion est directement corrélée avec les variations de la masse d'eau à partir des résultats d'essai des échantillons de mortier affectées par la RAG. Plus le gain de masse d'eau, le plus d'expansion évolue.

[Tomosawa et al.1989] et [Pedneault.1996] ont rapporté que le béton conservé dans un environnement avec moins de 80% d'humidité relative n'a pas subi une expansion significative (Fig.1.VII.3). [Folliard et al.2002] est allé même à dire qu'un béton contenant un agrégat réactif et une teneur en alcalins élevée peut être protégé contre l'expansion de la RAG en limitant l'accès de l'eau dans la réaction.

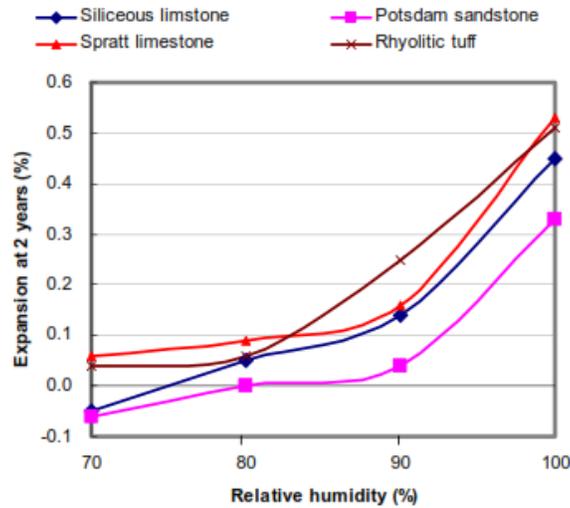


Fig.1.VII.3 : Effet de l'humidité relative sur l'expansion de la RAG. [Chang.2008]

VII -3-La silice réactive

Bon nombre d'agrégats utilisés dans les mélanges de béton sont constitués de composants siliceux, à savoir les différentes formes de minéraux de silice. Par exemple, du quartz et de calcédoine sont des formes cristallines de la silice mais l'opale est une forme amorphe du minéral de silice. Toutefois, pas toutes les formes de silice peuvent être réactive à la RAG.

Par exemple, le quartz bien cristallisé n'est pas considéré comme sensiblement réactive à la RAG alors que l'opale est très réactif. La structure de base de silicates comprend un cadre de tétraèdres de silicium d'oxygène. Chaque atome d'oxygène est partagé entre deux atomes de silicium.

Le tétraèdre peut être présent dans des forme seul ou peut être en former : doubles, bagues, chaînes, bandes, feuilles ou cadres (Fig.1.VII.4).

Un arrangement régulier (ordonnée) de base Si-O crée un tétraèdre a une structure cristalline (par exemple, le quartz) alors qu'un arrangement irrégulière (désordre) crée un tétraèdre mal cristallisé (par exemple, la calcédoine représenté sur la Fig.1.VII.5) et même des structure amorphe (par exemple, l'opale) en fonction du degré d'irrégularité.

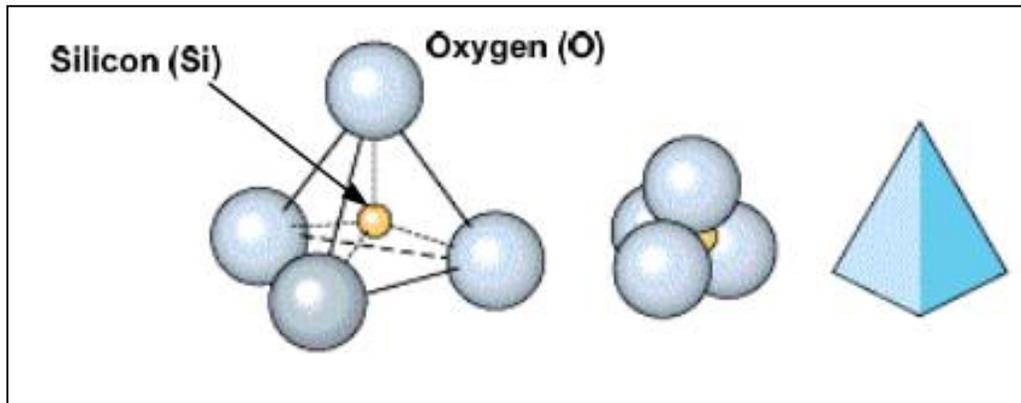


Fig.1.VII.4 : Une structure tétraédrique de silice. [Chang.2008]

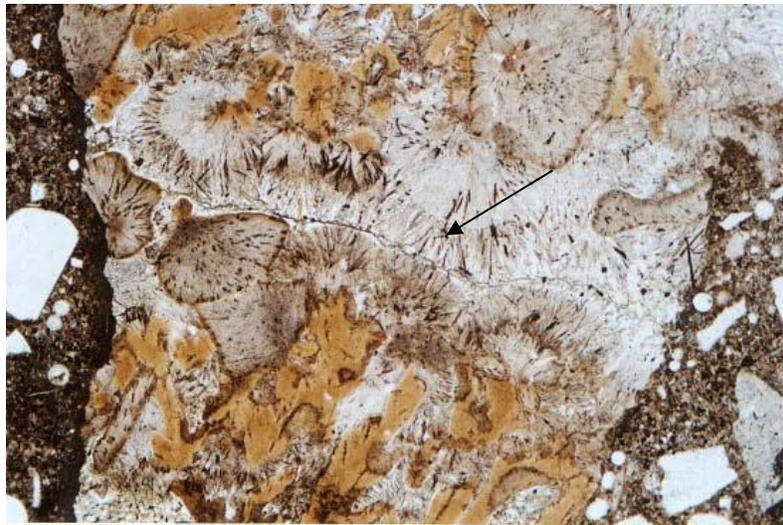


Fig.1.VII.5 : Microphotographie d'un grain (cryptocristalline) calcédoine agrégat très fin dans le béton. Notez les cristaux aciculaires caractéristiques de calcédoine indiqués par la flèche. [Chang.2008]

Les agrégats siliceux réactifs sont nécessaires dans le béton pour que la RAG se produise. Le terme agrégat réactif est défini comme un agrégat de tendance à se rupturer en cas d'exposition à la solution alcaline dans le pore du béton qui réagit avec l'hydroxyde d'alcalin (sodium et potassium) pour former un gel de silice.

Avec des paramètres tels que la teneur en alcalis et l'humidité étant constant, le degré de réactivité de granulats siliceux dépend essentiellement du degré de la structure cristalline désordonnée, la granulométrie des agrégats réactifs, et la proportion de ces phases réactives à

l'intérieur de l'agrégat réactif.

Plus désordonnée la silice réactive plus grande est la surface spécifique disponible pour la réaction. Structures de silice amorphe, crypto-cristallines, et microcristallines sont particulièrement sensibles à la RAG.

[Diamond.1976], [Tatematsu et al.1989], et [Mehta et al.1992] ont désigné la nature de ces formes réactives de silice et de l'ordre de réactivité globale de la manière suivante : l'opale, la cristobalite, la tridymite, quartz microcristallin, quartz cryptocristalline, calcédoine, chert, verre volcanique, et le quartz tendues.

[West.1991] et [Zhang et al.1990] ont examiné des sections minces de quartz agrégat. Les grains de quartz présentent généralement une extinction uniforme noir ou blanc. (Figure.11). Parfois, cependant, l'extinction ondulatoire est considérée dans lequel un balayage de bande d'extinction à travers un grain de quartz. Quartz présentant une extinction ondulatoire est très réactif à cause de sa forte densité de dislocations (Fig.1.VII.6 Fig.1.VII.7).

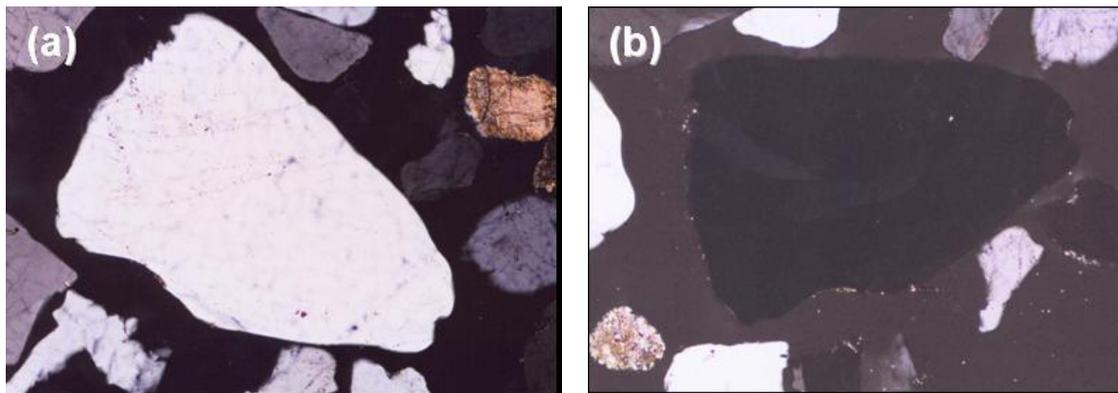


Fig.1.VII.6 : Quartz non réactif. Le grain de quartz ensemble est soit uniformément lumineux (a) ou totalement sombre (b) sous lumière polarisée croisée lorsque la platine du microscope est une rotation de 360 °.[Chang.2008]

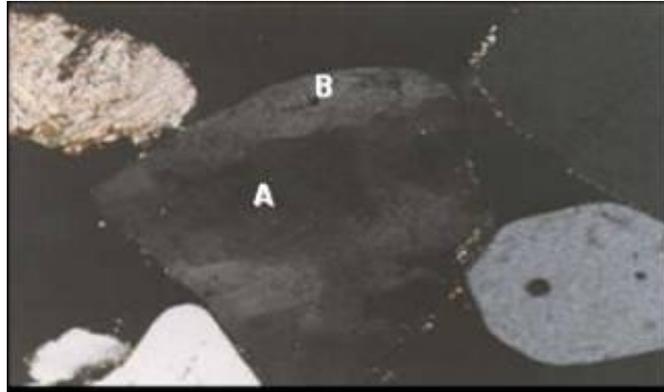


Fig.1.VII.7 : Réactif ou tendues quartz présentant foncé (A) et des bandes de lumière (B) dans un Seul grain. [Chang,2008]

VII-4-Effets de l'environnement

Les principaux effets de l'environnement sur la RAG se traduit dans la teneur en humidité relative et aux vecteurs de variations de température ainsi qu'au seuil d'exposition à des sels solubles qui pénètre dans le béton. Le béton peut être exposé à ralentir les cycles de variations de température et de l'humidité due aux variations climatiques saisonnières et cela peut avoir des effets importants sur la fissuration engendrée par la RAG. L'utilisation généralisée de sels de déglacage sur les trottoirs peut être responsable d'une grande détérioration.

L'une des trois conditions pour que la RAG se produire dans le béton est une humidité suffisante pour que les produits de la réaction l'absorbent. L'état d'humidité du béton en laquelle la RAG est associé qui peuvent ou ne peuvent pas se développer semble être mieux définies en termes d'humidité relative (RH). L'expansion du produit de la RAG se produit lorsque les valeurs RH de béton dépassent environ 80% référencé à 21 à 25 ° C de température.

De nombreuses expériences ont démontré que la température accélère la réaction, bien que l'expansion ultime ne semble pas nécessairement supérieure à long terme. Il est rapporté que les dalles de béton soumis à des conditions naturelles en plein air présente plus d'expansion que les échantillons de laboratoire maintenus dans des conditions d'humidité et de température constante.

À des températures élevées le taux de réactions et les taux d'expansion sont élevés, mais baisse avec le temps, ou à basse température, les taux sont plus lents mais l'expansion totale peuvent éventuellement atteindre ou dépasser celle avec des températures plus élevées. (Fig.1.VII.8)

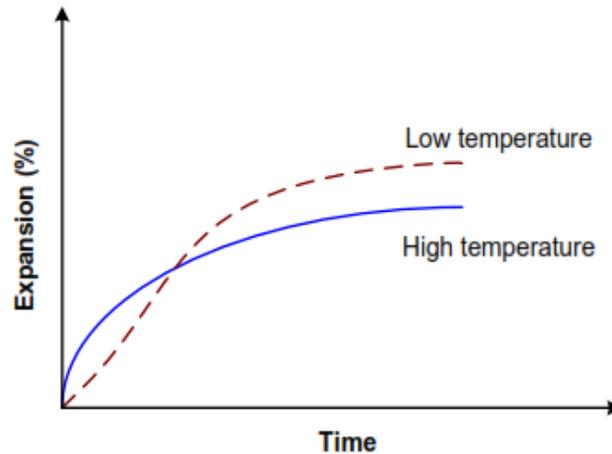


Fig.1.VII.8 : Influence de la température sur l'expansion de la RAG. [Chang,2008]

[Hearne et al 1992] a constaté que la réaction a eu lieu sept fois plus rapide pour les spécimens stocké à 38°C que pour ceux qui sont stockés à l'extérieur à une température moyenne de 9 ° C.

Le taux était quatre fois plus rapide que pour les échantillons stockés à 20°C. La réaction a généralement tendance à mûrir et à cesser dans une vingtaine d'années, mais des périodes plus longues peuvent être attendus dans les climats froids et plus courte dans un climat chaud.

VIII-Une critique sur les modélisations de la RAG

Malgré son importance pour quantifier une dégradation évolutive, la cinétique n'est pas toujours traitée par les modélisations disponibles. Les modèles souvent soulignent l'amplitude finale du gonflement du matériau et la corrélation entre cette valeur asymptotique, les facteurs d'influence, et le paramètre mécaniques, où la cinétique est considérée comme une entrée de données fournies par l'étude chimique de la réaction.

Tous les modèles proposés ont décrit, d'une façon ou une autre, la réponse de matériau à cette sollicitation interne d'origine chimique. Pour certains auteurs, le béton affecté est considéré comme un milieu continu où le comportement mécanique du matériau ayant un gonflement

interne peut être étudié par les éléments de la mécanique classique, e.g. l'élastoplasticité, la rupture ou bien l'endommagement.

Pour d'autres, une description du comportement mécanique ainsi abordé devrait tenir compte de la microstructure du matériau. De ce fait on peut classer la modélisation de la RAG en trois catégories :

Les modèles microscopique, mésoscopique et macroscopique.

Les modèles de microstructures (microscopiques) décrivent explicitement la microstructure du béton, généralement par discrétisation en éléments fini (FEM). Cela limite la taille de l'échantillon représenté (~ 10 cm), et sont habituellement mis au point pour l'analyse des expériences de laboratoire.

L'effort de modélisation peut donc se concentrer sur quelques phénomènes sélectionnez que seul un nombre limité de paramètres sont varié. Ces modèles sont utiles non seulement pour comprendre les mécanismes de la RAG, mais aussi pour aider à la construction de lois de comportement macroscopiques.

Une modélisation mésocopique se réfère à une échelle de l'ordre d'un granulat au sein du béton (~ 1 cm). La cinétique de formation et d'expansion du gel est aussi formulée à cette échelle, par un processus de diffusion. L'hétérogénéité entre les volumes élémentaires représentatifs (V.E.R.) du matériau est négligée et les modèles issus de cette modélisation visent souvent à décrire l'expansion des échantillons de l'essai, éventuellement sert à l'expertise du matériau du béton au laboratoire.

Les modèles macrostructuraux (macroscopique) font tenir en compte un large nombre de propriétés. Dans le cas de la RAG, ses paramètres incluent le flux de l'eau et de la température, l'expansion imposée, fluage, etc., qui, en fait, dépendent de la microstructure du matériau qui ne peut être représenté explicitement à une telle échelle.

Les lois de comportement macroscopique sont développées pour rapprocher les processus

qui se produisent au sein du matériau. Ces lois peuvent être soit empiriquement dérivée par corrélation avec l'expérience, ou par des modèles à multi-échelle basés sur la connaissance des processus physiques à l'échelle microscopique.

Dans ce chapitre, des modèles de la littérature sont synthétisés, en fonction de leur champ d'application. Il est montré que la plupart de ces modèles n'aborde pas de façon cohérente l'effet de la fraction des agrégats réactives dans un béton touché par la RAG. Une modification du modèle de Furusawa est proposée, qui représente un modèle de diffusion dans un VER. Les développements numériques seront décrits dans le chapitre 4.

VIII -1-Modèles Microscopiques

Dans ces modèles, la microstructure du béton est explicitement représentée avec une discrétisation en élément fini (FEM). La pression imposée par le gel de silice ouvre les fissures dans la microstructure, la complexité géométrique n'empêche de la représenter à l'aide des systèmes analytiques. L'emplacement auquel la formation d'un gel est un paramètre important qui dicte où les fissures et comment ils initient la propagation.

VIII -1-1-Lemarchand et Dormieux 2000

Une modélisation proposée par l'approche micromécanique [Lemarchand et al.2000] consiste à suivre un mécanisme topochimique de la réaction. Le gonflement du matériau est expliqué par un processus progressif du remplissage du gel forme à l'espace interne connecté dans le béton. Pour ce faire, les auteurs supposent, tout d'abord, une cinétique constante de la formation du gel sous la forme suivante,

$$\dot{m}_g \begin{cases} v_g & t < t_c \\ 0 & t \geq t_c \end{cases} \quad (\text{Equ.VIII.1})$$

Où \dot{m}_g représente la masse de gel forme, v_g est la vitesse de formation du gel et t_c est la durée de réaction.

Afin de mettre en évidence quantitativement la déformation du matériau, on suppose que le squelette est purement élastique avec K_s étant le module de compression.

En outre seulement une famille de pores, dont la taille est identique et dont la porosité est ϕ_0 , est en question.

De plus, le comportement du gel formé est supposé comme un fluide avec p_g traduisant sa pression et ρ_g pour sa densité de masse.

D'après la description poroélastique, le comportement d'un tel système peut être précisé par les relations reliant la contrainte macroscopique Σ , la déformation macroscopique E , la pression locale de pore p_g et la porosité ϕ ,

$$\begin{cases} \Sigma = C_{hom} : E - p_g B \\ p_g = M(-B : E + \phi - \phi_0) \end{cases} \quad (\text{Equ.VIII.2})$$

Où C_{hom} et B sont respectivement le tenseur d'élasticité homogénéisé (à pression nulle) et le tenseur des coefficients de Biot.

On s'intéresse au gonflement libre de matériau, i.e. $\Sigma = 0$ dans (Equ.VIII.2), et considère que le matériau est isotrope. En négligeant la compressibilité de gel, les auteurs arrivent à démontrer le gonflement libre explicitement sous la forme suivante,

$$\begin{cases} E_g = \mu_g T \delta \\ p_g = \frac{3K_{hom}}{b} T \mu_g \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} \mu_g = \langle \frac{m_g}{p_g} - \phi_0 \rangle \\ T = \frac{1}{3} \frac{b}{b - \phi_0(1-b)} \end{cases} \quad (\text{Equ.VIII.3})$$

Où $\langle x \rangle_1 = \frac{1}{2}(x + |x|)$ et K_{hom} représente le module de compression du matériau et b est le coefficient de Biot isotrope.

La déformation macroscopique est montrée donc d'être linéaire en termes de la formation de gel $m_g(t)$, ou plus précisément la partie au-delà de la porosité initiale $\phi_0 : \mu_g$. Avec l'adoption des valeurs typiques pour b et K_{hom} , une première estimation de la pression asymptotique accumulée dans le pore, $p_g(\infty)$, aboutit à,

$$p_g(\infty) \approx 400 \text{ MPa} \quad (\text{Equ.VIII.4})$$

Ensuite, les auteurs examinent le cas plus compliqué :

deux familles de pores internes avec ϕ_1 et ϕ_2 comme leurs porosités initiales.

Prenant l'hypothèse que le remplissage commence de la première famille ϕ_1 vers la deuxième ϕ_2 avec une pression p_s comme un seuil pour le démarrage de remplissage de ϕ_1 envers ϕ_2 .

Donc, le processus du gonflement du matériau est divisé en quatre étapes dont :

la première est la formation de gel sans entrainer aucune déformation avant que $\frac{m_g}{\rho_g}$ atteigne ϕ_1 .

La deuxième étape est la formation du gel dans ϕ_1 avant que la pression accumule p_g n'atteigne le seuil de remplissage p_s .

La déformation correspondante est calculée d'après (Equ.VIII.3) sauf qu'il faut substituer b , ϕ_0 par leurs valeurs d'une porosité ϕ_1 .

Dans l'étape suivante, la formation continuant du gel commence à remplir ϕ_2 ayant une pression interne constante $p_s = p_g$ de remplissage. A ce stade les auteurs montrent une relation linéaire entre la formation du gel et la déformation du matériau sous la forme suivante,

$$E_g = \frac{b}{3\phi} \frac{p_s}{K_{hom}} \frac{m_g(t)}{\rho_g} \delta \quad \text{avec } \phi = \phi_1 + \phi_2 \quad (\text{Equ.VIII.5})$$

Dans la dernière étape, on suppose que le processus de formation de gel finit avant que ϕ_2 ne soit totalement remplie.

Donc le gonflement se stabilise vis-à-vis de la finalisation de formation du gel. D'après les auteurs, ce calcul peut être appliqué, a priori, avec un spectre de distribution de tailles de pores pour un scénario plus réaliste dans le matériau du béton.

La déformation macroscopique en forme sigmoïdale "S", observée au laboratoire sur les éprouvettes, pourrait trouver son explication micromécanique.

L'intérêt de cette modélisation est d'interpréter et de quantifier l'observation macroscopique par les arguments micromécaniques. Certaines caractéristiques mécaniques du gel, e.g. sa compressibilité, pourraient être vérifiées par la comparaison, a travers une variable

observable, entre son estimation théorique et sa valeur mesurée, e.g. la pression interne p_g dans (Equ.VIII.5).

VIII -1-2-Les modèles d'agrégats expansives

Dans ces modèles, l'expansion est similaire aux modèles de bord ou elle se produit autour des agrégats, ou par une expansion homogène de l'ensemble lui-même. [Comby-Peyrot et al.2009] ont modélisé un bar de mortier touchés par la RAG en 3D dimensions par élément fini (FE). Dans cette simulation, les agrégats plus grands sont pris en considération. Cela peut avoir des effets indésirables dans la simulation, comme [Dupray et al.2009] ont montré que, pour ce type de simulation les plus petits agrégats ont une influence significative sur la propagation des fissures dans la microstructure. Ceci, combiné par le fait que l'expansion provoquée par une expansion homogène des agrégats conduit à un endommagement excessivement dense dans la pâte de ciment.

[Schlangen et al.2009] ont utilisé un modèle de réseaux (lattice) pour simuler la propagation des fissures causées par la RAG. Dans ce modèle, le gel ne sera pas décrit explicitement : certaine zone dans la microstructure décrite comme "expansive". La surface totale de ces zones ne change pas avec la réaction, mais là l'expansion tient compte d'un coefficient de loi cinétique empirique. Trois différentes configurations sont utilisées :

La zone de transition (ITZ) se dilate, le ITZ et les fissures formées se dilatent, ou tous les agrégats se dilatent de façon homogène.

Le dommage est calculé avec un algorithme local qui montre l'énorme dépendance de la taille de la maille [Schlangen et al.1997]. Le modèle a été comparé avec des images d'échantillons de micro-bar obtenue par microscope électronique à balayage (MEB). Les granulats basalte utilisés étaient hautement réactifs. Grâce à ces simulations, les auteurs ont conclu que le premier scénario (expansion sur l'ITZ) donne une meilleure corrélation avec le modèle de fracture.

Le deuxième scénario principal (l'expansion du ITZ et des fissures) à une défaillance prématurée de la matrice cimentaire. Le dernier scénario

(dilatation de l'agrégat) a provoqué une dense fissuration qui ne correspondaient pas aux observations. Cependant, aucune comparaison a été faite pour l'expansion totale de l'échantillon.

En outre, la simulation a tenté de reproduire l'essai du micro-bar, qui est connu pour d'avoir une faible corrélation avec ce qui se passe en réalité comme représenté par [Lu et al.2008].

VIII -1-3-Les modèles de gel de poche

Dans ces modèles, l'expansion est provoquée par le gel de poches dans les agrégats. Le modèle modifié de [Schlangen et al.1997] proposé par [Çopuroglu et al.2007] de sorte que le gel se forme dans les poches, soit en dans l'agrégat, dans la pâte cimentaire ou dans sur la surface de l'ITZ.

Dans la simulation, le volume du gel formé est constant, mais là l'expansion est imposée dépend de l'avancement de la réaction chimique. Ce modèle a montré que l'emplacement des poches de gel domine le modèle de la fissure dans le matériau (Fig.1.VIII.1).

Cependant, plusieurs préoccupations sont soulevées de cette simulation :

- la quantité de gel formé semble important par rapport aux valeurs mesurées expérimentalement par [Ben Haha et al.2007] ;
- un seul agrégat a été simulée, qui n'est pas représentatifs de la microstructure d'un béton ou d'un mortier ;
- et aucune comparaison a été faite avec des courbes d'expansion expérimentales. Ce modèle est donc mal adapté pour l'étude de la RAG.

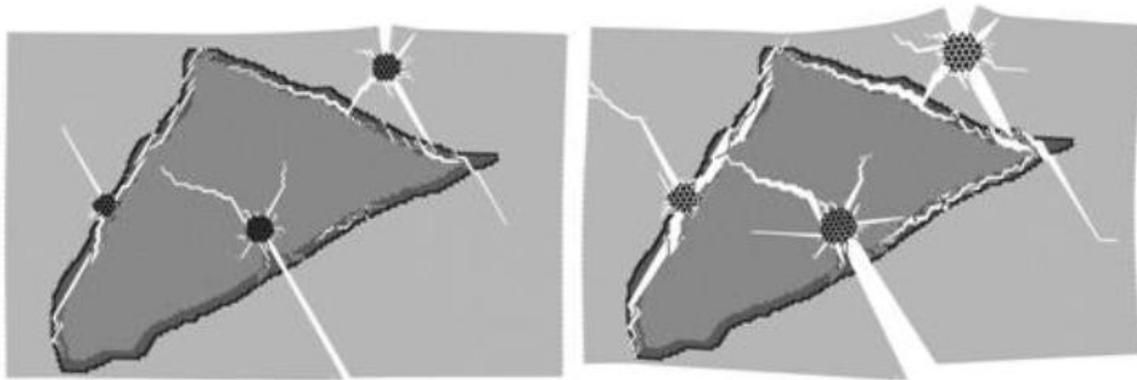


Fig.1.VIII.1: Influence de l'emplacement des poches de gel sur un modèle de fissure obtenue avec le modèle de [Çopuroglu et al.2007] .

[Dunant et al.2009 ;2010] ont proposé un modèle dans lequel les poches de gel se développent à l'intérieur des agrégats au faire et mesure de l'avancement de la réaction. Ce modèle suit la preuve expérimentale de [Ben Haha et al.2007], en outre confirmé par [Dunant.2010], qui a suggéré que l'expansion macroscopique ne dépend que de la quantité de gel formé, et non pas sur son taux.

Dans ce modèle, les effets des processus chimiques sont donc réduits au volume de gel formé. Le modèle de la fissure et l'expansion dépend uniquement sur le nombre et l'emplacement des zones de gel et les conditions aux limites mécaniques appliquée à l'échantillon.

Dans ce modèle, la microstructure du béton est discrétisée en deux dimensions en utilisant le code C ++ sous un logiciel appelé AMIE. Les agrégats sont représentés sous forme d'inclusions circulaires intégrés dans une matrice de pâte de ciment. Leur comportement est élastique fragile, et leurs propriétés mécaniques est distribué selon une loi de Weibull pour tenir compte de l'hétérogénéité du matériau. Les dimensions de la microstructure sont identiques aux dimensions des échantillons testés le laboratoire (4 cm pour un bar de mortier, 7 cm pour un prisme de béton), qui permet une comparaison directe entre la simulation et les expérimental.

La dégradation mécanique est décrite avec un modèle d'endommagement non local continue. Le réseau de fissures causées par la RAG est très dense, et serait numériquement trop intensive pour représenter avec une approche de fissuration discrète. L'algorithme d'endommagement utilisé fait que le critère de rupture évolue de façon monotone avec la charge générée. De cette façon, il est possible de prédire quelques éléments sont endommagés d'abord, et par conséquent façon de propagation de l'endommagement dans la microstructure, sans l'aide d'un solveur itératif de Newton-Raphson.

L'équilibre thermodynamique est naturellement forcé par l'algorithme. [Dunant et al.2011]

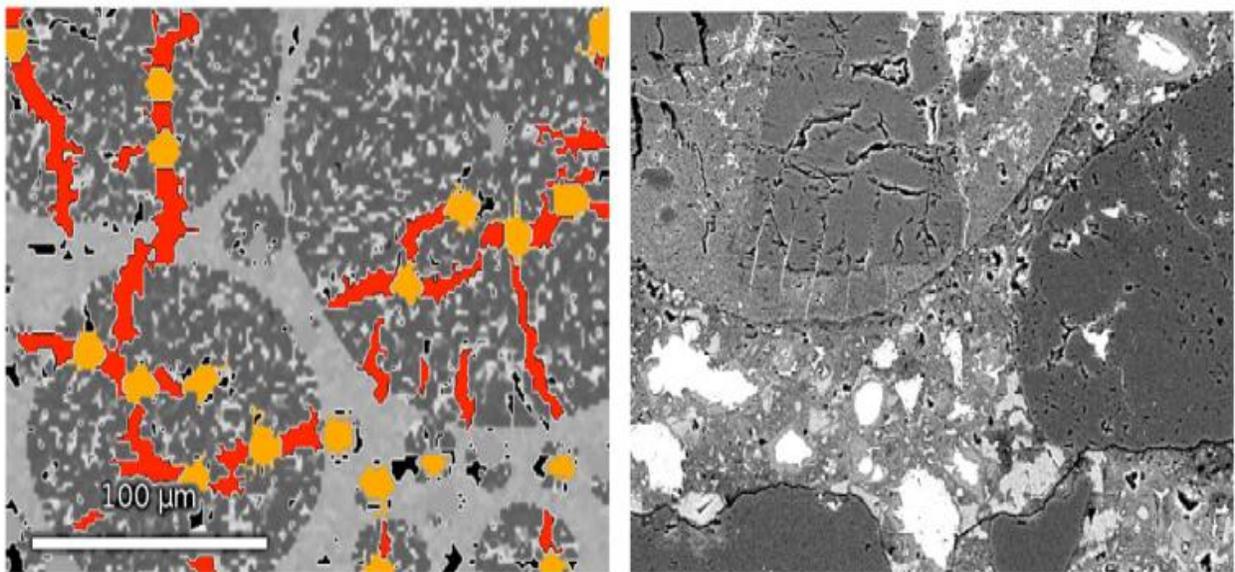


Fig.1.VIII.2: Modèle d'endommagement obtenue avec le modèle de [Dunant et al.2010] comparé par rapport l'image obtenu par le microscopie semi-électronique (à droite).

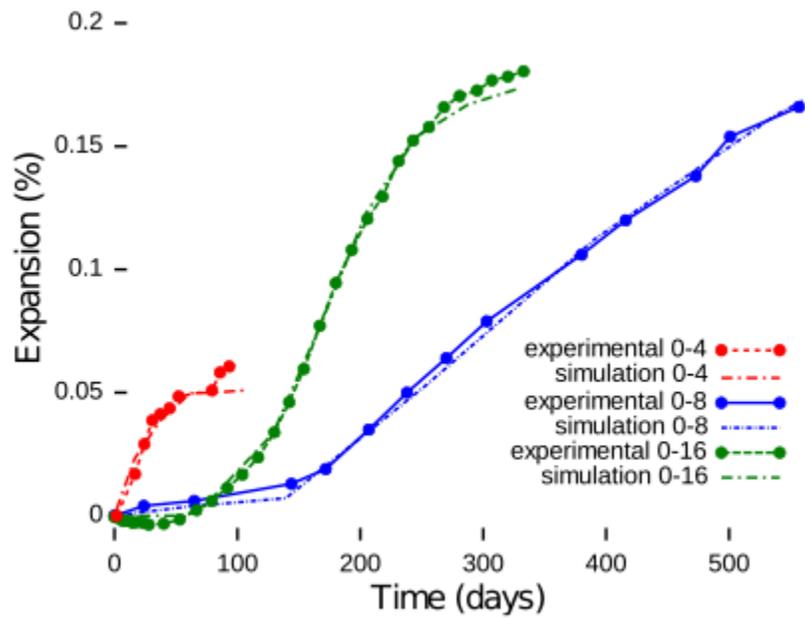


Fig.1.VIII.3: Comparaison en expérimentale et le modèle proposé par [Dunant.2009].

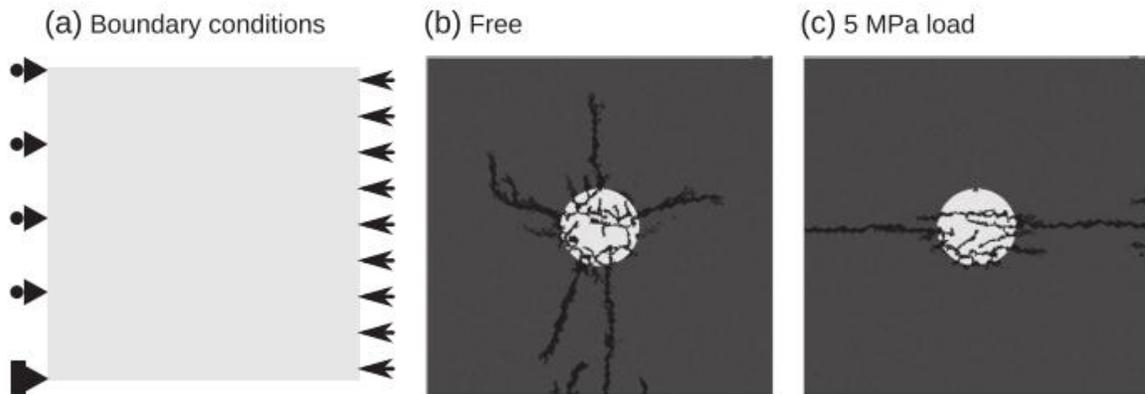


Fig.1.VIII.4: Illustration de l'influence de la charge sur l'orientation des fissures selon les estimations du modèle de [Dunant et al.2012].

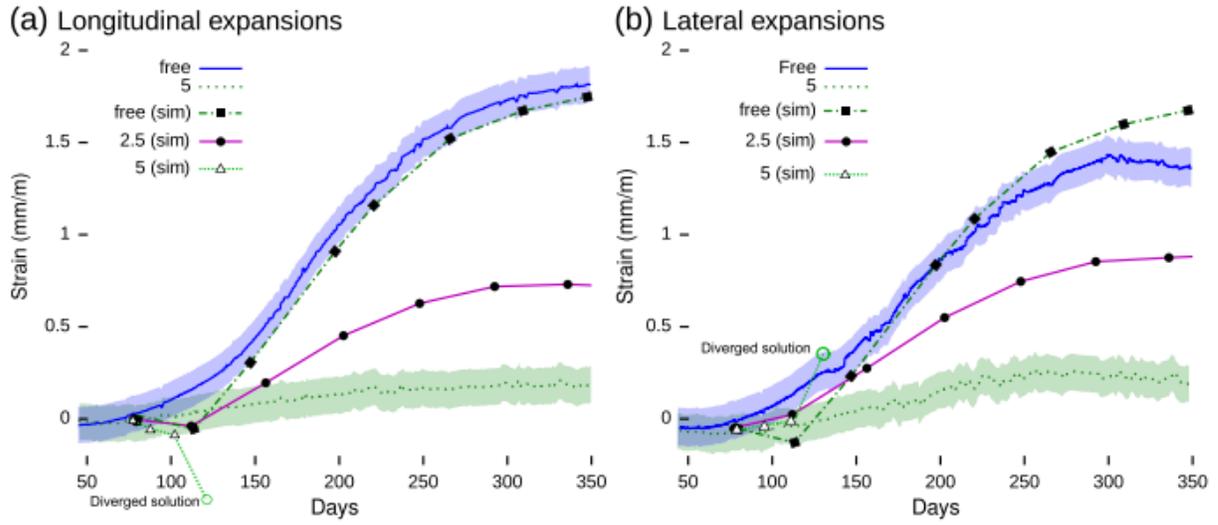


Fig.1.VIII.5: Comparaison entre l'expansion expérimentales et simulées sous contrainte uniaxiale obtenu avec le modèle de [Dunant et al.2012].

Dans ce modèle, l'effet de la charge uniaxiale peut être simulé en appliquant une contrainte constante sur un bord de l'échantillon [Dunant et al.2012]. En le faisant ainsi, les fissures dans les agrégats sont forcées dans la direction de la contrainte appliqué (Fig.1.VIII.5). Sous faible contrainte appliquée, le modèle prédit une diminution de la l'expansion dans le sens de la charge et dans le sens latéral, ce qui est cohérent avec les résultats expérimentaux (Fig.1.VIII.5).

Cependant, le modèle surestime le dommage des charges appliquées supérieures à 5 MPa, comme dans la configuration 2D ou la propagation à travers la pâte de ciment et se casse complètement l'échantillon. Ceci peut être expliqué par la fusion des fissures ce qui pourrait se produire plus tôt en 3D que dans 2D, et par l'absence de fluage sur le modèle de pâte de ciment.

VIII -1-4-Effet de forme sur la RAG

Le modèle de Dunant peut être utilisée pour étudier plusieurs paramètres morphologiques des de la RAG, telles que l'emplacement où le gel se forme, l'effet de la distribution granulométrique, ou la forme des agrégats.

L'expansion induite par la RAG a été démontré qu'elle est de nature anisotrope par rapport à la direction de coulage du béton, même dans le cas de l'expansion libre. Le degré d'anisotropie changements d'un auteur à l'autre, et une grande dispersion existe en fonction du type de l'agrégat ou la forme de l'échantillon. La forme des agrégats a souvent été proposé pour expliquer cette anisotropie de l'expansion.

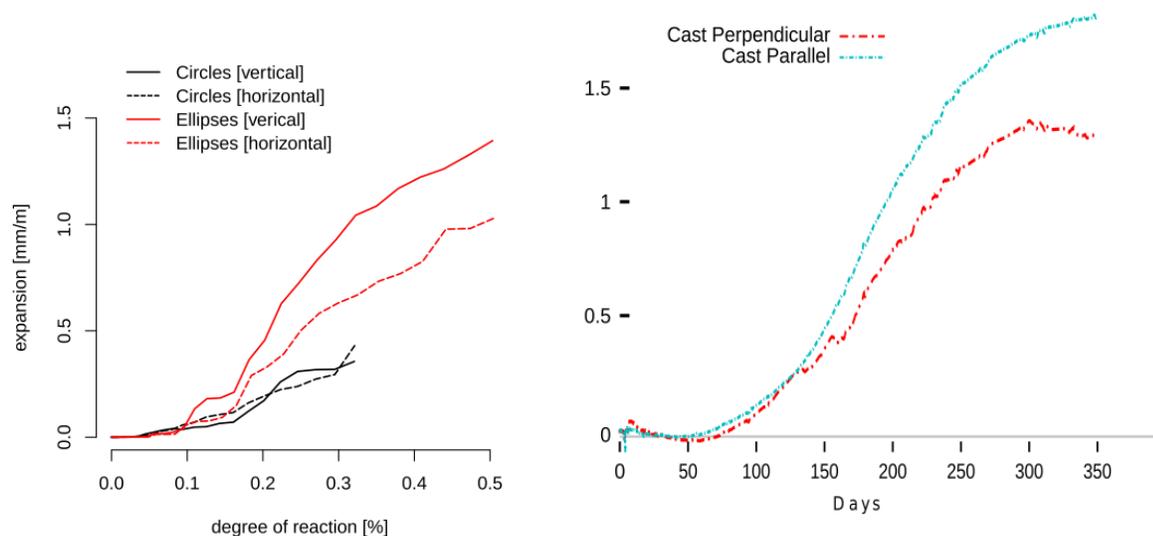


Fig.1.VIII.6: Influence de la forme d'agrégat sur l'anisotropie de l'expansion libre (à gauche) en comparaison avec les données expérimentales de.[Giorla.2013]

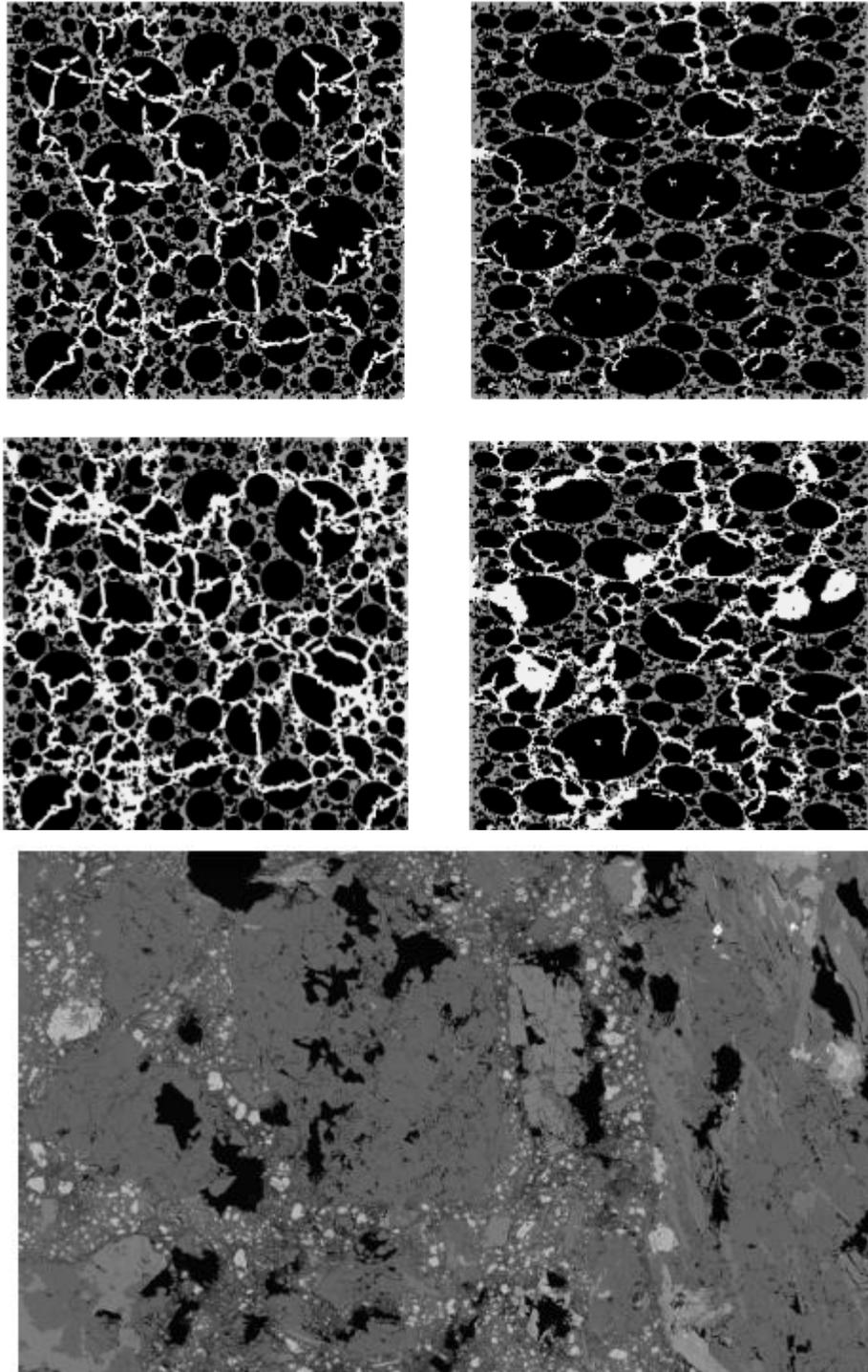


Fig.1.VIII.7: Influence de la forme globale sur le modèle de fissuration à deux de différents degrés réaction. Comparaison avec endommagement expérimentale obtenue à des degrés élevés de réaction. [Giorla.2013]

VIII -2-Modélisation mésoscopique

Les modèles mésoscopiques étaient proposés initialement pour estimer l'expansion des échantillons du matériau aux conditions de laboratoire, actuellement employés pour l'expertise du potentiel du gonflement des matériaux. Donc moins d'intention y est mise pour une application ultérieure à un calcul d'une structure. Dans ce groupe de modèles, on s'appuie souvent sur un mécanisme de réaction précis et un mécanisme du gonflement du matériau définitif, qui rend un modèle spécifique facile d'être compris ou bien critiqué.

VIII -2-1-Furusawa et al. 1994

Le premier modèle de cette catégorie, [Furusawa et al.1994] se base strictement sur le mécanisme topochimique en attribuant la cinétique de réaction à la diffusion des ions hydroxydes OH^- au sein du granulat réactif. La profondeur d'attaque de OH^- sur un granulat, dont la forme est idéalisée comme une sphère, est déduite auprès d'une loi de Fick,

$$\frac{dx}{dt} = k \frac{C_0}{x} \text{ (Equ.VIII.6)}$$

ou x denote l'épaisseur de la couche réactive d'un granulat réactif, C_0 est la concentration des ions hydroxydes à l'interface granulat-ciment et k représente un coefficient de diffusion.

L'expansion d'échantillon peut être calculée par l'excès volumique la couche réactive P_t par rapport à l'espace libre dans la zone poreuse autour du granulat P_{abs} ,

$$\varepsilon = B(P_t - P_{abs}) \text{ (Equ.VIII.7)}$$

avec B étant un coefficient à déterminer expérimentalement. Ce modèle implique que le volume de produit final est égal à celui de la couche réactive.

VIII -2-2-Xi et al. 1999

Ceci est bien élaboré par [Xi et al.1999] qui suit le même raisonnement que [Furusawa et al.1994] sauf qu'une augmentation volumique du produit final par rapport à la couche réactive du granulat est prise en compte. Les auteurs écrivent le volume final de produit V_{gel} sous la forme suivante,

$$V_{gel} = \eta V_R \text{ (Equ.VIII.8)}$$

ou V_R est le volume réagissant avec les ions hydroxyles, équivalent à P_t dans la relation (Equ.VIII.7), V_{gel} représente le volume du produit final et $\eta = \eta(t) > 1$ est un coefficient de l'augmentation volumique du produit final par rapport à V_R .

Le produit est de plus considéré comme un fluide et peut être partiellement absorbé par la zone poreuse autour du granulat. Pour cette partie de gel, une relation entre sa concentration et sa pression est décrite par une loi de Darcy,

$$\frac{\partial C_{gel}}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\frac{K_{gel}}{\eta_{gel}} \nabla P \right] \text{ (Equ.VIII.9)}$$

ou C_{gel} représente la concentration de gel dans la zone poreuse, P mesure sa pression tandis que K_{gel} dénotent la perméabilité de la zone poreuse vis-à-vis du produit fluide et la viscosité du produit respectivement. La contribution des granulats d'une certaine taille à l'expansion asymptotique du matériau s'écrit par la différence entre le volume total V_{gel} de produit et la partie absorbée par la zone poreuse V_{pg} ,

$$\varepsilon_i = \frac{V_{gel} - V_{pg}}{\phi_i V_a} \text{ (Equ.VIII.10)}$$

ou ϕ_i est le pourcentage des granulats réactifs d'une certaine taille par rapport au granulat réactif total avec V_a étant la fraction volumique de granulat réactif par rapport à celui de béton.

VIII -2-3-Sellier et Capra 1997

[Sellier et al.1997a] proposent un modèle mésoscopique en reposant sur un mécanisme topo-chimique de réaction. D'après les auteurs, la cinétique de la formation de gel est gouvernée par :

- (i) une diffusion des réactifs, i.e. les alcalins (en équivalence de Na_2O) et les ions hydroxyles vers le site du granulat contenant les silices actives;

- (ii) une "vitesse d'attaque" décrivant la cinétique de l'apparition du gel en la présence de tous les réactifs. En outre cette "vitesse d'attaque" est supposée thermoactivée, obéissant à une loi d'Arrhenius.

