

Titre: Investigation expérimentale via l'essai de fendage, de l'effet de la RAS sur l'énergie de fissuration du béton d'un ouvrage hydraulique
Title: RAS sur l'énergie de fissuration du béton d'un ouvrage hydraulique

Auteur: Anthony Chéruel
Author:

Date: 2020

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Chéruel, A. (2020). Investigation expérimentale via l'essai de fendage, de l'effet de la RAS sur l'énergie de fissuration du béton d'un ouvrage hydraulique
Citation: [Master's thesis, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/5516/>

Document en libre accès dans PolyPublie Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/5516/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Mahdi Ben Ftima
Advisors:

Programme: Génies civil, géologique et des mines
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Investigation expérimentale via l'essai de fendage, de l'effet de la RAS sur
l'énergie de fissuration du béton d'un ouvrage hydraulique**

ANTHONY CHÉRUEL

Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Maîtrise ès sciences appliquées

Génie Civil

Décembre 2020

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Investigation expérimentale via l'essai de fendage, de l'effet de la RAS sur
l'énergie de fissuration du béton d'un ouvrage hydraulique**

présenté par **Anthony CHÉRUEL**

en vue de l'obtention du diplôme de Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Pierre LÉGER, Ph.D., président

Mahdi BEN FTIMA, Ph.D., membre et directeur de recherche

Matthieu ARGOUGES, M.Sc.A., membre externe

DÉDICACE

À mes parents et ma grand-mère.

REMERCIEMENTS

J'aimerais d'abord souligner que beaucoup de personnes ont directement ou indirectement contribué au bon déroulement de cette maîtrise, qu'elles le sachent ou non. J'aimerais tout particulièrement remercier mon directeur de recherche M. Mahdi Ben Ftima, qui m'a brillamment guidé au travers des chemins tortueux d'une maîtrise expérimentale. La confiance et l'autonomie qu'il m'a accordé m'ont permis de m'épanouir dans la réalisation de ce projet. Son expertise, son soutien moral et ses grandes qualités humaines sont directement responsables de la réussite de cette maîtrise.

Je remercie profondément Joffrey Lemery, qui m'a transmis ses connaissances et son enthousiasme, et qui m'a efficacement installé sur les rails du projet qu'il a initié. L'accomplissement de cette maîtrise n'aurait pas été possible sans son remarquable travail préalable.

Du laboratoire de structure de Poly, je remercie grandement Martin Leclerc, Alexis Collins, Atea Bennett, Patrice Bélanger, Simon Bourget, David Ek, et Mathieu Robidas pour leur pédagogie, leur aide précieuse et leur bienveillance. De l'IREQ et d'Hydro-Québec je remercie Maxime Leboeuf, Matthieu Argouges, Mario Veilleux et Benoit Durand. Je salue particulièrement la bonne humeur et l'aide expérimentale précieuse de Maxime.

Enfin, je voudrais remercier tous mes collègues et mes amis pour leurs judicieux conseils, leur présence, et leur soutien moral, particulièrement pendant l'éprouvante période de confinement du COVID. Tous les citer et leur rendre hommage adéquatement ajouteraient quelques pages à un mémoire déjà bien long !

RÉSUMÉ

Plus de la moitié des aménagements hydrauliques du Québec sont affectés par la Réaction Alcalis-Silice (RAS). Cette réaction se développe sur plusieurs décennies et génère une expansion volumétrique importante accompagnée d'une dégradation du béton, altérant particulièrement les fonctionnalités en service. L'évaluation et la prédition du comportement de ces ouvrages est complexe, et encore plus lorsque la RAS se développe. Les modèles numériques sophistiqués, basés sur des lois de comportement du béton, sont la meilleure alternative dans ce contexte. Ces modèles nécessitent cependant des intrants matériaux considérant l'effet de la RAS.

En ce sens, la caractérisation de l'énergie de fissuration, intrant essentiel de ces modèles prédictifs, a motivé un projet de recherche et de collaboration université/industrie entre Polytechnique Montréal et Hydro-Québec. Les travaux préalables à cette maîtrise ont permis de reconstituer deux mélanges réactifs (granulats maximums de 38 mm et 76 mm) représentatifs d'un aménagement hydraulique existant d'Hydro-Québec. La caractérisation par essai de fendage de l'énergie de fissuration a été réalisée sur 12 blocs de béton pour un état avant le développement de la RAS, considéré comme état de référence. 42 autres blocs ont été stockés en chambre climatique à l'IREQ (Institut de Recherche en Électricité du Québec) afin d'accélérer le développement de la RAS.

La suite de ces travaux, qui constitue cette maîtrise, a pour objectifs d'étudier l'effet de la RAS sur l'énergie de fissuration du béton reconstitué via l'essai destructif de fendage et de caractériser la cinétique d'expansion de la RAS. La campagne d'essais menée en ce sens a permis de caractériser par essai de fendage 18 des 42 blocs réactifs, après plus d'un an et demi d'accélération de la RAS. Les 24 blocs restants seront testés ultérieurement à d'autres avancements de la RAS. Les méthodes SBEM (*Simplified Boundary Effect Method*) et DFPZ (*Disturbed Fracture process Zone*) ont été employées pour s'affranchir de l'effet d'échelle et déterminer l'énergie de fissuration asymptotique. Le suivi de l'expansion a été réalisé pendant plus de 800 jours, à la fois sur des éprouvettes cylindriques témoins et sur des blocs de caractérisation, par deux méthodes de mesures : traditionnelle (DEMEC et micromètre) et novatrice avec la technologie de scan laser 3D initialement développée dans le secteur d'industrie automobile.

Les résultats des mesures d'expansion révèlent que les éprouvettes cylindriques ont gonflé différemment des gros blocs de béton. Cet écart est attribué aux conditions hydriques différentes et aux effets d'échelles (lessivage des alcalis, degré de saturation en eau ...). La technologie de

mesure non invasive par scan laser 3D a permis de quantifier l'expansion RAS des éprouvettes cylindriques et de visualiser commodément cette expansion grâce à des colorimétries. Le gonflement local d'un gros granulat d'une éprouvette a notamment été détecté par la technologie de scan 3D, ce que les mesures traditionnelles n'ont pas permis de faire.

L'effet d'échelle sur l'énergie de fissuration a été filtré via la méthode DFPZ uniquement. L'hétérogénéité du développement de la RAS entre les spécimens n'a pas permis d'appliquer la SBEM. Les résultats des essais de fendage indiquent que l'énergie de fissuration asymptotique ne varie pas ou augmente lorsque la RAS se développe. Le phénomène de multifissuration est à l'origine de cette tendance. Les essais de fendage sur des blocs coulés dans deux sens différents suggèrent que l'orientation perpendiculaire au sens de coulée des granulats aplatis dirige l'endommagement interne de la RAS. Cette orientation de l'endommagement RAS génère une anisotropie de l'énergie de fissuration asymptotique.

ABSTRACT

More than half of the hydropower-generating facilities in Quebec are affected by the Alkali-Silica Reaction (ASR). This reaction develops over several decades and generates volumetric swelling in the mass concrete, causing extensive cracking and affecting service life. The assessment and behaviour prediction of these structures is complicated, especially when ASR occurs. Sophisticated numerical models, based on concrete constitutive laws, are the most suitable alternative in this context. However, these models require material inputs considering the effect of ASR.

The assessment of the size-independent fracture energy (which is an essential input to these predictive models) of an existing hydraulic facility motivated a collaborative university-industry research project between Polytechnique Montréal and Hydro-Québec. Previous works allowed the reconstitution of two reactive concrete mixtures (38 mm and 76 mm of maximum aggregate sizes). Testing of 12 concrete blocks by the mean of the Wedge-Splitting Test (WST) allowed the characterization of fracture energy for a reference configuration without ASR. 42 other blocks were stored in a climatic room at IREQ (Institut de Recherche en Électricité du Québec) to accelerate ASR development.

As continuation to this previous work, this master's degree aims to study the effect of ASR on the fracture energy of the reconstituted concrete mixtures and to characterize the expansion kinetics of ASR. WST tests were then carried out on 18 of the 42 reactive blocks, after more than a year and a half of ASR acceleration. The remaining 24 blocks will be tested later at other ASR advancements. The SBEM (Simplified Boundary Effect Method) and DFPZ method (Disturbed Fracture Process Zone) were used to filter the size effect and assess the asymptotic fracture energy. ASR expansion was monitored for more than 800 days, both on companion cylindrical specimens and large concrete blocks, using two measurement methods: traditional method using DEMEC and micrometer; and an innovative method using the 3D laser scanning technology initially developed in the automotive industry.

