

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES  
FACULTE DE TECHNOLOGIE



DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Génie Civil  
Option : Géotechnique & Matériaux

Présenté par :

**SEKRANE Nawal Zahira**

**ANALYSE ET SIMULATION DU PHENOMENE  
D'ALCALI-REACTION DANS LES BETONS**

Soutenue en ...Octobre.....2015

<b>SEBAIBI YAHIA</b>	<b>Pr</b>	<b>UDL – SBA</b>	<b>President</b>
<b>ASROUN AISSA</b>	<b>Pr</b>	<b>UDL – SBA</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>HOUARI MOHAMMED S.</b>	<b>MCA</b>	<b>U.MASCARA</b>	<b>Examineur</b>
<b>ELMEICHE NOUREDDINE</b>	<b>MCA</b>	<b>U.MASCARA</b>	<b>Examineur</b>
<b>BERRABAH HAMZA M.</b>	<b>MCA</b>	<b>C.U.RELIZANE</b>	<b>Invité</b>

Année Universitaire 2015/2016

## Remerciement

Le présent travail a été effectué au laboratoire de génie civil et environnement à la faculté de technologie de l'université Djillali Liabes de Sidi bel Abbés.

J'adresse mes remerciements à Monsieur A.ASROUN, professeur de l'université Djillali Liabes, directeur de cette thèse. Je lui suis très reconnaissant pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée tout au long de l'étude, ses conseils éclairés, pour sa grande disponibilité, ainsi que pour sa profonde humanité et ses encouragements qui m'ont beaucoup aidé à achever ce travail dans des conditions favorables.

Je suis reconnaissant envers Monsieur SEBAIBI YAHIA, professeur à l'université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbés pour avoir présidé ce jury, Mr SEBAIBI YAHIA a eu le mérite de juger ce document car son jugement est d'une valeur intrinsèque dans ce domaine.

Mes sincères remerciements vont également à messieurs : Houari Mohammed Sid Ahmed, Elmeiche Noureddine maîtres de conférences Université de Mascara qui ont accepté de participer au jury et qui ont bien voulu juger mon travail.

Je remercie de tout mon cœur mon mari, ma famille et la famille BERRABAH, qui ont su me donner sans cesse son soutien moral au cours de ma vie pour rendre possible mes études et par conséquent, cette thèse de Doctorat.

# SOMMAIRE

Résumé	
Abstract	
ملخص	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
<b>PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
<b>I QU'EST CE QUE L'ALCALI-REACTION</b>	<b>4</b>
<b>I.1 DEFINITION DE L'ALCALI-REACTION</b>	<b>4</b>
<b>I.2 LES TYPES D'ALCALI-REACTION</b>	<b>4</b>
<b>I.2.1 La réaction alcali-silice</b>	<b>3</b>
<b>I.2.2 La réaction alcali-carbonate</b>	<b>5</b>
<b>I.2.3 La réaction alcali-silicate</b>	<b>5</b>
<b>I.3 LES FACTEURS INFLUENÇANT L'ALCALI REACTION</b>	<b>6</b>
<b>I.3.1 Réactivité et nature du granulat</b>	<b>6</b>
<b>I.3.2 Teneur en alcalins et Composition de la solution interstitielle</b>	<b>6</b>
<b>I.3.3 Humidité</b>	<b>6</b>
<b>I.4 D'AUTRES FACTEURS INFLUENÇANT L'ALCALI-REACTION</b>	<b>7</b>
<b>I.4.1 Température</b>	<b>7</b>
<b>I.4.2 Perméabilité et rapport eau/ciment</b>	<b>7</b>
<b>I.4.3 Porosité</b>	<b>7</b>
<b>I.4.4 Fissuration</b>	<b>8</b>
<b>I.5 CONCLUSION</b>	<b>8</b>
<b>II MECANISME ET CONSEQUENCES DE L'ALCALI-REACTION</b>	<b>8</b>
<b>II.1 LE MECANISME DE L'ALCALI-REACTION</b>	<b>8</b>
<b>II.1.1 Introduction</b>	<b>8</b>
<b>II.1.2 Le mécanisme de la réaction alcali-silice</b>	<b>8</b>
<b>II.1.2.1 Approche des réactions topochimiques</b>	<b>9</b>
<b>II.1.2.2 Approche des mécanismes de trans-solution</b>	<b>11</b>
<b>II.1.2.3 Produits de la réaction</b>	<b>12</b>
<b>II.1.3 Le mécanisme de la réaction alcali carbonate</b>	<b>13</b>
<b>II.1.4 Conclusion</b>	<b>13</b>
<b>II.2 LES CONSEQUENCES DE L'ALCALI-REACTION</b>	<b>13</b>
<b>III.2.1 Introduction</b>	<b>13</b>
<b>III.2.2 Conséquences mécaniques pour le matériau</b>	<b>13</b>
<b>III.2.3 Conséquences mécaniques pour la structure</b>	<b>15</b>
<b>III.2.4 Conclusion</b>	<b>15</b>
<b>III DEPISTAGE ET PREVENTION DE L'ALCALI-REACTION</b>	<b>16</b>
<b>III.1 DEPISTAGE DE L'ALCALI-REACTION</b>	<b>16</b>
<b>III.1.1 Introduction</b>	<b>16</b>
<b>III.1.2 Dépistage des ouvrages atteints d'alcali-réaction</b>	<b>16</b>

<b>III.1.2.1</b>	Les symptômes visuels à l'échelle de l'ouvrage entier.....	<b>16</b>
<b>III.1.2.2</b>	Les symptômes visuels à l'échelle microscopique/ Macroscopique.....	<b>17</b>
<b>III.1.3</b>	Problème du traitement des ouvrages .....	<b>19</b>
<b>III.1.4</b>	Conclusion.....	<b>19</b>
<b>III.2</b>	<b>PREVENTION DE L'ALCALI-REACTION</b>	<b>20</b>
<b>III.2.1</b>	Introduction .....	<b>20</b>
<b>III.2.2</b>	Démarche de prévention des désordres de l'alcali-réaction.....	<b>20</b>
<b>III.2.3</b>	Limitation de la teneur en alcalins des bétons .....	<b>21</b>
<b>III.2.4</b>	L'ajout des additions minérales.....	<b>22</b>
<b>III.2.5</b>	conclusion.....	<b>23</b>
	<b>DEUXIEME PARTIE : MODELISATIONS DE L'ALCALI-REACTION</b>	
<b>IV</b>	<b>LES MODELISATIONS DE L'ALCALI-REACTION</b>	<b>24</b>
<b>IV.1</b>	INTRODUCTION.....	<b>24</b>
<b>IV.2</b>	LES MODELES MESOSCOPIQUES.....	<b>24</b>
<b>IV.2.1</b>	Le modèle de Sellier .....	<b>24</b>
<b>IV.2.2</b>	Le modèle de Uomoto et Furusawa.....	<b>27</b>
<b>IV.2.3</b>	Le modèle de Bažant et Steffens.....	<b>30</b>
<b>IV.2.4</b>	Le modèle de Xi.....	<b>33</b>
<b>IV.2.5</b>	Le modèle de Poyet.....	<b>35</b>
<b>IV.3</b>	LES MODELES MACROSCOPIQUES.....	<b>44</b>
<b>IV.3.1</b>	Le modèle de Nielsen.....	<b>44</b>
<b>IV.3.2</b>	Le modèle de Capra.....	<b>45</b>
<b>IV.3.3</b>	Le modèle de Li.....	<b>47</b>
<b>IV.4</b>	CONCLUSION.....	<b>49</b>
	<b>TROISIEME PARTIE : SIMULALTION NUMERIQUE DU PHENOMENE D'ALCALI-REACTION</b>	<b>50</b>
<b>V</b>	<b>MODELISATION DE L'EXPANSION ALCALI REACTIVE DANS LE BETON</b>	<b>50</b>
<b>V.1</b>	INTRODUCTION.....	<b>50</b>
<b>V.2</b>	MATERIAUX ET METHODE.....	<b>51</b>
<b>V.2.1</b>	Matériaux .....	<b>52</b>
<b>V.2.2</b>	Méthode de mélange et de moulage .....	<b>52</b>
<b>V.3</b>	LES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION.....	<b>53</b>
<b>V.4</b>	MODELE D'EXPANSION ET DISCUSSION.....	<b>56</b>
	CONCLUSION.....	<b>63</b>
	<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>65</b>
<b>V.5</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	

## Résumé

L'objectif de cette thèse est de développer un modèle pour prédire le potentiel d'expansion du béton contenant des granulats alcali-réactifs. Ce travail donne des mesures pour fournir des données expérimentales concernant l'effet de la taille des particules des granulats alcali-réactifs sur l'expansion du mortier et les servir comme base de données pour la simulation de l'alcali-réaction. Les résultats montrent qu'aucune expansion n'a été mesurée sur des mortiers contenant de petites particules (0,15 - 0,80) mm, tandis que les particules (1,25-2,50) mm ont donné les plus grandes expansions. Le modèle proposé a pour but de simuler la corrélation entre ces expansions mesurées et la taille des particules réactives, et de calculer l'épaisseur de la zone poreuse nécessaire de reprendre le volume du gel créé par cette réaction.

## **Abstract**

The objective of this thesis is to develop model to predict the potential for expansion of concrete containing alkali reactive aggregates. This work gives measures to provide experimental data on the effect of particle size of the alkali-reactive aggregates on the expansion of mortar and serve as a database for simulation of the alkali-silica reaction. The results show that no expansion was measured on mortars containing small particles (0.15 - 0.80) mm, while the particles (1.25 - 2.50) mm gave the greatest expansions. The proposed model aims to simulate the correlation of the measured expansions and the size of reactive particles, and to calculate the thickness of the porous zone necessary to take the volume of the gel created by this reaction.

## ملخص

الهدف من هذه الرسالة هو تطوير نموذج من أجل اكتشاف شدة تمدد الخرسانة المحتوية على الحصى القليلي التفاعلي. يوفر هذا العمل قياسات لتوفير البيانات التجريبية حول تأثير حجم الحصى على تمدد الاسمنت و يكون بمثابة قاعدة معطيات للتمثيل الرقمي. تظهر النتائج أنه لم يتم قياس أي تمدد على الاسمنت الذي يحتوي على حبيبات صغيرة (0,15-0,80) ملم في حين أعطت الحبيبات (1,25-2,50) ملم أكبر التمددات. هذا النموذج يقوم بدراسة العلاقة بين التمددات المقاسة و حجم الحبيبات التفاعلية، و يحسب سمك المنطقة الفارغة اللازمة لاحتواء الحجم الكلي من الهلام الذي نتج عن هذا التفاعل.

## Liste des Figures

<b>Fig. I.1</b>	Mécanisme réactionnel proposé par Dent-Glasser et Kataoka.....	<b>11</b>
<b>Fig. IV.1</b>	Représentation graphique du modèle de Sellier.....	<b>25</b>
<b>Fig. IV.2</b>	Modèle proposé par Bažant et Steffens	<b>31</b>
<b>Fig. IV.3</b>	Influence de l'humidité relative dans les pores et de la pression sur l'imbibition du gel basique .....	<b>32</b>
<b>Fig. IV.4</b>	Représentation d'un granulat réactif supposé sphérique.....	<b>12</b>
<b>Fig. IV.5</b>	Exemple de V.E.R. pour trois granulats, visualisation des trois focalisations.....	<b>37</b>
<b>Fig. IV.6</b>	Influence de l'humidité relative sur le gonflement, d'après [NIE-1993].....	<b>45</b>
<b>Fig. IV.7</b>	Evolution des fonctions h à gauche ( $\sigma_1=5$ MPa – $\sigma_2=40$ MPa) et f à droite.....	<b>46</b>
<b>Fig. V.1</b>	Expansions des mortiers contenant la taille des particules réactive (0.15 - 0.80) mm, (1.25 - 2.50) mm, (2.50 - 5.0) mm mesurées à 14 jours pour (PO).....	<b>54</b>
<b>Fig. V.2</b>	Expansions des mortiers contenant la taille des particules réactive (0.15 - 0.80) mm, (1.25 - 2.50) mm, (2.50 - 5.0) mm mesurées à 14 jours pour (NQ).....	<b>54</b>
<b>Fig. V.3</b>	La relation entre l'expansion et la taille des particules réactives .....	<b>55</b>
<b>Fig. V.4</b>	schéma d'une particule réactive après la réaction.....	<b>57</b>
<b>Fig. V.5</b>	Expansion du mortier en fonction du diamètre $D_i$ des particules réactives: calculée par le model d'expansion.....	<b>60</b>
<b>Fig. V.6</b>	Expansion du mortier en fonction du diamètre $D_i$ des particules réactives: comparaison entre l'expérimentale et le model d'expansion pour (PO).....	<b>61</b>
<b>Fig. V.7</b>	Expansion du mortier en fonction du diamètre $D_i$ des particules réactives: comparaison entre l'expérimentale et le model d'expansion pour (NQ).....	<b>62</b>
<b>Fig. V.8</b>	Expansion du mortier en fonction du diamètre $D_i$ des particules réactives: comparaison entre l'expérimentale et le model d'expansion pour (NQ).....	<b>63</b>



## Liste des tableaux

<b>Tableau III-1</b>	Détermination du niveau de prévention en fonction de la catégorie d'ouvrage et de son exposition.....	<b>21</b>
<b>Tableau V-1</b>	Paramètre des tests accélérés pour l'alcali-réaction.....	<b>52</b>
<b>Tableau V-2</b>	Résultats d'expansions des granulats réactifs.....	<b>55</b>
<b>Tableau V.3</b>	les paramètres du modèle d'expansion.....	<b>59</b>

# INTRODUCTION GENERALE

Le béton constitue certainement un des matériaux de constructions les plus durables. Certains ouvrages demeurent en excellent état après plus d'un siècle d'exposition à des conditions climatiques particulièrement rigoureuses. Cependant, on constate quelque fois que certains ouvrages récents présentent une détérioration importante.

Cette détérioration apparaît lorsque ces ouvrages ne peuvent pas résister à des agressions, elle hypothèque la durabilité, la résistance et la stabilité des ouvrages et peut entraîner leur dégradation, voir leur ruine.

Les causes de cette détérioration sont variées ; elles peuvent être mécaniques, physiques ou chimiques.

Parmi les causes chimiques, il existe des réactions qui se produisent entre la solution interstitielle fortement alcaline et certaines phases minérales présentes dans les granulats, se sont les Alcalis-Réactions. Ces réactions présentent la particularité d'être localisées et distribuées de manière aléatoire dans le béton ; créant ainsi au sein de celui-ci des désordres occasionnant des dégradations importantes conduisant quelques fois à la ruine de certains ouvrages, ces réactions sont appelée aussi le « *cancer du béton* ».

La thèse est divisée en trois parties :

La première partie est une recherche bibliographique dans laquelle nous définissons l'alcali-réaction, les types de ces réactions ainsi que les facteurs qui la déclenchent.

Puis nous présentons les mécanismes réactionnels des alcali-réactions et les différentes théories qui expliquent l'origine du gonflement causé par ces réactions, ainsi que ces conséquences diverses sur les ouvrages et ces conséquences mécaniques sur le matériau et sur la structure. Nous montrons aussi ces symptômes visibles à l'échelle de l'ouvrage et ceux visibles à l'échelle microscopique/macrosopique ainsi que les méthodes de traitement des ouvrages malades. Après nous présentons la démarche de prévention des désordres des alcali-réaction éditée par le LCPC ainsi que l'effet bénéfique des additions minérales pour réduire l'expansion.

La deuxième partie de ce mémoire sera consacrée à l'étude approfondie des différents modèles existants pour modéliser l'alcali- réaction et ses effets mécaniques sur le béton.

La troisième partie est une simulation numérique du phénomène d'alcali-réaction, son but est la modélisation de l'effet de la taille du granulat réactif sur l'expansion alcali réactive ; pour cette raison un modèle a été proposé, son objectif est d'analyser les résultats expérimentaux par l'étude des corrélations entre les expansions mesurées et la taille des agrégats et de calculer l'épaisseur de la zone poreuse nécessaire de reprendre tout le volume du gel créé par la réaction.

Enfin nous terminons ce mémoire par une conclusion générale de ce travail.

# **I-QU'EST-CE QUE L'ALCALI-REACTION**

## **I.1-DEFINITION DE L'ALCALI-REACTION**

L'alcali-réaction est une réaction de dissolution complexe entre certaines formes de silice, de silicates ou de carbonates de constitution des granulats et les ions hydroxydes (OH<sup>-</sup>) et les ions alcalins sodium (Na<sup>+</sup>), potassium (K<sup>+</sup>) et calcium (Ca<sup>2+</sup>) contenus dans le ciment Portland.

Trois conditions doivent être remplies pour que ces réactions puissent avoir lieu :

- Il faut que le granulat soit potentiellement réactif.
- la teneur en alcalins dans la phase liquide interstitielle dépasse un seuil critique.
- L'humidité relative excède 80 à 85%.

Tous les ciments portland contiennent des alcalis sous forme d'oxydes (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O), la teneur en alcalis dépend de l'origine des matières premières et du procédé de fabrication.

Au premier stade de l'hydratation du ciment, les alcalis sont libérés sous forme d'hydroxydes solubles (NaOH et KOH), ils peuvent alors migrer dans la pâte de ciment et réagir avec certains types de granulats. Les alcalis provenant d'autres sources, telles que l'eau du terrain ou d'adjuvants, ont les mêmes effets que ceux du ciment.

L'alcali-réaction entraîne le gonflement et la fissuration du béton qui peuvent mener à une destruction complète. Le mécanisme de cette destruction n'est pas encore complètement éclairci. Ces réactions n'apparaissent en général qu'après plusieurs dizaines d'années. Cependant si les trois conditions précédemment citées sont remplies, avec notamment une forte réactivité des granulats et une forte teneur en alcalins, une alcali-réaction peut se développer en quelques années.

## **I.2-LES TYPES D'ALCALI-REACTION**

### **I.2.1-La réaction alcali-silice**

La réaction alcalis-silice (RAS) est la réaction la plus courante, elle constitue un problème majeur au plan de la durabilité des bétons.

Comme toute réaction chimique, la réaction alcali-silice évolue dans le temps, impliquant la consommation de réactants. Il s'agit d'une réaction hétérogène entre certaines phases siliceuses réactives des granulats et les ions hydroxydes alcalins dissous dans la solution interstitielle du béton. La réaction se poursuit tant que les deux réactants sont en quantité suffisante. L'épuisement de la silice réactive ou des ions hydroxydes conduira inexorablement

à la fin de la réaction. La silice est généralement stable en milieu neutre ou acide mais le béton (dont le pH est généralement supérieur à 13) constitue un environnement particulièrement agressif vis-à-vis de certaines phases siliceuses. Après dissolution de la silice, un gel hydrophile est formé, dont les caractéristiques dépendront d'un bon nombre de facteurs. La pression exercée par le gel fracture les particules de granulat et provoque la propagation des fissures dans le béton environnant. La quantité du gel formé dépend de la quantité et du type de la silice réactive et de la concentration en hydroxydes alcalins. Généralement, la réaction alcalis-silice entraîne une fissuration en faïençage.

### **I.2.2-La réaction alcali-carbonate**

La réaction alcali-carbonate (RAC) est moins courante. Dans cette réaction, certains granulats de calcaires dolomitiques argileux réagissent avec les ions hydroxydes associés aux alcalis du ciment (ou provenant d'autres sources telles que les sels déglaçants) et provoquent le gonflement des particules de calcaire, ce qui entraîne l'expansion et la fissuration du béton.

La réaction alcali-carbonate demeure relativement rare puisque les granulats mis en cause ne conviennent généralement pas pour la fabrication du béton notamment en raison de leur faible résistance mécanique.

La réaction alcali-carbonate est très dommageable et peut causer des dommages notables sur le terrain après moins de deux ans suivant la mise en service. En particulier, des réactions graves se sont produites au barrage Chicamauga dans le Tennessee, dans plusieurs ponts routiers dans le sud-ouest de la Virginie, et près de Toronto, au Canada.

Cette réaction entraîne dans le béton une fissuration semblable à celle que provoque la réaction alcalis-silice.

### **I.2.3-La réaction alcali-silicate**

La réaction alcali-silicate est très rare, elle est associée à diverses variétés de quartz tels que: la calcédonite, le quartz microcristallisé et le quartz macrogranulaire. Les granulats contenant ces formes de quartz peuvent causer la détérioration des bétons contenant une haute teneur en alcalis lorsque la composante réactive est présente en quantités aussi faibles que 5% de la masse de granulats. L'expérience canadienne a permis d'inclure dans cette catégorie plusieurs granulats à expansion lente dans lesquels le quartz microcristallin serait la composante réactive. C'est le cas des roches comme le grauwaacke, l'argilite, le quartzwaacke, le quartzite, la cornéenne, le granite et le gneiss granitique. Ces types de roches peuvent ne présenter aucun signe de fissuration et de détérioration pendant près de 20 ans. Dans d'autres

cas cependant, en particulier lorsque le béton est exposé à des sels de déglçage, la fissuration peut se produire en moins de 5 ans.

Les réactions alcali-silicate sont assez semblables aux réactions alcali-silice; elles diffèrent principalement par leurs vitesses: les réactions alcali-silice sont plus rapides. Cette vitesse différente s'explique par le fait que les granulats contenant de l'acide silicique amorphe ou semi-cristallin réagissent plus rapidement que les silicates cristallins.

### **I.3-LES FACTEURS INFLUENÇANT L'ALCALI-REACTION**

#### **I.3.1- Réactivité et nature du granulat**

Les granulats sont classés en trois catégories :

- Les granulats non réactifs « **NR** » : si l'expansion de l'éprouvette est inférieure au seuil admis et si le granulat ne présente pas d'effet pessimum ;
- Les granulats potentiellement réactifs « **PR** » : si l'expansion de l'éprouvette est supérieure au seuil admis et si le granulat ne présente pas d'effet pessimum ;
- Les granulats potentiellement réactifs à effet de pessimum « **PRP** » : si en fonction de la teneur en silice potentiellement réactive, l'expansion de l'éprouvette dépasse le seuil admis et peut passer par un maximum alors le granulat est dit potentiellement réactif à effet de pessimum.

De nombreuses recherches ont mis en lumière la relation entre la nature du granulat et l'ampleur des dommages occasionnés par celui-ci.

Dans le cas de la réaction alcali-silice, la phase réactive est un minéral de silice.