Et le gel forme est, d'après eux, capable d'absorber 200%-400% de l'eau présente. Afin d'estimer la pression mise en squelette par le gel forme, une loi de Laplace est employée pour décrire la pression capillaire p_c sous la forme suivante,

$$p_c = \frac{2\sigma_g \cos\theta_g}{r_p} \text{ (Equ.VIII.11)}$$

avec σ_g étant la tension superficielle du gel, θ_g comme l'angle de raccordement et r_p comme le rayon du pore. Et puis ils constatent que la probabilité de la pression du gel atteignant certaine niveau p_g égale a celle d'occupation du gel forme dans les pores dont le rayon est supérieur a $2\sigma_g \cos\theta_g/p_g$. Par cela, la pression du gel est calculée vis-à-vis de la formation du gel.

Par cette pression du gel, la densité de contrainte locale K_l et puis l'énergie de rupture G sont évaluées par la mécanique de rupture [François et al.1993]. Et le gonflement du matériau est estimé par le volume de fissuration v_f par rapport a un volume élémentaire de béton v_e ,

$$\varepsilon = \frac{1}{3} tr(\varepsilon_g) = \frac{1}{3} \frac{v_f}{v_e} \text{ (Equ.VIII.12)}$$

De plus, on suppose qu'une relation linéaire se tient entre la pression du gel et le gonflement libre du matériau à travers un coefficient α ,

$$p_g(t) = \alpha \varepsilon(t) \text{ (Equ.VIII.13)}$$

VIII -2-4-Bazant et Steffens 2000

Sans avoir souci de présenter ultérieurement la déformation du matériau, [Bazant et al.2000] proposent de séparer la formation de gel pré-gonflant, i.e. à l'issue de l'attaque des ions OH^- , du gel post-gonflant, i.e. après l'imbibition de l'eau liquide disponible.

Cette partition prend la conscience du comportement de gel vis-à-vis de l'eau liquide. Au lieu de prendre un seul granulat, les auteurs commencent par un volume élémentaire représentatif d'un cube ou un granulat sphérique se trouve au centre. Ce granulat est supposé d'être couvert par une couche de gel pré-gonflant. La continuation de formation de gel pré-gonflant est contrôlée par l'arrivée de la solution au front de la réaction en traversant la couche de gel forme.

La réaction elle-même est supposée instantanée par rapport à la diffusion de solution. A partir de ces points de départ, l'avancement du front de réaction est résolu par les auteurs à l'aide de la conservation de masse à travers la discontinuité du front de réaction,

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{2a_s}{r\rho_s D} \left[\frac{\partial}{\partial x} F\left(\frac{x}{D}\right) \right]_{x=z} \quad (\text{Equ.VIII.14})$$

ou z est la profondeur du front de réaction, ρ_s représente la densité de masse de silice réactive avec a_s pour la perméabilité de gel vis-à-vis de l'eau liquide et D pour le diamètre du granulat. L'augmentation volumique de gel post-gonflant, par rapport à celui pré-gonflant, est considérés due seulement à la prise de l'eau liquide, étant une imbibition décrite par

$$\dot{\omega}_i = \frac{H_0}{\tau_i} A_i \quad (\text{Equ.VIII.15})$$

avec τ_i étant le demi-temps du processus de la prise de l'eau et A_i pour l'affinité de ce processus, et H_0 pour une constante. Finalement l'augmentation volumique du gel est,

$$tr(\varepsilon) = \frac{\omega_i}{\rho_\omega} \quad (\text{Equ.VIII.16})$$

avec ρ_ω représentant la densité de masse de l'eau liquide.

VIII -3-Modèles Macroscopiques

Les modèles microscopiques sont développés pour l'analyse de grandes structures en béton. Ces modèles peuvent être classifié selon la façon dont ils représentent le produit du gel de

silice . Dans la plupart de ses modèles, l'expansion ou le degré de réaction sont typiquement exprimées comme des fonctions sigmoïdales en fonction du temps. Ces fonctions sont utilisées en raison de leur similitude avec l'expansion libre mesurée expérimentalement.

VIII -3-1-Simulation thermique

Longtemps avant la disponibilité d'une modélisation spécifique du gonflement de la réaction, une simulation thermique était adoptée par les ingénieurs pour répondre à la demande urgente de calculer les structures touchées, surtout les barrages. L'idée consiste à imposer dans la structure une charge thermique $\Delta\theta$ si bien que l'expansion thermique ε_t en résultant reproduise celle de la réaction ε_r ,

$$\varepsilon_t = \alpha_t \Delta\theta \rightarrow \varepsilon_r \quad (\text{Equ.VIII.17})$$

ou α_t est le coefficient de dilatation thermique du matériau et $\Delta\theta$ est la charge thermique équivalente. [Davie et al.1991] introduisent une telle charge thermique pour simuler numériquement le comportement du barrage de Maentwrog (Grande-Bretagne); dans une évaluation du comportement du barrage de Chambon (France), modulait le barrage et attribuait différentes charges équivalentes à chaque zone modulée afin de rendre compte de l'hétérogénéité du gonflement; des similaires techniques sont employées par [Tanner, et al.1992] dans leur travaux d'expertise des barrages Hiwassee (Etats-Unis) et Fontana Spillway (Etats-Unis) respectivement.

VIII -3-2-Chatterji et Christensen 1990

Une première modélisation macroscopique était proposée par [Chatterji et al.1990] d'une façon phénoménologique. L'expansion asymptotique de leurs barres mortiers réactives ε est notée et fittée vis-à-vis de la température ambiante θ et la concentration alcaline C employée dans les barres,

$$\varepsilon = SK[1 - M\langle C - C_0 \rangle - N\langle \theta - \theta_0 \rangle + P\langle C - C_0 \rangle\langle \theta - \theta_0 \rangle] \quad (\text{Equ.VIII.18})$$

ou $\langle x \rangle = \frac{1}{2}(x + |x|)$ et l'indice "0" indique des valeurs de référence. (S, K, M, N, P) sont les paramètres. Il nous semble que S et K dépendent du type de matériaux tandis que M, N et P sont les coefficients sans signification physique claire.

Evidemment ce modèle ne s'intéresse qu'à l'amplitude d'expansion sans intention d'inclure la cinétique d'expansion.

VIII -3-3-Leger et al. 1995

Cette modélisation est orientée vers les calculs numériques des barrages atteints par l'alcali-réaction. Ce modèle inclut des facteurs importants du gonflement du béton, qui concernent la température ambiante T , l'humidité ambiante M , la réactivité normalisée du granulat $R \in [0, 1]$ et la contrainte imposée σ [Leger et al.1995]. Le gonflement du matériau s'écrit ainsi,

$$\varepsilon_r = \beta C T M R = \beta [F(\sigma)F(T)F(M)F(R)] \quad (\text{Equ.VIII.19})$$

ou les auteurs ont choisi quatre fonctions normalisées $F(\sigma), F(T), F(M),$ et $F(R)$ afin de tenir compte de l'influence de ces quatre facteurs sur le gonflement asymptotique du matériau, et β est l'expansion asymptotique du matériau.

Comme celui de [Chatterji et al.1990], ce modèle ne s'intéresse pas à la cinétique du gonflement. Néanmoins ce modèle a été intégré dans le code des éléments finis commercial et employé dans les calculs sur les barrages affecté [Leger et al.1996].

VIII -3-4-Huang et Pietrusczak 1999

Le modèle proposé par [Huang et al.1999] complète la modélisation au niveau de structure en introduisant la cinétique du gonflement dans le comportement avec compte tenu de deux facteurs : la température et la contrainte imposée,

$$\dot{\varepsilon}_A = g_1(t') \dot{g}_2(\sigma_m) \quad (\text{Equ.VIII.20})$$

ou $\sigma_m = \frac{1}{3}tr(\sigma)$ est la trace du tenseur contrainte σ t' est un temps normalise par la température θ par rapport au vrai temps t ,

$$dt' = g_3(\theta)dt \quad (\text{Equ.VIII.21})$$

avec les fonctions $g_{1,2,3}$ empiriquement determinees par les essais des matériaux. Pour un béton atteint, la contrainte s'écrit,

$$d\sigma = C^e[(d\varepsilon - d\varepsilon^p) - d\Lambda^e : \sigma - \frac{1}{3}d\varepsilon_A 1 + \frac{1}{3}\alpha d\theta 1] \quad (\text{Equ.VIII.22})$$

ou α est le coefficient de dilatation thermique de materiau et Λ^e est la compliance élastique de C^e .

L'équation (Equ.VIII.22) implicite la partition entre la déformation chimique ε_A , la déformation plastique ε^p . L'intervention de l'alcali-réaction dans les propriétés du matériau C^e par,

$$E = E_0\mu_1 \quad , \quad f_c = f_{c0}\mu_2 \quad (\text{Equ.VIII.23})$$

Ou $\mu_{,21}$ sont des fonctions de l'avancement de la réaction avec E_0 et f_{c0} pour le module d'Young et la resistance en compression du béton sein.

L'avancement de la réaction intervient ainsi dans la fonction d'écrouissage,

$$g = \sqrt{J_2} - \eta_c I \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (\text{Equ.VIII.24})$$

ou η_c est un coefficient, $I = \alpha_0 f_c + I_1$ et $I_0 = e\alpha_0 f_c$ avec I_1 le premier invariant du tenseur de contrainte et J_2 le deuxième invariant du tenseur de contrainte dérivée.

VIII -3-5-Sellier et Capra 1997

Dans la deuxième partie de leur modélisation, [Sellier et al.1997b] retiennent la relation (Equ.VIII.13) à l'échelle d'une éprouvette mécanique au laboratoire. Mais l'expansion libre du matériau est élaborée directement à ce niveau avec compte rendu de la température T ,

l'humidité H . A travers le coefficient a , la pression interne du gel s'écrit sous la forme suivante,

$$p_g(\varepsilon_\infty, T, H, t, a) = a\varepsilon(t) = a\varepsilon_\infty H^m \{1 - \exp[-k(T)t]\} \quad (\text{Equ.VIII.25})$$

ou k représente l'énergie thermoactivation de la réaction dépendant de température T , et m est déterminé par les essais. Par cette estimation de pression interne, le comportement d'une structure affectée pourrait être évalué.

VIII -3-6-Coussy et Larive 1996

Par la thermodynamique d'un système chimico-mécanique, [Coussy.1995] démontre un cadre de théorie permettant de tenir compte des phénomènes mécaniques ainsi que chimiques au sein d'un milieu poreux, tel que le béton.

Dans ce cadre théorique, [Larive et al.1996] décrivent le gonflement du matériau induit par le gel comme un couplage chimico-mécanique.

Il est démontré que la dissipation de ce système est purement chimique et un avancement de la réaction chimique est identifié comme une variable interne. L'équation mécanique s'écrit sous la forme suivante,

$$\sigma = K\varepsilon - aK\xi \quad (\text{Equ.VIII.26})$$

ou le terme $-aK\xi$ concerne l'intervention chimique dans le comportement mécanique. Dans le cas de l'expansion libre, i.e. $\sigma = 0$ dans (Equ.VIII.26), l'avancement de réaction ξ peut se traduire directement par la déformation observable du matériau,

$$\varepsilon = a\xi \quad (\text{Equ.VIII.27})$$

Malgré sa simplicité, la relation (Equ.VIII.27) porte un message important qu'il est possible de saisir l'avancement chimique ξ , une variable chimique, par la déformation mesurable du

matériau, i.e. ε . Par des éprouvettes, [Larive.1997] montre une courbe expérimentale d'expansion libre,

$$\xi(t) = \varepsilon(\infty) \frac{1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_c}\right)}}{1 + e^{-\left(\frac{\tau_L - t}{\tau_c}\right)}} \quad \text{avec} \quad a = \varepsilon(\infty) \quad (\text{Equ.VIII.28})$$

ou τ_c τ_L sont deux temps caractéristiques d'expansion des éprouvettes réactives.

VIII -3-7-Les modèles phénoménologiques

Ces modèles phénoménologiques simulent l'expansion de la réaction et les dommages induits par des lois macroscopiques dérivées de mesures expérimentales. Dans les premiers modèles rapportés [Leger et al.1995], l'expansion de la RAG été réparti uniformément dans la structure du béton. Il était plus facile d'imposer une charge thermique homogène équivalent plutôt que de mettre en œuvre une loi de comportement. Par la suite, une telle analyse a été redéfinie en faisant varier l'expansion imposé à travers la structure en fonction de la température, l'humidité relative, la concentration des composants réactifs et/ou contrainte de compression.

Ces premiers modèles utilisent trois paramètres principaux :

- le expansion asymptotique $\varepsilon_{RAS}^{\infty}$ qui contrôle l'amplitude de la déformation,
- le temps caractéristique de latence τ_{lat} qui contrôle l'induction de la réaction,
- et le temps d'accélération caractéristique τ_{acc} qui contrôle la pente de la courbe sigmoïdale (voir Fig.1.VIII.8). [Larive.1997] a proposé l'expression suivante pour l'expansion imposée en fonction du temps $\varepsilon_{RAS}^{\infty}(t)$:

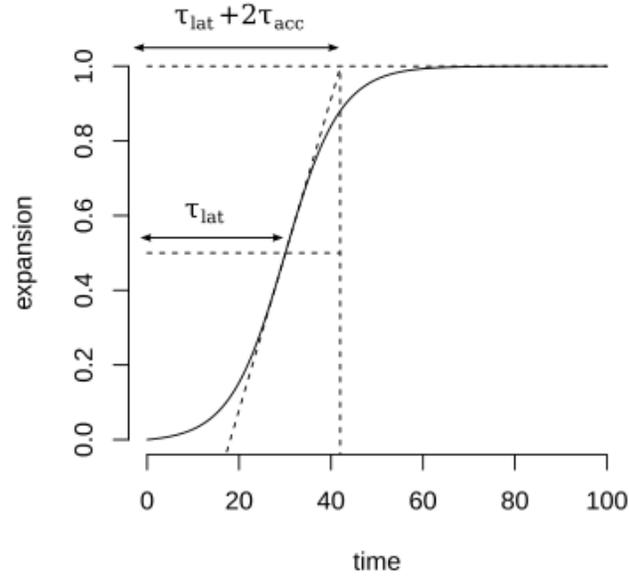


Fig.1.VIII.8: Expansion modélisée comme une fonction sigmoïde de temps (unités arbitraires).

$$\varepsilon_{RAS}^{\infty}(t) = \varepsilon_{RAS}^{\infty} \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_c}}}{1 + e^{-\frac{t}{\tau_c}} - \frac{t}{\tau_c}} \quad (\text{Equ.VIII.29})$$

Les essais de laboratoire effectués à différentes humidités relatives ont montré que l'expansion final diminue avec la diminution du degré de saturation dans le matériau.

Il y a un seuil en dessous duquel l'expansion peut se produire, qui lui-même dépend de la température, comme le montre [Poyet et al.2006].

Dans les modèles, comme le modèle de [Bažant et al.2000] [Capra et al.1998], ce seuil est pris en compte en multipliant l'expansion final $\varepsilon_{RAS}^{\infty}$ par h un facteur compris entre 0 et 1 qui dépend du degré de saturation dans le matériau et est concorde avec l'expérimental.

La température modifie les temps caractéristiques τ_{lat} et τ_{acc} avec une loi d'Arrhenius. Les énergies d'activation pour la latence $E_{a\ lat}$ et pour l'accélération $E_{a\ acc}$ sont différentes, et

sont mesurées expérimentalement à partir de courbes d'expansion à des températures différentes.

[Larive.1997] et [Ben Haha.2006] ont mesuré des énergies d'activation entre 40 à 45 kJ.mol⁻¹ pour le temps caractéristique d'accélération.

L'énergie d'activation pour la période de latence est difficile à déterminer, comme il notamment dépend de la disponibilité de l'eau comme le montre [Larive.1997].

Dans le modèle de [Saouma et al.2006] cette énergie d'activation est prise entre 75 et 80 kJ mol⁻¹. Cette valeur correspond à l'énergie d'activation de la dissolution de la silice dans une solution alcaline, mesuré expérimentalement aussi par [Larive.1997].

L'effet du chargement extérieur sur le développement est généralement représenté par la réduction de l'expansion asymptotique de même manière que l'humidité relative. [Leger et al.1995] proposé d'utiliser la relation suivante entre l'expansion et la charge appliquée :

$$\varepsilon_{RAS}(\sigma) = \begin{cases} \varepsilon_{RAS}^0 & \text{si } \sigma < \sigma_L \\ \varepsilon_{RAS}^0 - K \log_{10} \left(\frac{\sigma}{\sigma_L} \right) & \text{si } \sigma_L < \sigma < \sigma_{max} \\ 0 & \text{si } \sigma > \sigma_{max} \end{cases} \quad (\text{Equ.VIII.30})$$

σ_L est la contrainte imposée par l'expansion dans des conditions de charge libres; l'expansion ne soit pas n'est pas affecté si la tension appliquée est inférieure à cette valeur. K contrôle la pente d'expansion, et σ_{max} est la contrainte au-delà duquel se produit l'expansion. La fonction est indiquée sur la Fig.1.VIII.9.

Cependant, cette fonction ne tient pas compte de l'effet de l'expansion latérale, ou [Leger et al.1995] a constaté que les paramètres doivent être adaptés cas par cas. Ceci limite l'application de ce type de modèle, plusieurs auteurs renforce la formulation du modèle en considérant l'expansion volumétrique. [Saouma et al.2006] distingue deux effets distincts de la contrainte appliquée :

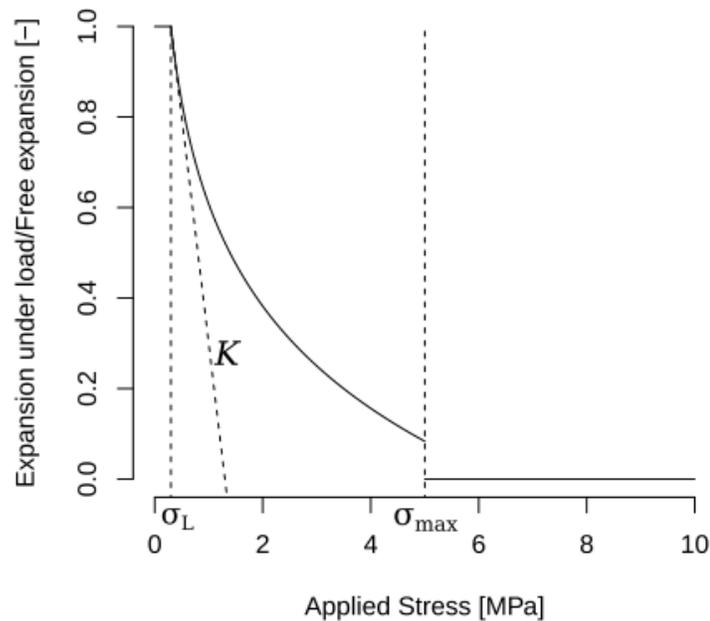


Fig.1.VIII.9: Réduction de l'expansion final en fonction de la contrainte appliquée dans la modèle de microstructure [Leger et al.1995].

Le tenseur des déformations imposées sur chaque axe est pondéré par un facteur qui dépend de l'état de contrainte triaxial. [Saouma et al.2006] identifié neuf cas d'expansion libre de compression isotrope et attribué des pondérations fondées sur des hypothèses mécaniques.

Cependant, dans tous les cas, l'expansion volumétrique imposé reste le même, ce qui est en contradiction avec les résultats expérimentaux de [Larive.1997], [Dunant et al.2010] ou [Multon et al.2006].

Le temps caractéristique τ_{lat} est augmenté en cas de contrainte de compression par un facteur qui dépend de la résistance à la compression de f'_c et la trace du tenseur des contrainte σ .

ϕ est un paramètre qui est égal à 1 si le matériau est sous tension, ou une valeur étalonnée sur l'expérience de [Multon et al.2006] si le matériau est en compression.

$$\tau_{lat} (T, \sigma, f'_c) = \underbrace{\left(1 + \phi \frac{tr(\sigma)}{3f'_c}\right)}_{\text{Contrainte}} \underbrace{\left(e^{E_{a,lat}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}\right)}_{\text{Température}} \tau_{lat} (T_0) \quad (\text{Equ.VIII.31})$$

VIII -3-8-Les modèles Poro-mécaniques

Ces modèles sont basés sur l'hypothèse que de gel de silice expansive se forme à l'intérieur du la porosité du béton. La quantité de gel formé est supposé être une fonction sigmoïde de temps pour reflète les courbes d'expansion expérimentales prouver auparavant par [Larive.1997] ;

Le gel exerce une pression sur les parois des pores, qui se traduit par une expansion macroscopique. Cependant, pour que le gel pour se forme dans les pores, il doit être soit très fluide pour passer d'agrégats au pâte cimentaire, ou formé une réaction trans-solution, qui ne correspond pas à l'expérimentale de [Ben Haha et al.2007] et [Buldeel et al.2002].

La loi de comportement macroscopique dans ces modèles suit (Equ.VIII.32), où B est équivalent au tenseur de Biot utilisé dans la poro-mécanique [Biot.1955], et se réfère à la quantité de gel rempli dans les pores et leur géométrie, et σ_{RAS} est la pression imposée par le gel.

$$\sigma = C : \varepsilon + B : \sigma_{RAS} \quad (\text{Equ.VIII.32})$$

Ces deux paramètres correspondent à une idéalisation de la microstructure du matériau et ne peuvent pas être mesurées expérimentalement. Ils peuvent être corrélés pour une formulation de béton spécifique, ou ils peuvent être obtenue à l'aide des systèmes d'homogénéisation analytiques.

[Li.2002] suppose que les pores où le gel se forme de forme ellipsoïdale, et que le rapport d'aspect de ces pores change au cours de la réaction à cause de la micro-fissuration. Le

coefficient B change avec le change de la propagation des fissures, et le modèle a été en mesure de reproduire les tendances observées dans les expériences uni-axiales de [Larive.1997].

Toutefois, le rapport d'aspect des pores idéalisée a été étalonné sur les expériences, et le modèle ne peut pas déterminer la façon dont ce rapport d'aspect évolue avec l'avancement de la réaction chimique.

[Capra et al.2003] a utilisé la pression de gel pour estimer les dommages causés par la RAG, ce qui se traduit dans des contraintes imposées. Dans son modèle, le gel peut faire pression sur le squelette solide seulement après qu'il a déjà rempli la porosité accessible, ou les fissures ouvert pendant l'initialisation de la RAG (Equ.VIII.33).

Cela retarde l'apparition de l'expansion de la même manière le temps caractéristique de latence dans les modèles phénoménologique.

$$\sigma_{RAS} = (V_{gel} - V_{porosité\ accessible} - V_{fissure})C_{gel} \cdot I \quad (\text{Equ.VIII.33})$$

[Capra et al.2003] identifiés la relations entre $V_{porosité\ accessible}$, σ_{RAS} , V_{gel} , $V_{fissure}$ et le tenseur des déformations total ε à partir d'hypothèses sur la microstructure du béton touchées de RAG. Le remplacement de ces relations dans (Equ.VIII.33) donne σ_{RAS} comme une fonction du volume de gel formés et la déformation actuelle de la structure.

Cependant, les coefficients de ces relations ne peuvent être mesurés expérimentalement et doivent être calibrés pour chaque série d'expériences. Ils n'ont pas en outre considérer le fait que ces relations pourraient changer en présence de contrainte appliquée, la déformation totale est la somme de la déformation élastique, déformation imposée par la RAG, et les déformations inélastiques mécaniques causée par les dommages mécaniques en traction ou en compression.

Ces déformations inélastiques ont été calculées avec un modèle de d'endommagement qui ne tient pas compte de la perte de résistance à la compression due à la RAG observé par de nombreux auteurs, ni du fait que cette perte dépend fortement du type d'agrégat comme le montre [Giaccio et al.2008]

[Grimal et al.2010] ont utilisé une variante du modèle de [Capra et al.2003] qui vise à rendre compte l'effet de fluage au niveau structurel. Les propriétés de fluage du matériau sont étalonnées sur des agrégats non réactifs et sont supposées indépendantes de l'occurrence de la RAG. Le taux d'expansion de la RAG et l'endommagement engendré d_{RAG} sont couplés par l'équation différentielle suivante :

$$\varepsilon_{RAG}(t) = \frac{\dot{d}_{RAG}(t)}{(1-d_{RAG}(t))^2} \varepsilon_{RAG}^{\infty} \quad (\text{Equ.VIII.34})$$

d_{RAG} est calculée à partir de la pression du gel générer avec une relation similaire à (Equ.VIII.33), ce qui en outre prend en comptes le degré de saturation et la température.

Ce modèle tient également compte de la pression dans l'eau au sein de la porosité. Cependant, les coefficients de Biot du gel et de l'eau sont liés à la morphologie des pores, de leur fraction de volume et les propriétés mécaniques du fluide qui les remplit.

Tous ces paramètres microstructuraux changent au cours de la réaction, notamment en raison de l'ouverture des fissures, et donc ces coefficients ne devraient pas être constants.

Plusieurs auteurs ont proposé des variantes de modèles poro-mécaniques. Le modèle de [Bangert et al.2004] décrit explicitement les mouvements d'eau dans la microstructure, et l'utilise pour calculer la pression sur gel. Cependant, le dommage est calculé au microscope comme une fonction empirique de la contrainte maximale dans l'échantillon, ce qui conduit à des dégâts anormalement élevés, même après quelques jours de réaction.

De même le modèle de [Pesavento et al.2012], le coefficient de Biot du gel fait qu'il se forme à l'intérieur de la porosité du béton. Cependant, même si les dégâts dans la microstructure est pris en compte dans l'expression de l'équilibre mécanique et les mouvements de l'eau, il n'a pas été pris en compte dans l'étalonnage du modèle.

Les modèles de genres dérivés de poro-mécanique souffrent d'une description simpliste de la phase solide. Tout d'abord, ces modèles sont des systèmes multi-échelles, et devraient donc tenir compte de tous les hétérogénéités de la même échelle, y compris les fissurations et les natures des agrégats.

Deuxièmement, les l'endommagement dus à la RAG n'est pas répartie uniformément dans tout le squelette solide, ce qui exige une distinction entre les agrégats et la pâte de ciment. Enfin, ils comptent généralement sur un certain nombre de paramètres qui sont impossibles à mesurer expérimentalement. Ces modèles nécessitent un grand nombre de paramètres de validation.

VIII -3-9-Les modèles ITZ

Ces modèles ont été développées pour proposer une meilleure représentation de la microstructure que les modèles poro-mécaniques. Dans ces modèles, chaque agrégat est considéré séparément dans un volume élémentaire représentatif de la pâte de ciment.

La réaction est supposée se produire autour des agrégats dans la zone de transition interfaciale (ITZ).

Ceci correspond à des agrégats de grands réactifs tels que l'opale, mais ne peut pas être appliquée aux agrégats lente réactifs couramment utilisés dans la construction.

[Bažant et al.2000a ;2000b] divise son modèle en un composant chimique qui contrôle la vitesse de réaction, et un composant de la mécanique de rupture, qui décrit les fissurations dans la pâte de ciment.

La fissure autour de chaque agrégat est supposée être un anneau qui se propage dans un plan. L'expansion finale est isotrope obtenue en intégrant sur toutes les orientations possibles de la fissure.

Le modèle ne tient pas compte des interactions entre chaque fissure, et il est limité à de faibles fractions de volume de granulats. Cependant, les manifestations mécaniques de la RAG sont différentes dans les agrégats à réaction lente, qui représentent la majorité des agrégats utilisés dans le domaine.

Le modèle de [Suwito et al.2002] 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.

[Charpin.2013] considère les différents mécanismes de rupture qui se déroulent simultanément dans l'ensemble : décollement autour de l'agrégat et propagation de fissures en forme de penny dans trois directions orthogonales.

Une approche d'homogénéisation est utilisée pour tenir compte de la distribution complète des diamètres de particules.

Il a représenté le fait que la propagation de la fissure change la morphologie de la microstructure, et modifie donc les pondérations calculées lors de la procédure d'homogénéisation. Toutefois, lorsque la charge est trop élevée, le modèle surestime le décollement des agrégats, et sous-estime l'expansion finale.

Ceci peut être expliqué par le fait que la morphologie de la réaction et la propagation des fissures sont mal représentées. En effet, la croissance des fissures dans les milieux viscoélastiques pourrait être plus lente que dans le matériel purement élastique, ce qui pourrait expliquer la surestimation des dommages par le modèle.

Ces modèles peuvent être améliorées si elles décrivent la formation d'un gel dans l'ensemble, au lieu de l'entourer. [Reinhardt et al.2011] utilise la mécanique de rupture au niveau global pour décrire la fracture des roches placées dans des solutions alcalines.

Avec son modèle, il a été en mesure de prédire la pression critique du gel nécessaire pour briser un agrégat en fonction de la taille de l'agrégat. En utilisant ce modèle dans une approche multi-échelle que celle proposée par auparavant il pourrait conduire à des lois de comportement macroscopiques plus précis.

IX-Conclusions

L'importance d'étude la réaction alcali granulaire semble être indiscutable vue que les contestations visuelles de l'effet de la RAG sont abordées, ainsi que les facteurs influent sur son occurrence et le degré de la réaction, les auteurs d'autre part se débâte sur les mécanismes et les approches théorique approprier a adopté pour comprendre le phénomène.

Le phénomène du gonflement chimique des bétons et les mécanismes réactionnelles sont traités par des démarches aux différents échelles. La modélisation microscopique tient à démontrer le mécanisme de la mise en gonflement du matériau d'un point de vue micromécanique.

Alors que les modèles mésoscopique cherchent à mettre en évidence la relation entre la formation du gel et la déformation du matériau et moins d'intention est prêtée à l'influence du processus chimique sur les caractéristiques mécaniques du matériau. Dans le souci de quantifier la dégradation du gonflement du gel d'une structure réellement touchée, une approche mésoscopique sera retenue dans la suite de discussion.

Dans les prochains chapitres, l'approche tomochimique sera retenue à l'aide du cadre théorique propose par [Furusawa et al.1994 ; Zhuang et al.2013]. Reposant sur la base de données fournies par [Larive.1997] du comportement des éprouvettes réactives, on va traiter alternativement les deux aspects radiaux d'une modélisation mésoscopique : le déroulement chimique et son intervention dans le comportement mécanique.

Dans le Chapitre 4 le béton affecter par une réaction est modélise comme un milieu élastique, et la cinétique de mise en gonflement du matériau est discuté par un gel simple.

Chapitre 2

Etudes et méthodes expérimentales de la Réaction Alkali Granulaire

Chapitre 2 : Etudes et méthodes expérimentales de la Réaction Alcali Granulaire

I-Généralité

Dans ce chapitre, les méthodes de test utilisées dans diverses parties du monde sont examinées pour caractérisation de la RAG. Les méthodes d'essai accélérer et un nouveau relativement accélérer sur la base d'expansion sont pris en compte dans ce chapitre.

II-Les Méthodes et essais existants

Comme indiqué précédemment, les méthodes d'essai basé sur la mesure de l'expansion de spécimens sont très courantes dans l'industrie du béton en raison de leur procédure d'utilisation simple et coût relativement faible. Bien que les méthodes d'essai d'extension standard utilisés dans les différents pays varient selon la taille de l'échantillon, la procédure de durcissement, et la limite de l'expansion, ils peuvent être classés en trois catégories générales :

- 1) les méthodes de test de barre de mortier accéléré (Accelerated Mortar Bar Test AMBT), (25 x 25 x 285) mm
- 2) les méthodes de prismes de béton (Concrete Prism Test CPT) , (75 x 75 x 275) mm
- 3) les prismes miniature en béton accélérées (Minature Concrete Prism Test MCPT).
Dans cette section, un examen détaillé est présenté pour les méthodes d'essai d'allongement (expansion) utilisés dans le monde. (50 x 50 x 285) mm

Chaque catégorie des méthodes d'expansion a ses propres avantages et inconvénients. Par exemple, les tests de barre de mortier accélérées sont généralement favorisés parmi les essais d'expansion en raison de leur durée relativement courte.

Toutefois, des inquiétudes en tourne les conditions sévères de contrôle (haute température et de la solution fortement alcaline) et la nécessité d'écraser et tamiser les gravillons peut conduire au rejet d'un agrégat qui peut effectuer de façon appropriée [Folliardet al.2003] .

Bien que l'essai du prisme de béton offre une meilleure fiabilité de la prévision de l'expansion de la RAG, la durée de l'essai est long et peut être considéré comme un inconvénient sur sa

praticabilité.

La durée du test est raccourcie dans le test du prisme de béton accélérée, mais reste long et les relations entre les résultats ACPT (Test de prisme béton accélérée) et les performances sur le terrain demeurent incertaines.

Une méthode d'essai idéal devrait être en mesure de l'identifier rapidement possible alcali-réactivité des agrégats non transformés avec une bonne fiabilité. Il est évident que le compromis inégale entre la fiabilité des tests et de la durée d'essai de ces méthodes d'extension nécessite une amélioration.

Ainsi, une méthode d'essai rapide et potentiellement plus précis sont encore nécessaires pour l'évaluation de la réactivité d'une combinaison d'agrégats et de pâtes.

II-1-Les essais Barre de mortier Accélérer (AMBT)

L'essai barre de mortier accélérer a été développé par Institut national de recherche (NBRI) en Afrique du Sud [Oberholster et al.1986]. Ce test est prescrit par beaucoup d'organismes pour évaluation de la réactivité d'agrégats aux alcalis, y compris la Société American pour les essais and matériaux (ASTM), l'Association American pour les autoroute et fonctionnaires de transport (AASHTO), et l'Association canadienne de normalisation (CSA). Comme suit, plusieurs méthodes d'essai de barre de mortier accéléré sont présentées et comparés.

II-1-1-ASTM C 1260 (ASTM C 1567)

Dans ce procédé, [ASTM C 1260-07.2007], les agrégats sont traités pour une granulométrie standard illustré dans le tableau.3. (Cependant, ASTM envisage également une disposition pour permettre de tester des agrégats dans leur granulométrie telle que reçue lorsque cette la sera spécifié pour un projet.

Il n'y a aucune exigence pour la teneur en alcalins du ciment car ils se trouvent avoir des effets négligeables ou mineures sur l'expansion dans ce test [ASTM C 1260-07.2007].

Les barres de mortier sont prises en fonction d'un rapport entre une masse de ciment et d'agrégats 2:25 et un rapport eau sur ciment (E / C) de 0,47 en masse.

Après 24 heures de durcissement, les échantillons sont retirés des moules et on les place dans des récipients avec de l'eau suffisante pour immerger complètement.

À la suite de l'immersion, les récipients sont transférés dans une étuve à 80 ° C pendant 24 heures. La première lecture de la première longueur de la barre de mortier est prise immédiatement après leur retrait de l'eau chaude.

Après les lectures initiales, les spécimens sont immergés dans des conteneurs avec une solution de NaOH 1N à 80 ° C pendant 14 jours. Au cours de la période d'exposition de 14 jours, des mesures de la longueur de l'échantillon sont effectuées périodiquement, avec au moins trois lectures intermédiaires.

Lors de l'expansion des échantillons est inférieure à 0,10%, les granulats sont considérés comme inoffensives ;

- lorsque l'expansion se trouve 0,10% à 0,20%, les agrégats sont considérés comme potentiellement réactifs;
- lorsque l'expansion est supérieure à 0,20%, les granulats sont considérées comme réactif.

En fait, cependant, ces limites d'expansion ne sont pas universellement acceptées. Car certains agrégats délétères ayant une vitesse de réaction lente pourraient être passés pour « classification négatif », certains sont maintenant augmenter la durée d'essai de 28 jours et la définition de nouvelles limites d'expansion [Grattan-Bellew.1997].

Par exemple, l'Association des normes brésilien a récemment proposé d'utiliser une limite de 0,19% à 28 jours [Sanchez et al.2008].

Pour réduire le risque de la RAG, d'autres fournissent des limites inférieures sur l'expansion. Le ministère de la Défense Américain permet juste une expansion de 0,06% à 14 jours.

Tab.2.II.1 : Analyse granulométrique des grains fins exigé par la norme ASTM C 1260.

Tailles des Tamis		% de masse
% Passant	% Retenue	
4,75 mm	2,36 mm	10
2,36 mm	1,18mm	25
1,18 mm	600 μ m	25
600 μ m	300 μ m	25
300 μ m	150 μ m	15

Lorsque les SCMs sont utilisés dans les AMBTs, la version modifiée de la norme ASTM C 1260, ASTM C 1567 doit être utilisé [ASTM C 1567-04.2008] .

Une certaine quantité de ciment est remplacée par SCMs, et le rapport de liant-agrégats et rapport eau-liant restent les mêmes que les valeurs indiquées dans la norme ASTM C 1260. La combinaison d'ajouts cimentaires et agrégats sera acceptée pour une utilisation si l'expansion est inférieure à 0,10% à 14 jours.

II-1-2-AASHTO T 303

La préparation de barres de mortier et les mesures ultérieures dans [ASSHTO T 303-00.2006] est presque identique à celui de la norme ASTM C 1260. Une petite différence réside dans le rapport E/C lors de la coulée des échantillons.

Dans cette méthode, le rapport E/C nécessaire est de 0,50 au lieu de 0,47 de la norme ASTM C 1260. La limite d'expansion de [ASSHTO T 303-00.2006] est également de 0,1% à 14 jours. L'utilisation d'ajouts cimentaires n'est actuellement pas prise en compte dans cette norme.

II-1-3-CSA A23.2-25A

[CSA A23.2-25A.2004b] est également tout à fait semblable à la norme ASTM C 1260 plus au moins. Cependant, elle nécessite la teneur équivalent en alcalin ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$) du contenu du ciment utilisé estimer a $0,90 \pm 0,10\%$.

En outre, l'exigence de la granulométrie de cette méthode est différente de celle de la norme ASTM C 1260 (voir le tableau.4).

La procédure de durcissement de la [CSA A23.2-25A.2004b] est le même que dans la norme ASTM C 1260 :

- retirer les échantillons de moules après 24 heures de séchage, puis les plonger avec suffisamment d'eau dans les conteneurs stockées à 80 ° C pendant 24 heures.
- après la lecture initiale, les échantillons sont placés dans une solution de 1N de NaOH à 80 ° C pendant 14 jours.

En outre, les critères d'expansion dans la norme est que, lorsque l'expansion est supérieure à 0,15% à 14 jours, les agrégats sont considérés comme réactifs. (à l'exception du calcaire); pour le calcaire, la limite de l'expansion est de 0,10% à 14 jours.

L'efficacité des SCMs dans les méthodes d'AMBT est également introduite dans la norme [CSA A23.2-25A.2004b]. Le rapport eau-liant est modifié pour obtenir un affaissement de 50-100 mm pour béton.

La réduction de la teneur en alcalins dans le mélange en raison de ciment remplacée par SMCs doit être remboursé par l'addition de NaOH.

La conception du mélange proposé avec ajouts cimentaires est considérée comme efficace lorsque l'expansion d'une telle combinaison (SMCs et granulats réactifs) est inférieure à 0,1% à 14 jours.

Tab.2.II.2 : Analyse granulométrique des grains fins exigé par la norme CSA A23.2-25A.

Tailles des Tamis		% de masse
% Passant	% Retenue	
5 mm	2,5 mm	10
2,5 mm	1,25 mm	25
1,25 mm	630 μ m	25
630 μ m	315 μ m	25
315 μ m	160 μ m	15

II-1-4-RILEM TC 106-2 (RILEM AAR-2)

[RILEM TC106-AAR.2000] est la méthode d'essai accéléré utilisé dans la plupart pays de l'Union européenne.

Dans ce procédé, un équivalent de ciment minimum en teneur d'alcalin de 1,0% est nécessaire et un rapport E / C est de 0,47.

Depuis que [RILEM TC106-AAR.2000] est également à l'origine de la NBRI (Norme Sud-Africain) norme, la préparation de barres de mortier et la mesure de l'expansion sont les mêmes que la norme ASTM C 1260, sauf l'exigence d'une analyse granulométrique différente.

La limite d'expansion de cette méthode est de 14 jours est décrite comme suit :

- non réactif si l'expansion est inférieure à 0,10%,
- réactif à plus de 0,20%,
- potentiel réactif pour l'expansion entre 0,10% -0,20% [RILEM TC-191-ARP.2003].

Tab.2.II.3 : Analyse granulométrique des grains fins exigé dans RILEM TC 106-2.

Tailles des Tamis		% de masse
% Passant	% Retenue	
4mm	2 mm	10
2 mm	1 mm	25
1 mm	500 μ m	25
500 μ m	250 μ m	25
250 μ m	125 μ m	15

II-1-5-Essais Barre de mortier Accélérer Chinois (CAMBT)

L'essais Barre de mortier Accélérer Chinois (CAMBT) est une méthode relativement nouvelle qui a été principalement utilisé pour l'évaluation de la RAG en Chine. Le CAMBT a été développé sur la base de la méthode de l'autoclave chinois [Xu et al.1998] dans lequel des échantillons de petite taille de dimension (10 x 10 x 40 mm), n'est pas très approprié pour le test de contrôle de qualité des granulats de source carrière .

Dans le CAMBT actuellement employé, des tailles d'agrégats plus grands sont utilisés de (40 × 40 × 160mm), les barres de mortier sont émises dans l'ordre de conserver les caractéristiques texturales des phases réactives. Le rapport E/C dans CAMBT est 0.33 et trois ratios de ciment/agrégats sont utilisés (10: 1, 2: 1 et 1: 1).

Un ciment à faible alcalin est utilisé et l'addition du KOH supplémentaire au mélange de l'eau pour amener le total des alcalis à 1,5% Na₂O équivalent. Le CAMBT utilise une fraction de taille unique de granulats (0.15-0.8mm) et les procédures de mélange et de moulage suivent les exigences de la norme [CSA A23.2-25A.2004b].

Les agrégats dont une expansion est supérieure à 0,10% après 7 jours de lecture initiale (initial lecture est après l'immersion de 4 heures de solution de NaOH 1N à 80 ° C) sont considérés comme réactif. L'utilisation d'ajouts cimentaires est pas abordée dans la spécification de CAMBT actuelle.

En raison de l'avantage pratique d'utiliser des tailles d'agrégats plus gros a une période d'essai plus courte (7 jours) offerte par le CAMBT, cette méthode a suscité l'intérêt dans le monde entier récemment, et des chercheurs d'autres pays examinent également diverses permutations de cette méthode d'essai [Andic-Cakir et al.2009]; [Lu et al.2006].

[Lu et al.2006] ont examiné l'influence de la taille des particules agrégées sur l'applicabilité du test en évaluant 11 agrégats différents en provenance du Canada, États-Unis, la Norvège et l'Australie.

[Grattan-Bellew et al.2004] ont proposé une méthode CAMBT modifiée en changeant la taille de particule d'agrégat pour différencier les réactions alcali-silice et alcalin-carbonate.

Une recherche plus récente menée en Europe [Andic-Cakir et al.2009] a également adopté une modification de la CAMBT pour l'évaluation de la RAG par utilisation de granulats locaux.

II-1-6-Limitation des essais Barre de mortier Accélérer

Une comparaison des différentes méthodes de AMBTs est résumée dans le tableau 2.4. Bien que ces méthodes suivent la méthode NBRI en adoptant des techniques simples et rapides, ils ont été utilisés dans une variété de régions, ils sont généralement considérés comme trop sévère en raison de leurs conditions d'essai extrêmes, y compris l'utilisation d'une solution de stockage hautement alcaline, une température d'exposition élevée, des granulats fins, et des échantillons avec grande surface de rapports de volume. [Latifee.2013]

En outre, les essais AMBT ne sont pas approprié pour l'examen des combinaisons agrégat / ciment, ou la teneur en alcali du ciment est submergé par une teneur en alcalin élevé.

Ainsi, ces méthodes identifieront certains agrégats d'être réactif, par contre elles peuvent avoir de bonnes performances mécaniques.

Par conséquent, les essais AMBT sont plus appropriée d'être des méthodes de dépistage, et où les granulats potentiellement réactifs peuvent être identifié par d'autres essais comme les méthodes prismes de béton (CPT), qui est considéré comme un test plus fiable. [Thomas et al.2006] ont rapporté que seulement 3 des 184 agrégats testés passés AMBT mais a échoué dans la méthode CPT. [Sanchez et al.2008] ont également trouvé un agrégat au Brésil qui passait au AMBT mais a montré des comportements néfastes dans des structure l'utilisant.

II-1-6-1-Comparaison entre les différentes méthodes d'AMBT:

Tab.2.II.4 : Comparaison des différentes méthodes d'AMBT [Jun.2010]

	ASTM C1260	AASHTO T 303	CSA A23.2- 25A	RILEM TC106-2	CAMBT
Eau/Ciment	0.47	0.50	0.44 (Sable naturelle) 0.50(Sable concassé)	0.47	0.3
Teneur en alcalins dans le ciment (Na₂O eq.)	Non requis	Non requis	0.9±0.1%	1.0%	1.5%
Taille des agrégats (mm)	0.15-4.75	0.15-4.75	0.16-5.0	0.125-4.0	0.15-0.80
Ciment/Agrégats	1:2.25*	1:2.25	1:2.25	1:2.25	10:1, 2:1, 1:1
Taille des Barres (mm)	25×25×285	25×25×285	25×25×285	25×25×285	40×40×160
Curing	23°C, 95%	23°C, 95%	23°C, 95%	23°C, 95%	23°C, 95%
Condition de stockage	RH for 24 heures	RH for 24 heures	RH for 24 heures	RH for 24 heures	RH for 24 heures
température de stockage	80°C	80°C	80°C	80°C	80°C
Solution de stockage	1.0N NaOH	1.0N NaOH	1.0N NaOH	1.0N NaOH	1.0N NaOH
Prémière lecture	Après 24 heures 80°C dans l'eau	Après 24 heures 80°C dans l'eau	Après 24 heures 80°C dans l'eau	Après 24 heures 80°C dans l'eau	Après 24 heures

Critère	<0.1% inoffensif	<0.1% inoffensif	>0.15% reactive (sauf Calcaire)	<0.1% non reactive	>0.10% reactive
	0.1%-0.2%	>0.1%	>0.1%	0.1%-0.2%	(après 7 jours)
	potentialleme nt reactive	potentialleme nt délétère	>0.1% reactive	potentialleme nt reactive	
	>0.2% reactive (après 14 jours)	(après 14 jours)	(Calcaire) (après 14 jours)	>0.2% reactive (après 14 jours)	

Récemment, l'administration fédéral des autoroutes États-Unis (FHWA) a proposé une approche plus quantitative qui corrèle les résultats AMBT et CPT pour un agrégat spécifique.

Si les résultats d'un agrégat coïncident dans la région comme indiqué dans la figure (Fig.2.II.1), les résultats de l'AMBT de cet agrégat ont une bonne corrélation avec les résultats de la CPT.

Cette approche pourrait être utilisée pour déterminer l'efficacité d'ajouts cimentaires et d'adjuvants chimiques [Folliard et al.2008]. Dans l'ensemble, il est recommandé que les méthodes AMBT ne doivent être utilisées, qu'accepter, non à rejeter les agrégats.

Tout agrégat classer réactif ou potentiellement réactive par l'AMBT doit être confirmé par des tests de prismes de béton et de l'analyse pétrographique avant d'être rejetée.

