



HAL
open science

Réactions de gonflement interne au béton : origines et conséquences mécaniques à l'échelle du matériau et de la structure

Stéphane Multon

► **To cite this version:**

Stéphane Multon. Réactions de gonflement interne au béton : origines et conséquences mécaniques à l'échelle du matériau et de la structure. Génie civil. Université Paul Sabatier - Toulouse 3, 2016. tel-02155297

HAL Id: tel-02155297

<https://hal.insa-toulouse.fr/tel-02155297>

Submitted on 13 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Mémoire

En vue de l'obtention de

l'Habilitation à Diriger les Recherches de l'Université de Toulouse

Délivrée par :
Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présenté et soutenu par :

Stéphane Multon

le 24 juin 2016

Titre :

**Réactions de gonflement interne au béton : origines et
conséquences mécaniques à l'échelle du matériau et de la structure**

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED MEGEP : Génie Civil

Unité de recherche :

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions

Jury :

**Benoît Bary
David Bulteel
Jean-Michel Torrenti
Benoît Fournier
Eric Garcia-Diaz
Alain Sellier
François Toutlemonde
Eric Bourdarot**

**Rapporteur
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur
Invité**

Remerciements

Je tiens à remercier les collègues et les étudiants qui m'ont permis de développer les travaux présentés dans ce mémoire :

- Les collègues avec qui j'ai travaillé et encadré des étudiants en master et en doctorat : Prof. Alain Sellier, Prof. Martin Cyr, Prof. Anaclet Turatsinze, Prof. Hacène Houari, Prof. Bernard Perrin, Dr. Jérôme Verdier et Dr. Laurie Buffo-Lacarrière.
- Les doctorants que j'ai co-encadrés et qui sont aujourd'hui docteurs : Dr. Xiao Xiao Gao, Dr. Hassina Bouzabata, Dr. Narintsoa Ranaivomanana et Dr. Marie Salgues.
- Les étudiants de master que j'ai co-encadrés,
- Les doctorants que je co-encadre actuellement : Hognon Sogbossi, Pierre Morenon et Yvan Thiebault.

Je souhaite également remercier Ginette Arliguie et Gilles Escadeillas directrice et directeur du Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions pendant la période où la majorité de ces travaux ont été réalisés. Je remercie l'ensemble des collègues, enseignants, enseignants-chercheurs, chercheurs, personnels techniques et administratifs des établissements et du laboratoire que j'ai côtoyés pendant ces quatorze années passées à Toulouse, avec une mention spéciale pour Michel Mouret, mon collègue de bureau depuis presque dix ans, en particulier pour nos discussions rugbyistiques, mais portant également sur bien d'autres sujets.

Enfin, je remercie l'ensemble du jury qui a accepté de lire et commenter ce travail :

- Les rapporteurs : Dr. Benoît Bary, Prof. David Bulteel et Prof. Jean-Michel Torrenti,
- Les examinateurs : Prof. Eric Garcia-Diaz, Prof. Benoît Fournier, Dr. François Toutlemonde, M. Eric Bourdarot, et Prof. Alain Sellier.

Parmi les membres du jury, je remercie notamment François Toutlemonde, pour toute la rigueur qu'il a su me transmettre en assurant mon encadrement de thèse, Benoît Fournier, pour les nombreux échanges et son accueil lors de ma venue à l'université Laval pour la soutenance de thèse de Léandro Sanchez, Eric Bourdarot qui a suivi mon travail depuis mon doctorat au LCPC et Alain Sellier, qui après avoir été mon enseignant à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan en 1995 et 1996, m'a permis de progresser dans la modélisation des mécanismes des réactions de gonflement interne au béton depuis mon arrivée à Toulouse en 2003.

Sommaire

1 ^{ère} partie : Curriculum-vitae	4
2 ^{ème} partie : Synthèse des activités de recherche	21
Introduction	21
Chapitre 1 : Origines de la formation des phases expansives	24
1. Généralités	24
2. Mécanismes de formations de gels d'alcali-réaction	26
3. Mécanismes de formation différée d'ettringite dans les bétons.....	38
4. Synthèse des lois d'avancement.....	45
Chapitre 2 : Conséquences mécaniques des expansions à l'échelle du matériau	47
1. Généralités	47
2. Déformation imposée d'expansion ou pression.....	48
3. Fissuration, endommagement et fluage	53
4. Couplages gonflement, fissuration, contrainte.....	62
5. Synthèse	70
Chapitre 3 : Conséquences des expansions à l'échelle de la structure	72
1. Généralités	72
2. Structures de laboratoire soumises à des gradients hydriques	73
3. Comportement de structures armées en laboratoire.....	81
4. Méthodologie d'évaluation des structures endommagées	87
Bilan et perspectives.....	96
Bibliographie	105

1^{ère} partie : Curriculum-vitae

1. Etat civil

Stéphane Multon

Né le 3 novembre 1974 à Longjumeau (91)

Nationalité française

Marié (à Claire Oms), 2 enfants (Joaquim et Josep, 9 et 11 ans)

Maître de conférences

Université Paul Sabatier

118 route de Narbonne

31062 Toulouse Cedex 9

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions

135, Avenue de Rangueil

31077 Toulouse Cedex 4

Coordonnées

Téléphone : 05 61 55 67 05

Courier électronique : stephane.multon@univ-tlse3.fr

Page internet : <http://multon.stephane.free.fr>

2. Formation et diplômes

Décembre 2003 **Doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée** (Ecole Doctorale Matériaux – Ouvrages – Durabilité – Environnement – Structures), effectué au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, spécialité Génie Civil.

Juin 1999 **DEA Matériaux Avancés - Ingénierie des Structures et des Enveloppes, Ecole Normale Supérieure de Cachan - ENPC**, mention Bien

Juin 1998 **Agrégation de Génie Civil**, option Structures et Ouvrages

Juin 1995 **Admission à l'ENS Cachan**, département Génie Civil, sur concours T

3. Postes

Depuis 2006	Maître de conférences – Université Paul Sabatier
2004-2006	Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche Institut Universitaire de Technologie « A » de Toulouse
2003-2004	Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse
1999-2003*	Doctorant : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Moniteur : Université de Marne-la-Vallée

* : interruption de septembre 2000 à juin 2001 pour cause de Service National.

4. Activités d'enseignement

Mes activités d'enseignements ont débuté en 1998, après l'obtention de l'agrégation de Génie Civil (option Structures et Ouvrages), par des vacances au sein de l'Institut Universitaire de Formation des Maîtres (IUFM) à Cachan (94) dans le cadre de la préparation au CAPET. Elles se sont poursuivies par un poste de moniteur à l'université de Marne-la-Vallée (77) puis par des postes d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER) à l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) et à l'Institut Universitaire de Technologie (IUT) de Toulouse (31). Depuis juin 2006, j'enseigne en tant que maître de conférences au sein de l'Université Paul Sabatier de Toulouse (31) depuis la 1^{ère} année de Licence jusqu'à la 2^{ème} année de Master. J'effectue également des vacances dans le cadre de la filière de Génie Civil du Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM) de Toulouse.

Les disciplines enseignées pendant ces quinze années font partie des enseignements usuels des 'Structures' du génie civil (Mécanique, Matériaux, Calculs de structures du Génie Civil), mais également des 'Equipements' (Thermique, Acoustique, Chauffage). Afin de former les étudiants aux techniques informatiques de tout niveau (tableur, programmation, éléments finis), je participe également à ces enseignements au sein des formations de Génie Civil de l'université.

L'enseignement qui aura marqué ces quinze premières années est celui du Béton Armé, par lequel j'ai commencé en 1998 à l'IUFM (40 heures de cours et de TD dans le cadre de la préparation du CAPET). J'ai poursuivi son enseignement en tant que moniteur (40 heures de cours et de TD, 12 heures de Projet en 2^{ème} année de l'IUP de Marne-la-Vallée), puis en tant qu'ATER (35 heures de TP et 15 heures de projet en 4^{ème} année de l'INSA de Toulouse).

Depuis 2006, je l'enseigne à l'université Paul Sabatier de Toulouse (28 heures de cours et TD en 2^{ème} année de Master 'Conception des Ouvrages d'Art et des Bâtiments') et dans la filière Génie Civil du CNAM de Toulouse (40 heures de cours et de TD). J'ai également donné deux stages de formation continue en bureau d'études (40 heures dans le bureau d'études BERT à Tarbes (65) et 20 heures au BETEM à Toulouse). J'ai effectué cet enseignement dans le cadre du règlement BAEL (Béton Armé aux Etats Limites) jusqu'en 2006 puis à l'Eurocode 2.

Le détail des enseignements effectué fait l'objet des deux parties suivantes, la première retraçant les enseignements effectués de 1998 à 2006 (en tant que moniteur, ATER et vacataire) et la suivante en tant que maître de conférences (depuis 2006).

4.1 En tant que moniteur, A.T.E.R et vacataire (de 1998 à 2006)

De 1998 à 2006, mes activités d'enseignements ont été dispensées dans le cadre de :

- demi-poste d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche à l'IUT « A » de Toulouse (2004-2006),
- poste entier d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche à l'INSA de Toulouse (2003-2004),
- monitorat au sein de l'Université de Marne-la-Vallée (IUT / IUP – 1999-2000 et 2001-2003),
- vacations à l'IUFM de Créteil (Préparation au CAPET – 1998-1999).

Le Tableau 1 présente l'ensemble des enseignements effectués dans cette période.

Tableau 1 : Activités d'enseignement de 1998 à 2006

Discipline	Enseignement	Niveau		Type et durée
Matériaux	Matériaux et bétons	IUT	1 ^{ère} année	10h TD / 48h TP
		INSA	2 ^{ème} année	17h TP
		INSA	3 ^{ème} année	49h TP
Mécanique	Mécanique des milieux continus	INSA	3 ^{ème} année	20h TD
	Mécanique des structures	IUT	2 ^{ème} année	24h TP
		INSA	3 ^{ème} année	12h TD / 35h TP
	Risque et sécurité	IUP	2 ^{ème} année	16h TD
	Mécanique des sols	IUP	3 ^{ème} année	8h Cours / 16h TD
INSA		4 ^{ème} année	35h TP	
Calcul de structures de Génie Civil	Béton Armé (au BAEL)	IUP	2 ^{ème} année	18h Cours / 20h TD / 12h Projet
		INSA	4 ^{ème} année	35h TP / 15h Projet
		IUFM		40h TD

Physique des ambiances	Thermique	IUT	2 ^{ème} année	24h TD
		IUP	2 ^{ème} année	72h TP
	Acoustique	IUT	2 ^{ème} année	18h TP
Construction	Topographie	IUT	1 ^{ère} année	24h TP
	Excel	IUT	1 ^{ère} année	60h TP
Informatique	Programmation VBA	IUT	1 ^{ère} année	30h TP
	Analyse numérique	INSA	2 ^{ème} année	12h TP

4.2 En tant que maître de conférences et vacataire (depuis 2006)

Depuis 2006, j'enseigne dans les formations de Génie Civil de l'Université Paul Sabatier de Toulouse avec trois axes principaux : la mécanique, le calcul des structures de Génie Civil et l'informatique appliquée (Tableau 2 et Tableau 3). En 2007, j'ai réalisé un cours de construction sur les ponts (12 heures devenues 9 heures en 2011) pour les étudiants de 1^{ère} année de Licence afin qu'ils aient une meilleure connaissance des activités du Génie Civil. Dans le cadre des diplômes de Licence et de Master, j'ai encadré des étudiants lors de leurs stages en entreprise. Actuellement, je participe principalement au suivi des stages de cinq mois effectués en fin de cursus universitaire par les étudiants de 2^{ème} année du Master Conception des Ouvrages d'Art et des Bâtiments (COAB). Dans cette période, deux bureaux d'études m'ont sollicité afin de compléter la formation de leurs salariés aux calculs de structures en Béton Armé (Tableau 4). Enfin, je réalise une conférence en relation avec mes travaux de recherche sur la durabilité des structures, le vieillissement des bétons et l'impact sur la tenue mécanique d'un barrage (1h30) dans le cadre de la 3^{ème} année du cycle d'ingénieur (M2) de l'option Sciences de l'eau et environnement de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications (ENSEEIH) de Toulouse.

Tableau 2 : Activités d'enseignement de l'année universitaire 2015-2016

Discipline	Enseignement	Niveau		Type et durée
	Mécanique des milieux continus	Licence	3 ^{ème} année	8h Cours / 18h TD
Mécanique				
	Thermomécanique (EC1-5)	Master	1 ^{ère} année	12h Cours / 12h TD
Calcul de structures de Génie Civil	Béton Armé (EC2)	Master	2 ^{ème} année	28h Cours / TD
		CNAM	Cycle Prépa.	40h Cours / TD
	Instabilité et Construction métallique (EC3)	Master	1 ^{ère} année	24h TD
Construction	Les Ponts	Licence	1 ^{ère} année	9h Cours / TD

	Excel	Licence	3 ^{ème} année	8h TP
Informatique	Programmation Octave	Licence	3 ^{ème} année	22h TP
	Robot : Plaques et Coques	Master	2 ^{ème} année	12h TD

Tableau 3 : Autres activités d'enseignement réalisées entre 2006 et 2012

Discipline	Enseignement	Niveau		Type et durée
Matériaux	Ciments et Bétons	Licence	3 ^{ème} année	10h TD
Mécanique	Mécanique des milieux continus	Préparation à l'agrégation		12h TD
Physique des ambiances	Chauffage	Master	1 ^{ère} année	8h Cours / 8h TD
Construction	Du pont romain au viaduc de Millau	Licence	3 ^{ème} année	24h Cours
Informatique	Langage C	Licence	3 ^{ème} année	18h TD

Tableau 4 : Formations continues réalisées entre 2006 et 2012

Discipline	Enseignement	Type et durée
Béton Armé (EC2)	Formation continue pour le BETEM à Toulouse	20h Cours
Béton Armé (BAEL)	Formation continue pour le BE BERT à Tarbes	40h Cours / TD

5. Activités de recherche

5.1 Thématiques et laboratoires

En termes de recherche, les thématiques auxquelles je me suis plus particulièrement consacrées concernent les causes et les conséquences mécaniques de l'apparition de phases néoformées au sein des matériaux de construction dont principalement le béton. Mes travaux de doctorat, qui ont été effectués au sein du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) de Paris sous la direction de François Toutlemonde, m'ont permis de me consacrer pendant trois ans aux conséquences mécaniques de l'alcali-réaction dans les structures.

Depuis 2004, j'ai poursuivi mes travaux de recherche au sein du Laboratoire des Matériaux et Durabilité des Construction de Toulouse en collaboration avec plusieurs professeurs de ce laboratoire. En ce qui concerne l'alcali-réaction, je me suis plus particulièrement consacré aux mécanismes de gonflements à l'échelle du matériau tout en participant à l'élaboration d'une méthodologie d'évaluation d'ouvrages endommagés avec les professeurs Alain Sellier et Martin Cyr. Dans le cadre de la compréhension des mécanismes des réactions de gonflement interne, j'ai été amené à travailler sur la réaction sulfatique interne d'un point de vue

expérimental et numérique avec le professeur Alain Sellier. Je me suis également intéressé aux mécanismes et aux conséquences du gel dans des terres cuites et des bétons avec les professeurs Alain Sellier et Bernard Perrin. Toutes ces manifestations de phases néoformées au sein du béton ont pour conséquences des contraintes importantes de traction sur des échelles de temps importantes amenant une fissuration du matériau plus ou moins rapide. Ainsi, j'ai complété ces travaux par des recherches sur le fluage en traction du béton avec le professeur Anaclet Turatsinze pour l'aspect expérimental et le professeur Alain Sellier pour la modélisation. Enfin, les apports d'eau étant de première importance en termes de potentiel d'expansion des phases néoformées, des travaux sur la détermination de l'impact de l'endommagement sur la perméabilité des bétons, menés avec le docteur Jérôme Verdier, sont venus complétés récemment mes activités centrées sur les conséquences structurelles des réactions de gonflement interne.

5.2 Encadrements

5.2.1 Thèses en cours (3)

Actuellement, je participe à l'encadrement de trois étudiants en thèse :

Yvan Thiebaut

Evaluation des structures en béton armé et/ou précontraintes atteintes de réaction sulfatique interne

Co-encadrement avec Dr. L. Buffo-Lacarrière, Prof. A. Sellier, L. Boutillon (VINCI), L. Linger (VINCI) et E. Meyer (VINCI)

Financement : VINCI Construction France, Cofiroute, Concrete

Pierre Morenon

Modélisation des réactions de gonflement interne des bétons avec prise en compte des couplages hydro-mécaniques et chimiques, démarrage le 1^{er} décembre 2014.

Co-encadrement avec Prof. A. Sellier, E. Bourdarot (EDF-CIH), E. Grimal (EDF-CIH) et F. Hamon.

Financement : *Electricité De France - Centre d'Ingénierie Hydraulique.*

Hognon Sogbossi

Etude de l'évolution de la perméabilité du béton en fonction de son endommagement : transposition des résultats de laboratoire à la prédiction des débits de fuite sur site, démarrage le 1^{er} octobre 2014

Co-encadrement avec Dr. J. Verdier.

Financement : ANR ENDE (Porteurs LMDC : J-P. Balayssac, J. Verdier)

5.2.2 Doctorat (4)

Dans le cadre de ces recherches, j'ai participé à l'encadrement des quatre thèses soutenues suivantes :

Marie Salgues (2013)

Modélisation numérique des effets structuraux des *réactions sulfatiques internes* : application aux barrages en béton, soutenue le 27 novembre 2013.

Co-encadrement avec Prof. A. Sellier, E. Bourdarot (EDF-CIH) et E. Grimal (EDF-CIH)

Financement : *Electricité De France - Centre d'Ingénierie Hydraulique*.

Narintsoa Ranaivomanana (2013)

Etudes expérimentale et numérique des interactions entre *fluage en traction* et endommagement du béton, thèse de l'université de Toulouse, soutenue le 21 mai 2013.

Co-encadrement avec Prof. A. Turatsinze

Financement du programme expérimental : *Andra* (G. Camps, X. Bourbon)

Hassina Bouzabata (2012)

Contribution à l'étude de l'influence des désordres dus aux *réactions de gonflement interne* sur le comportement des bétons, thèse de l'université de Constantine, Algérie, soutenue le 24 juin 2012.

Co-encadrement avec Prof. H. Houari (Université de Constantine)

Xiao Xiao Gao (2010)

Contribution to the requalification of *Alkali Silica Reaction (ASR)* damaged structures: Assessment of the ASR advancement in aggregates, thèse de l'université de Toulouse, soutenue le 19 décembre 2010.

Co-encadrement avec Prof. M. Cyr et Prof. A. Sellier

5.2.3 Master Recherche (9)

J'ai également encadré neuf étudiants en master de recherche :

Yvan Thiebaut (2015)

Evaluation de structures en béton armé atteintes de phénomènes de gonflement dû à la réaction sulfatique interne (RSI), co-encadrement avec Dr. L. Buffo-Lacarrière et Prof. A. Sellier, financé par *VINCI* (L. Boutillon, L. Linger).

Pierre Morenon (2014)

Modélisation des couplages hydro-chemo-mécaniques : application aux barrages atteints par la réaction alcali-granulats, co-encadrement avec M. Salgues et Prof. A. Sellier, financé par *EDF-CIH* (E. Grimal, E. Bourdarot).

Wahabi Ali Mze (2013)

Modélisation des bétons soumis au gel, financé par *Lafarge LCR* (E. Brouard, E. Stora).

Youssef El Bitouri (2011)

Etude des phénomènes de gel-dégel dans les matériaux à base d'argiles cuites, co-encadrement avec Prof. B. Perrin, financé par le Centre Technique des Matériaux Naturels de Construction (CTMNC).

Marie Salgues (2010)

Vers une modélisation des effets structuraux de la réaction sulfatique interne, co-encadrement avec Prof. A. Sellier, financé par *EDF-CIH* (E. Grimal, E. Bourdarot).

Duong Khanh Tran (2008)

Modélisation numérique d'une loi de comportement poro-mécanique du béton, co-encadrement avec Prof. A. Sellier.

Rani Hamrouche (2007)

Effets structuraux de la formation d'ettringite différée dans les bétons, co-encadrement avec Prof. A. Sellier.

Paco Diederich (2006)

Etude de l'influence de la taille des granulats sur les gonflements d'alcali-réaction, co-encadrement avec Prof. M. Cyr et Prof. A. Sellier.

Nordine Leklou (2005)

Etude de l'influence de la taille des granulats et de la concentration en alcalins sur les gonflements d'alcali-réaction, co-encadrement avec Prof. M. Cyr et Prof. A. Sellier, financé par *EDF-R&D* (L. Petit).

5.3 Publications

Ces travaux de recherches ont fait l'objet de vingt-neuf (29) articles en revues internationales à comité de lecture, deux (2) articles en revues nationales et vingt-quatre (24) communications en conférences internationales avec actes publiés. L'ensemble des références de ces publications sont données ci-dessous.

5.3.1 Articles en revues internationales à comité de lecture (29)

2016

1. Multon S., Sellier A., 2016, Multi-scale analysis of alkali-silica reaction (ASR): Impact of alkali leaching on scale effects affecting expansion tests, *Cement and Concrete Research*, 81, 122-133.
2. Sellier A., Multon S., Buffo-Lacarrière L., Vidal T., Bourbon X., Camps G., 2016, Concrete creep modelling for structural applications: non-linearity, multi-axiality, hydration, temperature and drying effects, *Cement and Concrete Research*, 79, 301-315.

2014

3. Sanchez L.F.M., Multon S., Sellier A., Cyr M., Fournier B., Jolin M., 2014, Comparative study of a chemo-mechanical modeling for alkali silica reaction (ASR) with experimental evidences, *Construction and Building Materials*, 72, 301-315.
4. Salgues M., Sellier A., Multon S., Bourdarot E., Grimal E., 2014, DEF modelling based on thermodynamic equilibria and ionic transfers for structural analysis, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18:4, 377-402.

2013

5. Ranaivomanana N., Multon S., Turatsinze A., 2013, Tensile, compressive and flexural basic creep of concrete at different stress levels, *Cement and Concrete Research*, Vol. 52, 1–10.
6. Gao X.X., Cyr M., Multon S., Sellier A., 2013, A three-step method for the recovery of aggregates from concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 45, 262–269.
7. Gao X.X., Cyr M., Multon S., Sellier A., 2013, A comparison of methods for chemical assessment of reactive silica in concrete aggregates by selective dissolution, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 37, 82–94.
8. Gao X.X., Multon S., Cyr M., Sellier A., 2013, Alkali–silica reaction (ASR) expansion: Pessimism effect versus scale effect, *Cement and Concrete Research*, Vol. 44, 25–33.
9. Ranaivomanana N., Multon S., Turatsinze A., 2013, Basic creep of concrete under compression, tension and bending, *Construction and Building Materials*, Vol. 38, 173–180.

2012

10. Bouzabata H., Multon S., Sellier A., Houari H., 2012, Effects of restraint on expansion due to delayed ettringite formation, *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, 1024–1031.
11. Bouzabata H., Multon S., Sellier A., Houari H., 2012, Swelling due to alkali-silica reaction and delayed ettringite formation: Characterisation of expansion isotropy and effect of moisture conditions, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, 349–356.
12. Multon S., Sellier A., Perrin B., 2012, Numerical analysis of frost effects in porous media. Benefits and limits of the finite element poroelasticity formulation, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 36, 438–458.

2011

13. Gao X.X., Multon S., Cyr M., Sellier A., 2011, Optimising an expansion test for the assessment of alkali-silica reaction in concrete structures, *Materials and Structures*, Vol. 44, 1641–1653.
14. Perrin B., Vu N.A., Multon S., Volland T., Ducroquetz C., 2011, Mechanical behaviour of fired clay materials subjected to freeze–thaw cycles, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, 1056–1064.

2010

15. Bourdarot E., Sellier A., Multon S., Grimal E., 2010, A review of continuum damage modelling for dam analysis. Main steps of a fruitful university-industry collaboration leading to an integrated model applicable to AAR affected structures, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 14, 805–822.
16. Multon S., Toutlemonde F., 2010, Effect of moisture conditions and transfers on alkali silica reaction damaged structures, *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, 924–934.
17. Multon S., Cyr M., Sellier A., Diederich P., Petit L., 2010, Effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion, *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, 508–516.
18. Grimal E., Sellier A., Multon S., Le Pape Y., Bourdarot E., 2010, Concrete modelling for expertise of structures affected by alkali aggregate reaction, *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, 502–507.

2009

19. Multon S., Sellier A., Cyr M., 2009, Chemo–mechanical modeling for prediction of alkali silica reaction (ASR) expansion, *Cement and Concrete Research*, Vol. 39, 490–500.

20. Sellier A., Bourdarot E., Multon S., Cyr M., Grimal E., 2009, Combination of Structural Monitoring and Laboratory Tests for Assessment of Alkali-Aggregate Reaction Swelling: Application to Gate Structure Dam, ACI Materials Journal, Vol. 106, 281-290.

2008

21. Multon S., Cyr M., Sellier A., Leklou N., Petit L., 2008, Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion, Cement and Concrete Research, Vol. 38, 350-359.
22. Multon S., Barin J-X., Godart B., Toutlemonde F., 2008, Estimation of the Residual Expansion of Concrete Affected by Alkali Silica Reaction", ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 20, 54-62.

2006

23. Multon S., Seignol J-F., Toutlemonde F., 2006, Chemo-mechanical assessment of beams damaged by Alkali-Silica Reaction, ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, 500-509.
24. Multon S., Toutlemonde F., 2006, Effect of Applied Stresses on Alkali-Silica Reaction Induced Expansions, Cement and Concrete Research, Vol. 36, 912-920.
25. Multon S., Seignol J-F., Toutlemonde F., 2006, Concrete beams submitted to various moisture environments, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 22, 71-83.

2005

26. Siegert D., Multon S., Toutlemonde F., 2005, Resonant frequencies monitoring of Alkali Aggregate Reaction (AAR) damaged concrete beams, Experimental Techniques, Vol. 29, 37-40.
27. Multon S., Seignol J-F., Toutlemonde F., 2005, Structural behavior of concrete beams affected by Alkali-Silica Reaction", ACI Materials Journal, Vol. 102, 67-76.

2004

28. Multon S., Toutlemonde F., 2004, Water distribution in concrete beams, Materials and Structures, Vol. 37, 378-386.
29. Multon S., Merliot E., Joly M., Toutlemonde F., 2004, Water distribution in beams damaged by Alkali-Silica Reaction : global weighing and local gammadensitometry measurements, Materials and Structures, Vol. 37, 282-288.

5.3.2 Articles en revues nationales avec comité de lecture (2)

2005

1. Multon S., Seignol J-F., Bourdarot E., Jeanpierre A., Toutlemonde F., 2005, Effets structuraux de l'alcali-réaction – Apports d'une expérimentation sur éléments de structures à la validation de modèles, Revue Européenne de Génie Civil, Vol 9, 1219-1247.

2003

2. Derkx F., Multon S., Toutlemonde F., 2003, Instrumentation innovante des couplages hydromécaniques au sein du béton pour l'évaluation des structures atteintes d'alcali-réaction, Essais Industriels, Vol. 27, 29-37.

5.3.3 Congrès internationaux à comité de lecture avec actes publiés (24)

2015

1. Ranaivomanana N., Multon S., Turatsinze A., Sellier A., 2015, Numerical modeling of basic creep of concrete under different types of load, 4th International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR 2015), Leipzig, Allemagne.

2013

2. Regis P., Multon S., Sellier A., 2013, Simulação numérica dos efeitos de retração, fluência e expansão do concreto em corpos-de-prova em diferentes condições ambientais / Numerical simulation of the effects of shrinkage, creep and expansion of concrete in specimens in different environmental conditions, Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2013, IBRACON, Brazil.

2012

3. Ranaivomanana N., Multon S., Turatsinze A., 2012, Comparative study of compressive and tensile basic creep behavior of concrete, Proceedings of the 10th International Symposium, Brittle Matrix Composites 10, edited by A.M. Brandt, J. Olek, M.A. Glinicki and C.K.Y. Leung, Warsaw, Poland, pp. 243–252.
4. Salgues M., Sellier A., Multon S., Bourdarot E., Grimal E., 2012, Delayed Ettringite Formation modeling under various conditions of temperature and pH, 1st International Congress on Durability of Concrete, Trondheim, Norvège.
5. Sellier A., Buffo-Lacariere L., Multon S., Vidal T., Bourbon X., 2012, Nonlinear basic creep and drying creep modelling, SCS 2012: numerical modeling Strategies for Sustainable Concrete Structures, Aix-en-Provence, France, FP_314.
6. Gao X.X., Multon S., Cyr M., Sellier A., 2012, Contribution to the requalification of Alkali-Silica Reaction (ASR) damaged structures: Assessment of the ASR advancement in aggregates, Proceedings of the 14th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction, Austin, Texas, USA.
7. Gao X.X., Multon S., Cyr M., Sellier A., 2012, Scale effect of alkali-silica reaction (ASR) expansion, Proceedings of the 14th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction, Austin, Texas, USA.
8. Martin R-P., Renaud J-C., Multon S., Toutlemonde F., 2012, Structural Behavior of plain and reinforced concrete beams affected by combined AAR and DEF, Proceedings of the 14th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction, Austin, Texas, USA.
9. Sellier A., Buffo-Lacariere L., Multon S., Salgues M., Souyis P., Kolani B., 2012, Recent modelling advances to predict Early age behaviour and prevent induced disorders in concrete structures, proceedings of the RILEM-JCI international workshop Concrack 3, Paris. Edited by F. Toutlemonde & J.M. Torrenti, RILEM Proceedings PRO 85, ISBN 978-2-35158-125-4, pp 11-20.

2009

10. Sellier A., Bourdarot E., Grimal E., Multon S., Cyr M., 2009, Structural Monitoring and Residual Reactive Silica Measurement Combination for Finite Element Analysis of Structures Affected By ASR, ACI Special Publication, SP 266-09, pp. 109-126.
11. Grimal E., Sellier A., Multon S., Bourdarot E., 2009, Modeling of Structures Affected by Alkali Aggregate Reaction, ACI Special Publication, SP 266-08, pp. 101-108.
12. Gao XX., Cyr M., Multon S., Sellier A., 2009, Comparative study of methods for the measurement of reactive silica in aggregates, 1st SBEIDCO (1st Int. Conf. on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries - Oran), 391-398.

2008

13. Multon S., Cyr M., Sellier A., Diederich P., Petit L., 2008, Effect of aggregate size and alkali content on ASR expansion, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Trondheim, Norvège.

14. Grimal E., Sellier A., Multon S., Le Pape Y., Bourdarot E., 2008, Concrete modeling for expertise of structures affected by alkali aggregate reaction, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Trondheim, Norvège.
15. Sellier A., Bourdarot E., Multon S., Cyr M., Grimal E., 2008, Assessment of the residual expansion for expertise of structures affected by AAR, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Trondheim, Norvège.

2004

16. Multon S., Dubroca S., Seignol J-F., Toutlemonde F., 2004, Flexural Strength of Beams Affected by ASR, Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Pékin, Chine, pp. 1181-1190.
17. Multon S., Seignol J-F., Toutlemonde F., 2004, Effects of Late Water Supply on ASR Progress in Damaged Structures, Proceedings of the 12th Int. Conf. on AAR, Pékin, Chine, pp. 754-763.
18. Multon S., Barin F-X., Godart B., Toutlemonde F., 2004, Estimation of the Residual Expansion of Concrete Damaged by AAR, Proceedings of the 12th Int. Conf. on AAR, Pékin, Chine, pp. 956-963.
19. Toutlemonde F., Multon S., Seignol J-F., Bourdarot E., Jeanpierre A., 2004, Extensive data basis for validating ASR models: a French contribution to the re-assessment of ASR-affected structures, Proceedings of the 12th Int. Conf. on AAR, Pékin, Chine, pp. 31-40.
20. Seignol J-F., Barbier F., Multon S., Toutlemonde F., 2004, Numerical simulation of ASR affected beams: comparison to experimental data, Proceedings of the 12th Int. Conf. on AAR, Pékin, Chine, pp. 198-206.
21. Multon S., Seignol J-F., Toutlemonde F., 2004, Concrete Girders Under Severe Drying, 4th Int. Conf. on Concrete under Severe Conditions: Environment and loading, Séoul, Corée, pp. 1965-1972.
22. Multon S., Leclainche G., Bourdarot E., Toutlemonde F., 2004, Alkali-Silica Reaction in specimens under multi-axial mechanical stresses, Proceedings of the 4th Int. Conf. on Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading, Séoul, Corée, pp. 2004-2011.

2003

23. Multon S., Seignol J-F., Toutlemonde F., 2003, Large girders subjected to ASR, Proceedings of the 6th CANMET/ACI Int. Conf. on Durability of Concrete, Thessaloniki, Greece, pp. 299-318.

2000

24. Larive C., Toutlemonde F., Joly M., Laplaud A., Derkx F., Merliot E., Multon S., Bourdarot E., Prené S. and Jeanpierre A. 2000, Structural Effects of ASR in France on Real and Laboratory Structures, Proceedings of the 11th Int. Conf. on AAR, Quebec, Canada, pp. 979-988.

5.3.4 Relectures pour des revues à comité de lecture (30)

Des revues internationales à comité de lecture m'ont contacté pour réaliser des relectures d'articles (30 depuis 2006). Ces revues sont : Cement and Concrete Research (10), Computers and concrete (3), Materials and Structures (3), American Concrete Institute – Structural and Materials Journal, Construction and Building Materials, International Journal of Solids and Structures, Engineering Structures, International Journal of Physical Sciences, Journal of Advanced Concrete Technology, Journal of Zhejiang University-Science A.

5.4 Relations scientifiques

5.4.1 Relations internationales

Les travaux de recherches sur l'alcali-réaction et la réaction sulfatique interne ont fait l'objet d'échanges avec des enseignant-chercheurs travaillant dans des universités étrangères :

Benoit Fournier, Professeur de l'Université Laval (Québec) et **Léandro Sanchez**, Professeur adjoint de l'Université d'Ottawa (Canada) (2012-2015)

- 2015 : stage d'un mois de Léandro Sanchez à Toulouse sur le recalcul du viaduc Du Vallon Charest par le modèle structure développé au LMDC,
- 2014 : participation au jury de thèse de Léandro Sanchez et journée de présentations des travaux de modélisation du LMDC (méthodologies d'évaluation de structures endommagées par une réaction de gonflement interne (réactions alcali-granulats et réaction sulfatique interne) et modélisations dédiées) à l'Université Laval,
- 2012 : stage de trois mois de Léandro Sanchez portant sur l'utilisation de modèles pour l'alcali-réaction.

Paulo de Araujo Regis, Professeur de l'Université Fédérale de Pernambuco, Recife (Brésil), collaboration portant sur l'utilisation du modèle rhéologique d'alcali-réaction de Grimal (2012-2015) :

- 2015 : présentation d'un cycle de trois (3) conférences (Mechanical effect of ASR, Modelling of structural effects of DEF, Methodology of requalification of ASR damaged structures) et travaux dirigés d'initiation à l'utilisation du code Elements Finis Castem (10 heures) à l'Université Fédérale de Pernambuco, Recife (Brésil),
- 2012-2013 : accueil de Paulo Regis pour une période de 18 mois au LMDC avec le professeur A. Sellier.

Victor Saouma, Professeur de l'Université de Boulder, Colorado (Etats-Unis), coordinateur du comité RILEM TC ISR (2014-2015)

- participation au comité RILEM TC ISR : *Prognosis of deterioration and loss of serviceability in structures affected by alkali-silica reaction*

Hassina Bouzabata (2009-2015)

Doctorat de l'université de Constantine (Algérie) codirigée avec le professeur Hacène Houari : doctorat portant sur les effets mécaniques de l'alcali-réaction, de la réaction sulfatique interne et de leur couplage (18 mois de thèse, puis plusieurs stages – 1 mois pour la poursuite des travaux).

Tao Wu (2012)

Doctorant à l'université Leibniz de Hanovre (Allemagne) sous la direction du professeur Peter Wriggers : stage portant sur l'élaboration d'un modèle mésoscopique pour l'alcali-réaction (5 jours).

5.4.2 Relations industrielles

Les travaux de recherches sur l'ensemble des thématiques ont fait l'objet d'échanges avec des ingénieurs et des chercheurs d'entreprises formalisés par des contrats :

Laurent Boutillon, Lionel Linger et Edouard Meyer (2015-2017)

VINCI Construction France, Cofiroute, Concrete, contrat de 72,0 k€ pour le doctorat 'Evaluation des structures en béton armé et/ou précontraintes atteintes de réaction sulfatique interne' de Yvan Thiebaut, co-encadré avec Dr. L. Buffo-Lacarrière et Prof. Alain Sellier.

Laurent Boutillon, Lionel Linger et Edouard Meyer (2015)

VINCI Construction France, contrat de 5,5 k€ pour le master 'Evaluation de structures en béton armé atteintes de phénomènes de gonflement dû à la réaction sulfatique interne' de Yvan Thiebaut, co-encadré avec Dr. L. Buffo-Lacarrière et Prof. Alain Sellier.

Eric Bourdarot et Etienne Grimal (2014-2016)

Centre d'Ingénierie Hydraulique d'Electricité de France, contrat de 62,0 k€ pour le doctorat 'Modélisation des réactions de gonflement interne des bétons avec prise en compte des couplages hydro-mécaniques et chimiques' de Pierre Morenon, co-encadré avec Prof. Alain Sellier.

Eric Bourdarot et Etienne Grimal (2014)

Centre d'Ingénierie Hydraulique d'Electricité de France, contrat de 10,0 k€ pour le master 'Réactions de gonflement interne des bétons avec prise en compte des couplages hydro-mécaniques' de Pierre Morenon, co-encadré avec Prof. Alain Sellier.

Eric Brouard et Eric Stora (2013)

Lafarge LCR, contrat de 6,0 k€ pour l'étude de master 'Modélisation des bétons soumis au gel' de Wahabi Ali Mze.

Eric Bourdarot et Etienne Grimal (2011-2013)

Centre d'Ingénierie Hydraulique d'Electricité de France, contrat de 57,5 k€ pour le doctorat 'Modélisation numérique des effets structuraux des réactions sulfatiques internes : application aux barrages en béton' de Marie Salgues, co-encadré avec Prof. Alain Sellier.

Xavier Bourbon et Guillaume Camps (2007-2011)

Andra, contrat de 34,5 k€ dans le cadre du lot 5.2.3 du groupement de laboratoire (GL) Andra pour le financement du programme expérimental du doctorat 'Etudes expérimentale et numérique des interactions entre fluage en traction et endommagement du béton' de Narintsoa Ranaivomanana, co-encadré avec Prof. Anaclet Turatsinze.

Yann Le Pape et Laurent Petit (2005)

Département Recherche et Développement d'Electricité de France, contrat de 10,5 k€ pour le développement d'un bâti de fluage de traction de mortier, avec Prof. Anaclet Turatsinze et Prof. Alain Sellier.

Laurent Petit (2004)

Département Recherche et Développement d'Electricité de France, contrat de 6,0 k€ pour le programme expérimental du master 'Etude de l'influence de la taille des granulats et de la concentration en alcalins sur les gonflements d'alcali-réaction' de Nordine Leklou, co-encadré par Prof. Martin Cyr et Prof. Alain Sellier.

5.4.3 Relations nationales

Les relations avec d'autres chercheurs d'organismes publics au niveau national sont de deux natures : des comités de suivis de thèse (3) et la participation à un projet de l'Agence Nationale de Recherche (1).

Comités de suivi de thèse :

Badreddine Kchakech (2012-2015)

Influence de la phase d'échauffement sur le développement des expansions de la réaction sulfatique interne, directeur de thèse : Dr. F. Toutlemonde (Ifsttar), coencadrement : Dr. R-P. Martin et O. Omikrine-Métalssi.

Renaud-Pierre Martin (2008-2010)

Analyse sur structures modèles des effets mécaniques de la réaction sulfatique interne au béton, directeur de thèse : Dr. F. Toutlemonde (Ifsttar), thèse de l'université Paris-Est, soutenue le 14 décembre 2010.

Etienne Grimal (2004-2007)

Caractérisation des effets de gonflements provoqués par la réaction alcali-silice sur le comportement mécanique d'une structure en béton, directeur de thèse : Prof. A. Sellier, thèse de l'université Paul Sabatier de Toulouse, soutenue le 07 février 2007.

Projet ANR :

2013-2017

participation au projet ANR MOSAIC Mesoscopic Scale durability Investigations for Concrete, coordonné par Jean-Baptiste COLLIAT du Laboratoire de Mécanique de Lille (LML).

5.5 Participation à des jurys de thèse

J'ai participé à quatre jurys de thèses en tant qu'examinateur :

Léandro Sanchez (2014)

Contribution to the assessment of damage in aging concrete infrastructures affected by alkali-aggregate reaction, directeur de thèse : Prof. B. Fournier, co-directeur : Prof. M. Jolin, thèse de l'Université de Laval, Québec, soutenue le 28 mars 2014.

Alain Giorla (2013)

Modelling of Alkali-Silica Reaction under Multi-Axial Load, directeur de thèse : Prof. K. Scrivener, co-directeur : Dr. C. Dunant, thèse de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, soutenue le 30 septembre 2013.

Laurent Charpin (2013)

Modèle micromécanique pour l'étude de l'anisotropie de la réaction alcali-silice, directeur de thèse : Prof. A. Ehlacher, thèse de l'Université Paris-Est, soutenue le 05 juillet 2013.

Etienne Grimal (2007)

Caractérisation des effets de gonflements provoqués par la réaction alcali-silice sur le comportement mécanique d'une structure en béton, directeur de thèse : Prof. A. Sellier, thèse de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, soutenue le 07 février 2007.