Expansion monitoring revealed that the cylindrical specimens swelled differently from the large concrete blocks. This difference is attributed to different hydric conditions and multiple scale effects (alkali leaching, degree of water saturation ...). The non-invasive 3D laser scan measurement technology allowed to quantify ASR swelling of cylindrical specimens and to

conveniently visualize this swelling through colormaps. The local swelling due to expansion of coarse aggregates was observed, which could not be detected by traditional measurement method.

Size effect on fracture energy was filtered only using the DFPZ method. The SBEM was not applicable because of the ASR heterogeneity among blocks. WST tests suggest that the asymptotic fracture energy increases or does not differ between sound specimen and ASR-affected specimen. This trend is caused by extensive crack branching. WST tests on blocks cast in two different directions show that the orientation perpendicular to the casting direction of the flattened aggregate directed ASR internal damage. This orientation of ASR-induced damage results in the anisotropy of the asymptotic fracture energy.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XV
LISTE DES FIGURES	XVII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XXIV
LISTE DES ANNEXES.....	XXVII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte général.....	1
1.2 Problématique.....	3
1.3 Objectifs du projet de recherche.....	5
1.4 Méthodologie du projet de maîtrise	6
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	9
2.1 Énergie de fissuration et effet d'échelle associé	9
2.1.1 Définition selon le modèle de fissuration fictive	9
2.1.2 Caractérisation expérimentale de <i>GF</i>	10
2.1.3 Effet d'échelle sur l'énergie de fissuration	12
2.2 Mécanismes de la Réaction Alcalis-Silice (RAS).....	15
2.2.1 Mécanisme réactionnel.....	16
2.2.1 Mécanismes d'endommagement.....	17
2.3 Caractéristiques de l'expansion libre de la RAS	19

2.3.1	Expansion macroscopique	19
2.3.2	Anisotropie de l'expansion libre	20
2.3.3	Effet de la température	23
2.3.4	Effet de l'eau	24
2.3.5	Effets de la quantité d'alcalis	27
2.3.6	Effets d'échelles sur l'expansion de RAS	29
2.3.7	Effet de la géométrie du spécimen	32
2.3.8	Effet de la taille du granulat	32
2.4	Essais d'expansions accélérés	35
2.4.1	Essai accéléré en bain d'alcalis (ASTM C1260).....	35
2.4.2	Essai accéléré avec surdosage en alcalis (ASTM C1293).....	36
2.4.3	Vers de nouveaux essais accélérés	36
2.5	Effet de la RAS sur les propriétés mécaniques	37
2.5.1	Effet sur la résistance en compression	37
2.5.2	Effet sur le module d'élasticité.....	39
2.5.3	Effet sur la résistance en traction	40
2.5.4	Effet de la cinétique de la réaction	43
2.5.5	Classification de l'endommagement	44
2.5.6	Effet sur l'énergie de fissuration	45
2.6	Conclusion de la revue de littérature	50
CHAPITRE 3	PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	52
3.1	Distinction des travaux réalisés	52
3.2	Spécimens, mélanges et coulées.....	53
3.2.1	Dimensions des spécimens.....	53

3.2.2	Nombre de spécimens et sens de coulée	55
3.2.3	Type de granulat.....	57
3.2.4	Mélanges	57
3.2.5	Conditions de cure.....	59
3.2.6	Préparation des carottes de caractérisation.....	60
3.2.7	Entreposage temporaire des spécimens	61
3.3	Méthodes de suivi de l'expansion	62
3.3.1	Outils de mesures mécaniques	62
3.3.2	Scanner 3D	66
3.3.3	Résumé des spécimens suivis en expansion.....	70
3.4	Confinement des spécimens pour accélérer la RAS.....	71
3.4.1	Historique du confinement	71
3.4.2	Disposition des spécimens par palette.....	72
3.4.3	Description des chambres climatiques	72
3.4.4	Description des conditions hydriques des spécimens	77
3.4.5	Protocole de déconfinement avant chaque mesure d'expansion	80
3.5	Essai de fendage	80
3.5.1	Instrumentation des essais	80
3.5.2	Protocole des essais	83
3.5.3	Réalisation des essais	87
CHAPITRE 4	MESURES D'EXPANSIONS	88
4.1	Inspection visuelle	88
4.1.1	Inspection visuelle des carottes	88
4.1.2	Inspection visuelle des blocs	89

4.1.3	Effet de la superposition des palettes de spécimens.....	89
4.1.4	Choix des blocs pour la campagne d'essai.....	90
4.2	Mesure avec l'instrumentation mécanique traditionnelle	94
4.2.1	Expansion des carottes	94
4.2.2	Expansion des blocs	95
4.2.3	Anisotropie de l'expansion.....	101
4.2.4	Température surfacique des spécimens aux instants de mesures	101
4.2.5	Comparaison des expansions volumétriques.....	103
4.2.6	Synthèse des différences entre les types de spécimens	111
4.2.7	Problèmes et limitations de la technique de mesure traditionnelle	113
4.3	Mesure avec le scanner 3D.....	115
4.3.1	Protocole de mesure des carottes	115
4.3.2	Protocole de mesure des blocs	118
4.3.3	Performance volumétrique des scans	120
4.3.4	Comparaison des expansions avec les mesures traditionnelles.....	123
4.3.5	Superposition des scans.....	130
4.3.6	Variation de l'expansion transversale selon la hauteur des carottes	135
4.3.7	Problématiques de la technologie de scan.....	140
4.4	Conclusions sur les mesures d'expansions.....	142
4.4.1	Mesures d'expansion traditionnelles	142
4.4.2	Mesures d'expansion avec la technologie de scan 3D	143
CHAPITRE 5	CAMPAGNES D'ESSAIS DESTRUCTIFS	144
5.1	Essais de caractérisation.....	144
5.1.1	Effet de la RAS sur la résistance en compression	145

5.1.2	Effet de la RAS sur le module d'élasticité	145
5.2	Essais de fendage	146
5.2.1	Méthode d'analyse	146
5.2.2	Exploitabilité d'un essai de fendage.....	149
5.2.3	Courbes « Effort de fendage – ROD »	150
5.2.4	Analyse des résultats	154
5.3	Profil de fissuration	157
5.3.1	Phénomène de multifissuration	157
5.3.2	Visualisation via le DIC de la propagation de la fissure	157
5.4	Effet du sens de coulée	160
5.4.1	Effet sur les propriétés mécaniques.....	160
5.4.2	Orientation de l'endommagement RAS	161
5.4.3	Deux degrés de développement de la RAS	162
5.5	Effet d'échelle sur <i>GF</i>	165
5.5.1	Constatation de l'effet d'échelle	165
5.5.2	Détermination de <i>GF</i> ∞ avec la méthode SBEM.....	167
5.5.3	Détermination de <i>GF</i> ∞ avec la méthode DFPZ.....	169
CHAPITRE 6	CONCLUSIONS	174
6.1	Rappel des objectifs	174
6.2	Conclusions	174
6.2.1	Mesures d'expansions	175
6.2.2	Pertinence de la technologie de mesure par scan laser 3D.....	176
6.2.3	Effet de la RAS sur les propriétés mécaniques	177
6.3	Recommandations	180