La silice est réactive lorsque son entropie est élevée : un réseau cristallin mal développé, désordonné ou distordu sera facilement attaqué par les ions agressifs. Par ailleurs, Monteiro et al. [2001] ont démontré que dans le cas d'une même roche ayant subi différents degrés de métamorphisme (granodiorite, mylonite et phyllonite), la texture des minéraux présents pouvait présenter une corrélation avec la réactivité du granulat dans le béton. Par exemple, en comparant la texture du quartz et celle de la biotite avec la réactivité du granulat, les chercheurs ont montré que la corrélation était meilleure avec la biotite. En d'autres termes, plus la biotite présente une texture associée à un métamorphisme élevée, plus grande est la réactivité du granulat.

Aussi, la porosité interne de la silice apparaît comme un paramètre important dans la réactivité. Souvent les formes les plus désordonnées sont celles avec une porosité plus grande. Ainsi une

forme de silice ayant peu de porosité interne comme les quartz bien cristallisés ne sont pas sensibles à la réaction alcali-silice.

La notion de réactivité d'un granulat a d'ailleurs été soulignée par Dron et Brivot [1993] qui ont démontré la grande variation de la vitesse de dissolution de la silice suivant le type de silice attaquée; la vitesse de dissolution de l'opale du Massif central (France) est deux fois plus élevée que celle de la cristobalite synthétique et deux milles fois plus élevée que celle de la quartzite de Brix (France).

### **I.3.2- Teneur en alcalins et composition de la solution interstitielle**

Bon nombre de chercheurs ont observé que la dégradation du béton (fissuration et expansion) causée par l'alcali-réaction dépend de la quantité d'alcalis dans la solution interstitielle du béton. En dessous d'un certain seuil, la réaction ne pourra plus continuer, faute de réactants.

Bien que le béton apparaisse souvent comme sec en surface, ce matériau contient une quantité appréciable de liquide aqueux appelé *solution interstitielle*.

La composition chimique de la solution interstitielle dépend principalement de la nature et de la chimie du ciment utilisé. La solution constitue un environnement naturellement basique car l'hydratation du ciment produit, en début de réaction, des solutions saturées en hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). L'alcalinité de la solution est par la suite rehaussée par la mise en solution d'ions potassium et d'ions sodium à partir des oxydes alcalins contenus dans le ciment.

Bien que la principale source d'alcalis soit le ciment, des alcalis supplémentaires peuvent toutefois être fournis par les autres ingrédients du béton : ajouts minéraux, eau de gâchage, adjuvants chimiques. Les granulats (fins et grossiers) peuvent eux-mêmes relâcher une partie de leurs alcalis comme les argiles et les feldspaths. De même, la pénétration de substances solubles externes (comme les sels de déglçage) peut modifier la chimie de la solution interstitielle.

### **I.3.3- Humidité**

Sans eau, l'alcali-réaction ne peut avoir lieu. Des conditions d'humidité relative minimales de 80% à 85% sont normalement requises pour que la réaction puisse se développer et se maintenir. La limite d'humidité varie en fonction de la réactivité du granulat et de la teneur en alcali du béton ; une limite inférieure peut s'appliquer dans le cas de granulats très réactifs.

Un degré d'humidité élevé est donc essentiel pour que la réaction ait lieu. En règle générale, le gonflement est d'autant plus important que la quantité d'eau disponible est grande.

## **I.4-AUTRES FACTEURS INFLUENÇANT L'ALCALI-REACTION**

Il existe d'autres facteurs influençant l'alcali-réaction lesquels luttent souvent entre eux, certains accélèrent la réaction, d'autres la ralentissent :

### **I.4.1- Température**

Selon la loi d'Arrhenius, une hausse de température accélère la cinétique d'une réaction chimique. La vitesse de réaction double pour chaque augmentation de 10°C. Dans le cas de l'alcali-réaction, il a été démontré à maintes reprises que la réaction débute plus rapidement et que les taux d'expansion sont plus élevés en augmentant la température ambiante.

### **I.4.2- Perméabilité et rapport eau/ciment**

La difficulté de bien comprendre l'effet de la perméabilité du béton provient principalement du fait que la façon habituelle de rendre un béton moins perméable consiste à abaisser le rapport eau/ciment. Ceci a pour première conséquence d'augmenter la quantité de ciment, donc la quantité d'alcalis. De plus, puisque qu'il y a diminution de la quantité d'eau dans le béton, la solution interstitielle se trouvera plus concentrée en ions. Une plus grande concentration en hydroxydes alcalins favorise l'alcali-réaction. De plus, un faible rapport E/C diminue la porosité du béton; il y a moins d'espace pour loger les gels, ce qui se traduirait par de plus fortes expansions. Finalement, en abaissant le rapport E/C, on accroît la résistance à la traction de la pâte; le béton résiste mieux aux pressions de gonflement. Ces facteurs entrent donc en compétition les uns avec les autres, ce qui se répercute dans la littérature par des résultats souvent très variables, contradictoires et parfois inexplicables.

### **I.4.3- Porosité**

La porosité du béton joue un rôle important dans le gonflement généré par l'alcali-réaction. En effet, si le milieu dans lequel la réaction a lieu comporte plusieurs vides (pores, bulles d'air, fissures), les produits de réaction s'y accumuleront et pourront gonfler librement sans créer de pressions importantes sur la pâte de ciment. L'expansion du béton sera donc grandement réduite. En somme, la relation entre la quantité de gel et l'expansion dépend, entre autres, de la porosité du béton. Les bulles d'air pourraient aussi agir comme barrière à la propagation des fissures et ainsi réduire la perméabilité et l'expansion.



#### **I.4.4- Fissuration**

La fissuration des bétons peut résulter de divers agents. Les cycles thermiques, les cycles de mouillage-séchage, les contraintes appliquées, le retrait de séchage et les détériorations physico-chimiques (alcali-réaction, attaque sulfatique) contribuent à accroître le nombre et la dimension des fissures dans le béton. La perméabilité du béton se trouve ainsi augmentée, ce qui peut permettre aux agents agressifs de promouvoir et accélérer l'alcali-réaction.

#### **I.5- CONCLUSION**

L'alcali-réaction est une réaction interne se produisant entre des phases minérales mal cristallisées contenues dans certains types de granulats et les alcalins présents dans la solution interstitielle du béton, fortement basique, elle se manifeste par la fissuration et le gonflement des bétons.

Plusieurs paramètres influencent à divers degrés le développement de la réaction, dont le facteur principal est la nature du granulat. Il est toutefois clair que l'eau est indispensable à la réaction, qu'une concentration élevée en alcalis favorise la réaction et qu'une hausse de température en accélère la cinétique.

## **II-MECANISME ET CONSEQUENCES DE L'ALCALI-REACTION**

### **II.1-LE MECANISME DE L'ALCALI-REACTION**

#### **II.1.1-Introduction**

L'alcali-réaction est étudiée depuis 60 ans mais à cause de la complexité de ses mécanismes, de nombreuses questions demeurent encore sans réponse définitive.

Le mécanisme de la réaction alcali-silicate est semblable à celui de la réaction alcali-silice mais le mécanisme de la réaction alcali-carbonate est différent.

#### **II.1.2- Le mécanisme de la réaction alcali-silice**

La réaction peut être visualisée comme processus en deux étapes. La première étape implique la formation du produit de réaction entre la silice réactive et les alcalis en béton. Les dommages réels au béton, cependant, sont provoqués par la deuxième étape. Dans cette étape, le produit de réaction qui est un gel absorbe l'eau et gonfle. Ce gel a une grande affinité pour l'imbibition de l'eau. Pendant qu'il absorbe l'humidité, il provoque des augmentations de volume et des contraintes de traction dans le béton. Il a été trouvé expérimentalement par Diamond (1986) que le gel peut augmenter jusqu'à 80% et prolonge une pression de gonflement au-dessus de 11MPa à son entourage. Ces pressions sont assez intenses pour

causer la rupture interne de la microstructure du tissu du béton qui affaiblit la force et la rigidité du béton. Dans une vue macroscopique, l'expansion volumétrique du béton est le résultat.

Beaucoup d'inconnues subsistent quant à la nature du produit et le mécanisme lié à l'apparition de pressions suffisantes pour fissurer le béton. De nombreuses expériences restent encore à faire dans ce domaine afin de clarifier le mécanisme et surtout la nature du ou des processus responsables de cette dégradation.

Le site des réactions chimiques fait l'objet de deux visions différentes. La majorité des chercheurs considère que la réaction se déroule entièrement au pourtour des particules réactives et/ou à l'intérieur de celles-ci. Cette conception sera définie comme *réactions topo-chimiques*. A l'opposé, d'autres chercheurs pensent que la réaction débute effectivement par la dissolution des phases réactives du granulats mais qu'elle se poursuit ailleurs dans la pâte. Ce concept est connu sous le nom de *réactions de trans-solution*, principe établi par Le Châtelier qui postule que toutes les réactions chimiques se produisent dans la solution interstitielle après passage à l'état ionique des différents éléments des espèces minérales [Larive 1997].

#### ***II.1.2.1-Approche des réactions topo-chimiques***

Cette approche est supportée par l'observation, en début de réaction, de fissures précoces et de produits de réaction (gels) localisés au sein des particules réactives. Les fissures tendent généralement à se propager des particules vers la pâte de ciment.

Les réactions se déroulent généralement à l'interface pâte-grulats. Toutefois, comme la plupart des granulats sont poreux, la solution agressive peut les pénétrer facilement et la réaction peut également se produire à l'intérieur des particules. Selon cette théorie, les pressions de gonflement seraient exercées à l'intérieur des granulats par les gels de réaction formés suite à la dissolution de la silice réactive.

Le mécanisme classique fut d'abord élaboré par Powers et Steinour [1955] puis repris et «popularisé» par Dent-Glasser et Kataoka [1981] (figure I.1).

Le réseau siliceux se compose de liaisons silanols (élément  $\equiv\text{Si} - \text{OH}$ ) et de ponts siloxanes (élément  $\equiv\text{Si} - \text{O} - \text{Si} \equiv$ ), son attaque se décompose en deux phases :

- 1) l'attaque des liaisons silanols du réseau de la silice par les ions hydroxydes de la solution interstitielle.

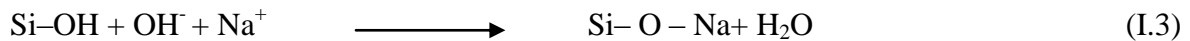


La vitesse de réaction dépend grandement de l'accessibilité de la silice réactive (c-à-d des caractéristiques de la zone de transition, de la fissuration et de la porosité du granulat, etc.)

2) Au même moment, il y a l'attaque des ponts siloxanes qui sont des liaisons plus fortes. L'attaque des ponts siloxanes dépendra, entre autre chose, de la distribution des groupes silanols sur la surface:

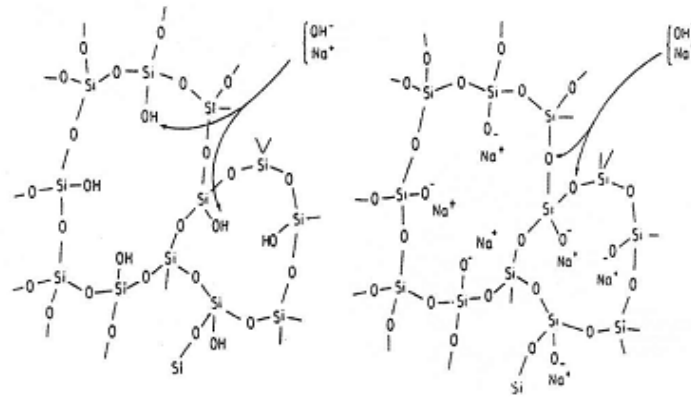


Les charges négatives engendrées par l'attaque des liaisons silanols et des ponts siloxanes sont contrebalancées par des alcalins ( $\text{Na}^+$  ou  $\text{K}^+$ ). Cela conduit à la formation d'un gel silico-alcalin de la forme  $\text{Si-O-Na}$ .



Il faut deux alcalins pour contrebalancer les charges négatives engendrées par la rupture d'un pont siloxane et un seul pour une liaison silanol (les ponts siloxanes sont les plus nombreux dans le réseau siliceux). Ces réactions conduisent à la découpe du réseau siliceux, à la formation d'un gel silico-alcalin et au passage en solution de la silice réactive (sous la forme d'un triacide :  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$ ,  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$  ou  $\text{HSiO}_4^{3-}$  selon la valeur du pH).





(a) Ionisation des silanols et neutralisation par les alcalins

(b) rupture des liaisons siloxanes par les ions hydroxydes

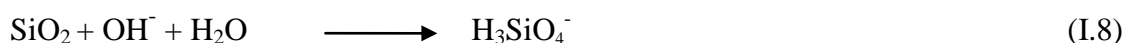
**Fig.I.1** : Mécanisme réactionnel proposé par Dent-Glasser et Kataoka

### II.1.2.2- Approche des mécanismes de trans-solution

Dans certains cas, la réaction semble plutôt localisée dans la pâte de ciment. Stark et al. [1993] rapportent le cas de mortiers fabriqués avec l'opale de Beltane. Leurs observations au microscope optique ont révélé que tous les grains avaient réagi intensément et généré une quantité importante de gel dans la pâte. Les auteurs mentionnent que, bien qu'attaquée aussi, seule la partie centrale des grains demeure visible, la partie périphérique ayant « disparu ». Les constituants originaux de l'opale semblaient donc avoir été dissous pour réagir plus loin dans la pâte.

Ces observations ont mené à l'approche des mécanismes de trans-solution, inspirée des réactions acides/bases, qui postule qu'il y a migration des réactifs (silice, hydroxydes alcalins) sous forme ionique dans la solution interstitielle et que les gels sont formés à l'extérieur des particules. Selon le schéma établi par Dron et Brivot [1992] et Lombardi et al. [1997], la réaction se déroulerait comme suit :

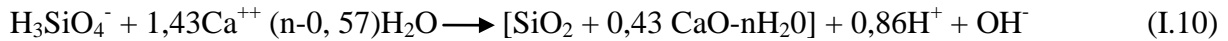
- 1) attaque superficielle des ponts siloxanes de la silice par les ions  $\text{OH}^-$  puis passage en solution des silanes (diffusion à l'extérieur de la particule) :



- 2) dissolution de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , pour équilibrer la consommation des ions  $\text{OH}^-$ . Les ions  $\text{Ca}^{++}$  tendent à migrer vers les zones de concentration plus faible en calcium :



3) lorsque tous les éléments en solution ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) se rencontrent, il y a précipitation et formation de gel dont la nature dépendra de la proportion respective des éléments en solution :



4) les ions alcalins ne seraient adsorbés qu'une fois les produits de réaction formés et ne feraient donc pas partie de la structure de ceux-ci. Le calcium joue donc ici un rôle tout aussi prépondérant que dans le modèle proposé par [Chatterji et al. \[1986\]](#).

Selon cette approche, les pressions de gonflement seraient causées par la cristallisation des produits de réaction.

Il est néanmoins possible que la vitesse de réaction puisse expliquer le fait que les gels soient plutôt formés dans la pâte. L'opale est une roche très réactive en milieu basique; la réaction se produisant à très grande vitesse, la silice est dissoute et migre rapidement vers la pâte où le calcium est abondant, favorisant la formation des gels gonflants.

Dans ce mécanisme, la nature et la localisation des produits de réaction dépendent des vitesses de dissolution de la silice et de diffusion des ions calcium en solution, de même que de la concentration initiale en alcalis dissous.

### ***II.1.2.3- Produits de la réaction***

Le gel produit par la réaction alcali-silice a une composition chimique largement variable et indéfinie et il n'y a aucune chimie exacte identifiée pour sa formation.

Le mécanisme responsable de la formation des gels à partir d'un sol silico-calco-alcalin peut être appelé floculation, agrégation ou gélation mais le terme gélation est préférable puisque celui-ci n'implique pas un type particulier de mécanisme; seulement une transformation de sol à gel.

Un gel est un réseau solide continu immergé dans une solution liquide continue. Le réseau peut exister grâce à des liaisons chimiques faibles ou fortes. En fait, on peut très bien comparer un gel à une éponge.

La gélification, sans la présence d'ions calcium, n'aurait pas lieu. Par conséquent, ces ions semblent être les moteurs de cette agrégation.

Les produits d'alcali-réaction peuvent se présenter sous plusieurs formes et montrer des compositions différentes, ils se classent en trois catégories:

- les produits amorphes (gels lisses, gels mamelonnés) ;
- les produits semi-organisés (produits microgrenus) ;
- les produits cristallisés (cristaux en feuillets, en rosettes).

Les trois morphologies peuvent coexister dans un même ouvrage, et parfois dans une même zone.

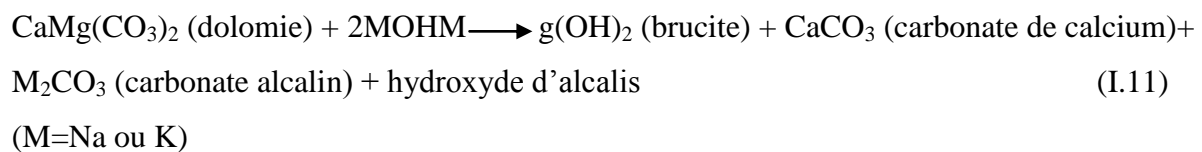
### II.1.3-LE MECANISME DE LA REACTION ALCALI-CARBONATE

Malgré 50 ans de recherches, le mécanisme de cette réaction n'est toujours pas bien compris. Il s'agit d'une dédolomitisation.

La dédolomitisation ou la décomposition de la dolomie (dissolution superficielle du granulat), forme de la brucite (hydroxyde de magnésium,  $Mg(OH)_2$ ) et de la calcite.

Les réactions suivantes décrivent le processus de dédolomitisation:

- Hydroxides alcalins de la solution interstitielle du béton attaquent les cristaux de dolomite :



- Les carbonates alcalins ( $M_2CO_3$ ) libérés réagissent avec l'hydroxyde de calcium du ciment ( $Ca(OH)_2$ ), ce qui libère des hydroxydes alcalins  $M(OH)$  :



Lors de la transformation de la dolomite ( $CaMg(CO_3)_2$ ) en brucite ( $Mg(OH)_2$ ), la porosité augmente, de l'humidité peut ainsi arriver jusqu'aux inclusions d'argile, lesquelles gonflent au sein de la matrice de la roche, alors une expansion considérable peut se produire.

La dédolomitisation peut produire de l'expansion de manière directe ou indirecte, et, dans ces deux cas, elle est généralement un prérequis à d'autres processus d'expansion.

#### **II.1.4- Conclusion**

Les différents mécanismes de réaction proposés au cours des années illustrent bien la complexité de la réaction alcali-silice. Deux concepts opposent les chercheurs : pour la majorité, la réaction se déroulerait entièrement à l'intérieur des particules de granulats avec possibilité de migration ultérieure du gel, tandis que pour d'autres, elle débiterait à la surface des granulats pour se poursuivre dans la pâte.

Les mécanismes de gonflement sont tout aussi sujets à discussion. Pour la majorité des chercheurs, ce sont les gels une fois formés qui gonflent en absorbant l'eau, la formation même des gels expliquerait le gonflement du béton, les gels devenant « inoffensifs » une fois produits.

Concernant la réaction alcali-carbonate, lors de la dédolomitisation, les inclusions d'argile absorbent l'humidité et gonflent au sein de la matrice de la roche, ce qui entraîne une expansion considérable.

### **II.2-LES CONSEQUENCES DE L'ALCALI-REACTION**

#### **II.2.1- Introduction**

L'alcali-réaction a des conséquences divers et variés sur les ouvrages tel que l'apparition du gel, l'apparition des déformations et des déplacements importants, blocage des vannes d'évacuation des crues ou désaxage des turbines de production d'électricité dans le cas des barrages, la fissuration.

La fissuration apparaît comme un inconvénient majeur du béton, elle représente des voies de passage à tous les corps étrangers nuisibles, liquides ou gazeux, vers l'intérieur du béton en affectant la force, la rigidité, l'utilité, la sûreté et la stabilité des ouvrages car elle donne lieu à d'autres processus de détérioration tel que la corrosion des armatures qui est causée par la pénétration des ions chlorures. Ainsi, elle a un effet nuisible sur la résistance au gel-dégel du béton.

En plus, les risques économiques liés à ces dégradations sont également importants en terme de mise hors service d'ouvrages d'art, et les coûts engendrés par les réparations sont énormes. Outre les aspects visibles, l'alcali-réaction a des conséquences mécaniques sur le matériau et sur la structure.

#### **III.2.2- Conséquences mécaniques pour le matériau**

Le gel d'alcali-réaction possède la propriété d'être gonflant. Divers auteurs s'accordent, en simplifiant à l'extrême, qu'il exerce sur la matrice qui l'entoure des pressions locales qui ont

été estimées entre 3 et 10 MPa. De telles contraintes engendrent des désordres dans le matériau qui sont facilement observables au microscope optique ou au microscope électronique à balayage ; il s'agit de microfissurations autour des particules réactives ou de décollements à l'interface pâte de ciment-granulats.

La microfissuration qui se développe progressivement dans le matériau est la cause principale de la chute des caractéristiques mécaniques du matériau. Les expériences ont confirmé que la résistance à la traction du béton est la caractéristique mécanique la plus affectée, que le module d'élasticité subit une baisse significative et que, par contre, la résistance à la compression est peu affectée (tout au moins au début de la réaction).

### **II.2.3- Conséquences mécaniques pour la structure**

Le gonflement du matériau engendre à son tour des contraintes internes non négligeables au sein de la structure, contraintes qui viennent se superposer aux contraintes déjà existantes, et entraîne des surtensions dans les aciers passifs et actifs, ces derniers étant plus aptes à suivre la déformation du béton en raison de leur plus grande déformabilité. Il en résulte une expansion de la structure, ainsi qu'une création de fissures qui se produisent lorsque l'état de contraintes résultant des actions permanentes, des surcharges et du gonflement du matériau dépasse la résistance à la traction du béton. Il est ainsi possible d'observer des fissures dans des zones comprimées, et l'on constate généralement sur le parement de l'ouvrage un réseau de fissures plus ouvertes, ce qui s'explique probablement par un gonflement différentiel entre la peau et le cœur de la structure.

Il semble que lorsque l'expansion du béton se limite à 0,75 mm/m, la réaction alcali-silice n'entraîne pas de désordres significatifs, à condition que le béton soit correctement armé dans les trois directions. Par contre, lorsque l'expansion atteint jusqu'à 10 mm/m, ou lorsque la structure est insuffisamment armée, une pathologie sérieuse est à craindre.