6. Activités d'intérêt collectif

6.1 En relation avec l'enseignement

En tant que maître de conférences de l'université Paul Sabatier de Toulouse, mes activités d'ordres administratif et pédagogique au sein des formations de Génie Civil sont ou ont été les suivantes :

depuis septembre 2010 :

- Responsable du Master 1 Génie Civil de l'université Paul Sabatier de Toulouse,
- Responsable de la filière CNAM Génie Civil – Toulouse,
- Responsable du site web des formations génie civil de l'université Paul Sabatier : <http://www-geniecivil.univ-tlse3.fr/> (gestion partagée avec Thierry Vidal, maître de conférences, pour la 3^{ème} année de licence).

depuis septembre 2007 :

- Responsable des stages du Master 2 Professionnel de Génie Civil 'COAB : Conception des Ouvrages d'Art et des Bâtiments' de l'université Paul Sabatier de Toulouse, responsable du diplôme : Prof. Alain Sellier.

entre septembre 2011 et juin 2013 :

- Co-responsable de la Licence Professionnelle REH : Rénovation Energétique de l'Habitat (de septembre 2011 à juin 2013) avec Marie Coutand (maître de conférences - IUT Toulouse).

6.2 En relation avec la recherche

En tant que maître de conférences du Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, mes activités d'ordres administratif et scientifique au sein des activités de recherche du laboratoire sont ou ont été :

depuis septembre 2006 :

- Co-responsable scientifique de la division transfert du Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse, avec Alexandra Bertron (maître de conférences - IUT Toulouse) et Prof. Gilles Escadeillas.

depuis 2005 :

- Responsable du site Web <http://www-lmdc.insa-toulouse.fr/> (création et mise en ligne en 2005) et de pages dédiées :
 - o à des conférences organisées par le laboratoire (6) : colloque du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton ((RF)2B, Toulouse, 2006), Rilem Technical Committee PAE : Performance of Cement-based Materials in Aggressive Aqueous Environments (Toulouse, 2009), journées de Fiabilité des Matériaux et des Structures - JFMS'10 (Toulouse, 2010), assises nationales de la construction en terre crue (Toulouse, 2011), conférence NoMaD (nouveaux matériaux et durabilité – Toulouse, 2012), congrès Diagnobéton (Toulouse, 2014).
 - o à des projets ANR (1) : EVADEOS – évaluation non destructive pour la prédiction de la Dégradation des structures et l'Optimisation de leur Suivi (2011-2015).

entre janvier 2011 et décembre 2015

- Co-responsable de l'axe transversal 'ASPRO : Animation Scientifique et PROspectives' avec Stéphane Laurens (maître de conférences - INSA Toulouse). Les objectifs de cet axe sont l'animation scientifique et le suivi des doctorants (via une présentation bibliographique en fin de 1^{ère} année et une présentation des travaux de recherches au milieu de 2^{ème} année de thèse).

2^{ème} partie : Synthèse des activités de recherche

Introduction

Les premiers grands ouvrages en béton, dont certains encore en fonctionnement, datent de la seconde partie du XIX^{ème} siècle. Ce matériau est devenu en moins d'un siècle le matériau le plus utilisé pour la réalisation de structures de bâtiments et de génie civil. Du fait de la pérennité de certains grands ponts et aqueducs romains, l'image que renvoient ces grands équipements auprès du public est celle d'ouvrages pouvant fonctionner sur de très longues durées (plusieurs vies d'homme). Pourtant, après une trentaine d'années de grande production d'ouvrages en béton dans l'immédiateté de l'après seconde guerre mondiale, les ingénieurs ont constaté qu'une grande partie des ouvrages construits ne pourraient pas continuer à remplir leurs fonctions sans des entretiens plus ou moins lourds. Malgré son utilisation croissante, la connaissance de ce matériau 'béton', ou plus exactement de ces matériaux 'béton' du fait de la grande diversité des constituants couramment utilisés, en tant qu'élément constitutif de grands ouvrages exposés à des environnements plus ou moins sévères datait alors de moins d'un siècle. L'étude de la durabilité de ces matériaux, qui avait commencé dès l'observation des premiers désordres inattendus sur ouvrages, s'est alors avérée indispensable et son importance n'a cessé de croître depuis.

La thématique de la durabilité des ouvrages en béton regroupe aujourd'hui les études d'un grand nombre de pathologies concernant aussi bien les bétons que les aciers dans leurs rôles d'armatures passives ou actives. En tant que doctorant, chercheur et encadrant, mes travaux de recherche ont concerné et concernent encore l'étude des mécanismes d'expansion dans le béton et de leurs conséquences mécaniques à l'échelle du matériau et de la structure. Une des particularités qui distingue les réactions de gonflement interne, de type réactions alcali-granulats (ou alcali-réaction) et réaction sulfatique interne, vis-à-vis des autres pathologies du béton est leur localisation dans les ouvrages. Là où les désordres créés par la plupart des problèmes de durabilité des matériaux de construction commencent en surface et ne concernent pendant de longues périodes qu'une partie superficielle des structures, les réactions de gonflement interne se développent directement au cœur des ouvrages et peuvent donc remettre en cause profondément leur comportement mécanique. Les travaux développés dans le présent mémoire, démarrés lors de mon stage de DEA en 1999 (Multon, 1999) et poursuivis pendant mon doctorat de 1999 à 2003 au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Paris (LCPC devenu IFSTTAR, doctorat cofinancé par Electricité de France – EDF, Département d'Etudes et de Recherche et Centre d'Ingénierie Hydraulique de Chambéry), ont débuté par l'analyse du comportement mécanique de structures endommagées par l'alcali-réaction (Multon, 2004). En 2003, j'ai poursuivi l'étude de l'alcali-réaction au Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse (LMDC) dans le cadre de développement de modélisations. Les connaissances acquises en termes de mécanismes et de conséquences de formations de produits, tels que les gels d'alcali-réaction, dans un matériau poreux comme le béton, m'ont alors conduit à effectuer des recherches sur le comportement au gel de terres cuites puis sur le comportement de bétons atteints par la réaction sulfatique

interne qui conduisent tous deux à la mise en pression d'un milieu poreux par l'apparition de phases néo-formées (respectivement la glace et l'ettringite dite différée). Enfin, l'importance des contraintes de traction lors de la fissuration de ces matériaux mis sous pression sur des échelles de temps étendues m'a amené à travailler sur le comportement de fluage des bétons, en particulier sous sollicitation de traction.

La finalité de ces travaux est d'estimer la pérennité d'une structure, en partie ou en totalité, soumise à une mise en pression par la production de phases néoformées au sein du matériau la constituant. A ce titre, plusieurs approches complémentaires sont nécessaires : l'expertise sur ouvrages, l'expérimentation en laboratoire et la modélisation. Lors de l'expertise d'un ouvrage endommagé, les trois approches ne peuvent pas toujours être réalisées. Il est alors important d'avoir des outils permettant d'obtenir l'expertise la plus précise possible malgré le manque de données sur un de ces points. Cet objectif ne peut être atteint que par une bonne compréhension de l'ensemble des phénomènes mis en jeu, tant du point de vue physique et chimique, que du point de vue mécanique. Les couplages entre ces phénomènes ont également des conséquences fortes sur les résultats observés. Ils doivent donc être compris, analysés et pris en compte dans des modélisations aussi prédictives que possibles. Malgré des origines différentes, ces mécanismes de dégradation ont comme point commun le caractère expansif conduisant à la mise en pression du matériau puis à sa fissuration. Afin d'appréhender le comportement mécanique des structures endommagées par la présence d'expansion en leur sein, il est tout d'abord nécessaire de comprendre l'origine des pressions, et donc d'étudier les mécanismes physiques et chimiques responsables de la production de nouvelles phases dans le matériau. Cette première partie du travail a donc consisté à évaluer de manière la plus réaliste possible l'origine des augmentations de volume dans la porosité des matériaux concernés (granulat ou pâte de ciment) en estimant l'avancement de la production des phases néoformées susceptibles d'être produites en fonction des constituants et de l'environnement du matériau (volume de gels d'alcali-réaction, d'ettringite différée ou de glace).

Au fur et à mesure de la formation de ces produits, le matériau est mis en pression ce qui conduit, à plus ou moins long termes, à sa fissuration. La conséquence finale pour le matériau est donc un endommagement plus ou moins important. L'accroissement de la pression, qui est graduel en fonction des cinétiques de formation des produits, est lente (plusieurs années) dans le cas d'ouvrages atteints par une alcali-réaction ou une réaction sulfatique interne. Dans ce cas, le matériau est soumis en parallèle au phénomène de fluage qui tend à accroître la déformabilité du matériau dans le temps et donc à diminuer les contraintes dans le matériau et finalement le risque de fissuration. La loi de comportement reliant contrainte et déformation dans le matériau doit donc prendre en compte l'endommagement, qui peut être anisotrope, particulièrement en présence de contraintes extérieures, et le fluage. La deuxième partie des travaux exposé dans ce mémoire a donc consisté à accroître les connaissances des phénomènes mécaniques ayant lieu au sein des matériaux atteints de gonflement (effet des contraintes, effet de la fissuration sur la perméabilité des produits formés, fluage de traction) et d'analyser les différences pouvant être observées entre les gonflements obtenus sur des éprouvettes en laboratoire et les déplacements observés sur ouvrages. Ces écarts ne peuvent

s'expliquer uniquement par les différences de conservation (température, humidité) ou par les conditions aux limites mécaniques de l'ouvrage et la compréhension de leur origine reste un enjeu majeur des recherches actuelles.

Une fois l'expansion du matériau évaluée et la loi de comportement des matériaux soumis à des gonflements internes établie dans le cadre d'hypothèses maîtrisées, l'évaluation de structures endommagées a pu être envisagée avec une confiance accrue. L'ensemble des connaissances acquises par les études physiques, chimiques et mécaniques, séparées et couplées, ont ainsi permis d'obtenir une compréhension fine des enjeux et des moyens nécessaires pour une expertise d'ouvrages atteints par de telles pathologies pouvant être finalisée par une étude numérique basée, par exemple, sur la mécanique des milieux poreux. Cette approche ne peut remettre en cause l'importance de valider ces connaissances par l'observation des mécanismes d'endommagement de structures réelles en conditions contrôlées de laboratoire qui sont indispensables à la validation des modélisations nécessaires à la réévaluation des structures endommagées. A l'issue de ces travaux, des méthodologies complètes d'expertises d'ouvrages et mettant en jeu, de préférence, les trois approches (observations et mesures sur structures, essais de laboratoire et modélisations) ont été envisagées et sont discutées dans la dernière partie de ce document.

Chapitre 1 : Origines de la formation des phases expansives

1. Généralités

La problématique générale de ce mémoire est l'endommagement des matériaux de génie civil, et, plus particulièrement du béton, par des mécanismes de type gonflement. Les pathologies de ce type sont nombreuses et de natures très diverses. Deux grandes catégories sont généralement distinguées :

- les gonflements causés par l'intrusion d'éléments externes au matériau par des phénomènes de transfert dans sa porosité et amenant la production de nouvelles phases à l'intérieur de celle-ci,
- les gonflements causés par des réactions chimiques d'attaques entre constituants du matériau, attaques suivies par la précipitation de phases nouvelles à des emplacements différents de ceux des espèces attaquées.

Du fait de la différence majeure de l'origine des réactifs, ces pathologies ont des conséquences très différentes pour les structures atteintes. En effet, dans le cas où la pathologie est liée à la progression des réactifs par transfert depuis les surfaces extérieures des ouvrages, les conséquences sont principalement localisées au niveau du parement de l'élément et peuvent favoriser la corrosion des armatures mais remettent rarement en cause la pérennité complète de structures massives. A l'opposée, les secondes ont généralement lieu dans la masse des structures ce qui crée des déformations et des déplacements importants dans le cas de grands ouvrages comme des barrages ou des ponts et peuvent ainsi présenter un risque de perte de stabilité pour les ouvrages. Le présent travail s'intéresse principalement au second type de réactions, parfois regroupées sous le terme générique de réactions de gonflement interne (RGI). Ces réactions sont multiples et les origines physiques ou chimiques des gonflements peuvent provenir des trois constituants majeurs des bétons : granulats, ciment ou eau.

Concernant les réactions de gonflements internes dont l'origine principale des expansions est la nature des granulats, il faut tout d'abord citer les réactions alcali-gratulats, qui regroupent les réactions alcali-silice, alcali-silicate et alcali-carbonate (Hadley, 1961; Swenson & Gillott, 1964; Grattan-Bellew et al., 2010). En présence d'alcalins, fournis principalement par le ciment, toute ou une partie de la silice, dite réactive, de ces granulats passent en solution sous l'action des ions hydroxydes et est alors à l'origine de la formation de nouveaux hydrates constitués de silicates, d'alcalins et de calcium provoquant l'expansion du béton (Dent Glasser & Kataoka, 1981; Poole, 1992; Dron & Brivot, 1993; Ichikawa & Miura, 2007). Pour la réaction alcali-carbonate, le terme pourrait être ambigu ; il pourrait en effet s'agir également d'une réaction alcali-silice, car les granulats susceptibles d'intervenir dans ce type de réactions contiendraient également de la silice réactive (Grattan-Bellew et al., 2010) mais cette conclusion ne fait pas l'unanimité des chercheurs. Les expansions peuvent également trouver leur source dans l'oxydation de sulfures contenus par les granulats (pyrites et pyrrhotites)

constituants le béton (Casanova et al., 1997). Cette oxydation provoque la libération d'ions sulfates dans la solution porale du béton qui, en réagissant avec les aluminates du ciment, sont à l'origine de la formation d'ettringite, causant des expansions pouvant remettre en cause la sécurité d'ouvrages tels que des barrages (Oliveira et al., 2013). De l'ensemble de ces réactions trouvant l'origine des expansions dans la nature des granulats, la réaction alcali-silice est une des plus répandues, endommageant des grands équipements (ponts, barrages) dans le monde entier (Corneille et al., 1991; Charlwood, 2009).

Les réactifs provoquant les expansions peuvent également ne provenir que du ciment sous des conditions de mise en œuvre et / ou d'environnement particulières. Ainsi, la formation d'ettringite différée ou réaction sulfatique interne (RSI) trouve son origine en fonction de la composition du ciment (source de sulfates, d'aluminates et d'ions calcium nécessaires à la formation d'ettringite), des conditions de cure (température élevée, supérieure à 70°C pendant une période donnée) et d'environnement (température et humidité relative) (Taylor et al., 2001). La formation de l'ettringite primaire qui s'effectue habituellement dans les bétons au jeune âge peut en effet être empêchée par des températures élevées (supérieures à 70°C) trouvant leur origine dans un échauffement industriel dans le cas de pièces préfabriquées ou dans l'élévation naturelle due à l'exothermie de l'hydratation du ciment dans le cas de pièces massives (éléments de ponts, barrages). Une fois la température redescendue à des valeurs courantes en condition d'ouvrages, l'ettringite peut de nouveau se former à conditions que les constituants (sulfates, aluminates, calcium et eau) soient réunis. La fixation de certaines de ces espèces dans les C-S-H et la présence d'alcalins peuvent empêcher ou retarder la présence simultanée de ces espèces en solution différant d'autant la précipitation de l'ettringite (Famy et al., 2001). Si elle peut se former en quantité importante, l'ettringite différée provoquera des pressions sur le béton entraînant des expansions et fissurations. La formation de thaumasite dans les bétons est un autre type d'attaque sulfatique ayant lieu en présence d'ions calcium et sulfate, de silice et d'ions carbonate à des températures généralement inférieure à 15°C (Bensted, 1999; Escadeillas & Hornain, 2008). Elle peut être d'origine interne. Cependant, contrairement aux attaques présentées ci-dessus, la formation de ce minéral ne provoque pas d'expansion mais une dégradation des C-S-H conduisant à l'endommagement du béton (Escadeillas & Hornain, 2008), en conséquence de quoi, il n'en sera pas fait mention plus longuement.

Enfin, les expansions du matériau peuvent provenir de l'eau contenue dans la porosité du matériau dans le cas d'éléments soumis à des températures inférieures à 0°C. La glaciation de l'eau liquide provoque un changement de volume qui induit des phénomènes de pression directement sur la matrice solide mais également dans l'eau liquide qui n'est pas encore atteinte par le gel (Powers, 1949; Powers & Helmuth, 1953). En effet, du fait des différences de tailles de pores dans les matériaux de constructions, le gel de l'eau n'a pas lieu de manière homogène mais commence par les pores de plus grandes dimensions pour s'étendre peu à peu aux pores plus petits si la baisse de température le permet (Scherer, 1999). Les gradients de pression induits par cette glaciation hétérogène est la cause de mouvements d'eau liquide entraînant également une dégradation du matériau (Powers & Helmuth, 1953). En outre, les déséquilibres thermodynamiques entre glace et solution liquide induisent des variations de pressions, et ainsi des mouvements de la solution liquide vers les sites gelés qui seraient la

cause de phénomènes de contraction (Coussy, 2005). Si l'endommagement du béton du fait du gel de l'eau s'apparente à une réaction de gonflement interne, le cas du gel est particulier. En effet, si l'eau est bien un des constituants majeurs du béton et que les conséquences sont des gonflements internes, les endommagements par glaciation de l'eau n'ont lieu que dans le cas où la porosité a un degré de saturation suffisant (Fagerlund, 1971), atteint dans la plupart des cas si de l'eau extérieure à l'élément remplit la porosité. En fin d'hydratation, le degré de saturation du béton est généralement inférieur à 90 % (sauf dans le cas de cures humides) ce qui est en-deçà du degré de saturation critique amenant des expansions dans le béton (Fagerlund, 1971). En outre, la température, en France, n'atteignant le seuil de glaciation que sur une profondeur limitée des ouvrages, la dégradation du béton par gel interne est principalement un phénomène de surface qui pénètre peu l'élément en béton (quelques centimètres), contrairement aux autres réactions qui ont des conséquences dans toute la masse de la structure endommagée.

2. Mécanismes de formations de gels d'alcali-réaction

L'alcali-réaction, réaction chimique endogène ayant lieu entre certaines formes de silice amorphe, mal cristallisée contenue par des granulats, dits réactifs, pouvant passer en solution en présence d'ions hydroxyles (fournis en particulier par les ciments à forte teneur en alcalins), cause la production de phases néoformées pouvant amener la fissuration du béton et la remise en cause de la pérennité des structures qui en sont atteintes. L'étude des mécanismes proposés par la littérature (Dent Glasser & Kataoka, 1981; Poole, 1992; Dron & Brivot, 1993; Bulteel et al., 2002; Ichikawa & Miura, 2007) permet de distinguer trois étapes majeures intervenant sur la cinétique de formation des gels d'alcali-réaction :

- la mise en présence des ions hydroxyles et de la silice réactive des granulats qui met en jeu des phénomènes de transport dans la pâte de ciment et dans les granulats,
- l'attaque de la silice par les ions hydroxyles,
- la précipitation des gels d'alcali-réaction.

Dans le cadre de la modélisation des conséquences de l'alcali-réaction, un des objectifs de l'étude des phénomènes ayant lieu à l'échelle microscopique est de déterminer la cinétique de formations des gels alcali-silice, liée à la réaction alcali-granat, et donc d'évaluer un degré d'avancement en relation avec les mécanismes physico-chimiques de la réaction. Plusieurs approches ont été retenues dans la littérature. Ainsi il est possible de quantifier expérimentalement le degré d'avancement par observations microscopiques (Haha et al., 2007) ou par attaques chimiques (Garcia-Diaz et al., 2006) ; cette quantification peut alors être utilisée comme données d'entrée des modèles mécaniques (Dunant & Scrivener, 2010). Une autre approche est d'utiliser des lois empiriques pour décrire cet avancement en fonction du temps et de paramètres nécessitant le calage sur des courbes de gonflements (Larive, 1998; Ulm et al., 2000; Poyet, 2003; Grimal, 2007).

Dans le prolongement des travaux de thèse de Stéphane Poyet (Poyet, 2003; Poyet et al., 2007), la méthodologie d'analyse retenue dans le travail présenté ici, a reposé sur deux étapes.

La première, expérimentale, a consisté à étudier, sur mortier, l'effet de la taille des granulats sur les cinétiques et l'amplitude des gonflements en collaboration avec EDF-DER (Multon et al., 2008b, 2010). Pour la seconde étape, un modèle physico-chimique a été développé afin d'analyser les résultats de la partie expérimentale (Multon et al., 2009). Le modèle contient une partie physico-chimique dont la finalité est de déterminer le nombre de moles de gels formées pendant les réactions alcali-granulats. Il permet d'analyser et donc de valider ou d'infirmer différents mécanismes théoriques proposés, d'améliorer les modèles empiriques et finalement d'utiliser le nombre de moles calculées en données d'entrée des modèles macroscopiques. Dans un premier temps, les mécanismes retenus pour reproduire la production de gels d'alcali-réaction sont décrits. Puis les résultats obtenus par le modèle sont analysés au regard d'observations expérimentales.

2.1 Approche multi-échelle des phénomènes chimiques

L'approche chimique retenue peut être résumée par un bilan des alcalins réalisé à deux échelles : celle du granulat et celle du béton (Figure 1).

A l'échelle du granulat, le bilan considère la diffusion dans les granulats et la fixation dans les gels. En effet, afin de représenter les différents types d'attaque de granulats, la diffusion ne peut être considérée comme le seul mécanisme pilotant la cinétique (Multon et al., 2009). Le modèle considère donc deux des mécanismes physiques présentés dans la littérature : la diffusion des ions hydroxyles et alcalins dans les granulats et la fixation des alcalins dans les gels formés après l'attaque de la silice par les ions hydroxyles (Figure 1).

A l'échelle du béton, une équation de diffusion des alcalins est utilisée pour quantifier les mouvements d'alcalins dans l'éprouvette ou vers l'extérieur, en fonction des conditions aux limites. La quantité d'alcalins liée aux gels d'alcali-réaction ($S_{\sum Na_f}^c$ dans la Figure 1) est la somme des flux d'alcalins entrants dans les granulats, déterminée à l'échelle du dessous $(\overrightarrow{\varphi}_{Na}^{agg}(r = R_{agg}))$ dans la Figure 1).

La cohérence de l'approche multi-échelle est assurée à condition que la concentration en alcalins dans la pâte de ciment au bord extérieur du granulat soit égale à la concentration à l'échelle du béton ($[Na^+]_x$ dans la Figure 1).

Aggregate scale

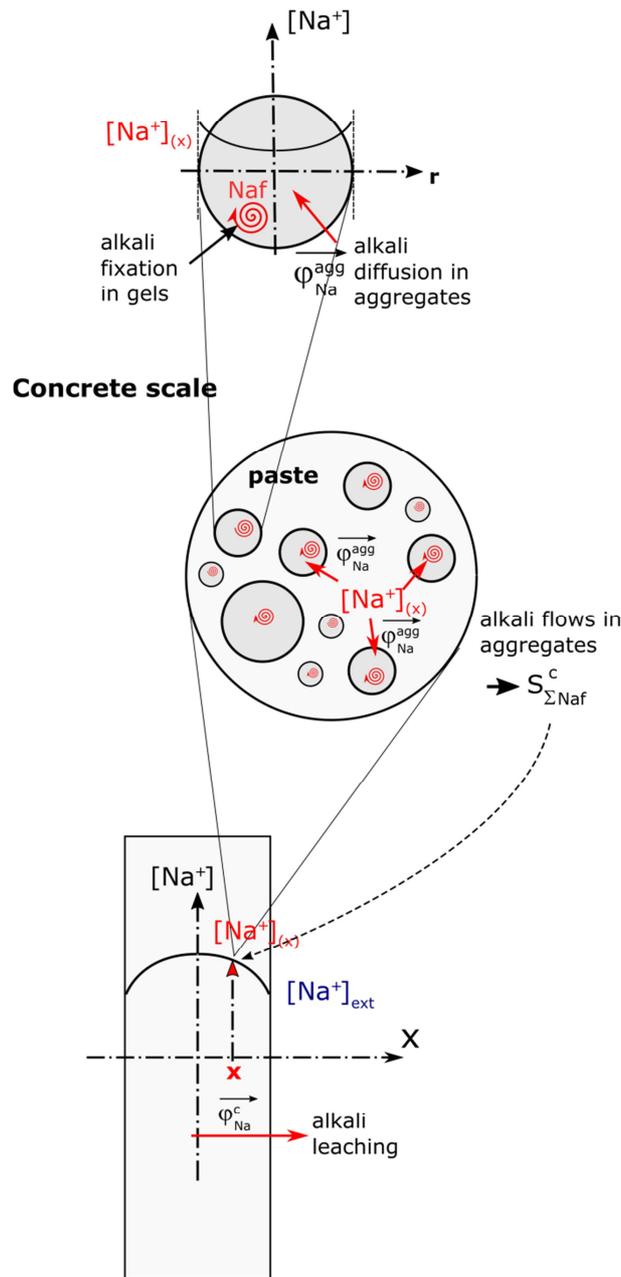


Figure 1 : Bilan des alcalins à l'échelle du granulat (considération de la diffusion et de la fixation des alcalins dans les gels d'alcali-réaction) et du béton (diffusion des alcalins dans l'éprouvette)

2.2 Transport des espèces réactives dans les granulats

La première étape conduisant à la formation de gels d'alcali-réaction est régie par l'accès des ions hydroxyle et alcalin à la silice réactive des granulats. La silice la première atteinte sera donc celle en surface extérieure des granulats ou celle présente dans les fissures des granulats (Ponce & Batic, 2006). Les espèces ioniques pénètrent continuellement dans le granulat lui-même pour atteindre la silice réactive au cœur du granulat.

Les travaux de modélisation de Poyet ont montré que la prise en compte de la diffusion dans la pâte de ciment entourant les granulats pouvait être négligée devant celle ayant lieu dans les granulats, qui est beaucoup plus lente (Poyet et al., 2007). En conséquence, la modélisation simplifiée développée dans (Multon et al., 2009) considère l'attaque des granulats à travers une équation de diffusion résolue pour chaque classe granulaire :

$$p_{agg}S_r \frac{d[Na^+]}{dt} = -div(\vec{\varphi}_{Na}) + S_{Na} \quad (1)$$

avec : t le temps, p_{agg} la porosité du granulat, S_r le degré de saturation du granulat, $[Na^+]$ la concentration en alcalins, et S un terme source représentant la consommation des alcalins par le gel formé. Pour ce phénomène de diffusion seule, la dépendance aux conditions de température peut être prise en compte par une loi d'Arrhenius avec une énergie de l'ordre de 20 kJ/mol (Goto & Roy, 1981).

Afin de pouvoir résoudre le problème à l'aide de différences finies ne faisant intervenir qu'une seule variable d'espace, les granulats ont été supposés sphériques et homogènes (Figure 2). En termes de conditions aux limites, le flux est bien sûr considéré nul au centre de la particule et la concentration ionique à la frontière extérieure est supposée ne dépendre que de la quantité d'ions ayant diffusé dans les granulats sans prise en compte d'un appauvrissement dans la pâte de ciment proche du granulat. L'interaction entre les classes granulaires est donc considérée par une équation bilan globale pour toute la pâte de ciment.

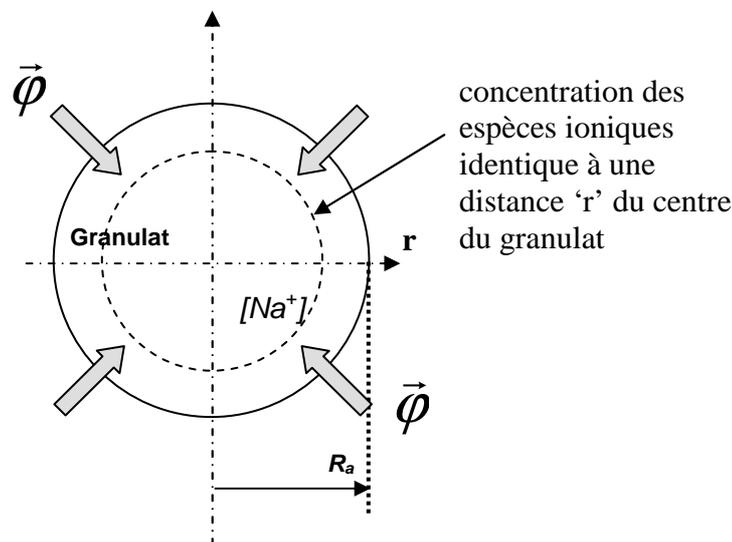


Figure 2 : Diffusion des alcalins dans un granulat

Naturellement, il s'agit ici d'une modélisation simplifiée des phénomènes de transport. Ce phénomène d'attaque extérieure du granulat est observé lors de l'examen microscopique de béton utilisant des granulats très réactifs (Ponce & Batic, 2006; Ichikawa & Miura, 2007) et ne présentant pas ou peu de fissuration avant attaque (Sanchez, 2014; Sanchez et al., 2014b). Cependant, de nombreux phénomènes perturbent ce mécanisme et les granulats sont rarement parfaitement homogènes. La diffusion est sans doute rendue plus rapide par la présence de

fissures dans la particule avant les premiers gonflements (concassage) et ces propriétés doivent également être modifiées lors de l'apparition de fissures liées à l'attaque du granulat. En outre, la production de gel dans le granulat peut également être responsable d'un ralentissement du transport des espèces réactives. Ainsi, le paramètre prépondérant pour l'évaluation de la disponibilité des ions alcalins (coefficient de diffusion dans le granulat) est difficilement mesurable mais peut être obtenu par calibration de la cinétique des expansions obtenues lors d'essais.

2.3 Attaque de la silice réactive des granulats

L'attaque de la silice réactive dépend de la concentration en espèce ionique réactive. Plus la concentration en ions hydroxydes et alcalins sera importante, plus l'attaque sera rapide. Ce taux d'attaque par les ions hydroxydes qui conduit à la formation des gels d'alcali-réaction a été modélisé par une équation simplifiée représentant la fixation des alcalins par les gels formés (Multon et al., 2009) :

$$\frac{\partial Na_f}{\partial t} = \frac{1}{\tau_f} \left([Na^+] - [Na^+]_{thr} \right)^+ \quad (2)$$

avec: Na_f , la quantité d'alcalins fixés dans les gels, τ_f , le temps caractéristique de fixation des alcalins par la formation de gels (dans (Multon et al., 2009), son inverse $f = 1 / \tau_f$, nommé coefficient de fixation des alcalins est utilisé). Plus ce temps caractéristique est grand, plus la fixation des alcalins et donc l'attaque de la silice se déroulent lentement. Pour ce phénomène de réactivité seule, la dépendance aux conditions de température peut être prise en compte par une loi d'Arrhenius avec une énergie de l'ordre de 80 kJ/mol (Bulteel et al., 2002).

La relation a donc été supposée linéaire avec une quantité représentant la différence entre la concentration en alcalins et une concentration en alcalins seuil en-deçà de laquelle l'attaque de la silice serait stoppée. Ce seuil a été retenu pour pouvoir modéliser avec un seul jeu de paramètre des expansions obtenues sur des formulations voisines mais présentant des concentrations en alcalins nettement différentes (Multon et al., 2009). D'un point de vue empirique, l'existence d'un seuil est soutenue par plusieurs observations expérimentales (Diamond, 1983; Rivard et al., 2003, 2007). Cependant, en conditions de conservation en solution alcaline (1 mol/l), ce seuil ne semble pas influencer les taux de gonflements, ce qui conduit à le négliger (Gao, 2010; Gao et al., 2013c). D'un point de vue physico-chimique, l'existence d'un seuil pourrait provenir de la compétition entre les équilibres thermodynamiques de plusieurs phases contenant de la silice, des alcalins et plus ou moins de calcium. En-deçà d'une certaine concentration en ions alcalins (autour de 0,25 mol/litre d'ions potassium, valeur qui dépend de la température), la formation des gels expansifs serait stoppée (Kim & Olek, 2014). La relation entre attaque de la silice et concentration en alcalins, qui influe sur le pH de la solution, devrait également être fortement non linéaire et dans le cas de concentration en alcalins faible, la vitesse d'attaque devrait être réduite de manière très importante (Urhan, 1987a).

Les récents travaux expérimentaux de Kim et Olek sur solutions extraites de bétons endommagés par l'alcali-réaction ont confirmé l'hypothèse de linéarité entre cinétique d'attaque et concentration en alcalins (Kim et al., 2015). Ils ont également apporté des résultats intéressants pour estimer la dépendance du seuil en alcalins à la température. Cette variation est causée par l'évolution des constantes de solubilité pour les différents produits de réactions mis en jeu en fonction de la température (gels silico-alcalins ou silico-calco alcalins). Si la concentration des ions calcium devient prépondérante sur celle en alcalins, les gels formés deviennent moins expansifs, ainsi le seuil apparent en alcalins est dépendant de la concentration en calcium, il peut être évalué à travers l'équation simplifiée suivante :

$$[Na^+]_{thr} = \rho_{sol}^{(T)} \cdot [Ca^{2+}] \quad (3)$$

avec $[Ca^{2+}]$ la concentration en ions calcium et $\rho_{sol}^{(T)}$ un paramètre qui dépend des constantes de solubilité des produits de réactions mis en jeu et donc de la température. Il peut être estimé par une loi de Van't Hoff avec une variation standard d'enthalpie de l'ordre de 205.9 kJ/mol (Figure 3).

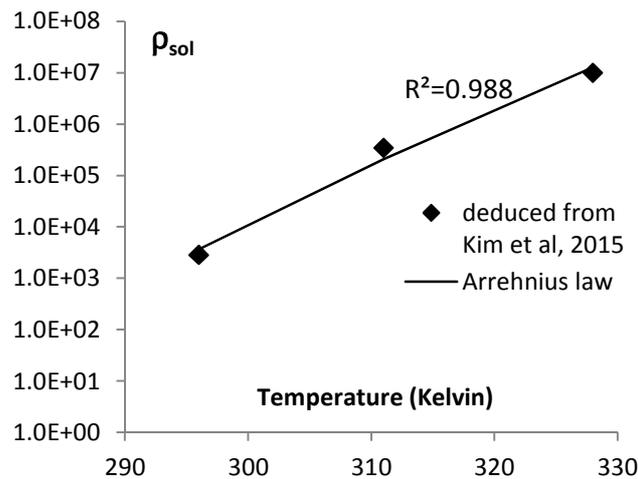


Figure 3 : Evolution de $\rho_{sol}^{(T)}$ pour la détermination du seuil en alcalins en fonction de la température déterminée sur la base des essais de (Kim et al., 2015)

La concentration en ions calcium peut, quant à elle, être déduite d'une écriture simplifiée de l'équilibre thermodynamique de la portlandite comme proposé dans (Poyet et al., 2007; Salgues et al., 2014) :

$$[Ca^+] = 0.357 \cdot \exp(386.8 \cdot [Na^+] - 0.01 \cdot T - 1.4 \cdot [Na^+] \cdot T) \quad (4)$$

Le seuil en alcalins peut alors être estimé de manière simplifiée ce qui évite la résolution de systèmes d'équations hautement non linéaires (Kim & Olek, 2014) qui rendrait le calcul de structures extrêmement long (Salgues, 2013).

Dans ce modèle, il est donc supposé que la quantité de gel d'alcali-réaction formée est égale à la quantité de silice attaquée par les ions hydroxyles et donc égale à la quantité d'alcalins fixés par les gels d'alcali-réaction avec un ratio $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de 0,2 comme observé dans la littérature (Kawamura & Fuwa, 2003). En choisissant de manière conventionnelle qu'une mole de silice forme une mole de gel d'alcali-réaction, le nombre de moles de gels formées en fonction de la concentration en alcalins est donc :

$$\frac{\partial ASR}{\partial t} = \frac{1}{\tau_f} \times \frac{5}{2} \times \left([Na^+] - [Na^+]_{thr} \right)^+ \quad (5)$$

En outre, aucune cinétique supplémentaire n'est supposée retardée l'apparition du gel entre l'attaque de la silice et sa nouvelle précipitation en gel d'alcali-réaction. L'ensemble de l'attaque et de la formation du gel n'est donc considéré qu'à travers une seule relation cinétique linéaire ne faisant intervenir qu'un seul paramètre τ_f , le temps caractéristique de fixation des alcalins.

La finalité de la partie physico-chimique du modèle d'alcali-réaction présenté ici est d'obtenir de manière la plus réaliste possible (tout en conservant une résolution suffisamment simple pour être utilisée dans des modèles macroscopiques) le nombre de moles de gels d'alcali-réaction qui seront l'origine de l'expansion dans le béton. Il s'agit donc d'une donnée d'entrée de première importance pour les modélisations mécaniques. La précision de ces modélisations ne pourrait qu'être améliorée s'il était possible d'obtenir une quantification expérimentale rapide et fiable de deux paramètres fondamentaux pour ces processus : la quantité de silice réactive (qui limite les gonflements en cas d'apport important d'alcalins, cas des conservations en solution alcaline) et la réactivité de la silice contenue dans les granulats (quantifiée dans le modèle par τ_f). Sur le premier point, la thèse de Xiao Xiao Gao a permis d'obtenir des résultats encourageants par l'étude comparative de plusieurs méthodes de dissolution de la silice avec des gonflements mesurés sur éprouvettes (Figure 4 – (Gao, 2010; Gao et al., 2013a)). Les difficultés demeurent importantes et des expérimentations sont encore nécessaires pour valider l'attaque par l'acide fluorhydrique qui semble être la plus prometteuse pour quantifier la part de silice réactive des granulats. En termes de réactivité, plusieurs travaux de la littérature mentionnent les différences de comportement entre bétons contenant des granulats de natures minéralogiques ou de microstructures différentes. Ils distinguent et identifient des différences de réactivité pour ces granulats (Monnin et al., 2006; Ponce & Batic, 2006; Jensen, 2012). Cependant, si ces auteurs observent ces différences de comportement entre bétons dans des conditions expérimentales voisines, aucune méthode de quantification de cette notion de réactivité n'est encore proposée. Elle semble pourtant être indispensable à la fois pour distinguer les granulats entre eux et pour aller vers une modélisation globale des mécanismes de réaction.