RÉFÉRENCES	182
ANNEXES	189

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Paramètres des normes ASTM C1260 et ASTM C1293.....	35
Tableau 2.2 : Classification de l'endommagement causée par la RAS (adapté de Sanchez et al. (2017)).....	45
Tableau 2.3 : Résumé des études de l'effet de la RAS sur l'énergie de fissuration.....	49
Tableau 3.1 : Spécimens analysés dans ce rapport de maîtrise	55
Tableau 3.2 : Mélanges B38 et B76 et comparaison avec le mélange requis par la norme ASTM C1293	58
Tableau 3.3 : Calcul détaillé du surdosage en alcalis du mélange B38	59
Tableau 3.4 : Incertitude de mesure des outils mécaniques (DEMEC et micromètre demi-lune) (tiré de l'annexe C).....	66
Tableau 3.5 : Caractéristiques du scanner <i>HandyScan 300</i> (CREAFORM, 2018).....	67
Tableau 3.6 : Incertitudes de mesure du scanner 3D (tiré de l'annexe D).....	70
Tableau 3.7 : Spécimens suivis en expansion avec les outils mécaniques et/ou le scanner 3D.....	71
Tableau 3.8 : Détails des périodes de confinement	75
Tableau 4.1 : Calcul des performances volumétriques pour chaque type de spécimen	123
Tableau 4.2 : Graphes de distribution des écarts entre les scans superposés de la carotte B76-CAR- 3 à toutes les dates de mesures	134
Tableau 5.1 : Résultats des essais de caractérisation (données à 0Y tiré de Lemery (2018)).....	145
Tableau 5.2 : Valeurs d'intérêts des essais B38 et B38c	152
Tableau 5.3 : Valeurs d'intérêts des essais B76.....	154
Tableau 5.4 : Valeurs d'intérêts moyennes par classe d'essai.....	155
Tableau 5.5 : Énergie de fissuration moyenne par classe d'essai	156
Tableau 5.6 : Valeurs d'intérêts des essais B38 de la campagne 2Y, distinguées selon le sens de coulée	161

Tableau 5.7 : Application de la méthode SBEM.....	168
Tableau 5.8 : Application de la méthode DFPZ.....	172
Tableau 5.9 : Comparaison de GF^∞ obtenu via les méthodes SBEM et DFPZ	173

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Contexte général du projet ((a) tiré de Bérubé et al. (2000); (b) tiré de Hydro-Québec (2018); (c) tiré de Bernard (2020)).....	2
Figure 1.2 : Problématique de caractérisation de l'énergie de fissuration <i>GF</i>	5
Figure 1.3 : Organigramme organisationnel du mémoire	8
Figure 2.1 : (a) Propagation de la fissuration; (b) Définition de la FPZ; (c) Modèle de fissuration fictive de Hillerborg ((a), (b) et (c) adapté de Hu et Duan (2004)); (d) Définition de l'énergie de fissuration <i>GF</i> (Lemery, 2018)	10
Figure 2.2 : Essais de caractérisation de l'énergie de fissuration ((a) modifié de Lemery et al. (2020); (b) modifié de Abdalla et Karihaloo (2003))	11
Figure 2.3 : Comportement quasi fragile en traction du béton et détermination de l'énergie de fissuration <i>GF</i> selon la méthode du travail de fissuration (modifié de Khalilpour et al. (2019))	12
Figure 2.4 : Théorie de l'effet de bord et approximation bilinéaire de <i>GF</i> (résumé par Lemery et al. (2020))	13
Figure 2.5 : Interprétation mécanique de l'effet de bord avec la théorie DFPZ (<i>Disturbed Fracture Process Zone</i>) (modifié de Lemery et al. (2020))	14
Figure 2.6 : Exemples d'ouvrages affectés par la RAS : (a) Aménagement hydraulique à l'étude dans ce projet (b) Pile de pont à Québec (Sanchez et al., 2020)	15
Figure 2.7 : Schéma simplifié du mécanisme réactionnel de la RAS (Figueira et al., 2019)	16
Figure 2.8 : (a) Fissuration du granulat réactif avec présence de gel produit de la RAS (b) Pression générée par le gel (Durand et Veilleux, 2003)	18
Figure 2.9 : Expansion libre de la RAS (a) générant de la fissuration (b) dans différentes zones du béton (adapté de Courtier (1990))	19
Figure 2.10 : Évolution de l'expansion macroscopique en fonction du temps et observations pétrographiques associées (adapté de Saouma et al. (2015))	20

Figure 2.11 : Effet de l'élancement du granulat sur l'orientation de la fissuration RAS : (a) avant formation du gel; (b) après formation du gel	22
Figure 2.12 : Expansion de spécimens confinés à 23°C et 38°C (Larive, 1997)	24
Figure 2.13 : Expansion longitudinale en fonction du temps pour des confinements à différentes humidités relatives (Poyet et al., 2006)	25
Figure 2.14 : Expansion finale d'un essai accéléré ASTM C1293 pour différents granulats réactifs et différents dosages de ciment (Bérubé et al., 2000)	28
Figure 2.15 : (a) Lessivage d'alcalis total et (b) Expansion pour différentes sections de prisme et de confinement selon l'étude de Lindgård et al. (2013); Saouma (2014) (points expérimentaux) et modélisation numérique de Multon et Sellier (2016) (traits continus)	30
Figure 2.16 : Comparaison des effets d'échelle pour une expansion causée par la RAS et pour une expansion thermique (Takahashi et al., 2016).....	31
Figure 2.17 : (a) Expansion finale de spécimen pour différentes granulométries de granulats réactifs et différentes dimensions de spécimen. (b) Explication de l'effet d'échelle observé (Gao et al., 2013).	34
Figure 2.18 : Évolution relative de la résistance en compression en fonction de l'expansion axiale (Esposito et al., 2016).....	38
Figure 2.19 : Évolution relative du module d'élasticité statique et dynamique en fonction de l'expansion axiale (Esposito et al., 2016)	39
Figure 2.20 : (a) Essai de traction directe (b) Essai de traction indirecte (Essai brésilien) (Siemes et al., 2002) (c) Essai de flexion.....	41
Figure 2.21 : Évolution relative de la résistance en traction indirecte ($f_{t,sp}$), directe ($f_{t,dir}$) et du module de rupture (MOR) en fonction de l'expansion axiale (Esposito et al., 2016)	42
Figure 2.22 : Effet du degré de réactivité de la RAS sur l'évolution de la résistance en compression, du module d'élasticité ((a), (b) et (c)) et de la résistance en traction indirecte (d) tiré de 17 études de la littérature (Abd-Elssamad et al., 2020)	44
Figure 2.23 : Courbes Effort-CMOD pour un spécimen sain et un spécimen affecté par la RAS (Rotter et al., 1998)	46

Figure 2.24 : Énergie de fissuration à 1 an, 1,5 an et 2 ans pour différentes orientations d'endommagement (adapté de Hayes et al. (2020)).....	48
Figure 3.1 : Organigramme sommaire du projet et distinction des travaux réalisés.....	53
Figure 3.2 : Deux diamètres de granulat utilisés lors de ce projet et leur localisation dans un barrage type (Bernard, 2020)	54
Figure 3.3 : Dimensions en mm des spécimens B38 (a) et B76 (b).....	54
Figure 3.4 : Nomenclature complète des spécimens	56
Figure 3.5 : Sens de coulée des spécimens (Lemery, 2018)	56
Figure 3.6 : (a) Carottage d'une dalle (b) Perçage des carottes via un gabarit spécifique (c) Collage des plots de suivi d'expansion (d) Plot de suivi d'expansion avec <i>wood insert</i> (Lemery, 2018)	61
Figure 3.7 : Outils de mesures mécaniques de l'expansion	63
Figure 3.8 : Dispositions des plots et mesures effectuées au DEMEC et micromètre demi-lune sur les trois types de spécimens	64
Figure 3.9 : Notation des expansions mesurées	65
Figure 3.10 : (a) Éléments constituants le scanner (b) Étalonnage (c) Acquisition de la surface de l'objet avec les cibles de positionnement (d) Projection des croix lasers sur la surface (adapté de CREAFORM (2018))	68
Figure 3.11 : Disposition des cibles sur deux types de spécimens.....	69
Figure 3.12 : Historique des événements durant le confinement des spécimens	72
Figure 3.13 : Disposition des spécimens confinés par palette numérotée et indication des spécimens rapatriés pour la campagne d'essai de cette étude	74
Figure 3.14 : Chambres climatiques utilisées durant ce projet	76
Figure 3.15 : Schémas des conditions hydriques des carottes durant les trois phases de confinement	78
Figure 3.16 : Schéma des trois types de confinement hydrique des blocs B76	79