### **II.2.4-Conclusion**

Les conséquences de l'alcali-réaction sont diverses, les plus préoccupantes sont le gonflement irréversible des ouvrages atteints qui entraîne la fissuration et la chute des caractéristiques mécaniques des bétons affectés. Ces phénomènes sont préoccupants pour les gestionnaires des structures atteintes car ils mettent en péril la sécurité des personnes et l'exploitation des ouvrages. De plus, il n'existe aucun moyen d'arrêter la réaction.



## **III-DEPISTAGE ET PREVENTION DE L'ALCALI- REACTION**

### **III.1-DEPISTAGE DE L'ALCALI- REACTION**

#### **III.1.1-Introduction**

Après examination de l'ensemble des ouvrages du réseau autoroutier du nord de la France, les ponts passant sous l'autoroute paraissent plus atteints que les ponts passant par-dessus de celle-ci ; et après examination de l'ensemble des ouvrages du réseau routier atteints par l'alcali-réaction, il apparaît que les parties les plus touchées sont les murs de soutènement et les murs en aile, les chevêtres de culée, ainsi que les piédroits des ponts-cadres et des portiques. Cependant, on observe que des parties plus importantes comme des dalles de tablier en béton armé, des poutres précontraintes et des piles d'appui intermédiaire sont aussi victimes de l'alcali-réaction.

Il ressort donc de cette analyse rapide que les ouvrages ou parties d'ouvrages en contact permanent avec les terres humides ainsi que les parties constamment arrosées par l'eau (en raison, par exemple, d'un défaut d'étanchéité des joints de chaussées) sont les plus dégradés par l'alcali-réaction, et l'on retrouve bien là le rôle prépondérant joué par l'eau dans le développement de la pathologie.

#### **III.1.2- Dépistage des ouvrages atteints d'alcali-réaction**

Le dépistage des ouvrages touchés par l'alcali-réaction se décompose en deux étapes :

- reconnaissance visuelle à l'échelle de l'ouvrage entier;
- reconnaissance visuelle à l'échelle microscopique/macrosopique.

##### ***III.1.2.1-Les symptômes visuels à l'échelle de l'ouvrage entier***

Cette étape repose sur l'examen visuel des ouvrages qui permet, à partir des défauts apparents constatés sur les ouvrages et de la connaissance des symptômes de l'alcali-réaction, d'effectuer un premier tri permettant de sélectionner les ouvrages susceptibles d'être atteints par l'alcali-réaction.

##### **▪ Fissuration en réseau et faïençage :**

La fissuration en réseau est le désordre le plus fréquemment rencontré sur les parements des structures atteintes par les alcali-réactions. La fissuration est généralement anarchique et peut prendre la forme d'un faïençage avec des mailles de petite dimension (20 à 50 mm) et une profondeur de fissure assez faible (quelques centimètres), ou prendre la forme d'un réseau de fissures de dimension plus grande (30 à 40 cm) et de profondeur plus importante (supérieure à 10 cm).

- **Fissuration orientée**

Le faïençage peut parfois laisser place à un réseau de fissures ayant une orientation préférentielle ; c'est le cas lorsque la fissuration reproduit le tracé des armatures ou se réunit à des fissures d'origine structurelle. Dans les quelques cas de structures précontraintes touchées par l'alcali-réaction, la fissuration peut s'orienter longitudinalement (suivant une direction non précontrainte), ou s'orienter suivant des fissures de diffusion dans la zone d'ancrage des câbles.

- **Mouvements, déformations**

L'expansion du béton consécutive à une alcali-réaction peut engendrer un gonflement de la structure. Dans le domaine des barrages, le gonflement d'ensemble peut être détecté par une élévation de la crête ou un blocage des vannes et des turbines.

Dans le domaine des ponts, il est possible d'observer sur certains ouvrages une fermeture des joints de dilatation avec une mise en butée de l'ouvrage, une flèche résiduelle importante ou des mouvements différentiels de parties d'ouvrage provoquant un rejet de certaines fissures. Ce décalage hors du plan des lèvres des fissures est certainement le symptôme le plus représentatif d'une alcali-réaction, car il traduit un gonflement différentiel entre deux zones d'une même partie d'un ouvrage.

- **Autres défauts**

Les fissures sont assez souvent soulignées par l'humidité, et l'on observe parfois un exsudat grisâtre au droit des fissures ou une décoloration du béton le long des fissures ; le parement apparaît alors comme tacheté.

Lorsque des granulats réactifs sont situés à proximité du parement, leur expansion peut provoquer l'expulsion d'une pastille conique de mortier, ce qui laisse alors un petit cratère (encore appelé *pop-out*) au fond duquel on aperçoit le granulats réactif.

Enfin, dans des cas extrêmes et heureusement rares comme les cas de structures insuffisamment ferrillées, il arrive que l'expansion du béton soit telle qu'elle réussisse à provoquer la rupture d'armatures passives.

### ***III.1.2.2- Les symptômes visuels à l'échelle microscopique/macrosopique***

La deuxième étape du dépistage consiste à prélever des carottes dans les ouvrages potentiellement atteints par l'alcali-réaction et détectés lors de la première étape, puis à

effectuer un certain nombre d'analyses pétrographiques et minéralogiques en laboratoire qui ont pour objectif d'identifier la présence de produits d'alcali-réaction.

Les principaux indices visibles à l'échelle microscopique/macrosopique sont :

- **Auréole de réaction**

La plupart des granulats présentent une auréole de réaction foncée à la périphérie des particules réactives lorsque la réaction est présente. L'identification de l'auréole de réaction peut parfois être difficile autour des granulats foncés.

- **Microfissuration**

Un autre indice révélateur de la réaction est le développement de microfissures à l'intérieur des particules réactives de granulats ainsi que dans la pâte de ciment. Puisque l'alcali-réaction est une réaction engendrant une expansion, les fissures ont tendance à se propager dans la pâte de ciment. La microfissuration n'est toutefois pas exclusive à l'alcali-réaction. Elle peut en effet avoir diverses origines, comme le retrait de séchage, les contraintes thermiques, l'effet des charges ou des contraintes appliquées, etc. Dans ces cas toutefois, les fissures traverseront très rarement les particules de granulats, les contournant plutôt.

- **Gel d'alcali réaction**

Le gel peut se concentrer dans divers espaces vides du béton, comme les fissures ou les bulles d'air, allant parfois jusqu'à les remplir complètement. Le gel peut également se retrouver à l'interface pâte/granat ou à l'intérieur même des particules réactives.

Une méthode de visualisation macroscopique des gels d'alcali réaction par fluorescence des ions uranyle a démontré un potentiel fort intéressant pour identifier la présence et la distribution de ces gels, son principe consiste à imprégner les échantillons de béton avec de l'acétate d'uranyle, à les éclairer sous lumière ultraviolette et à observer la fluorescence (intense et circonscrite dans les tons jaune-vert) des ions uranyle qui ont la propriété de se fixer sur les produits d'alcali-réaction amorphes.

Pour être complet, le diagnostic doit être confirmé par une observation au microscope électronique à balayage (MEB). La réaction se signale par la présence de zones craquelées, lisses, mamelonnées ou en rosettes, visibles le plus souvent au contact des granulats, et pouvant injecter parfois la pâte de ciment.

### **III.1.3- Problème du traitement des ouvrages**

Il n'existe pas actuellement de méthodologie de traitement qui soit suffisamment efficace pour réparer les ouvrages malades et même pour arrêter l'évolution des désordres.

Les tentatives suivantes ont tenté de traiter les ouvrages par la mise en œuvre de revêtements :

- L'application de peinture sur les ouvrages de génie civil constitue le moyen le plus simple de mettre en œuvre des revêtements. Ceux-ci ont alors une épaisseur assez faible (au maximum 2 à 300  $\mu\text{m}$ ), et leur efficacité pour lutter contre les effets de l'alcali-réaction est quasiment nulle.

- L'application d'un revêtement d'étanchéité avec généralement une épaisseur importante (quelques millimètres) constitue une autre mesure de protection. Jusqu'à présent, et faute de solution éprouvée de réparation, un seul pont a été traité de cette façon en France, à titre expérimental.

- Une autre méthode active de traitement consiste à libérer les contraintes en sciant tout ou une partie de la structure. Cette opération, déjà pratiquée avec succès par les Canadiens sur le barrage de Beauharnois dans la province de Québec, est actuellement prévue en France sur le barrage du Chambon.

- L'alcalinité de la solution des pores peut être réduite en injectant le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) ; en abaissant le PH de la solution des pores, le taux de l'alcali-réaction est ralenti, mais son introduction peut mener à une décomposition de la couche passive de l'acier, menant de ce fait à la corrosion.

### **III.1.4- Conclusion**

L'alcali-réaction peut se manifester par plusieurs symptômes soit à l'échelle de l'ouvrage entier tel que la fissuration, les exsudations de gel, les déformations et les décolorations soit à l'échelle microscopique telle que la microfissuration et l'existence d'une auréole entourant les particules réactives.

En revanche, il n'existe pas une solution pour arrêter la réaction, l'entretien et la réparation des ouvrages affectés sont très difficilement envisageables, ils se réduisent la plupart du temps à traiter les effets de la dégradation et à limiter les transferts hydriques entre le milieu extérieur et la structure.

## III.2-PREVENTION DE L'ALCALI-REACTION

### III.2.1- Introduction

L'absence de traitement efficace pour les ouvrages malades rend donc indispensable une démarche de prévention des désordres dus à l'alcali-réaction. Les ouvrages intéressés par ces recommandations sont les ouvrages neufs (à réaliser). Ce qui relève des ouvrages existants (diagnostic, pathologie et réparation) n'est pas de son domaine d'application.

### III.2.2-Démarche de la prévention de l'alcali-réaction

Le principe de cette démarche consiste à :

- 1) la détermination d'un niveau de prévention parmi 3 cas possibles, selon la catégorie de l'ouvrage et sa classe d'exposition(voir tableau III.1).
- 2) l'orientation vers la (ou les) solution(s) possible(s), en fonction du niveau de prévention retenu.

Le choix du niveau de prévention dépend du type d'environnement dans lequel se situe l'ouvrage et de la catégorie dont il relève:

- **la catégorie I** : regroupe les ouvrages intérieurs, secondaires ou ceux dont les parties détériorées sont facilement remplaçables ;
- **la catégorie II** : concerne la plupart des ouvrages du génie civil et du bâtiment, notamment les châteaux d'eau, réservoirs, cuves, bassins et cuvelages ;
- **la catégorie III** : est celle des grands ouvrages de prestige, tels que les barrages, ou pour lesquels la sécurité a une grande importance.

Le Tableau III.1 présente les trois niveaux de prévention retenus en fonction de la catégorie et de la classe d'exposition de l'ouvrage. A chaque niveau de prévention A, B ou C est associé le type de précaution suivant :

- **niveau A** : aucune précaution particulière ne s'impose vis-à-vis de l'alcali-réaction et les seules exigences sont les règles habituelles de construction ;
- **niveau B** : ce cas est le plus général car il intéresse la majorité des ouvrages de génie civil, dans ce cas six solutions sont théoriquement possibles; quatre d'entre elles sont adaptées à l'utilisation de granulats potentiellement réactifs, et il suffit que l'une de ces six solutions soit satisfaite pour se mettre à l'abri du risque ; à savoir :

- examen de la réactivité des granulats (étude du dossier granulats),
- établissement du bilan total des alcalins,
- Vérification de la satisfaction du béton à un critère de performance par essai de gonflement, dit "essai de performance de béton",
- examen de références d'emploi similaire (région, type d'utilisation),
- recherche des possibilités d'additions inhibitrices et de leur efficacité,
- examen des conditions particulières aux granulats PRP.

▪ **niveau C** : il est nécessaire d'utiliser des granulats non réactifs (NR) ou des granulats caractérisés comme potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP), sous réserve que des conditions particulières à leur emploi soient respectées.

Catégorie d'ouvrage	Classe d'environnement			
	1 sec ou peu humide	2 humide et eau	3 humide avec gel et fondant	4 milieu marin
<b>I</b> Risque faible -acceptable	A	A	A	A
<b>II</b> Risque peu tolérable	A	B	B	B
<b>III</b> Risque inacceptable	C	C	C	C

**Tableau III.1** : Détermination du niveau de prévention en fonction de la catégorie d'ouvrage et de son exposition.

### III.2.3- Limitation de la teneur en alcalins des bétons

La limitation de la teneur en alcalins du béton constitue une solution rapide et positive, en particulier dans le cas où l'on utilise des granulats potentiellement réactifs. Il faut alors prendre en compte toutes les sources possibles d'alcalins actifs, c'est-à-dire les alcalins provenant du ciment, des granulats, des adjuvants éventuels et de l'eau, et susceptibles de passer en solution pour participer à l'attaque de la silice des granulats.

Les recommandations présentent la méthode d'évaluation des alcalins actifs du ciment, ainsi que celle relative aux granulats sur la base d'un mode opératoire nécessitant un appareillage

spécifique, elles fixent des seuils sur les teneurs en alcalins. Dans le cas où ces données sont inconnues, les recommandations demandent que la teneur moyenne en alcalins du béton soit inférieure à  $3 \text{ kg/m}^3$  et que la teneur maximale soit limitée à  $3,3 \text{ kg/m}^3$ .

Pour l'évaluation de la teneur des alcalins d'un ciment, on utilise la notion d'alcalins équivalents ( $\text{Na}_2\text{O}$  équivalent) :

$$\% \text{Na}_2\text{O équivalent} = \% \text{Na}_2\text{O} + 0.658 \% \text{K}_2\text{O}$$

Où 0.658 correspond au rapport des masses molaires  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ .

La teneur en alcalins du béton est calculée par la formule suivante :

$$\text{Contenu du ciment} \times \% \text{Na}_2\text{O équivalent}$$

### III.2.4- L'ajout des additions minérales

La meilleure méthode pour réduire le risque d'expansion causée par la réaction alcali-silice dans le béton est de remplacer une partie du ciment Portland par un ajout cimentaire. Les cendres volantes à faible teneur en chaux, le laitier hydraulique cimentaire, les fumées de silice, l'argile broyé, le méta-kaolin et la pouzzolane naturelle utilisés en proportions adéquates se sont avérés être des solutions efficaces pour contrer la réaction alcalis-silice.

Aussi, l'ajout de fibres métalliques permet de limiter sensiblement l'ouverture des fissures et donc l'expansion générée par la réaction, il ne permet pas en revanche de limiter la réaction elle-même.

L'ajout de polymère (résine époxy) dans le mélange permet de réduire l'expansion observée. Cela serait dû selon les auteurs de l'étude à la réduction de la quantité de portlandite disponible (et donc le réservoir d'ions calcium) et à l'établissement d'une barrière entre les alcalins et les granulats réactifs. Une dernière méthode consiste à incorporer des ions lithium dans le béton pour prévenir toute expansion.

Dans le cas des réactions alcalis-carbonate, ni l'emploi de ciment à faible teneur en alcalis, ni l'utilisation d'ajouts cimentaires ne sont efficaces pour prévenir une expansion nuisible.

### **III.2.5- Conclusion**

Cependant, concernant les ouvrages qui sont en contact permanent avec l'eau, des liquides ou un environnement humide, il est conseillé d'adopter une démarche préventive.

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

Dans certains cas où l'on est en présence de granulats potentiellement réactifs, il serait tout à fait déraisonnable d'aller chercher du granulat non réactif alors que l'on a d'autres moyens de prévention.



## **IV-LES MODELISATIONS DE L'ALCALI-REACTION**

### **IV.1-INTRODUCTION**

Les principaux mécanismes de cette réaction ont été mis en évidence mais le nombre des phénomènes et des couplages mis en jeu rend les approches de la modélisation difficiles et diverses. On peut distinguer deux types d'approches de la réaction, une approche locale par les phénomènes physico-chimiques mésoscopiques de la réaction alcali-silice, et une approche par les phénomènes structuraux au sens large.

Dans un premier temps, nous allons donc nous intéresser aux modèles dits mésoscopiques dans lesquels les mécanismes réactionnels sont décrits et qui prennent en compte les phénomènes de transport des différentes espèces chimiques et les cinétiques de réaction afin de reproduire la courbe de gonflement libre du matériau. Certains de ces modèles tentent ensuite d'évaluer les propriétés mécaniques du matériau.

Puis, nous étudierons les modèles macroscopiques dans lesquels les mécanismes réactionnels sont simplifiés, voire inexistant, et qui prennent en compte un gonflement global à l'échelle de la structure.

### **IV.2. LES MODELES MESOSCOPIQUES**

#### **IV.2.1. Le modèle de Sellier**

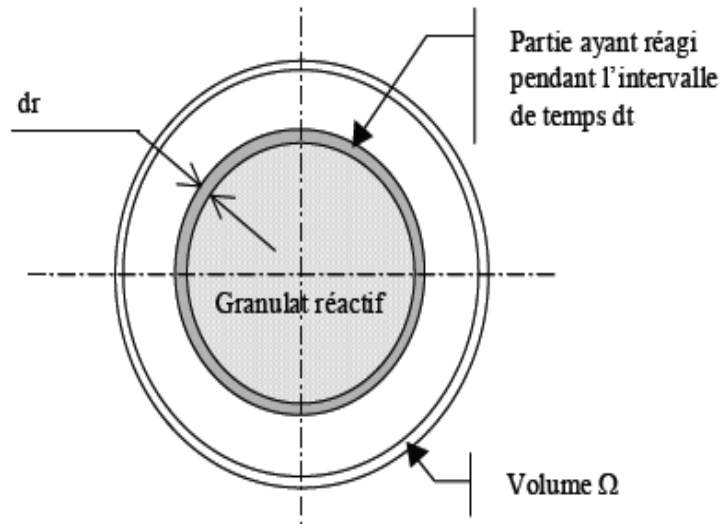
La modélisation de Sellier [Sellier, 1995] se décompose en deux parties :

- une modélisation des mécanismes de réaction ;
- une description des effets mécaniques induits par le gonflement du gel.

Ces deux parties utilisent des notions probabilistes.

Les différentes hypothèses sont les suivantes :

- Les granulats sont supposés sphériques, homogènes et tous de même diamètre ;
- Les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  sont supposés avoir le même effet, ils sont confondus dans le modèle ;
- L'attaque est uniforme sur la surface des granulats.



**Fig.IV.1:**représentation graphique du modèle de Sellier [SEL-1995].

Le modèle prend en compte la concentration moyenne probable autour du granulat réactif. Elle est définie comme suit pour une espèce ionique quelconque X (voir Figure. IV.1) :

$$\bar{C}_x(r, t) = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} C_x(M, t) d\Omega \quad (\text{IV.1})$$

Le réseau siliceux contenu dans le granulat réactif est attaqué de manière surfacique par les ions hydroxyles avec une vitesse  $V_{eq}$ . La réaction mobilise pendant un intervalle de temps  $dt$  la silice réactive dans le granulat sur une épaisseur  $dr$  :

$$dr = V_{eq} \cdot dt \quad (\text{IV.2})$$

La vitesse d'attaque varie en fonction de la température au moyen d'une loi d'Arrhenius. La silice se combine avec les alcalins pour former un gel qui peut s'imbiber et entraîner des gonflements. La consommation des alcalins et des ions hydroxyles entraîne un déséquilibre de concentrations. La diffusion des alcalins et des ions hydroxyles vers le granulat réactif est décrite par les lois de Fick :

$$\frac{\partial \bar{C}_x}{\partial t}(r, t) = -div[-D_x \overrightarrow{grad}(\bar{C}_x)] + S(X) \quad (\text{IV.3})$$

Le terme de source S(X) représente une variation homogène de concentration en espèce X.

Le gel se forme au voisinage du granulat réactif, il peut ensuite migrer dans la porosité connectée de la pâte de ciment entourant le granulat. La pression générée est supposée ouvrir et propager des fissures en mode I. Les fissures créées constituent un nouveau vase d'expansion pour le gel. L'auteur a modélisé la distribution poreuse par une distribution statistique log-normale qu'il a calée d'après des valeurs expérimentales. Cela lui permet de relier la pression  $p_g$  dans le gel au rayon  $r_p$  des pores concernés.

$$P_g = \frac{E_g}{3} \left[ 1 - \frac{V_v}{V_{gel}} \phi \left( \frac{-\ln(2\sigma \cos \theta / P_g) - \overline{\ln}(r_p)}{\overline{\overline{\ln}}(r_p)} \right) \right] + \frac{V_{gf}}{V_v} \quad (IV.4)$$

- $E_g$  est le module d'Young du gel ;
- $2\sigma \cos(\theta)$  représente la tension superficielle du gel ;
- $V_{gel}$  est le volume de gel à la pression atmosphérique déterminé précédemment ;
- $V_v$  est le volume des vides connectés au site réactif ;
- $\phi$  est la fonction de répartition de la distribution gaussienne ;
- $\overline{\ln}(r_p)$  et  $\overline{\overline{\ln}}(r_p)$  sont respectivement la moyenne et l'écart type de la distribution log-normale de la porosité ;
- $V_{gf}$  est le volume de gel contenu dans la fissure ouverte par la pression  $p_g$ .

Le volume de gel contenu dans la fissure est calculé en supposant un remplissage partiel de la fissure :

$$V_f = \frac{K_I(k+1)}{\mu} \sqrt{2\pi} \left[ \frac{2}{3} a_f (a_f - r_i)^{1,5} - \frac{2}{5} (a_f - r_i)^{2,5} \right] \quad (IV.5)$$

- $V_f$  est le volume de la fissure ;
- $k$  et  $\mu$  sont les caractéristiques mécaniques du béton ;
- $a_f$  est le rayon de la fissure supposée circulaire et plane ;
- $r_i$  est le rayon du granulat réactif ;
- $K_I$  est le facteur d'intensité de contrainte. Il est calculé comme suit :

$$K_1 = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{\pi a_f}{\cos\left(\frac{\pi a_f}{l_{vb}}\right)} \left( P_g \arcsin \left[ \frac{A}{a_f} \right] + \sigma_c \right)^+} \quad (\text{IV.6})$$

- $A$  est le rayon de pénétration du gel dans la fissure ;
- $\sigma_c$  est la pression isotrope de confinement (due au chargement mécanique extérieur) ;
- $l_{vb}$  est la longueur caractéristique de l'élément étudié ;
- $p_g$  est la pression dans le gel.