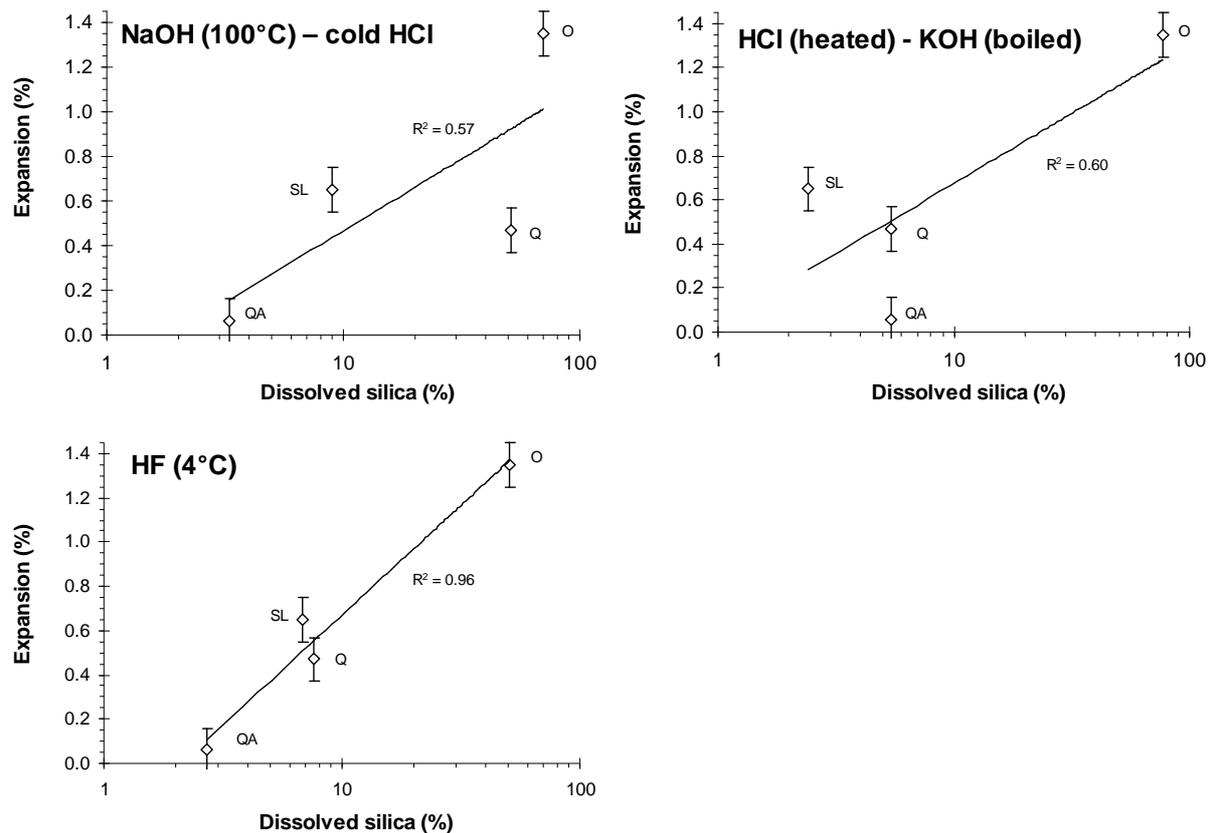


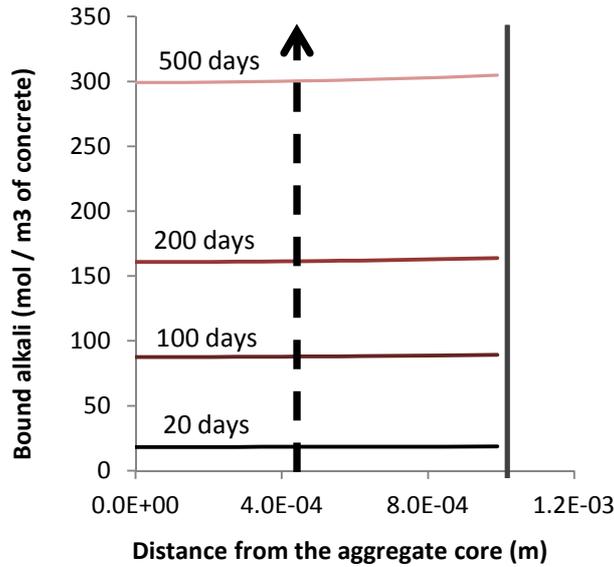
Figure 4 : Expansion finale mesurés sur barres de mortier en fonction de la silice dissoute pour quatre types de granulats (opale O, Quarzite Q, Quartz QA, calcaire siliceux SL) par trois méthodes de quantification de silice réactive (NaOH/ HCl, HCl/KOH et HF) (Gao et al., 2013a)

2.4 Couplage entre diffusion et réactivité des granulats réactifs

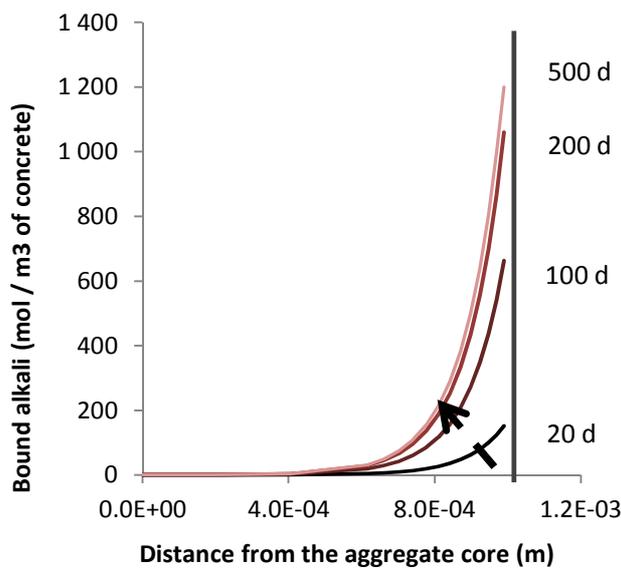
Les mécanismes mis en jeu dans la production de gels d'alcali-réaction dans les bétons viennent d'être rappelés. Une détermination de la cinétique de formation des gels d'alcali-réaction a été proposée à travers l'utilisation d'une équation à deux paramètres : pour le transport des espèces ioniques agressives vers la silice réactive des granulats et pour la fixation des alcalins dans les gels produits. Le modèle a été utilisé pour analyser les gonflements de mortiers et de bétons en conditions d'humidité relative élevées (Multon et al., 2009; Sanchez et al., 2014b) et en conservation en solution alcaline (Gao et al., 2013c). L'inconvénient majeur est la difficulté d'obtenir par des mesures directes les deux paramètres pilotant ces équations. Dans la plupart des cas, le modèle permet de retrouver l'allure des courbes de gonflements en obtenant par calage la valeur des coefficients de diffusion des alcalins dans les granulats et / ou la valeur du temps caractéristique de fixation des alcalins (ou son inverse f). Les coefficients de diffusion des alcalins dans les granulats obtenus par calage peuvent être comparés entre eux et avec les rares valeurs de la littérature (Goto & Roy, 1981). Après l'obtention d'une valeur assez réaliste pour l'étude des mortiers en conditions d'humidité élevées effectués dans (Multon et al., 2009) (de l'ordre de 10^{-13} m²/s comparable aux mesures de (Goto & Roy, 1981)). Le calcul de mortiers conservés en solution alcaline a conduit à des valeurs a priori trop faibles (entre 10^{-14} et 10^{-16} m²/s) (Gao et al.,

2013c). Faute de pouvoir le déterminer précisément dans ces conditions, le temps caractéristique utilisé pour ces seconds calculs était le même que celui déterminé pour l'étude effectuée sur mortiers conservés en atmosphère saturée. Or du fait de la forte non linéarité attendue pour le phénomène d'attaque en fonction de la concentration en alcalins, on peut s'attendre à une valeur de temps caractéristique différente. Finalement pour l'étude sur béton effectuée dans (Sanchez et al., 2014b), il a été choisi de revenir à des valeurs de coefficients de diffusion plus réalistes et de déterminer le temps caractéristique par le calage des courbes. Il a ainsi été possible de caler des bétons contenant des granulats de tailles significativement différentes (un sable 0-4 mm et un gravier de 5-20 mm) par un seul jeu de paramètres avec un coefficient de diffusion de l'ordre de 10^{-13} m²/s. Ces trois études ont montré tout l'intérêt qu'il y aurait à obtenir des mesures de diffusion sur des granulats de différentes natures et une fois encore à réussir à quantifier l'aspect 'réactivité' des granulats.

Malgré sa simplicité (représentation de l'ensemble des phénomènes de transport et de réactivité de l'alcali-réaction par une seule équation de bilan de masse des alcalins avec un terme de source linéaire), cette approche permet de retrouver les différentes observations de la littérature sur le comportement de granulats de différentes natures. Dans le cas de granulats dits à réactivité rapide, la fixation des alcalins (gérée par l'équation 3) pourra être considérée comme pratiquement instantanée en comparaison de l'équation de diffusion (équation 1) qui sera alors prépondérante pour la détermination de la cinétique de la formation des gels (Figure 5). Les granulats semblent alors être attaqués par leur périphérie ou par l'intérieur de fissures préexistantes (Ponce & Batic, 2006). A l'opposé sur l'échelle des réactivités, la cinétique des gonflements pour des bétons utilisant des granulats à réactivité lente est pilotée par l'équation de fixation des alcalins (équation 3). Les espèces ioniques ont dans ce cas le temps d'atteindre le cœur des granulats avant que la silice ne soit affectée par leur présence d'autant plus qu'ils sont de petites tailles (Figure 5 – ce qui est souvent le cas en condition d'essais de laboratoire). La cinétique d'attaque est lente par rapport à la diffusion et se produit alors en différentes localisations du granulat en même temps (Ponce & Batic, 2006; Dunant & Scrivener, 2010; Jensen, 2012). Les conséquences mécaniques induites seront alors différentes car la mise en pression plus ou moins rapide des granulats et de la pâte de ciment aura des conséquences sur le fluage des matériaux et donc sur l'amplitude et la partition de l'endommagement entre granulats et pâte.



(a)



(b)

Figure 5 : Profil d'alcalins fixés par les gels d'alcali-réaction en fonction de la profondeur dans des granulats à faible réactivité (a) ou à réactivité élevée (b) déterminé par le modèle proposé

L'intérêt de la méthodologie retenue ici a été d'appliquer ce modèle à des cas où les temps caractéristiques de transport dans les granulats était significativement différent (du fait de la différence de taille des particules réactives) et de comparer les résultats du modèle aux cinétiques de gonflement obtenues à partir d'essais d'expansion (Multon et al., 2009). Puisqu'il est nécessaire d'avoir des alcalins en présence de silice pour avoir alcali-réaction, le transport des alcalins dans les granulats est nécessaire. Toutefois, il n'est pas forcément le paramètre le plus limitant de la production de gels d'alcali-réaction. Ainsi, il est difficile de reproduire les différences de cinétiques de gonflement à partir de la seule diffusion dans le cas

de calcaire siliceux, à moins de supposer que la diffusion est très variable en fonction de la taille du granulat, et même dans ce cas, il n'est pas possible de reproduire le gonflement de mortier contenant le mélange de ces mêmes granulats réactifs de tailles différentes (Poyet et al., 2007). La confrontation avec les expérimentations a permis de montrer l'intérêt d'avoir une consommation des alcalins non pas instantanée mais progressive (Multon et al., 2009). La linéarité de la fixation des alcalins en fonction de la concentration en solution était la forme la plus simple à supposer. Elle était suffisante pour reproduire le gonflement de mélanges de granulats réactifs de différentes tailles à partir des gonflements des classes individuelles pour deux concentrations en alcalins différentes (Multon et al., 2009). En outre, elle semble correspondre aux mesures obtenues sur des solutions interstitielles de bétons réactifs (Kim et al., 2015). Plus la réactivité des particules sera grande, plus l'effet limitant de gonflement des particules fines sera important, ce qui permet d'expliquer que des fines de même taille et en même quantité n'aient pas le même impact sur les gonflements en fonction de la nature et donc de la réaction du granulat utilisé (Carles-Gibergues et al., 2007).

2.5 Diffusion des alcalins hors du béton

La plupart des recommandations ou normes d'essai d'expansion pour caractériser l'alcali-réaction propose de conserver les échantillons en condition de température et d'humidité élevée pour accélérer les phénomènes et donc les gonflements. Toutefois, plusieurs études ont montré qu'une conservation à 95 % d'humidité relative était suffisante pour provoquer des pertes importantes d'alcalins par diffusion vers l'extérieur du béton (Rivard et al., 2003, 2007) et ainsi des gonflements significativement différents en fonction de la taille des éprouvettes (Lindgård et al., 2013). Cet aspect a été peu étudié par les travaux de modélisation. Par conséquent, il était intéressant de coupler les équations précédentes qui représentent ce qui a lieu dans un volume élémentaire représentatif supposé isolé de l'extérieur en ce qui concerne les alcalins (soit échange supposé nul dans le cas d'éprouvettes conservées en humidité relative, soit échange instantané dans le cas d'éprouvettes conservées en solution alcaline) à une équation de diffusion à l'échelle de l'éprouvette :

$$p_c S_r \frac{\partial [Na^+]_c}{\partial t} = -div(\overrightarrow{\varphi_{Na}^c}) + S_{\Sigma Na_f}^c \quad (6)$$

Avec p_c , la porosité du béton, S_r , le degré de saturation, $[Na^+]_c$, la concentration d'alcalins dans la solution porale du béton, $\overrightarrow{\varphi_{Na}^c}$, le flux d'alcalins dans l'éprouvette (coefficient de diffusion compris de l'ordre de $1e^{-12}$ m²/s) et $S_{\Sigma Na_f}^c$, la somme des alcalins pénétrant dans les granulats à chaque pas de temps déterminée par le calcul local. Ce dernier terme permet le couplage des phénomènes à l'échelle du granulat et à l'échelle de l'éprouvette (Figure 6).

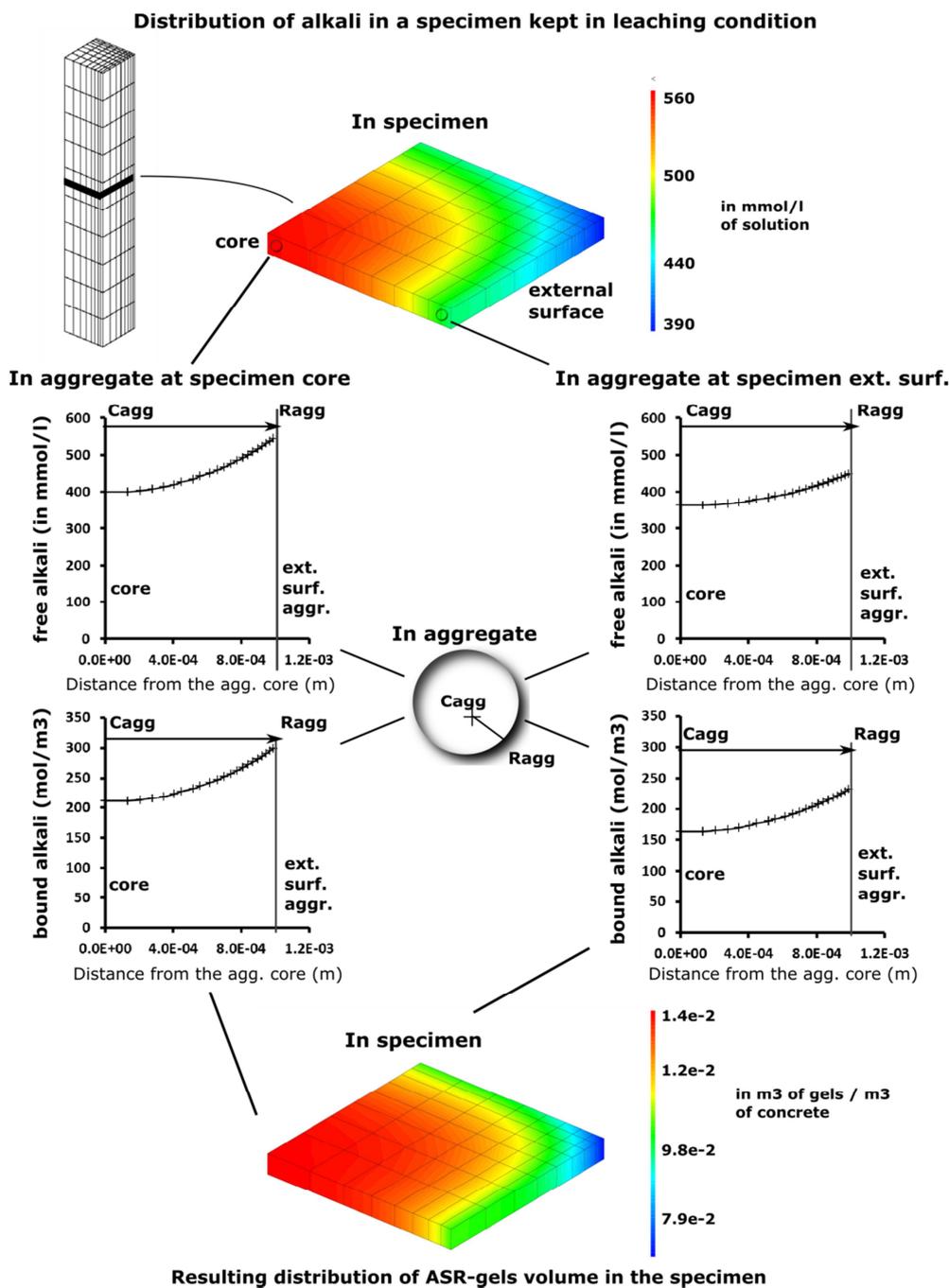


Figure 6 : Partie du maillage d’une éprouvette de section 100x100 mm soumise à de l’alcali-réaction dans le cas d’un lessivage modéré. En haut : distribution des alcalins en solution dans le béton. Au milieu : gradient des alcalins en solution et fixés aux gels dans les granulats situés au cœur et à la surface extérieure de l’éprouvette. En bas : distribution résultante du volume de gel d’alcali-réaction dans l’éprouvette.

Cette modélisation a permis d’analyser et de retrouver les différences de gonflements d’éprouvettes de tailles différentes (Figure 7) à partir des données de lessivage des alcalins (Lindgård et al., 2013). Cet outil peut alors être utilisé pour déduire les gonflements théoriques qui pourraient avoir lieu en condition de lessivage totalement nul, qui pourrait être plus représentatif de la réalité du cœur d’un ouvrage massif.

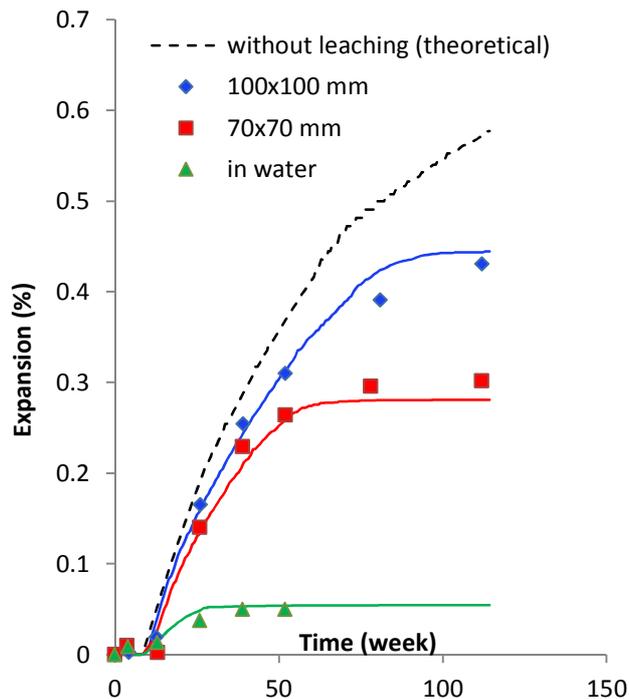


Figure 7 : Cinétiques de gonflement d'alcali-réaction en fonction de la taille des éprouvettes et des conditions de lessivage des alcalins en résultant (données expérimentales tirées de (Lindgård et al., 2013))

3. Mécanismes de formation différée d'ettringite dans les bétons

La formation différée d'ettringite met en jeu différentes espèces présentes dans la solution interstitielle du béton (sulfates, aluminates, calcium et alcalins) qui, dans des conditions environnementales particulières (températures supérieures à 70°C pendant une certaine durée puis conservation ultérieure à des températures inférieures à 50°C, environnement très humide), conduisent à la formation d'ettringite ($\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2 \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) dans un béton déjà durci et provoquent ainsi son endommagement. Les travaux de la littérature ont mis à jour les interactions entre les différents constituants du béton agissant sur la formation différée d'ettringite (espèces ioniques en solution, C-S-H, granulats) (Fu et al., 1997; Divet, 2001; Famy et al., 2001; Taylor et al., 2001; Collepardi, 2003). L'étude de la formation d'ettringite différée peut être décomposée en deux phases complémentaires :

- Pendant le cycle thermique à température élevée :
 - o Impossibilité de former de l'ettringite primaire du fait des températures élevées (ou déstabilisation dans le cas de cycle thermique tardif).
 - o Formation d'autres phases que l'ettringite utilisant les sulfates, aluminates et calcium rendus disponibles par la non précipitation de l'ettringite (portlandite CH, mono-sulfo-aluminate AFm, hydro-grenat siliceux HG)
 - o Fixation réversible d'une partie de ces espèces ioniques dans les C-S-H,
- Après le cycle thermique :

- Modification des conditions thermodynamiques liées à la baisse de la température et à un lessivage éventuel des alcalins,
- Libération des espèces ioniques fixées dans les C-S-H (aluminates, sulfates) et dissolution d'une partie de la portlandite en conditions de faible concentration en alcalins (libération de calcium),
- Précipitation de l'ettringite dans le béton une fois que les espèces la composant (sulfate, aluminates, calcium et eau) sont en présence en conditions stœchiométriques adéquates.

Comme pour l'alcali-réaction, le calcul de structures endommagées par la réaction sulfatique interne conduisant à la formation différée d'ettringite dans les ouvrages doit être basé sur la détermination d'un avancement de la réaction se produisant à différents emplacements des structures. Les approches retenues peuvent donc être de même nature avec l'utilisation de modèle empirique (Brunetaud, 2005; Baghdadi, 2008) ou basées sur la modélisation des phénomènes physiques et mécaniques. L'objectif de la modélisation développée dans la thèse de Marie Salgues, en collaboration avec le Centre d'Ingénierie Hydraulique d'EDF, visait à quantifier la formation de moles d'ettringite différée en fonction des constituants du béton, des conditions thermiques et hydriques en utilisant des équations physiques et chimiques pour décrire les différents phénomènes présentés ci-dessus (Salgues, 2013; Salgues et al., 2014).

3.1 Evaluation des équilibres des espèces en présence

3.1.1 Avancement des phases cristallisées

La formation d'ettringite est liée à des équilibres et déséquilibres thermodynamiques des espèces en présence dans une matrice cimentaire. Dans la thèse de Marie Salgues, la détermination de l'avancement de la réaction a été fondée sur l'étude de l'équilibre thermodynamique d'une partie des espèces mises en présence (l'ettringite, le mono-sulfo-aluminate, la portlandite, les espèces ioniques les composant et les alcalins. Ainsi la formation d'une espèce cristallisée C_i peut être évaluée par l'équation 7 qui permet de quantifier l'écart entre le produit et la constante de solubilité :

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{1}{\tau} \left(1 - \frac{\log(Q_{Ri})}{\log(K_i)} \right) \quad (7)$$

Le paramètre τ permet de prendre en compte la cinétique de formation de l'espèce cristallisée, cinétique qui peut s'expliquer en partie par les phénomènes de transport et donc de rencontre des réactants à l'échelle d'un volume élémentaire représentatif. Ce paramètre permet donc de prendre en compte les phénomènes de transport à l'échelle du matériau. De nombreux paramètres peuvent avoir une influence sur les propriétés de transfert. Pour l'étude entreprise dans ce travail, trois paramètres influençant les phénomènes de transport ont été considérés : la température de conservation du béton (à travers le coefficient A_T), le degré de saturation (à travers A_W) et l'endommagement du béton (A_d – équation 8).

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} \times A_T \times A_W \times A_d \quad (8)$$

L'utilisation de la fonction logarithme dans l'équation 7 permet d'atténuer l'effet de variations brusques sur plusieurs ordres de grandeur des quantités présentes dans l'équation. Dans le modèle de Marie Salgues, cette équation est appliquée à la détermination des avancements de l'ettringite et du mono-sulfo-aluminate.

Il aurait été possible d'utiliser le même type d'équation pour calculer l'ensemble des phases dont le rôle est important dans l'apparition de l'ettringite différée (portlandite et hydrogrenat). Cependant, l'utilisation de nombreuses équations différentielles couplées peut conduire à une augmentation pénalisante des temps de calculs, en particulier pour le calcul de grandes structures. La détermination de la concentration en ions calcium, bien que basée sur l'équilibre thermodynamique de la portlandite, a été traduit par une relation simplifiée (Equation 4 de la précédente partie) prenant en compte la présence des alcalins en solution et de la température (Salgues, 2013) basée sur une approche similaire effectuée dans le cadre de l'alcali-réaction par Stéphane Poyet (Poyet, 2003; Poyet et al., 2007). Cette relation représentée à 25°C sur la Figure 8 sous-estime légèrement la concentration ionique en ions calcium pour une concentration en alcalins donnée mais permet de quantifier assez correctement la dépendance de la présence des ions calcium en solution en fonction des alcalins. Rappelons ici que, tout comme les sulfates et les aluminates, la présence d'ions calcium est indispensable à la précipitation d'ettringite. D'après ces résultats, à 25°C, si la concentration en alcalins est supérieure à environ 0,3 mol/l, les ions calcium sont en grande majorité accaparés par la portlandite (Figure 8) et donc peu disponibles à la formation d'autres phases. Cette figure illustre le rôle indirect des alcalins dans la formation d'ettringite différée : ils ne participent pas directement aux produits de réaction mais influencent de manière importante la disponibilité d'ions réagissant.

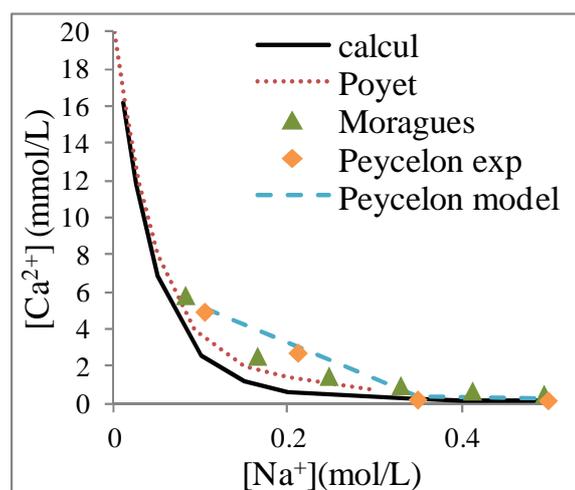


Figure 8 : Equilibre calcium / alcalins à 25°C (Salgues, 2013)

3.1.2 Interactions avec les C-S-H

Les espèces ioniques mises en jeu dans la formation d'ettringite se partagent entre les phases cristallisées, la solution interstitielle et les C-S-H de la matrice cimentaire. En effet, les propriétés de cette phase conduisent à la fixation d'espèces ioniques en fonction de leur concentration en solution, de la température du milieu et d'interaction avec d'autres espèces (Divet & Randriambololona, 1998; Hong & Glasser, 1999; Chen, 2007). Il existe peu de données permettant de quantifier ce phénomène avec précision. Des lois empiriques déterminées à partir d'expérimentations de la littérature ont donc été proposées dans la thèse de Marie Salgues. Ainsi l'équation 9 montre la relation empirique permettant de déterminer la quantité d'ions sulfates fixés à la structure des C-S-H à l'équilibre en fonction de la concentration en sulfates dans la solution porale, de la température et la concentration en alcalin. Cette équation est basée sur les travaux de (Divet & Randriambololona, 1998).

$$SO_{4B\text{eq}}^{2-} = 2.067 \times CSH \times (T)^{0.2124} \times [Na^+]^{0.2004} \times [SO_4^{2-}] \quad (9)$$

Tout comme pour la précipitation des phases cristallisées, le phénomène de fixation dans les C-S-H n'est pas instantané. Une équation cinétique a donc été proposée (équation 10). La cinétique de fixation dépend du transfert des ions sulfates dans le matériau (représenté par le coefficient τ) et de l'écart entre la quantité d'ions dans les C-S-H à l'équilibre ($SO_{4B\text{eq}}^{2-}$) et celle à l'instant de calcul (SO_{4B}^{2-}) :

$$\frac{\partial SO_{4B}^{2-}}{\partial t} = \frac{1}{\tau} \times (\log(SO_{4B\text{eq}}^{2-}) - \log(SO_{4B}^{2-})) \quad (10)$$

Des relations équivalentes ont été proposées pour prendre en compte la fixation des ions alcalin et aluminate (Salgues, 2013). Toutes les interactions avec les C-S-H sont supposées réversibles soit parce que cela a été constaté dans la littérature soit par manque d'observations expérimentales. Ces équations permettent d'avoir des concentrations en espèces ioniques en solution réalistes ce qui est indispensables pour quantifier la précipitation des différentes espèces cristallisées. Une mauvaise connaissance de ces courbes de sorption-désorption peut donc être la cause d'erreurs de prédiction de la quantité d'ettringite.

3.2 Equilibre à température élevée

L'existence d'un cycle thermique pendant lequel la température du béton devient supérieure à 70°C est primordiale pour l'apparition d'ettringite différée (Taylor et al., 2001). En outre, l'importance des expansions mesurées sur béton dépend de manière fortement non linéaire de la température maximale atteinte et de la durée d'exposition à ces températures (Fu et al., 1997; Brunetaud et al., 2007). Afin d'évaluer l'avancement de formation d'ettringite différée, il est donc de première importance de prendre en compte les effets de la température et de la durée d'exposition sur les mécanismes mis en jeu. Cet aspect de l'influence de la température sur la formation d'ettringite a déjà été étudié (Damidot & Glasser, 1992, 1993) et son évaluation est rendue possible par l'utilisation d'une loi de Van't Hoff (Figure 9).

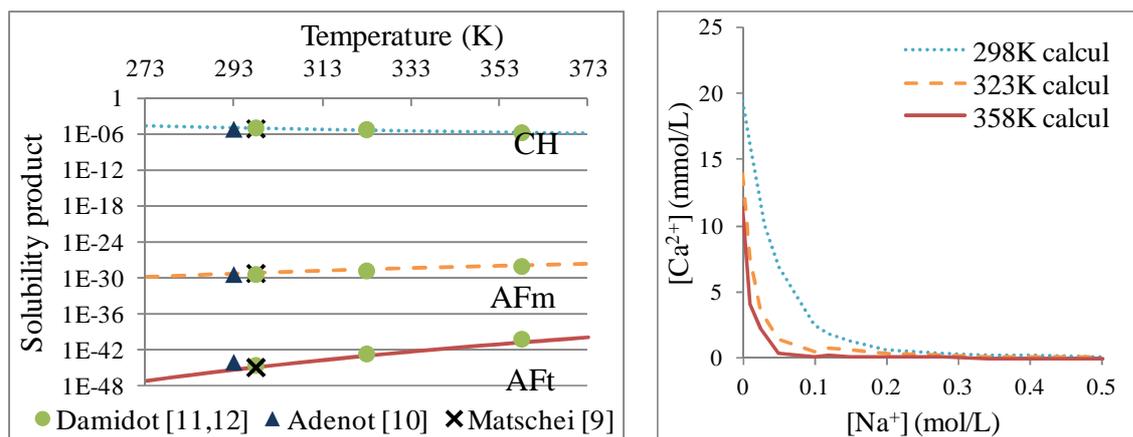


Figure 9 : Evolution des constantes d'équilibre de l'AFt, l'AFm et de la CH en température [Salgues, 2013]

En fonction de la température et de la valeur des produits de solubilité, la présence d'ettringite, de portlandite et de mono-sulfo-aluminate dans la pâte de ciment est donc plus ou moins importante. Les ions ne participant pas à la formation de ces phases sont alors soit dans la solution interstitielle soit fixés aux C-S-H. Des travaux ont également montré que l'hydratation des ciments à des températures élevées pouvait conduire à la formation d'hydrogrenats siliceux (HG) peu présents pour des hydratations à 20°C (Lothenbach et al., 2008; Dilnesa et al., 2014). Ces espèces fixent des ions aluminates de manière stable ce qui conduit à la diminution de la quantité d'ions aluminates susceptibles de former d'autres espèces cristallisées. Un modèle basé sur la thermodynamique des équilibres doit donc considérer ces espèces.

Les observations précédentes ont montré qu'une partie importante des phénomènes mis en jeu lors de la cure en température élevée modifiait les conditions d'hydratation des ciments et donc les produits de l'hydratation. Des travaux ont également montré la modification de l'état des C-S-H hydratés en fonction de la température pendant l'hydratation du ciment (Gallucci et al., 2013). Cette modification du ciment hydraté peut avoir un effet sur les mécanismes de la formation différée d'ettringite. De plus, la quantité d'ions aluminate en solution a une influence considérable sur la formation des différentes phases cristallisées. En fonction de leur concentration, la précipitation de mono-sulfo-aluminate ou d'ettringite est favorisée au détriment de l'autre (Adenot, 1992). Dans le cas d'un cycle thermique avec une température peu élevée et un cycle court (situation 1 de la Figure 10), une quantité importante d'ions aluminate se trouve en solution, les conditions stœchiométriques conduisent à favoriser l'équilibre thermodynamique du mono-sulfo-aluminate AFm. Dans ce cas, le potentiel de formation d'ettringite secondaire est faible. Pour un cycle thermique court avec une température élevée ou un cycle thermique long avec température moyenne (situation 2 de la Figure 10), une certaine quantité d'ions aluminates est rendu indisponible de manière définitive. A retour à température ambiante, les conditions stœchiométriques conduisent alors à la prédominance de l'ettringite sur le mono-sulfo-aluminate, le potentiel de formation différée d'ettringite est alors très élevé. Pour des cycles thermiques longs avec une température élevée (situation 3 de la Figure 10), il ne reste plus qu'une quantité faible d'ions

aluminates en solution et disponibles pour former de l'ettringite. Cette quantité devient donc négligeable, c'est l'effet pessimum observé par Xavier Brunetaud par exemple (Brunetaud, 2005). A partir de ce travail (Brunetaud, 2005), Marie Salgues a défini un indice de modification de la microstructure I_μ (Figure 10) permettant de distinguer les différentes phases décrites ci-dessus. Toutefois, cet indice donnait trop d'importance à la cinétique d'hydratation pendant le cycle thermique ce qui empêchait de modéliser le comportement de béton soumis à des échauffements tardifs et montrant des gonflements importants liés à la formation différée d'ettringite (Barbarulo et al., 2005; Kchakech, 2015). Les travaux récents de Baddredine Kchakech à l'Ifsttar portant sur l'étude d'un grand nombre de cycles thermiques (à jeune âge et tardif) lui ont permis de définir deux indicateurs pour rendre compte de l'adsorption des sulfates et des aluminiums en fonction du cycle thermique et de la concentration initiale en alcalins (Kchakech, 2015). L'utilisation de tels indices pourrait permettre d'estimer le potentiel de gonflement des formulations de bétons d'ouvrages en fonction de leurs histoires thermiques. Des travaux utilisant ses résultats sont en cours dans les thèses de Pierre Morenon (en collaboration avec EDF-CIH) et d'Yvan Thiebaut (en collaboration avec Vinci Construction, Cofiroute et Concrete).

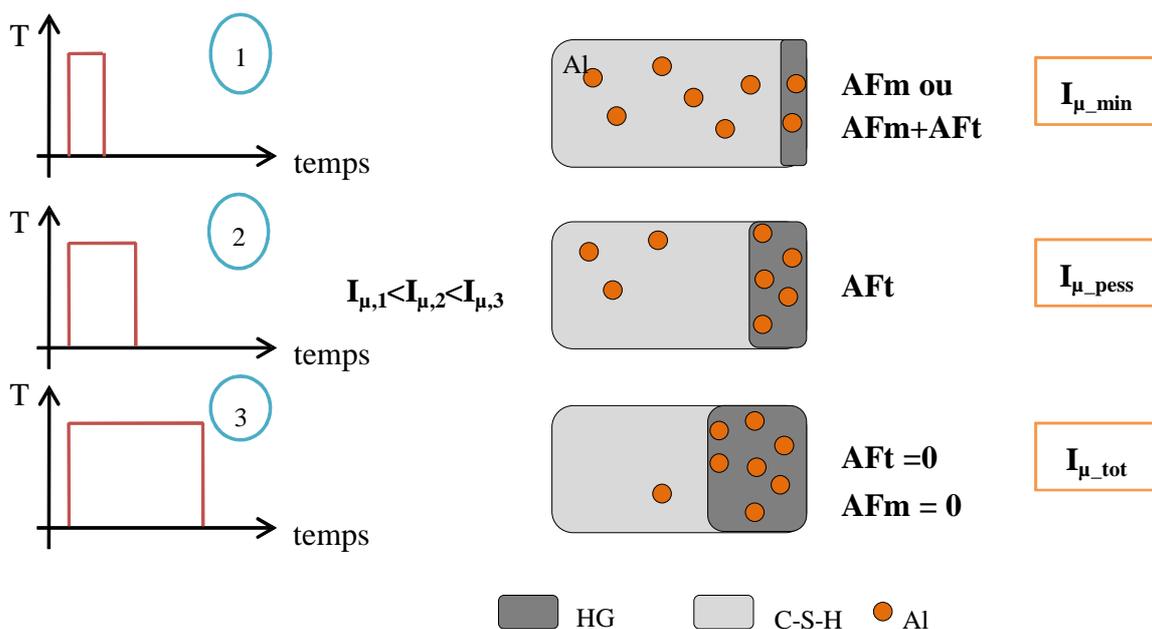


Figure 10 : Fixation des ions aluminate par les hydro-grenats (HG) en fonction du cycle de température

3.3 Précipitation d'ettringite différée

A partir des équations précédentes, il est possible de faire le bilan des espèces ioniques en solution intervenant dans ces processus (Salgues, 2013; Salgues et al., 2014). Ainsi, pour les alcalins, la variation de concentration dans le temps dépend des mouvements ioniques (via le flux et donc le coefficient de diffusion), des espèces fixées ou libérées par les C-S-H (Na^+_B),

de la quantité libérée par l'hydratation et dans certains cas par la quantité fixée dans les gels d'alcali-réaction. Le bilan est géré par l'équation suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varphi Sr [Na^+]) = -\text{div}(\vec{\varphi}_{Na^+}) - \frac{\partial Na^+_{\text{B}}}{\partial t} + \frac{\partial \alpha}{\partial t} \times Na_{\text{cement}} - \frac{2}{5} \frac{\partial ASR}{\partial t} \quad (11)$$

Il en est de même pour les sulfates et les aluminates. Dans le cas de ces deux espèces, le terme diffusif a été négligé car dans de nombreux cas, leur apparition en solution conduit à la précipitation d'une des espèces cristallisées avant que des transferts puissent avoir lieu. L'équation pour les sulfates et les aluminates prennent donc en compte la fixation par les C-S-H (et les hydro-grenats pour les aluminates uniquement), par la participation à l'ettringite ou au mono-sulfo-aluminate et l'apport lors de l'hydratation du ciment :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varphi Sr [SO_4^{2-}]) = -\frac{\partial SO_4^{2-}_{\text{B}}}{\partial t} - 3 \times \frac{\partial AFt}{\partial t} - \frac{\partial AFm}{\partial t} + \frac{\partial \alpha}{\partial t} \times SO_4^{2-}_{\text{cement}} \quad (12)$$

Dans le cas d'essais de laboratoire, pour lesquels, la concentration en alcalins est souvent élevée pour accélérer les processus. Leur rôle devient alors prépondérant et il est nécessaire que leur concentration dans le béton diminue sous une valeur voisine de 0,3 mol/l à 20°C pour que la formation d'ettringite ait lieu. De tels essais ont été simulés pendant le travail de thèse de Marie Salgues et sont présentés sur la Figure 11 (Salgues, 2013). Dans ce cas, le modèle reproduit bien la dépendance de la formation d'ettringite à la concentration en alcalins. Il est donc possible de calculer des champs d'ettringite dans l'éprouvette en fonction des conditions environnementales et de les utiliser pour mener un calcul poromécanique qui sera l'objet du deuxième chapitre de ce mémoire.

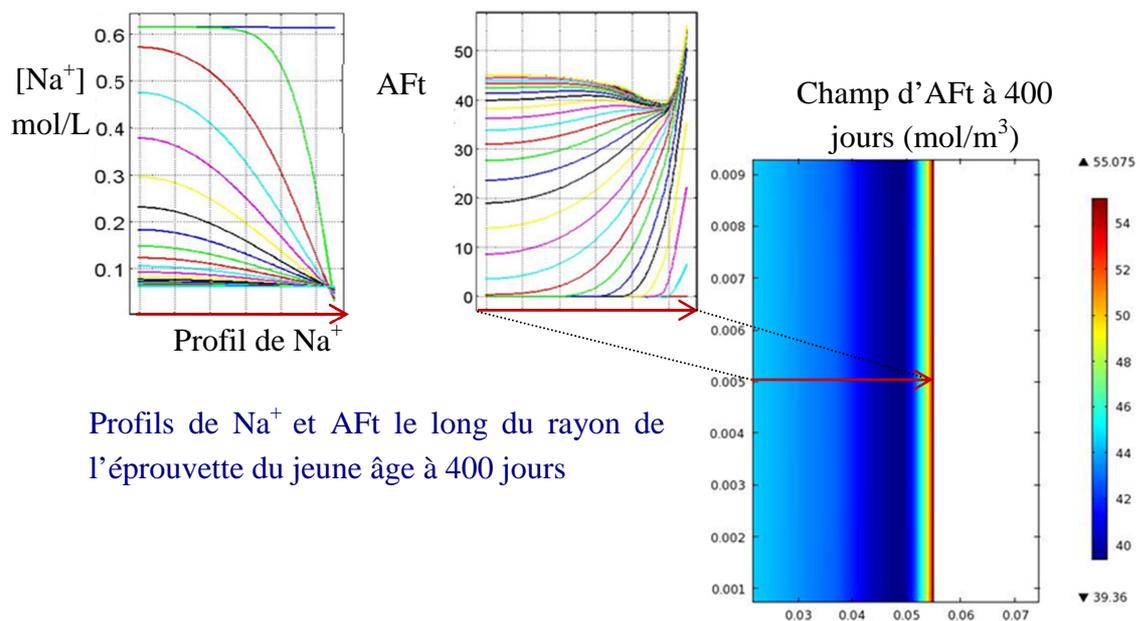


Figure 11 : Profil des concentrations en alcalins et en ettringite formée et champ d'ettringite à 400 jours pour des essais de laboratoire issus de la thèse de Renaud-Pierre Martin à l'IFSTTAR (Martin, 2010) et calculé par Marie Salgues dans (Salgues, 2013)

4. Synthèse des lois d'avancement

L'étude des conséquences de réactions de gonflement interne aux matériaux de construction nécessite la détermination la plus précise possible des volumes des phases néo-formées. L'évaluation proposée dans ce document repose à la fois sur des bases théoriques et sur des connaissances empiriques issues de la littérature ou de travaux originaux. L'avancement des réactions se traduit alors par une équation permettant de calculer le nombre de moles de gels d'alcali-réaction ou d'ettringite formées en fonction des variables (les variables principales sont rappelées dans le Tableau 5). Dans les deux cas, un paramètre cinétique (temps caractéristiques τ) permet de traduire un ou plusieurs phénomènes physiques qui restent encore difficiles à quantifier à partir de paramètres mesurables lors d'essais en laboratoire (réactivité de la silice contenue dans les granulats et probabilité de rencontre des espèces nécessaires à la formation d'ettringite dans un béton). L'observation du Tableau 5 montre la différence d'approches choisies initialement pour atteindre cet objectif pour l'alcali-réaction et la réaction sulfatique interne. En effet, dans le premier cas, le modèle ne traite actuellement qu'une variable principale : la concentration en ions alcalins alors que le modèle pour la réaction sulfatique interne prend en compte un grand nombre de variables. Pour l'alcali-réaction, le choix avait été fait de simplifier les mécanismes pour tenter de modéliser des expérimentations en conditions de températures et de degré de saturation contrôlés. A l'opposé, les phénomènes conduisant à la formation d'ettringite différée étant fortement couplés (Brunetaud, 2005), il a semblé important de produire en premier lieu un modèle aussi complet que possible afin de comprendre ces couplages et tenter dans un deuxième temps de produire un modèle simplifié plus facile à utiliser dans des calculs de structures de grandes dimensions. Dans l'avenir, le modèle pour l'alcali-réaction doit être enrichi pour prendre en compte l'effet du degré de saturation sur les mécanismes physico-chimiques.