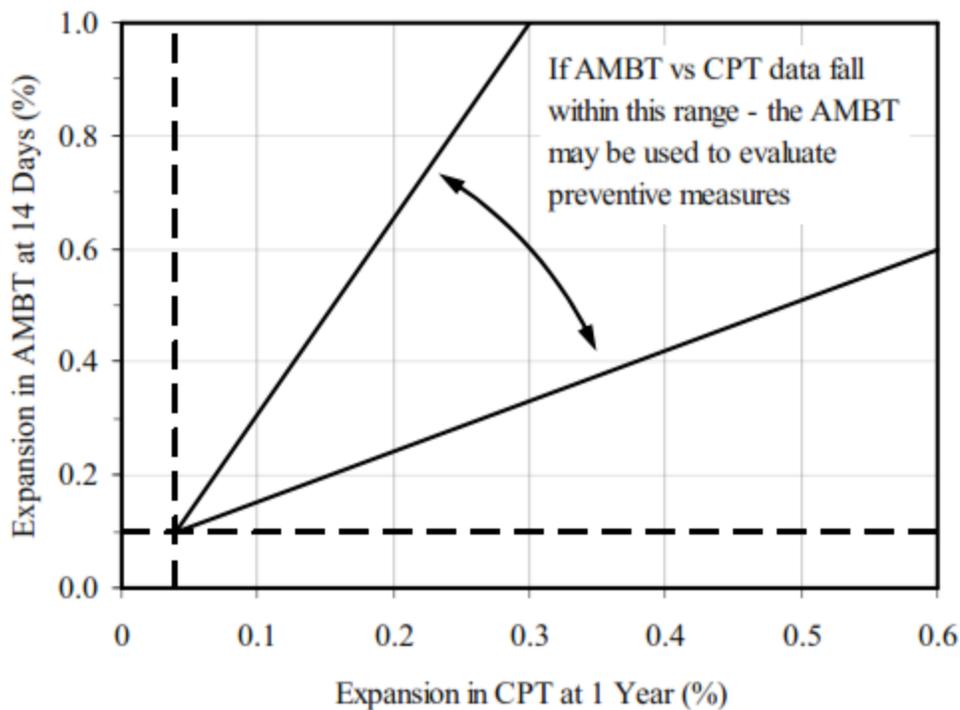


Fig.2.II.1 : Corrélation entre les résultats d'AMBT et les résultats CPT pour un agrégat spécifique [Folliard et al.2008].

II-2-Les méthodes de prismes de béton (Concrete Prism Test CPT)

Les méthodes de prismes de béton est reconnu comme méthode d'essai la plus fiable pour l'évaluation des de la RAG. Lorsque les résultats des méthodes AMBT contredisent les résultats CPT, celui-ci doit gouverner [CSA A23.2-27A.2004c].

Toutefois, la durée de l'essai est significativement plus long par rapport aux essais AMBT. De nombreuses organisations ont des méthodes de CPT standard, y compris ASTM, CSA et RILEM. Ces méthodes d'essai en béton sont résumées ci-dessous.

II-2-1-ASTM C 1293

[ASTM C 1293-08.2008] peut être utilisé pour l'évaluation de la RAG à la fois des agrégats fine et grossière. Un agrégat fin non-réactif est utilisé pour évaluer la réactivité d'un agrégat grossier et un agrégat grossier non-réactif est utilisé pour évaluer la réactivité d'un granulat fin.

Ici, les agrégats non réactifs sont définis comme agrégats satisfaisant à la limite de

l'expansion dans la norme ASTM C 1260 (0,10% en 14 jours).

Lors l'évaluation de la réactivité d'un granulats fin, la granulométrie des agrégats de grande taille utilisé est classée dans le tableau 2.5 et les agrégats fins sont utilisés tel que livré au laboratoire.

Tab.2.II.5 : Analyse granulométrique des grains gros dans la norme [ASTM C 1293-08.2008].

Tailles des Tamis		% de masse
% Passant	% Retenue	
19 mm	12,5 mm	33
12,5 mm	9,5 mm	33
9,5 mm	4,75 μ m	33

Dans ce test, le béton est coulé avec un dosage en ciment de 420 kg/m³ et E/C de 0,42 à 0,45. Le ciment utilisé doit avoir une teneur totale en alcalins entre 0,8% et 1,0%, avec du NaOH ajouté à l'eau de mélange pour amener la teneur en alcali du mélange à 1,25% en masse de ciment, ce qui correspond à un niveau alcalin de 5,25 kg / m³ et un rapport E / C.

Les prismes de béton (75 × 75 × 275mm) sont coulés et durci avec un couvercle en plastique à 23 ° C pendant 24 heures.

Après démoulage, la lecture initiale est effectuée. Par la suite, les échantillons sont immergés dans des contenants scellés à 38 ° C.

La durée du test commence depuis une année et les mesures d'expansion sont prises à intervalles réguliers. La limite d'extension qui indique un agrégat réactif est de 0,04% pour une année de longueur.

[Folliard et al.2008] fournissent une classification plus détaillée de la réactivité globale correspondant à différentes valeurs d'expansion mesurées dans les tests de CPT, comme on le voit Tab.2.II.6.

Tab.2.II.6 : Classification de la réactivité des agrégats.

Classement de la réactivité des agrégats	Description des agrégats réactifs	Une année d'expansion par CPT (%)
R0	Non réactif	<0,040
R1	Modérément réactif	0,040-0,120
R2	Très réactif	0,120-0,240
R3	Extrêmement réactifs	>0,240

D'autres, cependant, utilisent des limites plus strictes pour définir la réactivité des agrégats au cours des essais CPT. Le Ministère de la Défense Américain, utilise une expansion de 0,03% à un an comme une limite pour les granulats non réactifs.

II-2-2-CSA A23.2-14A

Comme les méthodes de prismes de béton, [CSA A23.2-14A.2004a] peut également être utilisé pour évaluer la réactivité des deux agrégats fins et gros. Un gros granulat non réactif doit être utilisé pour l'évaluation de la réactivité d'un granulat fin et un granulat gros non réactif doit être utilisé pour l'évaluation de la réactivité d'un agrégat fins non réactive.

La définition des agrégats non réactifs est la même que dans la norme ASTM C 1293 (une élongation inférieure à 0,10% à 14 jours). Lors de l'évaluation de la réactivité d'un granulat fin, le classement des gros granulats est selon le tableau 2.7, et les agrégats fins sont utilisés tel que livré au laboratoire.

L'élaboration des échantillons selon cette norme est la même que dans la norme ASTM C 1293. Lorsque l'expansion des échantillons est inférieure à 0,04% après un an de test, les agrégats sont classés comme non-réactif ; et si elle est plus de 0,12% à un an de test, les agrégats sont réactifs ; pour des expansion qui se situe entre 0,04% et 0,12% après un an, les agrégats sont classé comme modérément réactif.

Tab.2.II.7 : Analyse granulométrique des grains gros exigence par [CSA A23.2-14A.2004a].

Tailles des Tamis		% de masse
% Passant	% Retenue	
20 mm	14 mm	33
14 mm	10 mm	33
10 mm	5 μ m	33

L'utilisation d'ajouts cimentaires (SCMs) comme une mesure préventive de la RAG est abordée dans la norme [CSA A23.2-27A.2004c].

L'efficacité d'un SCMs spécifique se justifie par le critère suivant :

L'expansion des échantillons contenant une combinaison de SMCs et de granulats réactifs doit être inférieur à 0,04% après deux ans de test pour limiter les dommages induits par la RAG.

II-2-3-RILEM TC 106-3 (RILEM AAR-3)

[RILEM TC-106-AAR.2000b] est une méthode de CPT utilisée en Europe. Dans ce test, la fraction des granulats aura une combinaison en proportions massiques de 30% agrégats fins de dimension {0-4 mm, 30% de 4-10 mm, et 40% de 10-20 mm}.

Les agrégats non réactifs sont définis comme ayant des expansions de moins de 0,05% à 14 jours de test. Le mélange de béton dans ce cas doit être combiné de la façon suivante en fonction des proportions de volume : ciment 14%, eau 20%, granulats fins 20% et gros agrégats de 46% .Le béton est coulé avec une teneur en ciment de 440 kg/m³, qui est un peu plus élevée que dans les essais ASTM et CSA. Cela se traduit par un niveau élevé d'alcalin correspondant d'un mélange de 5,5 kg / m³.

La teneur en alcalins augmenté dans le mélange par rapport aux norme ASTM et CSA peut également provoquer une expansion plus élevé.

[RILEM TC-106-AAR.2000b] suggère une expansion de 0,05% pour une année pour les agrégats non réactifs. Selon [Folliard et al.2008], l'utilisation d'ajouts cimentaires dans le RILEM serait introduites dans RILEM ASR-7 qui ne sont pas encore officiellement publié à ce jour.

II-2-4-Limitation des méthodes de prismes de béton (CPT)

Une comparaison des différentes méthodes de CPT sont résumés dans le Tab.II.8. Les méthodes de prismes de béton sont généralement considérées comme les plus précis pour prédire la performance des agrégats sur le terrain. [Thomas et al.2006] ont indiqué que aucun agrégat jusqu'à présent qui passaient le test de CPT (ASTM C 1293 et CSA A23.2-14A) avait causé des dommages causés par la RAG.

En outre, les méthodes CPT sont également largement utilisés pour évaluer l'efficacité des SCMS [CSA A23.2-28A.2004], [Thomas et al.2006] et de lithium composés [Thomas et al.2006] , [Tremblay et al.2004] pour la mitigation de la RAG.

Malgré l'information fiable qui fournit le CPT, les méthodes du CPT ont un inconvénient évident, la longue durée de l'essai. La durée est d'une année pour CPT sans ajouts cimentaires ou de lithium et deux ans.

Le processus de test est extrêmement fastidieux parfois limite grandement l'application des méthodes du CPT lors la demande d'urgence d'identification de la réactivité des agrégats dans un temps opportun.

En outre, [Thomas et al.2006] et [Ideker et al.2008] ont rapporté deux autres problèmes vis-à-vis les procédés actuels du CPT, qui sont le lessivage des alcalins sous l'effet de la taille des échantillons proposés et de la réduction de l'élongation due à la sélection des agrégats non réactifs dans le mélange.

Ces problèmes peuvent causer une confusion sur la réactivité finale lorsque les agrégats sont lentement réactifs et l'expansion à un an est proche de la limite de 0,04% [Fournier et al.2006].

Tab.2.II.8 : Comparaison des différentes méthodes de CPT [Jun.2010]

	ASTM C1293	CSA A23.2-14A	RILEM TC106-3
Eau/Ciment	0.42-0.47	0.42-0.45	0.45
Teneur en alcalins dans le ciment (Na₂O eq.)	1.25%	1.25%	1.25%
Taille des agrégats (mm)	4.75-19	5-20	0-20
Dosage en ciment (Kg/m³)	420±10	420±10	440
Taille des Barres (mm)	75×75×275	75×75×276	75×75×277±50
Condition de stockage	23°C, 95% RH pour 24 heures	23°C, 100% RH pour 24 heures	23°C, 90% RH pour 24 heures
Température de stockage	38°C	38°C	38°C
Prémère lecture	Après 24 heures	Après 24 heures	Après 24 heures
Critère	>0.04% réactive <0,04% non réactive (après une année)	>0.12% Extrêmement réactive 0,04%-0,12% marginalement réactive <0,04% non réactive (après une année)	>0.10% réactive 0,05%-0,10% potentiellement réactive <0,05% non réactive (après une année)

II-2-Méthode des prismes miniature en béton accélérées (Minature Concrete Prism Test MCPT)

II-2-1-AASHTO TP 110-14

La méthode MCPT développé par [Latifee.2013] est adopté par l'AASHTO comme une nouvelle méthode pour déterminer la réactivité des agrégats vis-à-vis a une réaction alcali-granulaire. [AASHTO TP 110-14.2014]

[Latifee.2013] développe la méthode MCPT sur le plan conceptuel préliminairement du CPT, en grande partie sur la base des méthodes de CPT et AMBT existants. Ce type d'essai est une nouvelle méthode d'essai, est introduit pour évaluer le potentiel des agrégats à la RAG avec une fiabilité supérieure à la méthode de AMBT et qui se corrèle bien avec le méthode de CPT [Latifee.2013].

En choisissons certains aspects de la fonctionnalité de l'AMBT et du CPT. En particulier, les caractéristiques qui rendent le AMBT peu fiables, comme utilisation exclusive de granulats fins, haute température, et la taille d'échantillon petit ;

Avec les caractéristiques du CPT qui le rendent indésirable tel que du stockage des éprouvettes à 100% d'humidité relative qui permet une lixiviation alcaline à partir des spécimens du produire de la réaction, la température d'essai inférieure qui se traduit par une plus longue durée d'essai.

Les caractéristiques bénéfiques de la méthode AMBT tels que le stockage des éprouvettes dans une solution alcaline de 1 mole (1N NaOH) pour accélérer la réaction a été adopté dans la méthode MCPT.

De même, les caractéristiques bénéfiques de la méthode de CPT comme le renforcement de la teneur en alcali du ciment à 1,25% en poids de ciment, utilisation de prisme en béton plutôt que des barres de mortier béton ont été adoptées dans la méthode MCPT.

En plus de ces aspects pour accélérer la réaction en éprouvettes, [Latifee.2013] propose d'utilisé 1.27 cm en max pour les tailles des agrégats gros plutôt que 1.90 cm comme taille

maximale (tel qu'il est utilisé dans CPT), tremper les prismes de béton dans une solution de NaOH, plutôt que de le stocker à 100% d'humidité relative, en utilisant une température de stockage de 60 ° C au lieu de 38 ° C dans le CPT ou 80 ° C dans le AMBT.

Aussi, en utilisant des prismes de béton au lieu de barres de mortier permet d'utiliser des agrégats grossiers dans leur état d'origine, sans les soumettre à des écrasements agressifs et opérations susceptibles de modifier de manière significative le comportement de la réactivité de l'ensemble du système.

Les proportions des matériaux en béton sont basées sur les méthodes de CPT, cependant, la fraction volumique des agrégats gros secs dans le béton est fixée à 0,65 au lieu de 0,70 en raison de la taille maximale inférieure d'agrégat grossier par rapport à celui utilisé dans le procédé de CPT expliqué [Latifee.2013].

Dans ce procédé, des prismes de béton de dimensions (50 mm x 50 mm x 285 mm) sont utilisés. Une dosage en ciment de 420 kg / m³ dans le béton et une teneur en alcalins de 0,90% ± 0,10% est utilisée. Selon ASTM 150 la teneur en alcalins du béton peut se renforcer avec 1,25% Na₂O_{eq}.

La granulométrie requise est présentée dans le Tab.II.9. En règle générale, un agrégat grossier n° 7, conformément à la spécification ASTM C33, répondra aux exigences de MCPT.

Tab.2.II.9 : Analyse granulométrique du MCPT.

Tailles des Tamis		% de masse
% Passant	% Retenue	
12,5 mm	9,5 mm	57,5
9,5 mm	4,75 mm	42,5

Les prismes de béton préparés sont découlés après 24 heures du coulage. Après avoir pris la première lecture de la longueur, les prismes sont durcis dans l'eau à 60 ° C pendant 24 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 une température de 60 ° C.

Des lectures ultérieures de la longueur d'élongation sont périodiquement prélevés à des intervalles périodiques de 3, 7, 10, 14, 21, 28, 42, et 56 jours.

Dans les chapitres Nous allons utiliser la méthode ASTM C1260 et MCPT

II-3-Durabilité

Durabilité du béton est sa capacité à résister aux actions des conditions environnementale, attaque chimique, abrasion ou tout autre processus de dégradation [ACI].

Le béton durable prévoit des limites pour un ratio maximum eau/ciment, teneur minimale en alcalin dans le ciment, épaisseur de la couverture suffisante, et la présence de quantité de chlorure et de sulfates dans le béton, de plus une faible perméabilité que possible, ainsi que l'interface pâte/granulat et la nature des hydrates formés lors de l'hydratation du ciment [Baron et al.1992]. La durabilité à long terme, la maintenabilité et la sécurité des structures peuvent être endommagés par la réaction alcali-silice [Bâcha et al.1993, Bang et al.2010].

La durabilité peut être influencé par de multitude de paramètre en cite comme titre d'exemple sans s'y limiter :

L'influence du rapport E/C ; la durée de cure humide ; addition de la fumée de silice ; le degré de saturation ; et la température.

II-3-1-Perméabilité

Conformément au rapport technique [ACI31.1988], la perméabilité est définie comme la propriété d'écoulement dans un milieu poreux, ce qui caractérise la facilité avec laquelle le fluide passe à travers, sous l'action d'une pression différentielle, ou l'inter-connectivité des vides et des fissures joue le rôle majeur.

II-3-2-Porosité

La porosité est une caractéristique essentielle du béton durci est le rapport du volume des vides au volume total. Le lien établi entre la porosité du béton et sa résistance a une

importance non discutable ou elle facilite le transport et la réserve d'agents susceptible d'être agressifs ou contribuant dans le processus d'une éventuelle attaque chimique. C'est donc un facteur déterminant de la durabilité du béton.

Nous allons par la chapitre qui suit examiner de près l'effet de la RAG sur la perméabilité et porosité du béton affecter. La porosité de l'agrégat augmente également la vitesse et la réactivité de la RAG [Tomas et al.2007, Farny et al.1997].

III-Méthode de diagnostic de la RAG

Structures affectées par la RAG manifeste habituellement trois signes :

- 1) l'expansion du béton,
- 2) des fissures sur surface,
- 3) 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 (1) et (2) 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 électron à balayage (MEB). Le diagnostic peut être effectué par le processus suivant (Fig.2.III.1).

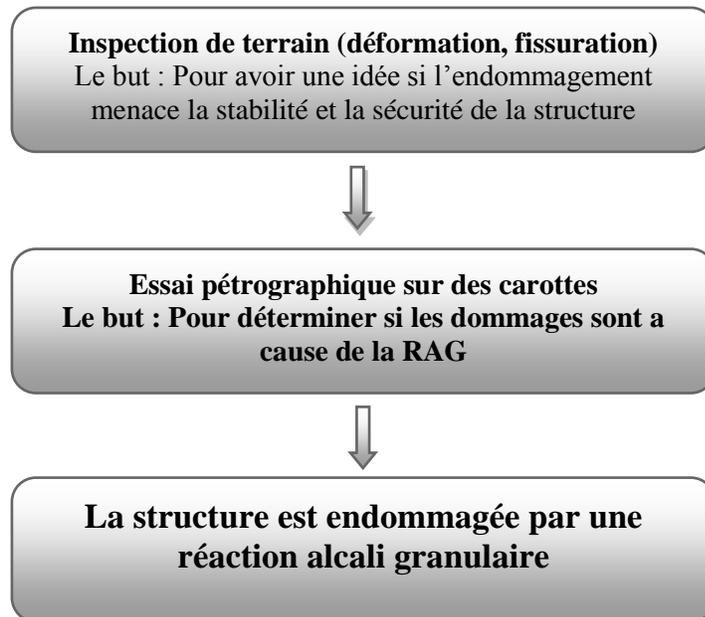


Fig.2.III.1 : processus de diagnostic et de requalification de la structure endommagée [Fasseu et al. 2003]

Dans le processus de diagnostic, l'inspection du site de mesure comprend principalement le craquage et la déformation de la structure.

III-1-Site inspection

Dans le processus de diagnostic, l'inspection in-situ comprend principalement le fissures et la déformation de la structure.

III-1-1-Mesure des fissurations [Fasseu et al. 2003], [Godart et al. 1992]

Les mesures sont effectuées avec une fissure mètres sur plusieurs modèles de référence de quatre axes (horizontal, vertical et deux médiatrices) sur une superficie de 1 m². Pour des raisons de précision, seules les fissures ayant largeurs d'ouverture supérieure à 0,05 mm (seuil de détection visuelle) sont enregistrés.

Un « indice de fissuration » (CI) qui est utilisé pour indiquer l'étendue de la fissuration, est calculée par l'ouverture totale de la fissure par mètre (mm / m). Cet indice peut être calculé pour chaque axe, ou évaluée pour la zone :

CI sur un axe = la moyenne de la largeur des fissures, divisée par la longueur de l'axe

CI de la zone = la moyenne des quatre indices de fissuration mesurées sur les axes.

III-1-2-Mesure de déformation

La mesure utilise des équipement topographique de mesure de distance. Le principe est basé sur la propagation entre l'émission et la réception par des réflecteurs optiques. En général, la valeur (D_m) est exprimée par la déformation par une année comme : mm / m / an.

III-1-3-Analyser des résultats de mesure de fissuration et de déformation

Les fissurations et les déformations initiales sont les signaux qui attirent l'attention sur la pathologie des structures. La surveillance est important pour évaluer le comportement des structures dans le temps.

Après une longue période de surveillance, les résultats peuvent être analysés sur le degré d'endommagement des structures. Habituellement, une structure à déformation supérieure à 0,5 mm / m / an est considéré comme gravement affectée par une réaction étendue [Fasseau et al. 2003].

III-1-4-Essai de fluorescence d'uranyle

Le but de cet essai est de déterminer si la RAG est la raison pour laquelle la fissuration sont présents, car la présence d'une déformation et fissuration peuvent être causées par d'autres problèmes. L'examen des produits sur la surface de la fissuration est utile pour déterminer la pathologie. [Fasseu et al.2003] suggère l'essai de fluorescence.

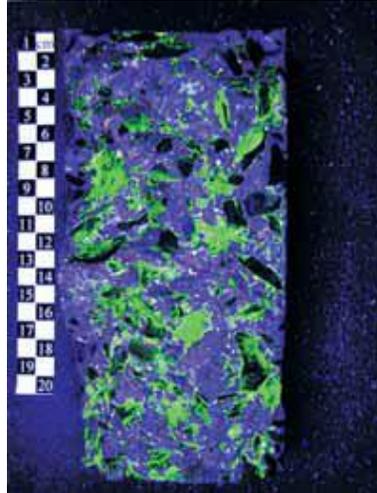


Fig.2.III.2 : Essai avec l'acétate d'uranyle à la lumière UV [Fasseu et al. 2003]

Les produits de la RAG sont identifiés par « coloration » avec ions uranyle, qui ont une fluorescence jaune verdâtre caractéristique sous courte longueur d'onde de la lumière Ultra Violé (UV) (Fig.2.III.2).

Cette méthode est rapide pour tester la présence de gel de silice réactif, mais il ne peut pas exclure la présence de cristaux d'ettringite différé.

Ainsi le MEB ou d'autres méthodes pétrographiques sont nécessaires pour identifier la RAG. La Fig.2.III.3 présente les différentes formes de gel de la RAG et les cristaux d'ettringite différé. [Poole.2016] explique que la principale différence qui distingue la RAG d'une DEF est la présence d'un produit de gel à l'interface agrégat/pâte de ciment ainsi qu'une propagation de fissures ou microfissures dans la pâte de ciment, ou en vue de prouvé cela on va le voir dans le chapitre suivant.

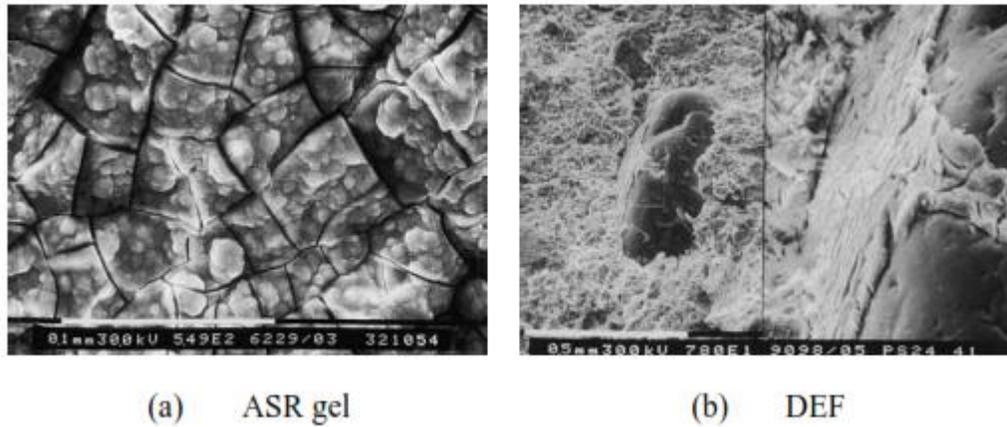


Fig.2.III.3: gel de silice et cristaux d'ettringite différenciés à l'aide du MEB [Fasseu et al. 2003]

III-1-5-L'expansion résiduelle

L'essai le plus fréquent pour mesurer l'expansion résiduelle des structures endommagées en effectuant sur des carottes extraites des structures affectées par la RAG des séries d'essais dans des conditions de stockage à 38 ° C et 95% d'humidité relative (RH). Une courbe d'expansion classique est représentée sur la Figure.29 [LPC 1997].

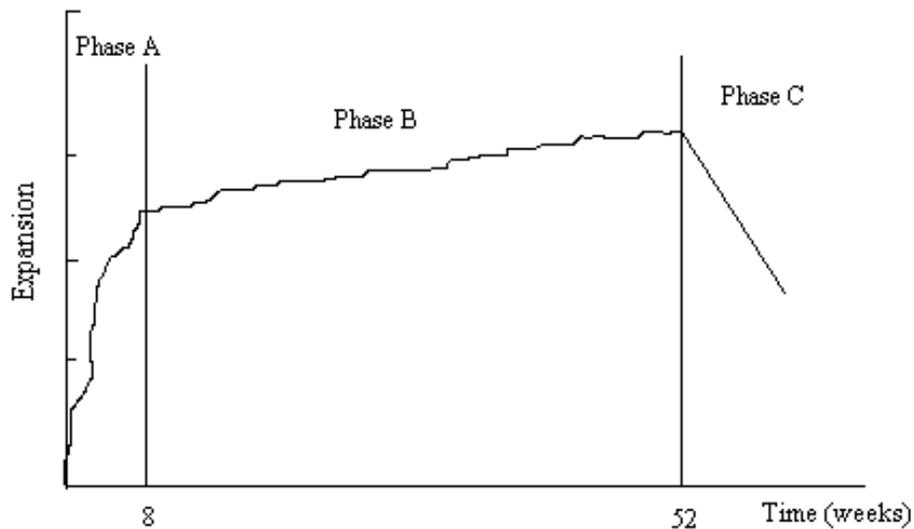


Fig.2.III.4: courbe d'expansion résiduelle (à 38 ° C, humidité relative > 95%) [LPC 1997].

Phase A : Cette période peut varier largement, mais selon le [LCPC 1997], cette période est considérée comme les 8 premières semaines, l'expansion de cette période est surtout due au retrait hydraulique et l'absorption de l'eau par les produits hydrophiles.

Par conséquent, l'expansion de la phase A sont pas prises en compte comme expansion de la RAG. Cependant, il se pose le débat quant à savoir si aucune expansion du a la RAG se produit au cours de cette période [Moulton et al. 2008].

Phase B : L'expansion au cours de cette période (8 ~ 52 semaines) est principalement attribuable à la RAG. La courbe augmente lentement, et ne montre aucun aspect évident asymptotique. Le gonflement de cette phase est généralement considéré comme représentatif de l'expansion résiduelle.

Phase C : Cette phase dure environ deux mois. La réduction de l'expansion peut être attribué à la dessiccation lorsque les échantillons sont retirés de l'environnement humide.

IV-La pétrographique

IV-1-Introduction

Le béton est un matériau de construction essentiel et irremplaçable dans le monde moderne. Ces derniers temps, les progrès technologiques dans la fabrication de ciments et de l'expansion de l'utilisation des bétons et matériaux connexes en génie civil ont conduit à la nécessité d'une pratique, la compréhension scientifique de ces matériaux et les relations entre leurs compositions et leurs propriétés.

La nature même du béton et sa variabilité innée sur de très petites échelles nécessite des techniques d'investigation qui permettent l'examen et l'analyse à des niveaux microscopiques et submicroscopiques [Poole et al.2016].

Un large éventail de techniques pétrographiques sont actuellement disponibles, avec les microscopes polarisant et les microscopes électroniques à balayage (MEB) à être particulier bien établi comme des techniques d'investigation géologiques.

Ces mêmes méthodes ont été étendues et développées pour étudier le béton et ses constituants. Ils sont uniques en apportant des éclairages sur la minéralogie, chimie et les caractéristiques de la microstructure de ces matériaux et fournissent ainsi une base scientifique de compréhension qui permet le comportement physique et mécanique des matériaux et prédire leur comportement futur [Poole et al.2016]

IV-2-Analyse pétrographique

L'analyse pétrographique est un test de dépistage rapide. La vitesse de cette méthode est entièrement dépendante à la connaissance et l'expérience de la personne (pétrographe) qui procède à l'inspection, vue que la technologie qu'il l'entoure a fait que cette méthode a une efficacité largement apprécié.

Le test consiste à l'inspection sous un microscope optique avec différents filtres qui permettent au pétrographe d'identifier divers minéraux et des phases minérales dans l'échantillon.

Les caractéristiques graphiques peuvent être corrélées à l'expansivité lorsque le matériau est bien connu [Mo et al.2007]. Les échantillons peuvent être étudiés plus en utilisant le microscope électronique à balayage (MEB) si obliger.

Les échantillons peuvent être ensemble, monté dans des sections polies, colorer pour leur donner un contraste et même les gravé par des acides faibles pour aider à exposer les minéraux pour l'étude [Monnin et al.2006].

L'avantage de ce méthode est sa vitesse évidente et la préparation minimale et de travail pour effectuer l'essai. Les inconvénients sont assez sévères et limitent l'application de la pétrographie comme le seul test de dépistage pour la RAG. Le premier problème est la compétence nécessaire pour évaluer correctement le matériel. Le pétrographe doit être expérimenté avec le type de matériau et plus particulièrement conscient du niveau de potentiel de la RAG pour les minéraux individuels.

IV-3-Équipement et méthode pétrographique

IV-3-1-Le microscope polarisant

Le microscope polarisant est conçu pour analyser la lumière transmise ou réfléchi à partir de source de lumière, ce qui nécessite une optique sans contrainte aligné avec l'axe optique du microscope [Poole et al.2016].

Certains fabricants publient des textes courts sur la microscopie pour le débutant, et il y a un certain nombre de textes plus détaillés qui sont utiles pour expliquer l'utilisation pratique des différents composants du microscope, y compris une gamme de manuels techniques :

l'un est un texte d'introduction sur la microscopie [Bradbury et al.1998] , le seconde sur la microscopie à lumière polarisée [Robinson et al.1992] et un autre sur la microscopie à fluorescence [Ploem et al.1987]. [Loveland et al.1970] explique de façon détaillée sur la microphotographie qui est toujours d'actualité.

La brève description ci-dessous présente les parties d'un microscope pétrographique universelle typique pour observations lumineux transmis qui est approprié pour la pétrographie béton et ses constituants.

IV-3-2-Composants caractéristiques d'un microscope polarisant

Les détails des composants du microscopes polarisant varient selon le fabriquant, mais la plupart sont construites à partir d'une série de modules de base. En termes généraux, les détails essentiels d'une qualité de la recherche en utilisant un microscope polarisant a bute pétrographique peuvent être résumé comme suit :

1- Un support universel (Fig.2.IV.1). Le stand doit être suffisamment robuste pour fournir suffisamment la stabilité à l'appui des accessoires lourds. Il supportera les contrôles axés graduées et les dispositions pour la fixation de systèmes d'éclairage transmis.

2-Systèmes d'éclairage (Fig.2.IV.1), utilisable en pétrographie du béton nécessite une transmission de source lumineuse avec des commandes de centrage et un système de condenseur intégré. En règle générale, il utilisera une lampe à halogène de tungstène 50 ou

de 100 W qui possède une alimentation électrique réglable.

3- Support de l'échantillon (Fig.2.IV.1). Le support est une plate-forme tournante circulaire, gradué en degrés autour de son périmètre, qui peut être serré et a provision pour 45 °.

4- Système de condensateur (Fig.2.IV.1). Le système de condensateur pour un microscope pétrographique est un achromatique à deux lentilles système d'Abbe sans contrainte avec une ouverture numérique.

5- Les lentilles d'objectif (Fig.2.IV.1). La plupart des modèles actuels acceptent cinq ou plusieurs objectifs dans un nez rotative. Chaque objectif aura des colliers ou des bagues comme un moyen de centrage individuel.

6- Une tête trinoculaire (Fig.2.IV.1). Est une caractéristique commune de nombreux microscopes de recherches est conçu pour permettre une visualisation binoculaire conjointement avec des dispositions pour l'utilisation de caméras numériques pour la photographie et pour l'analyse d'image pour le traitement ou l'affichage.

7- Oculaires (Fig.2.IV.1). Le choix d'oculaires est limité à l'achat de ceux adaptés aux objectifs en cours d'utilisation, car les oculaires peuvent contenir une partie de la correction conçue dans le système optique.

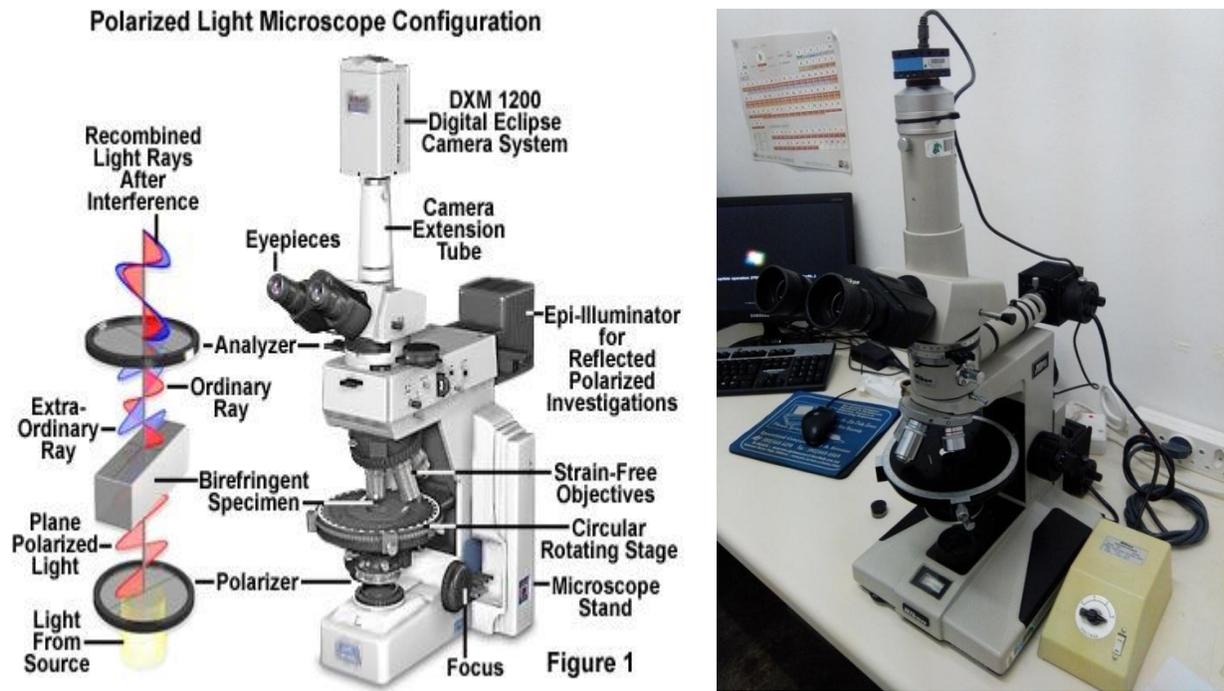


Fig.2.IV.1: Les composants d'un microscope polarisant.[microscopuyo.com]



Fig.2.IV.2 : Une section mince de béton sous un microscope polarisant à éclairage UV.
[Poole et al.2016]

IV-3-3-Procédures et méthodes

Les techniques pétrographiques, en particulier ceux qui utilisent les microscopes électroniques à balayage et polarisation, fournissent un moyen unique et essentiel d'enquêter sur les bétons et matériaux pour fournir des informations définitives relatives à la minéralogie, la conformité avec les spécifications, les caractéristiques de composition, de fabrication et la qualité.

Ces techniques sont également utilisées pour fournir des informations médico-légales relatives aux mécanismes et les causes de la dégradation, la pourriture et les dommages de toutes sortes. La complexité et la profondeur requise dans une étude pétrographique dépendent bien sûr une enquête particulière. Ceci est illustré schématiquement sur la figure Fig.2.IV.3, avec la complexité croissante de façon séquentielle, les étapes interdépendantes sont résumées comme suit.

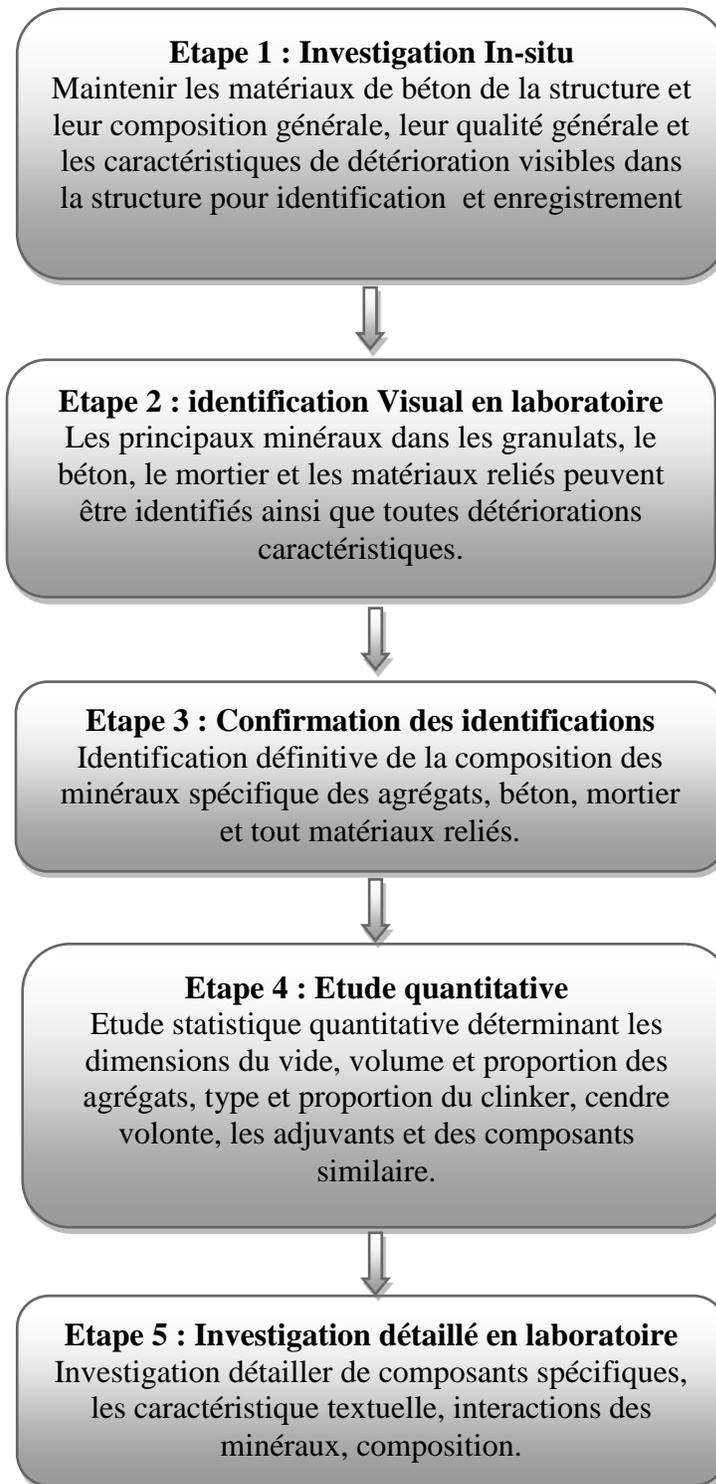


Fig.2.IV.3 : Un schéma illustrant les étapes d'enquête pétrographique en fonction de l'information et le détail qui est requis.[Poole et al.2016]

Un certain nombre de procédures et spécifications standards ont été développés pour l'évaluation pétrographique des granulats pour le béton. En outre, il existe également de nombreux documents et de guides concernés avec des types spécifiques d'investigation pétrographique des granulats, comme :

ASTM C33 / C33M-08, (2008), C295-09, (2009), BS 7943 (1999) et RILEM AAR -1 (2003) sont concernés par la spécification, l'identification pétrographique des granulats, le potentiel de la réactivité des agrégats a la RAG. [Poole et al.2016]

IV-4-Pétrographie des granulats

IV-4-1-Aspect général

Les agrégats à la fois nouvelle et sources existantes nécessitent souvent être évaluée pour leur aptitude à l'emploi dans le béton. L'enquête savoir le potentiel de réactivité de ses agrégats a une éventuelle RAG est une partie essentielle, mais il faut reconnaître que, dans de nombreux cas, d'autres propriétés auront un potentiel plus important de l'influence sur la performance et la durabilité des agrégats [Nixon et al.2016].

Toute évaluation d'une combinaison d'agrégats pour une éventuelle RAG devrait idéalement commencer par les examens pétrographiques des agrégats, qui établit l'identification individuel des compositions des agrégats et les concentrations de tous les constituants potentiellement réactifs.

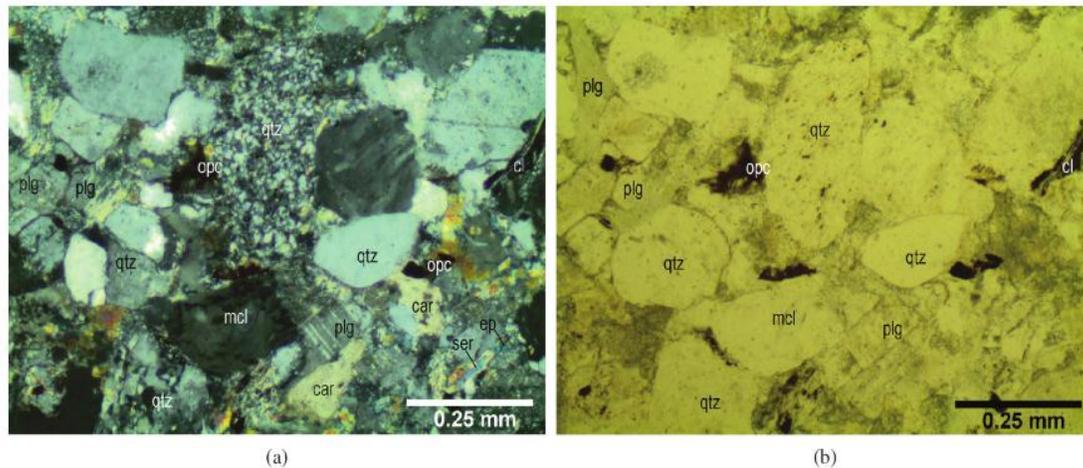


Fig.2.IV.4 : Vue de sous-grains de quartz microcristallines formés par recristallisation, (a) observée en utilisant avec des polarisant croisés, (b) observée en utilisant la lumière polarisée dans le plan. (qtz = quartz, plg = plagioclase, mcl = microcline, car = carbonate, ser = sericite, cl = chlorite, opc = opaque minerals, ep = epidote).[Neto et al.2014]

IV-5-Pétrographie du béton

IV-5-1-Aspect général

L'examen pétrographiques de béton sont généralement effectuées en raison de la dégradation prématurée d'une structure en béton existante ou d'un problème lors d'un projet de construction. Une pétrographie est faite pour déterminer la cause du problème et souvent de déterminer qui est responsable. [CRT.2016]

La valeur du microscope pétrographique comme un outil pour l'étude du béton a été largement reconnue. La du pétrographie béton est une méthode efficace pour examiner le ciment, béton et autres matériaux de construction et souvent fournit des informations utiles sur les problèmes qui leur sont associés.

Les méthodes microscopie sont des techniques utiles pour l'examen de la texture du béton, la détérioration lorsqu'il est combiné avec des techniques complémentaires appropriées telles que les microscopes électroniques et les analyses chimiques.

IV-6-Examen pétrographique du béton dans les sections minces

Les sections minces sont nécessaires pour obtenir un maximum d'informations d'un examen pétrographique du béton. Une évaluation pétrographique complète nécessite souvent analyse pétrographique à section mince impliquant :

- 1) l'examen de type et la composition du granulat de grande taille et fins
- 2) et la détermination de la nature de la pâte de ciment et le type de ciment.

La pratique standard pour examen pétrographique du béton durci est bien expliquée dans les normes citées auparavant. Certaines des caractéristiques générales et spécifiques de la description pétrographique qui sont nécessaires lors d'un examen pétrographique de routine, sont résumés ci-dessous. [St John et al.1998]

IV-6-1-Caractéristiques générales

- a. Une proportion de volume de gros granulats, granulats fins, pâte de ciment et vides d'air.
- b. Granulométrie et forme des agrégats
- c. Présence ou l'absence d'agrégats artificiels et les remplacements cimentaire; le type, la taille et les proportions volumiques de ces additions particulières.
- d. Nature, type et les proportions des vides d'air.

IV-6-2-Caractéristique Spécificités

- a. Une types des roches et minéraux leur proportions, degré d'altération des particules d'agrégats (si elles sont fissurées ou ont interagi avec la pâte cimentaire).
- b. La nature, la taille et l'état des grains de clinker restantes dans le ciment; Caractéristiques des gels de ciment d'hydrate; Taille et disposition d'hydroxyde de calcium cristallisé dans la pâte. La nature et l'étendue de carbonatation due la pâte de ciment [Sang.2001].
- c. La présence et la nature des vides ou fissures de remplissages; preuve et nature des réactions anormales à l'intérieur de la pâte de ciment ou autour des granulats, preuve de ségrégation ou d'orientation préférée de l'agrégat, la répartition inégale de l'eau dans le mélange, un mélange incomplet des constituants du béton, le lessivage des composants du béton[Sang.2001].

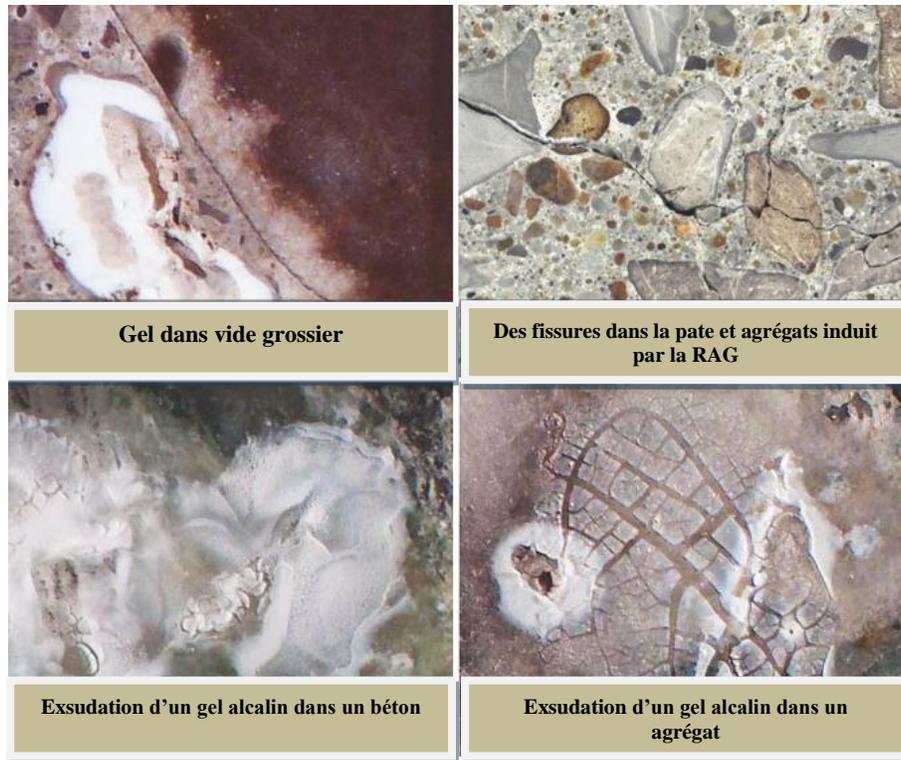


Fig.2.IV.5 : Visualisation à l'aide du microscope polarisant d'un béton atteint par la RAG dans différents degrés de détérioration. [Vega.2014]

En résumé l'examen pétrographique peut déterminer une série des paramètres, tel que :

- (i) Type, proportions, classement, forme et état des agrégats,
- (ii) Nature de la pâte de ciment, notamment des additions minérales telles que les cendres volantes / SCMs, et degré d'hydratation.
- (iii) la présence de matières nocives, et vides dans la pâte de ciment,
- (iv) degré de carbonatation,
- (v) liaison entre l'agrégat et la pâte cimentaire,
- (vi) preuve de présence de certaines formes d'attaque chimique comme l'attaque sulfatiques, et de la réaction alcali silice,
- (vii) degré des dégâts de feu et de haute température sur le béton.