Le facteur d'intensité de contrainte prend en compte le remplissage partiel des fissures par le gel, l'influence du confinement engendré par les efforts extérieurs et l'effet d'échelle (par l'intermédiaire de la longueur caractéristique  $l_{vb}$ ).

L'expansion générée par la réaction alcali-silice est directement reliée au volume des fissures créées.

$$\varepsilon_{ras} \approx \frac{V_f}{3V_e} \quad (\text{IV.7})$$

- $V_f$  est le volume total de fissures créées ;
- $V_e$  correspond au volume élémentaire de béton étudié.

Cette modélisation est une tentative de description probabiliste complète des mécanismes gouvernant la réaction alcali-silice. Elle décrit l'ensemble des mécanismes réactionnels locaux par une cinétique locale de réaction dans le granulat réactif. Le volume de gel formé au cours du temps, est relié à l'expansion totale du béton par l'intermédiaire de la mécanique linéaire de la rupture. Tous les paramètres utilisés ont une signification physique (sauf la cinétique de réaction  $V_{eq}$ , qui est un paramètre de calage). Ce modèle permet de mettre en évidence l'importance de la diffusion dans la cinétique globale de la réaction alcali-silice. Cependant, il ne considère qu'une seule taille de granulats réactifs. Il ne peut donc a priori être utilisé pour la description du gonflement des mortiers ou de bétons pour lesquels les granulats réactifs sont présents suivant plusieurs classes granulaires.

#### IV.2.2. Le modèle de Uomoto et Furusawa

Le modèle proposé par Uomoto et al. [UOM-1992] puis par Furusawa et al. [FUR-1994] permet de prédire la cinétique et l'amplitude des gonflements engendrés par la réaction alcali-silice. Les mécanismes réactionnels retenus pour ce modèle sont :

- Diffusion des alcalins dans les granulats réactifs ;

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

Les différentes hypothèses constitutives du modèle sont :

- Les granulats sont sphériques et entièrement constitués de silice réactive ;
- Il existe une zone poreuse entourant les granulats dans laquelle les produits se forment;
- La couche de gel entourant les granulats est fine devant le diamètre des granulats et son épaisseur est uniforme ;
- La diffusion des espèces dans les granulats est l'étape limitante du processus.

Grâce à la dernière hypothèse, la cinétique globale de la réaction alcali-silice est donc égale à la cinétique de diffusion, cette dernière est décrite de manière simplifiée :

$$\frac{dx_i}{dt}(C,t) = k \frac{C}{x_i(C,t)} \quad (\text{IV.8})$$

- $X_i$  est l'épaisseur de la couche de produits ;
- $k$  est le coefficient de diffusion apparent des alcalins dans le granulat ;
- $C$  est la concentration en ions  $\text{OH}^-$  à l'interface granulat - matrice.

Le modèle permet de prendre en compte l'influence de la température par l'intermédiaire de la variation du coefficient de diffusion apparent  $k$  dans les granulats réactifs. L'épaisseur de la couche de produits formés autour du granulat  $X_i$  est alors égale à :

$$x_i(C,t) = \sqrt{2kCt} \quad (\text{IV.9})$$

Pour le granulat  $i$  ( $\alpha_i$ ) est défini comme étant le pourcentage volumique du granulat ayant été dissous ( $R_i$  est le rayon équivalent du granulat réactif  $i$ ) :

$$\alpha_i = 1 - \left(1 - \frac{x_i}{R_i}\right)^3 \quad (\text{IV.10})$$

Le volume  $P_i$  de produits formés correspondant au granulat  $i$  est donc :

$$P_i(t) = \alpha_i \beta_i \frac{M_a}{\rho_{\text{SiO}_2}} \quad (\text{IV.11})$$

- $M_a$  est la masse totale de granulats réactifs dans le mortier ou le béton ;

- $\rho_{SiO_2}$  est la masse molaire de la silice réactive ( $SiO_2$ ), elle est égale à 60,08 g/mol ;
- $\beta_i$  est la fraction volumique de granulats de rayon équivalent  $R_i$ ;

La concentration en alcalins  $C$  au voisinage des granulats diminue en fonction de la consommation des ions par la réaction. Ceci est pris en compte par l'intermédiaire de l'équation suivante :

$$C(t) = \frac{1}{W_f} (C_{ini} - C_{surf} - P_t RS) \quad (IV.12)$$

- $W_f$  est la quantité d'eau libre dans le mortier ;
- $C_{ini}$  est la concentration initiale en alcalins par unité de volume de mortier ;
- $RS$  est le rapport molaire alcalins/silice dans les produits de réaction;
- $C_{surf}$  est la concentration absorbée par tous les granulats réactifs par unité de volume de mortier. Elle est calculée comme suit :

$$C_{surf} = 3C_{unit} V_a \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{R_i} \quad (IV.13)$$

- $V_a$  est le volume total des granulats réactifs par unité de volume de mortier ;
- $C_{unit}$  représente la concentration consommée par les granulats réactifs par unité de surface extérieure. Ce paramètre est constant quelle que soit la taille des granulats réactifs.

Le volume total de produits formés est égal à la somme des volumes produits par chaque granulat réactif :

$$P_t = \frac{V_a \rho_a}{\rho_{SiO_2}} \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i \quad (II.19)$$

- $\rho_a$  et  $\rho_{SiO_2}$  sont respectivement la masse volumique des granulats et la masse molaire de la silice.

L'expansion générée par la réaction alcali-silice est estimée au moyen de la relation suivante :

$$\varepsilon(t) = B(P_t - P_{abs}) \quad (IV.14)$$

- $B$  est une constante qui relie l'expansion au volume de produits formés;
- $P_{abs}$  représente le volume de produits nécessaire pour combler la porosité connectée aux granulats réactifs.

Toutes les équations précédentes sont résolues à chaque pas de calcul par un processus itératif à partir des résultats du pas précédent. Le modèle est alors capable de calculer entre autres l'avancement pour chaque granulats réactif et l'expansion totale du mortier étudié.

Le modèle U.F.O. est basé sur la diffusion des alcalins dans les granulats réactifs, il permet de prendre en compte l'influence de la température. Il permet de mettre en évidence l'importance de la diffusion dans les granulats et il permet de retrouver numériquement les effets de pessimisme sur la taille et sur la quantité des granulats réactifs.

Il a été écrit de manière à prendre en compte l'interaction entre les différents granulats réactifs sur la consommation des alcalins par l'intermédiaire du terme  $C_{surf}$ . Malheureusement, il n'a été appliqué que pour une seule classe granulaire. De plus, les hypothèses et les processus considérés sont assez simplifiés et cette modélisation comporte beaucoup de paramètres de calage ce qui réduit sa portée prédictive.

#### **IV.2.3. Le modèle de Bažant et Steffens**

Le modèle proposé par Bažant et Steffens [BAŽ-2000] s'applique aux bétons incorporant des granulats de verre broyé. Ces derniers sont constitués de silice amorphe, le béton ainsi formulé est fortement susceptible de voir se développer la réaction alcali-silice.

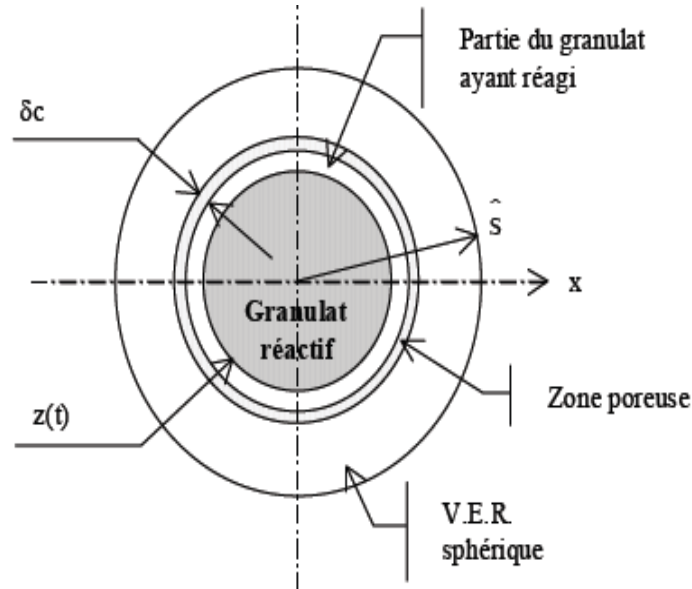
Les hypothèses retenues pour ce modèle sont :

- les granulats sont des particules sphériques entièrement réactives ;
- les auteurs se ramènent à l'étude d'un volume élémentaire représentatif (V.E.R.) sphérique dont les dimensions sont déterminées d'après la proportion de granulats dans le béton ;
- la dissolution de la silice réactive progresse de manière uniforme dans une direction radiale depuis la surface du granulats réactif ;
- les agrégats sont statistiquement distribués uniformément dans la matrice du béton ;
- deux molécules d'eau sont nécessaires pour dissoudre un atome de silice.

Les mécanismes réactionnels retenus sont les suivants :

- Diffusion des espèces réactives vers le granulats de verre ;
- Dissolution de la silice réactive et réaction avec les ions ;

- Formation d'un « gel sec » autour du granulat ;
- Imbibition du gel et expansion ;
- Apport d'eau vers le site de réaction par macro-diffusion.



**Fig.IV.2:** modèle proposé par Bažant et Steffens [BAŽ-2000]

La diffusion des espèces à travers la couche de gel est supposée être l'étape la plus lente de l'ensemble des processus composant la réaction alcali-silice. Les auteurs jugent la diffusion simultanée des ions trop difficile à décrire (prise en compte des potentiels électriques). Ce mécanisme est donc modélisé de manière simplifiée par la diffusion de l'eau en régime permanent à travers la couche de gel formé.

$$\xi_w(x, t) = W_s \frac{1 - z(t)/x}{1 - 2z(t)/D} \quad (\text{IV. 15})$$

- $\xi_w$  et  $W_s$  sont respectivement les concentrations en eau dans la couche de produits formés et dans le béton autour du granulat réactif ;
- $z(t)$  et  $D$  sont respectivement le rayon de la partie inaltérée du granulat et le diamètre initial du granulat ;



Les auteurs supposent qu'il faut deux molécules d'eau pour dissoudre une molécule de silice. La concentration massique ( $\xi_g$  en kg de gel par m<sup>3</sup> de béton) en gel formé dans le V.E.R. est alors :

$$\xi_g = \frac{8\rho_s}{\delta^3} \left[ \frac{D^3}{8} - z^3 \right] \frac{m_g}{m_s} \quad (\text{IV. 16})$$

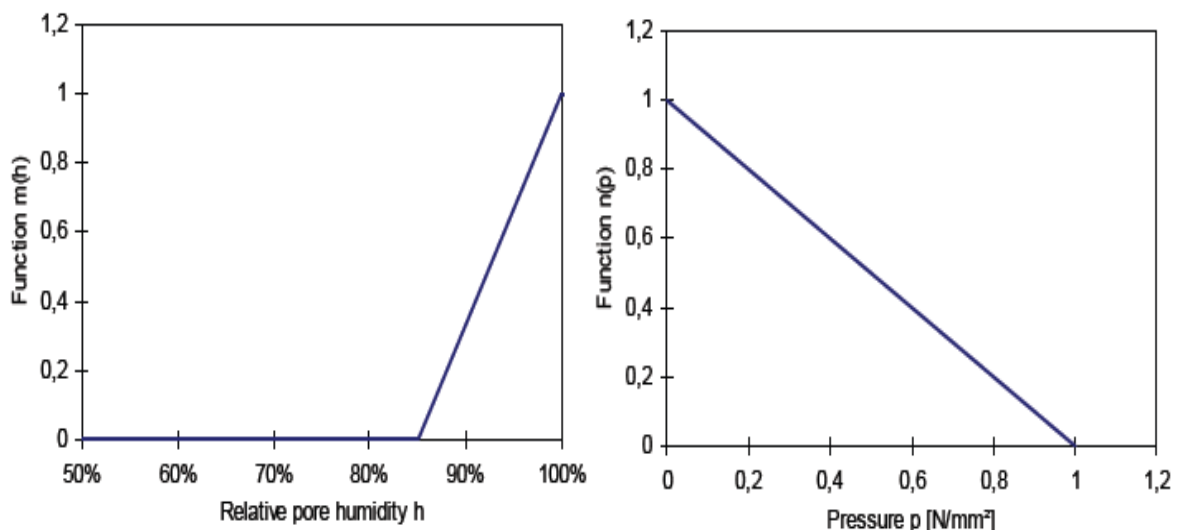
•  $m_g$  et  $m_s$  sont respectivement les masses molaires du gel et de la silice.

Le produit formé est un solide (gel basique sec) qui possède la capacité de combiner de l'eau pour former un fluide dont le volume augmente en fonction de la quantité d'eau qu'il absorbe. La pression générée par le gel limite la quantité d'eau qu'il absorbe. De la même façon l'imbibition ne peut se produire que lorsque l'humidité relative dans les pores est supérieure à un seuil. L'ensemble de ces phénomènes est décrit de manière simplifiée au moyen de l'équation suivante :

$$\dot{w}_i = \frac{n(p)m(h)\xi_g - w_i}{\delta_c^2 / C_{w_i}} \quad (\text{IV. 17})$$

- $w_i$  est la masse d'eau absorbée par le gel basique ;
- $\delta_c$  est l'épaisseur de la zone poreuse entourant le granulat ;
- $C_{w_i}$  est la diffusivité de l'eau dans le gel ;

Les fonctions  $m(h)$  et  $n(p)$  représentent respectivement l'influence de l'humidité relative dans les pores et de la pression sur l'imbibition du gel basique (voir Figure IV.3).



**Fig.IV.3:** Influence de l'humidité relative dans les pores et de la pression sur l'imbibition du gel basique d'après [BAŽ-2000]

Le transport d'eau à travers le béton vers le granulat réactif est décrit grâce aux lois de Fick :

$$\dot{h} = k(h) \operatorname{div}[-a(h) \operatorname{grad}(h)] - \dot{h}_s(t_e) - k(h)(\dot{w}_g + \dot{w}_i) \quad (\text{IV. 18})$$

- $k(h)$  est l'inverse de la pente de la courbe de sorption du matériau étudié ;
- $a(h)$  représente l'évolution de la diffusivité de l'eau ;
- $\dot{h}_s(t_e)$  représente la perte d'eau due à l'auto-dessiccation ;
- $\dot{w}_g$  et  $\dot{w}_i$  représentent respectivement la consommation d'eau correspondant à la formation du gel basique et à son imbibition.

Ce modèle permet de mettre en évidence l'importance du diamètre des granulats réactifs sur la cinétique et l'amplitude du gonflement engendré par la réaction alcali-silice. Cependant, le modèle fait intervenir de nombreuses simplifications (prise en compte simplifiée de la cinétique locale, solution approchée de l'équation de diffusion de l'eau à travers la couche de produits de réaction...). De nombreuses hypothèses avancées concernant les mécanismes réactionnels ne peuvent pas être vérifiées (influence de la pression et de l'humidité relative sur l'imbibition...). De plus, le modèle ne peut prendre en compte qu'une seule classe granulaire. Les interactions entre granulats réactifs de différentes tailles ne peuvent pas être reproduites.

#### IV.2.4. Le modèle de Xi

Cette modélisation [XI-1999] est inspirée du modèle U.F.O. (voir précédemment), elle est basée sur une description hétérogène biphasique du béton (granulats et matrice cimentaire). Le modèle s'applique sur une sphère de pâte de ciment entourant un granulat sphérique placé en son centre. Granulats et pâte de ciment sont isotropes et homogènes.

Les mécanismes réactionnels sont les mêmes que pour le modèle U.F.O. plus la perméation du gel dans la porosité connectée sous l'effet de la pression générée.

La diffusion des ions dans un granulat réactif de rayon  $R_i$  est décrite par la seconde loi de Fick. Cette équation est résolue de manière analytique en supposant que la concentration est nulle au centre du granulat et qu'elle est constante et égale à  $C_0$  à l'interface matrice/granulat ;

$$C_x(r, t) = C_0 + 2 \frac{R_i C_0}{\pi r} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{n} \exp\left[-\frac{D_x n^2 \pi^2 t}{B_x R_i^2}\right] \sin\left[n\pi \frac{r}{R_i}\right] \quad (\text{IV. 19})$$

•  $D_x$  et  $B_x$  sont les termes de l'équation de diffusion.

L'équation (IV.20) nous donne la profondeur  $x(t)$  sur laquelle la réaction a progressé dans le granulat et donc le volume de gel  $V_R^i$  formé par tous les granulats de rayon  $R_i$ .

$$V_{gel}^i = \eta V_R^i \quad (IV.20)$$

•  $\eta$  représente l'augmentation de volume correspondant à la précipitation du gel. C'est un paramètre de calage qui peut ne pas être constant.

Une fois créé le gel se déplace dans le volume poreux entourant les granulats sous l'effet de la pression qu'il génère. Ce phénomène est décrit en supposant une relation linéaire entre la pression et la concentration en gel par l'intermédiaire de l'équation suivante ( $\beta$  est un paramètre) :

$$\frac{\partial C_{gel}}{\partial t} = \nabla \left[ \frac{K_{gel}}{\eta_{gel}} \nabla (\beta C_{gel}) \right] \quad (IV.21)$$

La solution analytique de cette équation est la suivante :

$$C_{gel}(r, t) = \frac{2\beta}{r(R_{if} - R_i)} \sum_{n=1}^{+\infty} \exp \left[ - \frac{K_{gel} n^2 \pi^2 t}{\eta_{gel} (R_{if} - R_i)^2} \right] \sin \left[ n\pi \frac{r - R_i}{R_{if} - R_i} \right] \Omega(n, p) \quad (IV.22)$$

$$\Omega(n, p) = -n\pi \frac{K_{gel} R_i}{\eta_{gel} (R_i - R_{if})} \int_0^t P(\lambda) \exp \left[ \frac{K_{gel} n^2 \pi^2 \lambda}{\eta_{gel} (R_i - R_{if})^2} \right] d\lambda \quad (IV.23)$$

Les valeurs de  $C_{gel}(t)$  et de  $P(t)$  sont obtenues par une méthode incrémentale. Le volume de gel contenu dans la zone poreuse entourant tous les granulats de rayon équivalent  $R_i$  est alors :

$$V_{pg}^i = V_a \phi_i \int_{R_i}^{R_{if}} 4\pi r^2 C_{gel}(r, t) dr \quad (IV.24)$$

L'expansion correspondante des granulats de rayon équivalent  $R_i$  est :

$$\varepsilon_i = \frac{V_{gel}^i - V_{pg}^i}{\phi_i V_a} \quad (IV.25)$$

L'expansion totale du matériau  $\varepsilon(t)$  est calculée à partir des expansions  $\varepsilon_i(t)$  générées par les différentes classes granulaires par l'intermédiaire d'une analogie thermique. L'augmentation de volume des granulats est assimilée à une dilatation thermique. Pour cela l'auteur utilise le modèle composite [XI-1997]. Ce dernier donne l'expansion du béton en fonction de l'expansion et des caractéristiques mécaniques des granulats et de la matrice en supposant que le matériau est élastique. Dans le cas de la réaction alcali-silice, l'expansion s'écrit :

$$\varepsilon(t) = \frac{K_a V_a (3K_m + 4G_m)}{K_m (3K_a + 4G_m) - 4V_a G_m (K_m - K_a)} \sum_{i=1}^n \phi_i \varepsilon_i(t) \quad (\text{IV.26})$$

- $V_a$  est la fraction volumique des granulats dans le béton ;
- $K_a$ ,  $K_m$  et  $G_m$  sont respectivement les modules élastiques et les modules de cisaillement des granulats et de la matrice.

Ce modèle est basé sur la description des phénomènes physiques qui sont supposés gouverner la réaction alcali-silice. Toutes les équations constitutives sont résolues de manière analytique au moyen d'hypothèses fortes qui doivent être remises en cause. Par exemple, la concentration à l'interface granulat/matrice ne peut pas être considérée comme constante au cours du temps.

De plus, il y a de nombreux paramètres de calage dont la valeur peut être ajustée pour retrouver des résultats expérimentaux, par exemple, le paramètre  $\beta$  qui relie la pression et la concentration en gel ou  $\eta$  reliant le volume de granulat ayant réagi et le volume de gel créé peuvent varier au cours du temps...

Ce modèle a été écrit de manière à prendre en compte la présence simultanée de plusieurs granulats réactifs dans un béton, mais il n'existe aucune interaction entre eux sur la consommation des ions (la concentration à l'interface reste constante). De plus, aucune application n'a été menée avec plus d'un granulat réactif.

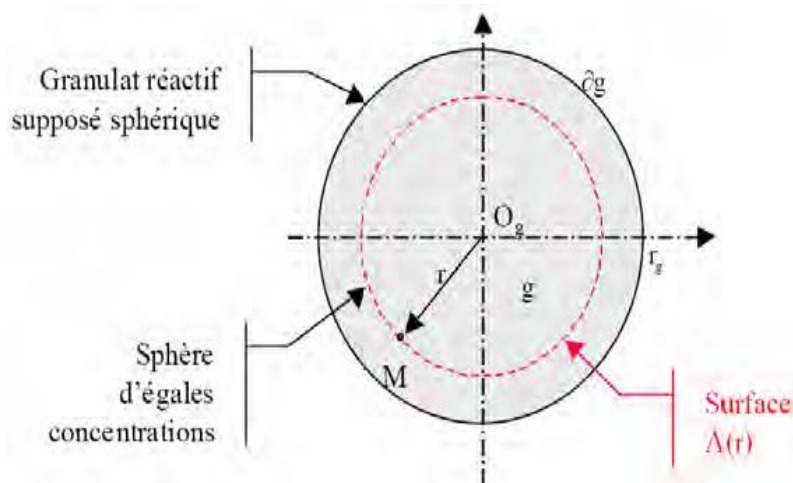
#### **IV.2.5. Le modèle de Poyet**

Ce modèle [Poyet, 2003] est une évolution de la version développée par Sellier. Il a pour but la prédiction de la cinétique et de l'amplitude du gonflement engendré par la réaction alcali-silice dans le béton.