Tableau 5 : Récapitulatif des lois d'avancement

Phénomène	Variables principales	Avancement
Alcali-réaction	$[Na^+]$	$\frac{\partial ASR}{\partial t} = \frac{1}{\tau_f} \times \frac{5}{2} \times \left([Na^+] - [Na^+]_{thr} \right)^+$
Réaction sulfatique interne	T, Sr, $[SO_4^{2-}]$, $[Ca^{2+}]$, $[Al(OH)_4^-]$, $[Na^+]$, C-S-H	$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{1}{\tau_{DEF}} \left(1 - \frac{\log(Q_{Ri})}{\log(K_i)} \right)$

Dans deux courtes études, en collaboration avec le CTMNC et Lafarge LCR, une logique identique, basée sur les travaux de Bruno Zuber (Zuber & Marchand, 2000), a été suivie pour l'étude du phénomène de gel interne des matériaux de construction (terres cuites (Multon et al., 2012) et bétons). Ainsi, il est possible de déterminer le volume de glace formé à un instant donné en fonction de la température et de la concentration ionique en solution, qui sont alors

les deux variables principales du problème. L'avancement de la formation de glace peut alors être traduit par l'évolution du degré de saturation de la porosité en glace, qui représente le volume de glace formé en fonction de la température :

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} dt = \frac{\partial S_i}{\partial T}(T) \frac{\partial T}{\partial t} dt = \int_{R_{peq}(T)}^{R_{peq}(T+dT)} \frac{d\varphi(r)}{dr} (1 - g(r, T)) dr \quad (13)$$

avec $\varphi(r)$ représentant la porosité de dimension supérieure à r et $g(r, T)$, le volume d'eau adsorbée sur les parois des pores. Le volume de glace dépend donc de la porosimétrie du matériau, la glace ne pouvant occuper que le volume de porosité dont le rayon moyen des pores est supérieur à une valeur fonction des conditions d'équilibre (Figure 12) qui pourrait être déterminée par la relation suivante (Coussy & Monteiro, 2008) :

$$R_{peq}(T, [X^+]) = \frac{2\gamma_{li}(T)}{\Sigma_M (T_m([X^+]) - T)} + \delta(T) \quad (14)$$

avec γ_{li} la tension superficielle au niveau de l'interface eau liquide / glace et T_m la température de solidification de l'eau qui dépend de la concentration ionique de la solution.

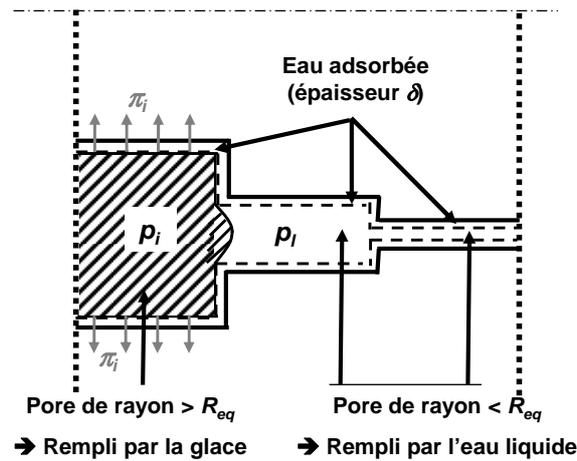


Figure 12 : Remplissage partiel de la porosité par la glace en fonction des rayons des pores

A partir du volume de glace ainsi déterminé, il est possible de calculer les conséquences mécaniques de cette formation (Multon et al., 2012).

Chapitre 2 : Conséquences mécaniques des expansions à l'échelle du matériau

1. Généralités

La formation de nouvelles phases dans les matériaux de construction ont pour conséquence première des gonflements hétérogènes conduisant à l'apparition de fissuration. D'un point de vue mécanique, les deux grandeurs à caractériser sont donc :

- la déformation positive de gonflement causée à la fois par la pression des phases néoformées et à l'ouverture de fissures,
- l'endommagement ou la modification de propriétés mécaniques initiales liés à la fissuration plus ou moins diffuse.

Du point de vue quantification des gonflements, une fois la quantité de produits néoformés calculée, les expansions peuvent être déterminées à partir d'approches empirique ou mécanique. Ainsi, des études ont montré qu'il était possible de relier l'avancement de l'alcali-réaction à l'expansion observée sur béton (Garcia-Diaz et al., 2006; Haha et al., 2007). L'approche mécanique tente d'établir la relation entre contrainte et déformation en prenant en compte la partie élastique du comportement mécanique mais également les déformations anélastiques trouvant leur origine dans l'endommagement et dans les phénomènes visqueux liés au fluage du béton. En termes de modélisations mécaniques, deux hypothèses peuvent être faites :

- considérer l'effet du produit néoformé en tant que déformations imposées (Leger et al., 1996; Multon & Toutlemonde, 2006; Multon et al., 2006, 2009; Saouma & Perotti, 2007; Comby-Peyrot et al., 2009; Dunant & Scrivener, 2010), avec une analogie possible avec les équations de thermo-mécanique usuelles,
- évaluer l'expansion liée à la pression engendrée par la formation de produits néoformés dans un milieu confiné formé par le matériau déjà durci (Scherer, 1999; Ulm et al., 2000; Bary, 2008) à travers sa relation avec l'endommagement (Capra & Sellier, 2002; Poyet et al., 2007) ou par une approche poromécanique (Coussy, 2006; Grimal et al., 2008; Comi et al., 2009; Charpin & Ehrlacher, 2014).

Les deux approches ont été utilisées dans la littérature que ce soit pour l'étude à l'échelle du matériau ou pour l'évaluation de structures endommagées. Dans les travaux présentés dans ce mémoire, les deux approches ont été successivement retenues pour évaluer les gonflements liés à l'alcali-réaction à l'échelle du matériau et l'endommagement induit. La première partie de ce deuxième chapitre présente comment il est possible d'évaluer les gonflements du matériau observés sur éprouvette en considérant uniquement l'action des granulats sur la pâte considérée sous la forme d'une déformation imposée et en négligeant donc l'endommagement propre aux granulats (Multon et al., 2009) ou de manière plus représentative des observations microscopiques sous la forme d'une pression interne aux granulats comme source de l'action

des granulats sur la pâte (approche multi-échelle considérant successivement la pression du gel d'alcali-réaction sur les granulats puis la pression des granulats sur la pâte). La fissuration induite par les gonflements des granulats ou internes à la pâte dans le cas de la réaction sulfatique interne est responsable d'une modification des propriétés mécaniques qui doit également être évaluée. Durant ces dégradations, le béton est soumis à des contraintes de traction sur de longues périodes qui causent finalement la fissuration observée (Multon et al., 2009). L'évaluation de l'endommagement lié à ces mécanismes de gonflement nécessitait donc une meilleure connaissance du comportement différé de bétons soumis à des sollicitations de traction, qui pourrait permettre une certaine déformation anélastique du béton sans pour autant causer d'endommagement. Ceci a fait l'objet d'un travail spécifique dans la thèse de Narintsoa Ranaivomanana (Ranaivomanana, 2013). Toutefois, l'endommagement seul ne peut expliquer les déformations résiduelles du béton quand il est soumis à une perte d'eau après gonflement (Multon, 2004). Il était donc nécessaire, pour représenter ce comportement, d'introduire un critère de plasticité, la déformation plastique représentant le volume de déformation anélastique liée à la fissuration (Grimal et al., 2010; Salgues, 2013). Enfin, deux phénomènes montrent l'importance des interactions entre la pression et l'endommagement du béton :

- L'analyse des phénomènes de pessimum de gonflement avec la taille des granulats (Multon et al., 2010) a conduit à s'intéresser à un mécanisme peu étudié : la perte de gels d'alcali-réaction à travers la fissuration (Gao, 2010; Gao et al., 2013c). Cet effet, qui peut avoir un effet important sur l'analyse des expansions mesurées en laboratoire, peut être décrit comme un phénomène de perméation des gels dans les fissures et lie donc directement pression et endommagement.
- Dans le cas de gonflements de matériaux soumis à des contraintes extérieures (Multon, 2004; Multon & Toutlemonde, 2006; Bouzabata et al., 2012), la pression des produits néoformés sous contrainte entraîne une orientation préférentielle de la fissuration et donc une anisotropie de l'endommagement. Ce phénomène doit être pris en compte dans le recalcul des ouvrages atteints.

Les trois parties suivantes décrivent donc ces effets mécaniques liés à l'apparition de nouvelles phases dans des matériaux durcis.

2. Déformation imposée d'expansion ou pression

Phases néoformées effectives

A la fin du chapitre précédent, il était possible d'évaluer le volume de phases néoformées à partir d'équations simplifiées d'avancement. Toutefois, dans le cas de l'alcali-réaction, les observations expérimentales montrent :

- L'absence d'expansion pour les particules les plus fines dans le cas d'un certain nombre de granulats courants (Multon et al., 2008b, 2010; Gao et al., 2013c),
- Un gonflement lent voire nul en début de conservation, suivi par une accélération importante des gonflements (souvent décrit par une courbe en forme de 'S') alors que

les mécanismes de diffusion et de réaction ont en général des évolutions exponentielles, ce qui a été observé pour l'alcali-réaction (Kim et al., 2015).

Plusieurs mécanismes permettent d'expliquer ce phénomène, toutes basées sur l'hypothèse qu'une partie des produits formés en début de réaction ne sont pas effectifs en termes d'expansion. Les précédentes modélisations ont supposé qu'une partie des produits d'alcali-réaction pouvait migrer dans une porosité connectée proche des sites réactifs (porosité de la pâte de ciment ou des granulats) (Suwito et al., Furusawa et al., 1994; Sellier et al., 1995; Poyet et al., 2007; Multon et al., 2009; Charpin & Ehrlacher, 2014). Cette hypothèse semblait réaliste, d'autant plus que le volume de gels non efficaces en termes d'expansion nécessaire pour retrouver les différences de gonflements observées, conduisait à des distances relativement faibles (moins de 10 μm). Lors d'observations microscopiques, ce type de comportement est noté pour des granulats très réactifs pour lesquels les gels sont formés d'abord dans des zones proches de la pâte de ciment et peuvent donc migrer dans la porosité environnante (Ponce & Batic, 2006; Giaccio et al., 2008; Idir et al., 2010; Pouhet & Cyr, 2014). Cependant, d'autres granulats réactifs ne montrent pas de produits néoformés avant les premières fissurations (Ponce & Batic, 2006; Haha et al., 2007; Sanchez et al., 2015). Pour ce type de granulats, des considérations chimiques peuvent également expliquer l'absence d'expansion au début des réactions. En effet, plusieurs travaux ont montré que les gels produits au démarrage des mécanismes d'attaque n'entraînent pas de gonflement (Garcia-Diaz et al., 2006; Ichikawa & Miura, 2007) ce qui a été décrit comme une absorption superficielle des alcalins par la silice réactive sans expansion (Garcia-Diaz et al., 2010).

Pour ces différentes raisons, la fraction de gels effectifs en terme d'expansion a été définie par :

$$\varphi_{eff} = \varphi_{gel} - \varphi_{0_exp} \quad (15)$$

φ_{0_exp} est la fraction de gel ne provoquant pas d'expansion dans le béton. Elle peut être calculée en fonction de la taille du granulat réactif. Cette fraction peut être évaluée pour obtenir l'absence d'expansion pour les particules les plus fines et le retard de gonflement pour les particules de tailles plus importantes.

Action des phases néoformées considérée comme une déformation imposée

Plusieurs approches successives ont été utilisées pour évaluer les gonflements mesurés à partir du volume de gels d'alcali-réaction calculé. Ainsi dans le travail d'analyse faisant suite au travail de master de recherche de Paco Diederich, une proportionnalité directe a été supposée entre le volume de gels et le gonflement (Multon et al., 2010). L'intérêt d'une telle approche repose sur sa simplicité d'un point de vue mécanique et la possibilité d'en déduire des ordres de grandeurs d'expansion lors de la réalisation de béton réactif à partir d'un granulat connu. Toutefois, elle ne permet pas d'envisager une évaluation simultanée de l'effet de la fissuration. Pour atteindre cet objectif, un modèle mécanique plus complet a été développé

dans la même période. Il reposait sur l'hypothèse de considérer l'action du gel d'alcali-réaction comme une déformation imposée par le granulat sur le béton environnant. Le gel d'alcali-réaction étant considéré incompressible par rapport aux propriétés élastiques du béton, la loi de comportement entre contrainte et déformation dans le granulat réactif pouvait être écrite sous la forme suivante :

$$\underline{\underline{\sigma}}_a = \lambda_a \text{tr} \underline{\underline{\varepsilon}}_a \cdot \underline{\underline{I}} + 2 \cdot \mu_a \cdot \underline{\underline{\varepsilon}}_a - (3\lambda_a + 2\mu_a) \cdot \underline{\underline{\varepsilon}}_{imp1}(t) \quad (16)$$

avec λ_a et μ_a les coefficients de Lamé du granulat et la déformation imposée par le granulat pouvant être évaluée à partir de la fraction de gel effective déterminée par l'équation (15).

Le béton environnant la particule réactive suit alors une loi élastique usuelle :

$$\underline{\underline{\sigma}}_{SC} = \lambda_{SC} \text{tr} \underline{\underline{\varepsilon}}_{SC} \cdot \underline{\underline{I}} + 2 \cdot \mu_{SC} \cdot \underline{\underline{\varepsilon}}_{SC} \quad (17)$$

avec λ_{SC} et μ_{SC} les coefficients de Lamé du béton entourant le granulat.

La déformation imposée étant supposée isotrope, il est alors possible de résoudre le problème mécanique dans un volume représentatif élémentaire (VER) supposé sphérique et centré sur le granulat réactif à partir de conditions aux limites ordinaires (continuité des déplacements et des contraintes dans la direction radiale à la limite entre granulat et pâte, et contrainte radiale nulle sur la limite extérieure du VER).

Du fait de l'hypothèse de déformation imposée homogène dans le granulat, celui-ci est soumis à une contrainte isotrope équilibrée par des contraintes radiales de compression dans le béton et par des contraintes de traction dans la direction tangentielle (Figure 13). Sous cette hypothèse, la contrainte de traction maximale est au niveau de l'interface granulat/béton et la fissuration devrait donc apparaître à ce niveau. Une fois la fissuration apparue, l'équation de comportement dans le béton entourant la particule réactive (Equation 17) doit être modifiée pour prendre en compte l'effet de la fissuration sur les propriétés mécaniques.

L'inconvénient principal de cette approche est de ne représenter que partiellement la réalité. En effet, pour un certain nombre de granulats réactifs, la fissuration au niveau de l'interface entre granulat et pâte n'apparaît que dans un deuxième temps, après la fissuration interne des granulats eux-mêmes (Dunant & Scrivener, 2010; Sanchez et al., 2014b). Une telle modélisation pourrait être obtenue en représentant la silice réactive dans le granulat (Dunant & Scrivener, 2010). Pour obtenir un modèle avec une solution analytique, la silice réactive devrait être représentée comme une sphère au centre du granulat et cela reviendrait alors à la même résolution à une échelle au-dessous avec pour gain la possibilité d'estimer l'endommagement du granulat de manière indépendante à celui du béton. Une solution plus réaliste est, à partir d'équations de comportement similaires, de représenter la silice réactive sous forme d'inclusions dans le granulat. Dans ce cas, il n'y a pas de solution analytique, mais le problème peut être résolu dans le cadre des éléments finis étendus (Dunant, 2009; Dunant & Scrivener, 2010). Toutefois, si cette approche ne permet pas d'estimer l'endommagement

du granulat sous l'effet de l'attaque chimique, elle permet d'évaluer un gonflement et d'obtenir une évaluation des conséquences sur les propriétés mécaniques du béton de manière globale, comme indiqué dans le paragraphe relatif à l'endommagement du béton.

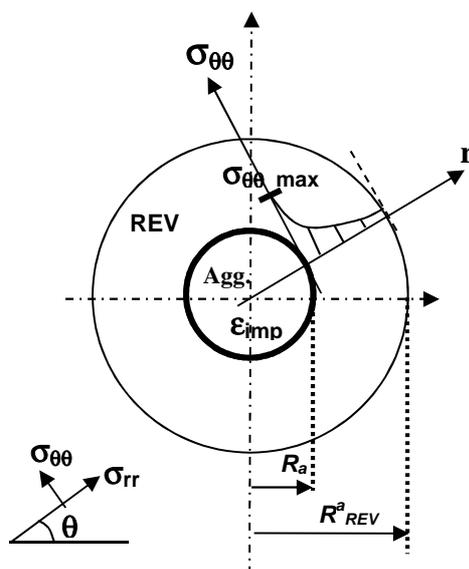


Figure 13 : Contraintes tangentielles de traction dans le béton entourant une particule réactive

Action des phases néoformées considérée comme une pression interne au béton

La représentation de l'action des phases néoformées par une pression interne au béton a été utilisée dans différents travaux de modélisations micro et macroscopiques de l'alcali-réaction (Ulm et al., 2000; Capra & Sellier, 2003; Grimal, 2007; Poyet et al., 2007; Comi et al., 2009; Charpin & Ehrlacher, 2012). Dans la continuité des travaux d'Etienne Grimal (Grimal, 2007), une approche poromécanique macroscopique similaire a été utilisée dans la thèse de Marie Salgues pour représenter les conséquences mécaniques des gonflements liés à la réaction sulfatique interne (Salgues, 2013). Dans ces travaux, les deux paramètres, b , coefficient de Biot, et M , module de Biot, définis dans la théorie de la poromécanique (Coussy, 2004), sont utilisés comme paramètres de calibration afin de retrouver le gonflement d'éprouvettes en condition de confinement. La poromécanique a également été utilisée dans le cadre de l'étude de l'action du gel sur les matériaux de terres cuites afin d'évaluer l'impact de la pression de la glace couplée à l'effet de la fermeture de la porosité par le gel sur la pression de l'eau non gelée et évaluer le développement de contraintes dans le matériau poreux (Multon et al., 2012).

Afin de représenter plus finement les mécanismes d'endommagement du béton lors d'une réaction alcali-granulats, il est également possible de proposer un modèle poromécanique multi-échelle : celle de l'action du produit de réaction sur le granulat et celle du granulat sur le béton environnant (Figure 13). Ainsi, à l'échelle du granulat, il est possible d'écrire que la pression du gel sur le granulat est proportionnelle à la fraction de gel effective diminuée de la déformation volumique élastique de la porosité du granulat φ_{el}^{agg} et du volume de gels remplissant les fissures φ_{cr}^c :

$$p_{gel} = M_{gel} \cdot (\varphi_{eff} - \varphi_{el}^{agg} - \varphi_{cr}^c) \quad (18)$$

avec M_{gel} le module de Biot du gel dans le granulat qui peut être évalué en fonction de la fraction de gel formée comme proposé dans (Dormieux et al., 2006; Coussy & Monteiro, 2008).

Le volume de fissures du béton φ_{cr}^c peut être évalué à partir d'un modèle d'endommagement ou de plasticité. Les valeurs des paramètres de calibration (volume molaire et fraction de gel non effectif en termes d'expansion) seront alors influencées par la capacité du béton à empêcher, de manière mécanique, l'expansion du matériau en fonction de la fraction de gel formé (Multon et al., 2010). Ces paramètres dépendent donc du modèle mécanique et en particulier de l'évaluation de la perte de rigidité du matériau lors de la fissuration. Dans notre cas, nous avons utilisé ces équations dans le cadre du modèle avec endommagement anisotrope couplé au fluage développé dans la thèse d'Etienne Grimal (Grimal, 2007). Le critère de fissuration est ici évalué à partir de la pression dans le gel (Equation 19) qui est donc la cause de la première fissuration localisée dans le granulat, avant d'entraîner la fissuration du béton.

A l'échelle du béton (Figure 13), la déformation volumique du granulat causée par la pression des gels d'alcali-réaction conduit à la déformation du béton ce qui peut être évaluée à travers l'action d'une pression équivalente du granulat sur le béton :

$$p_{agg} = M_{agg} \cdot (\varphi_{def}^{agg} - \varphi_{el}^c) \quad (19)$$

avec M_{agg} le module de Biot des granulats dans le béton et φ_{el}^c la déformation élastique du béton.

La pression du granulat sur le béton est finalement reliée à la pression du gel par l'équation suivante :

$$p_{agg} = b_{gel} \cdot p_{gel} \quad (20)$$

Il est alors possible d'évaluer la pression des gels sur le béton en fonction des conditions de compressibilité des gels d'alcali-réaction, des granulats et du béton. Dans le cas de béton contenant plusieurs classes de granulats réactifs, la loi de comportement poromécanique devient donc (Dormieux et al., 2006) :

$$\sigma = K_d^c \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{an}) - \sum_{agg} b_{agg} \cdot p_{agg} \quad (21)$$

avec K_d^c la compressibilité du béton prenant en compte l'endommagement et ε_{an} les déformations irréversibles liées à la fissuration et au fluage.

Dans cette modélisation, le gonflement d'alcali-réaction résulte de deux causes : la déformation des granulats sous l'action de la pression des gels et la fissuration induite dans les

granulats puis le béton. Un des intérêts de cette approche poromécanique, en plus de représenter la pression de manière plus réaliste par l'approche multi-échelle, est la possibilité de couplage avec le modèle de fluage développé par Alain Sellier (Sellier et al., 2016) dans une approche similaire à celle utilisée dans la thèse d'Etienne Grimal (Grimal, 2007), et d'avoir ainsi une prise en compte plus fine des effets du fluage que dans l'approche analytique par déformation imposée où le fluage n'était considéré que de manière forfaitaire (Multon et al., 2009).

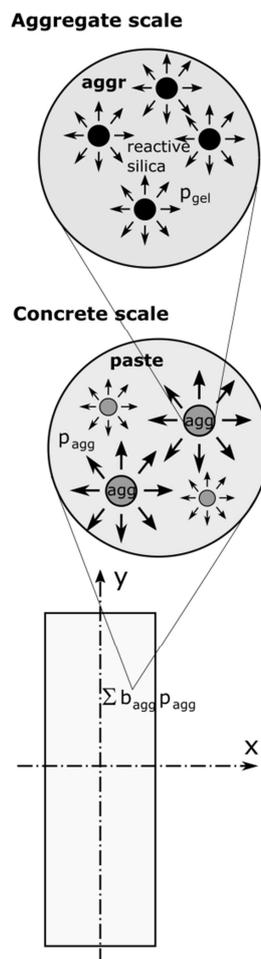


Figure 14 : Approches poromécaniques multi-échelle (échelle du granulat et à échelle du béton)

3. Fissuration, endommagement et fluage

3.1 Endommagement autour d'un site de gonflement

La mesure des gonflements d'alcali-réaction ou de réaction sulfatique intègre à la fois une déformation élastique, liée à la pression causée par les produits néoformés, et une déformation liée à l'ouverture des fissures résultant de cette formation. La fissuration du matériau entraîne également une modification plus ou moins importante des propriétés mécaniques des matériaux qui peut être évaluée à travers l'utilisation d'une variable d'endommagement dont la détermination peut être basée sur le principe d'équivalence en contraintes. Le milieu fissuré

(de module d'Young initial E_0) est remplacé par un milieu équivalent homogène sans fissure mais de raideur réduite (caractérisé par un module d'Young E_d) conduisant au même déplacement que le matériau fissuré initial de module E_0 (Figure 15) (Multon et al., 2009). Le matériau fissuré ne pouvant pas reprendre de contraintes de traction supérieures à la résistance en traction du béton, le béton non fissuré peut être représenté par une sphère creuse de rayon intérieur R_d soumise une pression extérieure p (Figure 15).

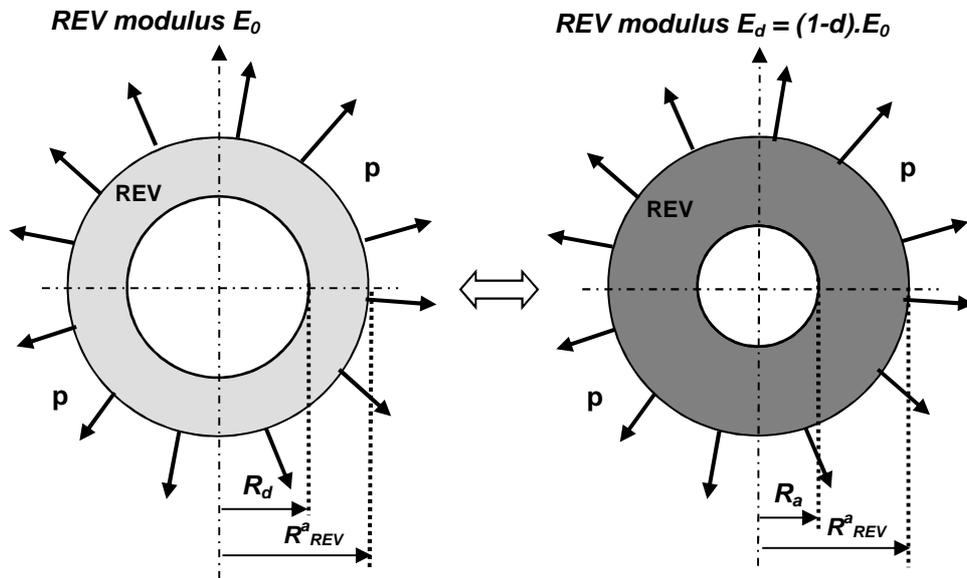


Figure 15 : Détermination du module d'Young du béton endommagé

Selon le principe d'équivalence, les contraintes dans la sphère creuse de rayon intérieur R_d (et de module E_0) doivent être égales aux contraintes dans la sphère non fissurée de rayon intérieur R_a (et de module E_d) sous une pression identique (Figure 15). Ainsi, les deux sphères creuses ont des raideurs identiques et l'endommagement peut être déterminé par :

$$d = 1 - \frac{E_d}{E_0} \quad (22)$$

Dans le cas où R_d tend vers R_a , l'endommagement est égal à 0. Au contraire, si R_d tend vers le rayon extérieur du VER R^a_{REV} , l'endommagement tend vers 1. Dans le cas d'un béton contenant plusieurs classes de granulats réactifs, les calculs sont menés indépendamment pour chaque classe. La valeur maximale est alors retenue pour déterminer le module endommagé du béton.

Dans le cas d'un VER fissuré, le gel est alors supposé être sous pression à la fois dans le granulat et dans la fissuration induite par le gel (Figure 16). Il faut noter que la partie mécanique de ce modèle ne requiert aucun calage mais conduit à l'évaluation de l'endommagement en fonction des propriétés mécaniques initiales et du gonflement du béton.

Ne pas prendre en compte le fluage du béton dans les mécanismes de fissuration pourrait conduire à une surestimation de l'endommagement. Cependant, l'état de contrainte dans un matériau soumis à des gonflements libres est principalement un état de traction et le fluage dans un matériau âgé sous une telle sollicitation est peu connu. Dans cette première approche, l'effet du fluage a été pris en compte de manière forfaitaire par un module d'Young différé comme préconisé dans les règlements de calculs de structures en béton usuel. En parallèle, des recherches sur l'évaluation du fluage en traction ont été lancées afin d'évaluer si les lois utilisées pour le fluage de compression pouvaient être conservées pour évaluer l'impact du fluage en traction sur l'endommagement dans le cas de matériaux soumis à des gonflements internes.

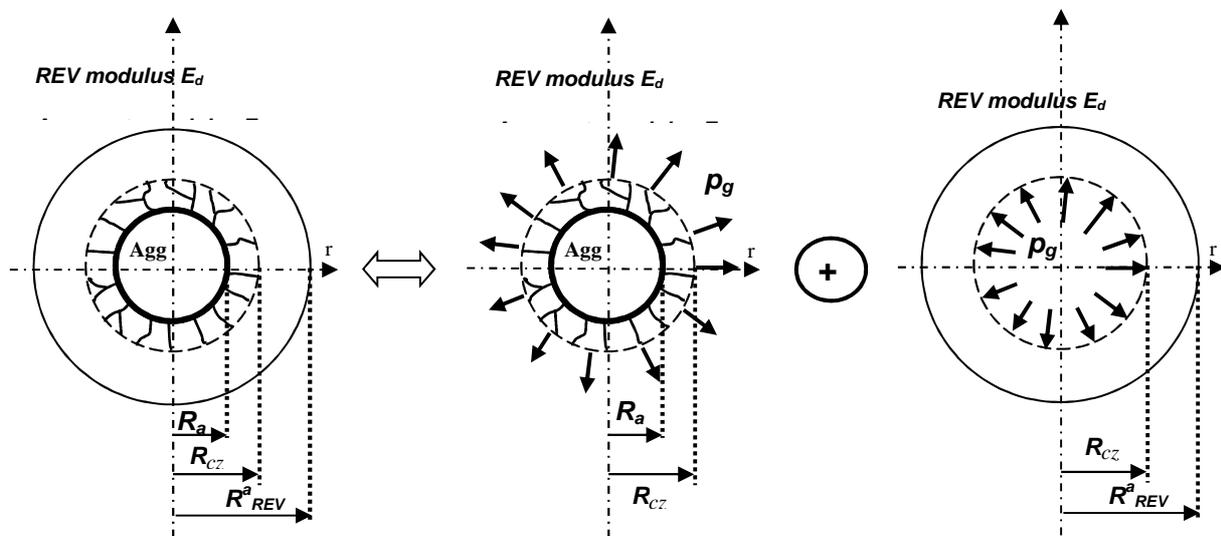


Figure 16 : Equilibre mécanique d'un volume élémentaire représentatif fissuré

Ce modèle d'endommagement a été utilisé par Léandro Sanchez lors du stage qu'il a effectué au LMDC pendant sa thèse (Sanchez, 2014) afin de mener une étude comparative entre le modèle et les observations expérimentales qu'il avait menées en termes d'hypothèses, de gonflements et d'endommagement (Sanchez et al., 2014b). Dans ce but, les paramètres du modèle ont été obtenus par calage pour reproduire les courbes de gonflement puis l'endommagement induit par ce gonflement a été comparé aux modifications des propriétés mécaniques en compression (module et résistance) et en traction (résistance obtenue lors d'un essai de pression sur tube creux) mesurées pour quatre niveaux d'expansion (0,05, 0,12, 0,20 et 0,30 %). Pour la comparaison avec la résistance en traction, la valeur de l'endommagement pour le premier niveau d'expansion est en général assez proche de la réalité pour les neuf bétons testés. En revanche, l'évolution de l'endommagement obtenue par le modèle se poursuit en s'atténuant avec l'augmentation du gonflement alors que les essais montrent une stagnation de la baisse de la résistance en traction qui reste souvent identique à tous les niveaux de gonflements (Sanchez et al., 2014b). Expérimentalement, la résistance en traction semble surtout sensible à l'apparition des fissures alors que le modèle évalue un endommagement plus progressif conduisant à une bonne estimation de l'endommagement

pour les bas niveaux d'expansion mais à une surévaluation pour les fortes expansions. Le modèle étant représentatif d'un matériau en traction, l'endommagement obtenu ne pouvait pas être comparé directement aux essais de résistance en compression. En effet, lors d'un essai de compression, une partie des fissures induites par les gonflements se referment de manière plus ou moins complète. Dans une telle configuration, le comportement mécanique n'est pas équivalent en traction et en compression et l'endommagement de traction ne peut pas être transposé directement pour les sollicitations de compression (Sellier & Bary, 2002). Toutefois, une comparaison a été menée à travers une loi simplifiée afin de considérer de manière empirique l'effet de l'endommagement de traction sur la variation de résistance en compression :

$$d_c = 1 - (1 - d_t)^{0.15} \quad (23)$$

Cette loi, tirée d'une calibration obtenue sur essais mécaniques (Sellier & Bary, 2002), permet d'avoir une bonne estimation de l'évolution de la résistance en compression de béton endommagé par l'alcali-réaction à partir de l'endommagement de traction évalué par le modèle d'endommagement précédent pour les neuf bétons étudiés (Sanchez et al., 2014b).

3.2 Impact du fluage de traction

Lors de la mise en pression du béton par la formation de gels d'alcali-réaction ou des produits de la réaction sulfatique interne, le matériau est le siège de contraintes de traction importantes qui provoque sa fissuration sur des échelles de temps souvent longues dans les conditions des ouvrages. Au cours des réflexions sur le développement de la modélisation mécanique des endommagements dus à cette mise en pression, un certain nombre de questions sur l'effet possible du comportement différé du béton sur cette quantification se sont posées. En particulier, une partie de la déformation importante de gonflement (entre 1000 et 5000 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour une réaction alcali-granulats et souvent plus pour une réaction sulfatique interne en conditions de laboratoire, alors que le matériau rompt pour une déformation positive de l'ordre de 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ lors d'un essai de traction directe) pouvait-elle trouver sa cause dans la déformation de fluage de traction ? Cet aspect du fluage du béton, peu étudié pour des bétons matures, a donc fait l'objet de travaux expérimentaux et d'analyses numériques particulières qui peuvent trouver un intérêt dans toutes les problématiques de fissuration du béton (retrait empêché, endommagement du béton de surface lors de la corrosion des armatures...) indépendamment de la question de gonflements internes.

La méthodologie retenue a été basée sur la comparaison du comportement de fluage en traction et compression directes et en traction et compression par flexion sur des bétons âgés de plus de 28 jours pour limiter les interactions avec l'hydratation du ciment en collaboration avec l'Andra (Ranaivomanana, 2013). Le fluage en compression est un mécanisme couramment étudié depuis de longues années (Benboudjema, 2002) et pour l'étude duquel le LMDC est bien équipé. Le premier objectif a été de développer des bâtis permettant la sollicitation en traction directe et en flexion d'éprouvettes de béton pendant de longues durées et d'assurer une évaluation précise en termes de déformation. Il a alors été possible de

comparer le comportement différé d'un béton haute performance sous l'effet des différents types de sollicitation et de les analyser à l'aide de la modélisation développée au LMDC par Alain Sellier.

3.2.1 Etude expérimentale du fluage de traction directe et par flexion

Le développement de bâtis de mesures de fluage de traction directe pour des matériaux à faible résistance comme le béton pose un grand nombre de difficultés, avec, en particulier, la mesure de faibles déformations de fluage pendant de longues périodes (Reviron, 2009; Ranaivomanana, 2013). Un soin particulier a donc été apporté pour obtenir sur deux bâtis de fluage de traction :

- une mise en charge de traction simple la plus uniforme possible, en limitant au maximum les actions mécaniques parasites (soin pour le centrage des éprouvettes sur les casques de fixation, fixation des éprouvettes par des câbles, rouleaux cylindriques pour fixation des câbles sur le bâti – Figure 17) et maintenue constante sur environ 100 jours,
- des conditions de températures maintenues les plus constantes possibles en menant les essais dans une salle climatisée, en utilisant une boîte calorifugée particulière pour chaque éprouvette en traction pour limiter les variations de température brutale et en associant une éprouvette en retrait libre coulée lors de la même gâchée placée dans la même boîte calorifugée,
- deux mesures de déformations par éprouvette à l'aide de jauges spéciales « longues durées » avec support métallique pour éviter la perte d'adhérence par remontée capillaire (Ranaivomanana, 2013; Ranaivomanana et al., 2013a).

Le même soin a été apporté pour la réalisation d'un bâti de fluage en flexion sur lequel deux éprouvettes 100 x 100 x 500 mm peuvent être testées simultanément (Figure 18). Pour ce chargement, les éprouvettes étaient équipées de trois jauges, en fibres supérieure et inférieure et à mi-hauteur de l'éprouvette, afin d'évaluer l'état de déformation dans une section droite de l'éprouvette.

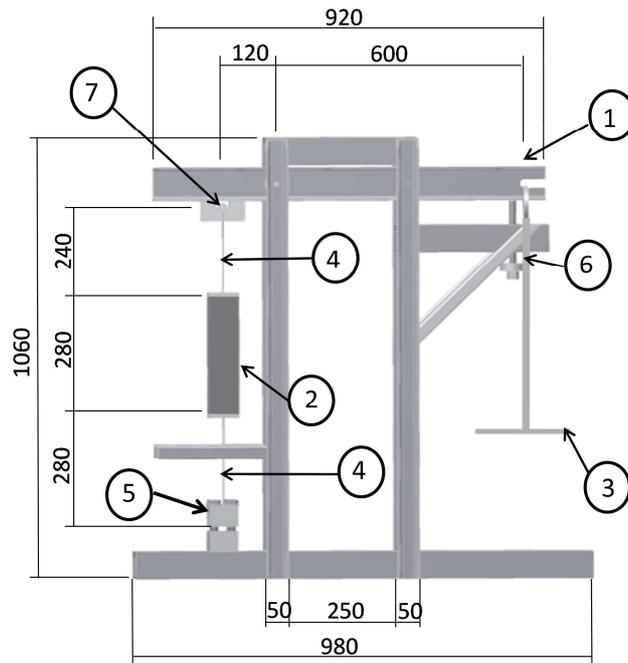


Figure 17 : Bâti de fluage en traction (① bras de levier, ② éprouvette prismatique 70×70×280 mm, ③ plateau de chargement, ④ câble de transmission d'effort, ⑤ contrôle d'horizontalité, ⑥ vis d'arrêt, ⑦ rouleau cylindrique) (Ranaivomanana, 2013)

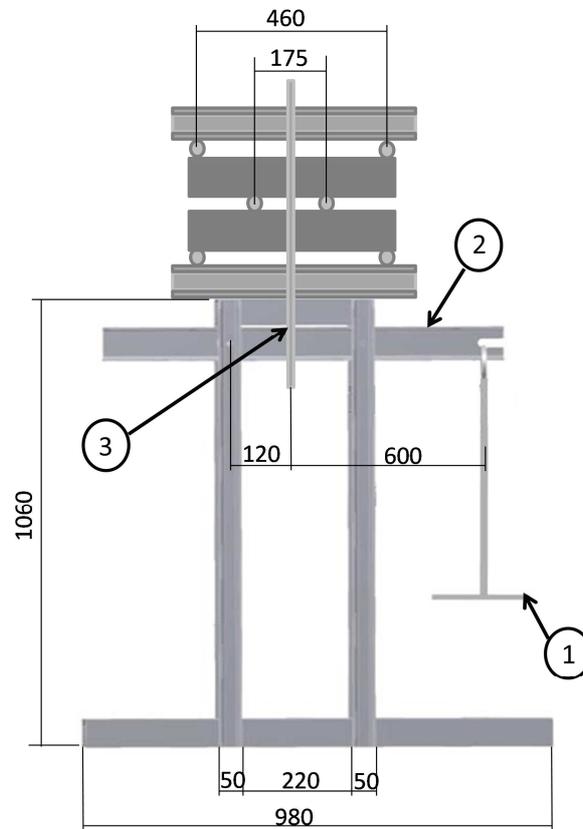


Figure 18 : Bâti de fluage en flexion (① plateau, ② bras de levier, ③ cadre rigide pour la transmission des efforts du bras de levier aux éprouvettes) (Ranaivomanana, 2013)

Les résultats pour les essais en traction directe et flexion ont été obtenus dans des conditions expérimentales toujours très proches (une seule gâchée de béton, conservation dans une même salle et utilisation d'un même moyen de mesure) permettant une analyse comparative fiable. L'étude des déformations instantanées a permis de confirmer que l'état de sollicitation visé était obtenu avec une assez bonne précision lors de ces essais. La comparaison des mesures différées de déformation sur une même éprouvette a permis de quantifier un faible écart au sein du matériau.

3.2.2 Interaction entre retrait, fluage et endommagement

La réalisation de ces essais pour trois niveaux de charges entre 30 et 50 % de la résistance en traction pour les essais de traction directe et flexion et deux niveaux de charge (30 et 50 %) pour la compression simple ont permis de comparer et d'analyser le comportement d'un béton haute performance. La Figure 19 présente de manière synthétique l'ensemble des résultats pour tous ces niveaux de charge pour les trois sollicitations en termes de fluage propre spécifique obtenus après déduction des déformations instantanées et des déformations de retrait (afin de rendre la comparaison plus facile, les déformations négatives de compression directe et par flexion ont été tracées en valeur absolue).

Pendant les premiers jours, les déformations de fluage ne sont pas significativement différentes pour les trois types de chargement. Elles évoluent de manière attendue selon les conditions de chargement (poursuites de l'extension en traction et du raccourcissement en compression). A 5 jours, les déformations de fluage spécifique en traction directe et en traction et compression par flexion sont du même ordre de grandeur (entre 3 et 5 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$) pour tous les niveaux de chargement. En compression directe, le fluage est deux fois plus important (entre 7 et 9 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$ à 30 et 50 %). Après 5 jours, les différences s'accroissent : le fluage de compression reste le plus important, le fluage de traction et compression par fluage est intermédiaire (avec peu de différence entre les deux (Ranaivomanana, 2013)) alors que le fluage en traction directe est le plus faible et montre même une évolution négative pour le moins inattendue.

La forte dispersion des résultats en traction directe sans rapport spécifique avec le niveau de chargement peut s'expliquer par la faible amplitude des déformations mesurées ou par la dispersion des mesures de retrait endogène (Ranaivomanana, 2013). Toutefois, il est important de noter que cette dispersion est plus faible pour les mesures de fluage en flexion qui utilisent les mêmes moyens de mesure pour des déformations du même ordre de grandeur et qu'elles sont également plus faibles lors de la recouvrance obtenue sur ces mêmes éprouvettes (Ranaivomanana, 2013; Ranaivomanana et al., 2013b). La raison pourrait plutôt être trouvée dans le comportement usuellement plus dispersé du béton sous sollicitation de traction. Ainsi, la dispersion de la résistance en traction du béton engendre un manque de précision en termes de niveau de chargement réellement subi par le matériau. De plus, le béton ayant des réponses plus dispersées en traction qu'en compression en termes de comportement instantané, il n'est pas surprenant de noter un résultat similaire en comportement différé.