V-Conclusion

Dans ce chapitre, notre enquête bibliographique nous a mené sur les différentes méthodes expérimentales accélérer aux essais de longue durée pour le diagnostics de la réactivité d'un béton en particulier composé d'agrégats susceptible d'être potentiellement réactifs ou réactifs envers une réaction alcali granulaire avec les limites de chaque type d'essais, de plus l'exploration des structures juger touché par la RAG par des essais in situ pour mesuré les fissurations, les déformations, preuve de présence des produits de la réaction par essais chimiques, ainsi que déterminations des expansion résiduelle éventuelle dans une structures touché par la RAG. L'utilisation d'essais en laboratoire de façon mécanique seulement nous donne une vision moins claire sur la réaction et la certitude de son occurrence, à cet effet l'analyse pétrographique doit être accompagné aux essais de réactivité durant l'investigation sur une réaction alcali granulaire. Dans le chapitre suivant le couplage entre les essais de réactivité et l'analyse pétrographique est utilisé pour prouver la RAG.

Partie 2

Etude de la Réaction Alkali Granulaire

Chapitre 03

Etude expérimental de la Réaction Alkali Granulaire

Partie 2 : Etude de la réaction alcali silice

Chapitre 3 : Etude expérimental de la RAG

I-Méthodes et essais adopté

I-1-Principes ayant guidé nos choix expérimentaux

Nous avons 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 granulats 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.

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 a 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.

II-Justification du choix des matériaux

II-1-Ciment

Nous avons choisi un seul et même ciment pour la totalité de nos 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 minéraux.

II-2-Granulats

Notre 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.

II-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.

III-Mode opératoire

III-1-L'essai Barre de mortier Accélérer (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 :

Tab.3.III.1 : Proportions de mélange pour la formulation des prismes de béton miniature.
[Latifee.2015]

Ciment (Kg/m3)	420
E/C=	0,47
A/C=	2,25
Eau (L)	197,4
Agrégats fins (Kg)	945

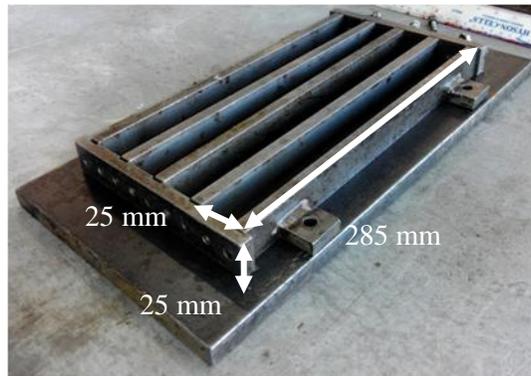


Fig.3.III.1: Moules d'une barre de mortier.



Fig.3.III.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.



Fig.3.III.3: Les récipients pour les barres de mortier.



Fig.3.III.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.

Tab.3.III.2 : Évaluation de la réactivité de granulats par ASTM C 1260 [ASTM C 1260-07.2007].

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

III-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.

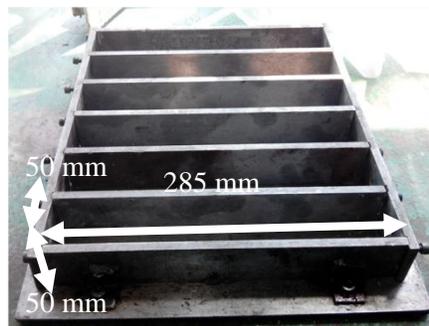


Fig.3.III.5: Moules à prisme miniature à béton.

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 3.5.

Tab.3.III.3: Granulométrie exigé par MCPT. [Latifée.2015]

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

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 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 arrêtons 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 :

Tab.3.III.4: Proportions de mélange pour la formulation des prisme de béton miniature.
[Latifée.2015]

Contenue du ciment/ kg/m³	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)

IV-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 $60 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ pour le MCPT et $80^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ pour l'ASTM pour toute la durée des essais.

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 :

$$L\% = \frac{L_x - L_i}{G} \times 100 \text{ (Equ.III.1)}$$

Où,

L = changement de longueur à x jours, %

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

L_i = 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%.

V-Caractéristiques des matériaux

V-1-Composition chimique du ciment

Nous avons 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 Tab.3.V.1.

Tab.3.V.1: composition chimique du ciment CEM 1 52.5N

CEM 1 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

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%).

V-2-Granulats

V-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 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.

V-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.



Fig.3.V.1: 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.

V-2-1-2-Quartzite

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

Le quartzite est une roche métamorphique formée lors 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.



Fig.3.V.2 : 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.

V-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.

V-2-2-1-Les résultats pour la méthode AMBT

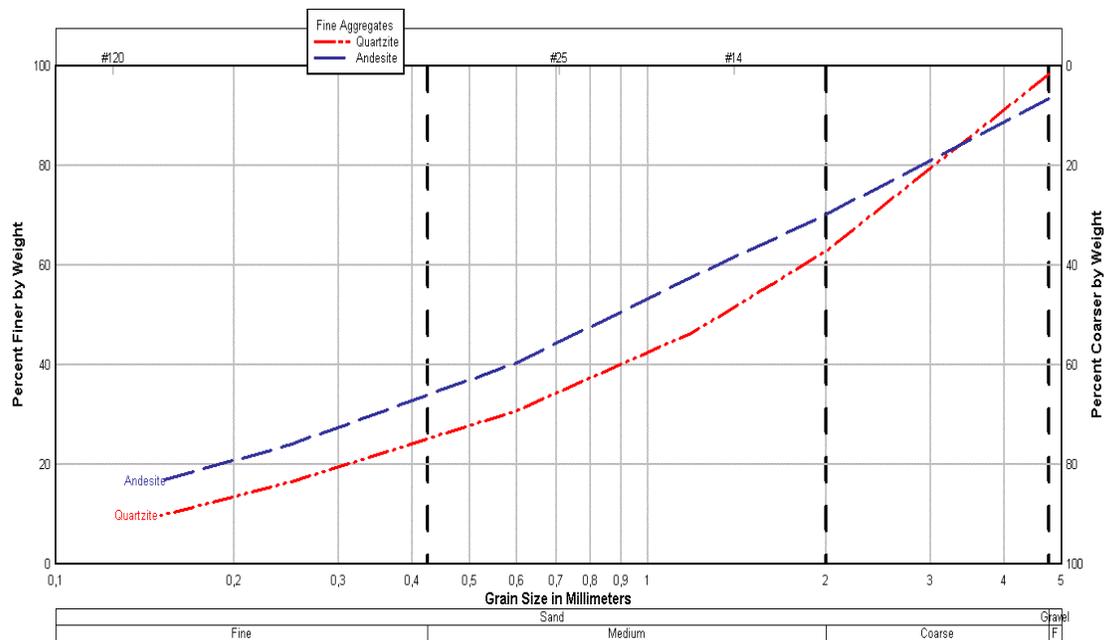


Fig.3.V.3 : Résultat de l'analyse granulométrique des agrégats fins pour l'andésite et le quartzite

V-2-2-2-Les résultats pour la méthode MCPT

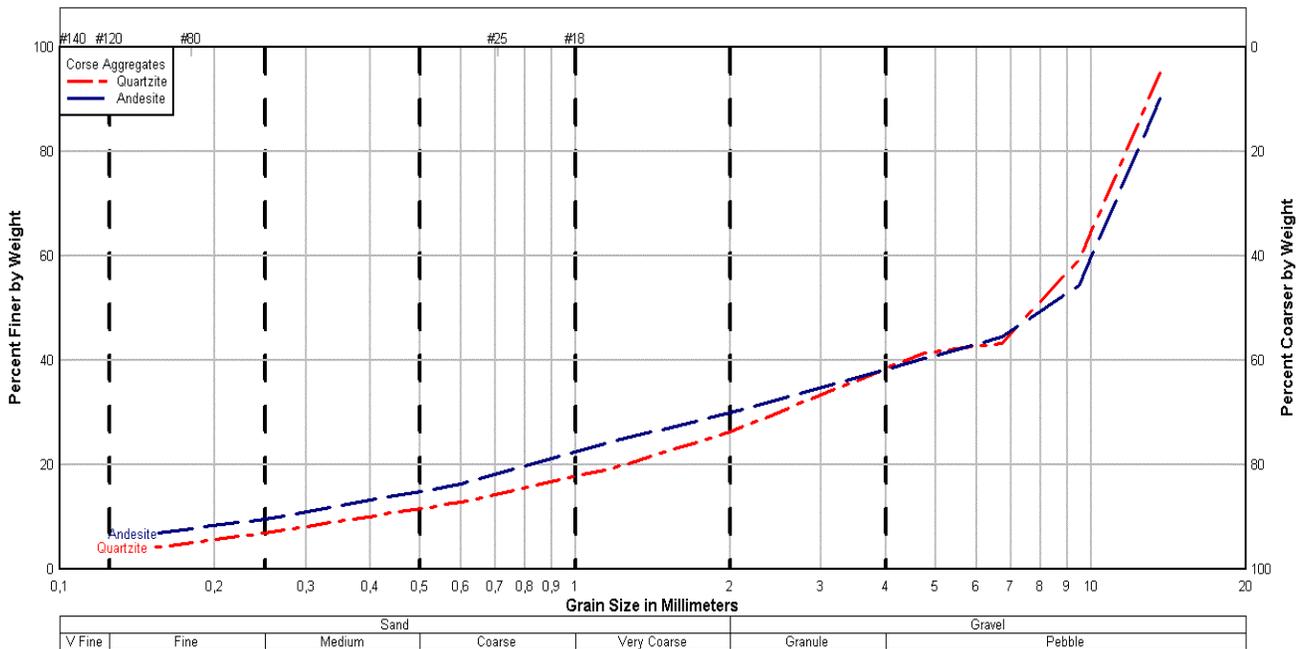


Fig.3.V.4 : Résultat de l'analyse granulométrique des agrégats pour l'andésite et le quartzite

V-3-Composition chimique des agrégats

V-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.

V-3-2-Résultats de la spectrométrie de fluorescence à rayons X**V-3-2-1-Andésite**

Tab.3. V.1 : composition chimique de l'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	13,72	0,24	1,95	0,05	0,9	2,75	3,19
	K₂O	Na₂O_{equ}	TiO₂	P₂O₅	Cr₂O₃	NiO	TOTAL	LOI
	4,98	6,46684	0,299	0,13	0,01	0,0016	99,75	1,59

L'analyse chimique de l'andésite indique que la présence de la silice n'est à prendre à la légère, vu une teneur en alcalin équivalent très grande (Na₂O_{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

V-3-2-2-Quartzite

Tab.3.V.2 : composition chimique de l'andésite

Quartzite	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O
Minéraux majeurs par masse. %	77,4	11,21	0,54	4,38	0,04	1,04	0,43	0,09
	K₂O	Na₂O_{equ}	TiO₂	P₂O₅	Cr₂O₃	NiO	TOTAL	LOI
	2,49	1,73	0,74	0,08	0,08	0,038	98,55	2,37

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

ASTCM C150)) et un pourcentage de chaux inférieur à celui de l'andésite, ou la réaction aura une source abondante en alcalin.

V-3-3-Caractéristique cristalline des agrégats

V-3-3-1-Caractérisation structurale (DRX)

La réaction alcali-granulat se produisent généralement dans les agrégats par un mécanisme de dissolution- précipitation, au cours de laquelle la silice amorphe et mal cristallisée, et un gel de silice se cristallise par précipitation. L'analyse par diffraction des rayons X nous a permis 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 indexés en la comparant ensuite avec le (COD), base de données contenant des dizaines de milliers de motifs de référence pour l'identification des phases chimiques qui constituent chaque agrégat.

V-3-3-2-Les résultats de la DRX

V-3-3-2-1-Andésite

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

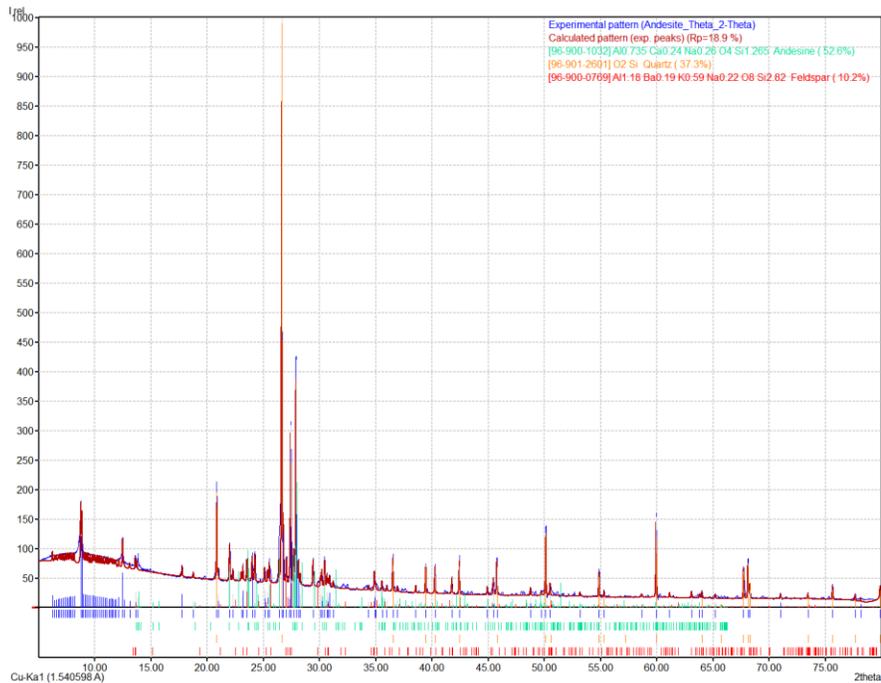


Fig.3.V.5 : Profile de la diffraction à rayons-X de l'andésite.

Le motif ou profile dans la figure Fig.3.V.5 montre les principales phases chimiques de l'andésite. Il montre une prépondérance d'andésine ainsi que des phases de Feldspar 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.

V-3-3-2-2-Quartzite

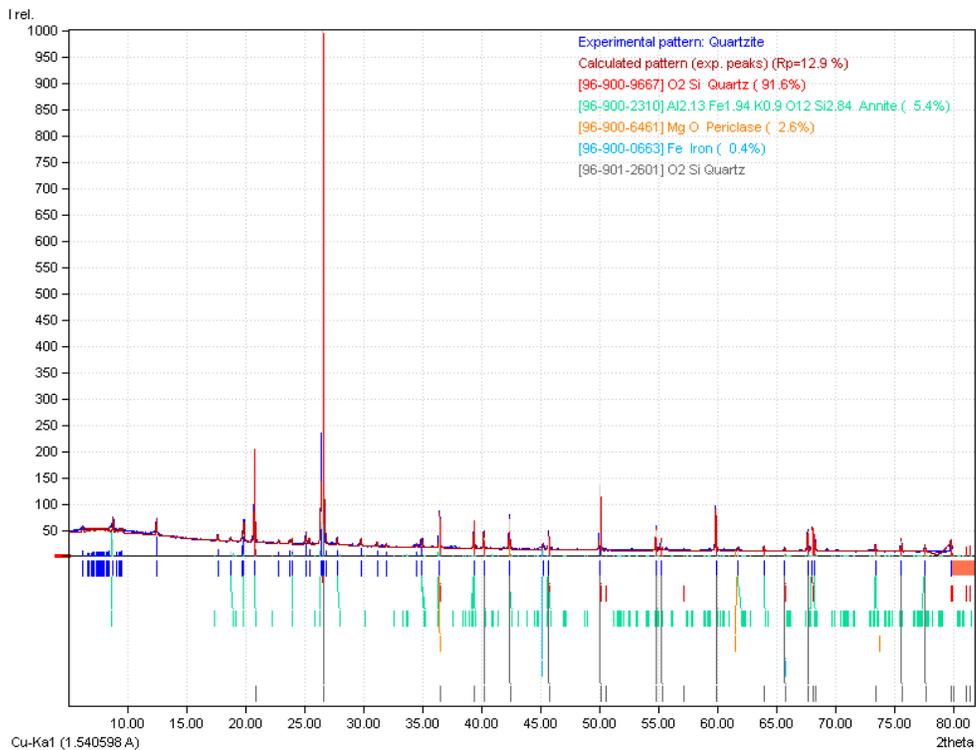


Fig.3.V.6 : Profile de la diffraction à rayons-X du quartzite.

Le motif ou profile dans la figure Fig.3.V.6 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.

VI-Résultats des essais d'expansion

VI-1-ASTM C 1260 (AMBT)

D'après la Fig.3.V.7 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.

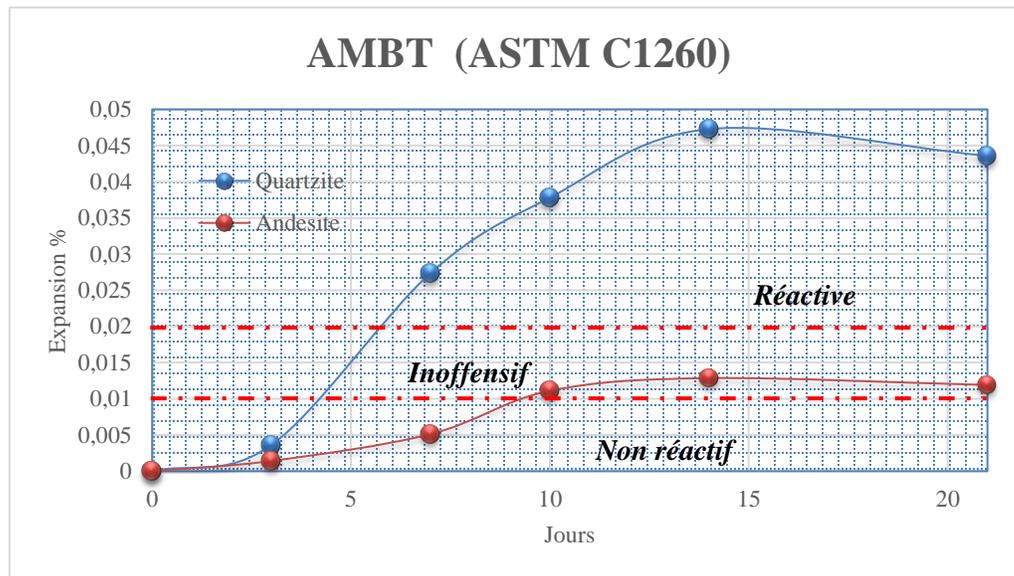


Fig.3.V.7 : Expansion des agrégats selon la méthode AMBT (ASTM C1260)

VI-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 (Fig.3.V.8) : 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 duré 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.

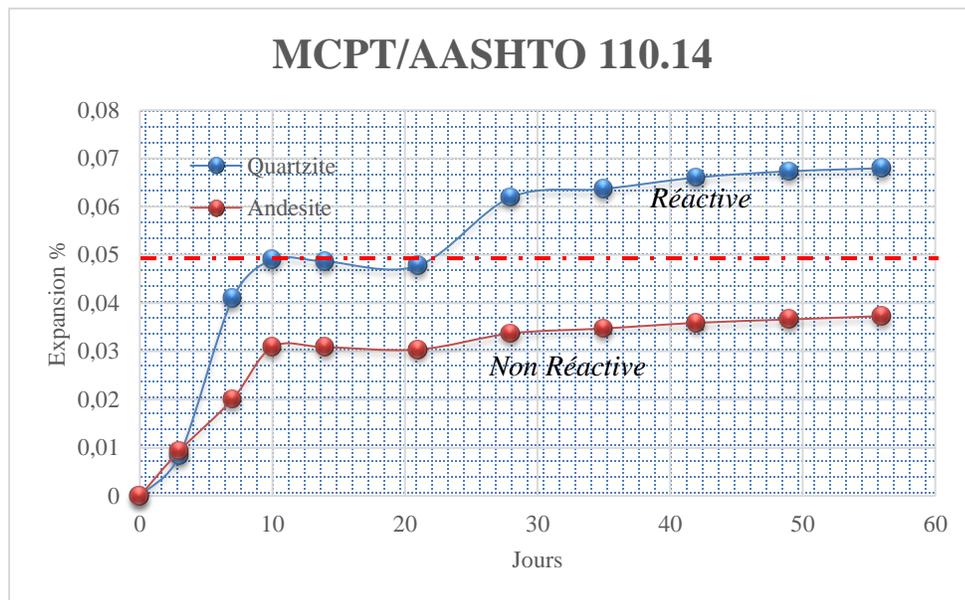


Fig.3.V.8 : Expansion des agrégats selon la méthode MCPT (AASHTO TP 110-14)

VII-Durabilité

Cette partie d'étude traite les aspects de la durabilité des bétons notamment : la perméabilité du béton à l'oxygène, sa porosité en rapport à l'Hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ainsi que sa résistance à la compression.

Les méthodes d'essai utilisé dans cette partie ont été initialement décrit par [Alexandra et al1999] afin d'avoir l'indice de durabilité le contrôle de qualité du béton.

VII-1-Essais de perméabilité à l'oxygène, et porosité à l'hydroxyle de calcium Préparation des échantillons

La perméabilité des cubes confectionné ont été mesurée à l'aide d'une perméamétrie [Ballim.1991]. Trente (30) cubes de (100mm x 100mm x 100mm) à mortiers et de béton selon la formulation utilisé dans les essais accéléré (ASTM C1260) et semi-acceléré (AASHTO T110-14) ont été préparés pour la perméabilité à l'oxygène et des tests de porosité suite à la procédure décrite par [Alexandra et al.1999], ainsi que pour des essais de résistance à la compression. Les échantillons ont été durcis dans différent conditions de stockage pendant 28 jours.

Les cubes ont été conserver dans des conditions d'essais comme suit :

- 06 cube à mortiers pour l'essais ASTM C1260 conserver dans l'eau (100% HR) à température maintenue à $23 \pm 2 \text{ C}^\circ$.
- 06 cube à mortiers pour l'essais ASTM C1260 conserver dans le NaOH (100% HR) à température maintenue à $80 \pm 2 \text{ C}^\circ$.
- 06 cube à béton pour l'essais AASHTO T110-14 conserver dans l'eau (100% HR) à température maintenue à $23 \pm 2 \text{ C}^\circ$.
- 06 cube à béton pour l'essais AASHTO T110-14 conserver dans le NaOH (100% HR) à température maintenue à $60 \pm 2 \text{ C}^\circ$.
- 06 cubes à béton pour l'essais AASHTO T110-14 et l'essai ASTM C1260 conserver à l'air libre sous une température ambiante et une HR de 50%



Fig.3.VII.1 : (a) Stockage pour 28 jours à $23 \pm 2 \text{ C}^\circ$. (b) Stockage pour 28 jours à température et HR ambiante. (c) Stockage pour 28 jours à $80 \pm 2 \text{ C}^\circ$ et $60 \pm 2 \text{ C}^\circ$.

VII-1-1-Préparation des échantillons à partir des cubes

- a) Les cubes seront coulés selon les spécifications citées auparavant, et avec des dimensions minimales de 100 mm.
- b) Des carottages des cubes auront lieu à 28 jours après la coulée.
- c) La direction de carottage doit être perpendiculaire à la direction de coulée.
- d) On veillera à ce que lorsque le carottage atteint le noyau et l'étendue de la zone rugueuse créée ne doit pas être supérieure à 5 mm de l'extrémité du noyau.
- e) Couper les 5 premiers mm de la face évidée du noyau et le jeter.
- f) Marquer les éprouvettes avec le numéro de référence correct sur la face intérieure originale.



Fig.3.VII.2 : (a) Appareil à carottage. (b) Scie mécanique pour béton

La méthode est basée sur le coefficient de perméabilité de Darcy déterminée par la surveillance d'une chute de pression. Les échantillons consistaient en disques de diamètre 68 ± 2 mm et une épaisseur de 25 ± 2 mm. À l'âge de test (28 jours), ceux-ci ont été forés à partir de base de 100 mm cubes (parallèles à la direction de coulée) après avoir été durcis pour 28 jours pour chaque type d'essais. Les disques échantillons carottés des cubes ont ensuite été séchés au four à 50 C° pendant 7 jours avant le test.

Les échantillons ont ensuite été retirés du four et on les laisse refroidir pendant 2 heures dans une pièce maintenue à 23°C. L'épaisseur de chaque échantillon a été mesurée à en 4 points également espacés autour du périmètre de l'échantillon, tandis que le diamètre a été mesuré à 2 points. Après que l'épaisseur et le diamètre des échantillons avaient été enregistré, les échantillons ont été placés dans un collier compressible avec la face d'essai (Face extérieure) tournée vers le fond. Le collier a été placé dans une gaine en PVC pour former une unité comme le montre la Fig.3.VII.3 Cette unité a été placée dans la chambre de perméamétrie, recouvert d'un anneau en bois et serré.



Fig.3.VII.3 : (a) Equipement pour mesuré la perméabilité.

La pression d'oxygène dans la chambre perméamétrie a été augmentée à 100 kPa, et ensuite la soupape d'admission est fermée. Le temps et la pression ont ensuite été enregistrées. Une décroissance de la pression était enregistrée à des intervalles d'environ 5 kPa et l'essai est arrêté lorsque la pression dans la chambre du cylindre atteint environ 60 kPa ou 6 heures après le début du test. Après le test de perméabilité, les échantillons de disques ont été retirés du col et utilisées plus tard pour le test de porosité.

-Le coefficient de perméabilité (m/s) est calculé manuellement ou automatiquement à l'aide des capteur de pression installé dans les chambres perméamétries, en utilisant l'équation suivante :

$$K = \frac{W.Vg}{RA} \left(\frac{d}{\theta t} \right) \ln\left(\frac{P_0}{P}\right) \quad (\text{Equ.VII.1})$$

Ou :

K = Coefficient de perméabilité en m/s

W = masse moléculaire de l'oxygène, 32 g/mol

V = Volume du l'oxygène sous pression dans le perméamétrie (m3)

g = accélération gravitationnelle, 9.81 m/s²

R = Constant Universal de gaz, 8.313 Nm/Kmol

A = Aire de section transversale de l'échantillon (m²)

d = épaisseur moyenne de l'échantillons

θ = Température absolue (K)

t = temps pour la pression à décroitre de P_0 à P

P_0 = Pression au début de l'essai (Kpa)

P =Pression à la fin de l'essai

Les résultats enregistrés sont en moyenne de trois échantillons



Fig.3.VII.4 : Enregistrements de la chute de pression de l'oxygène pendant l'essai de perméabilité.

VII-1-2-Résultats de l'essai de perméabilité

VII-1-2-1-AMBT (ASTM C1260)

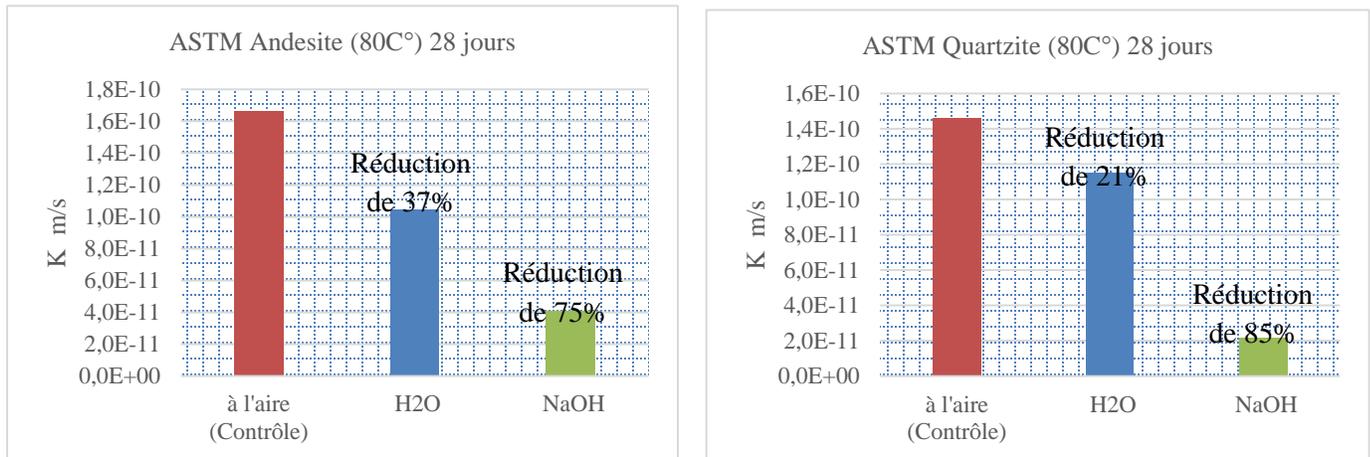


Fig.3.VII.5 : Variation du coefficient de perméabilité des bétons en fonction du milieu de stockage pour l'ASTM.

Dans le cas de la perméabilité à l'oxygène ou à l'eau, nous parlons souvent de la conductivité hydraulique K (m/s) au lieu de la perméabilité intrinsèque k (m²). On définit la conductivité hydraulique K , ou coefficient de perméabilité, comme expliquant auparavant.

La perméabilité est une caractéristique du matériau fortement contrôlée par la porosité et l'inter-connectivité de ces derniers par un fuseau de fissuration. Les valeurs du coefficient de perméabilité tester pour les essais ASTM MCPT des mortiers et bétons en fonction du temps sont illustrées sur la Fig.3.VII.5.

On peut remarquer que le coefficient de perméabilité varie de façon visible pour chaque conditionnement fixé pour les essais, sachant que le coefficient K a diminué par rapport au cube de contrôle ou enregistre une diminution de 37% en termes de perméabilité pour les cubes conservés dans milieu à HR à 100% (ASTM Andésite) avec une température ambiante ou en favorise l'hydratation du mortier de façon plus avancée au mortier de contrôle ou HR est estimé entre 53-47%.

En revanche on peut remarquer une diminution de 75% par rapport au cube de mortier de contrôle, ou les cubes ont été conservés dans un milieu alcalin agressif (1M NaOH) et chaux (80°C) (ASTM Andésite), qui peut être expliqué par une augmentation du volume du solide par rapport au volume du vide, remplis par le produit de la réaction alcali granulaire.

De même une diminution de 21% en termes de perméabilité pour les mortiers conservés dans milieu à HR à 100% (ASTM Quartzite). En revanche on peut remarquer une diminution de 85% par rapport au cube de mortier de contrôle, ou les cubes ont été conservés dans un milieu alcalin agressif (1M NaOH) et chaux (80°C) (ASTM Quartzite), qui peut être expliqué par une augmentation du volume du solide par rapport au volume du vide, remplis par le produit de la réaction alcali granulaire.

VII-1-2-2-MCPT (AASHTO T110-14)

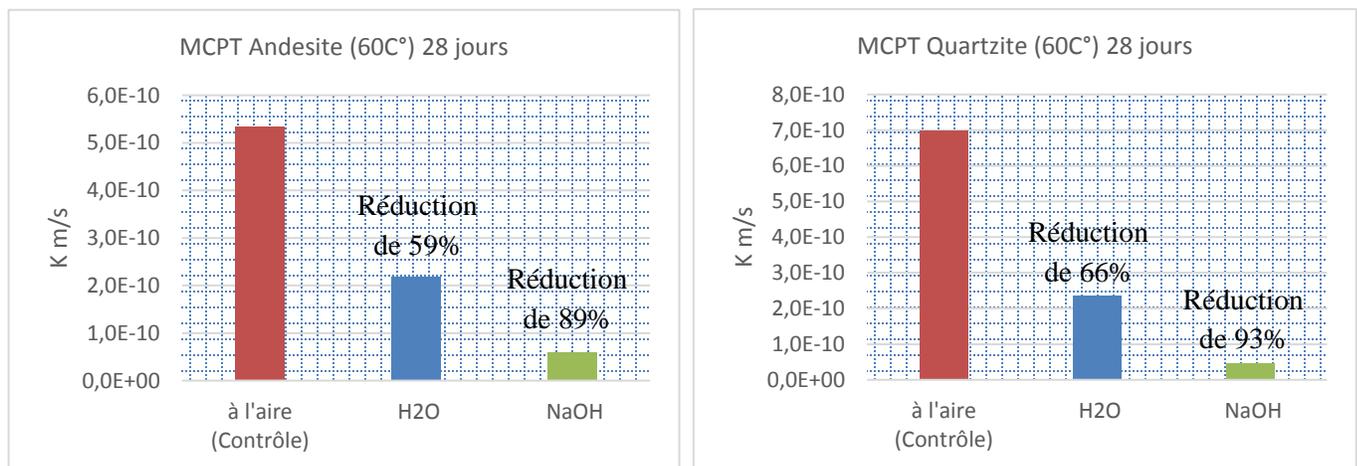


Fig.3.VII.6 : Variation du coefficient de perméabilité des bétons en fonction du milieu de stockage pour le MCPT.

La réduction du coefficient de perméabilité varie de façon visible pour chaque conditionnement fixé pour les essais MCPT, sachant que le coefficient K a diminué par rapport au cube de contrôle ou enregistre une diminution de 59% en termes de perméabilité pour les cubes conservés dans milieu à HR à 100% (MCPT Andésite) avec une température

ambiante ou l'hydratation du béton est avancé de façon par rapport au cube de contrôle ou HR est estimé entre 53-47%, de plus réduit de plus de 20% par rapport à l'essai ASTM avec le même type d'agrégat (Andésite), et cela peut revenir au coefficient de perméabilité plus au moins élevé des agrégats qui contribuât dans ce fait.

Aussi une similitude dans la réduction remarquer pour l'essai (MCPT Andésite) avec celle du ASTM ou une diminution de 89% par rapport au cube de béton de contrôle, ou les cubes ont été conserver dans un milieu alcalin agressive (1M NaOH) et chaud (60C°) (ASTM Andésite), qui peut être expliqué par une augmentation du volume du solide par rapport au volume du vide, remplis par le produit de la réaction alcali granulaire dans le béton.

De même une diminution de 66% en termes de perméabilité pour les béton conserver dans milieu a HR a 100% (MCPT Quartzite). En revanche on peut remarquer une diminution de 93% par rapport au cube de béton de contrôle, ou les cubes ont été conserver dans un milieu alcalin agressive (1M NaOH) et chaud (60C°) (MCPT Quartzite), qui peut aussi être expliqué par une augmentation du volume du solide par rapport au volume du vide, remplis par le produit de la réaction alcali granulaire qui reflète le degré et l'amplitude de la réaction.

VII-2-Essai de Porosité

Les mêmes échantillons de disques utilisés pour le test de perméabilité ont ensuite été utilisées pour l'essai de porosité. Ceci a été suivi par saturation sous vide des échantillons réalisés par application d'une sous pression de -75 Kpa d'aspiration. On a appliqué le vide pendant 3 heures pour les échantillons placés dans une vide dessiccateur suivie de cinq heures d'aspiration sous vide tandis que les échantillons sont saturés dans une solution d'hydroxyle de calcium Ca(OH)₂. Après encore 18 heures de trempage, les échantillons ont été pesés. La porosité est calculée en utilisant l'équation suivante :

$$n = \frac{M_{sv} - M_{so}}{A.d.\rho_w} \quad (\text{Equ.VII.2})$$

Ou :

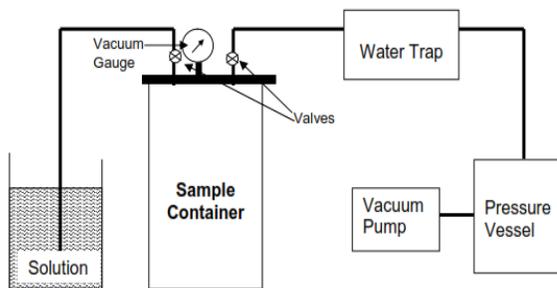
M_{sv} = masse de vide saturé de l'échantillon à 0,01 g de près.

M_{so} = masse initiale de l'échantillon à 0,01 g de près.

A = aire de la section transversale de l'échantillon à 0,02 m² de près.

d = épaisseur moyenne de l'échantillon à 0,02 m de près.

ρ_w = densité de l'eau.



(a)



(a')



(b)



(c)

Fig.3.VII.7 : (a, a') Equipements saturation à vide. (b) Des échantillons arrangés pour la saturation. (c) pesé électronique à 0.001 g de près.

VII-2-1-Résultats de l'essai de la porosité

VII-2-1-1-AMBT (ASTM C1260)

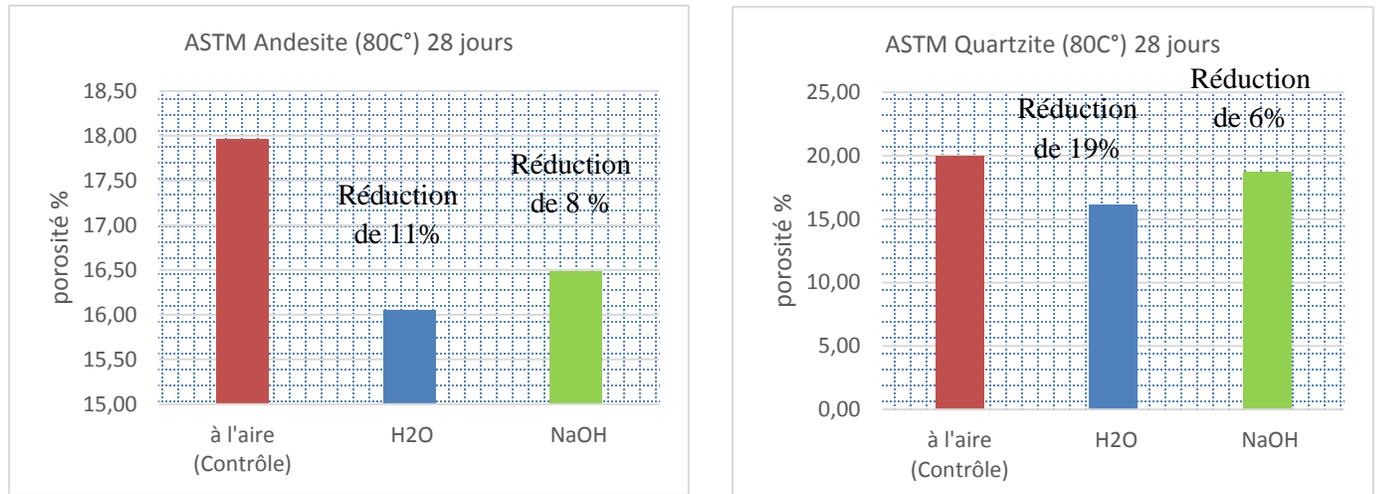


Fig.3.VII.8 : Variation du pourcentage de la porosité des cubes de mortiers en fonction du milieu de stockage pour le ASTM.

On peut remarquer que même la porosité a été affecter par la réaction alcali granulaire, vue qu'on enregistre une réduction de 8 % pour les cubes (ASTM Andésite) conserver dans une solution alcaline (1M NaOH / 80 C°) et cela peut être expliquer en concordance avec les résultats de la perméabilité discuté auparavant.

La porosité réduite peut être attribuer au fait que la taille, pourcentage des pores capillaire, et l'inter-connectivité entre eux on subit une grande réduction, et cela dus au produit de la réaction alcali granulaire remplissant ses derniers.

De plus la porosité pour les cubes conserver dans l'eau (H2O / 23 C°) on subit une réduction plus signifiante par rapport aux autres cubes (11%), dus à un couplage d'une hydratation continue dans les cubes avec une réaction alcali granulaire lente, ou on peut l'expliquer a une hausse de l'hydratation par rapport au produit de la réaction lente.

De même on peut observer une diminution de 6% pour les bétons conserver dans milieu a

1M NaOH /80 C° (ASTM Quartzite). En revanche on peut remarquer une diminution de 19% par rapport au cube de béton de contrôle, ou les cubes ont été conservés dans un milieu à HR de 100% et 23C° (ASTM Quartzite), qui peut aussi être expliqué par une coupure d'une hydratation continue dans les cubes avec une réaction alcali granulaire relativement rapide par rapport à l'andésite.

Les propriétés liées à la durabilité du béton sont connues d'être capables d'affecter directement, à cet effet l'expansion qui résultent de la RAG, qui dépendent à leur tour dans la mesure d'eau, de gaz et de produits chimiques agressifs dans le béton ; Qui, à leur tour, dépendent de la perméabilité (qui dépendent de la porosité). Par conséquent, la perméabilité du béton peut être utilisée comme mesure de la durabilité du béton. Ainsi, les effets de la porosité peuvent être liés à la durabilité du béton. [Massazza.1996]

D'une manière générale, on peut remarquer que la perméabilité décroît avec une augmentation de la porosité jusqu'à un certain niveau. Une forte corrélation entre la porosité et la perméabilité est rapportée par un certain nombre de chercheurs.

VII-2-1-2-MCPT (AASHTO T110-14)

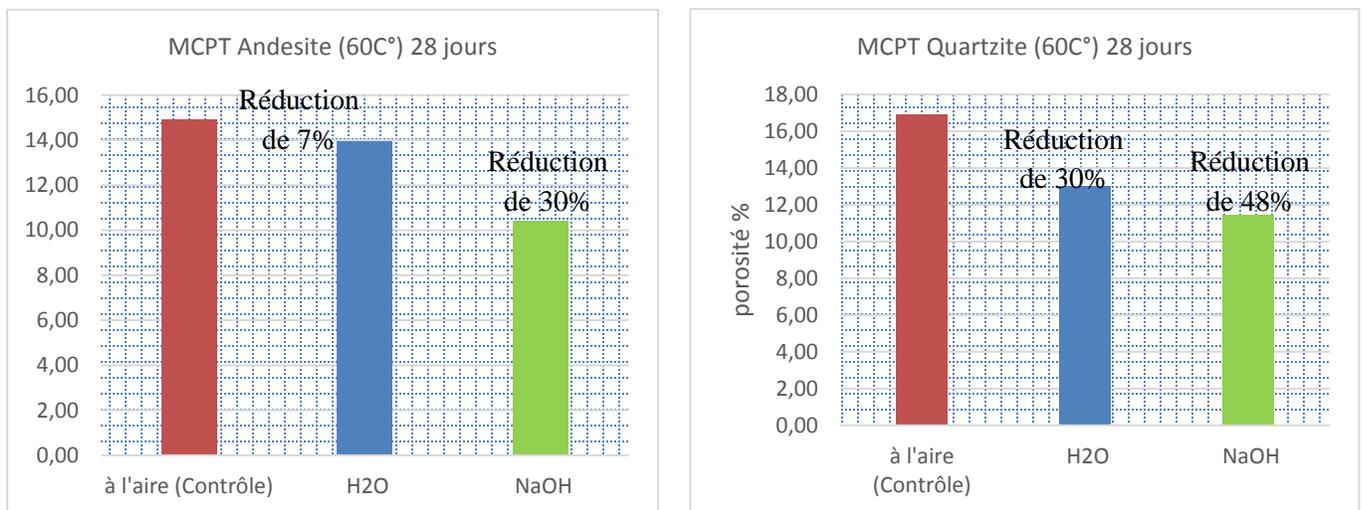


Fig.3.VII.9 : Variation du pourcentage de porosité des cubes de bétons en fonction du milieu de stockage pour le MCPT.

On peut remarquer aussi de même comme pour les essais MCPT que la porosité a été affecter par la réaction alcali granulaire de façon plus avancé par rapport aux essais ASTM , vue qu'on enregistre une réduction de 30 % pour les cubes (MCPT Andésite) conserver dans une solution alcaline (1M NaOH / 60 C°) et cela peut être expliquer un état avancé de la réaction alcali granulaire ou le produit a remplis les pores capillaire non touché par l'hydratation du béton dans les cubes de contrôle, et les cubes conserver dans un milieu a HR 100% à 23C° ou la réduction de la porosité été seulement de 7%.

De même on peut observer une diminution de 48% pour les bétons conserver dans milieu a 1M NaOH /60 C° (MCPT Quartzite). En revanche en peut remarquer une diminution de 30% pour les cubes conserver dans un milieu à HR de 100% et 23C° (MCPT Quartzite), qui peut aussi être expliqué par une un couplage d'une hydratation continue dans les cubes avec une réaction alcali granulaire relativement rapide par rapport à l'andésite.

De plus la porosité des agrégats joue un rôle non négligeable dans la réduction de la porosité de façon assez observable pour les essais MCPT par rapport aux essais ASTM, vue que la réaction alcali granulaire prenne place dans la majorité de la matrice du béton ou la perméabilité prenne le rôle de conducteur d'agents attribuant dans la réaction, de même que les pores capillaires jouent le rôle de réserves d'alcalin pour la dissolution de la silice réactive dans la matrice.

VII-3-Réduction de la résistance à la compression

Pour chacun des types d'agrégats (Quartzite, Andésite), 12 cubes de (100mm x 100mm x 100mm) ont été coulés en utilisant la formulation et les proportions discuté auparavant. Après démoulage, trois cubes pour chaque essai en subis les mêmes conditions de durcissement comme on l'a fait pour la perméabilité et porosité.

Après 28 jours de durcissement, les échantillons ont été soumis à des essais de compression uni-axiale.



Fig.3.VII.10 : La presse hydraulique utilisé.

VII-3-1-ABMT (ASTMC1260)

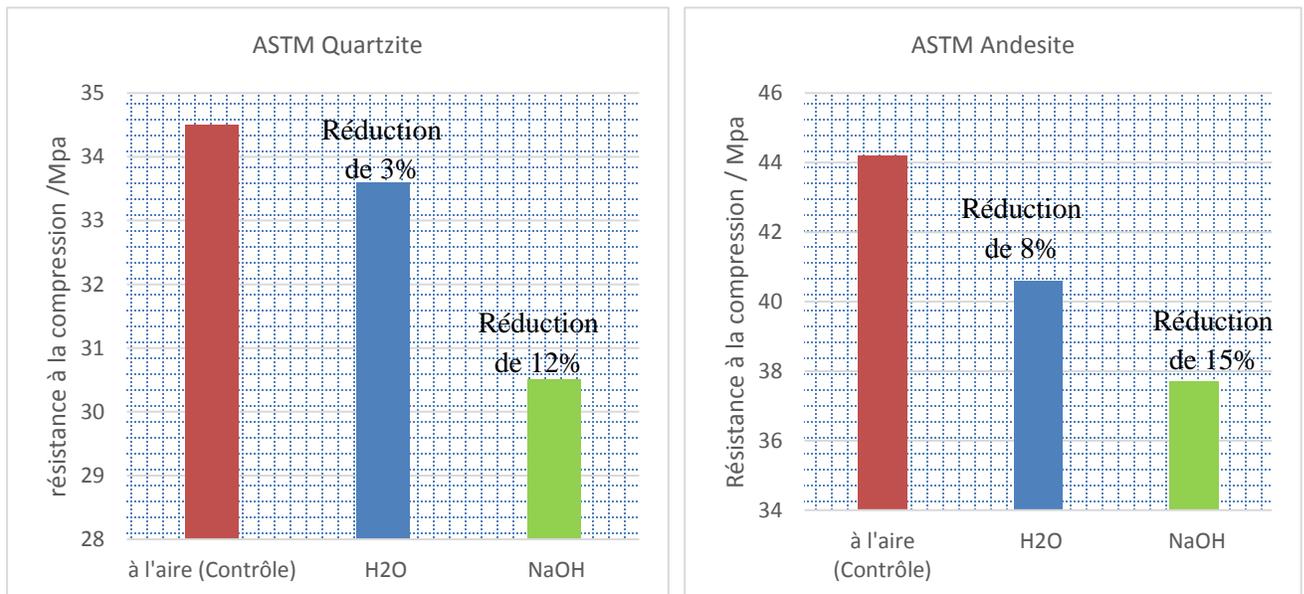


Fig.3.VII.11 : Variation du pourcentage des pertes de résistance des cubes de bétons en fonction du milieu de stockage pour le ASTM.

La perte de la résistance à compression des cubes se présente comme une réduction notée pour le béton de résistance normale préparée avec les agrégats très réactifs (Quartzite) et

potentiellement réactifs (Andésite).

Pour les échantillons confectionner avec d Quartzite et exposés à une solution de NaOH et a 80C° de température, une réduction globale de 12% de la résistance à la compression, cependant les échantillons stockés dans l'eau et à température ambiante, on note une réduction globale de 3% a été observée après la période d'exposition, qui peut être attribuer au taux de la réaction lent qui est influencer par une température baisse et un milieu non alcalin à comparer avec les échantillons de Quartzite.

Pour les échantillons d'andésite exposés à la solution de NaOH avec une température de 80C°, et contenant des agrégats modérément réactifs, la résistance à la compression des cubes après une période de 28 jours a été réduite de la mêmes façon que pour les échantillons de quartzite ou on note une baisse de 15% pour les cubes conserver dans un milieu alcalin (1M NaOH) et a 80C°, tandis les cubes conserver dans l'eau a température ambiante subis une réduction de 8%.