Les ions présents dans la matrice cimentaire comme les alcalins, les hydroxyles et les ions calciums pénètrent dans les granulats réactifs par diffusion. Le réseau siliceux est alors attaqué par les ions hydroxyles. Les charges négatives engendrées sont équilibrées par les alcalins et les ions calciums pour former des produits silico-alcalins ou silico-calciques. Ces produits se forment dans une zone de porosité connectée au voisinage des granulats réactifs. Lorsque le volume des produits formés devient plus important que le volume poreux entourant les granulats, la matrice cimentaire est alors mise sous pression et le béton gonfle [Sellier, 1999]. La cause du gonflement retenue par Poyet est donc la précipitation des produits de la réaction. A ces différents mécanismes réactionnels locaux s'ajoutent les phénomènes de diffusion des ions dans la matrice vers les sites réactifs et la dissolution de la portlandite pour maintenir le niveau d'ions calciums en solution.

Dans cette modélisation, l'étape limitante en temps est la diffusion des ions tandis que tous les autres mécanismes sont considérés comme instantanés.

Les granulats sont considérés comme sphériques, homogènes et isotropes. Ils sont uniformément répartis dans le béton. La réaction est elle aussi considérée comme isotrope et on suppose qu'elle se produit de façon uniforme sur toute la surface des granulats réactifs (Fig. IV.4).



**Fig.IV.4:** Représentation d'un granulat réactif supposé sphérique.

On a alors une symétrie sphérique à la fois à l'intérieur des granulats mais aussi en dehors.

Les zones d'égales concentrations sont donc des sphères de rayon  $r$  et de centre  $O_g$ . On passe alors d'une concentration locale réelle  $X$  à une concentration homogénéisée  $\bar{X}_g(r)$  qui a pour expression (IV.27) :

$$\bar{X}_g(r) = \frac{1}{4\pi r^2} \int_{A(r)} X(M) dA \quad (\text{IV.27})$$

L'équation de conservation de la masse dans le granulat s'écrit:

$$\int_{A(r)} \frac{\partial}{\partial t} (p S_r X) dV = - \int_{A(r)} \text{div}[-D_g^x \overrightarrow{\text{grad}}(X)] dV + \int_{A(r)} S(X) dV \quad (\text{IV.28. a})$$

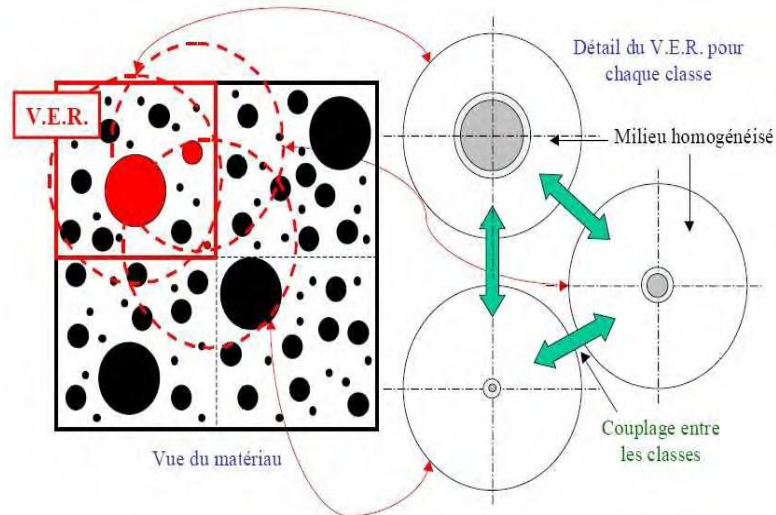
Ou encore

$$\int_{A(r)} \frac{\partial}{\partial t} (\bar{p}_g \bar{S}_{rg} \bar{X}_g) = - \text{div}[-\bar{D}_g^x \overrightarrow{\text{grad}}(\bar{X}_g)] + \bar{S}_g(X) \quad (\text{IV.28.b})$$

Avec  $\bar{D}_g^x$  le coefficient de diffusion de l'espèce X dans le granulat et  $\bar{S}_g$  un terme source.

### ***Définition d'un volume élémentaire représentatif***

Le volume élémentaire représentatif (V.E.R.) est sphérique et contient différentes classes granulaires réactives. Le V.E.R. peut être représenté sous la forme suivante (Fig. IV.5) en focalisant sa représentation sur une classe granulaire donnée. Sur cette figure, un exemple est donné pour trois classes granulaires.



**Fig.IV.5:** Exemple de V.E.R. pour trois granulats, visualisation des trois focalisations

Le rayon du V.E.R. est défini comme tel:

$$R_{VER} = \max(R_{VER}^i) = \max\left(\frac{R_i}{\sqrt[3]{\phi_i \xi_g}}\right) \quad (IV.29)$$

Avec

- $R_{VER}$  le rayon du volume élémentaire représentatif pour la classe granulaire  $i$ ,
- $\phi_i$  la fraction volumique de la classe  $i$ ,
- $\xi_g$  la concentration volumique de granulats dans le béton,
- $R_i$  le rayon moyen des granulats de classe  $i$ .

Si on se focalise sur une seule classe granulaire  $i$  alors le V.E.R. sphérique sera centré sur un granulats de la classe  $i$  et le milieu homogénéisé autour sera composé de la pâte de ciment durcie et de tous les autres granulats réactifs (ceux de la classe  $i$  et ceux des autres classes).Chacune des focalisations du V.E.R. est maillée par des éléments sphériques concentriques.

Pour chaque espèce ionique considérée, l'équation globale de diffusion (IV.28.b) est appliquée sur les volumes élémentaires représentatifs de chaque classe granulaire  $i$ . Cette équation est posée pour le domaine correspondant au granulats avec des conditions limites en  $r=0$  et en  $r_i=R$ , c'est-à-dire au centre et au bord de l'agrégat, et pour le domaine correspondant à la pâte de mortier avec des conditions limites en  $r_i=R$  et en  $r_{VER}^i=R$ , c'est-à-dire au bord de l'agrégat et au bord du volume élémentaire représentatif de la classe  $i$ .

Le nombre de granulats réactifs sphériques  $N_i^g$  pour chaque classe  $i$  dans le béton est donné par (IV. 30) :

$$N_i^g = \frac{3\xi_g \phi_i}{4\pi R_i^3} \quad (IV. 30)$$

Le nombre de granulats réactifs de chaque classe granulaire dans le V.E.R. est alors (IV. 31) :

$$n_g^i = \frac{N_i^g}{\min(N_i^g)} \quad (IV. 31)$$

- **Détermination du terme source dans les granulats réactifs**

A l'intérieur d'un granulat réactif de la classe  $i$ , le terme source  $\bar{S}_i(X)$  correspond à la diminution de concentration engendrée par la consommation des ions  $X$  par la réaction alcali silice.

Tous les ions qui pénètrent dans le granulat sont supposés réagir instantanément avec la silice réactive donc tant qu'il reste de la silice le terme de source est directement relié au flux dans le granulat et s'exprime ainsi:

$$\bar{S}_i(X) = -div[\bar{D}_i^g(X) \frac{\partial X_i}{\partial r}(r)] \quad (IV. 32)$$

Avec  $\bar{D}_i^g(X)$  le coefficient de diffusion des ions  $X$  dans le granulat  $i$ .

En dehors du granulat réactif, le terme source correspond à la baisse de concentration engendrée par la consommation des ions  $X$  par tous les autres granulats réactifs présents dans le volume élémentaire représentatif. En effet, les ions consommés par les autres granulats ne sont plus disponibles pour diffuser et réagir avec le granulat considéré  $i$ .

Le terme de source s'écrit:

$$\bar{S}_i(X) = -\frac{1}{V_{VER} - V_i^g} \left[ \lambda_i^i(r) C_i^i(X) + \sum_{j \neq i} \lambda_i^j C_i^j(X) \right] \quad (IV. 33)$$

Avec  $\lambda_i^j(r)$  une fonction de pondération qui tient compte de la probabilité de présence d'un granulat de la classe  $j$  à la distance  $r$  du centre du granulat de la classe  $i$ .

- **Diffusion des alcalins dans les granulats réactifs**

Le transport des alcalins dans les granulats réactifs est défini par:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{P}_i \bar{S}_i r_i \bar{N} a_i) = -div[-\bar{D}_i^g(N_a) grad(\bar{N} a_i)] + \bar{S}_i^{reac}(N_a) \quad (IV. 34)$$

Dans le granulat, tant qu'il reste de la silice, le terme source correspond à la consommation des alcalins par la réaction:

$$\bar{S}_i^{reac}(N_a) = -div\left[\bar{D}_i^g(N_a) \frac{\partial \bar{N} a_i}{\partial r}(r)\right] \quad (IV. 35)$$

Avec pour conditions limites:

$$\frac{\partial \bar{N} a_i}{\partial r}(r = 0) = 0 \quad (IV. 36. a)$$



$$\bar{D}_i^g(N_a) \frac{\partial \bar{N}a_i}{\partial r}(R_i^-) = \bar{D}_i^m(N_a) \frac{\partial \bar{N}a_i}{\partial r}(R_i^+) \quad (\text{IV.36. } b)$$

Avec  $\bar{D}_i^m(N_a)$  le coefficient de diffusion des alcalins dans la matrice autour du granulat i.

- **Diffusion des alcalins dans la pâte de mortier**

L'équation de transport s'écrit alors:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{P}_i \bar{S} r_i \bar{N}a_i) = -div[-\bar{D}_i^m(N_a) grad(\bar{N}a_i)] + \bar{S}_i^{coup}(N_a) \quad (\text{IV.37})$$

Avec

$$\bar{S}_i^{coup}(N_a) = -\frac{4\pi R_i^2(n_i^g-1)}{V_{VER}-V_i^g} \bar{D}_i^m(N_a) \frac{\partial \bar{N}a_i}{\partial r}(R_i) - \frac{4\pi}{V_{VER}-V_i^g} \sum_{j \neq i} n_j^g R_j^2 \frac{\partial \bar{N}a_j}{\partial r}(R_j) \quad (\text{IV.38})$$

Les conditions aux limites sont:

$$\frac{\partial \bar{N}a_i}{\partial r}(r = R_{VER}) = 0 \quad (\text{IV.39. } a)$$

$$\bar{D}_i^g(N_a) \frac{\partial \bar{N}a_i}{\partial r}(R_i^-) = \bar{D}_i^m(N_a) \frac{\partial \bar{N}a_i}{\partial r}(R_i^+) \quad (\text{IV.39. } b)$$

Il y a donc deux systèmes d'équations différentielles linéaires par rapport aux champs déconcentration en alcalins à résoudre. Le premier pour la pâte de mortier et le second pour les granulats réactifs. Ces deux systèmes sont constitués de  $n_{cl}$  équations.

- **1er système correspondant à la pâte de mortier:**

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{P}_1 \bar{S} r_1 \bar{N}a_1) = -div[-\bar{D}_1^m(N_a) grad(\bar{N}a_1)] + \bar{S}_1^{coup}(N_a) \\ \frac{\partial}{\partial t}(\bar{P}_i \bar{S} r_i \bar{N}a_i) = -div[-\bar{D}_i^m(N_a) grad(\bar{N}a_i)] + \bar{S}_i^{coup}(N_a) \\ \frac{\partial}{\partial t}(\bar{P}_{n_{cl}} \bar{S} r_{n_{cl}} \bar{N}a_{n_{cl}}) = -div[-\bar{D}_{n_{cl}}^m(N_a) grad(\bar{N}a_{n_{cl}})] + \bar{S}_{n_{cl}}^{coup}(N_a) \end{array} \right. \quad (\text{IV.40})$$

Ce système est composé de  $n_{cl}$  équations différentielles linéaires couplées entre elles par le terme source de couplage inter-granulaire.

- **2<sup>ème</sup> système correspondant aux granulats réactifs:**

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t} (\bar{P}_1 \bar{S} r_1 \bar{N} a_1) = -div[-\bar{D}_1^g(N_a) grad(\bar{N} a_1)] + \bar{S}_1^{coup} (N_a) \\ \frac{\partial}{\partial t} (\bar{P}_i \bar{S} r_i \bar{N} a_i) = -div[-\bar{D}_i^g(N_a) grad(\bar{N} a_i)] + \bar{S}_i^{coup} (N_a) \\ \frac{\partial}{\partial t} (\bar{P}_{n_{cl}} \bar{S} r_{n_{cl}} \bar{N} a_{n_{cl}}) = -div[-\bar{D}_{n_{cl}}^g(N_a) grad(\bar{N} a_{n_{cl}})] + \bar{S}_{n_{cl}}^{coup} (N_a) \end{array} \right. \quad (IV. 41)$$

Ce système est composé de  $n_{cl}$  équations différentielles linéaires découplées.

Ces deux systèmes sont couplés entre eux et doivent donc être résolus simultanément.

- ***Diffusion des ions calciums en solution dans les granulats réactifs***

C'est la même chose que pour les ions alcalins:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{P}_i \bar{S} r_i \bar{C} a_i) = -div[-\bar{D}_i^g(C_a) grad(\bar{C} a_i)] + \bar{S}_i^{reac} (C_a) \quad (IV. 42)$$

Avec

$$\bar{S}_i^{reac} (C_a) = -div \left[ \bar{D}_i^g(C_a) \frac{\partial \bar{C} a_i}{\partial r} (r) \right] \quad (IV. 43)$$

Et pour conditions aux limites:

$$\frac{\partial \bar{C} a_i}{\partial r} (r = 0) = 0 \quad (IV. 44)$$

$$\bar{D}_i^g(C_a) \frac{\partial \bar{C} a_i}{\partial r} (R_i^-) = \bar{D}_i^m(C_a) \frac{\partial \bar{C} a_i}{\partial r} (R_i^+) \quad (IV. 45)$$

- ***Diffusion des ions calciums en solution dans la pâte de mortier***

Dans le mortier, il est supposé que la portlandite est en équilibre local instantané avec la solution interstitielle.

L'auteur montre alors qu'il est impossible de gérer le calcium en solution indépendamment des alcalins en solution tant qu'il reste de la portlandite. Pour simplifier le problème, il suppose que la portlandite est toujours en excès en tout point de la pâte de ciment. Cette hypothèse est tout à fait vérifiée à court terme mais devient de plus en plus fautive au cours du temps.

La relation entre les ions calciums et les alcalins est alors:

$$\frac{\partial \bar{C} a_i}{\partial t} = \alpha (\bar{N} a_i) \frac{\partial \bar{N} a_i}{\partial t} \quad (IV. 46)$$

### Petit résumé

Dans un granulat quelconque  $i$ , il faut résoudre (IV. 47):

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall i \in \{1, \dots, n_{cl}\} \\ \forall r \in [R_i, R_{VER}] \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t} (\bar{P}_i \bar{S} r_i \bar{N} a_i) = -div[-\bar{D}_i^g(N_a) grad(\bar{N} a_i)] + \bar{S}_i^{reac}(N_a) \\ \frac{\partial}{\partial t} (\bar{P}_i \bar{S} r_i \bar{C} a_i) = -div[-\bar{D}_i^g(C_a) grad(\bar{C} a_i)] + \bar{S}_i^{reac}(C_a) \end{array} \right. \quad (IV. 47)$$

Avec

$$\bar{S}_i^{reac}(N_a) = div \left[ -\bar{D}_i^g(N_a) \frac{\partial \bar{N} a_i}{\partial r}(r) \right] \quad (IV. 48)$$

$$\bar{S}_i^{reac}(C_a) = div \left[ -\bar{D}_i^g(C_a) \frac{\partial \bar{C} a_i}{\partial r}(r) \right] \quad (IV. 49)$$

Les conditions aux limites sont:

$$\frac{\partial \bar{N} a_i}{\partial r}(r=0) = \frac{\partial \bar{C} a_i}{\partial r}(r=0) = 0 \quad (IV. 50)$$

$$\bar{D}_i^g(N_a) \frac{\partial \bar{N} a_i}{\partial r}(R_i^-) = \bar{D}_i^m(N_a) \frac{\partial \bar{N} a_i}{\partial r}(R_i^+) \quad (IV. 51)$$

$$\bar{D}_i^g(C_a) \frac{\partial \bar{C} a_i}{\partial r}(R_i^-) = \bar{D}_i^m(C_a) \frac{\partial \bar{C} a_i}{\partial r}(R_i^+) \quad (IV. 52)$$

Dans la pate de mortier, il faut résoudre (IV.53) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall i \in \{1, \dots, n_{cl}\} \\ \forall r \in [R_i, R_{VER}] \end{array} \right\} \frac{\partial}{\partial t} (\bar{P}_i \bar{S} r_i \bar{N} a_i) = -div[-\bar{D}_i^m(N_a) grad(\bar{N} a_i)] + \bar{S}_i^{coup}(N_a) \quad (IV. 53)$$

$$\frac{\partial \bar{C} a_i}{\partial t} = \alpha(\bar{N} a_i) \frac{\partial \bar{N} a_i}{\partial t} \quad (IV. 54)$$

Avec

$$\bar{S}_i^{coup}(N_a) = -\frac{4\pi R_i^2 (n_i^g - 1)}{V_{VER} - V_i^g} \bar{D}_i^m(N_a) \frac{\partial \bar{N} a_i}{\partial r}(R_i) - \frac{4\pi}{V_{VER} - V_i^g} \sum_{j \neq i} n_j^g R_j^2 \frac{\partial \bar{N} a_j}{\partial r}(R_j) \quad (IV. 55)$$

Les conditions aux limites sont :

$$\frac{\partial \bar{N} a_i}{\partial r}(r = R_{VER}) = 0 \quad (IV. 56)$$

$$\bar{D}_i^g(N_a) \frac{\partial \bar{N} a_i}{\partial r}(R_i^-) = \bar{D}_i^m(N_a) \frac{\partial \bar{N} a_i}{\partial r}(R_i^+) \quad (IV. 57)$$

- **Calcul du gonflement**

- *Détermination des quantités de produits formés par la réaction*

Les hypothèses posées pour calculer les quantités sont :

- la réaction est instantanée, c'est-à-dire que tous les ions qui pénètrent dans le granulat réactif sont consommés dès qu'ils rencontrent la silice réactive ;
- les ions alcalins et calciums réagissent séparément pour former des produits différents ;
- il faut deux moles d'alcalins pour couper les liaisons du réseau siliceux et libérer une mole de silice réactive pour former une mole de gel silico-alcalin ;
- il faut une mole d'ions calciums pour former une mole de gel silico-calcique.

Pour les granulats de chaque classe, l'évolution du nombre de moles de produits formés en fonction du temps est donnée par:

$$\forall i \in \{1, \dots, n_{cl}\} \begin{cases} N_i^{Na}(t) = \frac{1}{2} n_i^g \int_0^t \bar{\phi}_i^{Na}(\tau) d\tau \\ N_i^{Ca}(t) = n_i^g \int_0^t \bar{\phi}_i^{Ca}(\tau) d\tau \end{cases} \quad (IV. 58)$$

Avec  $N_i$  le nombre de moles de produits formés par chaque classe de granulat,  $n_i^g$  le nombre de granulats réactifs de chaque classe granulaire,  $\phi_i$  le flux d'espèce entrant dans les granulats de chaque classe présents dans le V.E.R. Ces flux sont connus par la résolution de:

$$\forall i \in \{1, \dots, n_{cl}\} \begin{cases} \bar{\phi}_i^{Na}(t) = -4\pi R_i^2 \bar{D}_i^g (Na) \frac{\partial \bar{N}a_i}{\partial r} (r = R_i) \\ \bar{\phi}_i^{Ca}(t) = -4\pi R_i^2 \bar{D}_i^g (Ca) \frac{\partial \bar{C}a_i}{\partial r} (r = R_i) \end{cases} \quad (IV. 59)$$

Le volume des produits formés pour chaque classe granulaire est calculé à partir du volume molaire. Ce volume molaire du gel a été déterminé expérimentalement par Lombardi et al. [Lombardi, 2000] et qui est égal à 21.5 cm<sup>3</sup>/mol.

$$\forall i \in \{1, \dots, n_{cl}\} \begin{cases} V_i^{Na}(t) = N_i^{Na}(t) V_{mol}^{gel} \\ V_i^{Ca}(t) = N_i^{Ca}(t) V_{mol}^{gel} \end{cases} \quad (IV. 60)$$

Le volume total de produits formés par les granulats de la classe  $i$  est par conséquent:

$$V_i^g(t) = V_i^{Na}(t) + V_i^{Ca}(t) \quad (\text{IV. 61})$$

➤ *Détermination du gonflement induit par la réaction*

Selon les mécanismes réactionnels retenus par l'auteur, le gel se forme dans la zone poreuse entourant le granulat et lorsque le volume du gel devient supérieur au volume poreux disponible alors il y a une mise en pression de la matrice cimentaire définie par:

$$P_i^g(t) = K_i^g (1 - D) \langle V_i^g - V_i^p \rangle^+ \quad (\text{IV. 62})$$

Avec

- $P_i^g$  la pression générée par le gel sur la matrice,
- $K_i^g$  le coefficient de compressibilité des produits formés,
- $D$  l'endommagement mécanique du matériau composant le V.E.R.,
- $V_i^g$  le volume de précipités formés par les granulats de la classe  $i$  et
- $V_i^p$  le volume poreux accessible pour le gel au voisinage des granulats de la classe  $i$ .

La fonction  $F(X) = \langle X \rangle^+$  donne la partie positive de  $X$ .

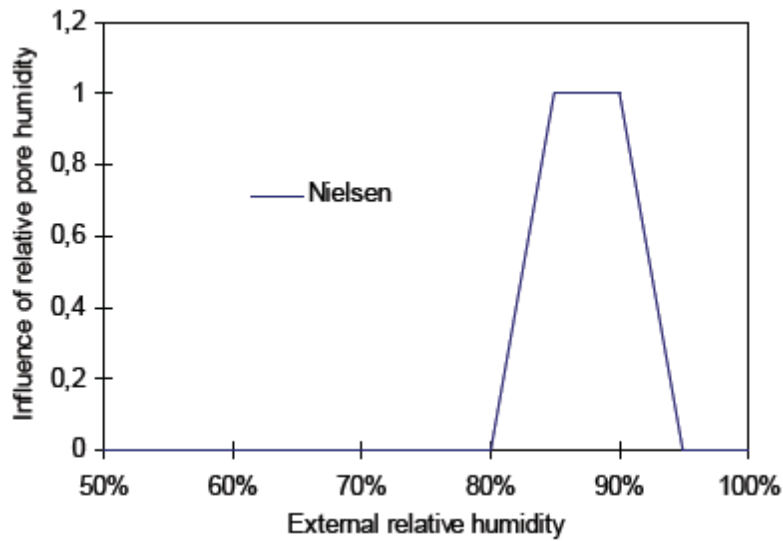
Ce modèle très complet permet de reproduire les tendances expérimentales observées de gonflement mais les sous-estime. Cela pourrait être dû au fait que l'auteur considère une consommation totale des alcalins ou encore à la stoechiométrie des produits formés.