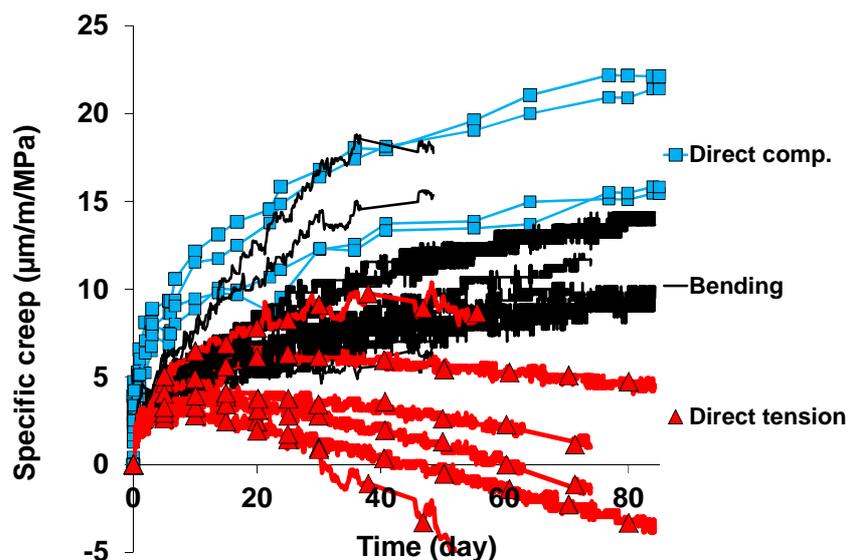


Figure 19 : Comparaison du fluage propre spécifique en traction et compression directes et en zones tendue et comprimée d'une éprouvette en flexion après soustraction du retrait sur éprouvette libre pour trois niveaux de contraintes (Ranaivomanana, 2013)

Les déformations de fluage en flexion pour les trois niveaux de charge et en compression à 30 % de la résistance en compression sont du même ordre de grandeur alors que la déformation de fluage en compression à 50 % est plus grande et que les déformations de fluage en traction directe sont systématiquement plus faibles avec une pente négative. Ces observations peuvent trouver une explication dans l'augmentation du retrait du matériau du fait de la mise en charge et en relation avec l'endommagement que subi le béton pendant le fluage (Rossi et al., 2012). En effet, pour obtenir les courbes de la Figure 19, une déformation de retrait obtenue sur éprouvette libre a été soustraite aux déformations totales. Cependant, cette déformation n'est peut-être pas représentative du véritable retrait connu par le matériau sous charge. L'endommagement de fluage pourrait ainsi permettre une reprise de l'hydratation de grains anhydres inaccessibles à l'eau avant endommagement entraînant un retrait plus fort dans les éprouvettes chargées, quel que soit le type de charge, que dans les éprouvettes libres (Rossi et al., 2012). Ainsi, en compression, plus la charge est importante, plus l'endommagement de fluage sera important et plus le retrait sous charge sera important. Ne soustraire que le retrait libre (plus faible) conduit alors à surestimer la déformation de fluage. Dans le cas de la traction, retrait et fluage de traction sont de signes opposés, soustraire le retrait conduit donc à une augmentation de la déformation déduite et sous-estimer le retrait conduit donc à sous-estimer la déformation de fluage de traction. En traction et compression directe, l'état de sollicitation est assez uniforme dans l'éprouvette, un état uniforme d'endommagement de fluage peut donc être attendu et être en relation directe avec le niveau de charge. Au contraire, en flexion, une faible partie de la poutre est soumise à l'état de sollicitation maximale et l'endommagement de fluage ne doit être du même ordre de grandeur que dans une faible partie de l'éprouvette. Dans de telles conditions, le retrait dans une grande partie de la poutre en flexion doit être proche du retrait sur l'éprouvette libre de contrainte. Finalement, le fluage de flexion est peut-être celui qui représente le mieux le

fluage du matériau car le retrait dans l'éprouvette en flexion est le moins impacté par la mise en charge.

Le comportement de fluage en traction et en compression semblent différents en fonction de l'âge du chargement et de leurs conservations (Ranaivomanana et al., 2013b; Hilaire et al., 2014). Au jeune âge, l'hydratation est en cours, l'endommagement de fluage est probablement faible car la rigidité du matériau est faible et permet donc une adaptation rapide. Dans le cas des bétons conservés en eau (Brooks & A.M., 1977), le retrait reste réduit par les conditions hydriques, son impact sur le fluage est donc faible. L'étude menée par Narintsoa Ranaivomanana a confirmé les premiers résultats de fluage en traction sur des bétons mûres (Rossi et al., 2012). Les déformations spécifiques de fluage, après soustraction du retrait libre, sur des bétons pour lesquels l'hydratation est avancée, semblent donc différentes en traction et en compression. Toutefois cette différence pourrait n'être qu'un artéfact dû à la méconnaissance du retrait réel sous charge (Ranaivomanana, 2013; Ranaivomanana et al., 2013b).

L'analyse de ces résultats par un modèle de comportement différé du béton a permis de montrer que le fluage plus faible en traction pouvait s'expliquer en partie par le rôle du retrait du matériau avant chargement. En effet, ce retrait pourrait entraîner une consolidation du béton qui aurait un impact plus important sur le fluage de traction que sur le fluage de compression dont l'amplitude est plus grande (Ranaivomanana, 2013). Toutefois, ce modèle ne prend pas encore en compte le retrait supérieur sous charge de traction et ne permet donc pas de retrouver les pentes négatives observées expérimentalement. Des travaux sont actuellement menés par Narintsoa Ranaivomanana pour intégrer ces phénomènes à la dernière version du modèle (Sellier et al., 2016). Ces nouveaux développements pourront être validés lors d'une confrontation avec les résultats de cette étude expérimentale.

La différence de fluage en traction et compression semble donc être réduite, particulièrement dans des bétons en conditions de saturation en eau importante. Dans le cadre des réactions de gonflement interne (qui ont lieu dans des bétons à degrés de saturation en eau supérieurs à 80 %), la détermination de l'impact du fluage sur l'endommagement semblent donc pouvoir être menée sur la base des résultats de fluage en compression avec un risque d'erreur assez réduit. La déformation positive importante ne s'explique donc pas par un fluage plus important en traction. Le gonflement doit donc s'expliquer principalement par une multi-fissuration diffuse, constituée par des fissures de petites tailles enchevêtrées et non continues, qui permet d'expliquer des déformations positives si importantes sans provoquer de rupture complète du matériau y compris sur des échantillons de petites dimensions.

3.3 Déformations irréversibles de gonflement et plasticité

Lors d'une alcali-réaction, ces déformations positives importantes de gonflement sont principalement irréversibles. Dans le cas d'un chargement extérieur de compression mené après gonflement, une partie de la fissuration sera refermée mécaniquement, ce qui peut être observé lors de la première mise en charge d'une mesure de module d'élasticité (Multon, 2004). En revanche, le retrait hydrique reste inchangé avant et après gonflement (Multon &

Toutlemonde, 2010), ce qui témoigne d'un comportement de type plastique en termes de pression. Une fois ouverte par la mise en pression interne, la fissuration ne se referme plus même si les gels d'alcali-réaction sont soumis à un séchage. Ce caractère irréversible peut s'expliquer par l'endommagement irréversible des granulats et d'une partie du béton, qui une fois fissurés ne peuvent pas reprendre leur forme et leur emplacement initiaux et par une cristallisation d'une partie des gels pouvant en partie combler les fissures.

Dans la version actuelle du modèle de comportement de béton soumis à des pressions internes, le comportement plastique est modélisé avec un écrouissage positif (Figure 20). Ainsi, la pression de gel crée une déformation positive élastique jusqu'à ce que la contrainte engendrée localement (avec possibilité de prise en compte de concentration de contrainte) atteigne la résistance en traction du béton. D'un point de vue physique, cet écrouissage positif permet de traduire l'existence de plusieurs directions de fissuration autour d'un même site de gonflement. En effet, avec un écrouissage nul, une fois que la première fissure est apparue autour d'un granulat, elle ne peut plus que s'ouvrir sans produire de nouvelles fissurations. Dans la réalité, si une première fissure est arrêtée par la présence d'une zone plus résistante (zone de granulats non réactive par exemple), la pression va s'élever jusqu'à provoquer une nouvelle fissure, c'est ce que traduit l'hypothèse d'écrouissage positif. Toutefois, dans un certain nombre d'observations microscopiques, le nombre de fissures autour d'un granulat est souvent limité. La pente de la zone plastique est donc probablement assez faible.

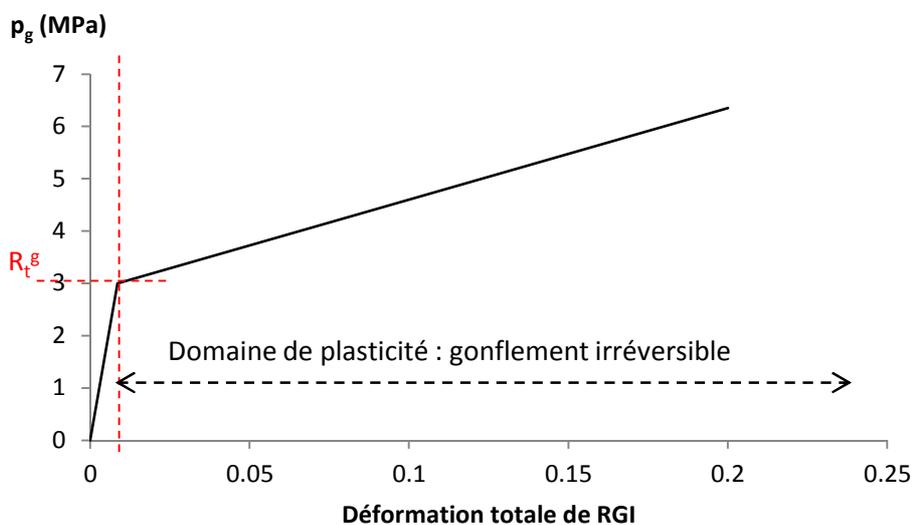


Figure 20 : Loi de comportement plastique de la pression des phases néoformées

4. Couplages gonflement, fissuration, contrainte

Les gonflements sont la cause de la fissuration du matériau. En gonflement libre, cette fissuration peut être très ouverte et être responsable d'une perte d'efficacité du gel sur les gonflements induits. Il existe donc un couplage important entre gonflement et fissuration à travers le rôle de la fissuration dans la perte des gels d'alcali-réaction par perméation. En

outre, le développement des gonflements sous contraintes sur le matériau aura des conséquences sur la fissuration qui pourra alors devenir anisotrope. Ces deux problématiques ont fait l'objet des travaux détaillés ci-après.

4.1 Fissuration et perméation des gels d'alcali-réaction

L'analyse des essais de Jan Lindgård (Lindgård et al., 2013), dont les résultats sont montrés dans la Figure 7, indique, qu'en conditions usuelles de conservation (environnement à humidité relative contrôlée à environ 95 %), la perte d'alcalins par lessivage est suffisante pour induire des gonflements significativement différents en fonction de la taille des éprouvettes. Ce mécanisme est donc responsable d'un effet d'échelle perturbant l'analyse directe des essais de gonflements libres. Toutefois, le travail de Xiaoxiao Gao a montré que des différences d'expansion existaient également pour des éprouvettes de différentes tailles conservées en solution de soude (1 mol/l – Figure 21). Il permettait ainsi de mettre à jour le couplage entre l'effet pessimum de tailles de grains réactifs et l'effet de taille des éprouvettes, l'effet pessimum de taille de granulats ne semblant plus exister en bain de soude dans des éprouvettes suffisamment grandes (Figure 21).

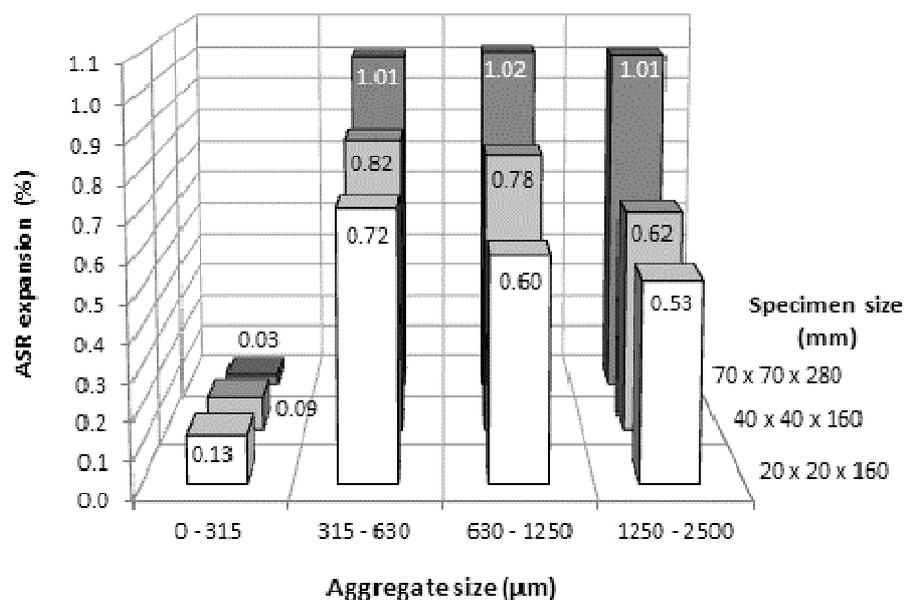


Figure 21 : Gonflement d'alcali-réaction en fonction de la taille du granulat réactif et de la taille de l'éprouvette (conservation : bain de soude, 60°C)

Ce comportement a été peu étudié dans la littérature. Pourtant il pourrait être important et être responsable d'erreurs lors de l'utilisation d'essai sur éprouvettes, forcément de taille réduite, pour modéliser une structure massive. Dans la littérature, l'effet pessimum en tailles de grain a été précédemment expliqué par des différences d'exsudation de gels d'alcali-réaction en fonction de la taille des particules réactives (Hobbs & Gutteridge, 1979; C. Zhang, A. Wang, M. Tang, 1999). Ainsi, la perte de gels par perméation pourrait induire des gonflements différents en fonction de la distance que le gel doit parcourir pour sortir du béton, les

déformations étant d'autant plus petites que la distance est faible. Dans les éprouvettes les plus grosses, la perte relative serait plus réduite ce qui expliquerait la disparition de l'effet pessimum. Toutefois, l'étude a été menée sur des mortiers et l'effet d'échelle semble réduit pour des rapports 'taille d'éprouvettes / taille de granulats' de l'ordre de 100, rapport qu'il est totalement inenvisageable d'obtenir lors d'expertise de béton de barrage.

L'utilisation des essais sur éprouvettes dans le cadre de requalification d'ouvrages atteints par l'alcali-réaction doit passer par une meilleure compréhension de cet effet d'échelle, voire par une quantification plus précise. Des développements basés sur la loi de Poiseuille ont débuté en supposant que la perte de gel d'alcali-réaction a lieu principalement par les fissures et en évaluant la quantité de gel perdu à partir d'une variation linéaire de la pression dans le gel entre la particule réactive et le bord de l'éprouvette. Avec l'hypothèse de granulats sphériques, la loi de Poiseuille pourrait ainsi s'écrire :

$$\frac{d\varphi_{gp}}{dt} = \frac{3f_c w_l^3}{16\pi\eta R_{VER}^2} \cdot \frac{p_g}{\delta x} \quad (24)$$

avec φ_{gp} , la fraction de gel perdu par les fissures, f_c , un coefficient de forme des fissures, w_l , l'ouverture des fissures qui pourrait être fonction de la taille des granulats, η , la viscosité du gel et δx , la distance de la particule au bord de l'éprouvette.

Plus la zone de formation du gel est proche d'une surface libre (δx petit), plus la perte de gel par perméation est importante. Ainsi, les plus petites éprouvettes perdent globalement un volume de gel relativement plus important et sont donc le siège de gonflement plus faible. Concernant l'effet de la taille des granulats, plus le granulats est de grande dimension, plus l'ouverture de fissure induite (w_l), localisée autour du granulats, est importante. Pour une même taille d'éprouvette, un granulats de plus grande dimension conduirait donc à une perte de gels plus importante, ce qui pourrait expliquer l'effet pessimum en taille lors d'une conservation en bain de soude.

La validation de cette approche n'a pas encore été réalisée et fait l'objet de travaux en cours. En outre, du fait du manque de résultats expérimentaux sur bétons, des essais ont démarré pour évaluer l'impact potentiel de cette perte de gels en fonction de la taille des granulats (de 0 à 20 mm) en conditions de conservation en eau (lessivage maximum des alcalins) et en conditions de bain de soude.

4.2 Effet des contraintes sur les gonflements et l'endommagement

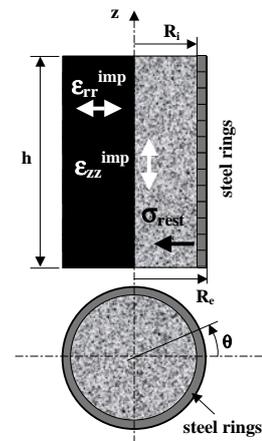
Les études en laboratoires, nécessaires à une meilleure compréhension des phénomènes et à la caractérisation lors de formulations de nouveaux bétons ou à l'expertise de structures endommagées, sont généralement menées sur des éprouvettes en gonflement libre. Ces essais doivent rendre compte, autant que possible, du potentiel de gonflement du matériau en conditions d'ouvrage. Toutefois, dans les structures réelles, une partie importante du béton est

soumis à des états de contrainte variés, liés aux chargements mécaniques ou à des conditions aux limites empêchant la libre dilatation, qui pourraient avoir des conséquences sur ce potentiel de gonflement en place. Il est donc important de savoir comment un béton soumis à une alcali-réaction ou à une réaction sulfatique interne se comporte sous chargement mécanique actif (contraintes appliquées) ou passif (gonflement empêché, frettage). Afin de comprendre le comportement des structures endommagées, il est nécessaire d'appréhender les particularités des gonflements sous contraintes et d'être capable de les modéliser.

Pour l'alcali-réaction, un large programme expérimental (LCPC-EDF) a été réalisé afin de caractériser sa capacité à causer des expansions dans des états de contraintes multiaxiaux pouvant être représentatif d'ouvrages précontraints dans une direction et d'ouvrages dans lequel le béton peut subir à la fois des charges appliquées et des conditions de gonflement empêché (Multon, 2004; Multon & Toutlemonde, 2006). Les éprouvettes de béton réactif ont été suivies : en gonflement libre, en gonflement sous charge (10 et 20 MPa) à l'aide de bâtis de fluage (Figure 22-a), en gonflement en conditions de frettage à l'aide d'anneaux métalliques creux (3 et 5 mm, Figure 22-b) et en conditions mixtes. Un robot a été utilisé pour réaliser 14 points de mesures de déplacement dans la direction longitudinale et 30 points de mesures dans la direction transversale (Multon, 2004; Multon & Toutlemonde, 2006).



(a)



(b)

Figure 22 : Alcali-réaction sous contrainte : bâti de fluage (a) et frettage par anneaux (b) (Multon, 2004; Multon & Toutlemonde, 2006)

L'analyse mécanique proposée dans le travail de thèse (Multon, 2004; Multon & Toutlemonde, 2006) basée sur l'hypothèse que les expansions d'alcali-réaction pouvaient être considérées comme des déformations imposées indépendantes du fluage a permis de montrer que, malgré une certaine dispersion des résultats, aucune tendance ne se dégagait quant à l'évolution de la déformation volumique avec l'état de contrainte moyen dans le béton qui

semblait relativement constante (Figure 23-a). Toutefois, à un état de contrainte près (autour de 2 MPa), la déformation volumique semble diminuer entre l'état de gonflement libre et une contrainte moyenne de compression de 5 MPa avant d'augmenter de nouveau et retrouver un gonflement volumique proche du gonflement libre pour une compression de 10 MPa, se rapprochant ainsi des résultats obtenus par Cyrille Dunant (Dunant, 2009; Dunant & Scrivener, 2012) et l'analyse faite par Alain Giorla (Giorla, 2013). En termes de coefficient d'anisotropie (rapport de l'expansion imposée au béton dans la direction verticale – la plus chargée pour les essais sous contraintes longitudinales – à l'expansion imposée dans la direction radiale – généralement la moins chargée à l'exception des essais sous frettage seul), les résultats sont beaucoup moins dispersés et montrent une tendance claire sur l'ensemble du domaine de contraintes étudié (Figure 23-b). Ainsi exprimée, il était possible de montrer que l'anisotropie était constante pour une charge de compression dominante de plus de 3 MPa environ et augmente quand l'état de compression radiale est dominant (Figure 23-b). Cette analyse permet enfin de conclure que l'analyse en déformation imposée globale, à l'échelle du béton lui-même, est possible (par une analogie thermomécanique par exemple) à condition de considérer des déformations imposées fortement anisotropes avec l'état de contrainte (coefficient de dilatation équivalent dépendant fortement de l'état de contraintes par exemple).

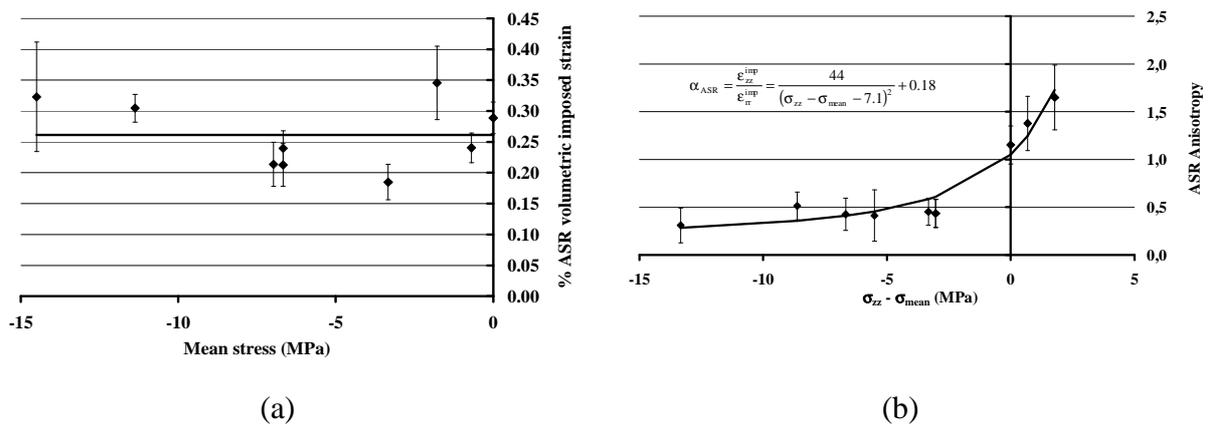


Figure 23 : Déformations volumiques d'alcali-réaction sous contrainte (a) et coefficient d'anisotropie (b) (Multon, 2004; Multon & Toutlemonde, 2006)

Pour la réaction sulfatique interne, les travaux de recherche sont beaucoup plus récents, et très peu de données sur le comportement sous contraintes sont accessibles. Un programme d'étude plus léger sur mortier a donc été lancé avec pour objectif premier d'avoir l'ordre de grandeur des conséquences potentielles d'un confinement sur les expansions dues à la formation d'ettringite différée (Figure 24) (Bouzabata, 2012; Bouzabata et al., 2012). Les déformations en conditions de gonflement libre et sous deux confinements (4 barres d'acier de 2 et 5 mm de diamètre) ont ainsi pu être comparées (Figure 24). La réduction des gonflements due à la formation d'ettringite différée dans la direction confinée est importante dès le premier niveau de confinement (conduisant à une contrainte de compression évaluée à 2 MPa). Elle devient inférieure à 0.2 % pour le plus fort confinement (contrainte de compression évaluée à environ 4 MPa). Le report dans les directions libres n'est pas total (Bouzabata, 2012; Bouzabata et al.,

2012) même si les déformations transversales augmentent légèrement (Figure 24). Ainsi, dans ce cas, la déformation volumique imposée est réduite d'environ 20 % entre l'état libre de contrainte et les états confinés.

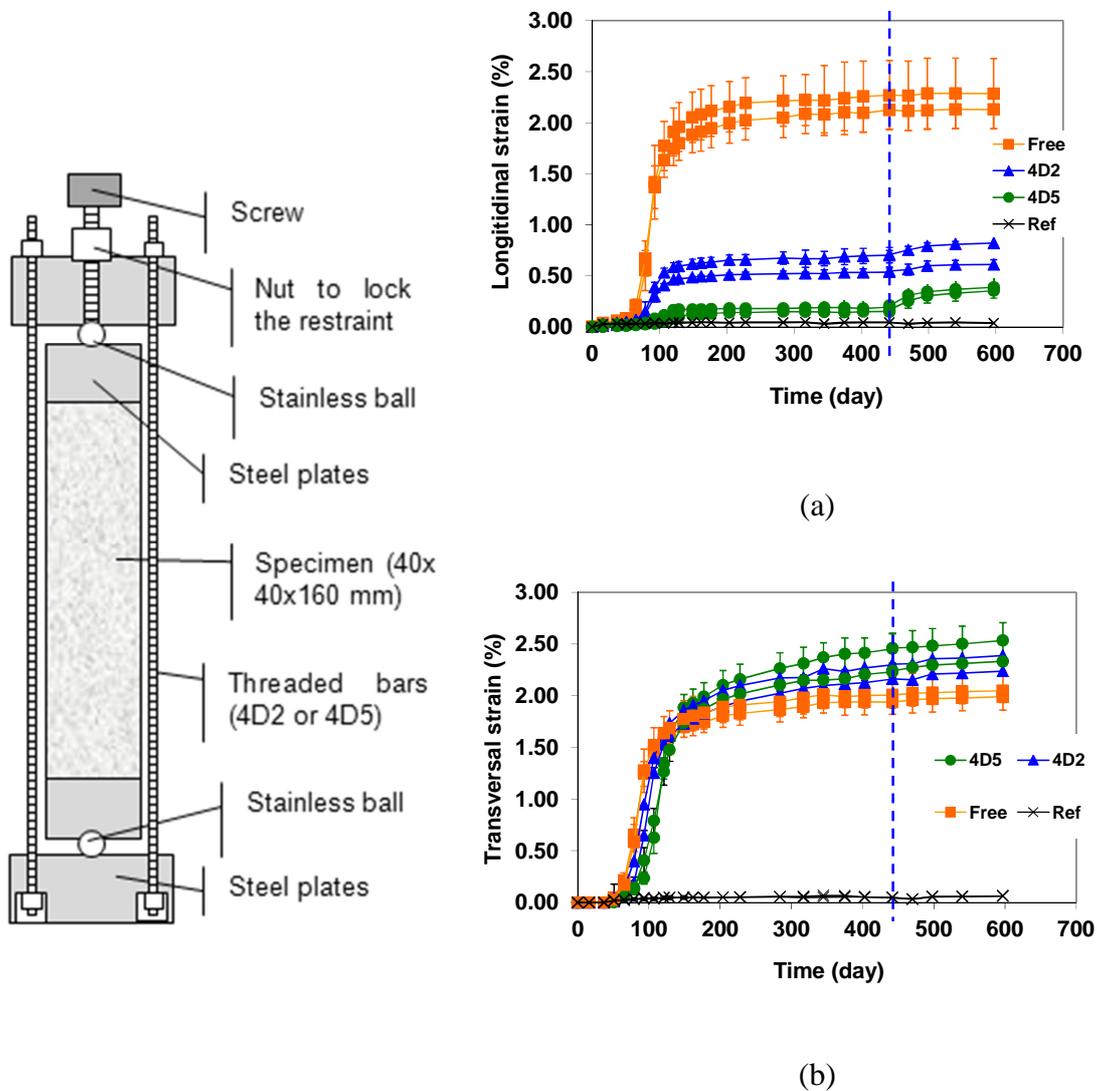
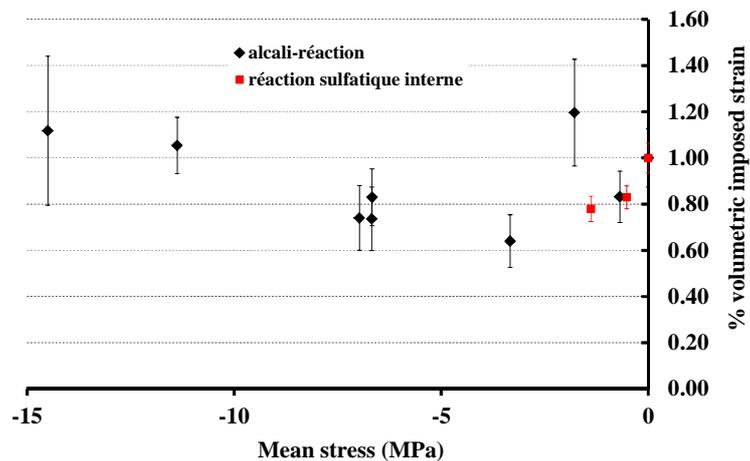


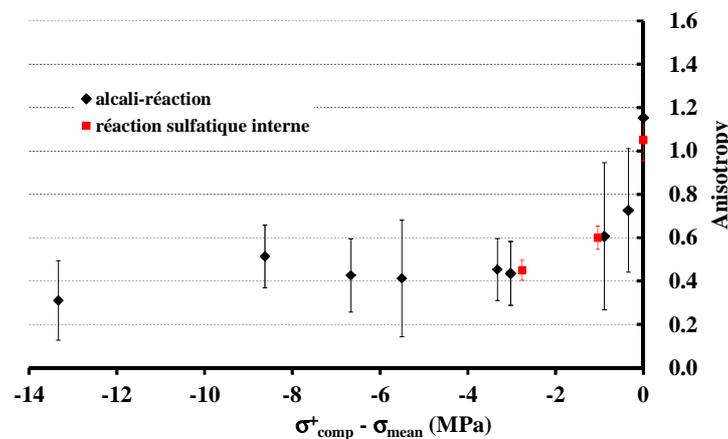
Figure 24 : Expansions longitudinales (a) et transversales (b) dues à la réaction sulfatique interne sous confinement longitudinal (la ligne pointillée représente l'instant où le confinement a été retiré) (Bouzabata, 2012; Bouzabata et al., 2012)

Dans la Figure 25-a, le gonflement volumique a été redéfini de manière relative pour évaluer l'effet de l'état de contrainte moyen par rapport au gonflement volumique obtenu en conditions libre de contrainte. L'anisotropie a également été redéfinie pour représenter le rapport de l'expansion de la direction la plus comprimée sur la direction de compression plus faible. Le déviateur, quant à lui, est celui obtenu dans la direction la plus comprimée (et non plus dans la direction verticale comme dans la Figure 23). Avec cette définition, les éprouvettes sous frottement seul soumises à l'alcali-réaction permettent de décrire des états de compression plus faibles (très proches de 0 MPa). En outre, les résultats obtenus pour la

réaction sulfatique interne (Bouzabata, 2012) permettent de compléter les courbes obtenues pour l'alcali-réaction (Multon, 2004) et semblent témoigner d'un comportement de gonflement sous contrainte proche pour les deux pathologies en termes de réduction de gonflement volumique et d'évolution de l'anisotropie pour les faibles contraintes (Figure 25-a et b). Ainsi, dès qu'une direction est soumise à une contrainte de compression supérieure de quelques dixièmes de Méga Pascal à l'état de compression moyen, une forte réduction des gonflements est observée dans la direction la plus comprimée pour les deux pathologies.



(a)



(b)

Figure 25 : Déformations volumiques (a) et coefficient d'anisotropie (b) sous contraintes pour l'alcali-réaction et la réaction sulfatique interne

Les résultats expérimentaux obtenus pour l'alcali-réaction sous contrainte ont fait l'objet d'analyses par plusieurs modélisations (Grimal, 2007; Baghdadi, 2008; Comi et al., 2009; Alnaggar et al., 2013; Pan et al., 2013), permettant la validation de ces approches numériques en remplissant ainsi un des objectifs de cette large étude. L'importance des déformations différées dans l'analyse des structures de génie civil, avec, en particulier l'impact du fluage sur l'endommagement dû aux expansions et sur les déformations globales des ouvrages, montre l'intérêt d'avoir un modèle capable de coupler les effets mécaniques des expansions

avec les comportements différés observés usuellement sur béton (Grimal, 2007). L'analyse du comportement mécanique de bétons soumis à des réactions de gonflement interne dans des états de contrainte multiaxiaux nécessite donc un modèle de fluage capable de reproduire le fluage de bétons placés dans de telles conditions de chargement. Dans ce but, le modèle de fluage couplé à la plasticité et à l'endommagement d'Alain Sellier, utilisé au LMDC, a fait l'objet d'une validation complète récente afin de tester sa capacité à représenter le fluage dans des états de contraintes multiaxiaux et dans des états d'humidité et de températures variés pour des niveaux de charges variant de 20 à 65 % en compression (Sellier et al., 2016).

Sous contraintes, l'expansion induite est réduite dans la direction la plus comprimée ce qui entraîne une anisotropie importante de la fissuration avec des fissures parallèles aux cheminement des contraintes de compression majeures (Figure 26). Les réactions de gonflement interne sous contraintes sont donc la cause de fissurations anisotropes ce qui témoigne d'un couplage entre pression isotrope des produits néoformés et gonflements anisotropes du fait de l'anisotropie de l'endommagement. Le critère de plasticité lié à la fissuration causée par les réactions de gonflement a donc été choisi anisotrope (Grimal, 2007). Ainsi, dans les directions pour lesquelles les contraintes de compression liées au chargement et aux conditions aux limites sont dominantes sur l'effet de la pression des produits néoformés et supérieure à la résistance en traction locale, l'endommagement sera nul, indiquant l'absence de fissuration perpendiculaire aux directions comprimées. Si l'état de contrainte est fortement anisotrope, avec une compression unidirectionnelle, la pression de gel induira une fissuration dans les directions parallèles à la contrainte et la pression devrait s'élever peu dans le matériau (Figure 26). En revanche, si l'état de contrainte est parfaitement isotrope avec de fortes valeurs de compression (ou un confinement tridimensionnel parfait), la fissuration pourrait être fortement réduite dans les trois directions tandis que la pression des produits de réaction pourrait augmenter de manière importante (Figure 26). Dans le cas d'un état de contrainte bidirectionnel (par exemple dans le cas de structures précontraintes dans deux directions), un risque de délamination peut être attendu (Figure 26).

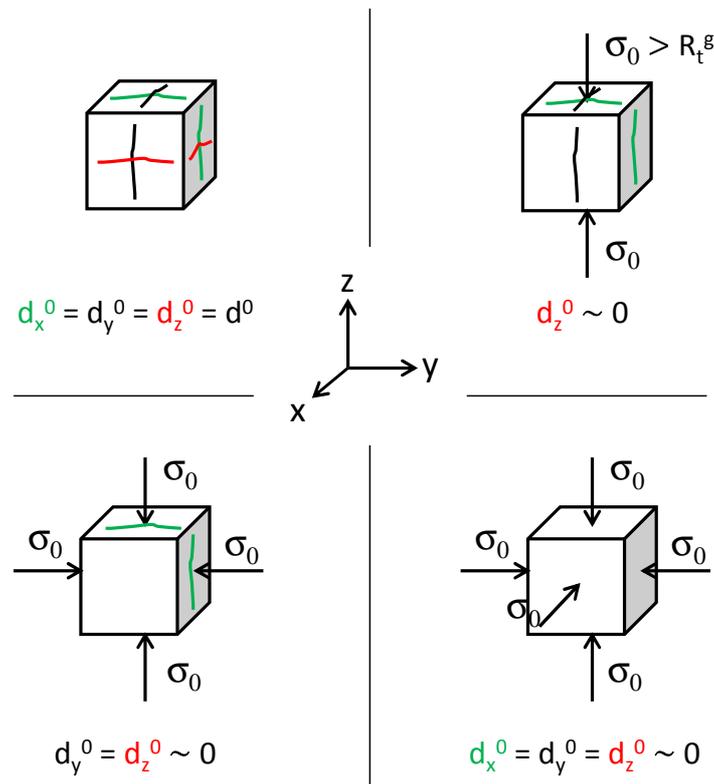


Figure 26 : Etat d'endommagement lié à une réaction de gonflement interne en fonction de l'état de contraintes

5. Synthèse

L'étude des conséquences mécaniques de l'apparition de phases néoformées dans des matériaux bétons durcis à l'échelle du matériau (expansion et endommagement) a été menée à partir de deux hypothèses :

- Représenter les expansions induites par la production de phases néoformées sous forme de déformations imposées ce qui peut être réalisé à l'aide d'une analogie thermo-mécanique par exemple,
- Modéliser les expansions à travers l'évaluation d'une pression des phases néoformées sur le béton environnant à l'aide d'une approche poromécanique.

Les deux approches ont apporté des résultats satisfaisant à l'échelle du matériau dans le cadre de la modélisation d'éprouvettes libres de contraintes. L'approche en déformations imposées a ainsi permis d'évaluer de manière satisfaisante l'endommagement induit en traction. Des recherches complémentaires ont été menées sur le fluage de traction afin d'évaluer l'erreur commise en évaluant le fluage du béton environnant les sites réactifs, principalement en traction, à l'aide de modèles réalisés sur la base d'essais de compression. Les réactions de gonflement interne ayant principalement lieu en zone à forte humidité, la différence entre fluage de traction et fluage de compression semble réduite. L'expansion semble principalement induire une multi-fissuration diffuse, qui permet d'expliquer des déformations

positives si importantes sans observation de rupture complète du matériau. Les résultats obtenus sur béton en traction, flexion et compression ont un intérêt qui dépasse les seules réactions de gonflement interne et doivent être utilisés pour améliorer la capacité du modèle de fluage à évaluer les risques de fissuration en zones tendues de n'importe quel type d'ouvrages.

L'impact de la fissuration sur l'évaluation des gonflements sur éprouvette est complexe mais fondamental. Dans le cas de gonflement libre sur éprouvette, une ouverture importante de fissures pourrait conduire à une perte de gel importante qui n'aura pas lieu sur ouvrages, et ainsi, à une évaluation erronée du potentiel de gonflement en conditions de structures. Dans le cas de matériaux sous contraintes, cette fissuration sera fortement anisotrope. Lors du carottage d'un ouvrage, ces directions de fissurations auront des conséquences sur la mesure d'expansion résiduelle, mais également sur la caractérisation de la rigidité du matériau. Ainsi, des chutes de modules d'Young plus importantes devraient être obtenues dans les directions faiblement chargées ou simplement dans les zones peu contraintes (qui sont souvent utilisées dans les carottages du fait de leur faible impact sur le fonctionnement de la structure) que dans les directions réellement importantes des ouvrages (celles qui reprennent les charges et dans lesquelles il est souvent difficile de carotter). L'analyse des essais sur carotte doit donc prendre en compte l'état de contrainte existant dans l'ouvrage.

Compte-tenu de l'effet des contraintes sur la fissuration et les gonflements, les modélisations doivent considérer une anisotropie ce qui peut être obtenues par l'utilisation de déformations imposées anisotropes en fonction de l'état de contraintes ou par un critère d'endommagement anisotrope dans le cadre d'une approche en pression. L'approche en pression pourrait tout de même présenter deux avantages :

- Pour la prise en compte de l'exsudation de gels par perméation dans les fissures, il est nécessaire d'évaluer la pression dans les produits de réaction car ce sera le moteur de la perte de volume expansif,
- Pour l'évaluation de l'expansion de bétons en condition isotrope, cette approche permet d'évaluer une augmentation de la pression des gels dans le matériau, même à déformations extérieures nulles, ce qui semble réaliste.

A partir de l'étude effectuée à l'échelle du matériau, il est à présent possible d'analyser les conséquences des réactions de gonflement interne à l'échelle de la structure et de proposer une méthodologie d'évaluation des ouvrages endommagés.

Chapitre 3 : Conséquences des expansions à l'échelle de la structure

1. Généralités

Les recherches concernant les conséquences des expansions dans les bétons sont fortement motivées par le besoin de réévaluation de structures endommagées. En effet, de nombreux ouvrages sont aujourd'hui atteints par ce type de pathologies et la taille importante de certains d'entre eux incite les gestionnaires à établir des méthodologies afin de recalculer ces structures endommagées (LCPC, 2003; Sellier et al., 2009). Ces méthodologies sont basées sur le diagnostic de l'état d'expansion et d'endommagement des structures et doivent être capable de prédire le comportement à venir pour estimer les risques encourus par les ouvrages endommagés et juger de l'intérêt d'une réparation ou d'une démolition. Comme pour toutes structures, l'évaluation d'un ouvrage endommagé par une réaction de gonflement interne doit être effectuée par rapport à deux situations : état limite de service pour estimer sa capacité à être utilisé conformément à sa fonction, évalué en termes de déformation et de fissuration, et état limite ultime pour estimer sa portance résiduelle, évaluée en termes de résistance.

En termes de diagnostic, de nombreux essais ont été utilisés afin de tenter de caractériser l'état du béton. Un premier groupe consiste à évaluer les caractéristiques mécaniques du matériau sur éprouvettes carottées dans l'ouvrage endommagé par des méthodes utilisées couramment pour la caractérisation de bétons (mesure de module d'élasticité, résistances en compression ou traction par fendage) sans toujours considérer les particularités d'une éprouvette de béton fissuré en condition d'expansion dans un ouvrage. Dans une structure, le gonflement ayant lieu sous contrainte, il provoque une fissuration anisotrope qui ne devrait pas être ignorée lors du prélèvement et des essais consécutifs. En outre, l'impact d'une fissuration plus ou moins ouverte peut être important sur ces différentes mesures. Ainsi, évaluer le module d'élasticité d'un béton lors de la première charge ou après plusieurs cycles de chargement / déchargement comme il est recommandé dans certaines normes ne conduit pas à une même estimation de l'endommagement du béton en place. Un deuxième groupe de méthodes consistent à tenter d'évaluer le potentiel de gonflement résiduel du béton sous différentes conditions de conservation (humidité relative élevée ou solution alcaline) en réalisant un essai de gonflement directement sur carottes issues d'ouvrages (Fasseu, 1997; Bérubé et al., 2002b; Multon et al., 2008a; Merz & Leemann, 2013). Un troisième groupe d'essais a pour objectif d'évaluer directement le gonflement ayant déjà eu lieu dans l'ouvrage (à partir d'essais mécaniques et d'observations microscopiques (Bérubé et al., 2005; Sanchez et al., 2014a, 2015), ou de manière connexe, d'évaluer le potentiel, voire le degré d'avancement, de la réaction à partir d'essais de granulats récupérés sur béton issu des ouvrages endommagés (Bérubé et al., 2002b; Sellier et al., 2009). Enfin, les méthodes récentes d'évaluation non destructives peuvent également être utilisées afin d'avoir une vision plus précise des gradients d'endommagement au sein d'une structure (Rivard & Saint-Pierre, 2009).