Figure 3.17 : Disposition des capteurs LVDT sur un bloc B76	81
Figure 3.18 : Utilisation de la technologie de corrélation d'images	83
Figure 3.19 : Protocole de l'essai de fendage pour un bloc B38 (modifié de Lemery (2018))	85
Figure 3.20 : Protocole de l'essai de fendage pour un bloc B76 (modifié de Lemery (2018))	86
Figure 3.21 : Ordre et opérateurs des essais	87
Figure 4.1 : Fissuration sans exsudation de gel sur trois des quatre carottes B76 suivies en expansion.....	91
Figure 4.2 : Disposition des blocs par palette et résultat de l'inspection visuelle	92
Figure 4.3 : Fissuration avec et sans exsudation de gel sur les blocs B38c ((a) et (b)) et sur les blocs B76 ((c) et (d)).....	93
Figure 4.4 : Variations de masse (a), expansions longitudinales (b) et transversales (c) des carottes B76	97
Figure 4.5 : Variations de masse (a), expansions longitudinales (b) et transversales (c) des carottes B38	98
Figure 4.6 : Expansions selon l'axe X (a), l'axe Y (b) et l'axe Z (c) des blocs B76	99
Figure 4.7 : Expansions selon l'axe X (a), variations de masse (b), expansions selon les axes Y (c) et Z (d) des blocs B38	100
Figure 4.8 : Température surfacique moyenne de chaque type de spécimen aux instants de mesures	103
Figure 4.9 : Variations de masse (a) et expansions volumétriques moyennes (b) des deux types de carottes	105
Figure 4.10 : Expansions volumétriques moyennes des blocs B38 et B76 en considérant le bloc B76-15 (a), et sans le considérer (b)	109
Figure 4.11 : Expansions volumétriques moyennes des quatre types de spécimens.....	111
Figure 4.12 : Résumé des différences entre les types de spécimens à date du rapatriement pour essais ($t = 609$ jours)	112

Figure 4.13 : Limitations des mesures transversales (a) et longitudinales (b)	114
Figure 4.14 : Utilisation des logiciels de la suite Vxelements pour les mesures d'expansions ...	115
Figure 4.15 : Protocole de mesure d'une carotte scannée : (a) Mesure longitudinale (b) Mesure transversale (c) Propriétés du scan (dont le volume) de la carotte B76-CAR-3	117
Figure 4.16 : Application de l'outil de remaillage étanche du scan d'une carotte	118
Figure 4.17 : Exemple de mesures dimensionnelles pour (a) le bloc B38-16 et (b) le bloc B76-13 scannés avant la mise en confinement.....	119
Figure 4.18 : Effet de la trajectoire de scan sur la détermination de la longueur caractéristique maximale (adapté de CREAFORM (2018)).....	121
Figure 4.19 : Détermination de la longueur caractéristique maximale des géométries cylindriques (a) et prismatiques (b)	122
Figure 4.20 : Comparaison des expansions longitudinales (a), transversales (b) et volumétriques (c) mesurées avec le scanner et le DEMEC, pour la carotte B76-CAR-3	126
Figure 4.21 : Comparaison des expansions longitudinales (a), transversales (b) et volumétriques (c) mesurées avec le scanner et le DEMEC, pour la carotte B38-CAR-2	127
Figure 4.22 : Comparaison des expansions selon les axes X (a), et Z (b) mesurées avec le scanner et le DEMEC, pour le bloc B76-13	128
Figure 4.23 : Comparaison des expansions selon les axes X (a), Y (b) et Z (c) mesurées avec le scanner et le DEMEC, pour le bloc B38-16.....	129
Figure 4.24 : Protocole de superposition des scans.....	130
Figure 4.25 : Description d'un graphe de distribution des écarts de superposition entre deux scans d'une carotte.....	131
Figure 4.26 : Exemple de distribution normale avec le pourcentage compris dans chaque borne d'écart-type standard (Kernler, 2014)	132
Figure 4.27 : Superposition des scans de la carotte B76-CAR-3 à différents âges avec le scan de référence	133
Figure 4.28 : Protocole de mesure de l'expansion transversale selon la hauteur d'une carotte ...	135

Figure 4.29 : (a) Colorimétrie de la superposition de la carotte B76-CAR-3 (b) Vue de la section d'intérêt avec les informations de déviations des superpositions sur le périmètre de la section (c) Inspection visuelle de la zone correspondant au gonflement local.....	137
Figure 4.30 : Expansion transversale de la carotte B76-CAR-3 en fonction de la hauteur après 591 jours.....	139
Figure 4.31 : Évolution de l'expansion transversale selon la hauteur de la carotte B76-CAR-3 et selon le temps	140
Figure 4.32 : Superposition des scans de la carotte B38-CAR-2 à différents âges avec le scan de référence et illustration des erreurs liées à l'utilisation du scan.....	142
Figure 5.1 : Essai de fendage et instrumentation (traduit de Lemery et al. (2020)).....	147
Figure 5.2 : Protocole de traitement des données d'un essai de fendage.....	148
Figure 5.3 : Exemple du traitement des données de l'essai B76-2Y-WS05-3 avec Matlab	149
Figure 5.4 : Exemple d'essai exploitable et inexploitable en fonction du profil de fissuration ...	150
Figure 5.5 : Courbes "Effort de fendage - ROD" des essais B38 et B38c	151
Figure 5.6 : Courbes "Effort de fendage - ROD" des essais B76.....	153
Figure 5.7 : Exemples de multifissuration de quelques essais	158
Figure 5.8 : Champ de déformation à différents temps de l'essai B76-2Y-WS05-3	159
Figure 5.9 : Effet du sens de coulée sur les courbes « Effort de fendage – ROD » des essais B38-2Y et B38c-2Y	160
Figure 5.10 : Effet du sens de coulée sur l'orientation de l'endommagement RAS ((a) et (c)) et la propagation de la macrofissure de fendage ((b) et (d))	162
Figure 5.11 : Surfaces de fissuration des essais B38c ((a), (b) et (c)) et des essais B38 ((d), (e) et (f)).....	164
Figure 5.12 : Présence de gel caractéristique de la RAS sur deux spécimens B38c	165
Figure 5.13 : Effets d'échelles pour les mélanges à granulats 38 mm.....	166
Figure 5.14 : Effets d'échelles pour les mélanges à granulats 76 mm.....	167

Figure 5.15 : Procédure d'application de la méthode SBEM	167
Figure 5.16 : Hypothèses sur α_1 lors de l'application de la SBEM pour le ratio $a/D = 0,5$ et un spécimen B38	169
Figure 5.17 : Protocole de traitement des extensomètres virtuels DIC pour déterminer $LFPZ$...	170
Figure 5.18 : Exemple de traitement des données extensométriques DIC sur l'essai B76-0Y-WS01-3	171
Figure 6.1 : Visualisation du gonflement RAS local sur une carotte B76, avec la technologie de scan laser 3D	177
Figure 6.2 : Effet de la RAS sur l'énergie de fissuration.....	179

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Abréviations :

ANLEF	Analyse Non Linéaire par Éléments Finis
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> – Association de normes techniques
COD	<i>Crack Opening Displacement</i> – Ouverture de fissure
CMOD	<i>Crack Mouth Opening Displacement</i> – Ouverture de fissure en haut de l'entaille
CTOD	<i>Crack Tip Opening Displacement</i> – Ouverture de fissure au bas de l'entaille
DEMEC	<i>DEmountable MEchanical gauge</i> – Instrument de mesure mécanique uni-axial
DFPZ	<i>Disturbed Fracture Process Zone</i> – Théorie de la FPZ perturbée
DIC	<i>Digital Image Correlation</i> – Système de corrélation d'image
DRI	<i>Damage Rating Index</i> – Indice d'endommagement
FPZ	<i>Fracture Process Zone</i> – Zone de propagation de la fissuration
HQ	Hydro-Québec
IREQ	Institut de Recherche en Électricité du Québec
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MOR	<i>Modulus Of Rupture</i> – Module de rupture
NaOH	Hydroxyde de sodium / Soude / « Alcalis »
Na_2O_{eq}	Teneur en alcalis équivalente
RAG	Réaction Alcalis-Granulat
RAS	Réaction Alcalis-Silice

ROD	<i>Roller Opening Displacement</i> – Ouverture au niveau de l'axe des roulements
SBEM	<i>Simplified Boundary Effect Method</i> – Méthode simplifiée de l'effet de bord
TPBT	<i>Three Point Bending Test</i> – Essai de flexion trois points
WST	<i>Wedge Splitting Test</i> – Essai de fendage

Variables :

a	Profondeur de l'entaille d'amorce de fissure
a_1	Longueur d'influence de la théorie de l'effet de bord
B	Épaisseur du spécimen
D	Dimension nominale du spécimen
e_{moy}	Écart moyen (scanner 3D)
E	Module élastique / Module d'élasticité / Module d'Young
E_{app}	Module élastique apparent
$f'c$	Résistance en compression
$f'_{t\ dir}$	Résistance en traction directe
$f'_{t\ sp}$	Résistance en traction indirecte
G_F	Énergie de fissuration
$G_{F\infty}$	Énergie de fissuration indépendante des effets d'échelles
L_{max}	Longueur caractéristique (scanner 3D)
P_s	Effort de fendage (horizontal)