### IV.3. LES MODELES MACROSCOPIQUES

#### IV.3.1. Le modèle de Nielsen

Ce modèle [NIE-1993] propose de calculer les déformations et les contraintes induites par le gonflement d'un granulat réactif sphérique placé au centre d'un volume élémentaire représentatif. Le gonflement est dû à la pénétration d'ions et d'eau dans le granulat [CHA-1986], cela génère des fissures dans le mortier et donc l'expansion du béton. Les fissures sont supposées être radiales.

La cinétique de gonflement est la donnée d'entrée du modèle. L'expansion est directement reliée à l'humidité relative dans les pores par l'intermédiaire d'une loi empirique basée sur les observations de Nilsson et al. [NIL-1983] (Voir Figure IV.6). Cette dernière est déterminée par un calcul hydrique.



**Fig.IV.6:** Influence de l'humidité relative sur le gonflement, d'après [NIE-1993].

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

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

### IV.3.2. Le modèle de Capra

Le modèle proposé par Capra et Bournazel [CAP-1996] [CAP-1998] permet de calculer la déformation engendrée par la réaction alcali-silice  $\varepsilon^r$  en tout point d'une structure.

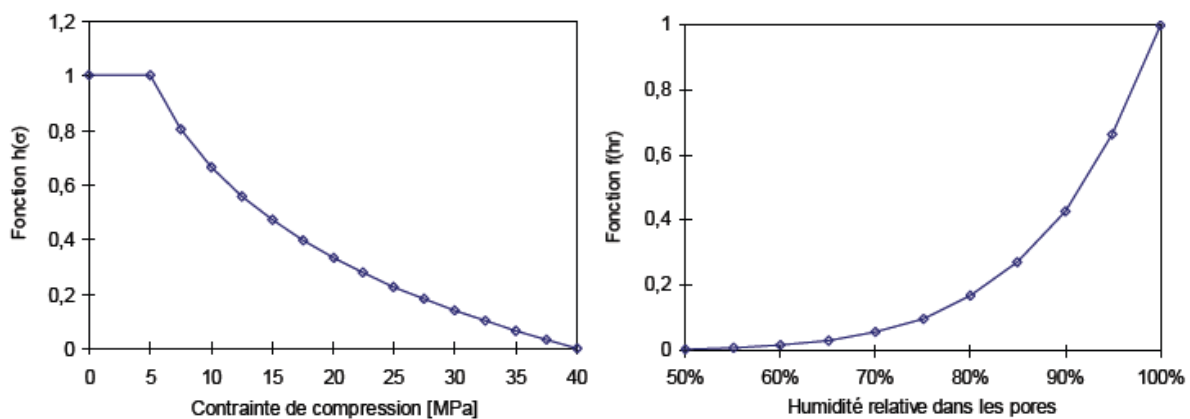
$$\varepsilon^r(M, t) = \varepsilon^{100\%}(t) f(hr) g(A, T) h(\sigma) \quad (\text{IV. 63})$$

Le terme  $\varepsilon^{100\%}(t)$  représente l'évolution du gonflement libre pour le matériau saturé. Elle peut être déterminée par un essai de gonflement libre. Les fonctions  $f$ ,  $g$  et  $h$  prennent en compte respectivement l'influence de l'humidité relative dans les pores, de la température et de la

quantité d'alcalins consommés (ou avancement de la réaction) et de la contrainte de compression appliquée au point considéré.

Les fonctions  $f(hr)$  et  $h(\sigma)$  définissent respectivement l'influence de l'humidité relative dans les pores et de la contrainte sur l'expansion générée par la réaction. La première a été calée par l'auteur d'après des résultats tirés de la littérature [POO-1992b] (voir Figure IV.7).

$$f(hr) = hr^8 \quad h(\sigma) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sigma < \sigma_1 \\ K \log(\sigma/\sigma_0) & \text{si } \sigma > \sigma_1 \end{cases} \quad (\text{IV. 64})$$



**Fig.IV.7:** Evolution des fonctions h à gauche ( $\sigma_1=5$  MPa –  $\sigma_2=40$  MPa) et f à droite

La cinétique de la réaction est supposée être du premier ordre, la déformation générée par la réaction devient alors :

$$\varepsilon^r(M, t) = \varepsilon^{100\%}(t)h(\sigma)hr^8 \langle 1 - \exp(-k(T)t) - A_0 \rangle^+ \quad (\text{IV. 65})$$

La fonction  $k(T)$  prend en compte l'influence de la température par l'intermédiaire d'une loi d'activation d'Arrhenius. La détermination du champ de déformation engendré par la réaction alcali-silice nécessite la connaissance du champ d'humidité relative dans les pores et des caractéristiques de gonflement du béton. Le champ d'humidité est déterminé par un calcul hydrique préalable et les caractéristiques de gonflement peuvent être déterminées par un essai de gonflement libre. Le champ de déformation dû à la réaction peut être injecté dans un calcul mécanique de structure pour déterminer les conséquences macroscopiques sur un ouvrage en tenant compte de l'influence des transferts hydriques et des contraintes sur la réaction [CAP-

1997]. L'auteur a ainsi évalué l'influence de la réaction sur un barrage et l'efficacité d'un sciage pour réduire les contraintes générées par la réaction [CAP-1997].

### IV.3.3. Le modèle de Li

Le modèle proposé par Li [LI-2002a] a pour vocation l'évaluation des conséquences de la réaction alcali-silice sur des ouvrages réels. La réaction est supposée produire un « gel sec » non gonflant selon un avancement  $\xi$ . Ce dernier possède la propriété de s'imbiber d'eau en fonction du temps et de l'humidité relative dans les pores pour former un « gel mouillé ». Ces deux processus sont supposés suivre des cinétiques du premier ordre :

$$\xi(t) = 1 - \exp(-t/t_c) \quad (\text{IV. 66})$$

$$\gamma(t) = 1 - \exp(-t/t_a) \quad (\text{IV. 67})$$

La valeur  $\gamma=0$  correspond à un « gel sec » et  $\gamma=1$  à un « gel mouillé » qui a perdu toute capacité d'imbibition. La variation de volume  $v$  du « gel mouillé » dépend de l'avancement  $\xi$  de la réaction et de la capacité restante  $(1-\gamma)$  du gel de s'imbiber :

$$\dot{v}_w = M(1 - \gamma)\dot{\xi} = M\dot{\xi}(1 - \xi)^{t_c/t_a} \quad (\text{IV. 68})$$

•  $M$  est le coefficient de combinaison d'eau, c'est un des paramètres du modèle.

Le gonflement libre  $\varepsilon_l^r(t)$  induit par la réaction est alors pour une humidité relative donnée :

$$\varepsilon_l^r(t) = \frac{\beta M}{1 + \bar{\omega}} \exp\left[-\frac{t_f}{t_c}(1 + \bar{\omega})\right] \left[1 - \exp\left(-\frac{1 + \bar{\omega}}{t_c} \langle t - t_f \rangle^+\right)\right] \quad (\text{IV. 69})$$

•  $\beta$  est une constante, c'est un des paramètres du modèle ;

•  $t_f$  est le temps nécessaire pour que le gonflement apparaisse (il correspond à  $\emptyset_0$ ) ;

•  $f(x) = \langle x \rangle^+$  est la fonction qui renvoie la partie positive de  $x$ .

•  $\bar{\omega}$  est une constante qui dépend des temps caractéristiques :

$$\bar{\omega} = t_c/t_a \quad (\text{IV. 70})$$

L'expansion provoquée par le gel mouillé implique trois phénomènes couplés : la formation d'un gel sec de temps caractéristique  $t_c$ , la combinaison de l'eau et du gel sec dont le caractère vieillissant est caractérisé par  $t_a$  et un phénomène de remplissage de durée  $t_f$ .



Ce modèle de comportement thermo-chemo-élastoplastique implanté dans le code de calcul CESAR-LCPC permet de prendre en compte l'effet de variations de température et d'humidité relative et du gonflement interne sur le comportement du béton :

$$\sigma = \left[ K - \frac{2}{3}G \right] (\varepsilon - \varepsilon^p) + 2G(\varepsilon - \varepsilon^p) - (K\alpha\Delta\theta)I - (K\beta v_w)I \quad (\text{IV.71})$$

- $\sigma, \varepsilon$  et  $\varepsilon^p$  sont respectivement les tenseurs des contraintes, des déformations totales et des déformations plastiques ;
- $I$  est le tenseur identité ;
- $K$  et  $G$  sont les modules de compressibilité et de cisaillement du béton ;
- $\alpha$  est le coefficient de dilatation du béton.

Ce modèle permet de prendre en compte l'influence de l'environnement extérieur sur la réaction (température et apport d'eau). Le nombre conséquent de paramètres rend difficile le calage d'un tel modèle.

#### IV.4. CONCLUSION

Les modèles présents dans la littérature peuvent être séparés en deux classes distinctes. Les modèles « mésoscopiques » et les modèles « macroscopiques ». Les premiers se basent sur des mécanismes réactionnels probables pour prédire l'évolution des espèces ioniques dans le matériau et l'avancement de la réaction. Ils caractérisent la réaction au niveau local et le gonflement au niveau du matériau. Les modèles concernés sont ceux proposés par Sellier, Bažant, Xi, U.F.O. et le modèle de Poyet.

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

Les modèles « mésoscopiques » se ramènent tous à l'étude d'un V.E.R. au moyen d'hypothèses adéquates (granulats sphériques, homogénéité et isotropie des matériaux et de la réaction,

répartition statistiquement homogène des granulats). Les mécanismes réactionnels décrits dans ces modèles sont très similaires.

Tous les modèles présentés permettent de prendre en compte l'influence du diamètre des granulats réactifs. En revanche, seulement trois sont écrits de manière à tenir compte de la présence simultanée de granulats réactifs de tailles différentes dans le V.E.R (celui de Uomoto et Furusawa, celui de Xi et celui de Poyet). Mais aucun ne le fait de manière satisfaisante. Xi considère que la concentration à l'interface granulat/pâte est constante au cours du temps. Cette hypothèse est valable dans le cas d'un matériau dilué mais elle devient d'autant plus fautive que la proportion d'agrégats réactifs augmente. Le modèle U.F.O. est capable de reproduire la baisse de concentration induite par la consommation simultanée de tous les granulats présents. Malheureusement, cette baisse est obtenue grâce à un paramètre de calage  $C_{unit}$ . Poyet quant à lui prend en compte cette baisse de concentration par l'intermédiaire d'une fonction de pondération.

Le modèle de Poyet apparaît comme le plus complet de tous, notamment car c'est le seul qui a été appliqué pour simuler le gonflement d'un matériau contenant différentes classes granulaires.

L'influence de l'eau sur la réaction est prise en compte dans les modèles proposés par Nielsen, Li, Bažant et Capra. Pour Li et Bažant, la réaction conduit à la formation d'un « gel sec » inoffensif qui a la propriété de s'imbiber d'eau pour former un « gel mouillé » dont la variation de volume entraîne le gonflement du matériau. Selon Bažant, cette imbibition ne peut se produire qu'au-delà d'une certaine humidité relative dans les pores, et pour Li, il n'y a pas de restriction.

## **V.MODELISATION DE L'EXPANSION ALCALI REACTIVE DANS LE BETON**

### **V.1.INTRODUCTION**

Le béton est un matériau de construction qui peut souffrir de mécanismes de dégradation chimiques qui peuvent conduire à une défaillance prématurée de la structure. L'alcali-réaction est l'une des pathologies les plus célèbres de ce matériau. Cette réaction peut être visualisée en tant que processus en deux étapes. La première étape implique la formation du produit de réaction entre la silice réactive et les alcalis du béton. Les véritables dommages causés au béton, cependant, sont provoqués par la deuxième étape. Dans cette étape, le produit de réaction qui est un gel absorbe l'eau et gonfle; ce gel a une grande affinité pour l'imbibition de l'eau. Lorsqu'il absorbe l'humidité, il provoque une augmentation de volume et une pression de gonflement dans le béton. Cette pression est assez intense pour provoquer la rupture de la microstructure interne du béton.

L'une des principales difficultés consiste à mesurer le volume du gel formé par cette réaction. Les modèles microscopiques pourraient être une méthode pour le faire [Bazant et Steffens 2000, Sellier et al.1996, Poyet et al.2007]. Ces modèles devraient être en mesure de prédire les différences des expansions avec la variation de tous les paramètres influents tels que la taille de l'agrégat et doivent être comparées avec les résultats expérimentaux.

De nombreux documents traitent l'effet de la taille des particules de granulats réactifs sur l'expansion due à l'alcali-réaction et beaucoup d'expériences ont été réalisées sur plusieurs types de granulats.

Notre travail vise à développer un modèle qui étudie les corrélations entre les expansions mesurées et la taille des agrégats, pour cette raison, des résultats expérimentaux issus des travaux de Duyou Lu et al. (2006) ont été utilisés pour les servir en tant que base de données expérimentales dans notre simulation numérique.

Trois mortiers ont été étudiés, chaque mortier contient une seule taille réactive (0,15 - 0,80 mm), (1,25 - 2,50 mm) et (2,50 - 5,0 mm). D'abord, on présente les conditions expérimentales des essais; ensuite, les mesures de l'expansion d'alcali réactions sont présentées. Enfin, un modèle est proposé pour simuler les résultats expérimentaux en étudiant les corrélations entre les expansions mesurées et la taille des agrégats et pour calculer l'épaisseur de la zone poreuse nécessaire de reprendre tout le volume du gel créé par cette réaction chimique.

### **V.2.MATERIAUX ET METHODE**

Afin de déterminer l'alcali réactivité des granulats plus rapidement et avec précision en Chine, une nouvelle méthode d'essai (essai accéléré chinois sur barre de mortier – CAMBT «Chinese accelerated mortar bar method») a été utilisé par les auteurs [Duyou Lu et al.2006], cette méthode a été développée récemment en Chine en combinant les avantages de l'essai d'autoclave chinois et l'essai accéléré sur barre de mortier – AMBT «Accelerated mortar bar test» avec quelques modifications sur la méthode par les auteurs. Les principaux paramètres de la nouvelle méthode, de l'AMBT et de la méthode d'autoclave sont comparés dans le tableau (V-1).

PARAMETRES	AMBT	METHODE D'AUTOCLAVE	CAMBT
Rapport eau/ciment	0.47	0.30	0.33
alcalis du Ciment (Na <sub>2</sub> O <sub>eq.</sub> )	1.0 ± 0.1% <sup>a</sup>	1.5% <sup>b</sup>	1.5% <sup>b</sup>
Taille des Agrégats (mm)	0.15–5.0 <sup>c</sup>	0.15–0.80	0.15–0.80
Taille des Barres (mm)	25x25x285	10 x 10 x 40	40x40x160
Rapport Ciment-granulat	1:2.25	10:1, 5:1, 2:1	10:1, 2:1, 1:1
Température	80°C	150°C	80°C
la solution de stockage	1.0M NaOH	10% KOH	1.0M NaOH
Longueur initiale	24 h in water @ 80°C	24 h humidité @ 23°C	4 h in 1 M NaOH @ 80°C
Critères	0.10 % @ 14 jours	0.10 % @ 6 h	0.10 % @ 7 jours

<sup>a</sup> Utiliser ciment haut alcalin.

<sup>b</sup> Utiliser ciment faible alcalin, ajouter KOH dans l'eau de gâchage.

<sup>c</sup> Cinq fractions de taille requises.

**Tableau V-1** : Paramètres des tests accélérés pour l'alcali-réaction.

Dans le CAMBT, une seule taille de granulats fins (0,15 - 0,80 mm) et un système de haut-alcali de 1,5% Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> (obtenu par l'addition de KOH à un ciment à faible alcalin) sont utilisés, qui sont les mêmes que dans l'essai de l'autoclave chinois. Trois séries d'essai ont été réalisés avec des rapports ciment/granulat de 10/1, 2/1 et 1/1. Le rapport eau/ciment a été fixé à 0,33. La taille de la barre de mortier était 40x40x160 mm. Les conditions de stockage et la procédure d'essai sont similaires à la méthode de l'AMBT, sauf que la mesure de la longueur initiale est effectuée après 4h d'immersion dans NaOH 1M à 80°C.

Les approches communes pour accélérer le processus de réaction dans ces procédures accélérées sont l'utilisation d'une grande proportion de particules d'agrégats fins, une température élevée et un régime haut-alcalin, mais avec une différence significative dans les

compositions de mélange, tels que la taille de l'échantillon, la granulométrie des granulats, etc. (tableau V-1). Les cinq fractions du granulat utilisées dans l'AMBT sont dérivées de la norme ASTM C227, le test des barres de mortier standard, tandis que la fraction d'agrégat 0,15 à 0,80 mm utilisé dans le CAMBT suit la méthode de l'autoclave chinois. Une étude antérieure a montré que, pour les barres de mortier 25 x 25 x 285 mm durcis à 38°C et dans un environnement d'humidité élevé, il existe une taille pessimum de particules qui pourrait induire plus grande expansion de mortier. Cependant, peu de travaux ont été rapporté sur l'effet de la taille des particules sur l'expansion des barres de mortier 40 x 40 x 160 mm immergées dans la solution NaOH 1M à 80°C.

### **V.2.1 Matériaux**

Les granulats sélectionnés étaient le grès quartzeux de Montréal, Canada (PO) et le quartzite de la Norvège (NQ). Ils ont été écrasés et tamisés en trois classes granulaires: (0,15- 0,80 mm), (1,25 - 2,50 mm) et (2,50 - 5,0 mm). Le rapport granulat/ciment est 1/1.

Dans la procédure proposée de la nouvelle méthode, un ciment à faible alcalin devait être utilisé, avec une teneur en alcali ajusté à 1,5%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  en ajoutant KOH à l'eau de gâchage. Un Ciment à faible alcalin (0,58%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ) a été d'abord essayé au laboratoire de CANMET, mais la pâte était très dure au rapport eau/ciment de 0,33 lors de l'ajout de KOH. Par conséquent, un ciment haut-alcalin avec 0,91%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  a été utilisé sans addition de KOH dans cette étude.

### **V.2.2 Méthode de mélange et de moulage**

Pour chaque mortier, un moule composé de trois éprouvettes prismatiques (40x40x160) mm a été utilisé. La procédure du mélange et de moulage a suivi les exigences de la norme CSA A23.2-25A. Le ciment a été mélangé avec l'eau dans le malaxeur à vitesse lente pendant 30 s; après le granulat a été introduit (une seule classe granulaire) lentement, tout en mélangeant à faible vitesse pendant 30s supplémentaires. Le mélange a été ensuite malaxé pendant 30 s à vitesse moyenne, puis laissé au repos pendant 90 s avec la cuvette recouverte d'un linge humide pour éviter la perte d'humidité. Le mélange est ensuite mélangé à nouveau pendant 60 s à vitesse moyenne [Oberholster et Davies 1986, D. Lu et al. 2006].

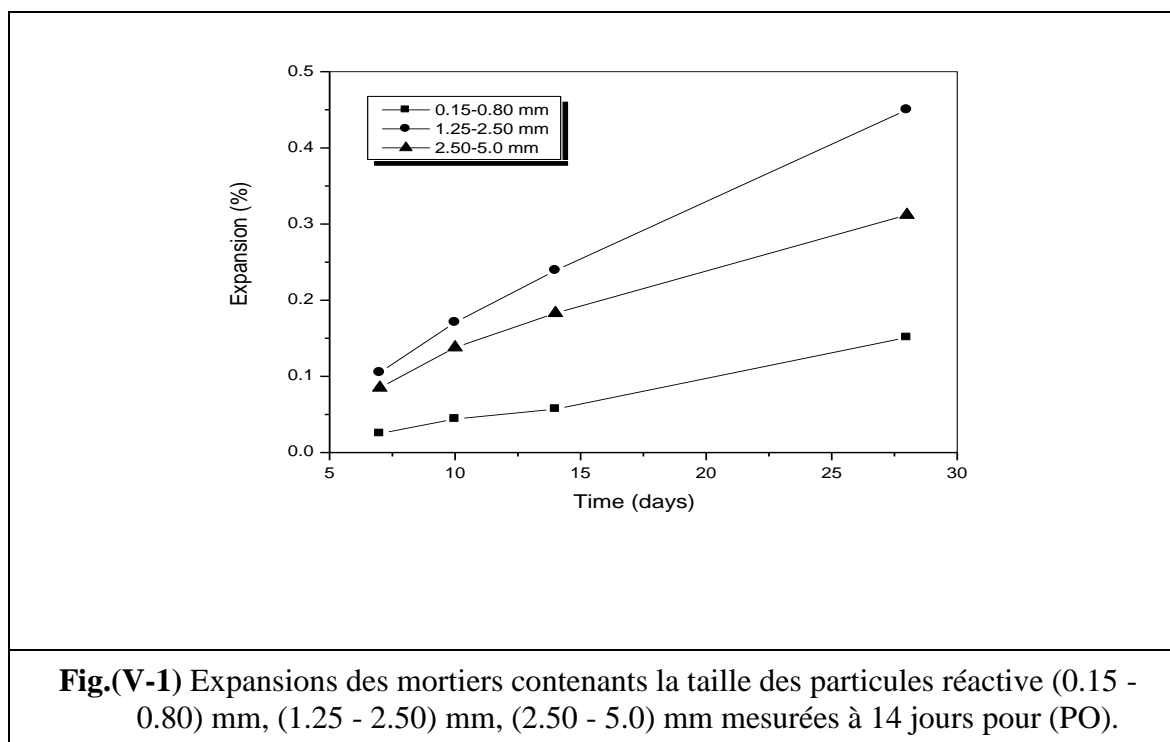
Le mélange a été compacté dans les moules. Les moules, couverts de feuille de plastique, étaient entreposés dans une chambre de brouillard à 23°C pendant  $24 \pm 2$  H. Les barres sont ensuite démoulées et plongées dans l'eau dans des conteneurs en plastique scellés, qui ont été ensuite placées dans une étuve à 80°C pendant  $24 \pm 2$  heures.