Le problème majeur de l'étude des structures est en effet la présence de gradients d'expansion et donc de fissuration dans les ouvrages endommagés par les réactions de gonflement interne.

Pour ces réactions de gonflement qui sont extrêmement sensibles à la moindre variation d'humidité et de concentrations en espèces ioniques (alcalins, hydroxyles pour l'alcali-réaction, sulfate, aluminate et calcium pour la réaction sulfatique), les phénomènes de transferts hydriques et ioniques ont des effets prépondérants dans le comportement des bétons endommagés. Cette sensibilité est tellement marquée qu'au sein même des éprouvettes, ces gradients sont la cause de variation d'expansion importante. Ainsi, une éprouvette soumise à de tels gonflements peut être considérée comme une structure de petite dimension dont les expansions diffèrent entre le cœur et la peau. L'utilisation courante d'éprouvettes de petite taille pour représenter le gonflement du matériau peut alors sembler inadéquate car ces transferts sont l'origine d'effets d'échelle qui remettent en cause la pertinence d'utiliser des gonflements obtenus sur éprouvette pour représenter les gonflements au sein de structures. Dans les ouvrages, l'impact de ces gradients est également très important, en particulier pour les ouvrages dont une des dimensions est relativement faible ce qui les rendent plus sensibles aux transferts. De plus, la présence d'armatures est également la cause de gradient de déformations au sein des structures armées. Les modélisations qui sont utilisées dans les méthodologies afin de prédire le comportement à venir des structures endommagées doivent être capables de distinguer ces effets, ce qui nécessite une validation des modèles mécaniques envisagés sur des structures pour lesquelles ces gradients sont contrôlés.

Les deux premières parties de ce dernier chapitre présentent des travaux dont l'objectif était d'obtenir des données de laboratoire complètes pour valider la capacité des modèles à prendre en compte l'effet de gradient hydrique dans des structures non armées d'une part et ce même effet, conjugué à la présence d'armatures d'autre part (Multon, 2004). Après la validation d'un modèle, il est nécessaire de réfléchir aux données d'entrée en situation d'expertise pour laquelle le gonflement en place et le gonflement à venir restent difficiles à estimer par les méthodes usuelles, en particulier à cause des effets d'échelles discutés précédemment. Ces données d'entrées doivent mêler essais sur granulats, sur bétons et mesures sur ouvrages afin de fournir au modèle un maximum de données d'entrée objectives et représentatives de la situation et de réduire ainsi le poids de la calibration du modèle dans la prédiction du comportement à venir (Sellier et al., 2009; Gao, 2010). Une méthodologie est proposée dans ce but dans la dernière partie ainsi que des pistes pour proposer des alternatives en fonction de ce qui peut être connu sur chaque ouvrage.

2. Structures de laboratoire soumises à des gradients hydriques

Une des premières causes de déformations différentielles dans les structures est la présence de gradients hydriques. Dans le cas d'alcali-réaction ou de réactions sulfatiques internes, ces variations spatiales de teneur en eau induisent des gradients de gonflement pouvant être la cause de fissuration superficielle ou de désordres plus généralisés avec l'apparition de déformée importante pouvant entraîner une fissuration structurale. Ces gradients ont d'autant plus de conséquences que les ouvrages sont élancés (routes, tabliers de ponts, piles de barrages au fil de l'eau). L'objectif de ces travaux a donc consisté à apporter des données expérimentales complètes du comportement de structures soumises à un gradient hydrique

contrôlé. Les structures devaient être non armées pour que le comportement mécanique soit principalement induit par les différences de teneur en eau et non par d'autres phénomènes, comme celui d'expansion empêchée par la présence d'armatures. Les mesures devaient comprendre à la fois des données en termes de comportements hydrique et mécanique afin de valider les différentes étapes de la modélisation d'une structure endommagée, composée d'un calcul hydrique et d'un calcul mécanique, couplés, s'il faut rendre compte de l'accélération des transferts avec la fissuration du matériau.

Les travaux de la campagne expérimentale sur structures de laboratoire, réalisée au LCPC avec la participation d'EDF (Multon, 2004), ont été menés sur des poutres de 3 mètres de long posées sur deux appuis (Figure 27). Elles étaient soumises à un gradient hydrique contrôlé par les conditions environnementales d'une salle climatisée à 38°C et 30 % d'humidité relative, par l'immersion des fibres inférieures et par l'étanchéité des faces latérales (Figure 28). Les dimensions et les conditions d'appuis permettaient d'avoir accès au comportement de structures réelles soumises à un gradient de transfert d'eau principalement vertical, la simplicité de ces conditions hydriques étant choisie pour faciliter l'analyse de ces éléments. Afin d'estimer l'évolution des transferts hydriques dans ces poutres de laboratoire, des équipements spécifiques de pesage et de gammadensimétrie ont été développés (Multon et al., 2004). Ils ont permis un suivi précis de l'évolution de la masse globale et du profil de séchage dans la partie supérieure des poutres (Multon & Toutlemonde, 2004). Le comportement mécanique a fait l'objet d'un suivi des déformations par extensomètres à corde vibrante sans raideur réalisés pour l'étude (Bourquin & Joly, 2001) et des flèches par capteurs numériques. Les conséquences des expansions différentielles ont ainsi pu être mesurées dans les trois directions des poutres, à la fois dans le béton et sur les surfaces extérieures (Multon et al., 2005). En parallèle à ce suivi, la dépendance des gonflements à l'humidité du béton a été étudiée sur éprouvettes en condition endogène, immergée et de retrait de séchage (30 % d'humidité relative).



Figure 27 : Campagne expérimentale sur poutres de laboratoire (LCPC / EDF) (Multon, 2004)

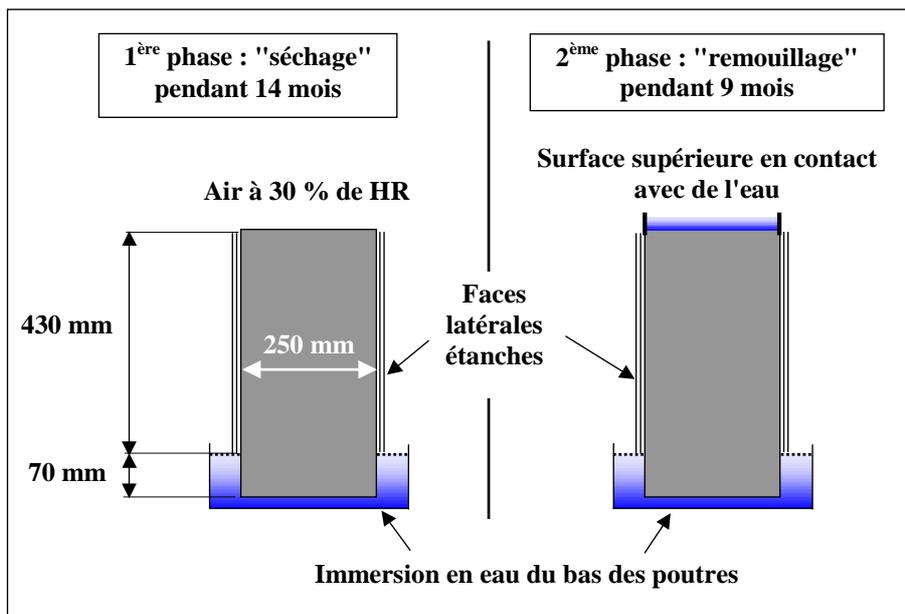
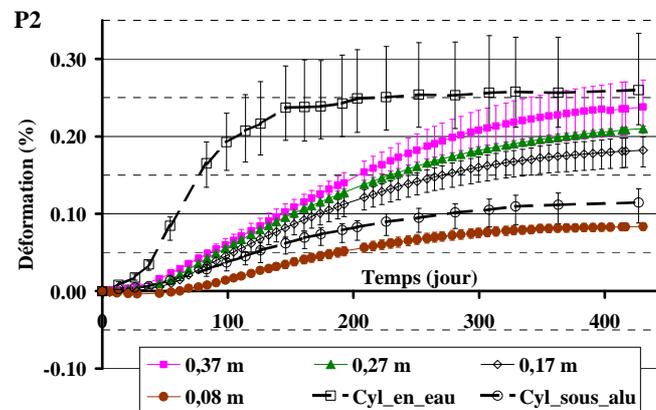


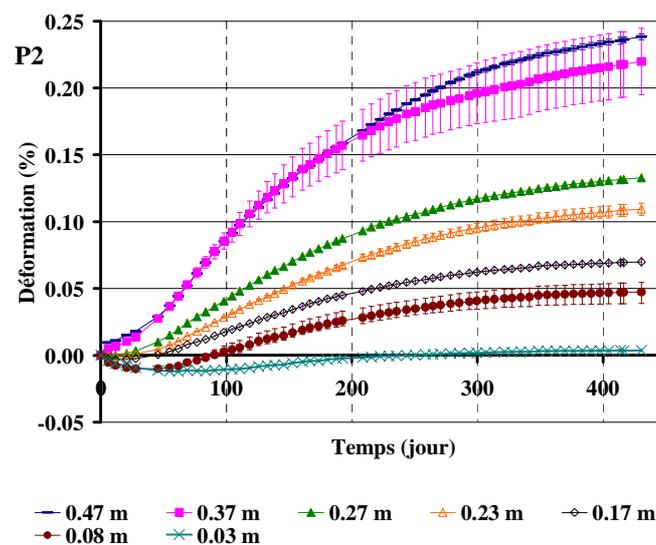
Figure 28 : Conditions hydriques des poutres de laboratoire (Multon, 2004)

La Figure 29 montre les déformations verticale et longitudinale d'une poutre non armée soumise à un gradient hydrique. Du fait des dimensions de la poutre, les déformations verticales peuvent être considérées comme des déformations relativement libres alors que les déformations longitudinales sont fortement influencées par le comportement de structure de l'élément. Les déformations verticales (Figure 29-a) montrent que les cinétiques d'expansions dans la structure sont fortement influencées par les transferts. En effet, la comparaison des gonflements en partie basse de la poutre (37 cm de profondeur par rapport à la face

supérieure) avec les gonflements obtenus sur éprouvettes montrent des amplitudes similaires mais une cinétique bien plus lente dans le cas de la poutre. Cette différence peut s'expliquer par le temps nécessaire à l'eau pour atteindre la zone de mesure qui se situe à quelques centimètres au-dessus de la partie immergée (Figure 28) alors qu'une éprouvette est saturée très rapidement après son immersion. Le comportement de la structure est donc fortement influencé par ses propriétés de transfert hydrique. Dans la partie proche du séchage (8 cm de profondeur), les expansions restent importantes et voisines de celles mesurées sur les éprouvettes conservées en conditions endogènes : la diminution du degré de saturation reste donc modérée dans cette zone malgré des conditions de séchage sévère (30 % d'humidité relative et 38°C). Les déformations longitudinales (Figure 29-b) montrent un comportement différent : d'une part, une cinétique légèrement plus rapide dans l'eau avec un point d'inflexion plus marqué et d'autre part, des déformations plus étalées entre la face de séchage (3 cm) et la zone immergée (47 cm).

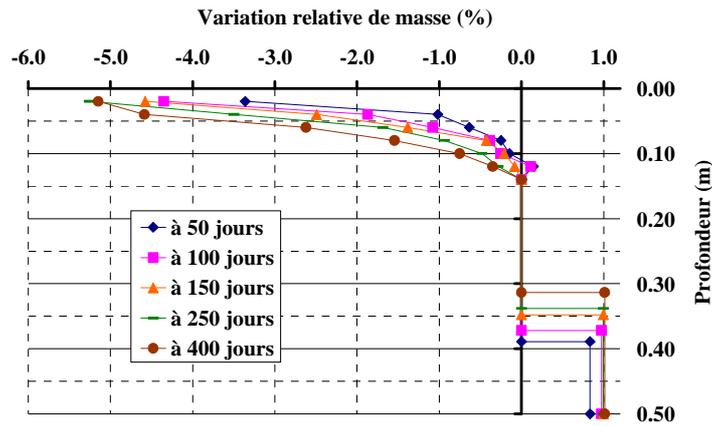


(a)

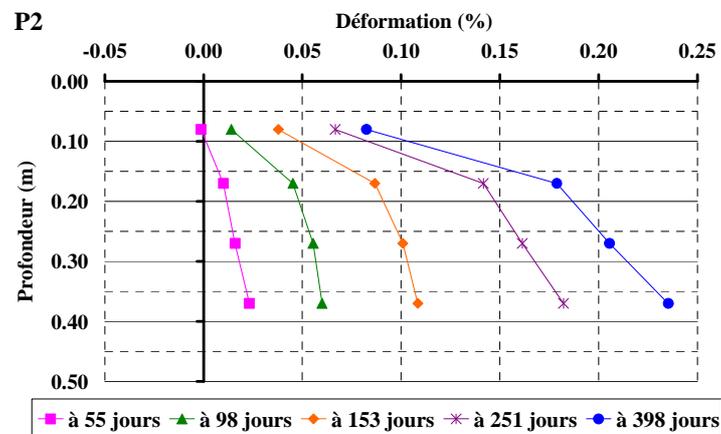


(b)

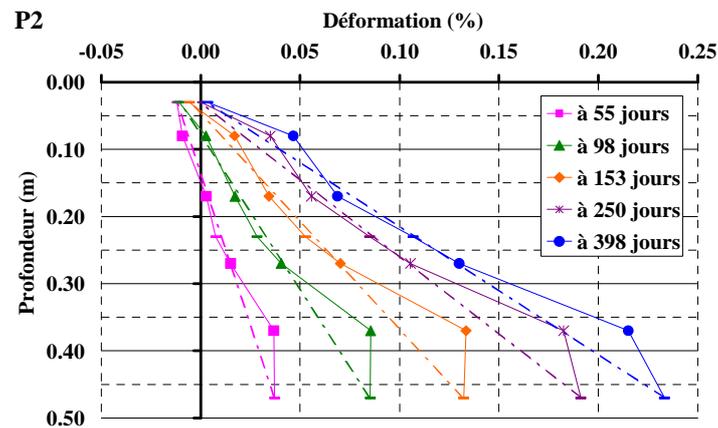
Figure 29 : Cinétiques des déformations dans la direction verticale (a) et longitudinale (b) d'une poutre non armée soumise à une alcali-réaction



(a)



(b)



(c)

Figure 30 : Profil hydrique (a) et profils de déformations verticale (b) et longitudinale (c) dans la hauteur d'une poutre non armée soumise à une alcali-réaction

L'analyse des profils de variation de masse (Figure 30-a) obtenus par combinaison des mesures de pesage et de gammadensimétrie confirme que le séchage concerne principalement les 10 cm supérieurs des poutres. Dans la direction verticale, le béton subissant peu de contrainte du fait du fonctionnement de la structure, le gradient de déformation le plus fort a

lieu entre 8 et 17 cm (Figure 30-b). Dans la partie inférieure de la poutre, les expansions sont d'autant plus fortes qu'elles se produisent près de l'apport d'eau. Dans la direction longitudinale, la sensibilité des gonflements aux apports d'eau est plus difficile à juger du fait du fonctionnement structural de l'élément (Figure 30-c). La linéarité des déformations dans la hauteur de la poutre (hypothèse des sections droites de la résistance des matériaux) est correctement respectée (avec quelques écarts qui peuvent s'expliquer par l'hétérogénéité locale du matériau).

Ces observations témoignent d'un comportement forcément anisotrope des expansions, anisotropie qui peut varier avec le temps et la localisation dans la poutre. Afin de l'analyser, ces essais ont fait l'objet d'une première modélisation simplifiée basée sur les hypothèses usuelles de la résistance des matériaux. L'expansion d'alcali-réaction a ainsi été considérée comme une déformation imposée pouvant être évaluée à partir des essais sur éprouvettes. Un profil de déformation imposé a ainsi pu être établi en fonction des profils hydriques, de l'état de fissuration avéré et des gonflements mesurés sur éprouvettes sous les différentes conservations (Figure 31). Plusieurs scénarios ont alors été étudiés pour considérer l'importance de l'anisotropie de gonflement en fonction de la direction de coulage ou de la fissuration (Multon, 2004; Multon et al., 2006). La meilleure hypothèse s'avère être celle qui consiste à considérer un gonflement isotrope dans la majeure partie de la structure à l'exception de la partie inférieure dont la fissuration transversale provoque une forte anisotropie (gonflement plus important de 50 % dans la zone fissurée par rapport au reste de la poutre). Cette hypothèse conduit à une bonne reproduction du comportement longitudinale à partir des gonflements obtenus sur éprouvette (Figure 32). La fissuration transversale de la face immergée est également retrouvée par ce calcul mécanique qui conduit à l'évaluation de contraintes de traction supérieure à la résistance du béton à partir de 120 jours. L'origine de cette fissuration est donc structurale et non liée au seul gonflement local des granulats.

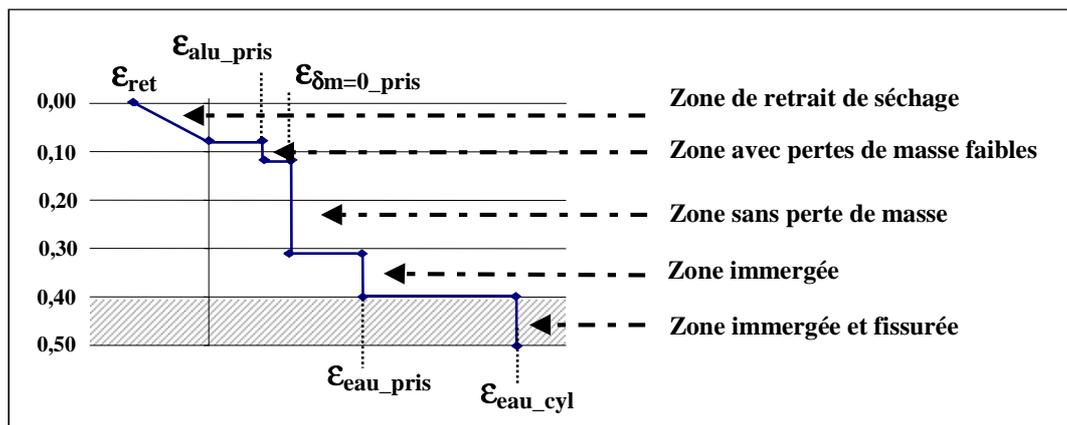


Figure 31 : Profil de déformations imposées dans les poutres à 400 jours

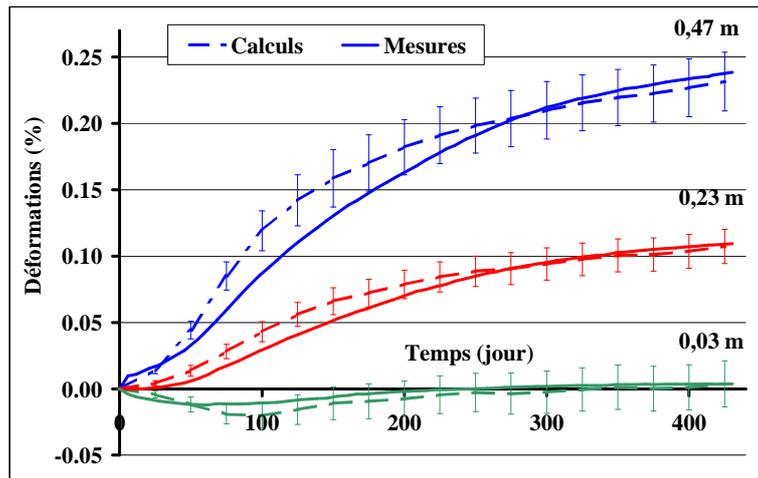


Figure 32 : Comparaison des déformations mesurées et calculées dans l'hypothèse prenant en compte des déformations imposées isotropes dans la partie non fissurée et anisotropes dans la partie fissurée

La première phase de séchage, qui a duré plus de 400 jours à 38°C, a été suivie d'une phase de remouillage pendant laquelle la face supérieure était soumise à un apport d'eau (Figure 28). Après le remouillage, le béton de la partie supérieure a gonflé de manière rapide. L'expansion a finalement été du même ordre que celle obtenue dans la partie de béton immergé depuis le début des essais. L'analyse mécanique a montré que le comportement longitudinal était, quant à lui, influencé par la précédente période. En effet, du fait de la déformée de la poutre en fin de phase de séchage, le remouillage provoque une mise en compression de la partie supérieure de la poutre. Le gonflement n'a donc pas lieu en condition libre mais sous contrainte, ce qui entraîne une réduction sensible des déformations imposées dans cette zone (Multon & Toutlemonde, 2010). Il est ainsi nécessaire de prendre en compte cette réduction, qui avoisine 60 % du gonflement sur éprouvette, pour retrouver le comportement de cette poutre.

Cet essai sur structure de laboratoire non armée atteinte d'alcali-réaction et soumise à un gradient hydrique a également fait l'objet d'analyse à l'aide d'un modèle poro-mécanique dans la thèse d'Etienne Grimal (Grimal, 2007). La reproduction du comportement de cette poutre à partir des données d'expansion obtenues sur éprouvette est rendu difficile par la sensibilité importante des gonflements d'alcali-réaction à la teneur en eau. En effet, des gradients d'humidité significatifs existent dans la poutre : fibre supérieure exposée à un air à 30 % d'humidité relative, gradient de séchage fort jusqu'à 10 cm de la surface supérieure, couplé à une fissuration transversale de cette surface, puis à l'opposé, une remontée capillaire sur les 20 cm inférieurs avec une teneur en eau proche de 100 % et également une fissuration importante. Ces conditions de gradients d'humidité prononcés, qui sont difficiles à reproduire d'un point de vue numérique, entraînent en outre, des variations d'expansion dans un domaine d'humidité (entre 90 et 100 %) dans lequel les cinétiques et amplitudes de gonflement sont particulièrement sensibles (Poyet et al., 2006) et donc difficile à maîtriser. Le travail de Paulo Régis, professeur invité au LMDC en 2012, et la thèse de Pierre Morenon permettent de réfléchir de nouveau à la prise en compte de l'humidité dans l'avancement de l'alcali-réaction

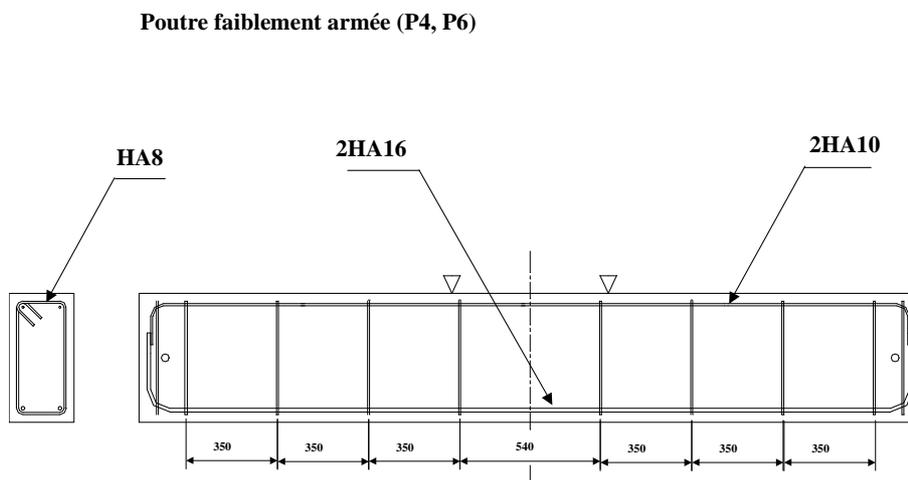
pour tenter de mieux reproduire le gonflement de béton dans ce domaine d'humidité et ainsi de mieux maîtriser le comportement de structures soumises à des gradients hydriques.

Les comportements mécaniques de poutres atteintes par la réaction sulfatique interne et soumises à un gradient hydrique ont été étudiés par Renaud-Pierre Martin, dans sa thèse effectuée à l'IFSTTAR en partenariat avec EDF (Martin, 2010). Ils ont également fait l'objet de plusieurs analyses chemo-mécaniques. Dans son mémoire de thèse, Renaud-Pierre Martin a montré la difficulté de mener une étude comparable à celle effectuée ci-dessus pour l'alcali-réaction (Martin, 2010). Plusieurs phénomènes perturbent en effet cette analyse. L'importance des expansions des poutres non armées rend le comportement mécanique fortement non-linéaire et particulièrement sensible aux hypothèses de déformations imposées (Martin, 2010). Le comportement hydrique des poutres atteintes de RSI est fortement influencé par le développement des expansions et des fissurations (Martin, 2010). Il est donc difficile d'évaluer correctement le profil hydrique dans les poutres non armées et d'en déduire un profil d'expansion imposée. Les analyses effectuées avec des hypothèses semblables à celles retenues ci-dessus conduisent alors à une surestimation de la flèche des poutres non armées. L'effet du lessivage des alcalins dans la cinétique de gonflement de RSI pourrait également induire des expansions imposées différentes de celles envisagées par l'impact du seul gradient hydrique (Martin et al., 2013). Afin d'être utilisés dans le calcul de structures, les gonflements observés sur éprouvette devrait donc faire l'objet d'une analyse préalable en tenant en compte de la diffusion des alcalins. Ceci a été effectué lors de la seconde analyse du comportement de ces poutres dans la thèse de Marie Salgues (Salgues, 2013). Les calculs, menés à l'aide d'une version avancée du modèle poro-mécanique développé dans la thèse d'Etienne Grimal (Grimal, 2007), ont montré que, dans ce cas, le comportement initial d'une poutre atteinte de RSI pouvait être évalué à partir des données de gonflement obtenues sur éprouvettes. Pour les éprouvettes, comme pour les poutres, un calcul de diffusion des alcalins a d'abord été mené afin de déterminer l'avancement de la précipitation d'ettringite secondaire. Une fois, le champ d'ettringite déterminé, il est alors possible de mener un calcul poromécanique (avec prise en compte du fluage et de l'endommagement du béton) afin de reproduire la cinétique d'expansion des éprouvettes (calage d'un paramètre de cinétique et d'un paramètre d'amplitude) puis d'en déduire la déformée de la poutre sous gradient hydrique tant que l'endommagement reste modéré (sans calibration supplémentaire). Toutefois, à partir du moment où la fissuration devient trop importante, le comportement fortement non linéaire de la poutre rend difficile son analyse (Salgues, 2013). Des travaux de thèses en cours (thèse de Pierre Morenon en collaboration avec EDF-CIH) devraient permettre de progresser sur la prise en compte du couplage entre endommagement lié à une RGI et comportement hydrique du béton et ainsi de mieux maîtriser les conséquences sur les non linéarités du comportement de structures endommagées.

3. Comportement de structures armées en laboratoire

Le second aspect qui influence le comportement de structures soumises à des gonflements internes est la présence d'armatures passives ou actives. Du fait des gonflements, les aciers passifs sont l'origine de contraintes de compression issues des déformations empêchées. Tout comme l'application de charges sur le béton, ces contraintes de compression entraînent une fissuration anisotrope et une forte réduction des gonflements dans la direction armée (quand la contrainte de compression dépasse environs 2 ou 3 MPa). Quant aux aciers de précontrainte, ils sont la cause de compression avant même la détection de gonflements significatifs. En cas de réaction de gonflement interne, la précontrainte est donc la cause de l'anisotropie de gonflement entraînant un endommagement du béton supérieur dans les directions perpendiculaires aux aciers actifs (Figure 26). L'objectif de ces recherches est d'être en position d'évaluer la capacité des modèles à prédire le comportement de structures armées ou précontraintes à partir de la donnée du gonflement libre du béton et de la connaissance du comportement expansif du matériau sous contrainte. Ces calculs prédictifs doivent entrer dans le cadre usuel de l'analyse des structures : évaluation de la capacité de la structure à remplir son usage (état limite de service) et de la capacité à assurer sa portance (état limite ultime).

Lors de la campagne expérimentale sur structures de laboratoire, réalisée au LCPC avec la participation d'EDF (Multon, 2004), le comportement de deux poutres réactives armées de 3 mètres de long a été suivi. La disposition des armatures de ces poutres permettaient de représenter des poutres plus ou moins armées (0,45 et près de 2 % de taux d'armatures – Figure 33).



(a)

Poutre fortement armée (P5)

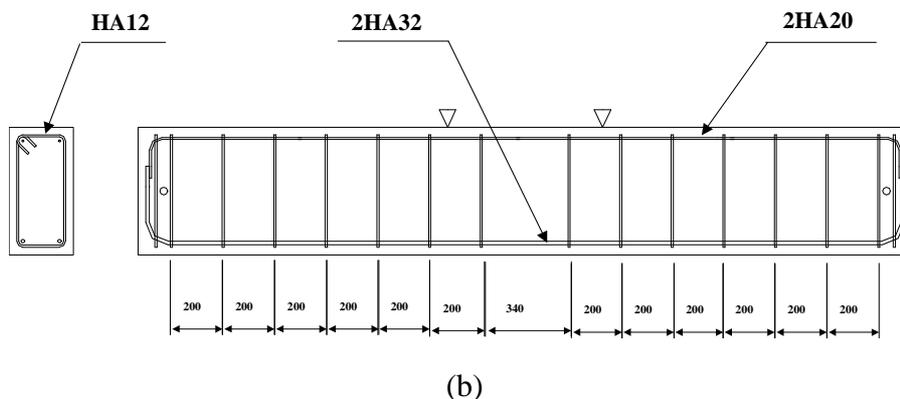
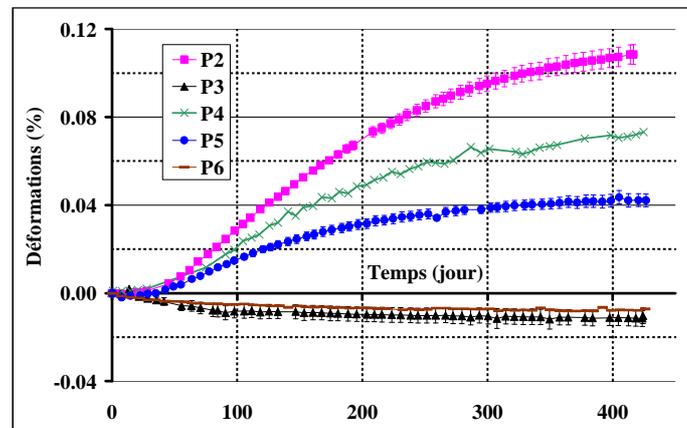


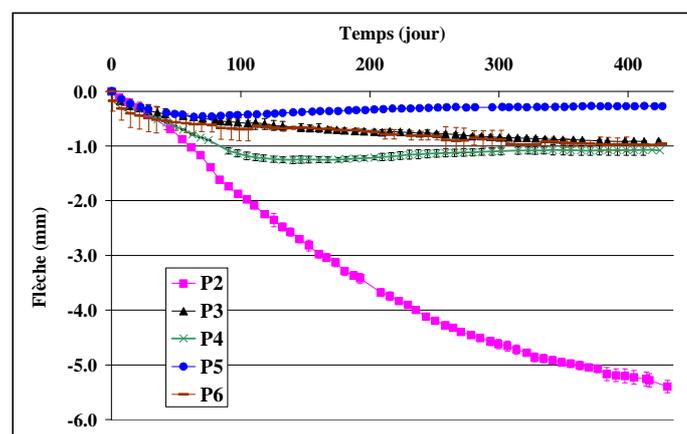
Figure 33 : Plans d'armatures des poutres armées atteintes par l'alcali-réaction (Multon, 2004)

Les comportements longitudinaux des poutres sont résumés par la donnée de la déformation moyenne (obtenue par corde vibrante de grande base – 3 mètres de long – à 23 cm de profondeur) et de la flèche à mi portée (Figure 34). Ils représentent le comportement en service (déformations) des poutres étudiées. La flèche est la grandeur utilisée pour caractériser le comportement des éléments en flexion. Dans le cas de gonflements internes, l'analyse de la flèche seule pourrait conduire à une conclusion erronée de l'impact d'une alcali-réaction sur le comportement d'une structure armée atteinte. En effet, dans le cas des deux poutres armées (P4 et P5), la flèche à mi portée en fin d'essai est du même ordre de grandeur que celle obtenue pour les poutres témoins (P3 et P6, mêmes dimensions, mêmes conditions mais béton non réactif). Pour la poutre la plus armée, la flèche est identique à celles des poutres témoins jusqu'à 100 jours et inférieure quand les gonflements deviennent significatifs et compensent les effets du retrait dans la partie supérieure des poutres (Figure 34-b). Cette analyse pourrait conduire à conclure qu'un ferrailage, même relativement faible (0,45 %), est suffisant pour s'opposer aux gonflements et permettre un fonctionnement pratiquement normal de l'ouvrage. Deux aspects du fonctionnement de la structure seraient alors oubliés. D'une part, la déformation moyenne des poutres montrent un comportement bien différent (Figure 34-a). En effet, en moyenne, les déformations ne sont réduites que de l'ordre de 30 % pour le ferrailage le plus de faible et de 60 % pour le plus fort. Ces gonflements pourtant réduits par la présence d'armatures peuvent donc induire un déplacement du même ordre de grandeur que celui dû aux variations de température et être ainsi délétères au bon fonctionnement de la structure. De manière analogue, les armatures transversales ont peu d'effet sur les gonflements et donc sur la fissuration longitudinale (Multon, 2004). D'autre part, ces poutres sont naturellement plus fissurées que les poutres témoins qui ne montrent aucune fissuration visible sans moyen d'observations microscopiques. L'orientation de ces fissures liées aux gonflements, principalement longitudinales, a peu d'impact sur le comportement à rupture, et donc sur la portance des poutres, comme cela est montré dans l'analyse suivante. Toutefois, elles peuvent diminuer de manière importante la résistance aux attaques extérieures de toute sorte (carbonatation, pénétration d'espèces ioniques agressives, gel-dégel) et donc entraîner une

diminution globale de la durabilité des ouvrages atteints. L'analyse globale de ces structures ne devrait donc pas se limiter aux seuls effets des gonflements sur le comportement mécanique mais étudier également leur impact sur les indicateurs de durabilité des bétons avec, en particulier, l'effet sur les propriétés de transfert.



(a)



(b)

Figure 34 : Déformations moyennes (a) et flèches à mi portée (b) de poutres témoins (P3 et P6) et atteintes d'alcali-réaction (P2, non armée, P4, faiblement armée et P5, fortement armée)

Comme pour la poutre non armée, une analyse mécanique simplifiée a été menée pour évaluer la possibilité de représenter les gonflements d'alcali-réaction comme des déformations imposées isotropes indépendantes de l'état de contrainte. Ainsi, il est possible de supposer un profil de déformations imposées par l'alcali-réaction en fonction des conditions hydriques (Figure 35) et d'en déduire la déformation moyenne et la flèche résultantes (Figure 36) ainsi que l'état de contraintes dans la section (Figure 35). Lors de la première phase, seule la partie inférieure des poutres est en contact avec un apport d'eau. Les gonflements ont alors lieu principalement dans le béton proche du lit inférieur d'armatures qui en empêchant la libre déformation est à l'origine de contrainte de compression (Figure 35). Les calculs menés en supposant des expansions imposées indépendantes de cet état de contraintes ne permettent pas de reproduire le comportement observé sur les poutres armées (Multon, 2004; Multon et al.,

2006). Les hypothèses qui permettent de retrouver le comportement global des poutres consistent à supposer :

- un gonflement isotrope dans les zones éloignées des armatures et donc soumises à de faibles contraintes de compressions,
- un gonflement fortement anisotrope dans les zones proches des armatures (réduction de 55 et 70 % des gonflements dans la direction sous contrainte de compression supérieure à 2 ou 3 MPa).

Ce jeu d'hypothèses conduit à retrouver le comportement expérimental des poutres en termes de déformations moyennes et de flèches à mi portée (Figure 36) et d'évaluer à 150 MPa et 100 MPa la contrainte de traction induite par les gonflements dans les aciers inférieurs des poutres faiblement et fortement armées. Ainsi, le gonflement doit être supposé isotrope dans les parties subissant peu de contraintes alors que les mesures sur éprouvettes en gonflement libre montrent un gonflement fortement anisotrope. Cette anisotropie, souvent observée sur éprouvette sans contrainte, et expliquée par un effet de ségrégation des granulats (Larive, 1998), semble donc négligeable devant celle induite par les contraintes dans une structure.

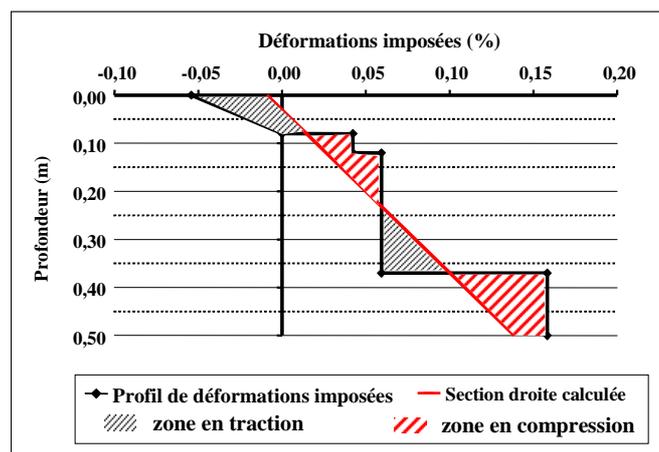


Figure 35 : Profil de déformations imposées isotropes et section droite résultante pour la poutre faiblement armée

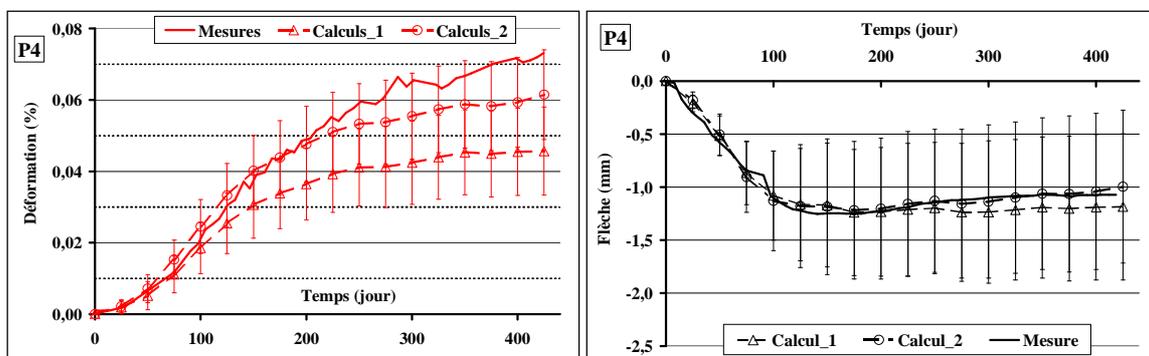


Figure 36 : Déformations moyennes et flèches à mi portée d'une poutre faiblement armée (mesure et calcul effectué avec l'hypothèse de réduction de gonflement dans les directions comprimées – gonflements imposés déduits des mesures sur prismes, calcul 1, ou supposant un gonflement isotrope dans toute la poutre, calcul 2)

Aux termes du suivi des gonflements, les poutres ont subi un essai de flexion 4 points mené jusqu'à rupture afin d'analyser le comportement des éléments sous charge avant et après fissuration. Le schéma mécanique utilisé pour l'essai à rupture, réalisé à partir des éléments modulaires de la dalle d'essais des structures du LCPC, est représenté sur la Figure 37. L'analyse de la rupture des poutres non armées est conforme à ce qui pouvait être attendu à partir des essais mécaniques sur éprouvettes (Multon, 2004). Concernant les poutres faiblement armées, il est possible de comparer le comportement à rupture des poutres réactive et témoin (Figure 38).