P_v	Effort vertical du vérin
t	Temps
u_v	Performance volumétrique d'un scan 3D
w	Ouverture de fissure
w_c	Ouverture de fissure critique
W_F	Travail de fissuration (<i>Work of fracture</i>)

Variables grecques :

ϵ_{long}	Expansion longitudinale d'une carotte
ϵ_{transv}	Expansion transversale d'une carotte
ϵ_v	Expansion volumétrique
ϵ_∞	Expansion asymptotique
ϵ_x	Expansion selon l'axe X d'un bloc
ϵ_y	Expansion selon l'axe Y d'un bloc
ϵ_z	Expansion selon l'axe Z d'un bloc
ϕ_{max}	Diamètre de granulat maximum
σ	Écart-type
τ_c	Temps caractéristique du modèle de Larive
τ_l	Temps de latence du modèle de Larive

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Propriétés du gel produit de la RAS	189
Annexe B : Suivi des essais de fendage	193
Annexe C : Incertitudes de mesures (DEMEC et micromètre demi-lune).....	195
Annexe D : Incertitudes de mesures (Scanner)	205
Annexe E : Reconstruction des scans incomplets des carottes	213
Annexe F : Observation de l'effet du sciage de blocs B38 avec le scanner 3D	219
Annexe G : Superposition des scans des blocs	222

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte général

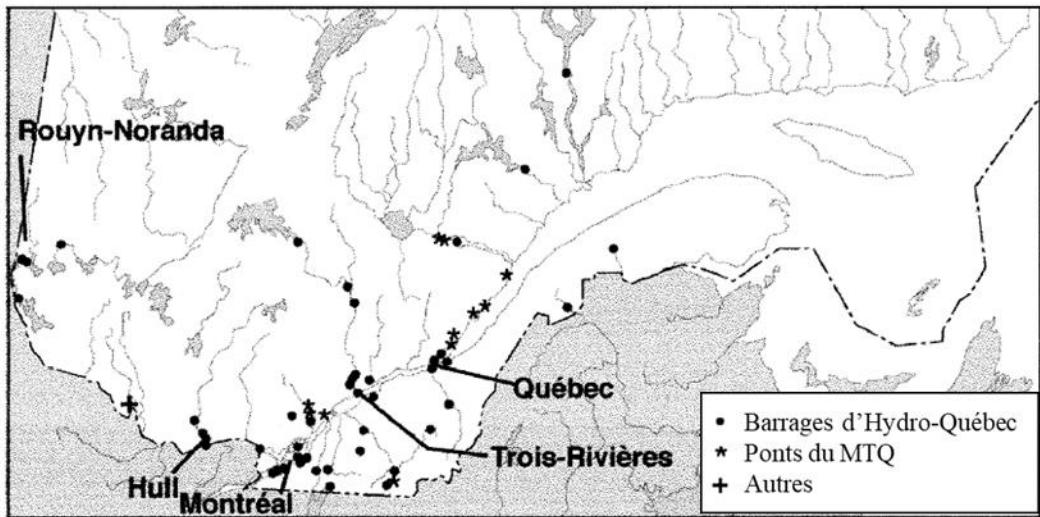
Les aménagements hydrauliques sont essentiels au Québec puisqu'ils génèrent plus de 95% de l'électricité nécessaire à la province. Le parc d'ouvrages hydrauliques du Québec de plus d'une soixantaine de ces infrastructures est conséquent, et place le Canada parmi les acteurs majeurs dans ce domaine. L'entretien et la gestion de tous ces aménagements sont des défis d'envergures pour les propriétaires d'ouvrages comme Hydro-Québec (HQ), et sont source de dépenses importantes. À titre d'exemple, le groupe Production qui gère les actifs d'HQ investit annuellement 40% de son budget dans le maintien et l'évaluation de ces ouvrages, soit plus de 650 M\$.

La réaction alcalis-silice (RAS), qui la plus courante des réactions alcalis-granulat (RAG), est une forme accélérée de dégradation qui affecte les ouvrages hydrauliques en béton. Elle est provoquée par les ions alcalins de la pâte cimentaire attaquant des sites de silices instables présents dans certains types de granulats. La RAS produit un gel blanc expansif qui, en présence d'eau, provoque un gonflement volumétrique du béton et génère de la fissuration extensive. Pas moins de 37 barrages d'Hydro-Québec ont été diagnostiqués avec cette pathologie à des degrés plus ou moins sévères (Figure 1.1 (a)). La RAS n'est souvent détectée qu'après une dizaine d'années de service d'un ouvrage, et continue de se développer sur plusieurs décennies en causant des problèmes de fonctionnalité en service (ex : blocage des vannes d'évacuateur, désalignement au niveau de la superstructure métallique et équipements encastrés) et de sécurité à l'ultime (ex : formation de plans préférentiels de glissements au sein d'un barrage).

Il est difficile d'évaluer précisément l'état d'endommagement et la durée de vie restante d'un ouvrage, et il l'est encore plus lorsque la RAS s'est développée, car les outils d'ingénieries conventionnels ne sont pas adaptés. Le développement de modèles numériques prédictifs constitue la seule alternative dans ce contexte spécifique. Les modèles numériques sophistiqués utilisent des *analyses avancées non linéaires par éléments finis* (ANLEF), et se basent sur des lois de comportement issues d'essais expérimentaux de caractérisation de la RAS dans le béton. Ces modèles peuvent tenir compte de phénomènes complexes de fissuration et d'interaction de processus physico-chimiques issus de la RAS (Ben Ftima et al., 2016). Pour que ces modèles prédisent de manière robuste le comportement futur d'un ouvrage hydraulique, des intrants

matériaux adéquats sont nécessaires. En particulier, il est essentiel de caractériser l'altération de ces intrants lorsque la RAS se développe et affecte les propriétés mécaniques d'un béton de ce type d'ouvrage.

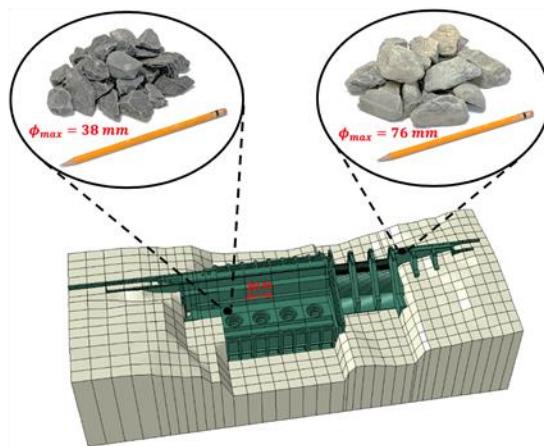
Cette maîtrise est une des dernières étapes dans un projet de collaboration université/industrie Polytechnique/HQ; dont l'objectif est de prédire le comportement d'un aménagement hydraulique existant de HQ affecté par la RAS, au moyen des ANLEF. L'aménagement à l'étude est montré à la Figure 1.1 (b) et (c).



(a) Localisation d'ouvrages affectés par la RAS au Québec



(b) Aménagement hydraulique affecté par la RAS, à l'étude dans ce projet



(c) Mélanges représentatifs de l'aménagement à l'étude

Figure 1.1 : Contexte général du projet ((a) tiré de Bérubé et al. (2000); (b) tiré de Hydro-Québec (2018); (c) tiré de Bernard (2020))

1.2 Problématique

Pour un ouvrage massif et faiblement armé tel qu'un ouvrage hydraulique, le comportement post-fissuration en traction du béton procure une énergie substantielle pour la redistribution des efforts. Cette *énergie de fissuration* notée G_F et définie à la Figure 1.2 (a) est un intrant essentiel à la majorité des lois de comportement utilisées par les ANLEF. Caractériser expérimentalement cet intrant pour un aménagement existant affecté par la RAS est un défi scientifique et technique pour trois raisons principales :

- Cet intrant G_F dépend des dimensions de l'élément structural : phénomène connu sous le nom de l'effet d'échelle. Caractériser cet intrant via des carottes prélevées de l'aménagement ne permettrait donc pas de représenter le comportement réel de l'ouvrage. D'autant que les diamètres des granulats de tels ouvrages (Figure 1.1 (c)) n'assurent pas la représentativité de carottes de diamètres usuels 150 mm.
- L'effet de la RAS sur cet intrant G_F est mal connu. Peu d'études s'y sont intéressées, et leurs conclusions ne s'accordent pas (Rotter, 1996; Giaccio et al., 2008; Hayes et al., 2020). Aucunes de ces études ne considèrent un béton type d'ouvrage hydraulique avec un diamètre de granulat > 25 mm, et aucune ne considère l'effet d'échelle sur G_F .
- Pour évaluer l'avancement de la RAS, l'expansion générée par cette réaction est communément mesurée sur des petits spécimens témoins. D'une part, la technique de mesure mécanique traditionnelle est chronophage et invasive. D'autre part, l'expansion de ces spécimens témoins n'est souvent pas représentative des expansions de l'ouvrage massif, pour plusieurs raisons : effets d'échelles, lessivage des alcalis, gradient de degré de saturation en eau ... (Multon et Sellier, 2016).