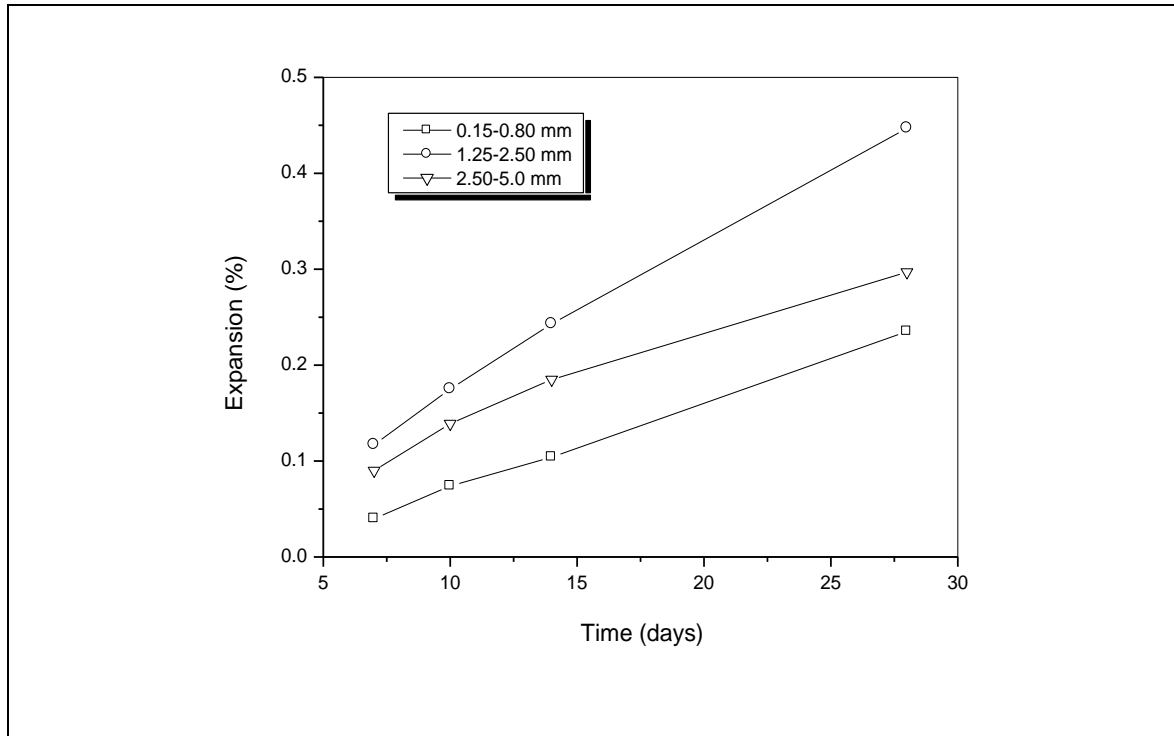
La mesure de la longueur initiale est ensuite prise, les barres étaient transférées dans des récipients remplis avec une solution de NaOH 1M à 80°C et les récipients étaient retournés au four maintenu à 80°C. Les variations de longueur des barres ont été mesurées à 1, 3, 5, 7, 10, 12, 14 et 28 jours, respectivement. Le résultat de l'expansion est la moyenne des trois mesures.

### V.3. LES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

Les résultats d'expansion pour les granulats réactifs sont présentés dans le tableau (V-2). Les expansions pour les barres avec une seule fraction d'agrégat réactif sont présentées dans les Figures (V-1) et (V-2), elles indiquent que l'expansion des barres contenant la fraction d'agrégat (0,15 - 0,80 mm) augmente linéairement avec le temps, au moins jusqu'à 14 jours. Pour les barres contenant la fraction d'agrégat (1,25 - 2,50 mm) et (2,5-5,0 mm) particules, les courbes d'expansion sont généralement linéaires, avec un ralentissement après environ 14 jours.

Les mesures de la variation de la masse des barres à 14 jours ont montré que les agrégats ont gagné un peu de poids. Le gain de masse pour ces agrégats varie de 0,2 à 1,0% de leur poids initial (un jour dans l'eau à 80°C).





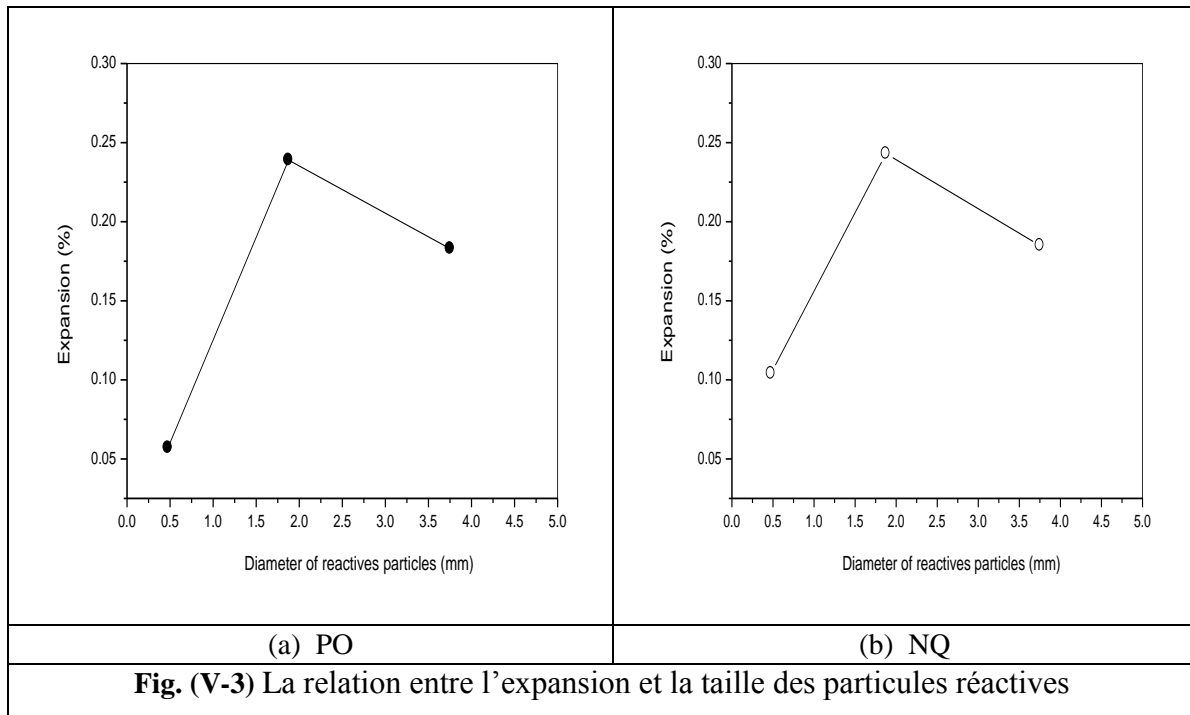
**Fig. (V- 2)** Expansions des mortiers contenant la taille des particules réactive (0.15 - 0.80) mm, (1.25 - 2.50) mm, (2.50 - 5.0) mm mesurées à 14 jours pour (NQ).

Granulat	PO			NQ		
	0.15-0.8 mm	1.25-2.5 mm	2.50-5.0 mm	0.15-0.8 mm	1.25-2.5 mm	2.50-5.0 mm
<b>07 jours</b>	0.025	0.105	0.085	0.040	0.117	0.090
<b>10 jours</b>	0.044	0.171	0.138	0.074	0.175	0.139
<b>14 jours</b>	0.057	0.239	0.183	0.104	0.243	0.185
<b>28 jours</b>	0.151	0.450	0.312	0.235	0.447	0.297

**Tableau V- 2 :** Résultats d'expansions des granulats réactifs.

La Figure. ((V-3) (a) - (b)) montre l'effet de la taille de particules sur l'expansion à différents âges. En Utilisant 0,10% comme un critère pour l'expansion, les barres avec la fraction la plus fine d'agrégat (0,15 - 0,80 mm) ne donne pas la plus grande expansion dans cet essai, surtout à un âge précoce, ils ont montré une expansion inférieure à environ (0,057%) pour PO et (0,104%) pour NQ. Il est clairement indiqué que les agrégats donnent la plus grande expansion pour la fraction (1,25 - 2,50 mm) pendant toute la période d'essai (0,239% pour

PO) et (0,243% pour NQ), pour les barres contenant la fraction d'agrégat (2,50 - 5,0 mm) l'expansion mesurée est (0,183% pour PO) et (0,185% pour NQ).



#### V.4. MODELE D'EXPANSION ET DISCUSSION

Le modèle présenté dans cette section vise à améliorer la compréhension des résultats expérimentaux obtenus dans la première partie. Il a pour but de calculer l'expansion des mortiers contenant une seule taille granulaire et de *calculer la distance jusqu'à laquelle le gel doit diffuser dans la pâte pour être complètement accommodé par la porosité de cette dernière.*

Les diverses hypothèses constitutives du modèle sont (figure V-4):

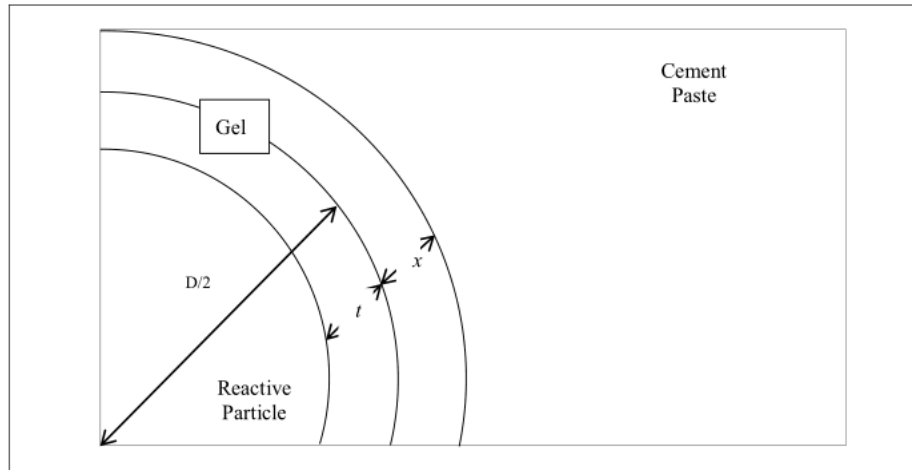
- Les granulats siliceux sont sphériques de diamètre  $D_i$ ;
- Un volume de silice produit " $n$ " volume de gel ( $n > 1$ );
- Les petits et les gros grains sont attaqués sur une épaisseur identique " $t$ ";
- Il existe une zone poreuse d'épaisseur « $x$ » autour des agrégats dans laquelle les produits sont formés.

Les mécanismes réactionnels sélectionnés sont [Dent-Glasser et Kataoka 1981, Chatterji et Thaulow 2000, Wang et Gillott 1991]:

- Les ions pénètrent dans les granulats réactifs par diffusion.
- Le réseau siliceux est attaqué par les ions hydroxydes.
- Les charges négatives créées sont équilibrées par les alcalins et les ions du calcium pour former des produits silico-alcalins (gel) ou silico-calcique.



- Ces produits sont formés dans une zone de porosité connectée au voisinage des granulats réactifs.
- Lorsque le volume des produits devient plus grand que le volume poreux disponible, le béton commence à gonfler [Poyet 2003].



**Fig.(V-4)** : schéma d'une particule réactive après la réaction.

L'expansion du mortier est causée par l'expansion du gel. On peut supposer que cette expansion est provoquée par la variation de volume du granulat (en présence de gel). Pour des raisons de simplicité, il est supposé que l'expansion du mortier due à l'alcali réaction ( $\varepsilon_{AAR}$ ) est proportionnelle à l'expansion du granulat (équation (V-3)). Pour plusieurs tailles de particules réactives, l'expansion du granulat est la somme des expansions de toutes les particules réactives [Multon *et al.*2010].

$$\varepsilon_{AAR} = k \cdot \sum_{i=1}^N \phi_i \varepsilon_i \quad (V.1)$$

Où

$\varepsilon_i$  : L'expansion d'un grain réactif de la classe  $i$ .

$\phi_i$  : La fraction volumique des particules réactives de la classe  $i$  par rapport au volume du mortier (volume total de particules réactives de la classe  $i$  / volume total du mortier).

$N$  : Le nombre de classes granulaires réactifs.

$K$  : La fraction de l'expansion due à l'alcali réaction liée à l'expansion des particules réactives.

L'expansion du mortier est supposée être due à l'expansion du granulat. Si  $k = 1$ , l'expansion du mortier est égal à l'expansion du granulat. En réalité,  $k$  doit être égal ou inférieur à 1, étant

donné que le mortier se dilate moins que le granulat en raison de l'effet mécanique de la pâte de ciment.

Pendant la réaction, à un moment donné, le grain est attaqué sur une épaisseur "t" et produit un volume de gel égale à  $V_i^g$  :

$$V_i^g = n \cdot \left[ \frac{\pi D_i^3}{6} - \frac{\pi (D_i - 2t)^3}{6} \right] \quad (\text{V-2})$$

Au cours de la formation du gel d'alcali réaction, une partie du gel peut migrer à travers la porosité fermée au grain. Par conséquent, l'expansion du grain  $i$  peut être décrite par l'équation (V-5).

$$\varepsilon_i = \frac{\langle V_i^g - V_i^p \rangle^+}{V_i} \quad (\text{V-3})$$

Avec:

$V_i^p$  : Le volume de la porosité fermée du grain réactif dans laquelle le gel d'alcali réaction peut migrer sans causer une expansion.

$V_i$  : Le volume du grain réactif et qui est égal à :

$$V_i = \frac{\pi D_i^3}{6} \quad (\text{V.4})$$

Où:  $D_i$  est le diamètre du grain réactif et

$$\langle X \rangle^+ \text{ est la partie positive du } X, \text{ Si: } \begin{cases} X < 0, \langle X \rangle^+ = 0 \\ X > 0, \langle X \rangle^+ = X \end{cases}$$

Supposons que le gel peut migrer le long de la même distance dans le grain «x» quelque soit la taille du grain, (hypothèse simplificatrice), le volume de la porosité est donné par l'équation (V-5)

$$V_i^p = \left[ \frac{\pi (D_i + 2x)^3}{6} - \frac{\pi D_i^3}{6} \right] \cdot P \quad (\text{V-5})$$

Où :

$P$  est la porosité du mortier.

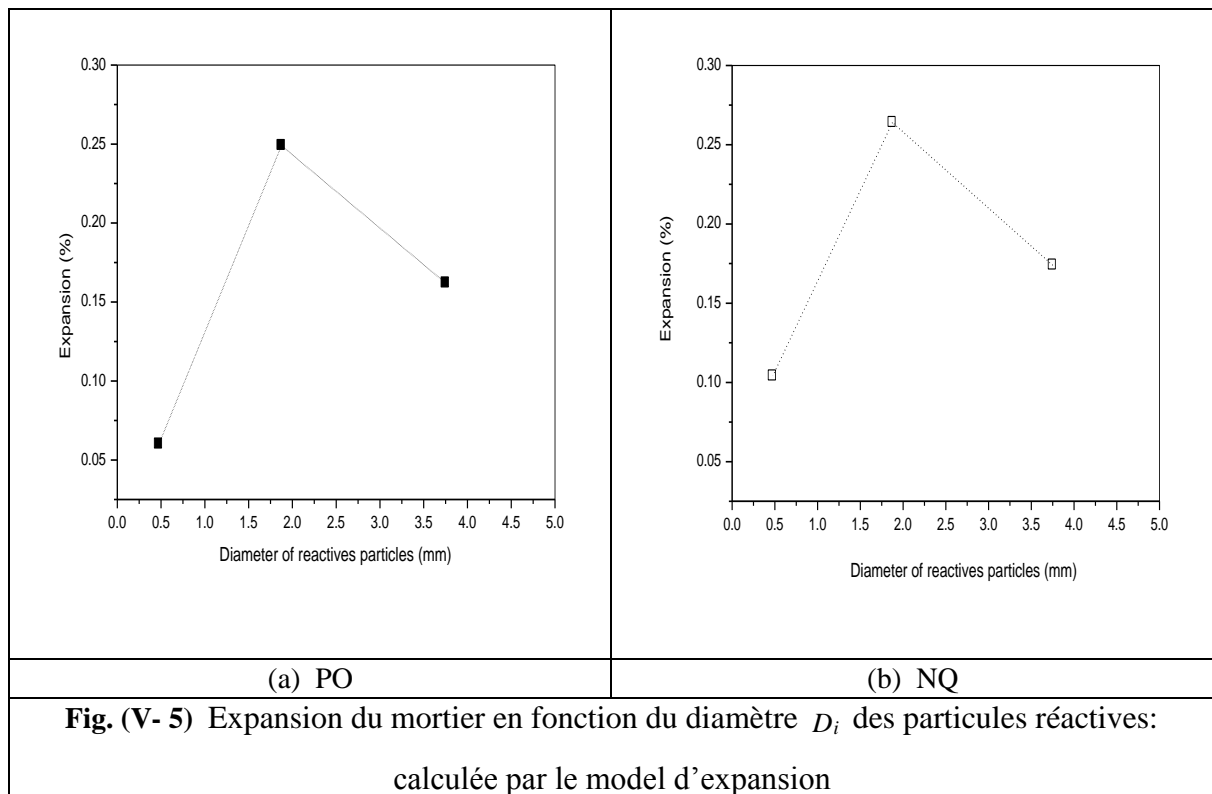
La combinaison des équations (V-1) – (V-5) pour une seule classe des particules réactives mène à l'équation (V-6)

$$\varepsilon_{AAR} = k \cdot \phi_i \left[ \left\langle n \cdot \left( 1 - \frac{(D_i - 2t)^3}{D_i^3} \right) - P \cdot \left( \frac{(D_i + 2x)^3}{D_i^3} - 1 \right) \right\rangle^+ \right] \quad (V-6)$$

Afin d'effectuer ces calculs et pour obtenir une expansion comparable à celle mesurée sur les mortiers, on a fixé la porosité du mortier ( $p$ ), l'épaisseur de l'attaque des grains siliceux ( $t$ ), le coefficient volumique du gel ( $n$ ) et la distance ( $x$ ) jusqu'à laquelle le gel doit diffuser dans la pâte de ciment (voir tableau (V-3)). Ces calculs sont effectués à l'aide du logiciel de calcul technique Maple 12. Les expansions calculées sont présentées dans le tableau V-4 et reportées dans la figure (V-5 (a)-(b)).

Tableau V-3 les paramètres du model d'expansion.

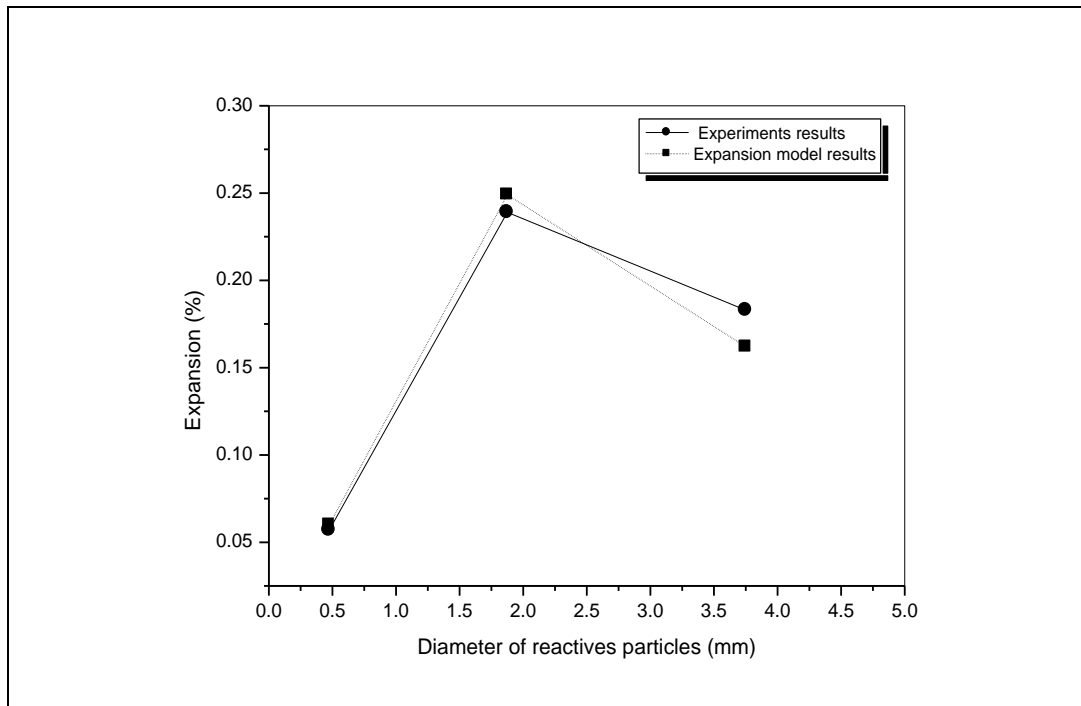
paramètres	$K$	$N$	$T$	$x$	$P$
<b>PO</b>	0.2	2	0.25mm	0.35 mm	25%
<b>NQ</b>	0.2	2	0.25 mm	0.38 mm	25%



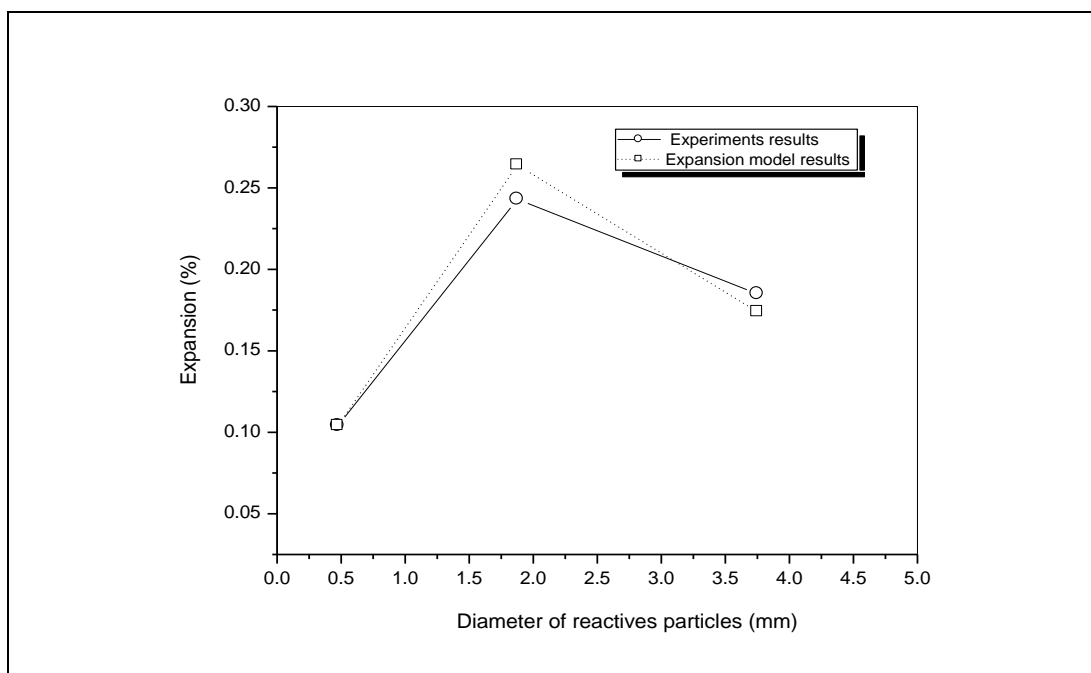
Les Figures (V-6) et (V-7) comparent les résultats expérimentaux de l'expansion des mortiers contenant une taille de particules réactives avec les résultats calculés par le modèle d'expansion; ils ont une forme similaire de la courbe d'expansion. On observe que le modèle simule bien les données expérimentales. La fraction la plus fine de l'agrégat (0,15 - 0,80 mm) ne donne pas la plus grande expansion, ils ont montré une expansion d'alcali-réaction égal à (0,060% pour les PO) et (0,104% pour NQ). Les barres contenant la fraction d'agrégat (1,25 - 2,50 mm) ont donné la plus grande expansion (0,249% pour les PO) et (0,264% pour NQ), pour les barres contenant la fraction d'agrégat (2,50 - 5,0 mm), l'expansion d'alcali-réaction mesurée est (0,162% pour les PO) et (0,174% pour NQ).