VII-3-2-MCPT (AASHTO T110-14)

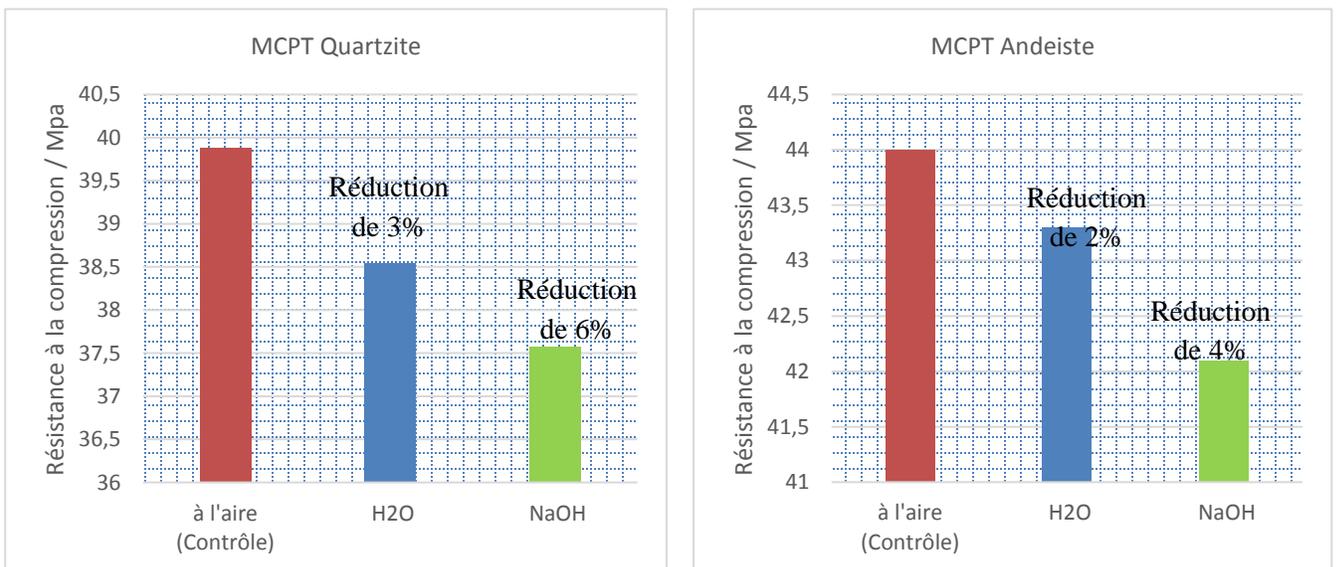


Fig.VII.12 : Variation du pourcentage des pertes de résistance des cubes de bétons en fonction du milieu de stockage pour le MCPT.

La réduction de la résistance à compression des cubes notée pour le béton de résistance normale préparée avec les agrégats (Quartzite) et (Andésite). Pour les échantillons confectionner avec d Quartzite et exposés à une solution de NaOH et a 60C° de température, une réduction globale de 6% de la résistance à la compression, cependant les échantillons stockés dans l'eau et à température ambiante, on note une réduction globale de 3% a été observée après la période d'exposition.

Pour les échantillons d'andésite exposés à la solution de NaOH avec une température de 60C°, et contenant des agrégats lentement réactifs, la résistance à la compression des cubes après une période de 28 jours a été réduite de la mêmes façon que pour les échantillons de quartzite ou on note une baisse de 4% pour les cubes conserver dans un milieu alcalin (1M NaOH) et a 60C°, tandis les cubes conserver dans l'eau à température ambiante subis une réduction de 2%.

VII-4-Niveau pH dans la réaction alcali granulaire

La réaction alcali-silice dépend de la concentration en substance alcaline et de la réactivité globale. Une quantité suffisante d'alcali doit être présent dans la solution interstitielle pour entraîner le pH du béton suffisamment élevé pour que la réaction se produise. Le niveau de réactivité de silice définit le seuil de pH pour la réaction initiale.

Une faible réactivité exige un pH supérieur à une silice avec un niveau élevé de réactivité. Une fois la RAG a commencé, il continuera jusqu'à ce que la silice réactive a été épuisée, le pH de la solution a été réduite en dessous du seuil requis, ou la masse de béton devient appauvri de l'humidité nécessaire [Fanny et al.1997].

VII-4-1-Procédure d'essai utilisant un pH mettre

ASTM International a publié une méthode de test standard pour mesurer le pH du la surface de béton. Un bref résumé de la norme ASTM F710-11, "Pratique standard pour la préparation des sols en béton pour recevoir revêtements de sol résilients," est la suivante :

1. Calibrer le pH-mètre avec les normes calibration de trois pH soit fourni par le fabricant ou des produits chimiques indépendantes d'un pH reconnu. Les trois solutions d'étalonnage doivent être de pH 7, 10 et 12. La pointe de mesure du pH-mètre doit être nettoyé par immersion dans un récipient propre de l'eau distillée fraîche et séchez avec un chiffon propre, une serviette en papier frais avant de prendre les mesures de pH. Répétez la même procédure de nettoyage immédiatement après la fin de chaque lecture de pH. Enregistrez chacune des trois lectures de pH.

2. Nettoyer la surface du béton pour enlever la saleté, scellant pour béton, et résidu d'adhésif.

3. Poncer légèrement une participation d'environ (30 mm) zone de la surface de béton propre pour 60 ± 10 secondes avec du papier de verre. Recueillir et mesurer 0,5 de poudre de béton à l'aide d'une pesé électronique.

4. Ajouter la poudre de béton dans une bouteille contenant (10 ml) d'eau distillée fraîche.



Fig.3.VII.13 : Le pH d'un échantillon de poudre de béton obtenu après 60 secondes de ponçage de surface en utilisant du papier de verre relevée par un pH-mètre.

Les poudres obtenues pour la mesure des pH ont été fait avant les essais de perméabilité et porosité. Le procédé chimique décrit ci-dessus conduit à la dissolution des composants de la silice réactive ; l'alcalinité de la solution des pores et la structure de la silice régit le débit

et/ou la quantité de dissolution. La silice mal cristallin ou amorphe est beaucoup plus enclin à la RAG que des formes bien cristallisés. L'une des raisons de cette différence de comportement est que la solubilité augmente la silice amorphe de manière significative avec le pH, comme l'illustre la figure 5.

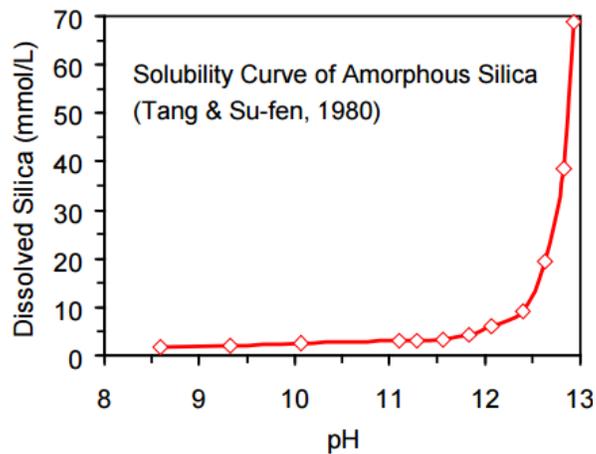


Fig.3.VII.14 : Effect of pH on Dissolution of Amorphous Silica [Tang and al, 1980].

Ainsi, les agrégats composés de silice amorphe ou faiblement cristallin a tendance à se dissoudre plus facilement dans la solution intrinsèquement élevée de pores de pH dans le béton. La silice bien-cristallisés, tels que le quartz, sont relativement inaccessibles à la solution alcaline d'hydroxyde, et la dissolution se produit seulement à la surface, à un rythme très lent. [Tang and al, 1980].

VII-4-2-Résultats

VII-4-2-1-AMBT (ASTM C1260)

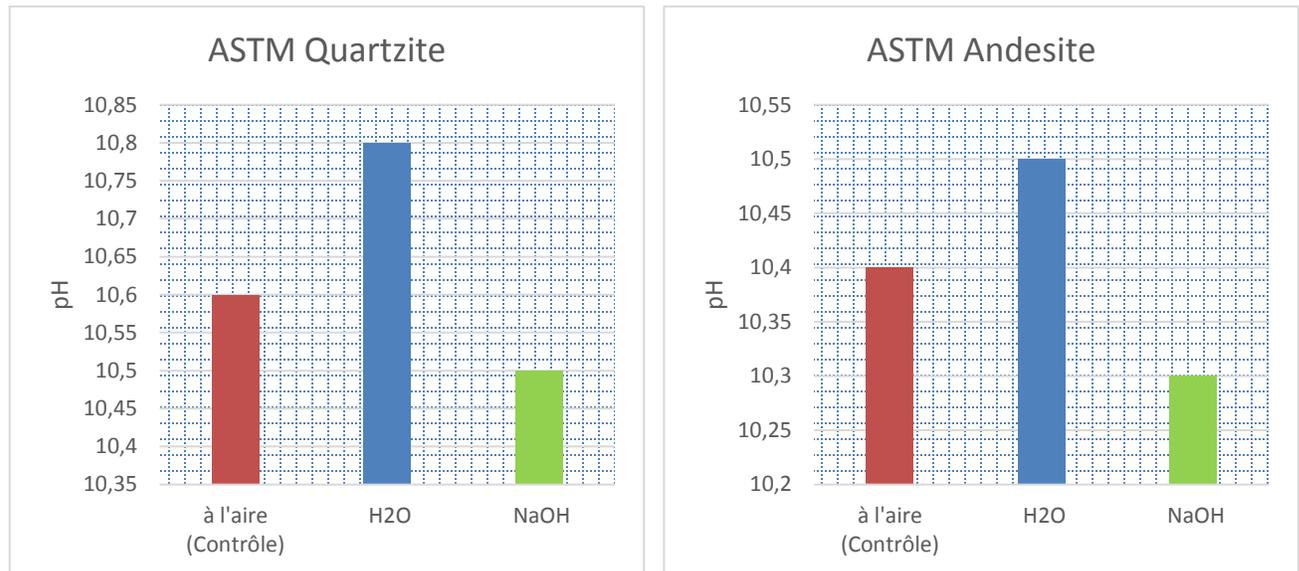


Fig.3.VII.15 : Variation du pourcentage de porosité des cubes de bétons en fonction du milieu de stockage pour le MCPT.

Dès que la solution alcaline basic est créé dans la matrice du béton, elle va se réagir avec la silice réactive des agrégats produisant un gel de silicate hydraté de métal [Hobbs.1988] dans les fissures de la matrice [Farny et al.1997]. Et comme la réaction alcali granulaire requis un pH assez élevé pour qu'elle occupe. Le niveau de la silice réactive définit le seuil du pH nécessaire pour déclencher la réaction [Hobbs.1988].

De ce fait une réactivité faible exige un pH supérieur à une silice avec réactivité élevé. Une fois la RAG a commencé, elle continuera jusqu'à ce que la silice réactive ait été épuisé, et le pH de la solution a été en dessous du seuil requis. [Farny et al.1997]

Le pH mesuré à partir des surfaces des disques de béton interne était dans les environs de 10, comme cela est habituel pour des mélanges de béton contenant un ciment à faible alcalinité (voir composition chimique du ciment).

Dans la Fig.3.VII.15 on peut remarquer que le pH des échantillons pour les essais ASTM subis à un milieu agressive (1M NaOH / 80C°) montre un niveau de pH inférieur à comparer devant les échantillons de contrôle et même les échantillons conserver dans un milieu de 100% HR et 23C°.

Cependant le niveau de pH mesuré pour les cubes conserver dans l'eau à température ambiante montre un niveau nettement supérieur à celle des cubes de contrôle. Ce taux supérieur peut être expliquer par une dissolution lente de la silice réactive pour être associer avec les hydroxyles libres qui par la suite augmente l'alcalinité du béton même à l'intérieur du béton loin de la surface.

De même le niveau inférieur mesuré pour les cubes conserver dans le milieu agressif s'explique par une dissolution avancée de la silice, ou [Hobbs.1988] et [Farny et al.1997] l'expliquent.

En plus de l'alcalinité de la solution des pores et fissures [Hobbs.1988], on ne peut négliger l'effet des tailles des agrégats réactifs ou potentiellement réactif, vue qu'elles sont une réserve considérable de silice réactive donc même si les hydroxyles contenant dans la solution pour une période donnée est consommé, la chaine de la RAG ne s'arrêtera pas vue les facteurs essentiels présent même de façon alternative en fonction du temps.

VII-4-2-2-MCPT (AASHTO 110-14)

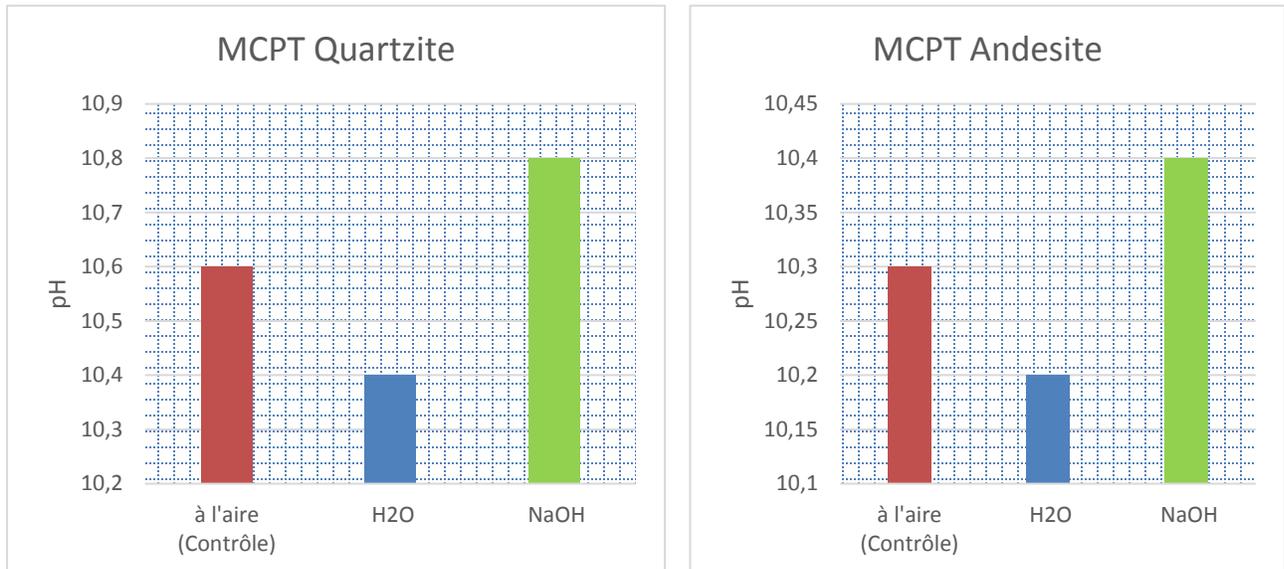


Fig.3.VII.16: Variation du pourcentage de porosité des cubes de bétons en fonction du milieu de stockage pour le MCPT.

En revanche les pH mesurés pour le cas des essais MCPT on observe un niveau de pH typiquement d'un béton atteint par une RAG, comme [Hobbs.1988] à expliquer qu'un béton avec un pH élevé après des essais accélérer de réactivité des agrégats, reflète le niveau et degré avancé de la réaction.

Cependant le niveau de pH pour les échantillons conserver dans l'eau montre un niveau inférieur par rapport au cube de contrôle qui peut être expliquer par la dominance de l'hydrations du béton devant la réaction alcali granulaire, cela peut être associé avec les résultats obtenue auparavant dans les essais accélérer et de durabilité.

VIII-Analyse pétrographie

Dans ce chapitre l'examen par analyse pétrographique a été fait pour les échantillons des granulats utilisé dans les essais précédent (ASTM, MCPT) pour l'andésite et le quartzite pour détermine visiblement les composants minéraux , ainsi qu'une extension de cette analyse a

toucher des section mince à partir des échantillons des essais accélérer des méthodes AMBT (ASTM C1260) et MCPT (AASHTO 110-14).

Pour avoir une idée claire sur le produit d'une réaction alcali granulaire (alcali silice), nous avons aussi analysé des carottes issus du Golden pont (Sud Afrique, Johannesburg) altérée par le phénomène, les sections minces sont expliqué dans la figure.4.

Ces sections minces ont été analysées en utilisant la pétrographie optique pour la présence éventuelle de phases réactives dans les agrégats. Les résultats des méthodes d'essai étaient cohérents avec l'existence de l'alcali réaction de silice prouver par les essais d'expansion expliqué auparavant. Le niveau de gravité de la réactivité alcali-silice semblait être modérée à comparer avec les sections minces des carottes obtenue du pont touché par la réaction mondant plus de 20 ans diagnostiqué en premier lieu par Pr. Y. BALLIM.

Dans cette étude, les sections minces ont été examinés à l'aide de qualité de recherche fournie par le microscope polarisant optique, NIKON Optiphot-POL avec des capacités d'imagerie à haute résolution et jusqu'à un grossissement de 400X. Ces analyses ont été réalisées dans le laboratoire de génie civil dans l'université de Wits avec l'aide du Dr Peter. E. GRAHAM.

Les figures suivantes donnent les différentes imageries au cours de laquelle des sections minces ont été faites pour les différents cas d'étude. Les procédures décrites dans la norme ASTM C 856 [ASTM C856-14.2014] .

Des coupes minces préparées à partir de échantillons d'agrégats, barres de mortier, et prisme de béton miniature, ainsi que à partir de carottes obtenues du pont infectées, ont été examinés par microscope optique en lumière polarisée dans le plan (PPL) et de la lumière polarisée croisée (XPL) pour confirmer, la composition minéralogique contribuant à une RAG et la présence potentielle de la réaction alcali-silice dans les barres de mortier et prismes de béton miniature.

VIII-1-Pétrographie des granulats

VIII-1-1-Quartzite

L'analyse pétrographique a été faite sur des sections minces comme la figure en dessous la montre.

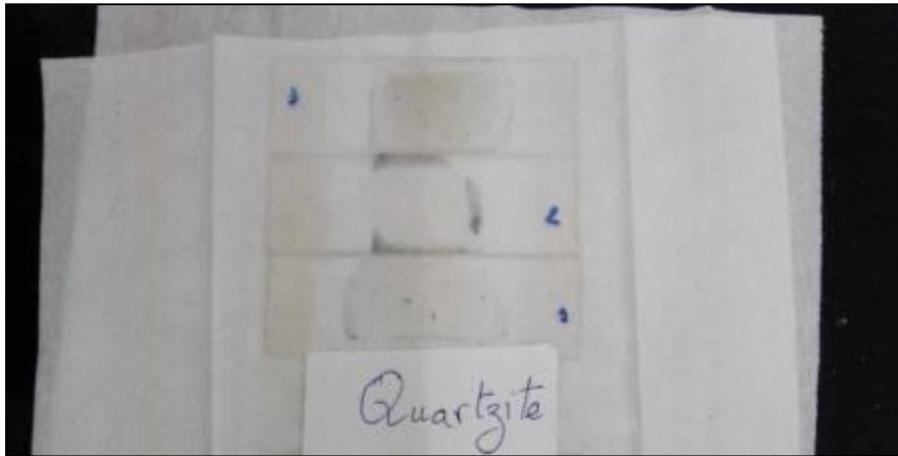


Fig.3.VIII.1 : Section mince de quartzite à analyser.

L'inspection à l'aide du microscope polarisant nous a donné les images suivantes :

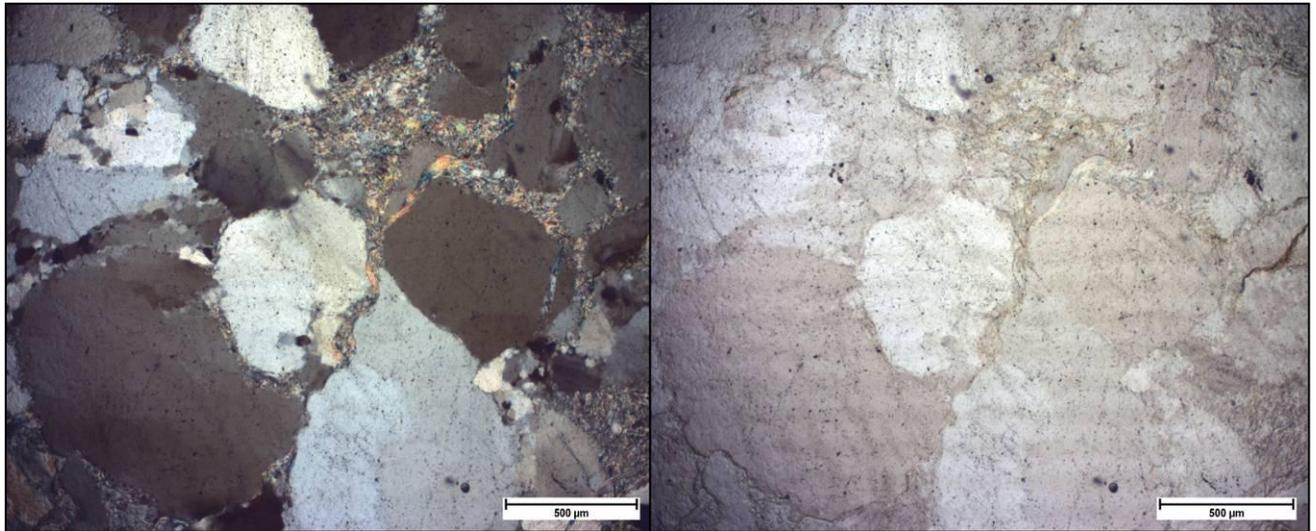


Fig.3.VIII.2 : Imagerie d'une section mince de quartzite à une amplification de 50x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)

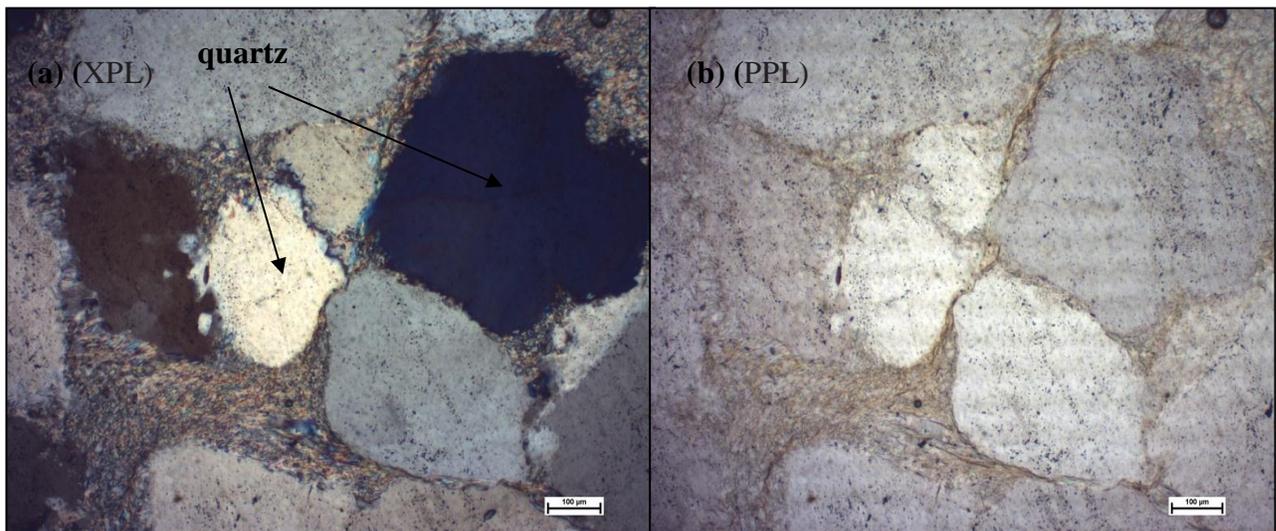


Fig.VIII.3: Imagerie d'une section mince de quartzite à une amplification de 100x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)

Le quartzite sous un microscope polarisant montre la présence des grains de quartz vue en couleur variant du blanc jaune vers le bleu foncé en fonction du degré de rotation de la table rotatif pénètre par une lumière polarisé (a) et par le biais du gris au noir, et un réseau serré et

saturé liant les minéraux de (ciment rocheux-cimentation) quartz qui peut être une source rapide pour les alcalins vue sa composition unique suggérant la présence de calcite.

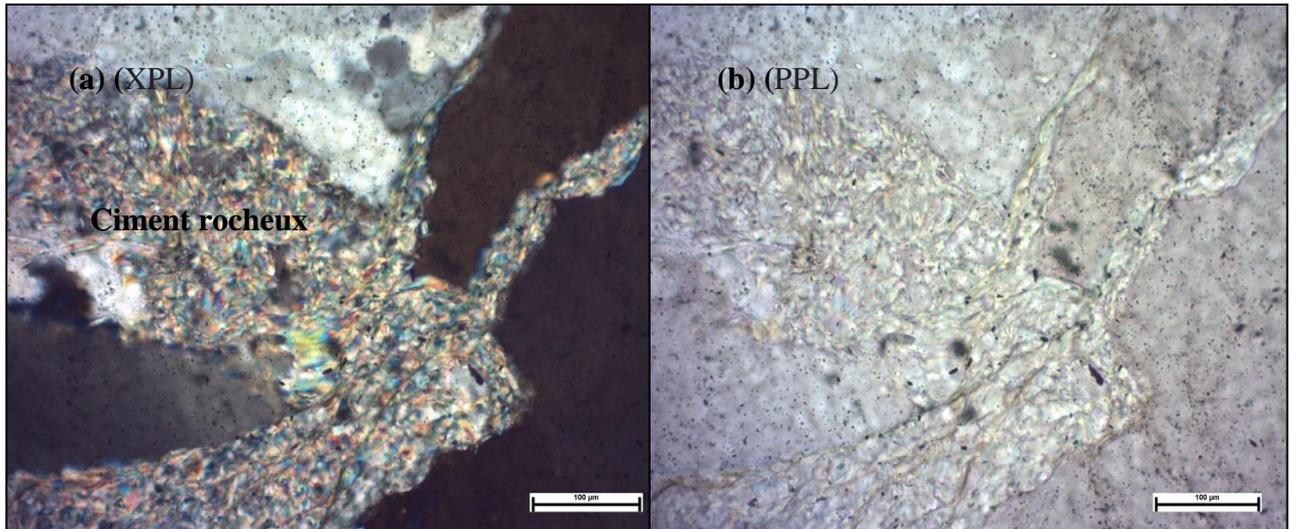


Fig.3.VIII.4 :Imagerie d'une section mince de quartzite à une amplification de 200x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)

VIII-1-2-Andésite

L'analyse pétrographique a été faite sur des sections minces comme la figure en dessous la montre.

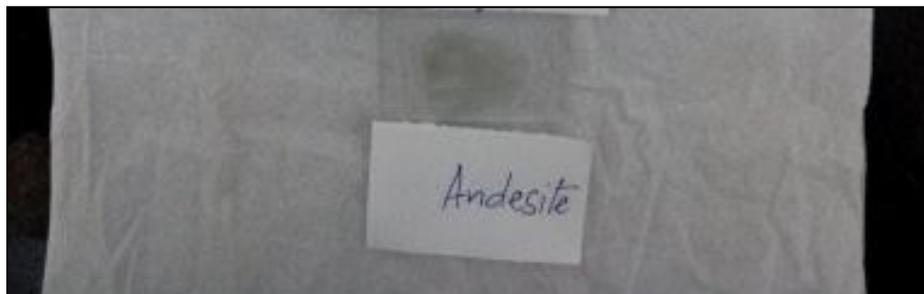


Fig.3.VIII.5:Section mince d'andésite à analyser.

L'inspection à l'aide du microscope polarisant nous a donné les images suivantes :

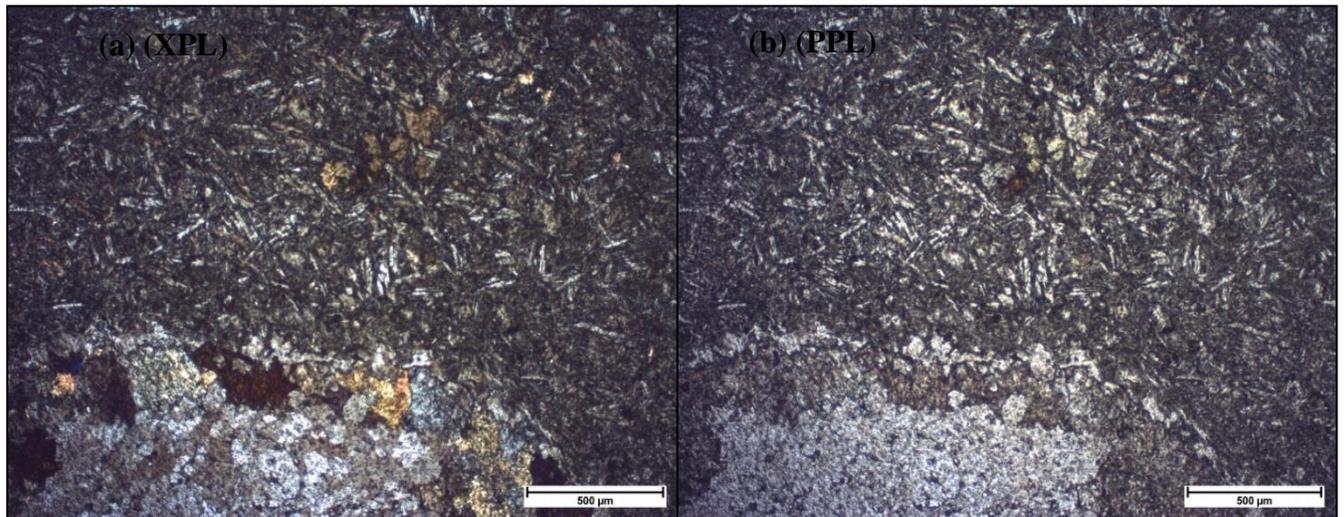


Fig.3.VIII.6 : Imagerie d'une section mince d'andésite à une amplification de 50x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)

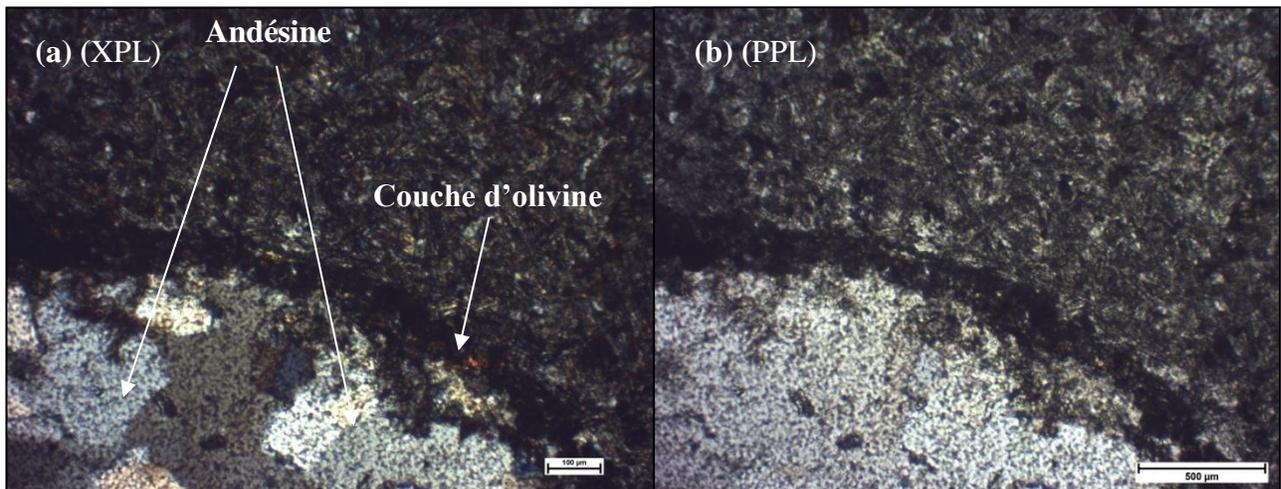


Fig.3.VIII.7 : Imagerie d'une section mince d'andésite à une amplification de 100x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)

Pour l'andésite l'andésine est le minéraux le plus dominant dans la constituant du granulats analysé sous un microscope polarisant montre la présence des grains de andésine vue en couleur variant du blanc jaune vers le bleu marron en fonction du degré de rotation de la table rotatif pénètre par une lumière polarisé (a) et par le biais du gris au noir, entourer d'une

couche d'olivine (a) le séparons des andésine cristallisé avec la cimentation.

VIII-2-Pétrographie du béton

VIII-2-1-Pont Golden

L'analyse pétrographique a été faite sur des sections minces d'un béton âgé de plus de 20 ans sous microscope polarisant comme la figure en dessous la montre.

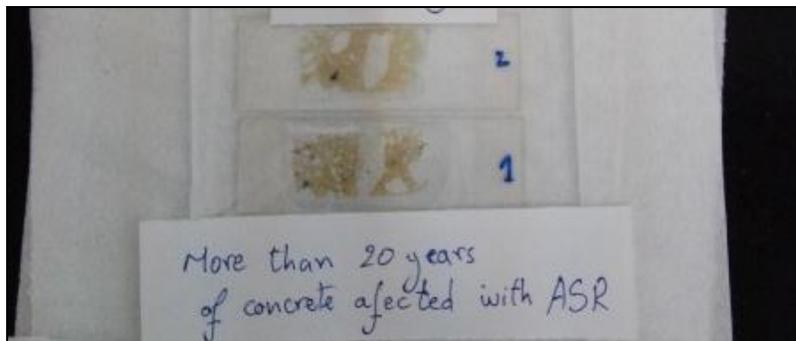


Fig.3.VIII.8: Section mince du béton affecté du pont de Golden.
L'inspection à l'aide du microscope polarisant nous a donné les images suivantes :

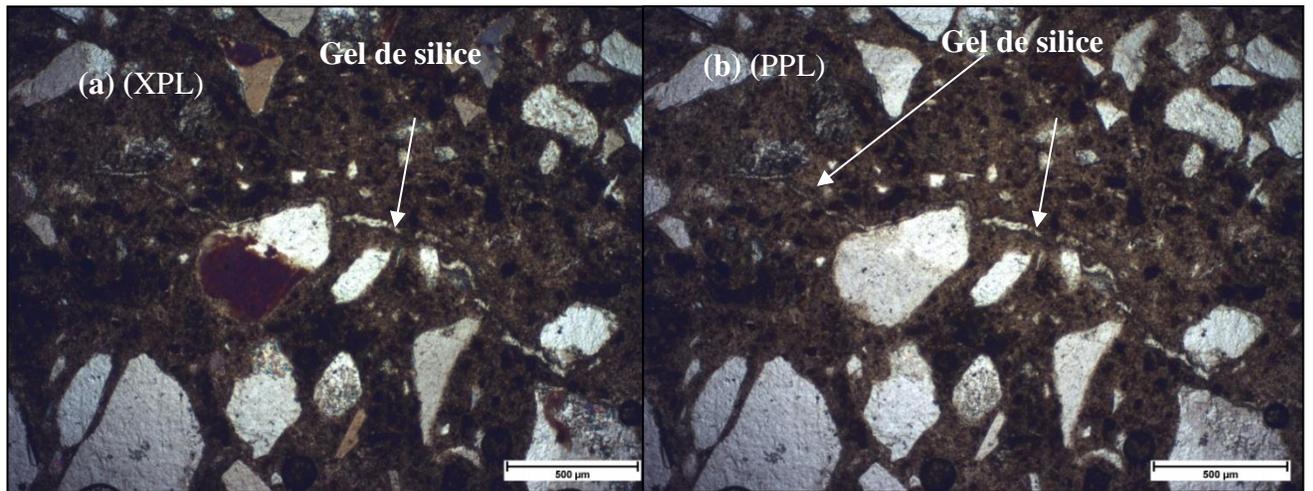


Fig.3.VIII.9: Imagerie d'une section mince de béton altéré à une amplification de 50x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)

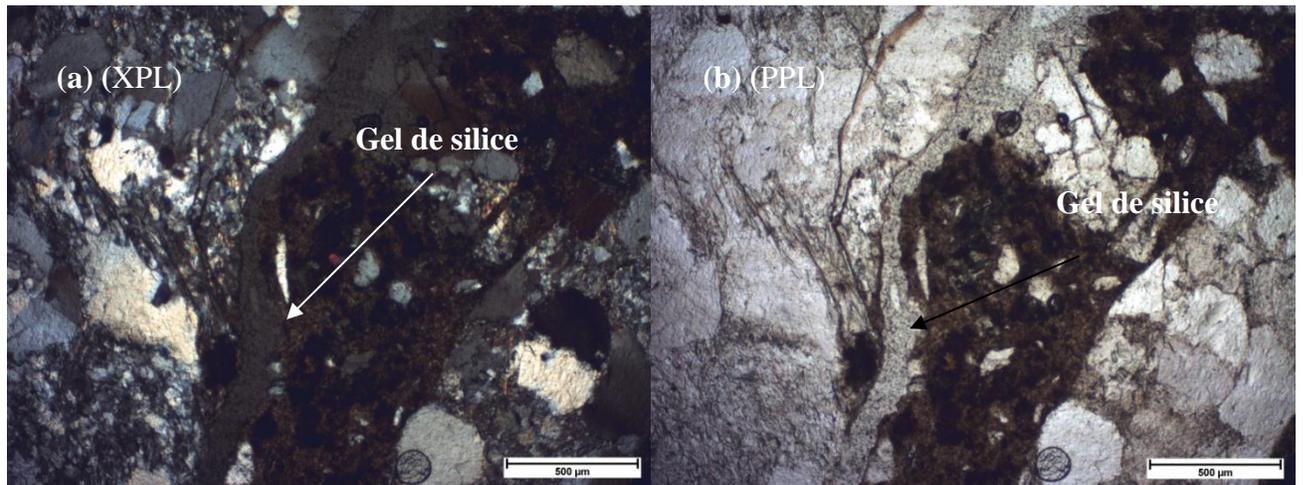


Fig.3.VIII.10: Imagerie d'une section mince de béton altéré à une amplification de 50x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)

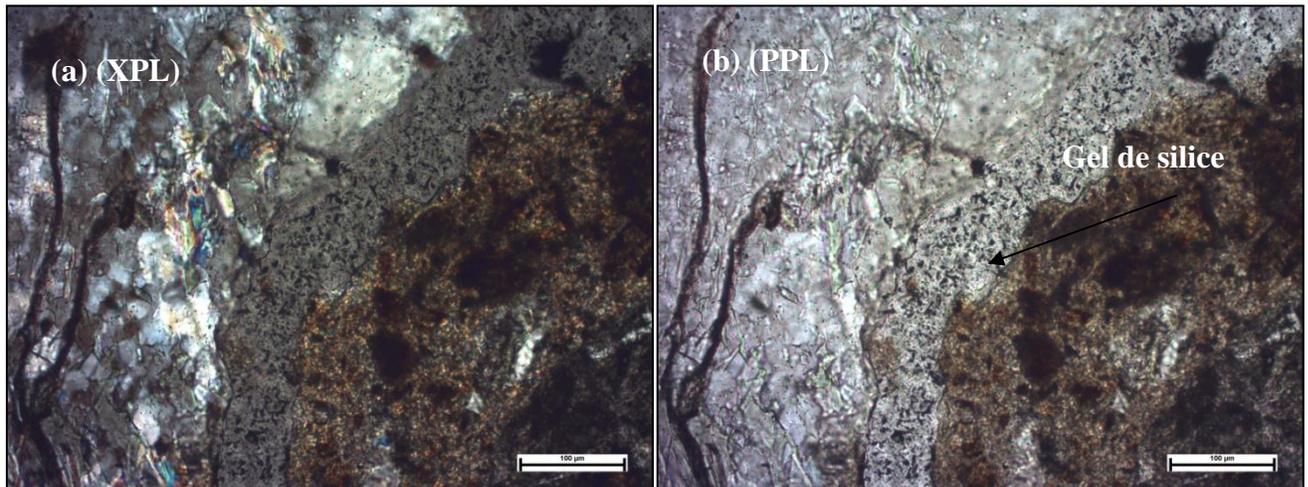


Fig.3.VIII.11: Imagerie d'une section mince de béton altéré à une amplification de 200x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)

Ceci peut être vu dans les figures (Fig.3.VIII.9/10/11) des fissurations distinctive est clairement visible le long de la pâte cimentaire remplis par le produit la réaction alcali silice (le gel de silice alcalin) . Le gel de silice a un aspect cristallin. Dans la Fig.3.VIII.9, le produit de la RAG ne s'est pas limité de se former à l'interface du granulats altérés, mais des grains cristallin associé avec des fissure suivant le sens parallèle de la formation du gel, qui confirme les deux écoles, qui revendique la formation du produit chimiques à l'interface du granulats et dedans, mais cela n'explique pas le mécanisme en détaille, on attribuant l'arrangement des étapes.

VIII-3-Pétrographie des échantillons de l'essai AMBT (ASTM C1260)

VIII-3-1-AMBT (ASTM C1260) avec des quartzite

L'analyse pétrographique a été faite sur des sections minces des barres de mortier confectionné à base de quartzite et après finalisation de l'essai accélérer AMBT (ASTM C1260) nous avons analysé les échantillons sous microscope polarisant comme la figure en dessous la montre.

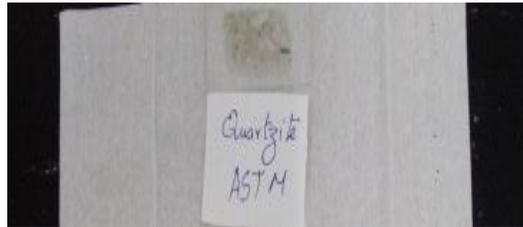


Fig.3.VIII.12: Section mince du barre de mortier à base de quartzite (ASTM).

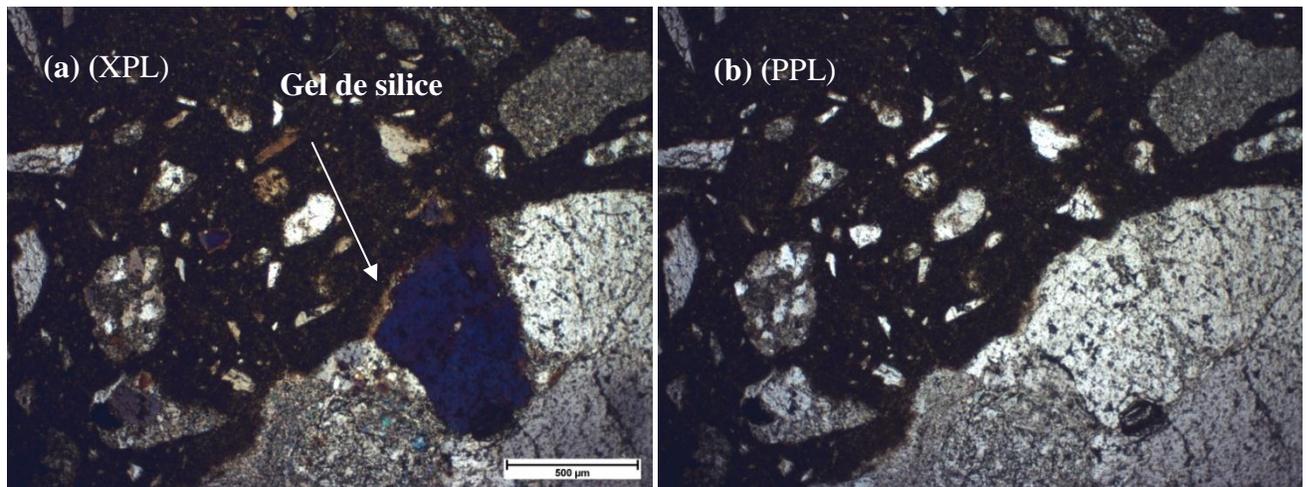


Fig.3.VIII.13: Imagerie d'une section mince de la barre de mortier tester altéré à une amplification de 50x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)

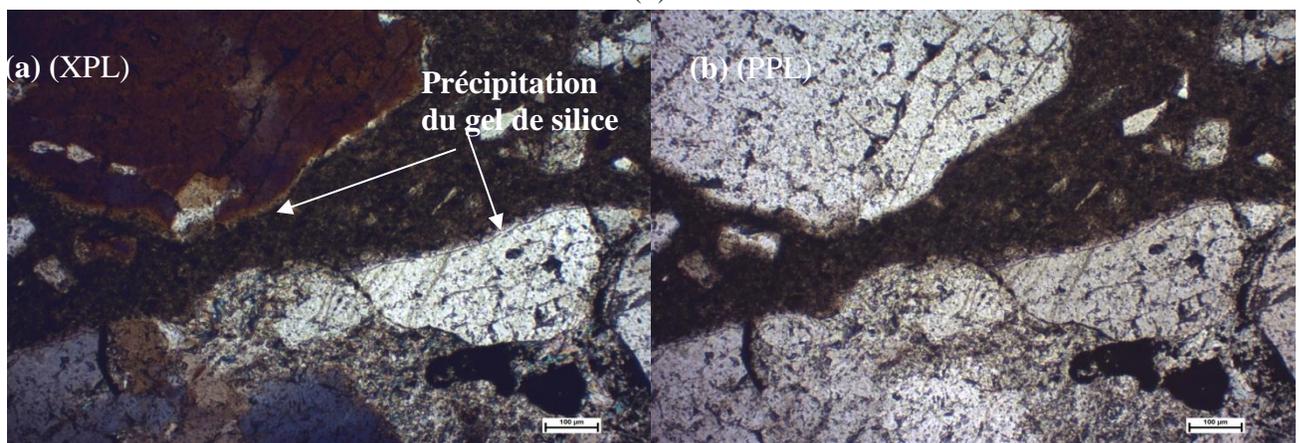


Fig.VIII.14 : Imagerie d'une section mince de la barre de mortier tester altéré à une amplification de 100x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)

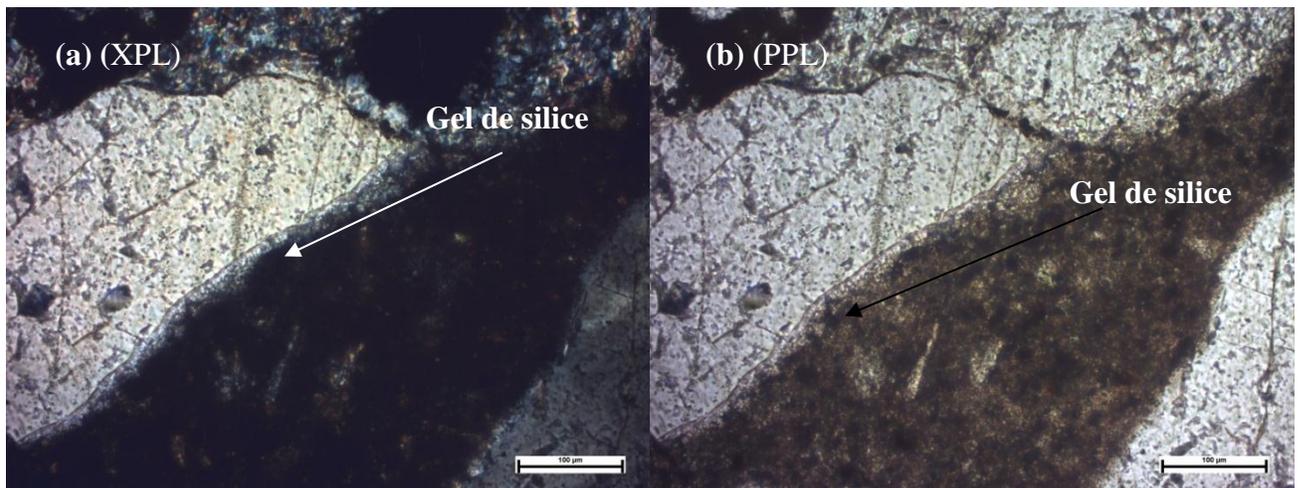


Fig.3.VIII.15: Imagerie d'une section mince de la barre de mortier tester altéré à une amplification de 200x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b).