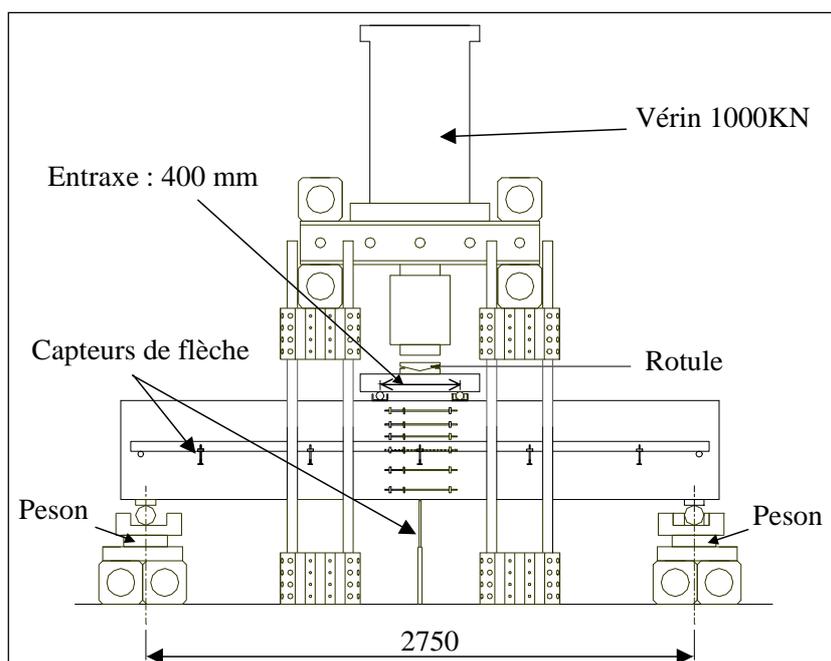


Figure 37 : Schéma mécanique pour l'essai de rupture des poutres

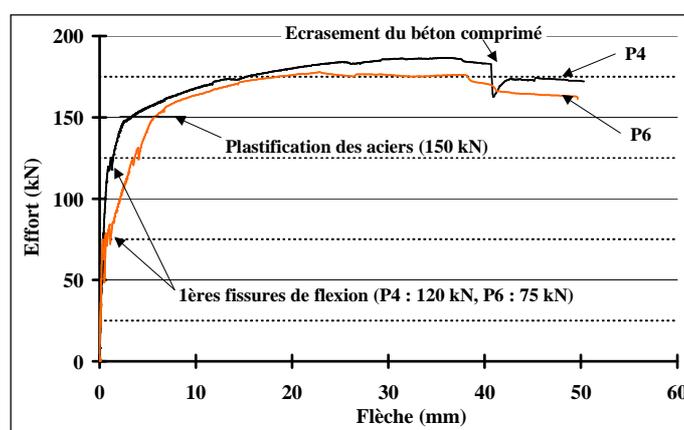


Figure 38 : Courbes Effort / Flèche des deux poutres faiblement armées (réactive P4 et non réactive P6)

Pour analyser ce comportement à rupture, il est important de rappeler que les poutres avaient été dimensionnées pour obtenir une rupture par plastification des aciers (Pivot A) pour être conforme à ce qui est couramment réalisé pour le calcul de poutres d'ouvrages d'art (Multon, 2004). La Figure 38 montre que le comportement de la poutre réactive, malgré une déformation moyenne et une fissuration importantes liées à l'alcali-réaction, reste très proche du comportement de la poutre témoin. Dans la première phase du chargement, il faut même noter une amélioration du comportement en termes de rigidité avec une fissuration de flexion plus tardive. En effet, les fissures de flexion sont apparues pour un effort de l'ordre de 75 kN pour la poutre témoin et de 120 kN pour la poutre réactive, ce qui correspond à un gain de 60 % de résistance à fissuration. La différence peut s'expliquer par la présence de contraintes de compression longitudinale par gonflement empêché du fait de la présence des armatures pour la poutre réactive P4. En prenant en compte les caractéristiques des poutres et de l'essai, une contrainte de compression d'environ 2,5 MPa permet de retrouver cet écart de comportement à fissuration, ce qui confirme les ordres de grandeur de contrainte de compression trouvée lors de l'analyse mécanique des poutres armées. En revanche, le comportement à rupture est peu modifié, avec une charge de plastification des aciers identique pour les deux poutres et un domaine plastique aux comportements proches. L'analyse numérique du comportement sous charge de ces poutres n'a pas encore été effectuée. Elle est envisagée dans le cadre de la thèse de Pierre Morenon en collaboration avec EDF-CIH.

L'analyse de poutres armées atteintes par la réaction sulfatique interne présente les mêmes difficultés que celle des poutres non armées (Martin, 2010). Elle a toutefois permis de montrer que les gonflements imposés dans des poutres armées étaient également fortement réduits du fait de la compression induite par les déformations empêchées par les armatures (Martin, 2010). Les calculs menés à partir du modèle poro-mécanique sont également rendus difficiles du fait de l'hypothèse d'adhérence parfaite entre acier et béton. Cette hypothèse acceptable pour l'alcali-réaction (Grimal, 2007) rend les calculs particulièrement non linéaires du fait de la grande amplitude des expansions de RSI (Salgues, 2013). Les hypothèses sur l'adhérence entre les armatures et le béton auront donc un effet du premier ordre sur l'évaluation du comportement de structures endommagées. Ceci est actuellement étudié dans le cadre de la thèse d'Yvan Thiebaut (en collaboration avec VINCI Construction, Cofiroute, Concrete). Une fois que l'effet des expansions de RSI sur l'adhérence acier / béton pourra être évaluée et que l'effet des contraintes sera modélisé sur la base des essais d'Hassina Bouzabata (Bouzabata, 2012), les données obtenues sur poutres dans la thèse de Renaud-Pierre Martin (Martin, 2010) devraient permettre la validation des modèles pour l'évaluation de structures atteintes par la formation d'ettringite différée.

En résumé de l'analyse mécanique des poutres armées et non armées, il est possible de conclure que les modélisations mécaniques des réactions de gonflement interne en phase de fonctionnement (évaluation de l'état limite de service) doivent supposer un gonflement isotrope (qui peut être évalué à partir du gonflement volumique d'une éprouvette en gonflement libre) et considérer l'anisotropie de gonflement et de fissuration uniquement en fonction de l'état de contrainte du béton dans la structure. Dans les directions tendues et

fissurées du fait du fonctionnement mécanique global, une augmentation des gonflements imposés peut être attendue (cas de la poutre non armée). A l'opposé, des contraintes de compression (liées à l'existence d'un gradient de déformation, comme lors du remouillage tardif de la poutre non armée, ou à la présence d'armatures) sont la cause d'une réduction importante des déformations imposées, même pour des contraintes faibles (de l'ordre de quelques MPa). Tout comme la flèche, le gonflement moyen des poutres soumises à des gradients hydriques doit être analysé. En effet, il peut induire des problèmes de fonctionnement en termes d'allongement de structures (fermeture d'un joint de dilatation de ponts par exemple). Concernant le comportement sous charge de structures dimensionnées pour une rupture par plastification des aciers, il est principalement affecté avant fissuration. La présence de contraintes de compression dans le béton, du fait de la restriction des gonflements par les armatures, peuvent permettre de retarder la fissuration, et ainsi d'augmenter la rigidité sous charge instantanée avant fissuration. Pour ce type d'éléments et le niveau d'expansion obtenu dans cette étude, le comportement vis-à-vis de l'état limite ultime semble peu affecté par les gonflements et les fissurations liés au développement d'un alcali-réaction.

4. Méthodologie d'évaluation des structures endommagées

Un des objectifs majeurs de l'ensemble de ces études est d'améliorer la compréhension des mécanismes des réactions de gonflement interne à la fois à l'échelle du matériau et de la structure afin d'établir une méthodologie d'évaluation des structures endommagées. Une fois, les modèles validés sur des structures de laboratoires, pour lesquelles la plupart des données d'entrée sont maîtrisées, ils doivent être confrontés aux calculs de structures réelles dans le cadre d'expertise. Au démarrage d'une telle étude, la plupart des paramètres sont inconnus et doivent donc être déterminés à l'aide d'échantillons obtenus sur l'ouvrage endommagé. Une réflexion sur les données d'entrée nécessaires aux calculs et sur la manière de les obtenir a donc été menée. Il s'agit du troisième objectif de l'étude des réactions de gonflement interne à l'échelle des structures.

Les gonflements trouvant leurs origines dans des mécanismes réactionnels chimiques, les méthodologies devraient pouvoir se baser sur les données d'entrées les plus basiques des éléments mis en jeu à l'échelle microscopique : teneur en silice réactive des granulats, concentration en alcalins, degré de saturation, propriétés mécaniques instantanées et différées des granulats et de la pâte de ciment... Toutefois, les nombreuses différences existant entre le développement des gonflements à l'échelle de la structure et les essais d'expansions de laboratoire ont conduit à l'élaboration de méthodologies alternatives utilisant autant de données objectives possibles et limitant l'utilisation de données obtenues directement sur structures au strict minimum. La méthodologie proposée par le LMDC et EDF, issue des travaux de thèse d'Etienne Grimal (Grimal, 2007), est présentée sur la Figure 39. Elle reprend les trois grandes catégories d'outils disponibles à l'expertise : données issues de l'ouvrage (par échantillonnage ou suivi de structures), expérimentation en laboratoire (sur échantillons

provenant de la carrière ou de l'ouvrage endommagé) et modélisation numérique. Il est alors possible de retracer le passé de la structure et d'envisager son avenir, avec ou sans scénario de réparation (Grimal, 2007; Sellier et al., 2009). L'objectif de cette partie est de faire le point sur la méthodologie et les attendus des expérimentations de laboratoire sur les échantillons issus du site et de présenter la première application de cette méthode sur un barrage au fil de l'eau endommagé par alcali-réaction.

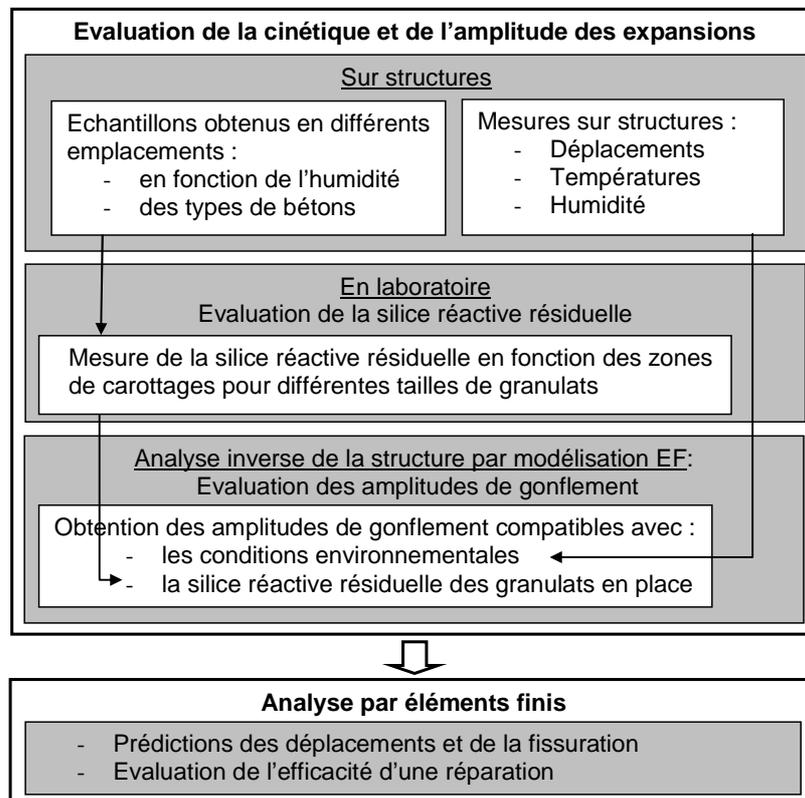


Figure 39 : Organigramme de la méthodologie proposée dans (Grimal, 2007; Sellier et al., 2009)

4.1 Essais de laboratoire

L'objectif des essais de laboratoire sur échantillons issus de l'ouvrage est d'obtenir des données les plus objectives possibles sur l'avancement des réactions délétères dans la structure et surtout sur le potentiel de dégradation résiduel. Une fois les échantillons obtenus, il est donc important de prévoir une conservation adaptée afin de limiter l'évolution des désordres avant leur caractérisation (Multon et al., 2008a). Un des enjeux de l'expertise étant de prévoir l'avenir d'ouvrages dont le comportement est principalement perturbé par la présence de gonflements, il est naturel d'essayer de l'obtenir à partir d'essais de gonflement résiduel (Li & Coussy, 2002; LCPC, 2003). Toutefois, pour le cas de l'alcali-réaction, de nombreuses perturbations rendent difficiles cette utilisation directe de l'essai (Gao et al., 2011) :

1. Pour des bétons contenant des granulats de grande dimension, une partie importante de la silice réactive n'est pas atteinte sur la durée de l'essai (52 semaines) (Grimal, 2007; Sellier et al., 2009).
2. Du fait des conditions accélérées (38°C), les conditions d'équilibre chimique ont un impact sur la composition des produits de réaction formés (Urhan, 1987b; Kim & Olek, 2014) et donc sur leur propriété mécanique, leur viscosité et donc leurs propriétés expansives.
3. Le lessivage des alcalins, dans de telles conditions de saturation, tend à diminuer de manière significative le gonflement observé, même pour des éprouvettes de grandes dimensions (Bérubé et al., 2002a; Rivard et al., 2007; Lindgård et al., 2013).
4. Ces conditions de saturation (humidité relative supérieure à 95 %) sont difficiles à contrôler ce qui peut conduire à des variations significatives d'expansion entre 95 et 100 % (Poyet et al., 2006).
5. L'effet d'échelle induit par la perte de gel réactif par perméation, fortement influencé par le rapport de taille entre granulats réactifs et éprouvettes de caractérisation des expansions semble particulièrement sensible (Gao et al., 2013c). Cette perturbation, qui reste encore trop peu étudiée, est actuellement difficile à quantifier mais pourrait conduire à sous-estimer les gonflements même pour des tailles d'éprouvette importantes.

En conséquence, il semble difficile d'utiliser de telles données pour un calcul d'ouvrages sans en faire une analyse préalable pour recalculer le gonflement pouvant être induit dans les conditions de la structure sans lessivage ni perte de gel par perméation.

Cette analyse a conduit le LMDC et EDF a proposé une analyse de laboratoire alternative. Son objectif n'est plus d'obtenir le gonflement résiduel à partir d'essais menés en laboratoire, mais de déterminer l'avancement de la réaction dans les différentes zones de l'ouvrage afin de maîtriser la cinétique des dégradations et d'obtenir leur amplitude par analyse inverse du comportement de la structure endommagée. Cette analyse repose donc sur trois étapes :

- la récupération des granulats à partir des échantillons obtenus sur ouvrages,
- leurs analyses chimiques pour tenter d'évaluer la quantité de silice réactive,
- la mesure d'expansion sur mortiers reconstitués,

pour en déduire l'avancement de la réaction dans les différents granulats composant l'ouvrage.

Dans le cas de l'alcali-réaction, l'avancement de la réaction peut être caractérisé par l'état d'épuisement d'un des réactifs : les espèces ioniques pilotant la déstructuration de la silice (alcalins, hydroxyles) ou la silice réactive contenue dans les granulats. Pour les premières, leur capacité à se régénérer par un phénomène de substitution (les ions calcium pouvant prendre la place des alcalins dans les gels d'alcali-réaction et ainsi libérer les ions alcalins qui pourraient de nouveau réagir) a été décrite (Lagerblad & Trägårdh, 1992; Jensen, 1993; Duchesne & Bérubé, 1994), mais reste mal maîtrisée. Ce comportement remet en cause

l'hypothèse que les alcalins soient un réactif limitant, ce qui conduit à définir l'état d'avancement de l'alcali-réaction comme l'état de destruction de la silice des granulats. Il est alors nécessaire d'obtenir la quantité de silice de référence, initialement contenue dans les granulats (par analyse de granulats de la carrière d'origine ou de granulats issus de béton en zones sèches et ne présentant pas de désordres). L'avancement de la réaction peut alors être obtenu de manière simplifiée par le rapport entre la silice présente dans les granulats de différentes tailles et la silice présente dans ces granulats pas ou peu dégradés.

Lors de la récupération des granulats, il est donc important de limiter les conséquences de l'extraction en termes de destruction de la silice présente encore dans les granulats. Des recherches ont été menées par Xiao Xiao Gao afin d'obtenir une récupération des granulats en trois étapes dont l'objectif est de ne modifier ni la composition chimique ni la granularité des granulats (Gao et al., 2013b). Cette méthode, dont l'efficacité en termes de granularité a été quantifiée, est utilisée couramment dans le cadre d'expertises par la division Transfert de Technologie du LMDC.

Une fois les granulats récupérés, deux essais ont été proposés pour quantifier la silice pouvant faire l'objet d'une alcali-réaction dans un ouvrage :

- une analyse chimique réalisée sur des poudres issues des granulats réactifs dont l'objectif est de quantifier directement la silice pouvant conduire à une alcali-réaction (Gao et al., 2013a),
- un essai de gonflement sur mortiers reconstitués utilisant des granulats réactifs broyés afin de quantifier indirectement la silice réactive résiduelle (Sellier et al., 2009).

L'intérêt d'une analyse chimique est d'obtenir la teneur en silice réactive de chaque type de granulat par une méthode directe (la silice dissoute est réellement mesurée) et rapide (1 à 2 jours). Toutefois, il est très difficile de reproduire des conditions représentatives de l'attaque de la silice dans les ouvrages tout en accélérant les processus. Afin d'évaluer leur capacité de représentativité de l'alcali-réaction, les teneurs de silice soluble obtenues par plusieurs analyses chimiques ont été comparées à des essais d'expansions sur mortiers pour plusieurs types de granulats réactifs (Gao et al., 2013a). Certaines méthodes peuvent ainsi entraîner une surestimation importante de la quantité de silice qui peut réellement conduire à des gonflements dans les conditions d'une solution interstitielle de béton (Figure 4). Finalement, l'analyse chimique qui conduit à des résultats les plus cohérents avec les essais d'expansions semble être celle utilisant l'acide fluorhydrique. Même si les mécanismes réactionnels sont plus éloignés que l'attaque par des solutions basiques plus proches de la solution interstitielle, le caractère sélectif d'une attaque acide semble permettre une meilleure distinction des différents états de cristallisation de la silice présente dans les granulats. Actuellement, le manque de retour d'expérience sur cette méthode dans le cadre d'expertise d'ouvrages réels ne permet pas de l'utiliser seule. Elle est donc suivie d'une méthode de quantification indirecte par mesure d'expansion sur mortiers reconstitués (Grimal, 2007; Sellier et al., 2009). Elle permet donc d'avoir une première estimation de la quantité de silice réactive et de classer la réactivité du granulat étudiée. Cette réactivité conduit à optimiser la quantité d'éléments

réactifs dans les mortiers afin de limiter l'effet d'échelle lié à la quantité de silice présente dans les éprouvettes. En effet, une grande quantité de granulats très réactifs peut conduire à des gonflements très importants pouvant perturber l'analyse des résultats d'expansion (Gao et al., 2011).

L'intérêt des essais sur mortiers reconstitués est d'être représentatif d'une alcali-réaction. Toutefois, les expansions obtenues lors de ces essais ne peuvent naturellement pas être utilisés directement pour le calcul d'ouvrages puisque les conditions de ces essais ne sont pas représentatives de la réalité de l'ouvrage en termes de conservation et de granularité des éléments réactifs. Les conditions d'essais ont été définies pour obtenir une attaque complète de la silice réactive (conservation dans des solutions de soude) et des résultats rapides (granulats et éprouvettes de petites tailles – entre 315 et 1250 μm pour les granulats et 20 mm pour les éprouvettes). Les résultats obtenus pour un essai de ce type sont présentés sur la Figure 40 (dans ces premiers essais, les éprouvettes ont été fortement dopées en soude lors du coulage des mortiers mais étaient conservées à 95 % d'humidité relative). Afin d'analyser la Figure 40, il est important de rappeler que ces granulats sont issus d'un ouvrage dégradé par une alcali-réaction depuis plusieurs décennies. Leur potentiel expansif a donc été entamé en fonction de leur taille et de leur situation dans l'ouvrage. Les résultats d'expansion de gonflement montrent que les sables ont un potentiel expansif résiduel plus faible que les granulats. Ceci s'explique par la différence de taille qui conduit à une diffusion des alcalins plus rapides dans les petits granulats que dans les plus gros. Cette diffusion plus rapide conduit à une alcali-réaction plus profonde dans le sable à une même date. Ainsi, l'avancement de la réaction est plus grand pour les sables que pour les granulats. Concernant les différents types de béton, celui contenant le plus de ciment est le plus riche en alcalins, l'alcali-réaction a donc été plus rapide dans ce béton (Figure 40). L'avancement de la réaction dans le béton le plus riche en alcalins (dosé à 350 kg de ciment par m^3 de béton) est donc plus élevé que l'avancement pour le béton dosé à 250 kg de ciment par m^3 de béton. En absence d'autres informations disponibles, le gonflement permettant l'évaluation de la silice réactive de référence (pas ou peu attaquée par l'alcali-réaction) a été évalué par celui obtenu sur les granulats les moins atteints (le gravier le plus gros pour la teneur en ciment la plus faible). Il est alors possible de quantifier l'avancement des autres en supposant que le potentiel était identique pour tous les granulats au moment de la construction du barrage.

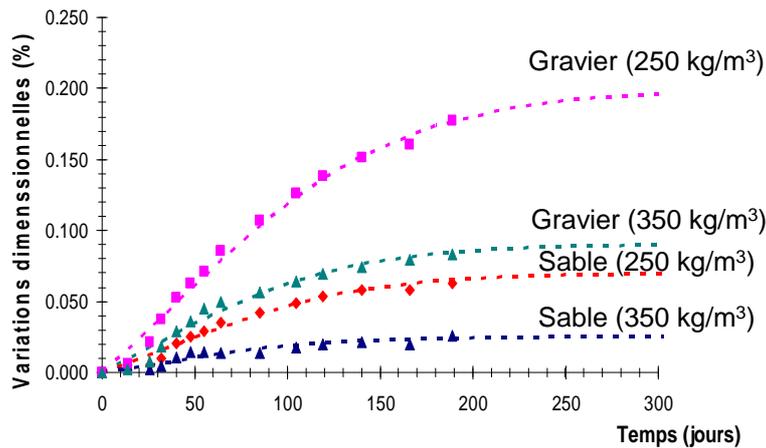


Figure 40 : Courbes d'expansion sur mortiers reconstitués pour deux sables et deux granulats issus de bétons dosés à 250 et 350 kg de ciment par m^3 de béton (Grimal, 2007)

A partir des différents avancements ainsi déterminés et de la connaissance des conditions environnementales (température et degré de saturation) dans lesquelles ces avancements ont eu lieu, il est possible de déduire la cinétique de la dégradation passée. La cinétique future pourra alors être déterminée par continuité et jusqu'à épuisement de la silice réactive. Dans le cas où les alcalins finiraient malgré tout par s'épuiser ou par ne plus pouvoir se libérer, le calcul permet de se placer en sécurité puisqu'il a tendance à surestimer la durée des gonflements et donc des déplacements de l'ouvrage.

4.2 Mesures in situ et analyse inverse par éléments finis

La méthode présentée dans l'organigramme de la Figure 39 a été appliquée une première fois dans la thèse d'Etienne Grimal sur un barrage au fil de l'eau (Figure 41). Une des particularités de cet ouvrage était d'être constitué de deux bétons ayant des dosages en ciment différents conduisant à des degrés d'avancement différents de la réaction dans l'ouvrage (Figure 40).

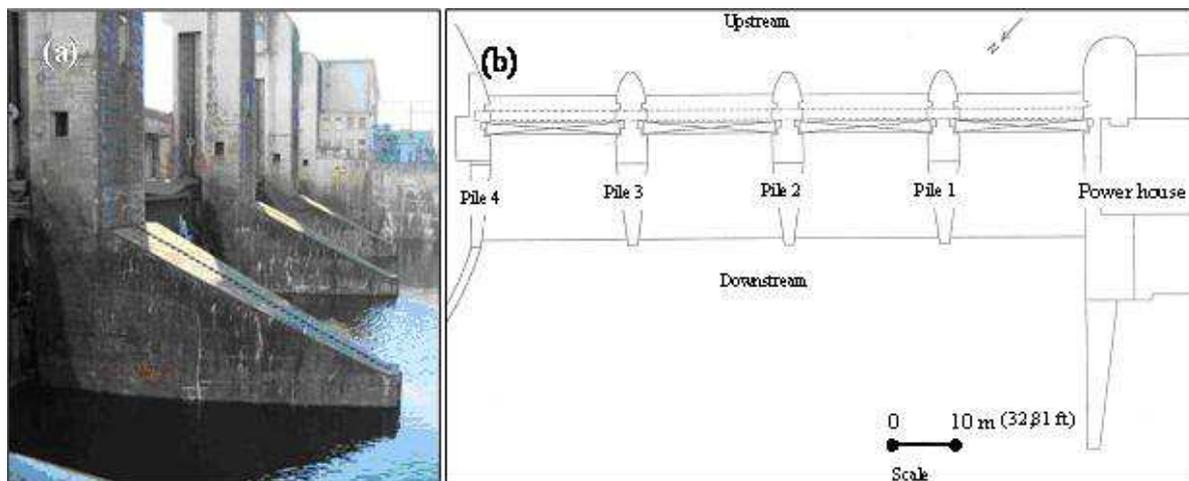


Figure 41 : Piles d'un barrage au fil de l'eau (a) et plan de l'ouvrage (b) (Grimal, 2007)

Après la détermination des caractéristiques mécaniques instantanées et différées du béton de l'ouvrage (Grimal, 2007), les essais sur mortiers reconstituées ont permis de déterminer l'état d'avancement de la réaction dans les différentes zones de l'ouvrage et ainsi d'en déduire une cinétique de dégradation. Le calcul sur structure comporte alors deux étapes : une évaluation du degré de saturation dans la structure par calcul de transfert hydrique dont les conditions aux limites en teneur en eau ont été déterminées sur échantillons issus de l'ouvrage, puis une détermination des conséquences mécaniques par calcul poromécanique prenant en compte fluage et endommagement (Grimal, 2007; Sellier et al., 2009). Dans le cas de cet ouvrage, plusieurs mesures de déplacement sur l'ouvrage étaient disponibles. Seul le déplacement horizontal vers la rive d'un point à mi-hauteur de la pile a alors été utilisé afin d'estimer l'amplitude du volume de gel formé au moment du carottage (Figure 42). Le calcul dans les autres directions pour tous les points de la structure est alors possible. La comparaison des résultats des calculs avec les déplacements mesurés permettent de valider la capacité du modèle mécanique à reproduire les conséquences du gonflement dans les différents points de la structure (Figure 42). Une autre validation est possible par comparaison des cartes d'endommagement avec les observations sur l'ouvrage (Figure 43). Un des atouts de la modélisation proposée est la prise en compte de l'anisotropie des endommagements de gonflement permettant une comparaison précise en fonction de la direction de la fissuration (Figure 43).

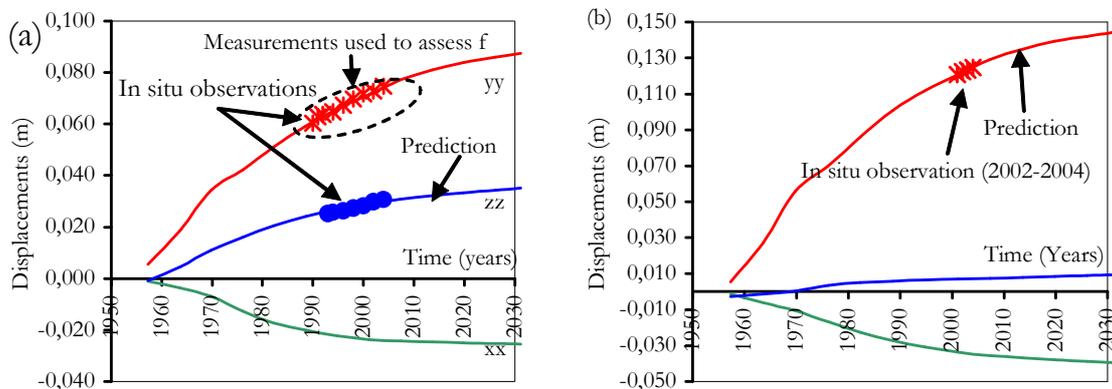


Figure 42 : (a) Calibration du volume de gel formé sur le déplacement d'un point de la pile dans la direction horizontale yy et calcul des déplacements dans les deux autres directions (zz et xx), depuis la construction, (b) déplacements du point haut de la pile et comparaison avec la mesure horizontale *in situ* (Grimal, 2007)

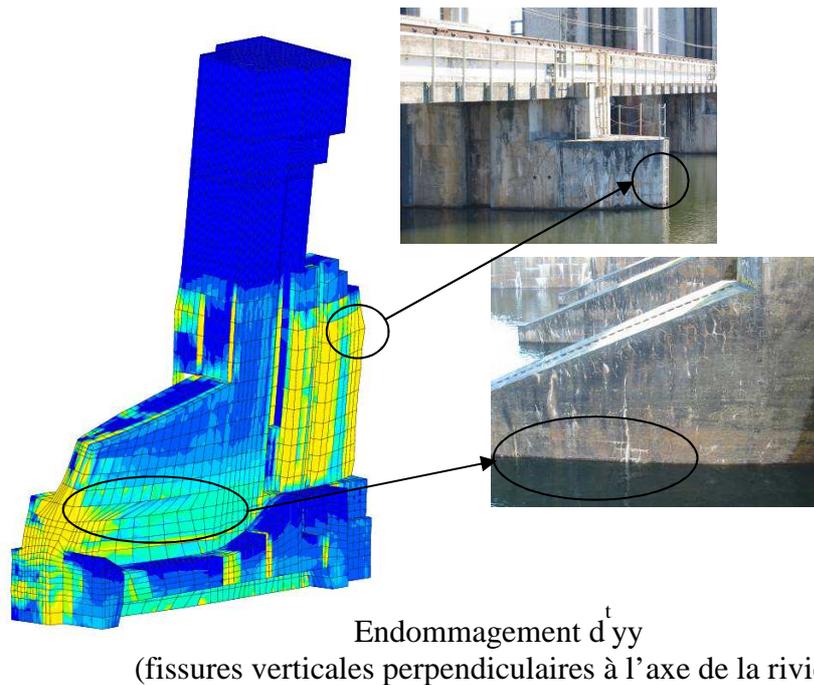


Figure 43 : Champ d'endommagement sur le maillage de la pile de rive d'un barrage au fil de l'eau en 2004 (en bleu, endommagement nul, en jaune endommagement diffus important) (Grimal, 2007)

Les calculs présentés concernent un ouvrage dégradé par une alcali-réaction. Actuellement, le modèle n'a pas encore été utilisé pour mener une telle analyse pour un ouvrage endommagé par la réaction sulfatique interne. Toutefois, l'élaboration du modèle pour cette pathologie a démarré dans la thèse de Marie Salgues et il a déjà été utilisé pour l'analyse en coupe d'un ouvrage poids (Salgues, 2013). Ce travail a ainsi permis de dégager les axes du travail de recherche à venir afin de simplifier le modèle physico-chimique pour le rendre plus performant dans le cadre d'un calcul de structures.

L'analyse précédente a montré l'importance d'avoir des données quantitatives de la dégradation de l'ouvrage in situ afin de calibrer le modèle de manière réaliste. Toutefois, peu d'ouvrages sont suivis de manière aussi complète que les grands barrages français et une méthodologie développée pour ce type d'ouvrages peut s'avérer difficile à mettre en place dans le cas d'autres expertises. Des travaux sont en cours avec Benoit Fournier de l'université de Laval et Léandro Sanchez de l'université d'Ottawa afin d'évaluer la possibilité de calibrer le modèle mécanique sur d'autres mesures, comme l'évolution du module d'Young du béton de l'ouvrage mesuré sur carottes à plusieurs échéances ou la mesure de libération de contraintes sur les aciers d'une pile d'un viaduc endommagé. Ces travaux devraient également permettre d'obtenir un retour d'expérience supplémentaire sur la récupération de granulats, les analyses chimiques et les essais d'expansion sur mortiers reconstitués. Toutes les informations obtenues par le suivi d'un ouvrage endommagé devraient permettre d'obtenir une calibration réaliste. Ainsi il est également envisageable d'utiliser l'évolution de l'indice de fissuration obtenu sur ouvrage (LCPC, 2003). Il serait ainsi intéressant de comparer l'anisotropie d'endommagement obtenu par le modèle avec cet indice qui permet une

quantification de l'état de fissuration dans plusieurs directions et d'évaluer la possibilité d'utiliser l'évolution de cet indice pour obtenir la donnée de calibration du modèle.

Synthèse des travaux

Les dégradations liées au développement de réactions de gonflement interne au béton peuvent entraîner une remise en cause de l'intégrité des structures atteintes. A l'opposé des pathologies liées à une attaque externe, les réactions de gonflement peuvent se développer autant à cœur des plus gros ouvrages que dans les parties superficielles. Le comportement de ces structures endommagées, qui peuvent avoir un rôle stratégique en termes de communication ou de production d'énergie, doivent donc faire l'objet d'un suivi régulier et d'une réévaluation fiable. L'expertise de ces ouvrages débute par les inspections visuelles qui sont généralement à l'origine de la détection première du problème par l'observation de fissuration anormale. Suite à ces constatations, des essais de laboratoire adaptés sont effectués sur échantillons issus de l'ouvrage afin de diagnostiquer l'origine du désordre. En fonction de la gravité des conséquences pour l'ouvrage, plusieurs démarches peuvent être envisagées, depuis le suivi de l'évolution des désordres sur ouvrage jusqu'au calcul complet de l'ouvrage avec prise en compte de l'ensemble des dégradations et du comportement différé naturel des matériaux. Ces démarches utilisent des outils de différentes natures : mesures sur ouvrages, essais de laboratoire sur échantillons et modélisations. Chacune doit faire l'objet de recherche particulière afin d'être en mesure de fournir un outil fiable en fonction de la démarche envisagée : d'une évaluation quantitative du gonflement potentiel du matériau en place à la réévaluation complète du comportement mécanique de la structure.

Les travaux présentés dans ce mémoire avaient pour objet une meilleure compréhension des phénomènes aux différentes échelles des manifestations. A l'échelle du matériau, l'objectif a d'abord été de synthétiser les connaissances des mécanismes réactionnels et d'en proposer une modélisation simplifiée basée sur les mécanismes prépondérants. Les origines de l'alcali-réaction et de la réaction sulfatique interne se situent dans des phénomènes de dissolution et de précipitations de nouvelles phases dans un matériau déjà résistant. Pour l'alcali-réaction, ces travaux ont montré que la cinétique des phénomènes pouvait être reproduite à partir de l'équation de conservation des alcalins, partagés entre ceux présents dans la solution interstitielle, ceux fixés par les gels d'alcali-réaction et ceux pouvant sortir du béton par un phénomène de lessivage. Le rôle important des ions calciums a été pris en compte à travers une équation simplifiée traduisant l'équilibre de la portlandite dans une solution fortement alcaline. Cette démarche a été validée par l'analyse de plusieurs campagnes d'essais effectuées spécifiquement ou issues de la littérature. Ce modèle semble assez simple pour être utilisé dans un calcul de structures, ce qui sera envisagé dans les perspectives. Pour la réaction sulfatique interne, le modèle développé a permis de mieux cerner les espèces dominantes dans les mécanismes à l'origine de l'ettringite différée. Toutefois, il s'avère trop complexe pour être utilisé dans un calcul de structures et une simplification doit être envisagée. Enfin, cette démarche, basée sur l'évaluation de l'avancement des mécanismes à l'origine des expansions, peut être appliquée à d'autres problématiques comme celle de la dégradation observée lors du

gel de matériaux de construction ou aux expansions consécutives de l'oxydation de sulfures contenus par certains granulats (pyrites et pyrrhotites).

Les conséquences mécaniques des réactions de gonflement interne doivent être étudiées à deux échelles. A l'échelle du matériau, les deux hypothèses usuelles ont été envisagées : la représentation du gonflement par une déformation imposée en analogie avec les lois de la thermo-mécanique et une représentation par une pression dans le cadre de la poromécanique. La première hypothèse a permis de reproduire les expansions d'éprouvettes en conditions de gonflement libre de contrainte et d'en prédire l'endommagement. Toutefois, le comportement du matériau soumis à un gonflement interne ne se résume pas à son expansion et à son endommagement en conditions mécaniques libres. En effet, la dégradation du béton peut entraîner une atténuation de la mise en pression du fait de la création de volume de vides et de la perméation des gels d'alcali-réaction dans les fissures. Ce phénomène conduisant à une perte plus importante de gel pour des éprouvettes de petites dimensions est la cause d'un effet d'échelle qui doit être analysé afin de pouvoir être pris en compte dans les modélisations. De plus, l'analyse du comportement des gonflements sous contraintes, pour l'alcali-réaction ou la réaction sulfatique interne, a montré qu'une approche simple basée sur la thermo-mécanique ne permettait pas de reproduire l'anisotropie des gonflements sous contraintes. Dans cette approche, l'amplitude des gonflements imposés devraient donc dépendre de l'état de contrainte du béton. L'approche en pression semble ainsi présenter deux avantages. Elle permet d'évaluer la pression des gels d'alcali-réaction qui est le moteur dans le mécanisme de pertes de gel par perméation. En condition de contraintes multi-axiales, cette approche permet également d'évaluer l'augmentation de la pression des gels dans le matériau et donc l'évolution de l'état de contraintes internes au béton.

Les conséquences mécaniques à l'échelle des structures ont d'abord été analysées sur des poutres de laboratoire. L'analyse du comportement de structures simples armées ou non soumises à des conditions hydriques variables a permis de montrer l'importance de l'état de contraintes même faible. L'évaluation de l'état limite de service de structures endommagées par une réaction de gonflement interne doit être effectuée avec l'hypothèse que l'origine principale de l'anisotropie des gonflements est la nature des contraintes : le gonflement imposé (résultat de la mise en pression du matériau et de sa fissuration) augmente dans les directions tendues et perpendiculairement aux fissures et diminue dans les directions comprimées même pour des contraintes faibles. Le gonflement empêché par la présence d'armatures est à l'origine d'une mise en compression modérée du béton, qui peut toutefois entraîner un certain gain de rigidités des structures avant fissuration mécanique. L'analyse d'un barrage réel a permis de montrer la difficulté de baser un calcul de structure sur les gonflements mesurés lors de l'essai d'expansion résiduelle. Une méthodologie a donc été proposée pour combiner des essais de laboratoires (analyses chimiques et expansions sur mortiers reconstitués) et des mesures de déplacement sur ouvrages pour obtenir les données d'entrée d'une modélisation macroscopique de la manière la plus objective possible. Cette méthode a été appliquée pour plusieurs ouvrages et permet de prédire le comportement à venir de structures endommagées par l'alcali-réaction. Les recherches doivent à présent se

poursuivre afin d'obtenir une méthode analogue pour la réaction sulfatique interne mais également pour pouvoir l'appliquer sur des structures sur lesquelles aucune mesure de déplacement n'est accessible.

Perspectives

En continuité des travaux actuels

Au cours d'une expertise d'ouvrages endommagés par une réaction de gonflement interne, plusieurs types de réévaluation peuvent être envisagés. L'information la plus importante est, dans tous les cas, l'évaluation du gonflement résiduel du matériau pour envisager l'avenir de la structure. Actuellement, aucun essai de laboratoire ne permet d'évaluer, de manière réaliste et certaine, ce potentiel de gonflement. Les travaux à venir doivent combler cette lacune. La méconnaissance des mécanismes conduisant à des effets d'échelle pour les gonflements liés aux réactions de gonflement interne est à l'origine de cette difficulté, il est donc nécessaire de les maîtriser. Dans le cas de l'alcali-réaction, trois phénomènes ont été bien identifiés : les transferts hydriques, les transferts ioniques et le transfert de produits de réaction dans les fissures. Une partie des travaux à venir doit permettre de quantifier ces effets d'échelle à partir de données objectives afin d'être en mesure de proposer une évaluation du gonflement en conditions d'ouvrages à partir d'une mesure d'expansion sur éprouvette.

Toute la difficulté pour analyser ces effets d'échelle est d'être capable de les découpler. En effet, en fonction des conditions environnementales retenues pour les essais, les trois effets d'échelle peuvent être concomitants. Nous devons donc être en mesure de séparer la contribution de chaque effet dans les différences de gonflement liées à la taille des éprouvettes. Dans ce but, plusieurs campagnes expérimentales doivent être envisagées. Leur ordonnancement dans le temps doit également être prévu afin de simplifier la séparation des effets. Ainsi, même s'il est le dernier à avoir été identifié, l'effet d'échelle lié à la perméation des gels d'alcali-réaction devrait être le premier à être analysé. En effet, dans ce cas, il est possible de réaliser des essais sur des éprouvettes de différentes tailles à degré de saturation constant, afin d'annuler l'effet d'échelle lié au transfert hydrique, et en solution alcaline, pour annuler l'effet d'échelle lié au lessivage. Il est important de noter que des alcalins sont progressivement fixés dans les gels d'alcali-réaction, il sera donc impossible d'annuler totalement les transferts ioniques entre le béton et la solution. Toutefois dans cette configuration, les transferts ne devraient avoir qu'un rôle cinétique sans avoir d'impact sur l'amplitude finale des gonflements et l'effet d'échelle de perméation sur l'amplitude pourrait donc être en partie isolé des deux autres.

Cependant, même dans cette configuration, nous ne sommes pas certains d'évaluer l'effet de la perméation des gels dans des conditions tout à fait semblables à celles des structures. En effet, la viscosité de ces produits de réaction est fortement influencée par leur composition chimique. Ainsi, des gels produits dans un béton de structure à teneur en alcalins fixes ont

tendance à se charger en ions calcium quand ils progressent dans la pâte de ciment riche en portlandite. Au fur et à mesure de cette progression, ils deviennent moins mobiles et leur déplacement de moins en moins facile. L'observation de gels sur les parements d'ouvrages endommagés est toutefois courante (il s'agit d'ailleurs d'un des critères retenus lors des analyses de détection d'une alcali-réaction sur ouvrages), ce phénomène a donc un impact sur le comportement des structures tout en restant plus faible que celui qu'il peut avoir sur une éprouvette de petites dimensions. Dans le cas de bétons conservés en solution alcaline, les gels seront produits dans un environnement pauvre en ions calcium et seront donc particulièrement mobiles. L'effet quantifié risque donc d'être surestimé par rapport à ce qui aurait lieu pour un autre type de conservation plus proche de la réalité. C'est pourquoi des essais complémentaires en conditions de conservation en eau doivent être menés en parallèle. Dans ce cas, la viscosité des gels sera plus réaliste mais l'effet d'échelle de lessivage des alcalins aura également un impact. L'intérêt d'une conservation en eau par rapport à la conservation en humidité relative retenue habituellement pour ce type d'essai est d'ordre pratique. En effet, ce type de conditions de conservation est plus facile à modéliser qu'une conservation en humidité relative pour laquelle le lessivage des alcalins est lié à un phénomène de condensation de paroi, difficile à maîtriser et donc à modéliser. L'analyse multi-échelle déjà réalisée pour les transferts ioniques des alcalins doit donc être enrichie par l'équation de perméation, issue de la loi de Poiseuille, proposée dans ce mémoire afin d'envisager la quantification de l'effet de départ des gels d'alcali-réaction. Ce travail devrait alors permettre d'évaluer la part des deux phénomènes (diffusion des alcalins et perméation) dans la modification des amplitudes de gonflement dans des conditions réalistes.