Considérant ces difficultés, une reconstitution des deux mélanges de cet aménagement (pour les deux diamètres de granulats 38 mm et 76 mm de la Figure 1.1 (c)) a été entreprise (Lemery, 2018) dans l'objectif de caractériser l'énergie de fissuration G_F sur des blocs coulés. La caractérisation s'effectuera à différents avancements de la RAS, après l'accélération du développement de la réaction en chambre climatique. Le suivi de l'expansion générée par la RAS se fera à la fois sur des spécimens témoins (éprouvettes cylindriques) et des spécimens de caractérisation (blocs de béton), par deux méthodes de mesures : traditionnelle (DEMEC) et novatrice avec la technologie

de scan laser 3D bien développée dans l'industrie automobile (Figure 1.2 (d)). La caractérisation de G_F se fera via l'essai de fendage illustré à la Figure 1.2 (b), réputé robuste, économique en matériau, et stable (Brühwiler et Wittmann, 1990).

L'énergie de fissuration obtenue via cet essai est nécessairement sujette à l'effet d'échelle (Figure 1.2 (c)) : G_F augmente lorsque la taille nominale D du spécimen augmente. L'énergie représentative des ouvrages hydrauliques en béton, qui doit être utilisée dans les ANLEF, est par conséquent l'énergie de *fissuration asymptotique*, notée $G_{F\infty}$ (Figure 1.2(c)).

La réalisation d'essais de fendage sur de très grands spécimens est techniquement difficile. Il est cependant possible d'utiliser des méthodes expérimentales simplifiées qui permettent de déduire indirectement l'énergie de fissuration asymptotique à partir de spécimens de tailles raisonnables. La méthode expérimentale nommée SBEM (*Simplified Boundary Effect Method*), développée par Abdalla et Karihaloo (2003) et la méthode nommée DFPZ (*Disturbed Fracture Process Zone Method*), développée par Lemery et al. (2020) permettent d'estimer $G_{F\infty}$. Elles sont basées sur la théorie de l'effet de bord (Duan et al., 2001) considérée comme une des théories permettant d'expliquer l'effet d'échelle observé sur G_F (Figure 1.2 (c)).

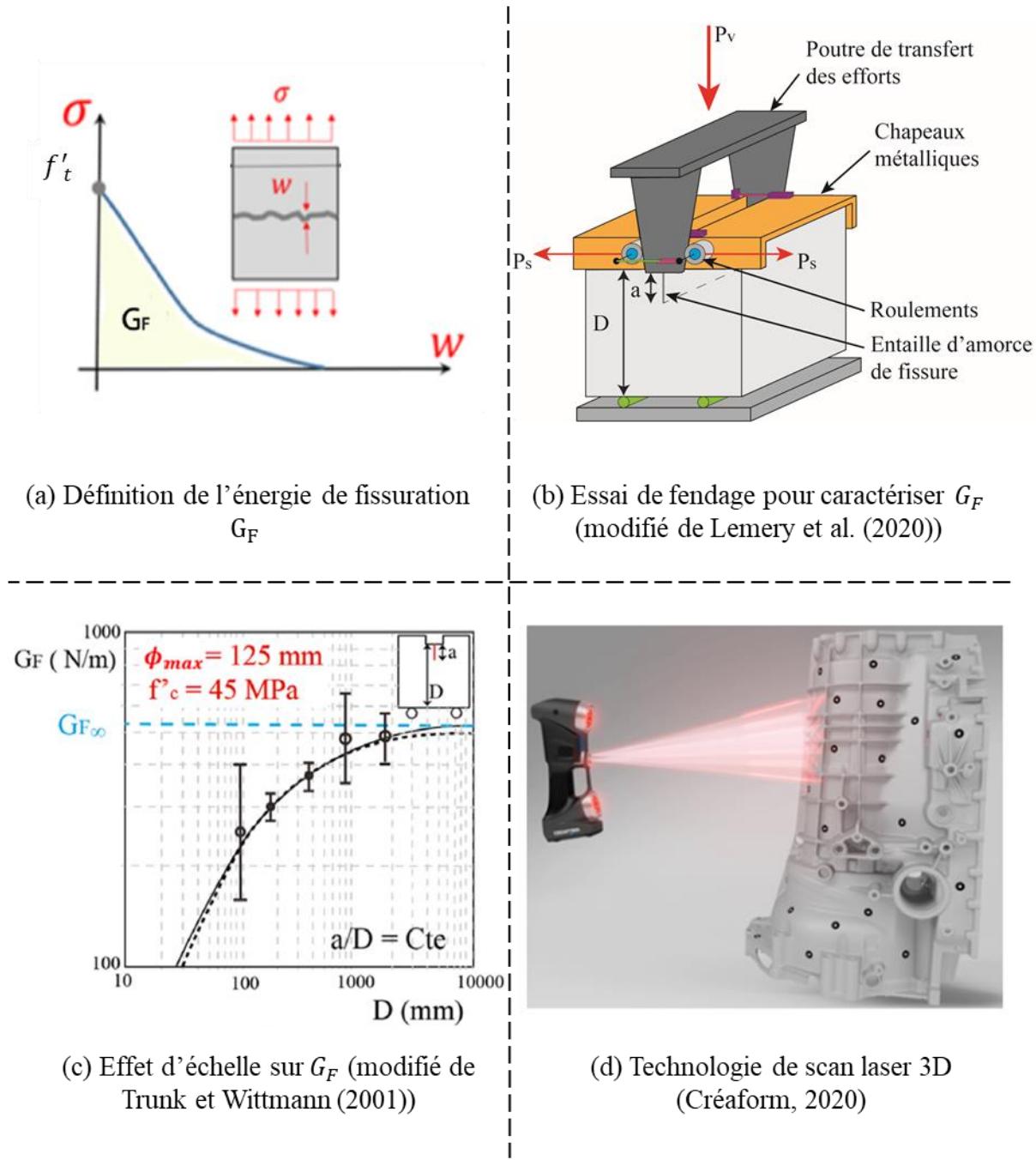


Figure 1.2 : Problématique de caractérisation de l'énergie de fissuration G_F

1.3 Objectifs du projet de recherche

Considérant les problématiques en jeu, les objectifs principaux de cette maîtrise sont de :

- Caractériser expérimentalement l'effet de la RAS sur les propriétés mécaniques du béton reconstitué de l'aménagement hydraulique. Plus spécifiquement, il s'agit de caractériser l'effet de la RAS sur l'énergie de fissuration, indépendamment de l'effet d'échelle.
- Caractériser la cinétique de gonflement associé à la RAS via des mesures traditionnelles au DEMEC et la technique de mesure au scanner laser 3D utilisée pour la première fois dans ce contexte. Montrer la pertinence et identifier les limitations de la technologie de scan laser 3D.