Dans le cas des agrégats de quartzite l'essai AMBT (ASTM) prouve de façon explicite que le granulat et réactifs non seulement par les résultats d'expansion, mais aussi par la formation du gel de silice autour de l'anneau de l'agrégat comme la figure (Fig.3.VIII.13/14/15) l'explique. Le produit de la réaction se distingue par la formation d'un gel sur l'agrégat pour l'état extrême, et par phénomène dissolution-précipitation comme [Dron.1990] l'expliqué dans son modèle du mécanisme réactionnel. L'effet de la calcite composant la cimentation dans l'agrégats comme source de calcium peut suggérer que le phénomène et aussi associé avec un mécanisme réactionnel mixte comme [Chatterji et al.1986] et d'autre l'ont expliqué.

VIII-3-2-AMBT (ASTM C1260) avec des andésites

L'analyse pétrographique a été faite sur des sections minces des barres de mortier confectionné à base d'andésite et après finalisation de l'essai accélérer AMBT (ASTM C1260) nous avons analysé les échantillons sous microscope polarisant comme la figure en dessous la montre.



Fig.3.VIII.16: Section mince du barre de mortier à base de andésite (ASTM).

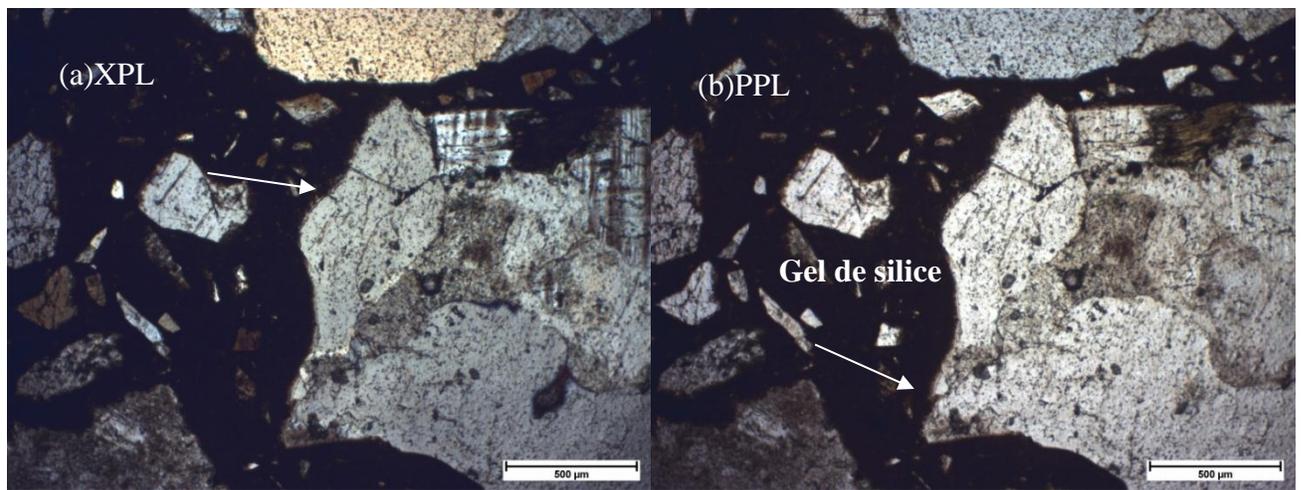


Fig.3.VIII.17: Imagerie d'une section mince de la barre de mortier tester altéré à une amplification de 50x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)

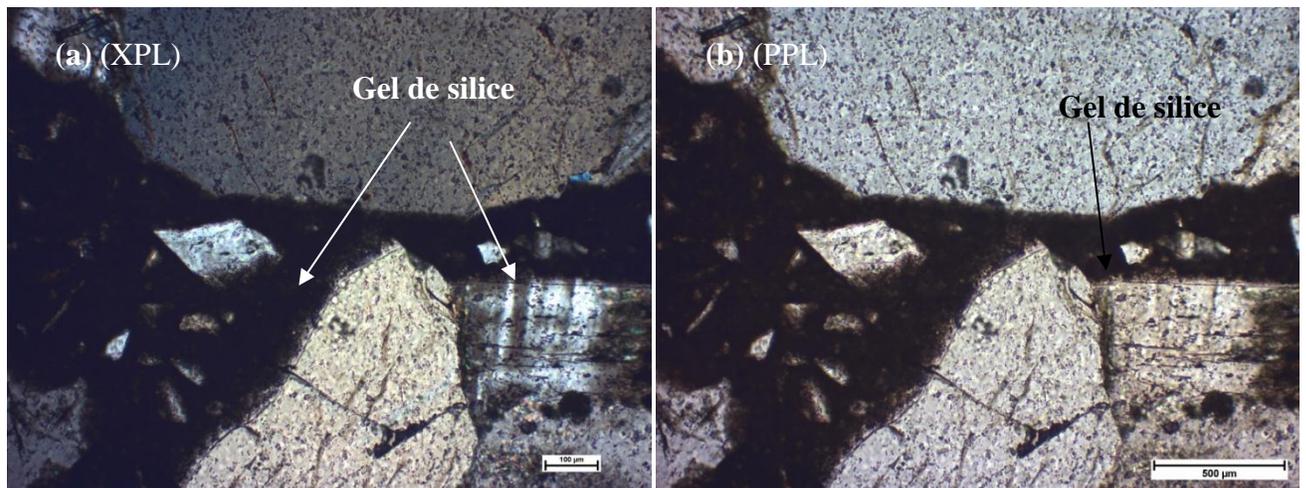


Fig.3.VIII.18: Imagerie d'une section mince de la barre de mortier tester altéré à une amplification de 100x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)



Fig.3.VIII.19: Imagerie d'une section mince de la barre de mortier tester altéré à une amplification de 200x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)

Dans le cas des agrégats d'andésite a présence d'un gel formé à l'interface granulat/pate de ciment montre que la réaction alcali silice est présente, l'essai AMBT (ASTM) prouve de que le granulat et réactifs mais de façon inoffensive, une confirmation des résultats d'expansion. Comme pour le quartzite le produit de la réaction se distingue par la formation d'un gel autour du granulat par phénomène de dissolution-précipitation comme [Dron.1990]

l'expliqué dans son modèle du mécanisme réactionnel associé avec un mécanisme réactionnel mixte comme [Chatterji et al.1986] et d'autre l'ont expliqué.

VIII-4-Pétrographie des échantillons de l'essai MCPT (AASHTO-110.14)

VIII-4-1-MCPT (AASHTO-110.14) avec quartzite

L'analyse pétrographique a été faite sur des sections minces des prismes de béton confectionné à base de quartzite et après finalisation de l'essai accélérer MCPT (AASHTO-110.14) nous avons analysé les échantillons sous microscope polarisant comme la figure en dessous la montre.



Fig.3.VIII.20: Section mince du prisme de béton à base de quartzite (MCPT).

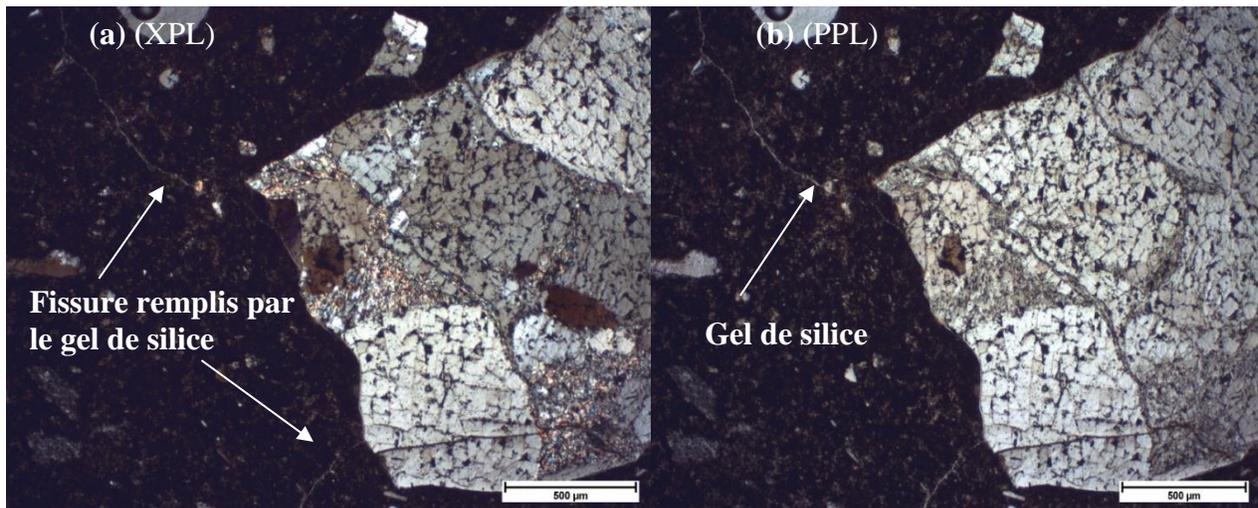


Fig.3.VIII.21: Imagerie d'une section mince de prisme à béton altéré tester à une amplification de 50x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)

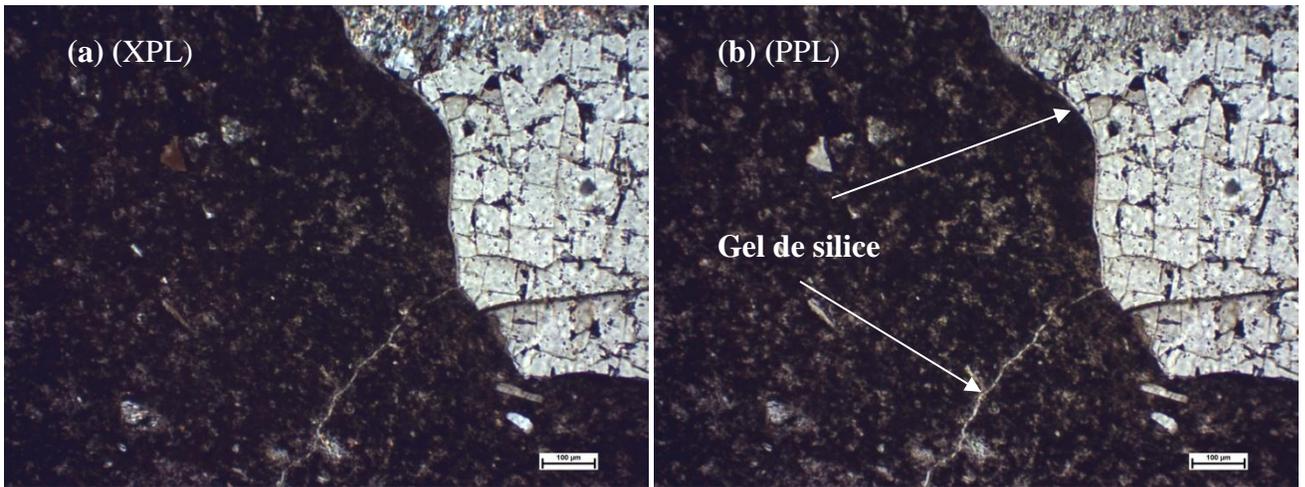


Fig.3.VIII.22: Imagerie d'une section mince de prisme à béton tester à une amplification de 100x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b)

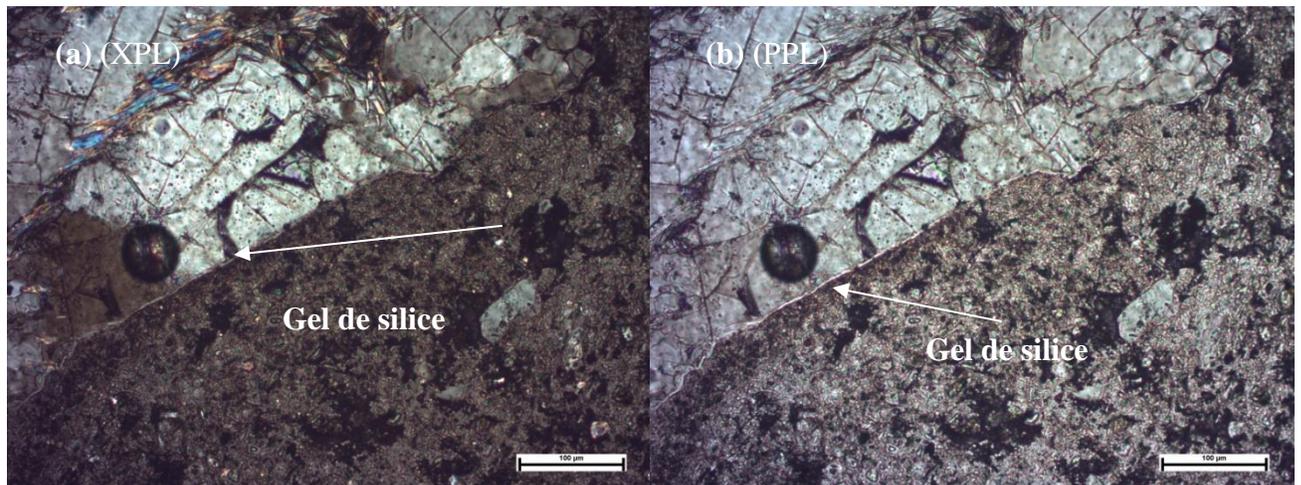


Fig.3.VIII.23: Imagerie d'une section mince de prisme de béton tester altéré à une amplification de 200x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b).

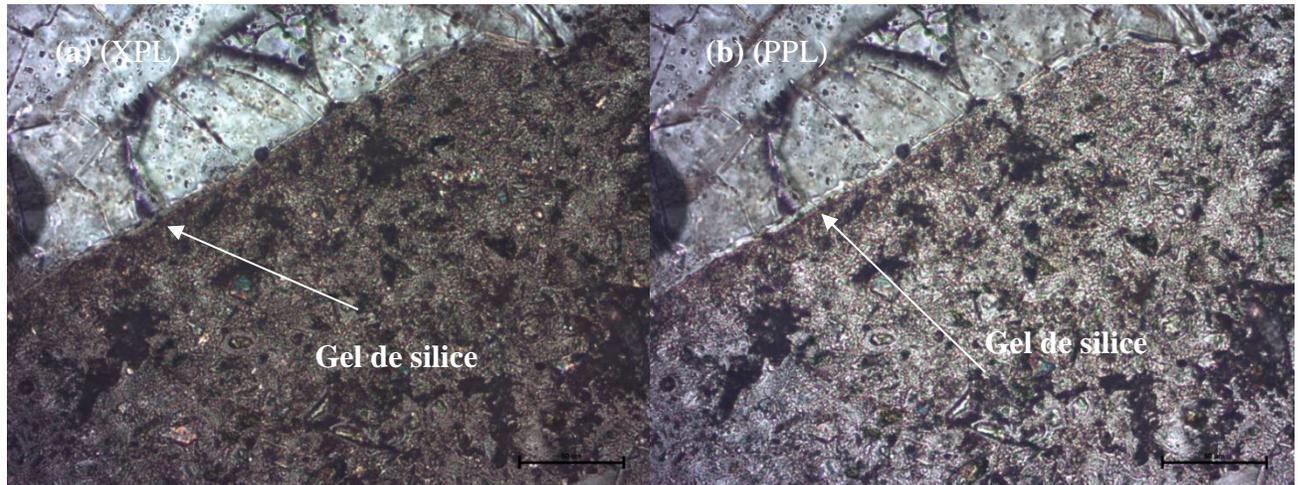


Fig.3.VIII.24: Imagerie d'une section mince de prisme de béton tester altéré à une amplification de 400x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b).

L'essai proposé par [Latifee.2013] pour tester la réactivité des agrégats à une réaction alcali silice prouve que, avec les résultats obtenus des essais d'expansion et l'analyse pétrographique que la RAG est confirmé par les fissures dans la pâte de ciment qui suit le cheminement des lignes de surface des granulats comme les figure (Fig.3.VIII.22/23/24) le montre. On observe aussi que le degré de réaction est assez avancé vue que les fissures sont remplies d'un gel qui correspond au gel de silice, produit dérivé de la réaction.

VIII-4-2-MCPT (AASHTO-110.14) avec andésite

L'analyse pétrographique a été faite sur des sections minces des prismes de béton confectionné à base de andésite et après finalisation de l'essai accélérer MCPT (AASHTO-110.14) nous avons analysé les échantillons sous microscope polarisant comme la figure en dessous la montre.

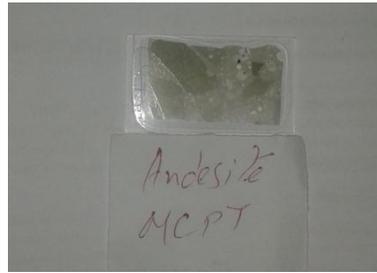


Fig.3.VIII.25: Section mince du prisme de béton miniature à base d'andésite (MCPT).

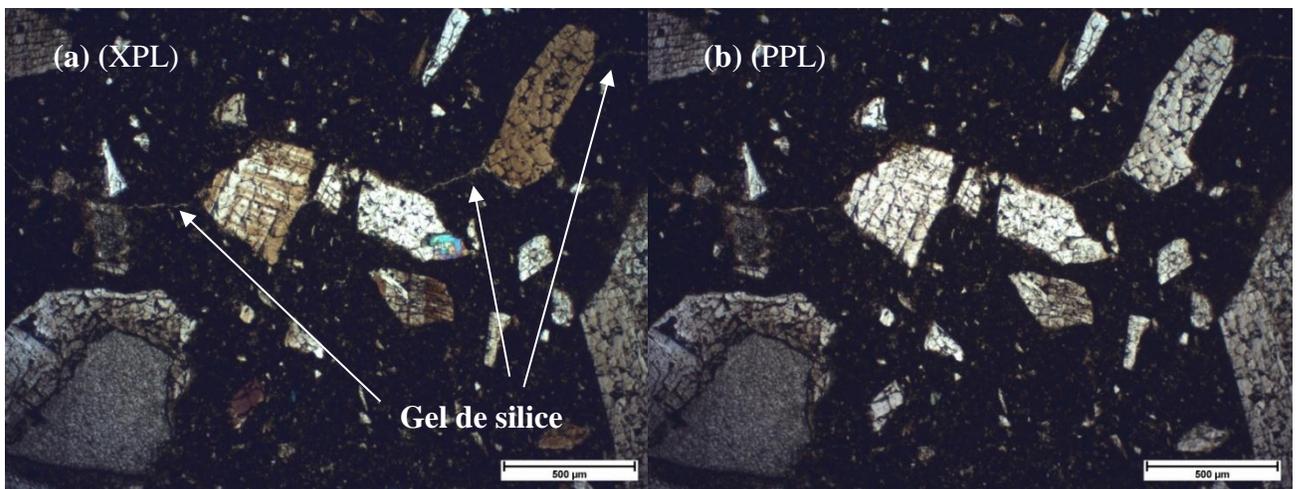


Fig.3.VIII.26: Imagerie d'une section mince de prisme de béton tester altéré à une amplification de 50x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b).

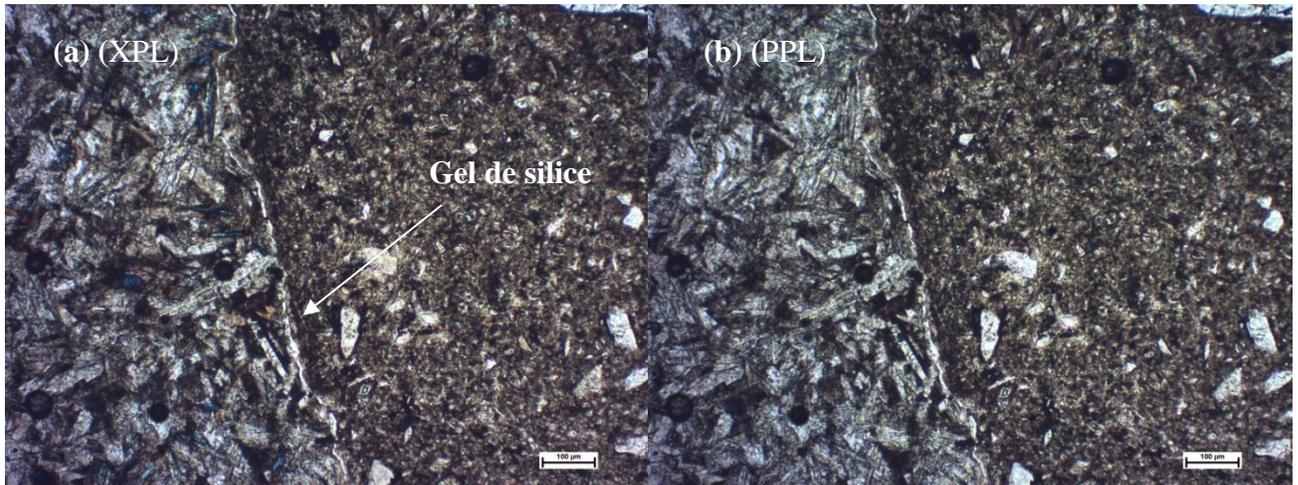


Fig.3.VIII.27: Imagerie d'une section mince de prisme de béton tester altéré à une amplification de 100x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b).

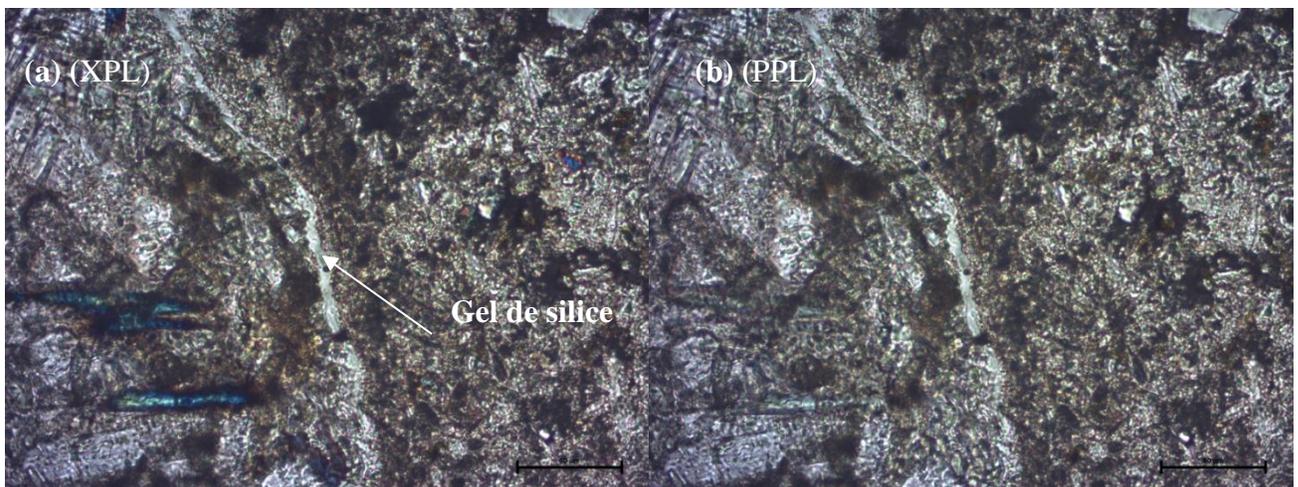


Fig.3.VIII.28: Imagerie d'une section mince de prisme de béton tester altéré à une amplification de 400x fois avec polarisation croisée (XPL) en (a) et polarisation plane (PPL) en (b).

L'expansion mesuré par essai d'expansion des prismes de béton miniature prouve que l'andésite est réactive d'une manière [Latifee.2013] juge inoffensif, alors que l'analyse

péetrographique montre le gel de silice se formant autour du granulat et dans les fissures engendrées par son expansion dans la pâte cimentaire comme la figure (Fig.3.VIII.26) le montre. On observe aussi que le degré de réaction est assez avancé vu que les fissures sont remplies d'un gel qui correspond au gel de silice, produit dérivé de la réaction.

IX-Conclusion

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 (ASHTO 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 une 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, vue qu'en note pour l'essais 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% vue l'amplitude la réaction. Pour l'essai MCPT/ Andésite la réduction a été plus importante vue 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°).

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 registrer 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 rédaction 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°).

Pour la résistance à la compression la réduction est visible mais d'une façon non agressive à comparer avec la réduction dans la perméabilité et porosité ou en note 3% et 12% pour le quartzite conserver dans l'eau devant 8 et 15% pour l'andésite conserver dans (1M NaOH/80C°) pour l'essai AMBT, de même pour le MCPT ou enregistre 3% et 6% pour ceux conserver dans l'eau devant 2% et 4% pour ceux conserver dans (1M NaOH/60C°). Pour l'analyse pétrographique l'image analysée montre la réactivité du quartzite et andésite envers la RAG pour les différents essais tester, ainsi elles montrent une corrélation avec les résultats trouver pour la l'expansion, perméabilité, et porosité.

Chapitre 04

Modélisation de la Réaction Alkali Granulaire

Chapitre 4 : Modélisation de la Réaction Alcali Granulaire

I-Principe de la modélisation

L'objectif de ce chapitre est d'entamer la modélisation numérique pour définir l'ampleur de la RAG par un modèle numérique qui permet de prédire la cinétique et l'amplitude du gonflement correspondant au matériau concerné. Il doit aussi être capable de prendre en compte la présence simultanée de granulats réactifs de différentes tailles dans le matériau. L'étude bibliographique a permis de mettre en lumière deux lacunes. Premièrement, les résultats expérimentaux publiés concernant l'influence de la taille des granulats sont contradictoires et l'influence de la fraction des tailles des granulats réactifs a été très peu étudiée.

Deuxièmement, la plupart des « modèles chimiques » récents ne prennent pas en compte l'influence de la taille et fraction des granulats réactifs.

En revanche, seulement deux modèles ; [Furusawa et al.1994] et le modèle proposé par [Xi et al.1999] ensuite développé par [Zhuang et al.2013] sont écrits de manière à tenir compte de la présence simultanée de plusieurs granulats réactifs différents dans le matériau. Notre modèle aura l'avantage d'étudier de manière plus proche l'effet des fractions des agrégats sur l'ensemble de la réaction et la surface volumique qu'occupe les échantillons durant l'expérimentation. Les modèles cités auparavant assume une source infini d'alcalin d'approvisionnement pour la réaction.

Dans un premier temps, nous avons lancé une campagne expérimentale dans le but de mettre en évidence la réactivité des granulats utilisés et d'une part l'influence de la taille et fraction des granulats réactifs. Le mode opératoire et les résultats obtenus sont présentés dans le chapitre 3.

Dans un second temps, nous avons défini une « modélisation chimique » de la réaction qui est une évolution du modèle proposé par Sellier [Zhuang et al.2013]. Elle se base sur la diffusion et des mécanismes réactionnels probables pour décrire l'évolution chimique du matériau et prédire l'avancement et le gonflement libre induit par la réaction en tenant en

compte l'effet de la température et les fractions des tailles d'agrégats sur la réaction. Elle prend en compte les ions sodium ou de potassium pour pouvoir confronter notre modèle avec les résultats obtenus de l'expérimentation.

Une version simplifiée du modèle est proposée, la source des alcalins est en fonction direct avec les créations du volume de gel expansive. Le modèle est utilisé pour reproduire les résultats des essais cités précédemment. La comparaison entre les simulations et les allongements expérimentaux sont étudiés.

Le développement d'un modèle mésoscopique est une préoccupation majeure des chercheurs qui tentent de comprendre les mécanismes impliqués dans la réaction et de prédire l'expansion future du béton, vue que le facteur majeur pour l'occupation de la RAG dans l'agrégats.

La modélisation étudier les différents aspects de la réaction : la mécanique conséquences d'un agrégat expansive dans la pâte de ciment [Furusawa et al.1994] [Xi et al.1999], [Bazant et al. 2000], [Zhuang et al.2013], les mécanismes chimiques qui conduise les attaques de l'agrégat par des ions hydroxyle [Furusawa et al. 1994], et leur couplage [, Milton et al. 2009], [Poyet et al. 2007], [Nielsen et al. 1993,].

Le travail présenté ici est basé sur le modèle mésoscopique développé par [Zhuang et al.2013]. Ce modèle est basé sur certains des modèles antérieurs [Furusawa et al. 1994], [Xi et al.1999], [Poyet et al. 2007], par prédictions des dommages de l'expansion d'un volume représentatif élémentaire (VER) de béton contenant un mélange de granulats réactifs de différentes tailles.

L'attaque de la silice réactive par les alcalins a été déterminé par l'équation d'équilibre de masse, qui commande le mécanisme de diffusion dans l'ensemble et la fixation de la substance alcaline dans les gels de la RAG et de calculer l'expansion d'un volume élémentaire représentatif (REV) du béton [Multon et al., 2009].

II-Les hypothèses de la modélisation

Le modèle a été basé d'abord sur les mécanismes proposés par [Dent-Glasser et al.1981] et sur des considérations faites par [Jones .1988] :

- Les ions hydroxyles diffusés autour de l'agrégat réactif, attaque et détruire les liaisons Si-O, puis former un gel de silice en présence d'ions de l'eau et de calcium.
- Le gel pénètre à travers les pores connectés qui existent entre les granulats et la pâte de ciment et remplit une partie de la porosité connectée.

Lorsque le volume du gel est supérieur au volume poreux, il exerce une pression sur la pâte de ciment, ce qui provoque la fissuration et à l'expansion du béton.

Sur la base des mécanismes ci-dessus, plusieurs hypothèses ont été faites pour simplifier le processus physique et chimique de cette réaction. Simplifications doivent être prises afin de modéliser l'expansion de la RAG en conformité avec la plupart des phénomènes.

III-Géométrie

L'agrégat réactif est considéré comme étant sphérique pour idéaliser et simplifié le phénomène. Le volume relatif élémentaire (VER), qui représente l'environnement de l'agrégat dans la pâte de béton, est supposée être sphérique aussi (Fig.4.III.1).

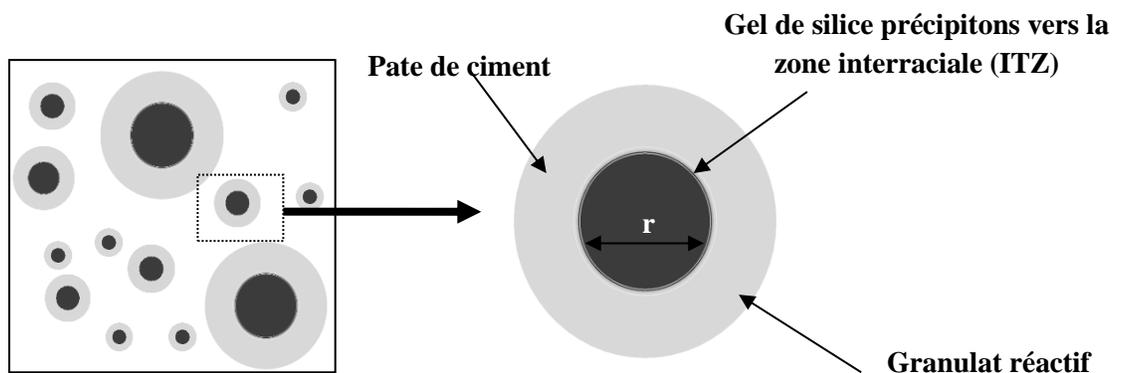


Fig.4.III.1 : Définition du volume élémentaire relatif (VER) de plusieurs tailles d'agrégats réactifs [Poyet et al. 2007]

IV-Modèle adopté

Le produit de réaction est un gel amorphe, qui se gonfle en présence d'eau, la pression du gonflement excédant la limite des contraintes de traction de la pâte cimentaire génère des fissures.

Bien que beaucoup de travail ont été faite pour déterminer les propriétés du gel de silice formées, où il est le point clé pour déterminer les dommages induits de gel de silice. Cependant, la modélisation du gel de silice doit être afin d'expliquer le comportement du béton affecté par la RAG, connaissant la complication qui prend de saisir le mécanisme mécanique et chimique du phénomène.

Le produit de la réaction chimique (gel silice) est un aspect fondamental de cette réaction, ainsi le transport des ions alcalins dans les solutions de pores *deq* grains réactifs ont montré que les ions alcalins se déplacent vers les grains réactifs en précipitant vers le contour des grains et des agrégats, en pâte de ciment / frontières globales.

Des études de modélisation ont été basés sur deux hypothèses pour prédire la RAG, qui implique la dissolution / diffusion de la silice et à la fin de la formation du gel gonflement en présence d'humidité [Grimal et al.2010].

[Furusawa et al.1994] décrivent le mécanisme réactionnel de façon que la cinétique de réaction est considérée topochemique, et la diffusion des ions hydroxyles OH⁻ dans l'ensemble réactif, et déduisent par la 2eme loi de Fick que :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (\text{Equ.IV.1})$$

[Zhuang et al.2013] suivent le même raisonnement que [Furusawa et al.1994] et [Poyet et al. 2007], avec prédiction de la création du gel de silice par introduction d'une augmentation du volume des produits de la réaction de la couche réactive sur le granulat.

$$V_{gel_i} = n_{gel_i} \cdot V_{gel/mol} \quad (\text{Equ.IV.2})$$

La contribution de la taille des agrégats et de la forme asymptotique de l'expansion du matériau est écrite par la différence entre le volume total du produit de gel et l'absorption par la surface poreuse.

Cependant la fraction des tailles des mêmes agrégats ϕ_i doit être mise en compte pour avoir un résultat réaliste de l'expansion pour chaque type d'agrégats pour l'ensemble du volume en question.

Et comme la quantification des fractions des taille agrégats peut être calculé et estimé expérimentalement et sa difficulté par une analyse granulométrique des tailles d'agrégats potentiellement contribuant dans la réaction.

$$\varepsilon_{gel_i} = \frac{V_{gel} - V_{pores}}{V} \quad (\text{Equ.IV.3})$$

De même, le nombre d'agrégats réactifs N_g est calculé à une fraction volumique de la fraction du volume entier de la structure.

$$N_{ag} = \phi_i \quad (\text{Equ.IV.4})$$

Où : ϕ_i : Fraction des tailles d'agrégats réactifs

Les hypothèses retenues dans ce modèle indiquent que la réaction a une source semi-infini d'alcalins, une quantité fixe de matériau qui nécessite une quantité constante d'alcalins.

Comme expliqué dans l'introduction de ce chapitre, le modèle a été modifié pour tenir les conditions expérimentales spécifiques en compte. Dans les expansions analysées dans cette partie, les échantillons ont été immergés dans une solution de NaOH (1 mol /L).

$$Na_2O_{eq} = Na_2O (\%) + 0.658 K_2O(\%) \quad (\text{Equ.IV.5})$$

La diffusion ionique dans la pâte de ciment est considérée comme à peu près homogène.

[Poyet 2003] prend le coefficient de diffusion de l'alcali dans la pâte de ciment a été estimé à environ $10E-11 \text{ m}^2/\text{s}$ tandis que le coefficient de diffusion dans l'ensemble était de $8.9E-11 \text{ m}^2/\text{s}$ pour [Suwito et al. 2002].

Par conséquent, [Multon et al. 2009] a estimé que la diffusion dans la pâte était beaucoup plus rapide que la diffusion dans l'ensemble et donc la diffusion dans la pâte de ciment a été considéré qu'elle n'affecter pas la cinétique de la RAG. Cette hypothèse a été faite pour l'analyse de petits échantillons (20 mm) ne sont pas exposés à une source externe d'alcali.

Cependant, les observations faites sur les mesures expérimentales présentées au chapitre 3 montrent que cela ne peut être assumée pour les gros spécimens (comme $50 \times 50 \times 285 \text{ mm}$ et $25 \times 25 \times 285 \text{ mm}$). Par conséquent, le modèle a été modifié afin d'examiner l'effet de la diffusion alcaline dans la pâte de ciment et de prévoir les vitesses de dissolution différentes observées en fonction de la surface effective de l'échantillon.

$$C(x, t_0) = D \cdot M_v \cdot S_c \quad (\text{Equ.IV.6})$$

Où :

D : coefficient de diffusion

M_v : nombre de mole absorbé par volume de l'échantillons.

S_c : surface effective

Les conditions aux limites initiales sont définies :

$$\left. \begin{aligned} C(z, 0) &= 0 \\ \int C(z, t) dz &= C_0 \\ C(z, \infty) &= 0 \\ Z(r) &= R_{equ}(D_i) \end{aligned} \right\} \quad (\text{Equ.IV.7})$$

La diffusion des alcalins vers les agrégats près de la limite extérieur des échantillons en raison

de la source externe des alcalins, ou ils vont réagir avec les agrégats au noyau des échantillons. Cela signifie que tous les agrégats d'une dimension donnée ne peuvent pas avoir la même expansion en même temps (la différence de cinétique), qui est en opposition avec l'hypothèse formulée ci-dessus. Seulement discrétisations complète de l'ensemble des échantillons permettrait cette différence d'expansion à considérer. Ce type d'approche a été proposée par [Comby et al. 2009].

Dans notre travail, le phénomène de diffusion dans l'échantillon a été simplifié, en prenant une concentration fixée par l'expérimentation qui est proportionnel avec le déroulement de la réaction.

La solution à la 2^{ème} loi de Fick dans ces conditions est :

$$C(z, t) = C_0 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4Dt}}\right) \quad (\text{Equ.IV.8})$$

Selon la première loi de Fick pour la diffusion, le flux d'alcalins peut être décrite par l'équation suivante :

Pour le flux d'interface granulat/pâte de ciment :

$$J = \sqrt{\frac{D}{\pi t}} \cdot C(z, t) \quad (\text{Equ.IV.9})$$

Et en prenant l'effet du temps et l'espace (Equ.IV.9) devient :

$$J = \sqrt{\frac{D}{\pi t}} \cdot e^{-\frac{z^2}{4Dt}} \cdot C_0 \quad (\text{Equ.IV.10})$$

La composition de gel de silice est variable et dépend de nombreux paramètres de la réaction [Leemann et al.2013]. Le rapport Na₂O/SiO₂ a été jugée 0,1 ~ 0,4 [Kawamura et al. 2003] , [Taylor 1990], [Thaulow et al. 1996].

Dans le modèle utilisé ici, le Na₂O/SiO₂ le rapport est supposé être égal à une valeur moyenne de 0,2 obtenue dans des expériences de laboratoire dans [Kawamura et al. 2003] et utilisé dans [Multon et al.2009]. Cela veut dire que 1 mole de Na₂O_{equ} réagit avec 5 moles de SiO₂ donnent 1 mole de gel de silice.

[Maxwell.2014] explique que la quantité qui passe à travers le volume dans le cas de flux, et l'intégration du flux, sur un volume, les résultats de cette opération est appelée la surface intégrale du flux. Elle représente la quantité qui passe à travers la surface, le volume de gel de silice en milieu alcalin peut être décrit par :

$$V_{gel_i} = N_{ag} \cdot V_{gel/mol} \cdot 4 \cdot \pi \cdot R_{equ}^2 \cdot \int_0^t (J \cdot dt) \quad (\text{Equ.IV.11})$$

L'effet de la température et l'évolution de l'expansion développée par [Larive.1997] est adopté dans ce travail sachant la dépendance de la RAG à la température.

$$\xi(t) = \varepsilon(\infty) \frac{1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_c}\right)}}{1 + e^{-\left(\frac{t_L - t}{\tau_c}\right)}} \quad (\text{Equ.IV.12})$$

Ou:

$$\tau_c(T) = \tau_c(T_0) e^{U_c \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

$$\tau_L(T) = \tau_L(T_0) e^{U_c \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

Donc l'expansion de la RAG par gonflement du gel de silice peut être décrite comme ci-dessus par :

$$\varepsilon_{RAS_i} = \frac{\langle V_{gel} - V_{pores} \rangle}{V} \cdot \xi(t) \quad (\text{Equ.IV.13})$$

A la fin l'expansion final induite par la réaction peut être exprimée comme suit :

$$\varepsilon_{RAS} = \sum_{i=0}^n \varepsilon_{RAS_i} \cdot \Phi_i \quad (\text{Equ.IV.14})$$

V-Validation du modèle par rapport l'expérimental

V-1-Comparaison des résultats de notre modèle avec l'expérimentation

Les calculs ont été effectués pour analyser les expériences présentées dans le chapitre 3 (tests d'expansion) avec le modèle adopté présenté ci-dessus, ainsi une comparaison de la sensibilité du modèle avec le modèle de [Zhuang et al.2013] pour voir l'effet de la température.

L'efficacité de notre modèle a été comparais avec les résultats obtenus par [Zhuang et al.2013] ou des tailles d'agrégats qui varie de 4,75 à 9,5 mm, de 9,5 à 16 mm, 16-19 mm et 19-26.5 mm. La réactivité a été tester par des prismes de 100 mm × 100 mm × 400 mm. Le ciment utilisé est un ciment Portland avec une teneur en alcalin de 0,565% en de Na₂O_{eq} équivalent (Na₂O + 0.658K₂O).

L'expansion a été calculée selon le modèle proposé. Les résultats des calculs ont été obtenue à partir des paramètres proposés par [Zhuang et al.2013] lister en dessous, comme le montre les figures 1.2:

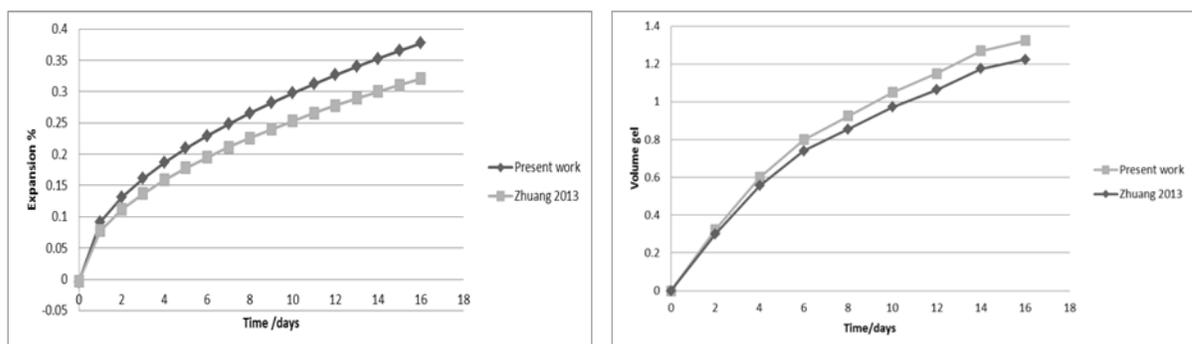


Fig.4.V.1: expansion et calcul du volume de gel formé pour la taille d'agrégats 4.75mm

V-1-1-Parametres de modélisation

Paramètre	Values
Volume fraction des agrégats réactive [Zhuang et al.2013]	ϕ_i
Taille des échantillons / mm ³ [Zhuang et al.2013]	25x25x285 / 50x50x285
Porosité / % [Zhuang et al.2013]	40x40x100
Coefficient de Diffusion des Na ⁺ dans la pâte de ciment / (m ² /s) [Larive.1997]	13-16 8.5 x 10 ⁻¹³
volume de gel molaire / (cm ³ /mol) [Zhuang et al.2013]	21.5
Concentration du Na ₂ O _i / (mol/L) [Zhuang et al.2013]	0.327
Tailles d'agrégats (mm) [Zhuang et al.2013]	4.75-9.5
Temps de calcul (jours) [Larive.1997]	16
Coefficient de Poisson d'agrégats [Yang et al.1995]	0.23
Module de Young d'agrégats / Gpa [Yang et al.1995]	54.0
Coefficient de Poisson de pate de ciment [Yang et al.1995]	0.217
Module deYoung de la pâte de ciment / Gpa [Yang et al.1995]	28.46
Température ambiante T ₀ / C° [Larive.1997]	21.0
Température T/C°[Larive.1997]	60.0
Temps caracteristique τ_c (T ₀) /day [Larive.1997]	1
Temps de latence τ_L (T ₀)/day [Larive.1997]	2
U _c Energie d'activation de τ_c (T)/K [Larive.1997]	5400
U _L Energie d'activation de τ_L (T)/K [Larive.1997]	9500

La confrontation des résultats du programme expérimental présenter dans le chapitre 3 avec les résultats numériques nous montre l'amplitude que le modèle peut nous donner.

V-1-1-AMBT (ASTM C1260)

La validation de notre modèle a été comparés avec les résultats obtenue dans le chapitre 3 , ont utilisant à partir de l'analyse granulométrique les fractions des tailles de particules réactifs pour calculé l'expansion total comme suggérer dans (Chapitre 3, IV) pour chaque type d'essais fait.

V-1-1-1-Fraction des tailles d'agrégats pour l'AMBT

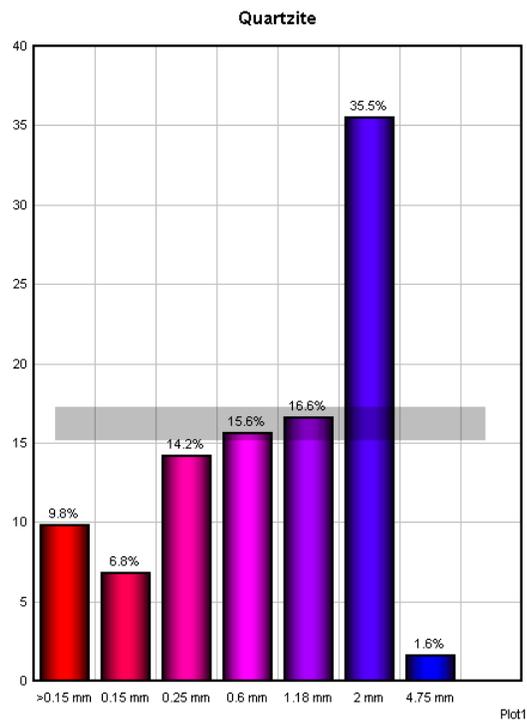


Fig.4.V.2 : Fraction des tailles d'agrégats pour la méthode AMBT (ASTM C1260)

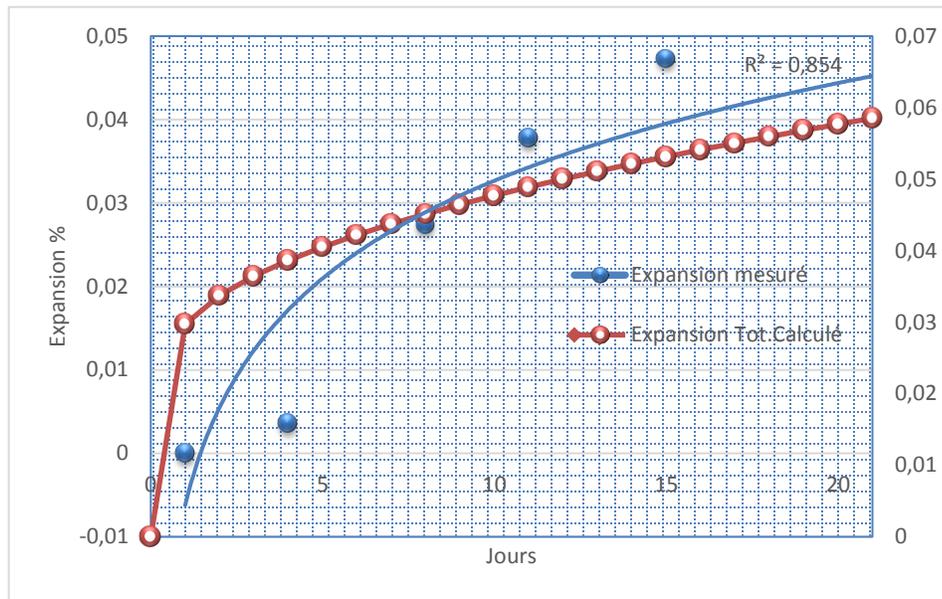


Fig.4.V.3 : Expansion des agrégats Quartzite selon la méthode AMBT (ASTM C1260)

V-1-2-MCPT (AASHTO 110.14)

V-1-1-1-Fraction des tailles d'agrégats pour le MCPT

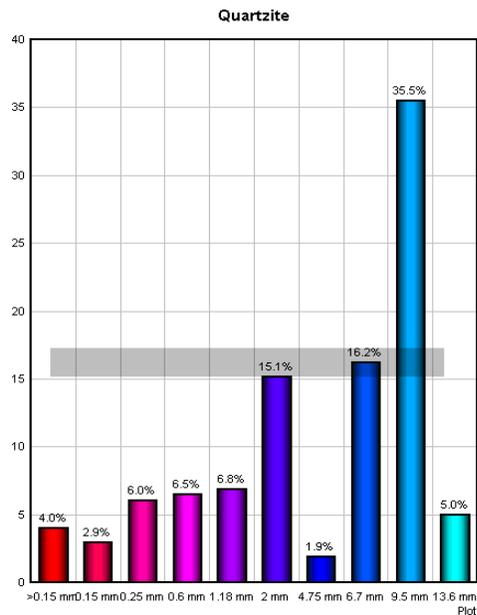


Fig.4.V.4 : Fraction des tailles d'agrégats pour la méthode MCPT (AASHTO 110.14)

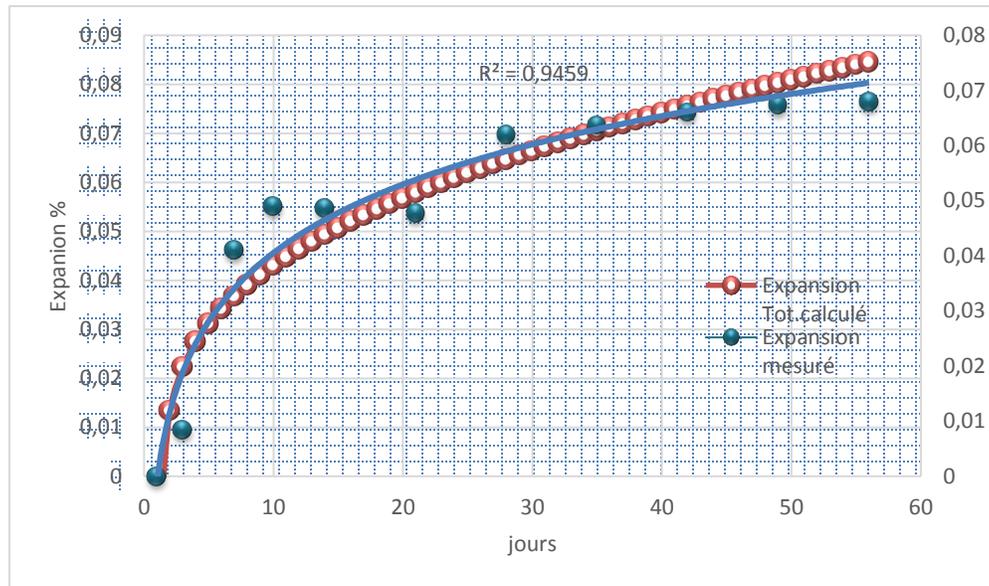


Fig.4.V.5 : Expansion des agrégats Quartzite selon la méthode AMBT (ASTM C1260)

VI-Implémentation du modèle dans un FEM application

L'expansion obtenue par confrontation du modèle avec la littérature, a été implémenté dans un programme élément finis (FEM / FreeFEM++) pour voir le comportement d'un volume élémentaire relatif (VER) sous contrainte induite d'une déformation à origine chimique.