Les phénomènes de transferts hydriques doivent également faire l'objet d'études complémentaires afin d'être capable d'évaluer leur contribution dans les effets d'échelles. Vis-à-vis de l'approche multi-échelle déjà définie, des travaux numériques sont envisagés pour reproduire l'effet de la variation d'expansion avec la teneur en eau du béton en modifiant les propriétés de diffusion dans les granulats et dans le béton en fonction du degré de saturation. Dans le cas de ces transferts, plusieurs types d'essais ont déjà été réalisés (effets de conditions hydriques constantes et uniformes, de cycles hydriques, de gradients), et peuvent permettre une première confrontation du modèle envisagé. Toutefois, afin de mieux appréhender l'effet d'échelle lié à la taille des éprouvettes et valider la capacité des modèles multi-échelle à les quantifier, une campagne expérimentale spécifique doit être envisagée. Dans ce but, des éprouvettes de tailles significativement différentes seront réalisées à l'aide d'un béton présentant un fort potentiel d'expansion et exposées à un environnement accélérant les gonflements (38°C) et favorisant leur séchage (30 % de HR). Ainsi, les gonflements devraient être stoppés rapidement par le manque d'eau dans les plus petits échantillons alors que les plus gros éléments devraient présenter des expansions plus longues et ainsi plus fortes. Ce qui a déjà pu être observé lors d'essais in situ sera, dans ce cas, réalisé en conditions de laboratoire contrôlées ce qui devrait permettre une analyse plus précise et une confrontation des modèles. En termes de couplage, les conditions de séchage devraient permettre de limiter au maximum l'impact des transferts ioniques sur les gonflements. En

revanche, l'effet de perméation sera peut-être limité car les gels devraient être pauvres en eau mais ne devrait pas être totalement supprimé, en particulier proches des surfaces extérieures. Une analyse précise ne devrait donc pas négliger la part de ce mécanisme dans les variations de gonflement.

En résumé, trois grandes campagnes d'essais sont envisagées dans l'avenir afin d'enrichir l'approche développée pour la compréhension et l'évaluation des effets d'échelle des gonflements liés à l'alcali-réaction :

- maîtrise de l'effet d'échelle de perméation des gels : expérimentations sur éprouvettes de béton de différentes tailles conservées en bain de soude (limitation de l'influence des transferts ioniques à un effet cinétique) ;
- maîtrise de l'effet d'échelle de perméation des gels en conditions réalistes d'ouvrages : expérimentations sur éprouvettes de béton de différentes tailles conservées en eau (limitation de l'influence des transferts hydriques à un effet cinétique) afin d'obtenir une viscosité et donc un phénomène de perméation des gels plus réalistes qu'en solution alcaline. Dans ce cas, l'effet de lessivage des alcalins sur les amplitudes de gonflement ne pourra pas être empêché et une analyse multi-échelle couplant les deux phénomènes sera donc indispensable ;
- maîtrise de l'effet d'échelle de transfert hydrique : expérimentations sur éprouvettes de béton de différentes tailles conservées en atmosphère sèche (limitation de l'influence des transferts ioniques).

Ces campagnes pourraient être envisagées au LMDC en utilisant en particulier la salle climatisée de grand volume dont le laboratoire s'est récemment doté pour la troisième campagne sur les transferts hydriques. Toutefois, cet équipement étant déjà occupé pour une longue période, la collaboration avec des laboratoires extérieurs pourrait également être envisagée. La problématique des transferts hydriques a en effet perturbé le suivi d'éléments de structures réalisées en environnement extérieur en Amérique du Nord. Des partenariats avec les laboratoires concernés pourraient donc s'avérer particulièrement riches pour l'analyse de ce phénomène.

La finalité de l'approche multi-échelle simplifiée proposée pour l'alcali-réaction est de pouvoir utiliser un même modèle pour analyser finement des essais sur éprouvettes et de réaliser en suivant le calcul complet de structures endommagées avec les mêmes paramètres. Avant de l'envisager, il est nécessaire de valider la capacité de l'approche poromécanique multi-échelle à reproduire l'effet des contraintes sur les gonflements de manière aussi satisfaisante que l'approche poromécanique macroscopique utilisée actuellement. En effet, l'approche multi-échelle conduit à déterminer les coefficients et les modules de Biot à partir du volume de gel formé et des caractéristiques mécaniques des gels et du béton, alors que dans l'approche macroscopique, un coefficient et un module de Biot macroscopiques sont calibrés pour reproduire l'effet des contraintes. La sensibilité du modèle poromécanique vis-à-vis de l'effet des contraintes pourrait être modifiée par l'approche multi-échelle et la disparition de cette calibration. Des travaux sont donc nécessaires pour :

- évaluer si le modèle d'endommagement lié aux expansions doit être modifié pour reproduire les comportements de gonflement sous contraintes à partir de l'approche poromécanique multi-échelle ;
- évaluer la capacité du modèle multi-échelle à être utilisée pour un calcul de structure réelle.

L'approche multi-échelle a également un intérêt pédagogique car elle permet de présenter aux échelles successives les différents mécanismes conduisant aux dégradations par réactions de gonflement interne. Les équations conduisant à l'évaluation de chaque phénomène et leur couplage peuvent ainsi être explicitées de manière concrète à chaque étape de l'approche. Cette présentation sera utilisée dans le cadre des enseignements de la nouvelle accréditation du master Génie Civil de Toulouse. En première année, une matière du nouveau module intitulé 'Mécanique et matériaux pour l'innovation dans le génie civil' a été défini pour aborder la problématique des pathologies du béton à travers l'approche thermodynamique de formation ou dissolution de phases dans les matériaux cimentaires. Les mécanismes à l'échelle microscopique présentés dans ce mémoire y trouveront naturellement leur place. En seconde année, un enseignement du nouveau parcours de master Ingénierie de la Durabilité – Recherche et Innovation en Matériaux et Structures (Id-Rims) me permettra de replacer l'approche thermodynamique appliquée à l'alcali-réaction dans l'ensemble du cadre multi-échelle.

Concernant les particularités des expansions liées à la réaction sulfatique interne, deux thèses sont en cours afin d'évaluer la capacité du modèle macroscopique à évaluer le comportement de structures armées ou non, voire précontraintes. L'enjeu pour ces travaux est triple :

- évaluer la capacité du modèle à mener des calculs pour des expansions qui peuvent être dix fois supérieures à celles de l'alcali-réaction en présence de contraintes mécaniques ;
- résoudre les problèmes d'interface entre acier et béton expansif pour reproduire à la fois le comportement en service et évaluer le comportement à rupture ;
- établir une méthodologie propre à cette pathologie en combinant des essais de laboratoire et les données disponibles sur structures.

Dans ce but, des essais d'expansion d'éléments armés et renforcés transversalement sont envisagés dans le cadre de la thèse d'Yvan Thiebaut (en partenariat avec VINCI Construction, Cofiroute et Concrete). L'objectif de cette campagne expérimentale est de compléter la connaissance des expansions sous contraintes (et en particulier pour des ordres de grandeur comparables à des conditions d'ouvrages précontraints) et en milieu confiné. Elle doit également permettre de mieux évaluer les conséquences d'expansions de ce type sur l'adhérence acier / béton, ce qui est indispensable pour effectuer un calcul de structures endommagées réaliste.

L'effet de la fissuration sur les propriétés de transfert, en particulier la perméabilité du béton, et la capacité d'une fissuration progressive à étendre le domaine de gonflement par

accélération des transferts doivent être également étudiés afin d'obtenir des évaluations à venir les plus réalistes possibles. Dans ce but, la thèse d'Hognon Sogbossi, dans le cadre de l'ANR ENDE, devrait permettre de progresser dans la compréhension de ces phénomènes à la fois pour des fissurations localisées que pour des fissurations diffuses. L'influence de la présence des armatures sur ces transferts doit également être analysée dans ce cadre. Cette thèse permettra d'améliorer l'évaluation de l'impact d'une fissuration diffuse, comparable à celle d'une réaction de gonflement interne, sur les propriétés de transfert et de confronter les développements souhaités pour le calcul d'ouvrages hydrauliques dans le cadre de la thèse de Pierre Morenon (en partenariat avec EDF-CIH) à des résultats d'expérimentations.

Des travaux concernant la validation de la méthodologie d'évaluation de structures endommagées par des réactions de gonflement interne, mêlant essais de laboratoires et modélisations, pour différents types d'ouvrages en fonction de la nature des informations connues font l'objet de collaborations internationales (Prof. Benoit Fournier – Université Laval, Dr. Léandro Sanchez – Université d'Ottawa, Prof. Victor Saouma – Université Boulder) devant se poursuivre dans les années à venir. L'évaluation du viaduc Du Vallon Charrest situé au Québec a démarré lors d'un stage de Léandro Sanchez au laboratoire. Ce calcul de structures endommagées devrait se poursuivre dans les mois à venir. Des analyses numériques de structures endommagées sont également envisagées avec l'Université de Laval afin d'évaluer et de modéliser le comportement structural d'un pavage affecté par l'alcali-réaction dans la région de Trois-Rivières et l'évaluation de l'état d'endommagement et du comportement futur du barrage Rapide-des-iles (mandat pour le compte d'Hydro-Québec). Pour cet aspect des perspectives de mon travail, j'ai demandé un congé pour recherches au CNU afin de pouvoir travailler avec les équipes de l'Université Laval et de consacrer une année au développement de ces projets et ainsi consolider cette collaboration internationale.

En prolongement

A plus long termes, plusieurs perspectives sont envisagées. Il serait d'abord important de poursuivre le développement de la modélisation relative aux mécanismes réactionnels, différentes pistes de recherche pourraient être étudiées :

- enrichir le modèle d'alcali-réaction en prenant en compte la libération d'alcalins contenus dans les granulats et ainsi analyser la capacité du modèle à reproduire les gonflements de béton contenant de tels granulats ;
- utiliser le modèle d'alcali-réaction pour quantifier la capacité des fines de granulats réactifs à fixer les alcalins dans les gels formés.

Un programme expérimental est en cours de démarrage à l'Université Laval afin de caractériser expérimentalement l'effet de la libération d'alcalins par les granulats sur les expansions mesurées. Le congé pour recherches demandé au CNU sera l'occasion d'élaborer une réflexion pour introduire ces mécanismes à la modélisation physico-chimique existante avec confrontation à des résultats expérimentaux.

Au niveau du comportement des structures endommagées, il faut aujourd'hui prévoir de poursuivre l'exploitation de ces ouvrages tant que leur portance n'est pas remise en jeu. A cette fin, deux grandes lignes directrices peuvent être tracées :

- l'utilisation de techniques d'évaluation non destructive afin d'effectuer un suivi plus régulier des structures endommagées par réaction de gonflement interne et d'avoir une vision plus précise des gradients d'expansion dans les ouvrages ;
- l'évaluation des modifications des propriétés de transfert par la fissuration liée aux expansions et l'effet sur les indicateurs de durabilité usuels afin d'évaluer l'effet du couplage de cette fissuration sur les autres pathologies du béton et donc sur le comportement général de l'ouvrage en service.

De telles perspectives, qui rejoignent des problématiques actuelles dépassant les seules réactions de gonflement interne, doivent s'envisager à travers des collaborations qui pourraient être en partie interne au laboratoire mais également faire l'objet d'une collaboration internationale. Ainsi sur les techniques d'évaluation non destructives, des discussions ont été menées avec Stéphane Laurens (INSA de Toulouse) et Prof. Josée Bastien (Université Laval) pour évaluer la capacité de plusieurs techniques non destructives utilisées au LMDC dans le cadre de l'expertise de bétons endommagés par des réactions de gonflement interne. Les mesures par résistivité électrique sont difficiles à utiliser du fait du nombre important de grandeurs ayant une influence sur ce paramètre (Rivard & Saint-Pierre, 2009). L'utilisation de mesure par émission acoustique pourrait s'avérer être une solution plus intéressante pour évaluer les différences de dégradations entre plusieurs zones d'un même ouvrage. Pour les aspects transferts, la thèse d'Hognon Sogbossi sur l'influence d'une fissuration thermo-mécanique liée à un échauffement est une première étape pour la prise en compte de l'impact d'une fissuration diffuse sur les propriétés de transfert. Par la suite, il sera important d'étudier l'impact de la fissuration d'une expansion de types alcali-réaction ou réaction sulfatique interne. Dans ce cadre, il faudrait prévoir des mesures de propriétés de transferts sur des bétons en gonflement libre avec fissuration diffuse d'orientation aléatoire mais également l'effet de fissuration orientée lors de gonflement sous contrainte. Cette caractérisation devrait être effectuée pour plusieurs niveaux de gonflements pour juger de l'effet de fissurations plus ou moins connectées et donc de l'avancement des réactions. Il pourrait également être envisagé une campagne d'essais permettant de caractériser le couplage hydro-mécanique pour mettre en évidence l'accélération des gonflements par l'accroissement des propriétés de transfert lié à une fissuration mécanique. L'étude de gonflement de bétons soumis à une pré-fissuration mécanique avant démarrage des réactions pourrait apporter des éléments intéressants à analyser.

Enfin, une réflexion est actuellement en cours pour juger de l'intérêt de généraliser l'approche multi-échelle de transport réactif en milieu hétérogène à d'autres problématiques que celle de l'alcali-réaction. En effet, d'autres phénomènes dans les matériaux de construction, mais également au-delà du génie civil, peuvent être analysés à l'aide de cette approche. Celle-ci pourrait ainsi être enrichie par la prise en compte de termes source ou puits dans le milieu

environnant les inclusions. La prise en compte de phénomènes réactifs dans le milieu extérieur serait alors possible. Ce type d'approche pourrait par exemple permettre d'évaluer les profils de réactions autour de résines échangeuses d'ions lors de leur conditionnement dans des matrices cimentaires (Neji et al., 2015) ou être appliqué à d'autres sujets connexes.

Bibliographie

- Adenot, F. 1992. Durabilité des bétons : caractérisation et modélisation des processus physiques et chimiques de dégradation du ciment, Thèse de l'Université d'Orléans.
- Alnagar, M., Cusatis, G., & Di Luzio, G. 2013. Lattice Discrete Particle Modeling (LDPM) of Alkali Silica Reaction (ASR) deterioration of concrete structures. *Cement and Concrete Composites* **41**, 45-59.
- Baghdadi, N. 2008. Modélisation du couplage chimico-mécanique d'un béton atteint d'une réaction sulfatique interne, Ph.D. thesis, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Barbarulo, R., Peycelon, H., Prené, S., & Marchand, J. 2005. Delayed ettringite formation symptoms on mortars induced by high temperature due to cement heat of hydration or late thermal cycle. *Cement and Concrete Research* **35**, 125-131.
- Bary, B. 2008. Simplified coupled chemo-mechanical modeling of cement paste behavior subjected to combined leaching and external sulfate attack. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* **32**, 1791-1816.
- Benboudjema, F. 2002. Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations biaxiales. Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaires, Thèse de doctorat, Université de Marne la Vallée.
- Bensted, J. 1999. Thaumasite — background and nature in deterioration of cements, mortars and concretes. *Cement and Concrete Composites* **21**, 117-121.
- Bérubé, M.A., Duchesne, J., Dorion, J.F., & Rivest, M. 2002a. Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity. *Cement and Concrete Research* **32**, 1215-1227.
- Bérubé, M.A., Frenette, J., Pedneault, A., & Rivest, M. 2002b. Laboratory Assessment of the Potential Rate of ASR Expansion of Field Concrete. *Cement, Concrete, and Aggregates* **24**, 28-36.
- Bérubé, M.-A., Smaoui, N., Fournier, B., & Bissonnette, B. 2005. Evaluation of the expansion attained to date by concrete affected by alkali – silica reaction . Part III : Application to existing structures Evaluation of the expansion attained to date by concrete affected by alkali – silica reaction . Part III : *Canadian Journal of Civil Engineering* **32**, 463-479.
- Bourquin, F., & Joly, M. 2001. A Magnet-Based Vibrating Wire Sensor. In Proceedings of the International Conference on Smart Technology Demonstration and Devices. Edinburgh, Scotland.
- Bouzabata, H. 2012. Contribution à l'étude de l'influence des désordres dus aux réactions de gonflement interne sur le comportement des bétons, Thèse de doctorat, Université de Constantine.

- Bouzabata, H., Multon, S., Sellier, A., & Houari, H. 2012. Effects of restraint on expansion due to delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Research* **42**, 1024-1031.
- Brooks, J.J., & A.M., N. 1977. A comparison of creep, elasticité and strength of concrete in tension and in compression. *Magazine of Concrete Research* **29**, 131-141.
- Brunetaud, X. 2005. Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton, Ph.D. thesis, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Brunetaud, X., Linder, R., Divet, L., Duragrín, D., & Damidot, D. 2007. Effect of curing conditions and concrete mix design on the expansion generated by delayed ettringite formation. *Materials and Structures* **40**, 567-578.
- Bulteel, D., Garcia-Diaz, E., Vernet, C., & Zanni, H. 2002. Alkali-silica reaction: A Method to quantify the reaction degree. *Cement and Concrete Research* **32**, 1199-1206.
- C. Zhang, A. Wang, M. Tang, N.Z. 1999. Influence of dimension of test specimen on alkali aggregate reactive expansion. *ACI Materials Journal* **96**, 204-207.
- Capra, B., & Sellier, A. 2002. Orthotropic modelling of alkali-aggregate reaction in concrete structures : numerical simulations. *Mechanics of Materials* **6**.
- Capra, B., & Sellier, A. 2003. Orthotropic modelling of alkali-aggregate reaction in concrete structures: Numerical simulations. *Mechanics of Materials* **35**, 817-830.
- Carles-Gibergues, A., Cyr, M., Moisson, M., & Ringot, E. 2007. A simple way to mitigate alkali-silica reaction. *Materials and Structures* **41**, 73-83.
- Casanova, I., Aguado, a., & Agulló, L. 1997. Aggregate expansivity due to sulfide oxidation — II. Physico-chemical modeling of sulfate attack. *Cement and Concrete Research* **27**, 1627-1632.
- Charlwood, R. 2009. AAR in Dams: Case studies, Monitoring Remediation. *In* AAR short course, Paris.
- Charpin, L., & Ehrlacher, A. 2012. A computational linear elastic fracture mechanics-based model for alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research* **42**, 613-625.
- Charpin, L., & Ehrlacher, A. 2014. Microporomechanics study of anisotropy of ASR under loading. *Cement and Concrete Research* **63**, 143-157.
- Chen, X. 2007. Influence des ions aluminates sur la composition, la structure et les propriétés cohésives des hydrosilicates de calcium, constituants principaux de la pâte de ciment portland hydratée, Thèse de doctorat, Institut Carnot de Bourgogne.
- Colleparidi, M. 2003. A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. *Cement and Concrete Composites* **25**, 401-407.

- Comby-Peyrot, I., Bernard, F., Bouchard, P.O., Bay, F., & Garcia-Diaz, E. 2009. Development and validation of a 3D computational tool to describe concrete behaviour at mesoscale. Application to the alkali-silica reaction. *Computational Materials Science* **46**, 1163-1177.
- Comi, C., Fedele, R., & Perego, U. 2009. A chemo-thermo-damage model for the analysis of concrete dams affected by alkali-silica reaction. *Mechanics of Materials* **41**, 210-230.
- Corneille, A., Douillet, G., Garbe, J.-P., Leroux, A., Monachon, P., Moranville-Regourd, M., Poitevin, P., Berra, M., Turriziani, R., Palmer, D., & Graham, J. 1991. Alkali-aggregate Reaction in Concrete Dams/Alcali-réaction dans les Barrages en Béton. *In Bulletin of ICOLD* 79.
- Coussy, O. 2004. Poromechanics. Wiley. New York.
- Coussy, O. 2005. Poromechanics of freezing materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **53**, 1689-1718.
- Coussy, O. 2006. Deformation and stress from in-pore drying-induced crystallization of salt. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **54**, 1517-1547.
- Coussy, O., & Monteiro, P.J.M. 2008. Poroelastic model for concrete exposed to freezing temperatures. *Cement and Concrete Research* **38**, 40-48.
- Damidot, D., & Glasser, F.P. 1992. Thermodynamic investigation of the CaO-Al₂O₃-CaSO₄-H₂O system at 50°C and 85°C. *Cement and Concrete Research* **22**, 1179-1191.
- Damidot, D., & Glasser, F.P. 1993. Thermodynamic investigation of the CaO-Ai₂O₃-CaSO₄.H₂O system at 25°C and the influence of Na₂O. *Cement and Concrete Research* **23**, 221-238.
- Dent Glasser, L.S., & Kataoka, N. 1981. The chemistry of alkali-aggregate reaction. p. S252/23. *In* 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Cape Town, South Africa,.
- Diamond, S. 1983. Alkali reactions in concrete – pore solution effects. p. 155-166. *In* 6th International Conference on AAR in Concrete, Copenhagen, Denmark.
- Dilnesa, B.Z., Lothenbach, B., Renaudin, G., Wichser, A., & Kulik, D. 2014. Synthesis and characterization of hydrogarnet Ca₃(Al_xFe_{1-x})₂(SiO₄)_y(OH)₄(3-y). *Cement and Concrete Research* **59**, 96-111.
- Divet, L. 2001. Les réactions sulfatiques internes au béton: contribution à l'étude des mécanismes de la formation différée de l'ettringite, Thèse de doctorat, Conservatoire National des Arts et Métiers.
- Divet, L., & Randriambololona, R. 1998. Delayed Ettringite Formation: The Effect of Temperature and Basicity on the Interaction of Sulphate and C-S-H Phase. *Cement and Concrete Research* **28**, 357-363.

- Dormieux, L., Kondo, D., & Ulm, F. 2006. *Microporomechanics*. Wiley.
- Dron, R., & Brivot, F. 1993. Thermodynamic and Kinetic Approach to the Alkali-Silica-Reaction. Part 2: Experiment. *Cement and Concrete Research* **23**, 93-103.
- Duchesne, J., & Bérubé, M.-A. 1994. Discussion of the Paper « The effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to ASR – Part 1, Concrete expansion and portlandite depletion ». *Cement and Concrete Research* **24**, 1572-1573.
- Dunant, C. 2009. Experimental and Modelling Study of the Alkali-Silica-Reaction in Concrete, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Dunant, C.F., & Scrivener, K.L. 2010. Micro-mechanical modelling of alkali-silica-reaction-induced degradation using the AMIE framework. *Cement and Concrete Research* **40**, 517-525.
- Dunant, C.F., & Scrivener, K.L. 2012. Effects of uniaxial stress on alkali-silica reaction induced expansion of concrete. *Cement and Concrete Research* **42**, 567-576.
- Escadeillas, G., & Hornain, H. 2008. La durabilité des bétons vis-à-vis des environnements chimiquement agressifs. p. 613-705. In 'la durabilité des bétons' sous la direction de J-P. Olivier et A. Vicat. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Fagerlund, G. 1971. Degré critique de saturation un outil pour l'estimation de la résistance au gel des matériaux de construction. *Matériaux et Constructions* **4**, 271-285.
- Famy, C., Scrivener, K.L., Atkinson, a., & Brough, a. R. 2001. Influence of the storage conditions on the dimensional changes of heat-cured mortars. *Cement and Concrete Research* **31**, 795-803.
- Fasseu, P. 1997. Alkali-Réaction du béton : Essai d'expansion résiduelle sur béton durci, Projet de méthode d'essai LPC n°44, (IFSTTAR, Éd.).
- Fu, Y., Ding, J., & Beaudoin, J.J. 1997. Expansion of Portland cement mortar due to internal sulfate attack. *Cement and Concrete Research* **27**, 1299-1306.
- Furusawa, Y., Ohga, H., & Uomoto, T. 1994. An analytical study concerning prediction of concrete expansion due to alkali-silica reaction. p. 757-780, SP 145-40. In in: Malhotra (Ed.), 3rd Int. Conf. on Durability of Concrete, Nice, France.
- Gallucci, E., Zhang, X., & Scrivener, K.L. 2013. Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H). *Cement and Concrete Research* **53**, 185-195.
- Gao, X.X. 2010. Contribution to the requalification of Alkali Silica Reaction (ASR) damaged structures: Assessment of the ASR advancement in aggregates, PhD thesis, Université de Toulouse, France.

- Gao, X.X., Cyr, M., Multon, S., & Sellier, A. 2013a. A comparison of methods for chemical assessment of reactive silica in concrete aggregates by selective dissolution. *Cement and Concrete Composites* **37**, 82-94.
- Gao, X.X., Cyr, M., Multon, S., & Sellier, A. 2013b. A three-step method for the recovery of aggregates from concrete. *Construction and Building Materials* **45**, 262-269.
- Gao, X.X., Multon, S., Cyr, M., & Sellier, A. 2011. Optimising an expansion test for the assessment of alkali-silica reaction in concrete structures. *Materials and Structures* **44**, 1641-1653.
- Gao, X.X., Multon, S., Cyr, M., & Sellier, A. 2013c. Alkali-silica reaction (ASR) expansion: Pessimism effect versus scale effect. *Cement and Concrete Research* **44**, 25-33.
- Garcia-Diaz, E., Bulteel, D., Monnin, Y., Degrugilliers, P., & Fasseu, P. 2010. ASR pessimism behaviour of siliceous limestone aggregates. *Cement and Concrete Research* **40**, 546-549.
- Garcia-Diaz, E., Riche, J., Bulteel, D., & Vernet, C. 2006. Mechanism of damage for the alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research* **36**, 395-400.
- Giaccio, G., Zerbino, R., Ponce, J.M., & Batic, O.R. 2008. Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research* **38**, 993-1004.
- Giorla, A.B. 2013. Modelling of Alkali-Silica Reaction under Multi-Axial Load, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Goto, S., & Roy, D.M. 1981. Diffusion of ions through hardened cement pastes. *Cement and Concrete Research* **11**, 751-757.
- Grattan-Bellew, P.E., Mitchell, L.D., Margeson, J., & Min, D. 2010. Is alkali-carbonate reaction just a variant of alkali-silica reaction ACR = ASR? *Cement and Concrete Research* **40**, 556-562.
- Grimal, E. 2007. Caractérisation des effets du gonflement provoqué par la réaction alcali-silice sur le comportement mécanique d'une structure en béton, Ph.D. thesis, Université Paul Sabatier Toulouse III.
- Grimal, E., Sellier, A., Multon, S., Le Pape, Y., & Bourdarot, E. 2010. Concrete modelling for expertise of structures affected by alkali aggregate reaction. *Cement and Concrete Research* **40**, 502-507.
- Grimal, E., Sellier, A., Pape, Y. Le, & Bourdarot, E. 2008. Creep , Shrinkage , and Anisotropic Damage in Alkali- Aggregate Reaction Swelling Mechanism — Part II : Identification of Model Parameters and Application. *ACI Materials Journal* **105**, 236-242.
- Hadley, D.W. 1961. Alkali reactivity of carbonate rocks — expansion and dedolomitization. p. 462–474, référencé par [Grattan-Bellew et al. 2010. *In Proceedings of the Annual Meeting of the Highway Research Board* 40.

- Haha, M. Ben, Gallucci, E., Guidoum, A., & Scrivener, K.L. 2007. Relation of expansion due to alkali silica reaction to the degree of reaction measured by SEM image analysis. *Cement and Concrete Research* **37**, 1206-1214.
- Hilaire, A., Benboudjema, F., Darquennes, A., Berthaud, Y., & Nahas, G. 2014. Modeling basic creep in concrete at early-age under compressive and tensile loading. *Nuclear Engineering and Design* **269**, 222-230.
- Hobbs, D.W., & Gutteridge, W.H. 1979. Particle size of aggregate and its influence upon the expansion caused by the alkali-silica reaction. *Magazine of Concrete Research* **31**, 235-242.
- Hong, S., & Glasser, F.P. 1999. Alkali binding in cement pastes. *Cement and Concrete Research* **29**, 1893-1903.
- Ichikawa, T., & Miura, M. 2007. Modified model of alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research* **37**, 1291-1297.
- Idir, R., Cyr, M., & Tagnit-Hamou, A. 2010. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. *Construction and Building Materials* **24**, 1309-1312.
- Jensen, V. 1993. Alkali Aggregate Reaction in Southern Norway, Norwegian Institute of Tehcnology, University of Trondheim, Norway.
- Jensen, V. 2012. Reclassification of Alkali-Aggregate Reaction. In 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Austin, Etats-Unis.
- Kawamura, M., & Fuwa, H. 2003. Effects of lithium salts on ASR gel composition and expansion of mortars. *Cement and Concrete Research* **33**, 913-919.
- Kchakech, B. 2015. Etude de l'influence de l'échauffement subi par un béton sur le risque d'expansions associées à la Réaction Sulfatique Interne, Ifsttar, Université Paris-Est.
- Kim, T., & Olek, J. 2014. Chemical sequence and kinetics of alkali-silica reaction part II. A thermodynamic model. *Journal of the American Ceramic Society* **97**, 2204-2212.
- Kim, T., Olek, J., & Jeong, H. 2015. Alkali-silica reaction: Kinetics of chemistry of pore solution and calcium hydroxide content in cementitious system. *Cement and Concrete Research* **71**, 36-45.
- Lagerblad, B., & Trägårdh, J. 1992. Slowly reacting aggregates in Sweden – Mechanism and conditions for reactivity in concrete. p. 570-578. In 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Concrete Society Publication CS 106, Vol 2, London, Great-Britain.
- Larive, C. 1998. Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Edt.), Ouvrage d'Art, Rapport OA 28.

- LCPC. 2003. Guide méthodologique : Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne (IFSTTAR, Éd.).
- Leger, P., Cote, P., & Tinawi, R. 1996. Finite element analysis of concrete due to alkali-aggregate reactions in dams. *Computers and Structures* **60**, 601-611.
- Li, K., & Coussy, O. 2002. Concrete ASR degradation : from material modeling to structure assessment. *Concrete Science and Engineering* **4**, 35-46.
- Lindgård, J., Sellevold, E.J., Thomas, M.D.A., Pedersen, B., Justnes, H., & Rønning, T.F. 2013. Alkali-silica reaction (ASR) - Performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on alkali leaching and prism expansion. *Cement and Concrete Research* **53**, 68-90.
- Lothenbach, B., Matschei, T., Möschner, G., & Glasser, F.P. 2008. Thermodynamic modelling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland cement. *Cement and Concrete Research* **38**, 1-18.
- Martin, R.-P. 2010. Analyse sur structures modèles des effets mécaniques de la réaction sulfatique interne du béton, Ph.D. thesis, LCPC Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Paris.
- Martin, R.P., Omikrine Metalssi, O., & Toutlemonde, F. 2013. Importance of considering the coupling between transfer properties, alkali leaching and expansion in the modelling of concrete beams affected by internal swelling reactions. *Construction and Building Materials* **49**, 23-30.
- Merz, C., & Leemann, A. 2013. Assessment of the residual expansion potential of concrete from structures damaged by AAR. *Cement and Concrete Research* **52**, 182-189.
- Monnin, Y., Dégrugilliers, P., Bulteel, D., & Garcia-Diaz, E. 2006. Petrography study of two siliceous limestones submitted to alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research* **36**, 1460-1466.
- Multon, S. 1999. Comportement mécanique des structures en béton affectées par l'alcali-réaction. Modélisation numérique et programme expérimental sur structures et éprouvettes. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, DEA de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan.
- Multon, S. 2004. Evaluation expérimentale et théorique des effets mécaniques de l'alcali-réaction sur des structures modèles, Thèse de Doctorat, Etudes et recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées, Collection Ouvrages d'Art OA 46, Paris, France.
- Multon, S., Barin, F.-X., Godart, B., & Toutlemonde, F. 2008a. Estimation of the Residual Expansion of Concrete Affected by Alkali Silica Reaction. *Journal of Materials in Civil Engineering* **20**, 54-62.
- Multon, S., Cyr, M., Sellier, A., Diederich, P., & Petit, L. 2010. Effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. *Cement and Concrete Research* **40**, 508-516.

- Multon, S., Cyr, M., Sellier, A., Leklou, N., & Petit, L. 2008b. Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. *Cement and Concrete Research* **38**, 350-359.
- Multon, S., Merliot, E., Joly, M., & Toutlemonde, F. 2004. Water distribution in beams damaged by Alkali-Silica Reaction: global weighing and local gammadensitometry. *Materials and Structures* **37**, 282-288.
- Multon, S., Ph, D., Seignol, J., Ph, D., Toutlemonde, F., & Ph, D. 2006. Chemomechanical Assessment of Beams Damaged by Alkali-Silica Reaction. , 500-509.
- Multon, S., Seignol, J.F., & Toutlemonde, F. 2005. Structural Behavior of Concrete Beams Affected by Alkali-Silica Reaction. *ACI Materials Journal* **102**, 67-76.
- Multon, S., Sellier, A., & Cyr, M. 2009. Chemo-mechanical modeling for prediction of alkali silica reaction (ASR) expansion. *Cement and Concrete Research* **39**, 490-500.
- Multon, S., Sellier, A., & Perrin, B. 2012. Numerical analysis of frost effects in porous media. Benefits and limits of the finite element poroelasticity formulation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* **36**, 438-458.
- Multon, S., & Toutlemonde, F. 2004. Water distribution in concrete beams. *Materials and Structures* **37**, 378-386.
- Multon, S., & Toutlemonde, F. 2006. Effect of applied stresses on alkali-silica reaction-induced expansions. *Cement and Concrete Research* **36**, 912-920.
- Multon, S., & Toutlemonde, F. 2010. Effect of moisture conditions and transfers on alkali silica reaction damaged structures. *Cement and Concrete Research* **40**, 924-934.
- Neji, M., Bary, B., Le Bescop, P., & Burlion, N. 2015. Swelling behavior of ion exchange resins incorporated in tri-calcium silicate cement matrix: I. Chemical analysis. *Journal of Nuclear Materials* **467**, 544-556.
- Oliveira, I., Cavalaro, S.H.P., & Aguado, A. 2013. New kinetic model to quantify the internal sulfate attack in concrete. *Cement and Concrete Research* **43**, 95-104.
- Pan, J., Feng, Y.T., Jin, F., & Zhang, C. 2013. Numerical prediction of swelling in concrete arch dams affected by alkali-aggregate reaction. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-17.
- Ponce, J.M., & Batic, O.R. 2006. Different manifestations of the alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of the reactive aggregate. *Cement and Concrete Research* **36**, 1148-1156.
- Poole, A.B. 1992. Alkali-silica reactivity mechanism of gel formation and expansion. p. 782-789. In 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, London.
- Pouhet, R., & Cyr, M. 2014. Alkali-silica reaction in metakaolin-based geopolymer mortar. *Materials and Structures* **48**, 571-583.

- Powers, T.C. 1949. The air requirement of frost-resistant concrete. Proceedings of the Highway Research Board, vol. 29, PCA Bulletin 33, Portland Cement Association, Skokie.
- Powers, T.C., & Helmuth, R.A. 1953. Theory of volume changes in hardened Portland cement paste during freezing. Proceedings of the Highway Research Board, vol. 32, PCA Bulletin 33, Portland Cement Association, Skokie.
- Poyet, S. 2003. Etude de la dégradation des ouvrages en béton atteints de la réaction alcali-silice: approche expérimentale et modélisation numérique multi-échelle des dégradations dans un environnement hydrochemo-mécanique variable, PhD thesis, Université de Marne la Va.
- Poyet, S., Sellier, A., Capra, B., Foray, G., Torrenti, J.-M., Cognon, H., & Bourdarot, E. 2007. Chemical modelling of Alkali Silica reaction: Influence of the reactive aggregate size distribution. *Materials and Structures* **40**, 229-239.
- Poyet, S., Sellier, A., Capra, B., Thèvenin-Foray, G., Torrenti, J.M., Tournier-Cognon, H., & Bourdarot, E. 2006. Influence of Water on Alkali-Silica Reaction: Experimental Study and Numerical Simulations. *Journal of Materials in Civil Engineering* **18**, 588-596.
- Ranaivomanana, N. 2013. Etudes expérimentale et numérique des interactions entre le fluage en traction et l'endommagement du béton, Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- Ranaivomanana, N., Multon, S., & Turatsinze, A. 2013a. Basic creep of concrete under compression, tension and bending. *Construction and Building Materials* **38**, 173-180.
- Ranaivomanana, N., Multon, S., & Turatsinze, A. 2013b. Tensile, compressive and flexural basic creep of concrete at different stress levels. *Cement and Concrete Research* **52**, 1-10.
- Reviron, N. 2009. Etude du fluage des béton en traction. Application aux enceintes de confinement des centrales nucléaires à eau sous pression, Thèse de doctorat, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Ecole Normale Supérieure de Cachan.
- Rivard, P., Bérubé, M.A., Ollivier, J.P., & Ballivy, G. 2003. Alkali mass balance during the accelerated concrete prism test for alkali-aggregate reactivity. *Cement and Concrete Research* **33**, 1147-1153.
- Rivard, P., Bérubé, M.A., Ollivier, J.-P., & Ballivy, G. 2007. Decrease of pore solution alkalinity in concrete tested for alkali-silica reaction. *Materials and Structures* **40**, 909-921.
- Rivard, P., & Saint-Pierre, F. 2009. Assessing alkali-silica reaction damage to concrete with non-destructive methods: From the lab to the field. *Construction and Building Materials* **23**, 902-909.
- Rossi, P., Tailhan, J., Maou, F. Le, Gaillet, L., & Martin, E. 2012. Basic creep behavior of concretes investigation of the physical mechanisms by using acoustic emission. *Cement and Concrete Research* **42**, 61-73.

- Salgues, M. 2013. Modélisations des effets structuraux des réactions sulfatiques internes et alcali-granulats : Application aux barrages en béton, PhD Thesis, Université de Toulouse.
- Salgues, M., Sellier, A., Multon, S., Bourdarot, E., & Grimal, E. 2014. DEF modelling based on thermodynamic equilibria and ionic transfers for structural analysis. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* **18**, 377-402.
- Sanchez, L. 2014. Contribution to the assesment of damage in aging concrete infrastructures affected by Alkali-Aggregate Reaction, Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada.
- Sanchez, L., Fournier, B., Jolin, M., & Bastien, J. 2014a. Evaluation of the stiffness damage test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to ASR : Test loading and output responses for concretes incorporating fine or coarse reactive aggregates. *Cement and Concrete Research* **56**, 213-229.
- Sanchez, L.F.M., Fournier, B., Jolin, M., & Duchesne, J. 2015. Reliable quantification of AAR damage through assessment of the Damage Rating Index (DRI). *Cement and Concrete Research* **67**, 74-92.
- Sanchez, L.F.M., Multon, S., Sellier, A., Cyr, M., Fournier, B., & Jolin, M. 2014b. Comparative study of a chemo-mechanical modeling for alkali silica reaction (ASR) with experimental evidences. *Construction and Building Materials* **72**, 301-315.
- Saouma, V., & Perotti, L. 2007. Constitutive Model for Alkali-Aggregate Reactions. *ACI Materials Journal* **103**, 194-202.
- Scherer, G.W. 1999. Crystallization in pores. *Cement and Concrete Research* **29**, 1347-1358.
- Sellier, A., & Bary, B. 2002. Coupled damage tensors and weakest link theory for the description of crack induced anisotropy in concrete. **69**, 1925-1939.
- Sellier, A., Bourdarot, E., Multon, S., Cyr, M., & Grimal, E. 2009. Combination of structural monitoring and laboratory tests for the assessment of AAR-swelling: application to a gate structure dam. *ACI Materials Journal* **106**, 281-290.
- Sellier, A., Bournazel, J.P., & Mébarki, A. 1995. Une modélisation de la réaction alcalis-granulat intégrant une description des phénomènes aléatoires locaux. *Materials and Structures* **28**, 373-383.
- Sellier, A., Multon, S., Buffo-Lacarrière, L., Vidal, T., Bourbon, X., & Camps, G. 2016. Concrete creep modelling for structural applications: non-linearity, multi-axiality, hydration, temperature and drying effects. *Cement and Concrete Research* **79**, 301-315.
- Suwito, A., Jin, W., Xi, Y., & Meyer, C. A Mathematical Model for the Pessimum Size Effect of ASR in Concrete. *Civil Engineering*, 1-29.
- Swenson, E.G., & Gillott, J.E. 1964. Alkali-carbonate rock reaction. Highway Res. Record. No. 45.

- Taylor, H.F.W., Famy, C., & Scrivener, K.L. 2001. Delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Research* **31**, 683-693.
- Ulm, F.-J., Coussy, O., Li, K., & Larive, C. 2000. Thermo-Chemo-Mechanics of ASR expansion in concrete structures. *ASCE Journal of Engineering Mechanics* **126**, 233-242.
- Urhan, S. 1987a. Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 2: Observations on expanded perlite aggregate concretes. *Cement and Concrete Research* **17**, 465-477.
- Urhan, S. 1987b. Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 1: Interpretation of published results and an hypothesis concerning the mechanism. *Cement and Concrete Research* **17**, 141-152.
- Zuber, B., & Marchand, J. 2000. Modeling the deterioration of hydrated cement systems exposed to frost action - Part 1: Description of the mathematical model. *Cement and Concrete Research* **30**, 1929-1939.