1.4 Méthodologie du projet de maîtrise

La conception et la coulée des spécimens (au total 54 blocs de béton et 48 éprouvettes cylindriques), la mise en place du montage expérimental, la validation du protocole de l'essai de fendage, ainsi que la mise en place des spécimens réactifs en chambres climatiques de l'IREQ (Institut de recherche d'Hydro-Québec) ont déjà été réalisées grâce aux travaux préalables de Lemery (2018). Ainsi les objectifs énoncés précédemment seront complétés via la démarche suivante :

- Réalisation d'une revue de littérature pertinente sur les aspects reliés aux objectifs du mémoire.
- Suivi du développement de la RAS en mesurant périodiquement l'expansion des spécimens confinés en chambre climatique à l'IREQ, par deux méthodes : instrumentation mécanique traditionnelle et scanner laser 3D.
- Établissement d'un protocole de post-traitement des scans pour quantifier l'expansion générée par la RAS.
- Comparaison des expansions obtenues via les deux méthodes de mesures.
- Rapatriement de 18 spécimens au laboratoire de structures de Polytechnique Montréal pour réaliser les essais de fendage, après plus d'un an et demi en chambre climatique pour accélérer la RAS.
- Réalisation des essais de fendage.
- Analyse et interprétation des résultats des essais de deux campagnes d'essais de fendage : la première menée durant la maîtrise de Lemery (2018), et la seconde menée par l'auteur de ce mémoire.

- Conclusions et recommandations pour la suite du projet.

En raison de la cinétique de RAS plus longue que prévu et des multiples imprévus expérimentaux rencontrés, seulement 18 spécimens atteints de RAS ont été testés dans ce projet de maîtrise. Les autres spécimens au nombre de 24, sont encore confinés en chambre climatique à l'IREQ. Ils seront testés ultérieurement à des avancements différents de RAS.

La démarche suivie est résumée à la Figure 1.3, et sera détaillée dans ce mémoire de 6 chapitres incluant l'introduction et la conclusion.

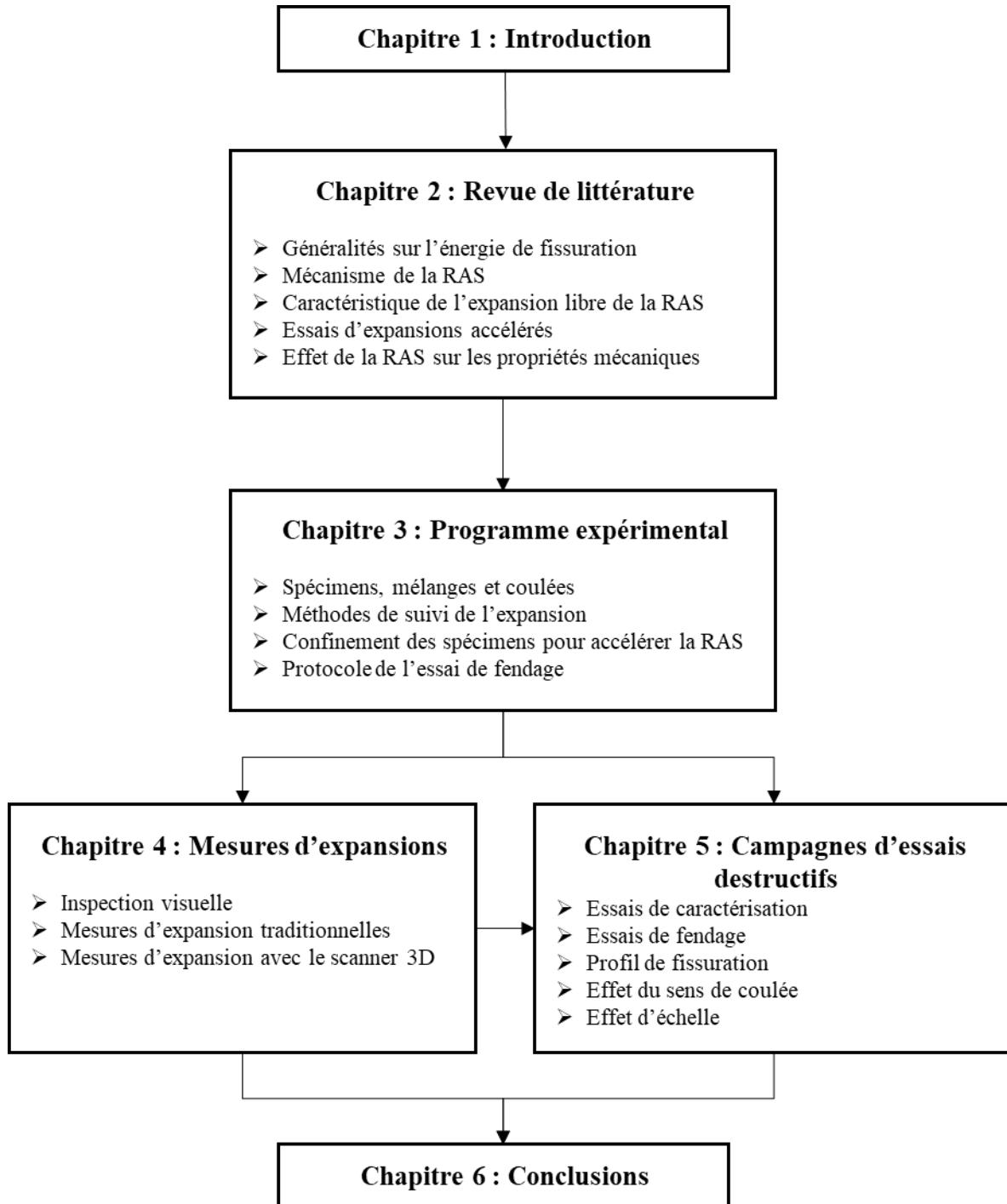


Figure 1.3 : Organigramme organisationnel du mémoire

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Considérant les différentes problématiques soulevées par les objectifs du projet, il est essentiel de comprendre les tenants et aboutissants des mécanismes mis en jeu, afin de pouvoir interpréter adéquatement les essais réalisés. C'est l'objectif de cette revue, qui se développera sur cinq grands axes pertinents :

- Énergie de fissuration et effet d'échelle associé.
- Mécanismes de la RAS.
- Caractéristiques de l'expansion libre de la RAS.
- Essais d'expansions accélérés pour caractériser la RAS.
- Effet de la RAS sur les propriétés mécaniques du béton.

Il est important de mentionner que cette revue a été réalisée alors que les spécimens étaient déjà coulés, quelques-uns déjà caractérisés, et que les spécimens réactifs étaient déjà confinés en chambre climatique depuis plus d'un an grâce aux travaux préalables de Lemery (2018). Cette revue a donc pour objectif de permettre l'interprétation des résultats expérimentaux des chapitres 4 et 5, et non pour objectif de faire des choix de conception de plan d'expérience.

2.1 Énergie de fissuration et effet d'échelle associé

Seules les notions liées à l'énergie de fissuration, sa caractérisation expérimentale et l'effet d'échelle associé seront abordées dans cette section. Plus de détails sur la théorie de la mécanique de la rupture et l'énergie de fissuration sont résumés entre autres dans la très bonne revue de Lemery (2018).

2.1.1 Définition selon le modèle de fissuration fictive

Le béton est un matériau hétérogène dont le comportement à la rupture ne peut être simplement modélisé par la mécanique de la rupture linéaire élastique. En effet, lors de la propagation de la fissure dans le béton (Figure 2.1 (a)), une zone de déformation non linéaire en pointe de fissuration se crée (Figure 2.1 (b)). Cette zone se nomme « zone de propagation de la fissuration » ou FPZ (*Fracture process Zone*). Et contrairement à d'autres matériaux, la FPZ du béton est de dimension

non négligeable : sa longueur est de l'ordre de 3 fois la dimension de granulat maximum ϕ_{max} (Lemery et al., 2020).

Plusieurs mécanismes de dissipation d'énergie se produisent au sein de la FPZ : effet de pontage des granulats, rugosité des surfaces, ramification locale de la fissure, etc. Ces mécanismes permettent de la transmission d'effort et peuvent être modélisés par une pression cohésive (Figure 2.1 (c)). Dans le modèle de fissuration fictive de Hillerborg (Hillerborg, 1985), l'énergie de fissuration est définie comme l'énergie nécessaire pour vaincre cette pression cohésive : c'est donc l'aire sous la courbe $(\sigma - w)$ de la Figure 2.1 (d).