VI-1-L'analyse de l'expansion dans VER

Dans ce travail, la mise en œuvre de ce modèle adopté est modélisé par Freefem. La mise en place d'un VER 2D et le calcul numérique de l'expansion générée est modélisé en insérant la déformation pour analyser l'effet de l'expansion de la structure du VER.

Pour faciliter la modélisation du gel de silice formé par la RAG, quelques simplifications ont été faites pour mettre en œuvre un modèle efficace pour que nous comprenons d'une manière efficace le comportement d'un béton affecté par la RAG à échelle mésoscopique. Pour cette enquête préparatoire, un modèle de déformation plane est adopté, ainsi deux dimensions de

segment de VER de forme sphérique est choisi.

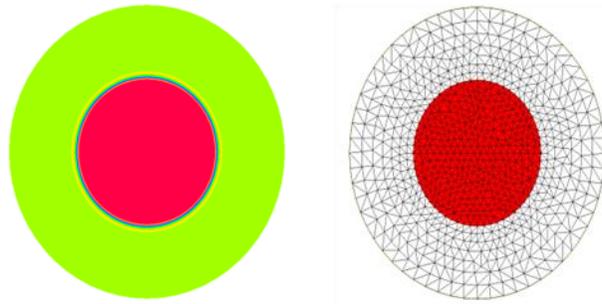


Fig.4.VI.1 : une coupe transversale du VER

Les résultats montrent que le modèle proposé seront ressortaient de ceux utilisant la situation actuelle avec le modèle de la pratique [Saouma et al.2010] avec un développement direct qui dépend de la température et la réponse cinématique réactionnel.

En outre, en raison des contraintes de traction internes, la formation du motif de la fissure observée explique que, quelles qu'en soient les mérites scientifiques, pour étalonnées les mesures en terrain, seuls les modèles solidement fondés sur la chimie, la physique et la mécanique de la RAG, sont susceptibles de donner un champ de contrainte réalistes, qui est ce qui concerne finalement les ingénieurs.

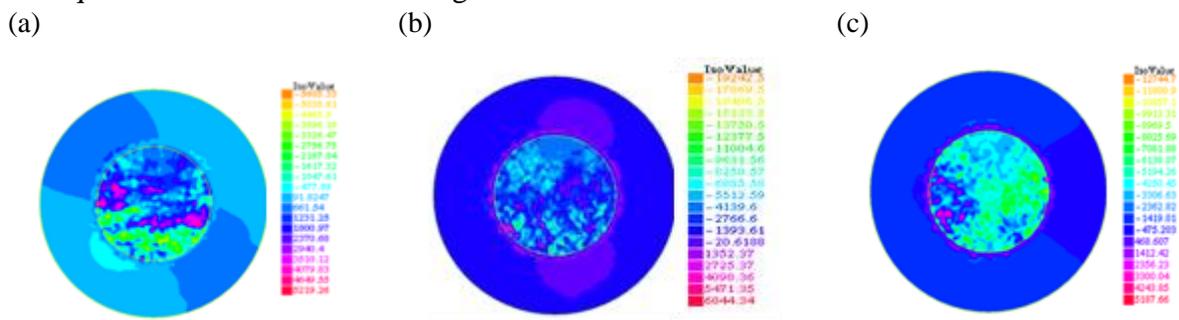


Fig.4.VI.2 : (a, b, c) Réponse des contraintes générées par l'expansion du gel de silice

Les résultats montrent le mécanisme de déformation et d'endommagement à l'échelle mésoscopique (voir Fig.4.VI.2), où la contrainte est maximale à l'interface gel de silice formé / agrégat (voir Fig.4.VI.3); après un court laps de temps ou la résistance mécanique des agrégats peu cohérents rejoint le seuil critique et se déforme sans revenir à son comportement élastique linéaire, contrairement au gel de silice formée et la pâte de ciment dont ils ont des propriétés mécaniques réduites par rapport aux agrégats (voir le tableau des paramètres), mais ils ont absorbé plus de contrainte par la suite plus d'énergie que l'agrégat qui a un comportement élastique (voir Fig.5).

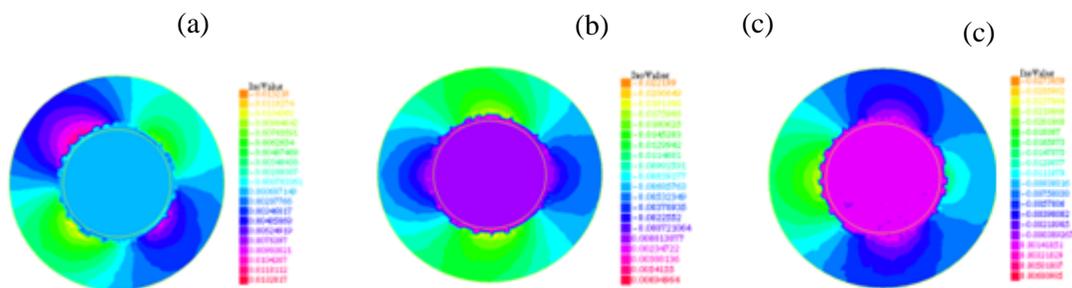


Fig.4.VI.3 : (a, b, c) réaction de la déformation de l'expansion du gel de silice formé.

Comme nous l'avons dit le (voir Fig.4.VI.3) montrent que la déformation provoquée par l'expansion du gel formé par la réaction est principalement concentrée à l'interface gel de silice/ agrégat mais la prolongation du champ de déformation vers la pâte cimentaire montre l'effet des différents caractéristique mécaniques sur le comportement d'endommagement que subis le béton après expansion du gel de silice sur l'agrégat.

Ce résultat a montré que le comportement rhéologique du composant en béton (agrégats, la pâte de ciment, du gel de silice formée,...) devrait être étudiée davantage.

VII-Limite de notre modèle

Cependant, notre modèle proposé n'est pas satisfaisant pour diverses raisons pour le cas général et globe de la réaction. En premier lieu, il ne tient pas compte de la diffusion des ions

dans la pâte de ciment durcie qui entoure les granulats réactifs. De plus, la diffusion dans les granulats est modélisée par une équation simplifiée. Ensuite, le modèle ne tient pas compte des ions calcium. Enfin, la baisse de la concentration en alcalins à l'interface granulats/pâte est déterminée au moyen d'un paramètre expérimentale.

Pour cela l'amélioration d'un modèle qui ne tient pas seulement des lacunes citées précédemment, la demande pour un modèle plus complet nécessite la compréhension quasi-parfaite du mécanisme qui en tourne la réaction mais en tenant en compte des paramètres moins complexes pour l'accomplir.

VIII-Mécanisme d'avancement de la réaction alcali granulaire

La composition chimique de cette réaction est complexe [Chatterji.2005] à plusieurs étages [Ichikawa et al.2007] et est essentiellement un un produit acide-base . Le réactif acide est la silice à l'état solide, les réactifs basiques sont le potassium et / ou de l'hydroxyde de sodium et éventuellement de calcium dans la solution interstitielle. Le milieu réactionnel est l'eau et le produit de la réaction est un hydrate de silicate de potassium, de calcium, ou un hydrate de silicate de sodium de calcium [Dron et al.1992], en fonction de la position par rapport à la pâte de ciment et l'âge du gel de silice formé .

Les Alcalis sont présents dans le ciment Portland sous forme de sulfates alcalins, alcali-aluminate, et la solution solide de bélite. Parmi ceux-ci, les sulfates alcalins sont la phase dominante et soluble dans l'eau, ce qui signifie que le contre-ion des alcalins dans la solution de pore dans la première étape de l'hydratation du ciment est du sulfate. En conséquence, lorsque la précipitation subséquente de l'ettringite est terminée, le contre-ion des alcalis dévient hydroxyde.

Cela se traduira par une augmentation du pH de la solution des pores tandis que les deux ions alcalins (Na^+ et K^+) et les ions hydroxyde (OH^-) se concentrera à suffisamment de haut niveau pour attaquer la silice réactive dans l'ensemble pour former un alcali -gel de silice. Il convient de noter qu'il existe des preuves de plus en plus que les alcalis peuvent également être trouvés

dans certains agrégats, comme prouvé dans le chapitre précédent où le niveau d'alcalins équivalent dans l'andésite et le quartzite excèdent le niveau inférieur fixé par l'ASTM pour l'occurrence d'une réaction.

Si le pH est supérieur à une valeur critique, les silicates alcalins contenant vont être libérés par l'interaction avec la solution interstitielle dans le béton et la réaction sera plus sévère que le contraire [Bérubé et al.2002], [Constantiner et al.2003].

Dans notre calcul des réactants et produits de la réaction au sein d'un granulats réactifs au potentiellement réactifs, pas distinction est faite quant à la source de la substance alcaline et silicisieuse ou l'analyse chimique pour chaque type d'agrégats est déterminé auparavant. Les examens pétrographiques réalisés nous donnent un aperçu sur le mécanisme réactionnel de la RAG qui agit de la manière expliquée par [Monnin.2005] :

Les examens pétrographiques, montre que la RAG procède par les étapes suivantes comme expliqué [Katayama.2012] :

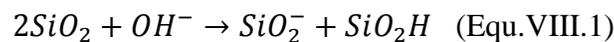
- (i) la formation de jante de la réaction, et exsudation
- (ii) effet de jante/ exsudation de sol / gel sur l'agrégat ayant réagi partiellement remplissant la microporosité dans la pâte de ciment,
- (iii) la fissuration à l'intérieur de l'agrégats mis accompagnée la réaction d'un gel-le remplissage,
- (iv) la propagation radiale des fissures du gel de silice formé vers l'agrégats réactif en entourant la pâte de ciment,
- (v) et la précipitation du gel de silice dans les pores d'air le long des fissures éloignés de l'agrégat réagi.



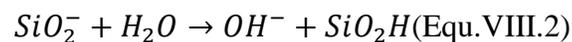
Fig.4.VIII.1: Fissure à l'intérieur de la nucléation des granulats suivi par la propagation à l'intérieur de la pâte de ciment [Katayama.2012]

L'ensemble des mécanismes réactionnels et modèles d'expansion, le schéma réactionnel suit l'étape suivante explique [Monnin.2005] :

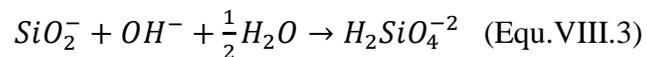
Etape 1 : Formation des tétraèdres Q3 par l'attaque des ions hydroxyles sur les tétraèdres Q4:



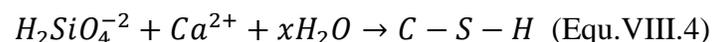
La rupture d'une liaison siloxane induit la formation de deux tétraèdres Q3. En fonction du pH, les sites Q3 sont soit sous forme ionisée soit sous forme protonée :

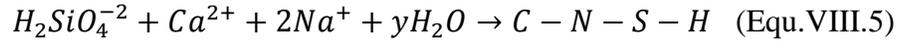


Etape 2 : Dissolution des tétraèdres Q3 sous la forme de tétraèdres Q0 suite à la poursuite de la découpe des liaisons siloxanes par les ions hydroxyles :



Etape 3 : La silice dissoute peut diffuser dans la solution interstitielle et former avec les alcalins et la chaux des silicates de calcium hydratés et/ou des silicates calco-sodiques hydratés :

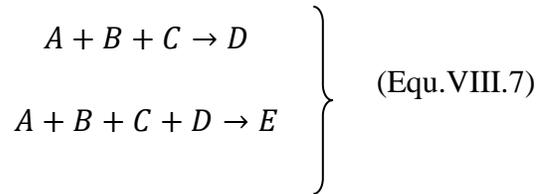




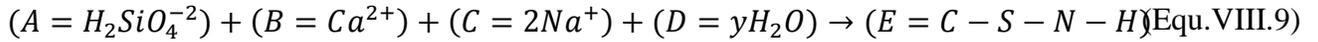
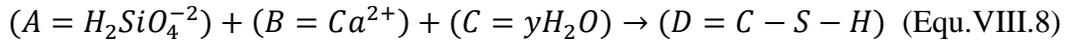
L'application de la loi de Fick nous donne une réaction chimique de 2eme ordre ou la cinétique de réaction se traduit sur les lois de cinétiques basics de la chimie élémentaire :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \nabla C_i) &= R_i \\ N_i &= -D_i \nabla C_i \end{aligned} \right\} \quad (\text{Equ.VIII.6})$$

Etant donné que la réaction est :



Où :



Une fois que le gel de silice migre de l'agrégat ayant réagi et atteint la pâte de ciment, il prend le calcium et perd ainsi les ions d'alcalins de la composition, de ce fait la ressemblance de la composition du gel de silice avec le CSH. [Katayama.2008]

Le remplissage des fissures par le gel de silice de l'ensemble dans la pâte de ciment a également une allure sigmoïde suggère un procédé de diffusion. [Katayama.2012]:Fig. 5 (a)).

Dans cette réaction d'hydrolyse d'un pH de pores élevé le réactant fluide réagit avec des liaisons Si-O-Si pour former l'acide silicique (silanol) et un gel de silicate alcalin. Les agrégats imperméables (Tel que l'andésite) réagissent très lentement. [Saouma et al.2015]

L'objectif de cette étude est de tirer un seul terme cinétique qui peut caractériser la réaction :

$$k_{RAG} = f(k_1, k_2, k_3) \quad (\text{Equ.VIII.10})$$

Tout d'abord, le taux de variation de la concentration pour chacun des cinq constituants est écrite sous la forme [Espenson.2002]

$$\frac{dA}{dt} = -k_1 A(t)B(t) \quad (\text{Equ.VIII.11})$$

$$\frac{dB}{dt} = -k_1 A(t)B(t) - k_2 D(t)B(t) \quad (\text{Equ.VIII.12})$$

$$\frac{dC}{dt} = k_1 A(t)B(t) + k_2 D(t)B(t) - k_3 C(t)E(t) \quad (\text{Equ.VIII.13})$$

$$\frac{dD}{dt} = k_1 A(t)B(t) - k_2 D(t)B(t) \quad (\text{Equ.VIII.14})$$

$$\frac{dE}{dt} = -k_3 C(t)E(t) \quad (\text{Equ.VIII.15})$$

Où k_i est une constante réelle positive pour $i = 1,2,3$ et $(A | B | C | D | E)$ est la concentration en moles par volume de solution est déterminé dans le système par analyse chimiques du ciment, et agrégats (andésite, quartzite) exprimé par des équations différentielles ordinaires.

VIII-1-Les Hypothèses

Etant donné que la concentration molaire doit être positif ou nul, A, B, C, D, et E sont considérés comme positifs ou nuls, tandis que A (t = 0) et B (t = 0) doit être différente de zéro pour une réaction alcali-silice se produise. Il convient de noter que D (t = 0), comprendra à la fois l'eau générée (Eq. (6)) et la présence initiale de l'eau $D \geq 0$. Par souci de simplicité, on suppose en outre que $C (t = 0) = D (t = 0) = E (t = 0) = 0$. Alors qu'il est communément admis que la RAG est régie par une source de silice semi infinie.

Comme toutes les réactions chimiques, la RAG est en fonction à la fois du temps et de la température, l'échelle de temps est mesurée en journée.

La cinétique de la RAG a été examinée directement ou indirectement par les chercheurs, selon le modèle adopté. Au niveau macro empirique (basée sur l'expansion des prismes et barres de mortiers) des modèles cinétiques ont été développés. Le modèle adopter dans notre calcul est basé sur la combinaisons de plusieurs modèles.

Par ailleurs, et comme indiqué précédemment, l'effet de la température, confinement et le type d'agrégat, bien que critique, sont par les présentes ignorée pour des raisons de simplification.

La solution aux équations différentielles ordinaires temporelles a été réalisé à l'aide du module Chemical Reaction de Cosmol MultiPhysics [Comsol.2013].

VIII-2-La caractérisation chimique des réactifs et produits de la réaction

Il convient de noter qu'il existe des preuves de plus en plus que les alcalins peuvent également être trouvés dans certains agrégats (tels que ceux extraits de la roche contenant du feldspath, mica illite ou verre volcanique, andésite, et quartzite).[Saouma et al.2015]

La silice, en revanche, est le constituant principal de la plupart des agrégats sous la forme de dioxyde de silicium (SiO_2). La silice réactive tels que: 1) début expansive (opale, cristobalite, tridymite et calcédoine) et 2) expansive a particule fins (crypto cristalline et quartz microcristallin), et 3) verres volcaniques siliceuse (par exemple verre rhyolitique) sont tous présents dans les roches siliceuses à travers toute types de l'agrégat [Katayama et al.2010] (Fig. 4d).

Tab.4.VIII.1 : Concentration initial des réactants de la réaction chimique.

	<i>Ciment</i>			<i>Andésite</i>			<i>Quartzite</i>		
	%	<i>MM</i>	<i>MM %</i>	%	<i>MM</i>	<i>MM %</i>	%	<i>MM</i>	<i>MM %</i>
<i>SiO₂</i>	21,6	60,09	0,35946	71,5	60,09	1,18988	77,4	60,09	1,28807
<i>CaO</i>	65,1	56,08	1,160841655	2,75	56,08	0,04904	0,43	56,08	0,00767
<i>NaO₂_{equ}</i>	0,38	61,98	0,00613101	6,46	61,98	0,10423	1,73	61,98	0,02791

* **MM : Masse molaire**

Les agrégats larges ont tendance à retenir des concentrations plus élevées de OH^- et d'ions d'alcalins à l'intérieur de l'ensemble (Cas des essais MCPT où le % des agrégats gros sont de l'ordre de 10%), d'où la formation d'un gel expansive riche en alcalins initié à l'intérieur des agrégats grossiers, plutôt que sur la surface où le calcium domine dans la pâte de ciment. [Saouma et al.2015]. Ceci explique la sévère fissuration typique des agrégats grossiers.

Tab.4.VIII.2 : Récapitulatifs des concentrations initiales et du volume d'eau.

Contribution totale	Pour l'andésite /%MM	Pour le quartzite /%MM	MCPT H₂O /%MM	MCPT H₂O /%MM	Volume du bar de mortier	Volume du prisme de béton
<i>SiO₂</i>	1,54934	1,647528707	0,041285	0,08116	25 x 25 x 285 (mm)	50 x 50 x 285 (mm)
<i>CaO</i>	1,209878745	1,168509272				
<i>NaO₂_{equ}</i>	0,11035818	0,03404324				
<i>OH</i>	5,13583E-08	1,00997E-07				

Des simplifications ont été suggérées par de nombreux chercheurs supposant la réaction se produise sur la surface de l'agrégat pour produire des silanols (groupes Si-OH). Dans un premier temps, chaque atome de silicium est relié au réseau par quatre liaisons siloxane et sera rompu par des ions OH^- .

Compte tenu de la complexité du problème, et l'absence d'études antérieures directement liées, les effets suivants sont négligés :

- 1) La présence de calcium et de substitution en milieu alcalin calcium [Dent-Glasser et al.1981]
- 2) la température ;
- 3) et Le confinement structurelle [Multon et al.2006],
- 4) et Enfin, il convient de souligner que, k_i n'a pas été déterminée, mais des valeurs constantes en été proposé par [Saouma et al.2015]

VIII-3-Résultats asymptotiques

VIII-3-1-ASTM

VIII-3-1-1-CSH

Les résultats obtenus pour le développement des équations différentielles pour quantifier le produit de l'hydrations est montré dans la Fig.4.VIII.1.

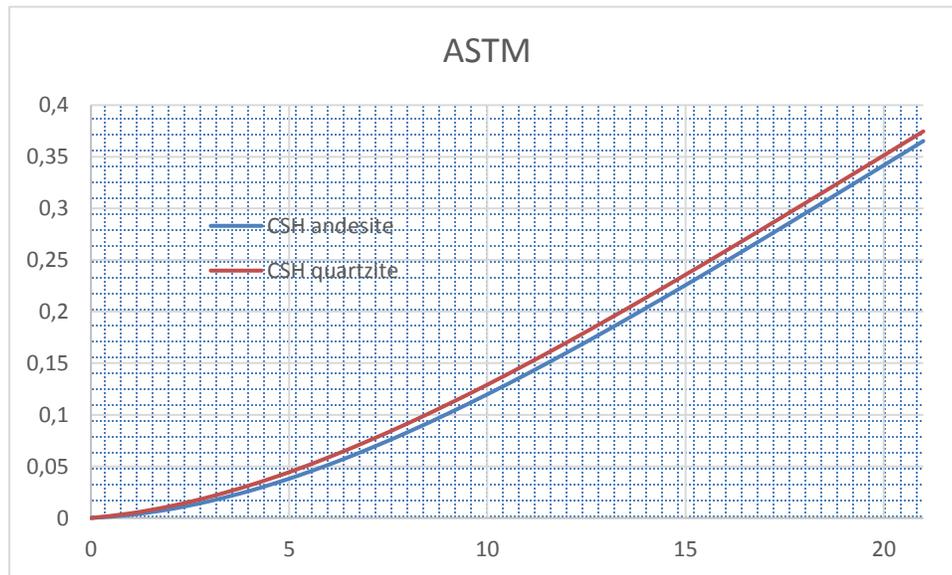


Fig.4.VIII.1 : Evolution du produit CNS pour l'ASTM dans une période de 21 jours

La Fig.4.VIII.1 montre que le produit de la réaction (Equ.VIII.8) a un taux de croissance lent. Ce taux de croissance initiale est encore plus lent pour le béton confectionner avec l'andésite, ou le CSH enregistre 0.37 mol/m^3 pour le quartzite. En outre, il faut noter que la différence entre les deux produits pour chaque type d'agrégats est très petite de l'ordre de 2%.

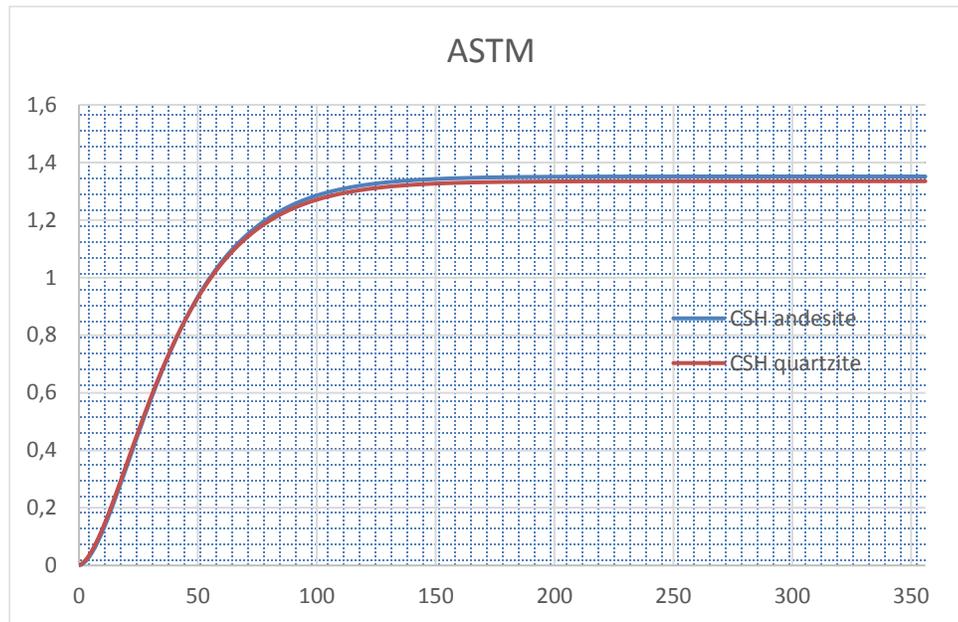


Fig.4.VIII.2 : Evolution du produit CSH pour l'ASTM dans une période de 356 jours

Le produit de la réaction (Equ.VIII.8) concernant l'hydratation a un taux de croissance relativement accélérer pour les premier 100 jours avant de se stabiliser, avec un effet sigmoïdal réduit, ou le taux du CSH enregistre 1.35 mol/m³ devant 1.33 mol/m³ pour le le quartzite. En outre, il faut noter que la différence entre les deux produits pour chaque type d'agrégats est très petite de l'ordre de 1.22%.

VIII-3-1-2-CNSH

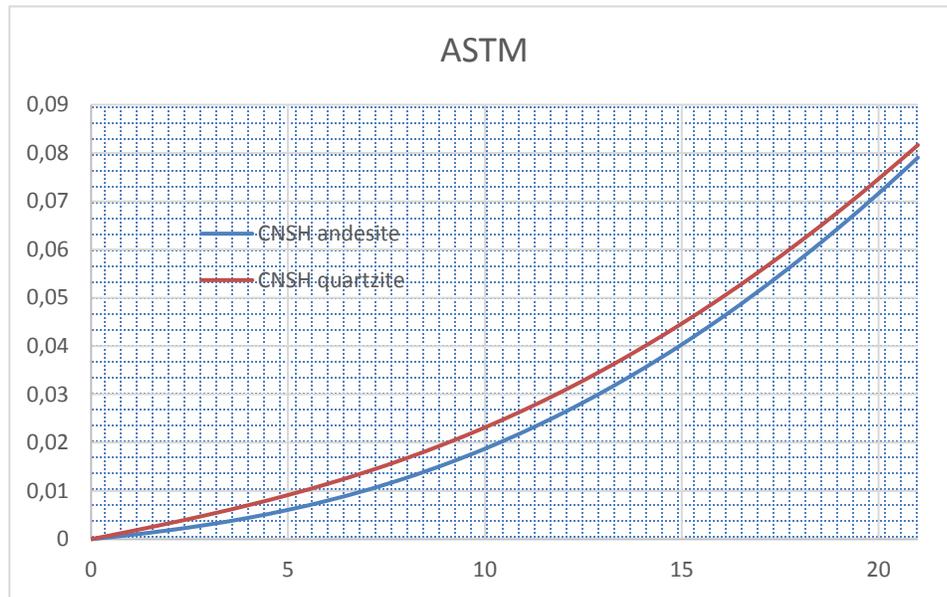


Fig.4.VIII.3 : Evolution du produit CNSH pour l'ASTM dans une période de 21 jours

La Fig.4.VIII.3 montre que le produit de la réaction (Equ.VIII.9) concernant le RAG a un taux de croissance relativement moins lent, vue en note une augmentation totale pour les deux cas d'agrégats de 2 fois plus que celle du CSH, ou le CSH enregistre 0.37 mol/m^3 devant 0.81 mol/m^3 pour le CNSH. En outre, il faut noter que la différence entre les deux produits pour chaque type d'agrégats est très petite de l'ordre de 3%.

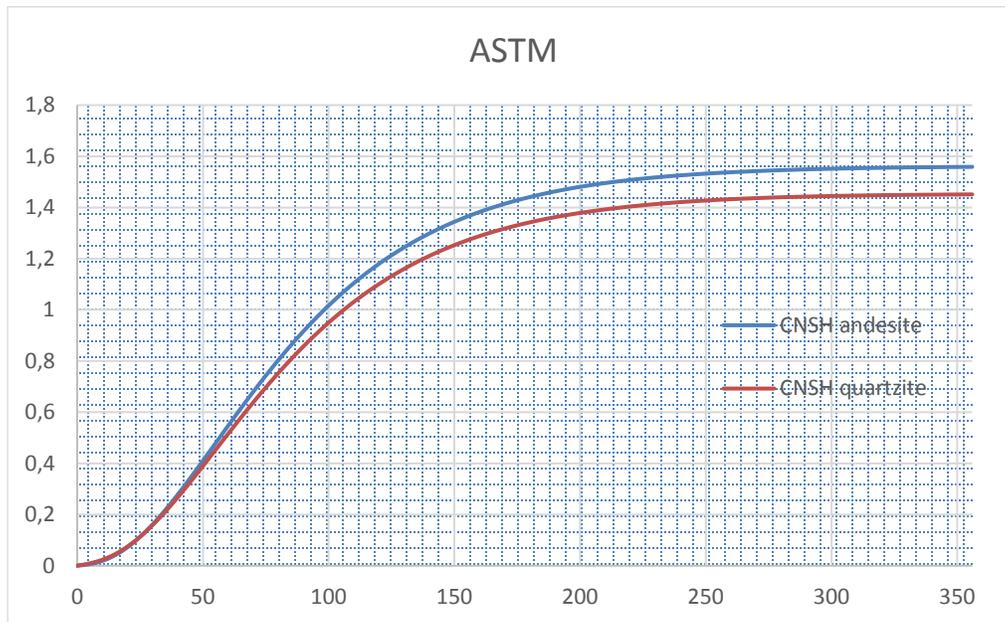


Fig.4.VIII.4 : Evolution du produit CNSH pour l'ASTM dans une période de 356 jours

Le produit de la réaction (Equ.VIII.9) concernant l'hydratation a un taux de croissance relativement accéléré pour les premiers 100 jours suivi d'un taux lent avec une pente moins de gravité jusqu'au 250 jours avant de se stabiliser, avec un effet sigmoïdale visible avec imitation parfaite du modèle proposé par [Larive.1997], où le taux du CNSH enregistré est 1.55 mol/m^3 devant 1.45 mol/m^3 pour le quartzite. En outre, il faut noter que la différence entre les deux produits pour chaque type d'agrégats est très petite de l'ordre de 6.90%

VIII-3-2-MCPT

VIII-3-2-1-CSH

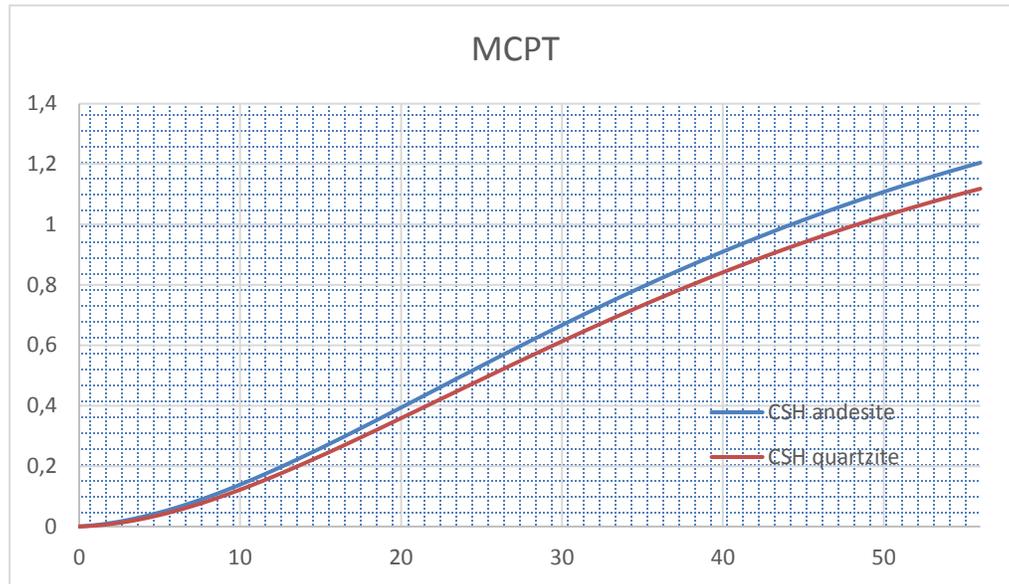


Fig.4.VIII.5 : Evolution du produit CSH pour le MCPT dans une période de 56 jours

La Fig.4.VIII.5 montre que le produit de la réaction (Equ.VIII.8) a un taux de croissance lent. Pour le MCPT le taux de produit d'hydrations de l'andésite est relativement plus grand que celui du quartzite, ou le CSH enregistre 1.20 mol/m^3 pour l'andésite devant 1.18 mol/m^3 pour le quartzite. En outre, il faut noter que la différence entre les deux produits pour chaque type d'agrégats est très petite de l'ordre de 7%.

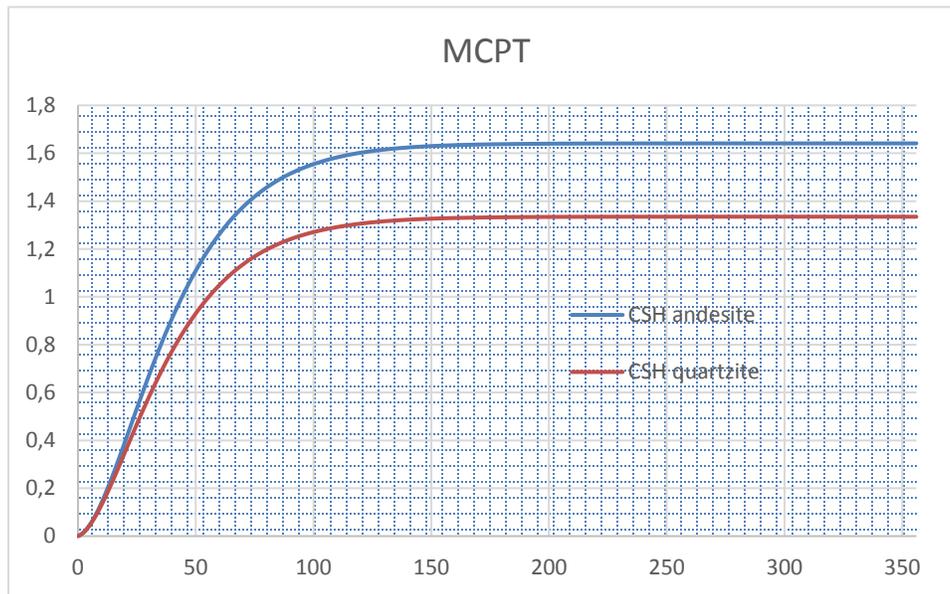


Fig.4.VIII.6 : Evolution du produit CSH pour le MCPT dans une période de 356 jours

Le produit de la réaction (Equ.VIII.8) concernant l'hydratation a un taux de croissance relativement accélérer pour les premier 150 jours avant de se stabiliser, avec un effet sigmoïdal réduit, ou le taux du CSH enregistre 2.09 mol/m^3 devant 1.88 mol/m^3 pour le quartzite. En outre, il faut noter que la différence entre les deux produits pour chaque type d'agrégats est très petite de l'ordre de 18.67%.

VIII-3-2-2-CNSH

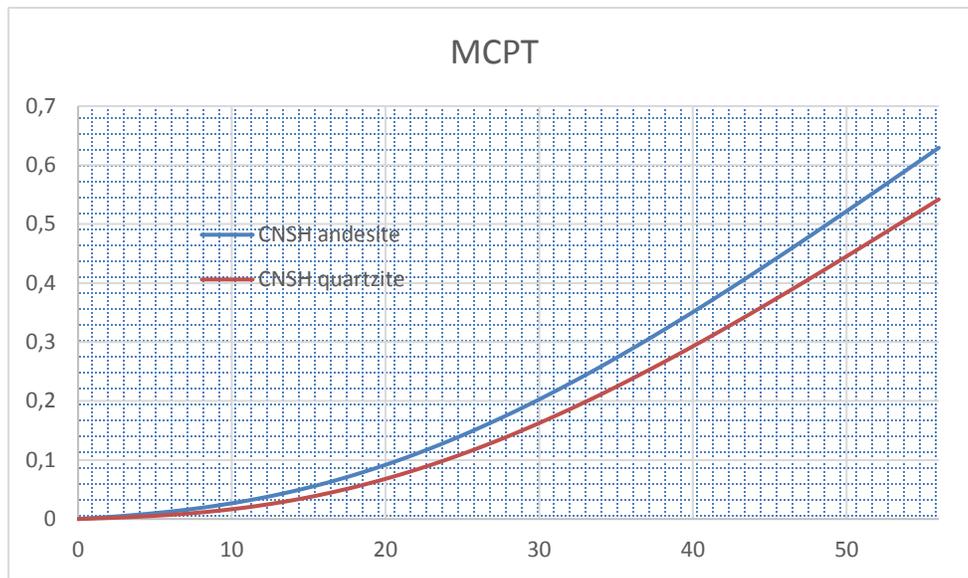


Fig.4.VIII.7 : Evolution du produit CNSH pour le MCPT dans une période de 56 jours

La Fig.4.VIII.7 montre que le produit de la réaction (Equ.VIII.9) concernant le RAG a un taux de croissance relativement moins lent, vue en note une augmentation totale pour les deux cas d'agrégats de 2 fois plus que celle du CSH, ou le CNSH enregistre 0.62 mol/m^3 devant 0.54 mol/m^3 pour le quartzite. En outre, il faut noter que la différence entre les deux produits pour chaque type d'agrégats est très petite de l'ordre de 14%

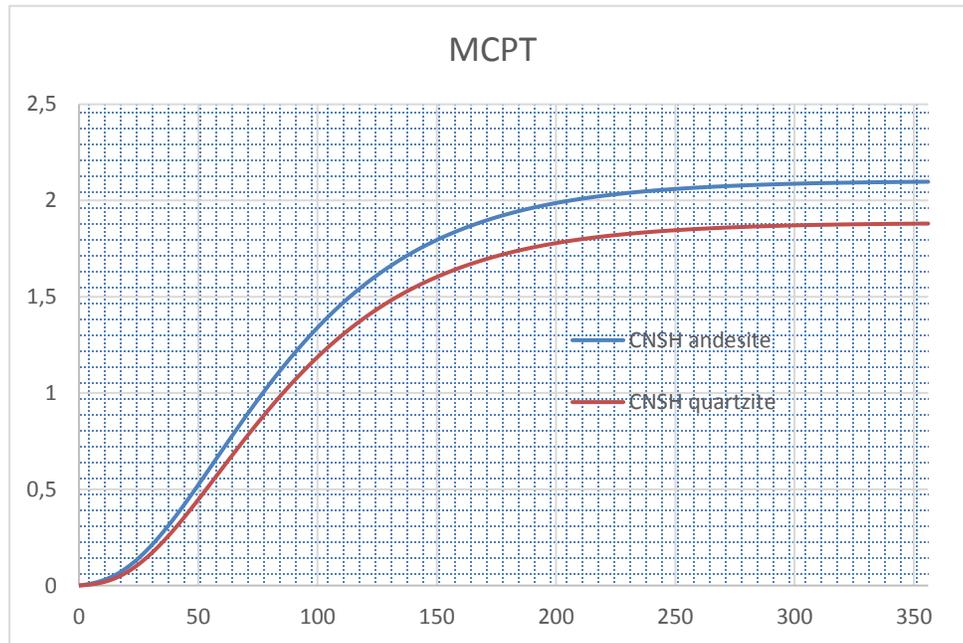


Fig.4.VIII.8 : Evolution du produit CNSH pour le MCPT dans une période de 356 jours

Le produit de la réaction (Equ.VIII.9) concernant l'hydratation a un taux de croissance relativement accélérer pour les premier 100 suivi de taux lent avec une pente moins de gravité jusqu'au 250 jours avant de se stabiliser, avec un effet sigmoïdal, ou le taux du CNSH enregistre 2.09 mol/m³ devant 1.88 mol/m³ pour le quartzite. En outre, il faut noter que la différence entre les deux produits pour chaque type d'agrégats est très petite de l'ordre de 10.36%

Notre tentative pour améliorer notre compréhension fondamentale de la cinétique de la réaction chimique de la RAG. Il est entravé par un manque de données (taux cinétiques), et quelques hypothèses simplificatrices (en ignorant l'effet de la température et de la stoechiométrie), mais on obtient des résultats intéressants. Plus précisément :

Selon Les concentrations initiales de la substance alcaline et de la silice, des estimations des concentrations résiduelles de ces corps réactionnels à la fin de la réaction sont déterminer. L'importance de la concentration initiale de l'eau dans la formation de gel est primordiale ainsi que la surface et volume des échantillons de prisme et barres de mortier utilisé. Lorsque les alcalins sont en quantité inférieure à celle de la silice, une plus petite quantité de gel expansé est produit. En remarque une similitudes qualitative (courbe sigmoïde) entre la concentration du gel (réaction chimique) et l'expansion du béton sous l'effet de la RAG sont observés.

Conclusions et perspectives

Notre recherche bibliographique nous a mené sur les différentes méthodes expérimentales accélérées aux essais de longue durée pour le diagnostic de la réactivité d'un béton en particulier composé d'agrégats susceptible d'être potentiellement réactifs ou réactifs envers une réaction alcali granulaire, les résultats de cette recherche sont traduits dans les critères de nos choix pour les essais utilisés à ce titre.

Dans ce travail, une série de tests a été effectuée sur deux différents agrégats, de qui est apparu initialement réactifs, ou potentiellement réactifs. Les essais de barre de mortier à 80°C et prisme à béton miniature à 60°C ont été menés. Les principaux résultats obtenus à partir de cette recherche ont été les suivantes :

Le résultat le plus important de cette recherche a été la création de la relation entre la réaction et l'expansion globale observée. Ce serait expliqué par la confrontation de la modélisation mésoscopique. Malgré diverse source d'alcalins, les compositions et les différentes températures utilisées au cours de l'étude, la courbe tracée de l'expansion par rapport à la quantité de produit réactif était unique.

Une méthode de couplage pour une mesure quantitative des degrés de la RAG a été utilisée. L'étude au microscope a révélé la formation d'un gel de silice à l'interface granulat / pâte de ciment, ainsi que des fissures remplies de gel de silice dans la pâte de ciment. Cela est dû à la diffusion alcaline à travers la porosité d'agrégat des sites réactifs. L'analyse pétrographique montre la réactivité du quartzite et andésite envers la RAG pour les différents essais tester, ainsi elles montrent une corrélation avec les résultats trouvés pour l'expansion, la perméabilité, et la porosité.

À partir d'une modélisation mésoscopique simple, il a été montré que la seule différence de niveau d'expansion observée est due à la réaction, tailles et fraction d'agrégats utilisés dans le mélange. Ainsi, comme les conditions (température et concentration) ont été les seules variables qui influent sur la cinétique de la réaction, pas de variation doit être prévu pour la

même réactivité dans l'ensemble expansion.

Une Faible teneur en alcalin avec une petite taille d'agrégats peut se traduire par moins d'expansion dans le matériau composite. Ceci peut être utilisé comme preuve d'appuyer pour l'observation selon laquelle l'expansion se produit au contour de l'agrégat pour l'essai ASTM, au contraire du MCPT au le produit de la réaction est visible autour l'agrégat et dans la pâte de ciment.

En utilisant cette modélisation nous avons rapporté l'expansion apparente du degré de réaction, la fraction de la taille d'agrégats et leur influence sur l'expansion total. Toutes les expansions ultérieures peuvent être prédite par les variations dues à la formation de gel et l'apparence des microfissures dans les agrégats observés par analyse pétrographique.

La cinétique de la RAG a été affectés par la température, la teneur en alcalis, taille des agrégats utilisé, et fraction de l'ensemble. L'effet de la température a été décrite par la loi d'Arrhenius ou [Larive.1997] l'a expliqué.

On observe principalement un voile très fin (d'une épaisseur de l'ordre du micron), qui semble être constitué essentiellement de silice, et qui recouvre largement l'agrégat vue par microscope polarisant, pour les barres de mortier et prisme à béton miniature, on trouve, dans des zones bien délimitées, les produits de réaction habituels : gels et précipités. Ce voile est donc vraisemblablement le précurseur des produits de réaction [Jehenne et al. 1996] et les éléments qui le composent peuvent se déplacer dans le béton.

Les produits de réaction ne sont pas situés uniquement à l'interface pâte-granulat. C'est pourquoi, malgré le grand nombre d'auteurs qui souscrivent à l'idée d'une localisation des gonflements dans les granulats, on ne peut adhérer à cette hypothèse qu'à condition d'admettre que les produits de réaction migrent après leur formation et que cette migration se fait sans répercussion à l'échelle macroscopique. Cette migration a posteriori ne fait pas l'unanimité [Larive.1997].

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

A la lumière des résultats obtenus et des observations données ci-dessus, il est donc primordial d'approfondir les enquêtes pour mieux comprendre les mécanismes réactionnelles relative à la RAG; et être capable d'une main pour vérifier avec certitude la présence de la RAG dans une structure potentiellement touché par la RAG avec le couplage adéquats des méthode de dépistage et de confirmation, et d'autre part à étudier la RAG de façon numérique en prenant en compte les résultats expérimentaux plus réalistique avec ceux obtenus par modélisation numérique, aussi l'application de l'approche quantitative pour voir l'amplitude de la RAG par quantification des produit de la réaction sur une période de temps assez longue, ainsi que la caractérisation du produit de la réaction par le MEB.

Bibliographie

[**ACI.2008**] ACI 221.1R, 2008, Report on Alkali-Aggregate Reactivity, ACI Manual of Concrete Practice, ACI, Farmington Hills, MI,2008.

[**AASHTO.2015**] AASHTO PP 65-10 Practice for Determining the Reactivity of Concrete Aggregates and Selecting Appropriate Measures for Preventing Deleterious Expansion in New Concrete Construction, AASHTO, Washington DC,2015.

[**ASTM.2015**] ASTM Standards referenced, Annual Book of ASTM Standards, Volume 4.02, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania,2015.

[**ASTM C 1260-07.2007**] ASTM C 1260-07, “Standard test method for determining the potential alkali reactivity aggregates (accelerated mortar-bar method).” Annual Book of ASTM Standards vol. 04.02, (Concrete and Aggregates), Philadelphia (PA), 2007.

[**ASTM C 1567-04.2008**] ASTM C 1567-04, “Standard test method for determining the potential alkali reactivity of combinations of cementitious materials and aggregate (accelerated mortar-bar method),” Annual Book of ASTM Standards vol. 04.02, (Concrete and Aggregates), Philadelphia (PA), 2008.

[**AASHTO T 303-00.2006**] AASHTO T 303-00, “Standard method of test for accelerated detection of potentially deleterious expansion of mortar bars due to alkali-silica reaction,” Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing Part 2B: Tests, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 2006.