Pour résumer, le modèle développé dans cette section suppose que l'augmentation de l'expansion d'alcali-réaction avec la taille des particules réactives peut être expliquée par l'effet de la porosité connectée à l'agrégat réactif. Le volume de gel a été calculé selon l'équation. (V-2) et le volume de porosité à être rempli autour de chaque particule de diamètre  $D_i$  avant que l'expansion commence est donnée par l'équation. (V-5). L'expansion de mortier a été alors prise comme le changement volumétrique de l'agrégat en raison du volume de gel ne figurant pas dans la zone poreuse (Equation. (V-3)). Cette relation simple permet à l'expansion finale d'être tracer en fonction du granulat réactif. Les petites particules réactives, en raison de leur distribution uniforme dans la pâte, pourraient créer un gel réparti

régulièrement dans tout le mortier. Ce gel va migrer dans la matrice et être facilement adapté par la porosité de la pâte de ciment, sans créer l'expansion du mortier. Cependant, le gel produit autour des grandes particules réactives pourrait générer des pressions considérables conduisant à des gonflements macroscopiques importantes si l'épaisseur de la porosité était faible.



**Fig. (V- 6)** Expansion du mortier en fonction du diamètre  $D_i$  des particules réactives: comparaison entre l'expérimentale et le model d'expansion pour (PO).



**Fig. (V- 7)** Expansion du mortier en fonction du diamètre  $D_i$  des particules réactives: comparaison entre l'expérimentale et le model d'expansion pour (NQ).

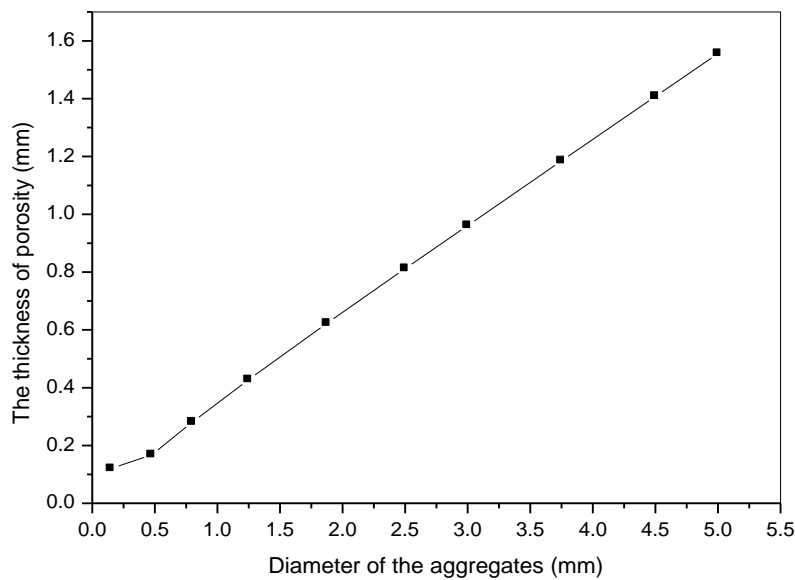
En utilisant ce modèle, l'épaisseur de la zone poreuse peut être estimée en fonction du diamètre des particules réactives de façon que le gel puisse être créé tout à fait adapté à la porosité du mortier. Dans ce cas, le volume du gel créé est égal à la somme du volume du gel produit par l'ensemble au cours de sa réaction et du volume de la porosité dans laquelle le gel peut diffuser:

$$V_i^s = \left[ \frac{\pi D_i^3}{6} - \frac{\pi (D_i - 2t)^3}{6} \right] \cdot n + \left[ \frac{\pi (D_i + 2x)^3}{6} - \frac{\pi D_i^3}{6} \right] \cdot P \quad (\text{V-7})$$

A partir de l'Equation. (7), la distance "x" est calculée

$$x = \frac{\sqrt[3]{\left[ \left( \frac{n-1}{P} \right) \cdot (D_i^3 - (D_i - 2t)^3) \right] + D_i^3 - D_i}}{2} \quad (\text{V-8})$$

Les résultats des calculs avec l'étable de logiciels de calcul technique 12 sont tracés dans la figure. (V-7).



**Fig. (V- 8)** La distance "x" dans laquelle le gel doit diffuser dans la pâte de ciment pour être complètement adaptée par la porosité en fonction du diamètre  $D_i$  pour (PO) et (NQ).

La Fig. (V-8) donne l'évolution de "x" et montre que le gel produit dans les petits grains a besoin de moins de distance pour être adapté par la porosité de la pâte, cependant l'épaisseur devient important pour les grains supérieurs à 1 mm. Par conséquent, les résultats des calculs de ce modèle indique que, s'il existe une grande quantité de gel, "x" doit être grande pour empêcher l'expansion des particules réactives.

## **V.5. CONCLUSION**

Dans cette partie, une combinaison d'expériences et de la modélisation a été utilisée pour étudier les effets de la taille de l'agrégat réactif sur l'expansion d'alcali-réaction. Pour cette raison, trois fractions granulométriques de deux granulats réactifs ont été étudiées dans les mortiers et les mesures expérimentales ont été présentées. Les résultats indiquent que, pour les éprouvettes (40x40x160 mm) immergées dans la solution de NaOH 1M à 80°C, aucune expansion n'a été mesurée pour les barres de mortier contenant la classe granulaire (0,15 - 0,80 mm) alors que les barres de mortier contenant la classe granulaire (1,25 - 2,50 mm) montrent la plus grande expansion, surtout à un âge précoce et pour les barres contenant la classe granulaire (2,50 - 5,0 mm), l'expansion mesurée est (0,183% pour PO) et (0,185% pour NQ).

Le modèle d'expansion développé simule les résultats expérimentaux bien et résume les principales observations expérimentales; il permet à certains phénomènes importants liés à la taille de l'agrégat réactif à interpréter facilement. Les plus petites particules réactives ne causent pas l'expansion, mais les plus grandes provoquent une grande expansion. De plus, il calcule l'épaisseur de la zone poreuse nécessaire de reprendre la totalité du volume du gel créé par les agrégats réactifs dans la pâte de ciment en fonction du diamètre des grains. Les résultats indiquent que l'épaisseur augmente avec le diamètre des granulats réactifs.

## CONCLUSION GENERALE

L'alcali- Réaction affecte de nombreux ouvrages de génie civil, c'est une réaction chimique entre les phases siliceuses réactives de granulats et les alcalins du ciment. Le produit de la réaction (gel) conduit à l'apparition d'une pression de gonflement provoquant l'expansion irréversible et à la fissuration du béton. Elles nécessitent la présence simultanée de trois facteurs :

- un granulat potentiellement réactif.
- une teneur en alcalins dans la phase liquide interstitielle supérieure à un seuil critique.
- L'humidité relative supérieure à 80 - 85%.

Il existe trois types d'alcali-réaction :

- La réaction alcali-silice, il s'agit de la plus courante.
- La réaction alcali-carbonate, elle implique des granulats contenant des inclusions argileuses, le mécanisme de gonflement est lié à l'absorption d'eau des argiles ;
- La réaction alcali-silicate, elle est semblable à la réaction alcali-silice mais de cinétique plus lente, elle est très rare.

Les désordres observables sur les ouvrages correspondent à des phénomènes de faïençage, de fissuration majeure, de cônes d'éclatement. Ces désordres peuvent être associés à des exsudations de gel au travers des fissures créées. Ils constituent un ensemble de signes qui, pris séparément, ne sont pas caractéristiques de cette pathologie. En générale, ils apparaissent quelques années ou dizaines d'années après la construction.

Du point de vue mécanique, la résistance à la traction est plus affectée que la résistance à la compression et le module d'élasticité peut subir des diminutions importantes avant même que des expansions significatives soient observées.

Le mécanisme réactionnel des alcali-réactions ainsi que le mécanisme d'expansion sont très complexes et ils sont sujet de recherche pour beaucoup de chercheurs.

En France, le LCPC (Laboratoire central des ponts et chaussées) a publié, en 1994, un guide élaboré par un comité technique et un groupe d'experts. Ce guide propose une démarche préventive permettant de limiter les risques d'apparition de phénomènes d'alcali-réaction dans les ouvrages. Depuis sa publication et son utilisation par les prescripteurs, le nombre de cas révélés a diminué.



Ainsi, les additions minérales tel que les cendres volantes à faible teneur en chaux, le laitier hydraulique cimentaire, les fumées de silice, l'argile broyé, le méta-kaolin et la pouzzolane naturelle sont des moyens de prévention très efficace pour réduire l'expansion causée par les alcali-réaction. L'expansion provoquée au sein des éléments de structure peut tout au plus être ralentie, mais pas stoppée.

L'objectif de cette thèse est d'analyser et modéliser le phénomène d'alcali-réaction dans les bétons. D'abord on a montré la richesse des travaux menés dans le cadre de la modélisation de cette réaction. Les modèles disponibles dans la littérature peuvent être séparés en deux classes distinctes. Les modèles «mésoscopiques» et les modèles «macroscopiques».

Les « modèles mésoscopiques » se basent sur des mécanismes réactionnels probables pour prédire l'évolution des espèces ioniques dans le matériau et de l'avancement de la réaction au niveau local. Ils se ramènent à l'étude d'un V.E.R. au moyen d'hypothèses adéquates. Le principal mécanisme réactionnel est la diffusion (dans les granulats et dans la matrice). La plupart des modèles supposent l'existence d'une zone de porosité connectée que le gel doit combler pour mettre en pression la matrice. Ils prennent tous en compte l'influence de la taille des granulats réactifs.

Les « modèles macroscopiques» se basent sur des phénomènes physiques observés expérimentalement pour décrire l'évolution du gonflement interne (ou des contraintes générées) induit par la réaction en fonction de données observables (chargement, température, humidité relative...). Ils permettent de décrire l'évolution du gonflement (en fonction des apports hydriques, du chargement...) dans le but d'évaluer les conséquences structurelles de la réaction.

Après on a étudié l'effet de la taille des particules des granulats réactifs sur l'expansion alcali réactive en effectuant une combinaison entre l'expérimentale et la simulation numérique, pour cette raison, des résultats expérimentaux issus des travaux de Duyou Lu et al. (2006) ont été utilisés pour les servir en tant que base de données expérimentales dans notre simulation numérique. Les granulats sélectionnés étaient le grès quartzeux de Montréal, Canada (PO) et le quartzite de la Norvège (NQ), ils ont été écrasés et tamisés en trois classes granulaires: (0,15- 0,80 mm), (1,25 - 2,50 mm) et (2,50 - 5,0 mm) puis trois mortiers ont été étudiés, chaque mortier contient une seule taille des particules réactives du granulat. Les résultats ont montré que pour les barres de mortier contenant la classe granulaire (0,15-0,80), mm aucune

expansion n'a été mesurée alors que les barres de mortier contenant la classe granulaire (1,25-2,50) mm montrent la plus grande expansion, surtout à un jeune âge et pour les barres contenant la classe granulaire (2,50-5,0) mm, l'expansion mesurée est (0,183% pour PO) et (0,185% pour NQ).

Puis on a proposé un modèle qui résume les principales observations expérimentales et permet la modélisation de l'effet de la taille des particules réactives sur l'expansion. Ces résultats sont similaires aux résultats expérimentaux, les barres contenant la classe granulaire (0,15-0,80) mm n'ont pas montré une expansion alcali réactive, les barres contenant la classe granulaire (1,25-2,50) mm ont donné une plus grande expansion et les barres contenant la classe granulaire (2,50- 5,0) mm ont donné une expansion égale à (0,162% pour les PO) et (0,174% pour NQ). Donc, On observe que le modèle proposé a représenté les données expérimentales bien.

A partir de ce modèle on a pu également calculer l'épaisseur de la zone poreuse nécessaire de reprendre tout le volume du gel créé par les grains réactifs dans la pâte de ciment en fonction du diamètre des grains. Les résultats indiquent que l'épaisseur augmente avec le diamètre des grains réactifs.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] ASTM C1260-94. 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 2002, Vol 04.02, American Society for Testing and Materials, 1916 Race Street, Philadelphia, PA 19103.
- [2] BAZANT, Z.P., STEFFENS, A. (2000), “Mathematical model for kinetics of alkali silica reaction in concrete”, *Cem. Conc. Res.*, 30 (3), 419-428.
- [3] BÉRUBÉ Marc-André, FOURNIER Benoit (1993) “Canadian Experience with Testing for Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete” *Cement and Concrete Composites* 15, P.27-47.
- [4] CAPRA, B., BOURNAZEL, J.P., (1996) “Modelling of alkali aggregate reaction induced mechanical effects in concrete”, *Proceedings of the International Conference on Concrete: from material to structure*, pp. 260-276, Arles, France.
- [5] CAPRA.B (1997), « modélisation des effets mécaniques induits par les réactions alcali-granulats », thèse de doctorat, ENS Cachan.
- [6] CAPRA, B., BOURNAZEL, J.P., (1998) “Modeling of induced mechanical effects of alkali-aggregate reactions”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, pp. 251-260.
- [7] CHATTERJI, S., JENSEN, A., THAULOW, N., CHRISTENSEN, P. (1986) “Studies of alkali-silica reactions – part 3 – mechanism by which NaCl and Ca(OH)<sub>2</sub> affect the reaction”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 16, pp. 246-254.
- [8] CHATTERJI, S., THAULOW, N. (2000), “Some fundamentals of alkali-silica reaction”, *11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in concrete*, Québec City, Québec, 21-29.
- [9] CSA A23.2-25A-00, Detection of alkali silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars.

[10] CSA A23.2-00: Methods of Test for concrete, Canadian Standards Association, Mississauga (ON).

[11] DENT GLASSER L.S, KATAOKA N (1981), « the chemistry of alkali-aggregate reactions », Cement and Concrete Research, vol 11, P.1-9.

[12] DENT-GLASSER, L.S., KATAOKA, N. (1981), “The chemistry of alkali-aggregate reaction”, 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in concrete, Cape Town, South Africa, 252/23.

[13] DRON, R. BRIVOT, F. (1992) “Thermodynamic and kinetic approach to the alkali-silica reaction – part 1 – concepts”, Cement and Concrete Research, Vol. 22, pp. 941-948.

[14] DUYOU Lu, FOURNIER Bénéoit, GRATTAN-BELLEW P.E. (2006), “Evaluation of accelerated test methods for determining alkali-silica reactivity of concrete aggregates” Cement and Concrete Composites 28, P. 546-554.

[15] FURUSAWA, Y., OHGA, H., UOMOTO, T. (1994) “An analytical study concerning prediction of concrete expansion due to alkali-silica reaction”, Proceedings of the 3rd International Conference on Durability of Concrete, pp. 757-779, Nice, France.

[16] GARCIA-DIAZ.E, BULTEEL.D, COMBY.I, BERNARD.F (2006), “ Un mécanisme d’endommagement multi-échelle pour la réaction alcali- silice” Département Génie Civil des Mines de Douai, France.

[17] GRAVEL Clermont (2001), « contribution à l’étude des mécanismes des réactions alcalis-granulats », thèse de doctorat, université de Sherbrooke.

[18] KAROUIE Azddine (2007), «Utilisation des cendres volantes pour la prévention des désordres dus à l’alcali-réaction », thèse de doctorat, Ecole HASSANIA des Travaux publics.

[19] LARIVE, C. (1997) « Quand le béton se met à gonfler », La recherche, n°319.

[20] LI, K. (2002) « Modélisation chimico-mécanique du comportement des bétons affectés par la réaction alcali-silice et expertise numérique des ouvrages dégradés », Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 215p.

[21] LOMBARDI, J., PERRUCHOT, A., MASSARD, P, (2000) « Experimental evaluation of composition and volume variability of Ca-Si gels, first products of alkali silica reaction (ASR) », Compte rendu de la 11e conférence internationale sur les réactions alcalis granulats (ICAAR), Québec, pp. 81-87.

[22] LU, D., FOURNIER, B. AND GRATAN-BELLEW, P.E. (2006), “Evaluation of accelerated test methods for determining alkali-silica reactivity of concrete aggregates”, Cem. Conc. Comp., 28, 546–554.

[23] MOISSON Marc (2005), « contribution a la maitrise de la réaction alcali-silice par ajout de fines de granulats réactifs dans le béton », thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

[24] MONNIN Yann (2005), « méthodologie pour décrire le gonflement multi-échelle de calcaires siliceux soumis à la réaction alcali-silice dans le matériau béton », thèse de doctorat, université d'ARTOIS

[25] MULTON, S., CYR, M., SELLIER, A., DIEDERICH, P. AND PETIT, L. (2010), “Effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion”, Cem. Conc. Res., 40, 508–516.

[26] MULTON, S., CYR, M., SELLIER, A., LEKLOU, N. AND PETIT, L. (2008), “Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion”, Cem. Conc. Res., 38, 350-359.

[27] NELSON K.C. (1999), “cracking due to Alkali-Silica Reaction and its effect on durability properties of concrete », thèse de doctorat, université de Toronto.

[28] NILSSON, L.O. (1983) “Moisture effects on the alkali-silica reaction”, Proceedings of the International Conference on Alkalis in Concrete, pp. 201-208, Copenhagen, Danemark.

[29] OBERHOLSTER, R.E., DAVIES, G. (1986), "An accelerated method for testing the potential alkali reactivity of siliceous aggregates", *Cem. Conc. Res.*, 16, 181-9.

[30] POOLE, A.B. (1992) "Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete, in *The alkali-silica reaction in Concrete*", edited by R. N. Swamy, Blackie, London, England.

[31] POYET Stéphane (2003), « étude de la dégradation des ouvrages en béton atteints par la réaction alcali-silice : approche expérimentale et modélisation numérique multi-échelles des dégradations dans un environnement hydro-chemo-mécanique variable », thèse de doctorat, université de Marne-La-Vallée.

[32] POYET, S., SELLIER, A., CAPRA, B., FORAY, G., TORRENTI, J.M., COGNON, H. AND BOURDAROT, E. (2007), "Chemical modelling of Alkali Silica reaction: influence of the reactive aggregate size distribution", *Mat. Struct*, 40(2), 229–239.

[33] RIVARD Patrice (2002), « Contribution à l'étude de l'expansion résiduelle des bétons atteints de réactivité alcalis-silice », thèse de doctorat, université de Sherbrooke.

[34] RIVARD patrice, BALLIVY Gérard (2003), « application de méthodes pétrographiques à l'évaluation de l'état de dégradation du béton affecté de l'alcali-réaction », bulletin des laboratoires des ponts et chaussées-244-245, REF 4475, P.73-90, université de Sherbrooke.

[35] SELLIER, A. (1995), « Modélisations probabilistes du comportement de matériaux et de structures en génie civil », Thèse de doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 150p.

[36] SELLIER, A., BOURNAZEL, J.P. AND MÉBARKI, A. (1996), "Modelling the alkali aggregate reaction within a probabilistic frame-work, in: A. Shayan (Ed.)", 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Melbourne, Australia, 694–701.

[37] SELLIER, A., CAPRA, B., TOGNAZZI, G., POYET. S. (1999), « Couplage dégradation–diffusion, chapitre 8 de la communication : La dégradation des bétons–couplage fissuration–dégradation chimique », sous la direction de J.-M. Torrenti, O. Didry, J.-P. Ollivier, F. Plas dans la série : communications en mécanique, éditions Hermès.

[38] SHELDON langdon (1998), « The effects of Alkali-Aggregate reactivity on the mechanical properties of concrete », thèse de magister, Université de Newfoundland.

[39] THOMAS Michael, FOURNIER Benoit, FOLLIARD Kevin, IDEKER Jason, SHEHATA Medhat (2006), “Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silicareaction in concrete” Cement and Concrete Research 36, P.1842–1856.

[40] UOMOTO, T., FURUSAWA, Y., OHGA, H. (1992) “A simple kinetics based model for predicting alkali-silica reaction”, Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in concrete, pp. 1077-1084, London, England

[41] WANG, H., GILLOTT, J.E. (1991), “Mechanisms of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide”, Cem. Conc. Res., 21, 647-654.

[42] WISSAM ELIAS TOUMA (2000), « Alkali-silica reaction in Portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives », thèse de doctorat, Université de Texas AtAustin.

[43] XI, Y., JENNINGS, H. (1997) “Shrinkage of cement paste and concrete modelled by a multi-scale effective homogeneous theory”, Materials and Structures (RILEM), Vol. 30, pp. 329-339.

[44] XI, Y., SUWITO, A., WEN, X., MEYER C., JIN W. (1999) “Testing and modeling alkali-silica-reaction and the associated expansion of concrete”, Mechanics of quasi-brittle materials and structures, pp. 217-232, Ed. Hermès Science Publications.

[45] ZDENEKP. Bazant, ALEXANDER Steffens (2000), “Mathematical model for kinetics of alkali silica reaction in concrete” Cement and Concrete Research 30, P. 419-428.