[**Andic-Cakir et al.2009**] Andic-Cakir, O., Copuroglu, O., and Ramyar, K., “Evaluation of alkali-silica reaction by concrete microbar test,” ACI Materials Journal, 106 (2009), 184191.

[**ASTM C 1293-08.2008**] ASTM C 1293-08, “Standard test method for concrete aggregates by determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction,” Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02 (Concrete and Aggregates), Philadelphia (PA), 2008

[**AASHTO TP 110-14.2014**] the AASHTO Provisional Standards, 8 Edition, 2014.

[**ACI 211.2011**] ACI 211.5R-01. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. (2011). Detroit, MI: American Concrete Institute.

[**ASTM C157.2008**] ASTM C157 / C157M-08, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008, www.astm.org

[**ASTM C490.2011**] ASTM C490 / C490M-11e1, Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org

[**ASTM C856-14.2014**] ASTM C856-14, Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org

[**ACI**] American Society Institut

- [Alexandra et al.1999]** M.G. Alexander, Y Ballim, J.R. Mackechnie. Monograph No 4: Concrète Durability Index testing manual.
- [Ben Haha et al.2007]** M. Ben Haha, E. Gallucci, A. Guidoum, K. Scrivener, Relation of expansion due to alkali silica reaction to the degree of reaction measured by sem image analysis, *Cement and Concrete Research* 37 (8) (2007) 1206-1214.
- [Baron et al.1992]** J. BARON et OLLIVIER J.P., «La durabilité des bétons». Press de l'école national des ponts et chaussées, 1992.
- [Ben Haha.2006]** M. Ben Haha, Mechanical effects of alkali silica reaction in concrete studied by semimage analysis, Thèse doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, n°3516 (2006).
- [Bulteel et al.2002]** D.Bulteel, E.Garcia-Diaz, C.Vernet, H.Zanni, Alkali-silica reaction: A methode to quantify the reaction degree, *Cement and Concrete research*, 2002, pp 1199-1209
- [Breton et al., 1994]** D.Berton, A.Carles-Gibergues, G.Ballivy, J.Grandet, Contribution to the formation mecahnism of the transition zone between rock-cement paste, *Cement and Cobcrete research*, 1994, pp 335-346.
- [Bangert et al.2004]** F. Bangert, D. Kuhl, G. Meschke, Chemo-hygro-mechanical modelling and numerical simulation of concrete deterioration caused by alkali-silica reaction, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 28 (7-8) (2004) 689–714.
- [Bažant et al.2000b]** Z. Bažant, G. Zi, C. Meyer, Fracture mechanics of asr in concretes with waste glass particles of different sizes, *Journal of engineering mechanics* 126 (3) (2000) 226–232.
- [Biot.1955]** M. Biot, Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid, *Journal of Applied Physics* 26 (2) (1955) 182–185.
- [Bažant et al.2000a]** Z. Bažant, A. Steffens, Mathematical model for kinetics of alkali–silica reaction in concrete, *Cement and Concrete Research* 30 (3) (2000) 419–428.
- [Bradbury et al.1998]** Bradbury, H.S.M. and Bracegirdle, B. 1998: Introduction to Light Microscopy. Handbook 42, Royal Microscopical Society, Oxford, U.K.
- [Bâcha et al.1993]** Bach, F. ; Thorsen, T.S. ; Nielsen, M. P. (1993). la capacité des éléments de structure soumis à des réactions alcali-silice-charge. *Construction. Mater Building*. 1993, 7 (2), 109-115.
- [Bang et al.2010]** Wang, X. ; Nguyen, M. ; Stewart, M.G. ; Syme, M. ; Leitch, A. Analyse des impacts des changements climatiques sur la détérioration des infrastructures en béton - Partie 1: Mécanismes, pratiques, modélisation et simulations - Un examen. CSIRO, Canberra 2010.
- [Ballim1991]** , Y.A (1991) Low cost, falling head permeameter for measuring concrete gas permeability, *Concrete/Beton, Journal of the Concrete Society of Southern Africa*, no. 61, pp. 13-18.

- [**Bérubé et al.2002**] M.A. Bérubé, J. Duchesnea, J.F. Doriona, M. Rivestb, Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali–silica reactivity, *Cem. Concr. Res.* 32 (2002) 1215–1227.
- [**Comby-Peyrot 2006**] I. COMBY PEYROT, Development and validation of a 3D computational tool to describe damage and fracture due to alkali silica reaction in concrete structures, Thèse doctorat, 2006, France.
- [**Corneille et al. 1991**] A. Corneille, G. Douillet, J.-P. Garbe, A. Leroux, P. Monachon, M.Moranville-Regourd, P. Poitevin, M. Berra, R. Turriziani, D. Palmer, J. Graham, Alkaliaggregate Reaction in Concrete Dams/Alcali-réaction dans les Barrages en Béton, *Bulletin of ICOLD* 79, 1991.
- [**Chatterji et al.1986**] S.Chatterji, AD, Jensen, N.Thaulow, P.Christensen, Studies of alkali-silica reaction: Part 3: Mechanisms by wich Nacl and Ca(OH)₂ affect the reaction, *Cement and Concrete Research*, 1986, pp246-254.
- [**Chatterji et al.2000**] S.Chatterj, N.Thaulow, Some fundamental aspects of alkali-silica-reaction, 11th nternatinal Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 2000, pp 21-30.
- [**Chaprin.2013**] Charpin.L ,Modèle micromécanique pour l'étude de l'anisotropie de la réaction alcali-silice Les forme de la réaction alcali granulaire. Thèse de doctorat, Université de Paris-Est, 2013.
- [**Carrasquillo et al.1988**] CarRAGquillo, R.L. and Farbiaz, J. (1988). “Alkali-aggregate reaction in concrete containing fly ash: Final report.” Research Report #450-3F, Center of Transportation Research.
- [**Chatterji et al.1990**] Chatterji, S., Christensen, P. (1990). Studies of the Alkali-Silica Reaction : Part 7. Modeling of Expansion, *Cement and Concrete Res.*, 20, 285-290.
- [**Chatterji .1989a**]Chatterji, S. (1989a). “A critical review of the recent Danish literature on alkali-silica reaction.” *Proc.*, 8th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Kyoto, 37-42.
- [**Chatterji .1989b**]Chatterji, S. (1989b). “Mechanisms of alkali-silica reaction and expansion.” *Proc.*, 8th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Kyoto, 101-105.
- [**Chang.2008**]Chang.S.S , Performance-based approach to evaluate alkali-silica reaction potential of aggregate and concrete using dilatometer method .Thèse de doctorat, Université Texas A&M , 2008.
- [**Comby-Peyrot et al.2009**] I. Comby-Peyrot, F. Bernard, P.-O. Bouchard, F. Bay, E. Garcia-Diaz, Development and validation of a 3d computational tool to describe concrete behaviour at mesoscale. application to the alkali-silica reaction, *Computational Materials Science* 46 (4) (2009) 1163–1177.
- [**Çopuroglu et al.2007**] O. Çopuroglu, E. Schlangen, Modelling of effect of asr on concrete microstructure, *Key Engineering Materials* 348 (2007) 809–812.
- [**Coussy.1995**] Coussy, O. (1995). *Mechanics of Porous Continua*, Wiley, Chichester, U.K
- [**Comsol.2013**] COMSOL 4.3b Multiphysics Software. (n.d.). Retrieved March 03, 2013.

- [Capra et al.2003]** B. Capra, A. Sellier, Orthotropic modelling of alkali-aggregate reaction in concrete structures: numerical simulations, *Mechanics of materials* 35 (8) (2003) 817–830.
- [Charpin.2013]** L. Charpin, *Modèle micromécanique pour l'étude de la réaction alcali-silice*, Thèse doctorat, Université Paris Est (2013).
- [Charlwood.2009]** R. Charlwood, *AAR in Dams: Case studies, Monitoring Remediation, AAR short course*, Paris, 2009.
- [CRT.2016]** *Petrographic Examinations of Concrete - Concrete Research & Testing, LLC.* (n.d.). Retrieved February 26, 2016, from <http://www.concretetesting.com/petrographic-examinations-concrete/>
- [Capra et al.1998]** B. Capra, J.-P. Bournazel, Modeling of induced mechanical effects of alkali-aggregate reactions, *Cement and Concrete Research* 28 (2) (1998) 251–260.
- [CSA A23.2-25A.2004b]** CSA A23.2-25A, “Test method for detection of alkali-silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars,” CSA A23.2-04: Methods of Test for Concrete, Canadian Standards Association, Mississauga (ON), 2004b, 240-245.
- [CSA A23.2-27A.2004c]** CSA A23.2-27A, “Standard practice to identify degree of alkali-reactivity of aggregates and to identify measures to avoid deleterious expansion in concrete,” CSA A23.2-04: Methods of Test for Concrete, Canadian Standards Association, Mississauga (ON), 2004c, 251-259.
- [CSA A23.2-14A.2004a]** CSA A23.2-14A, “Potential expansivity of aggregates (procedure for length change due to alkali-aggregate reaction in concrete prisms),” CSA A23.2-04: Methods of Test for Concrete, Canadian Standards Association, Mississauga (ON), 2004a, 207–216.
- [CSA A23.2-28A.2004]** CSA A23.2-28A, “Standard practice for laboratory testing to demonstrate the effectiveness of supplementary cementing materials and chemical admixtures to prevent alkali-silica reaction in concrete,” CSA A23.2-04: Methods of Test for Concrete, Canadian Standards Association, Mississauga (ON), 2004, 260-262.
- [Constantiner et al.2003]** D. Constantiner, S. Diamond, Alkali release from feldspars into pore solutions, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 549–554.
- [Chatterji.2005]** S. Chatterji, Chemistry of alkali–silica reaction and testing of aggregates, *Cem. Concr. Compos.* (2005) 788–795.
- [Dunant et al. 2012]** C. Dunant, K. Scrivener, Effects of uniaxial stress on alkali-silica reaction induced expansion of concrete, *Cement and concrete research* 42 (3) (2012) 567-576.
- [Dunant et al.2010]** C. Dunant, K. Scrivener, Micro-mechanical modelling of alkali-silica-reaction-induced degradation using the amie framework, *Cement and Concrete research* 40 (4) (2010) 517-525.
- [Dent-Glasser et al.1981]** L. S. DENT-GLASSER - N. KATAOKA, The chemistry of alkali-aggregate reaction, 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in concrete, Paper 252/23, Cape Town, South Africa, 1981.
- [Dron.1990]** R. Dron, Thermodynamique de la réaction alcali-silice, *Bulletin de liaison des*

Ponts et Chaussées, 1990, pp 55-59.

[Dron et al 1996] R.Dron, F.Brivot, Solid-liquid in C-K-S-H/H₂O systems, 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Melbourne, Australia, 1996, pp 927-933.

[Diamond et al. 1981] S.Diamond, J.Barneback, J.Stuble, 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 1981, pp 1-11.

[Diamond et al.1992] Diamond, S. and Penko, M. (1992). "Alkali silica reaction processes: The conversion of cement alkalis to alkali hydroxide", Int. Symp. on Durability of Concrete, ACI SP131, Detroit, 153-169.

[Diamond et al.1981] Diamond, S. (1981). "Effect of two Danish fly ashes on alkali contents of pore solutions of cement-fly ash pastes." Cem. Concr. Res., 11 (3), 383-394.

[Diamond.1976] Diamond, S. (1976). "A review of alkali-silica and expansion mechanisms . Reactive aggregate." Cem Con Res, 6(4), 549-560.

[Dupray et al.2009] F. Dupray, Y. Malecot, L. Daudeville, E. Buzaud, A mesoscopic model for the behaviour of concrete under high confinement, International journal for numerical and analytical methods in geomechanics 33 (11) (2009) 1407–1423.

[Dunant et al.2010] C. Dunant, K. Scrivener, Micro-mechanical modelling of alkali–silica-reaction-induced degradation using the amie framework, Cement and Concrete research 40 (4) (2010) 517–525.

[Dunant.2009] C. Dunant, Experimental and modelling study of the alkali-silica reaction in concrete, Ph.D. thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, n°4510 (2009).

[Dunant et al.2011] C. Dunant, S. Bordas, P. Kerfriden, K. Scrivener, T. Rabczuk, An algorithm to compute damage from load in composites, Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China 5 (2) (2011) 180–193.

[Dunant et al.2012] C. Dunant, K. Scrivener, Effects of uniaxial stress on alkali-silica reaction induced expansion of concrete, Cement and concrete research 42 (3) (2012) 567–576.

[Davie et al.1991] Davie, J., Tripp, J. F., (1991). Maentwrog dam - deterioration in the concrete fabric of a concrete gravity dam and related structural implications, Proc. 17th Inter. Cong. on Large Dams, Vienna, Austria, 1023-1034.

[Durand et al.2004] B. Durand, B. Marchand, R. Larivière, J-M. Bergeron, G. Pelletier, M. Ouimet, J. Bérard, T. Katayama, A special history case about seven damages due to freezing and thawing combined with sulfate migration and ASR at rapides-des-quinze hydraulic structures, Quebec, Canada, 12 th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 2004, Beijing, China, pp 1043-1054.

[Dron et al.1992] R. Dron, F. Brivot, Thermodynamic and kinetic approach to the alkali–silica reaction. Part I: concepts, Cem. Concr. Res. 22 (1992) 941–948.

[Espenson.2002] J. Espenson, Chemical Kinetics and Reaction Mechanisms, McGraw-Hill, 2002.

[Fernandez.1992] L.FERNANDEZ, Caractérisation de solutions alcalines de silice et de

leurs précipités en présence de calcium au moyen de la résonance magnétique nucléaire, thèse de Doctorat : Université Pierre et Marie Curie, 1992.

[Folliard et al.2002] Folliard, K.J., Thomas, M.D.A., and Kurtis, K.E. (2002). "Guideline for the use of lithium to mitigate or prevent ASR." FHWA-RD-03-047, Federal Highway Administration, Georgetown Pike, VA.

[Furusawa et al.1994] Furusawa, Y., Ohga, H. Uomoto, T. (1994). An analytical study concerning prediction of concrete expansion due to alkali-silica reaction, Durability of Concrete: Third International Conference, ACI SP 145-40, 757-778.

[François et al.1993] François, D., Zaoui, A. (1993). Comportement Mécanique des Matériaux : Viscoplasticité, Endommagement, Mécanique de la Rupture, Mécanique de Contact, Edition Hermès, Paris.

[Fu et al.2004] P. X. Fu, Y. Liu, J. M. Wang, Alkali reactivity of aggregates and AAR-affected concrete structures in Beijing, 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 2004, Beijing, China, pp 1055-1061.

[Fan et al.1998] S. F. Fan and J. M. Hanson, Effect of Alkali Silica Reaction Expansion and Cracking on Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams, ACI Structural Journal, 1998, 95(5), 498-505.

[Folliard et al.2008] Folliard, K.J., Fournier, B., and Thomas, M., "ASR testing and evaluation protocols, Protocol A: Determining the reactivity of concrete aggregates and selecting appropriate measures for preventing deleterious expansion in concrete," Federal Highways Administration, Washington D.C., 2008.

[Fournier et al.2006] Fournier, B., Nkinamubanzi, P.C., Lu, D., Thomas, M.D.A., Folliard, K.J., and Ideker, J., "Evaluating potential alkali-reactivity of concrete aggregates – how reliable are the current and new test methods?" Symposium on alkali-aggregate reaction in concrete structures, Rio de Janeiro, Brazil (2006).

[Fasseu et al.2003] P. Fasseu, B. Mahut, L. Divet, B. Godart, T. Kretz, A. Laplaud, A. Le Méhauté, G. Le Mestre, K. Li, M. Michel, F. Renaudin, P. Reynaud, J.-F. Seignol, F. Toutlemonde, L. Labourie, M. Laude, Guide méthodologique : Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne, eds., LCPC, « techniques et méthodes des LPC » collection, 2003, Paris, France (in French).

[Fulton et al.2009] Fulton, F. S. & Owens, G. (2009). Fulton's concrete technology. Midrand: Cement & Concrete Institute.

[Fanny et al.1997] Fanny, James A., and Kosmatka, Steven H., "Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete." Portland Cement Association 1997.

[Fanny et al.1997] Fanny, J. A.; Kosmatka, S. H. Diagnosis and control of alkali-aggregate reactions in concrete, Concrete Information Series, No. IS413.01T, Portland Cement Association. Skokie, IL, USA, 1997.

[Greenberg.1956] S.A.Greenberg, Journal Physics and Chemistry, 1956.

[Grattan-Bellew.1992] P.E. Grattan-Bellew. Alkali-silica reaction - Canadian experience, in : the alkali aggregate reaction in concrete. Ed. R.N Swamy, Blackie, London, UK, 1992.

- [Giorla.2013] Giorla.A.B,Modelling of Alkali-Silica Reaction under Multi-Axial Load, Thèse doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, n°5982 (2013).
- [Giaccio et al.2008] G. Giaccio, R. Zerbino, J. Ponce, O. Batic, Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research* 38 (7) (2008) 993–1004.
- [Grattan-Bellew.2002] Grattan-Bellew, P. E. ; Mitchell. Prévention de la détérioration du béton due à la réaction alcali-granulat, Institut de recherche en construction (IRC), Conseil de recherches naturelles du Canada, des technologies de construction n ° 52, 2002.
- [Grimal et al.2010] E. Grimal, A. Sellier, S. Multon, Y. Le Pape, E. Bourdarot, Concrete modelling for expertise of structures affected by alkali aggregate reaction, *Cement and Concrete Research* 40 (4) (2010) 502–507.
- [Gilks et al.2003] P. Gilks, D. Curtis, Dealing with the effects of AAR on the water retaining structures at Mactaquac GS, *Proceedings of the 21st Congress on Large Dams*, Montreal, Quebec, Canada, pp681-703.2003.
- [Grattan-Bellew.1997] Grattan-Bellew, P.E., “A critical review of ultra accelerated tests for alkali-silica reactivity,” *Cement and Concrete Research*, 19 (1997), 403-414.
- [Godart et al.1992] B. Godart, P. Fasseu, M. Michel, Diagnosis and monitoring of concrete bridges damaged by A.A.R. in northern France, 9th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, 1992, London, pp 368-375.
- [Grattan-Bellew et al.2004] Grattan-Bellew, P.E., Cybanski G, Fournier B, and Mitchell L., “Proposed universal accelerated test for alkali-aggregate reaction the concrete microbar test,” *Cement Concrete and Aggregates*, 25 (2004), 29-34.
- [Helmut.1992] R.A.Helmut, D.Stark, Alkali-silica reactivity mechanism, *Materials Science of Concrete*, Volume 3, American Cermaic Society, 1992, pp 131-208.
- [Hobbs.1988], D.W. (1988). *Alkali-silica reaction in concrete*, Thomas Telford, London.
- [Hearne et al 1992] Hearne, T.M. Jr., Cowsert, J.E., and Cordle, V.O. (1992). “Monitoring mortar bar alkaliaggregate reactivity.” *Trans. Res. Rec. 1362*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington,DC, 44-50.
- [Huang et al.1999] Huang, M., Pietruszczak, S. (1999). Modeling of thermomechanical effects of alkali-silica reaction, *J. Engrg. Mech.*, 125(4), 476-485.
- [Hobbs.1988] Hobbs, Don W. "Alkali-silica reaction in concrete." (1988).
- [Ideker et al.2008] Ideker, J.H., East, B.L., Folliard, K.J., Thomas, M., and Fournier, B., “The current state of the accelerated concrete prism test,” in *Proceedings of the 13th ICAAR*, Trondheim, Norway (2008).
- [Ichikawa.2009] Ichikawa T., Alkali-Silica reaction, pessimum effects and pozzolanic effect, *Cement and Concrete Res.* 2009, 39, 716-726.
- [Ichikawa et al.2007] T. Ichikawa, M. Miura, Modified model of alkali–silica reaction, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 1291–1297.
- [IS 456-2000] Plain and Reinforced Concrete
- [Jabarooti et al.2003] M. R. Jabarooti, I. Golabtoonchi, Alkali-Aggregate reactivity in

South-East Iran, Proceedings of the 21 st Congress on Large Dams, Montreal, Quebec, Canada, pp53-62.

[**Jun.2010**] Juan.C. (2010). Ultra-accelerated assessment of alkali-reactivity of aggregates by nonlinear acoustic techniques, Institut technologique de Georgia, Georgia.

[**Jones .1988**] T.N. Jones, A new interpretation of alkali-silica reaction and expansion mechanisms in concrete, Chemistry and Industry, 1988, 18, 40-44

[**Jensen.2012**] Jensen Viggo. Reclassification of alkali aggregate reaction. Proceedings of the 14 International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR). Austin, Texas, 2012.

[**Kurihara et al.1989**] Kurihara, T. and Katawaki, K. (1989). “Effect of moisture control and inhibition on alkali silica reaction.” Proc., 8th Int. Conf. on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Kyoto, Japan, 629-634.

[**Katayama.2012**] T. Katayama, Late-expansive ASR in a 30-year old PC structure in eastern Japan, Proc.14th International Conference on Alkali–Aggregate Reaction (ICAAR), Austin, Texas,USA, 2012 (paper 030411-KATA-05, 10 pp.).

[**Katayama et al.2010**] T. Katayama, Diagnosis of alkali–aggregate reaction—polarizing microscopy and SEM-EDS analysis, in: P. Castro-Borges, E.I. Moreno, K. Sakai, O.E. Gjorv, N. Banthia (Eds.), Proceedings, 6th International Conference on Concrete under Severe Conditions, Environment and Loading (CONSEC'10), Taylor & Francis Group, London, 2010, pp. 19–34 (Merida, Yukatan, Mexico).

[**Katayama.2008**] T. Katayama, ASR gel in concrete subject to freeze–thaw cycles—comparison between laboratory and field concretes from Newfoundland, Canada, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali–Aggregate Reaction (ICAAR), 2008, pp. 174–183 (Trondheim, Norway).

[**Le Roux et al.1992**] A. Le Roux, E. Massieu, B. Godart, Evolution under stress of a concrete affected by aar. application to the feasibility of strengthening a bridge by prestressing, in: The ninth international conference on alkali-aggregate reaction in concrete, Volume 2, London, 1992, pp. 599-606.

[**Larive.1997**] C. Larive, Apports combinés de l’expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l’alcali-réaction et de ses effets mécaniques, Ph.D. thesis, Ecole nationale des ponts et chaussees (1997).

[**Lombardi et al.1996**] J.Lombardi, A.Perruchot, P.Massard, C.Larive, Study of Ca-Si gels products of alkali-silica reaction : A comparison between hydraulic concretes and synthetic Ca-Si gels, 10th Internatinal Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Melbourne, Australia, 1996, pp 934-941.

[**Larive et al.2000**] Larive, C., Laplaud, A., and Coussy, O. (2000). “The role of water in alkali-silica reaction.” Proc., 11th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Québec City, 61-69.

[**Lu et al.2008**] D. Lu, B. Fournier, P. Grattan-Bellew, Z. Xu, M. Tang, Development of a universal accelerated test for alkali-silica and alkali-carbonate reactivity of concrete

aggregates, *Materials and Structures* 41 (2) (2008) 235-246.

[Lemarchand et al.2000] Lemarchand, E., Dormieux, L. (2000). A micromechanical approach to the modeling of swelling due to alkali-silica reaction, *Proc., 14th Engrg. Mech. Conf.*, Mai 2000, Austin (Texas), U.S.

[Lemarchand .2001] Lemarchand, E. (2001). Contribution de la micromécanique à l'étude des phénomènes de transport et de couplage poromécanique dans les milieux poreux: Application aux phénomènes de gon_flement des géomatériaux, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, mai, 2001, Paris.

[Leger et al.1995] Leger, P., Tinawi, R., Mounzer, N. (1995). Numerical simulation of concrete expansion in concrete dams affected byalkali-aggregate reaction: state-of-the-art, *Can. J. Civ. Eng.*, 22, 692-713

[Leger et al.1996] Léger, P., Côté, P., Tinawi, R. (1996).Finite element analysis of concrete swelling due to alkali-aggregate reactions in dams, *Comput. Struct.*, 60(4), 601-611.

[Larive et al.1996] Larive C., Coussy, O. (1996). Behavior of AAR-a_ected Concrete, *Modeling, Proc.*, 10th AAR Int. Conf., Québec, Canada, 662-669.

[Larive.1997] Larive, C. (1997). Apports combinés de l'expérimentation et la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses e_ets mécaniques, Monograph LPC, Thèse doctorat ,0A28, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris.

[Li.2002] K. Li, Modélisation chimico-mécanique du comportement des bétons affectés par la réaction d'alcali-silice et expertise numérique des ouvrages d'art dégradés, Thèse doctorat , Ecole des Ponts ParisTech (2002).

[Leemann et al.2004] A. Leemann, C. Thalmann, W. Studer, AAR in underground structures of Switzerland-a survey, 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 2004, Beijing, China, pp 1071-1077.

[Lu et al.2006] Lu, D.Y., Fournier, B., and Grattan-Bellew, P.E., "Evaluation of accelerated test methods for determining alkali-silica reactivity of concrete aggregates," *Cement and Concrete Composites*, 28 (2006), 546-554.

[LCPC.1997] LCPC N°44, Alkali reaction du béton: essai d'expansion résiduelle sur béton durci, à 38°C et H.R.≥ 95%, Presse des ponts et chaussées, February 1997, in French.

[Loveland et al.1970] Loveland, R.P. 1970: Photomicrography. A Comprehensive Treatise. Vols. 1 and 2. Wiley, New York. Ludwig, U. and Rudiger, I. 1993: Quantitative determination of ettringite in cement pastes, mortars and concretes. *Zement-Kalk-Gips* 46 (5), E153–E156

[Latifee.2015] Latifee, E, "Investigation of ASR Expansion Due to Total Alkali and Internal Alkali in the Concrete Mixture". Proceedings of 10th Global Engineering, Science and Technology Conference 2-3 January, 2015, BIAM Foundation, Dhaka, Bangladesh, ISBN: 978-1-922069-69-6

[Leemann et al.2013] Leemann, A. et LURA, P. E-modulus of the alkali-silica-reaction product determined by micro indentation. *Construction and Building Materials*, 2013, vol.

44, p. 221-227.

[**Li.2004**] J.Y. Li, Problems on alkali-aggregate reactions of dam concrete in China, 12 International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 2004, Beijing, China, pp 1078-1085.

[**López et al.2011**] López. Problemática de las reacciones expansivas en presas.

[**Latifee.2013**] Latifee, E, "Miniature Concrete Prism Test - a New Test Method for Evaluating the ASR Potential of Aggregates, the Effectiveness of ASR Mitigation and the Job Mixture" (2013). All Dissertations. Paper 1176

[**Multon et al.2006**] S. Multon, F. Toutlemonde, Effect of applied stresses on alkali-silica reaction-induced expansions, *Cement and Concrete Research* 36 (5) (2006) 912–920.

[**Malla et al.1999**] S. Malla, M. Wieland, Analysis of an arch-gravity dam with a horizontal crack, *Computers and Structures*, 1999, 72, 267-278.

[**Mo et al.2007**] Mo X., Fournier B. Investigation of structural properties associated with alkali-silica reaction by means of macro and micro-structural analysis. *Materials Characterization* 58.2 (2007) pp. 179189

[**Monnin et al.2006**] Monnin Y., Dégrugilliers P., Bulteel D., Garcia-Diaz E. Petrographic study of two siliceous limestones submitted to alkali-silica reaction. *Cement & Concrete Research* 36.8 (2006) pp.1460-1466

[**Monnin.2005**] Monnin Y., Méthodologie pour décrire le gonflement multi-échelle de calcaires siliceux soumis à la réaction alcali-silice dans le matériau béton, 2005, Thèse de Doctorat de l'université d'Artois.

[**Maxwell.2014**] Maxwell, J. Maxwell's equations. wikipedia.org, Web. 1 October 2014.

[**Mehta et al.1992**] Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M. (1992). *Concrete: Structure, Properties, and Materials* (2nd Ed.). Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

[**Multon et al.2008**] S . Multon, F-X. Barin, B. Godart, F. Toutlemonde, Estimation of the Residual Expansion of Concrete Affected by AAR, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 2008, 20(1), January 2008, 54-62.

[**Massazza.1996**].Massazza, F. (1996), "Action of Environmental Conditions," RILEM REPORT 11: Interfacial Transition Zone in Concrete, J. C. Maso, ed. E&FN SPON, London, England, U.K., First Edition,pp. 132-149.

[**Nixon et al.1992**]Nixon, P.J. and Sims, I. (1992). "RILEM TC 106 alkali aggregate reaction-accelerated tests interim report and summary of national specifications." Proc., 9th Int. Conf.on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Slough, 731-738.

[**Nixon et al.1987**]Nixon, P.J., Canham, I., Page, C., and Bollinghaus, R. (1987). "Sodium chloride and alkali-aggregate reaction, concrete alkali-aggregate reactions." Proc., 7th Int. Conf.on Alkali-Aggregate Reaction, Ottawa, 110.

[**Nixon et al.2016**] Nixon, P. J., & Sims, I. (2016). RILEM recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures: State-of-the-art report of the RILEM Technical Committee 219-ACS. Dordrecht: Springer.

[**Neto et al.2014**] Neto, D. D., Conceição, H., Lisboa, V. A., Santana, R. S., & Barreto, L. S.

(2014). Influence of granitic aggregates from northeast Brazil on the alkali-aggregate reaction. *Mat. Res. Materials Research*, 17, 51-58.

[Oberholster.1992] Oberholster, R.E. (1992). “The effect of different outdoor exposure conditions on the expansion due to alkali-silica reaction.” *Proc., 9th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Slough, 623-628.

[Oberholster et al.1986] Oberholster, R.E., and Davies, G., “An accelerated method for testing the potential alkali reactivity of siliceous aggregates,” *Cement and Concrete Research*, 16 (1986), 181–189.

[Olafsson.1986] Olafsson, H. (1986). “The effect of relative humidity and temperature on alkali expansion of mortar bars.” *Proc., 7th Int. Conf. on Alkali Aggregate Reaction in Concrete*, Ottawa, 461-465.

[Poyet et al.2006] S. Poyet, A. Sellier, B. Capra, G. Thèvenin-Foray, J.-M. Torrenti, H. Tournier-Cognon, E. Bourdarot, Influence of water on alkali-silica reaction: Experimental study and numerical simulations, *Journal of Materials in civil Engineering* 18 (4) (2006) 588-596.

[Ponce et al.2006] J. Ponce, O. Batic, Different manifestations of the alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of the reactive aggregate, *Cement and Concrete Research* 36 (6) (2006) 1148-1156.

[Poole. 1992] A.B.Poole, Alkali-silica reactivity mechanism of gel formation and expansion, 9th International Conference on alkali-aggregate reaction in concrete, London, 1992, pp 782-789.

[Ponce et al.2006] Ponce J. M. et Batic O. R., Different manifestations of alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of reactive aggregate, *Cement and Concrete Recherche*, 2006, 36, 1148-1156.

[Poulsen et al.2000] Poulsen, E., Hansen, T., and Sørensen, H. (2000). “Release of alkalis from feldspar in concrete and mortar.” *Proc.*, 807-824. *The 5th Int. Conf. on Durability of Concrete*, Barcelona,

[Pedneault.1996] Pedneault, A. (1996). Development of testing and analytical procedures for the evaluation of the residual potential of reaction, expansion, and deterioration of concrete affected by ASR. M.Sc. Memoir, Laval Univeristy, Québec City, 133.

[Poyet et al.2006] S. Poyet, A. Sellier, B. Capra, G. Thèvenin-Foray, J.-M. Torrenti, H. Tournier-Cognon, E. Bourdarot, Influence of water on alkali-silica reaction: Experimental study and numerical simulations, *Journal of Materials in civil Engineering* 18 (4) (2006) 588–596.

[Pesavento et al.2012] F. Pesavento, D. Gawin, M. Wyrzykowski, B. Schrefler, L. Simoni, Modeling alkali-silica reaction in non-isothermal, partially saturated cement based materials, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Volumes 225–228, 15 June 2012, Pages 95–115

[Poole et al.2016] Poole, A. B., Sims, I., & A., S. J. *Concrete petrography: A handbook of investigative techniques*. CPC Press.(2016)

- [**Ploem et al.1987**] Ploem, J.S. and Tanke, H.J. 1987: Introduction to Fluorescence Microscopy. Handbook 10, Royal Microscopical Society, Oxford, U.K
- [**Prince et al.1993**] W.Prince, R.Perami, Mise en évidence du rôle essentiel des ions OH⁻ dans les réactions alcalis-silices, *Cement and concrete Research*, 1993, pp 1121-1129.
- [**Perez et AL.1997**] Prezzi, M., Monteiro, P. J., & Sposito, G. (1997). The alkali-silica reaction, Part I: use of the double-layer theory to explain the behavior of reaction-product gels. *ACI materials journal*, 94(1), 10-17.
- [**Riche.2003**]J.Riche, La réaction alcali silice: approche cinétique et mécanisme d'expansion, étude du système silex—potasse à 80°C, Thèse doctorat, Université des sciences et technologie de Lille, (2003).
- [**Regoud et al 1986**] M.Rgourd, H.Hornain, P.Poitevin, 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 1986, pp 375-380.
- [**Reinhardt et al.2011**] H. Reinhardt, O. Mielich, A fracture mechanics approach to the crack formation in alkali-sensitive grains, *Cement and Concrete Research* 41 (3) (2011) 255–262.
- [**Richardson.2004**] M.G. Richardson, Alkali-silica reaction in the republic of Ireland: recent research and revisions to national guidance, 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 2004, Beijing, China, pp 1120-1129
- [**Rivard et al.2009**] P. Rivard, F. Saint-Pierre, Assessing alkali-silica reaction damage to concrete with non-destructive methods: From the lab to the field, *Concrete and Building Materials*, 2009, 23(2), 902-909.
- [**RILEM TC106-AAR.2000**] RILEM TC106-AAR, “Detection of potential alkali-reactivity of aggregates—the ultra-accelerated mortar-bar test,” *Materials and Structures*, 33 (2000), 283–293.
- [**RILEM TC-191-ARP.2003**] RILEM TC-191-ARP, Alkali-reactivity and prevention assessment, specification and diagnosis of alkali-reactivity, *Materials and Structure*, 36 (2003), 472-479.
- [**RILEM TC-106-AAR.2000b**] RILEM TC-106-AAR, “Detection of potential alkali reactivity of aggregates—methods for aggregate combinations using concrete prisms,” *Materials and Structures*, 33 (2000b), 290–293.
- [**Robinson et al.1992**] Robinson, P.C. and Bradbury, H.S.M. 1992: Quantitative Polarized Light Microscopy. Handbook 9, Royal Microscopical Society, Oxford, U.K
- [**Sibbick.1992**] Sibbick R. G., Page C. L., Susceptibility of various UK aggregates to alkaliaggregate reaction, 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in concrete, pp. 980-987, Londres, Angleterre, 1992.
- [**Shehata et al.2000**] Shehata, M.H. and Thomas, M.D.A. (2000). “The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali silica reaction.” *Cem. Concr. Res.*, 30(7), 1063-1072.
- [**Shehata et al.1999**] Shehata, M.H., Thomas, M.D.A., and Bleszynski, R.F. (1999). “The effect of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrated cement paste.” *Cem. Conc. Res.*, 29(12), 1915-1920.

- [**Shon et al.2004**] Shon, C.-S., Sarkar, S.L., Zollinger, D.G. (2004). “Testing the effectiveness of class c and class f fly ash in controlling expansion due to alkali-silica reaction using modified astm c 1260 test method,” J. Mat. in Civ. Eng., 16 (1), 20-27.
- [**Shon et al.2003**] Shon, C.-S., Zollinger, D.G., and Sarkar, L.S. (2003). “Application of modified ASTM C 1260 test for fly ash-cement mixtures.” Trans. Res. Rec. 1834, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 93-106.
- [**Scrivener.2001**] SCRIVENER K., «Cours on-line», EPFL, 2001.
- [**Stark.1983**] Stark, D. (1983). “Osmotic cell test to identify potential for alkali-aggregate reactivity.” Proc., 6th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Copenhagen, 351357.
- [**Steffens et al.2003**] Steffens, A., Li, K., and Coussy, O. (2003). “Aging approach to water effect on alkali silica reaction degradation of structures.” J. Eng. Mech., 129(1), 50-59.
- [**Schlangen et al.2009**] E. Schlangen, O. Çopuroglu, Concrete damage due to asr: a new method to determine the properties of the expansive gel, in: Proceedings Framcos6, June, 2007, pp. 17–22.
- [**Schlangen et al.1997**] E. Schlangen, E. Garboczi, Fracture simulations of concrete using lattice models: computational aspects, Engineering fracture mechanics 57 (2) (1997) 319–332.
- [**Sellier et al.1997**] Sellier, A., Capra, B. (1997). Modélisations physico-chimique de la réaction alcali-granat : apport au calcul des structures dégradées, Revue française de génie civil, 1(3), 445-481.
- [**Saouma et al.2006**] V. Saouma, L. Perotti, Constitutive model for alkali-aggregate reactions, ACI materials journal 103 (3) (2006) 194–202.
- [**Suwito et al.2002**] A. Suwito, W. Jin, Y. Xi, C. Meyer, A mathematical model for the pessimumsize effect of asr in concrete, Concrete Science and Engineering 4 (13) (2002) 23–34.
- [**Sanchez et al.2008**] Sanchez, L., Kuperman, S.C., Helene, P., and Kihara, Y., “Trials to correlate the accelerated mortar bar test, the standard and the accelerated concrete prism tests,” in Proceeding of the 13th ICAAR, Trondheim, Norway (2008).
- [**St John et al.1998**] St John, D.A., Poole, A.W. and Sims, I., Concrete petrography: A handbook of investigative techniques, John Wiley & Sons Inc., London, 1998.
- [**Sang.2001**] Sang-Y.L, PETROGRAPHIC EVALUATION OF BRIDGE DECK CONCRETE DURABILITY,These, Université de Texas Tech, 2001.
- [**Swamy.1993**] Swamy, R. N. éd., La réaction alcali-silice dans le béton, Blackie and Son Ltd, Glasgow, Londres, 1992
- [**Saouma et .2015**] Saouma, V. E., Martin, R. A., Hariri-Ardebili, M. A., & Katayama, T. (2015). A mathematical model for the kinetics of the alkali–silica chemical reaction.Cement and Concrete Research, 68, 184-195.
- [**Tambelli et al.2006**] C. Tambelli, J. Schneider, N. Hasparyk, P. Monteiro, Study of the structure of alkali silica reaction gel by high-resolution nmr spectroscopy, Journal of non-

crystalline solids 352 (32) (2006) 3429-3436.

[**Tanner, et al.1992**] Tanner, D.T. (1992). The use of monitoring and finite element analyses in evaluating remedial measures at TVA's Hiwassee Dam, Proc., Inter. Conf. AAR. Hyro. Plants and Dams, Fredricton, Canada, 28 septembre - 2 octobre, 1992.

[**Taylor.1997**] H.F.W. Taylor, Cement Chemistry : 2nd Edition, Thomas Therlford ed., 1997.

[**Tagushi et al.,1992**] M.tagushi, S.Chatterj, M.Kawamura, On the specific effect of ions on the rate of alkali-silica reaction, Cement and Concrete Research, 1992, pp 609-611.

[**Thomas et al.1992**] Thomas, M.D.A., Blackwell, B.Q., and Pettifer, K. (1992). "Suppression of damage from alkali silica reaction by fly ash in concrete dams." Proc., 9th Int. Conf. on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, 2, Slough, 1059-1066.

[**Tomosawa et al.1989**] Tomosawa, F., Tamura, K., and Abe, M. (1989). "Influence of water content of concrete on alkali-aggregate reaction." Proc. 8th Int. Conf. on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Kyoto, 881-885.

[**Tatematsu et al.1989**] Tatematsu, H. and Sasaki, T. (1989). "Proposal of a new index for a modified chemical method." Proc., 8th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Kyoto, 333-338.

[**Thomas et al.2006**] Thomas, M., Fournier, B., Folliard K., Ideker, J., and Shehata, M., "Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete," Cement and Concrete Research, 36 (2006), 1842-1856.

[**Tremblay et al.2004**] Tremblay, C., Berube, M.-A., Fournier, B., Thomas, M.D.A., and Stokes, D.B., Performance of lithium-based products against ASR: application to Canadian reactive aggregates, reaction mechanisms and testing", in Proceeding of the 12th ICAAR, Beijing, China (2004), 668-677.

[**Tang et AL.1980**] M S Tang, H Su-Fen, Effect of Ca(OH)₂ on Alkali-Silica Reaction , Proceedings of the Eight International Congress of Cement Chemistry.(1980)

[**Tomas et al.2007**] Thomas, M. D. A.; Fournier, B.; Folliard, K.; Ideker, J.; Resendez, Y. The use of lithium to prevent or mitigate alkali-silica reaction in concrete pavements and structures. Publication no. FHWA-HRT-06-133. The Transtec Group Inc. Austin, TX, 2007.

[**Uhran, 1992**] S.Urhan, Alkali-silica and pouzzolanic reactions in concrete: part1; Interpretation of published results and hypothesis concerning the mechanism Cement and Concrete Research, 1992, pp 141-152.

[**Vivian.1981**] Vivian, H.E. (1981). "The effect of drying on reactive aggregate and mortar expansions." Proc., 5th Int. Conf. on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Cape Town, , 25228.

[**Vega.2014**] Varga, J. (n.d.). L&M Construction Chemicals LATICRETE. Retrieved March 23, 2016.

[**Wilson et al.1994**] M.Wilson, J.G.Cabrera, Y.Zou, The process and mecahnism of alkali-silica reaction using fused silica as the reactive aggregate, Advances in Cement Research,

1994, pp 117-125.

[**Wang et al. 1991**] H.Wang, J.E.Gillott, Mechanism of alkali-silica reaction and the signification of calcium hydroxyde Cement and Concrete research, 1191, pp 647-654.

[**Way et al.1993**] S.J.Way, A.Shayan, Synthesis and charactersation of crystalline analogues of alkali-aggregate reaction products, cement and Concrete Research, 1993, pp 471-479.

[**Wiecker et al.,1998**] W.Wiekler, C.Hurbert, D.Heidman, R.Ebert, Alkali silica reaction - a problem of insufficient fundamental knowldge of the chemical base, Materials Science of concrete : The Sidney Diamond Symposium, American Ceramic Society, 1998, pp 325-337.

[**Wiecker et al. 2000**] W.Wiekler, C.Hurbert, D.Heidman, R.Ebert, Some experiences in chemical modeling of the alkali silica reaction, 11th Internatinal Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete,2000, pp 119-128.

[**West.1991**] West, G. (1991). "A note on undulatory extinction of quartz in granite." J. Eng. Geol., 24(1), 159-165.

[**Winter.2001**] Winter, N. (2001). Alkali-Silica reaction in Concrete. Retrieved 06 18, 2011, from Understanding Cement: understanding-cement.com

[**Xu et al.1998**] Xu, Z., Shen, Y., and Lu, D., "Main parameters in the new test method for alkali-silica reactivity," Journal of Nanjing University in Chemical Technology,20 (1998), 1-7.

[**Xi et al.1999**] Xi, Y., Suwito, A., Meyer, C., Jin, W. (1999). Testing and modeling of alkali-silica reaction and the associated expansion of concrete in Pijaudier-Cabot, G., Bittnar, Z., Gérard, B. (Eds.) Mechanics of Quasi-Brittle Materials and Structures, Hermes Science Publications, Paris, 217-232.

[**Yang et al.1995**] Yang, C. C., Huang, R., Yeih, W., et al. Aggregate effect on elastic moduli of cement-based composite materials. Journal of Marine Science and Technology, 1995, vol. 3, no 1, p. 5-10.

[**Zhang et al.1990**] Zhang, X., Blackwell, B.Q., and Groves, G.W. (1990). "The microstructure of reactive aggregate." Brit. Cer. Trans. J., 89, 89-92.

[**Zhuang et al.2013**] Zhuang, Y., Qian, C., & Xu, W. (2013). Calculation of alkali silica reaction (ASR) induced expansion before cracking of concrete. J. Wuhan Univ. Technol.-Mat. Sci. Edit. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 28(1), 110-116.

Listes des publications & communications issues de la thèse

Publications dans des revues

M. Tabet, A. Guettala, "The Effect of Alkali Silica Gel Formation from Alkali Silica Reaction in Mesoscopic Scale", *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 752-753, pp. 295-299, 2015.

Communications internationales

M. Tabet, A. Guettala. Modélisation numérique à l'échelle mésoscopique du gel de silice formé par la réaction alcali silice. 1^{er} Conférence International sur la mécanique des matériaux et des structures , Marrakech, Maroc, 2014., pp. 110-114.

Abstract

The alkali aggregate reaction is more frequent in the diagnostic of damaged structures. Although the reaction has been known for some time, it is difficult to have a clear picture of the mechanisms of the phenomenon in granular scale (mesoscopic) in the reaction of the affected structures. This thesis aims to study the relationship between the progress of the reaction and the effects that generate the reaction on concrete, to better study the effect of the AAR on structures, and have an additional understanding. The base of our thesis and the program was to characterize the microstructure and mechanical properties of concrete affected by alkali aggregate reaction. The microstructural characteristics of some aggregates were studied and measured using microscopic techniques. Mortar bars samples and miniature concrete prisms were made with these aggregates and subjected to alkali aggregate reaction. The analysis of microscopic images obtained from samples was used to understand the mechanism and the degree of reaction. The multidisciplinary approach was used with the microstructural characterization and accelerated test to find a combination of techniques that can be used to assess the reaction. The mesoscopic modeling approach adopted in the thesis take into account the effect of size reactive aggregates, the alkali content and the fraction of particle sizes. Kinetics modeling was done to address the mechanisms of the reaction on the basis of a chemical characterization. The results show a promising relationship between the observed response and the expansions in the concrete and mortar prisms bars. A clarification has been discussed using microscope image processing regarding the mechanism of the reaction. The mesoscopic modeling approach presented was able to correctly reproduce the results of laboratory.

Keywords: alkali aggregate reaction, AAR, silica gel formed, petrographic analysis, expansion, alkalinity, mesoscopic modeling, reaction mechanism.

Résumé

La réaction alcali granulaire est de plus en plus fréquente dans le diagnostics des structures endommagées. Bien que la réaction soit connue depuis un certain temps, il est difficile d'avoir une image claire sur les mécanismes du phénomène à échelle granulaire (mésoscopique) sur les structures affectées. Cette thèse vise à étudier le rapport entre l'avancement de la réaction et les effets générés de la réaction sur béton afin de mieux étudier l'effet de la RAG sur les structures, et y avoir une compréhension additionnelle. La base du programme de notre mémoire était ainsi de caractériser la microstructure et les propriétés mécaniques du béton affecté par une réaction alcali granulaire. Les caractéristiques microstructurales de quelques granulats ont été étudiées et mesurées en utilisant des techniques microscopiques. Des échantillons de barres de mortier et de prismes béton miniature ont été confectionnés avec ces granulats et soumis à la réaction alcali silice. L'analyse des images microscopiques obtenues à partir des échantillons polis a été utilisée pour comprendre le mécanisme et le degré de réaction. L'approche multidisciplinaire a été faite pour la caractérisation microstructurale et essai accéléré pour trouver une combinaison des techniques qui peuvent être employées pour évaluer la réaction. La modéliser par une approche mésoscopique en prenant en compte l'effet des taille agrégats réactifs, la teneur en alcalin, ainsi que la fraction des tailles de particule. Une clarification a été examinée au microscope en ce qui concerne le mécanisme de la réaction. Une modélisation de la cinétique de la réaction a été faite pour voir les mécanismes de la réaction sur la base d'une caractérisation chimique. Les résultats montrent une relation prometteuse entre la réactivité observée et les expansions dans les prismes de béton et les barres de mortiers. L'approche de modélisation mésoscopique présentée a pu reproduire correctement les résultats de laboratoire.

Mots-clés : réaction alcali granulaire, RAG, gel de silice formé, analyse pétrographique, expansion, alcalinité, modélisation mésoscopique, mécanisme réactionnel.