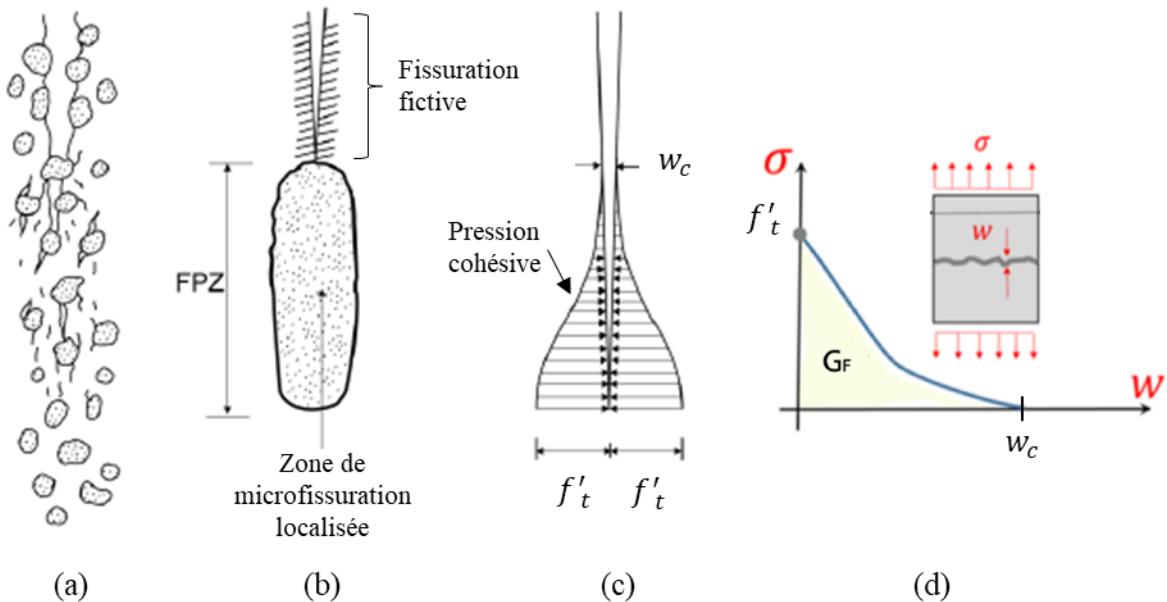


Figure 2.1 : (a) Propagation de la fissuration; (b) Définition de la FPZ; (c) Modèle de fissuration fictive de Hillerborg ((a), (b) et (c) adapté de Hu et Duan (2004)); (d) Définition de l'énergie de fissuration G_F (Lemery, 2018)

2.1.2 Caractérisation expérimentale de G_F

Deux essais de caractérisation sont couramment utilisés dans la littérature pour déterminer l'énergie de fissuration d'un mélange donné : l'essai de fendage de la Figure 2.2 (a) (WST pour *Wedge Splitting Test*) et l'essai de flexion trois-points de la Figure 2.2 (b) (TPBT pour *Three-Point Bending Test*). L'essai de fendage a l'avantage d'être plus stable et économique en matériau (Brühwiler et Wittmann, 1990). Ces deux essais permettent de calculer l'énergie de fissuration

selon la méthode du travail de fissuration (*Work of fracture*) : G_F est obtenue en divisant le travail de fissuration W_F de la courbe d'adoucissement « Effort - Ouverture de fissure » par la surface de fissuration projetée $(D - a) * B$ (Figure 2.3) où $D - a$ est le ligament de fissuration et B est l'épaisseur du spécimen. La Figure 2.3 illustre au passage le comportement quasi fragile ou adoucissant du béton soumis à une sollicitation de traction.

L'énergie de fissuration peut donc être définie comme l'énergie nécessaire pour séparer en deux parties un bloc de béton de surface unitaire (Lemery, 2018).

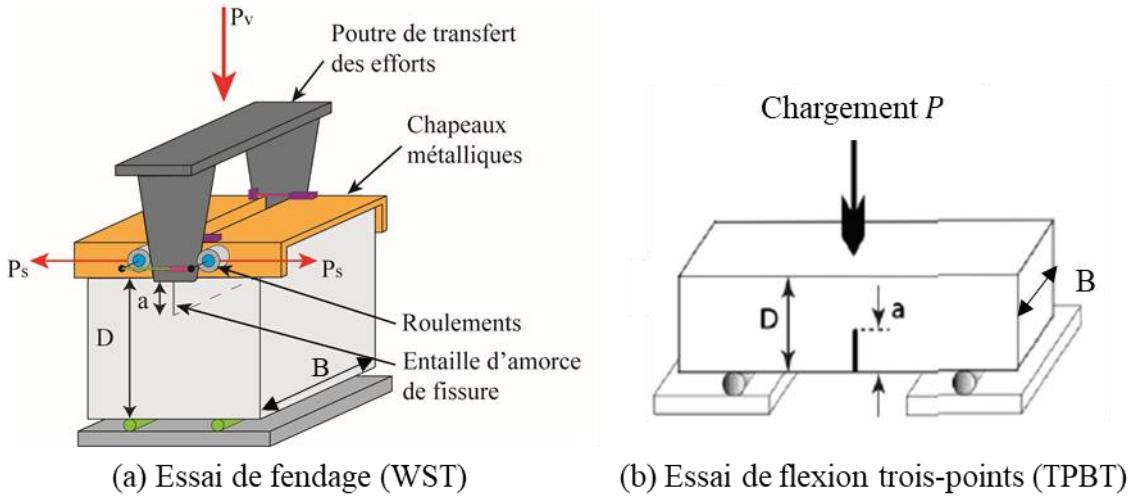


Figure 2.2 : Essais de caractérisation de l'énergie de fissuration ((a) modifié de Lemery et al. (2020); (b) modifié de Abdalla et Karihaloo (2003))

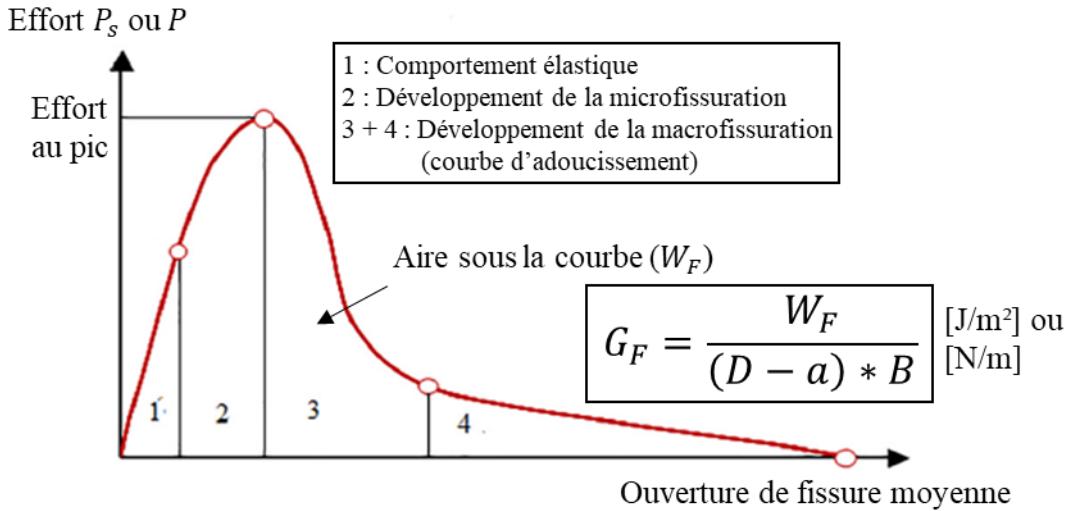


Figure 2.3 : Comportement quasi fragile en traction du béton et détermination de l'énergie de fissuration G_F selon la méthode du travail de fissuration (modifié de Khalilpour et al. (2019))

2.1.3 Effet d'échelle sur l'énergie de fissuration

2.1.3.1 Constatation expérimentale

Les propriétés mécaniques d'un élément structural peuvent s'altérer lorsque les dimensions de cet élément évoluent : c'est le principe de l'effet d'échelle. Plus particulièrement dans le contexte de ce projet, l'énergie de fissuration G_F augmente lorsque le ligament de fissuration $D - a$ augmente. Cet effet d'échelle est illustré à la Figure 1.2 (c) d'après les travaux de Trunk et Wittmann (2001) pour des essais de fendage sur un mélange reconstitué de barrage avec des gros granulats 125 mm. De nombreuses études confirment cet effet d'échelle sur G_F (Trunk et Wittmann, 2001; Abdalla et Karihaloo, 2003; Duan et al., 2003; Guan et al., 2015; Ben Ftima et Lemery, 2020; Lemery et al., 2020).

Plusieurs théories tentent d'interpréter cet effet. Parmi celles-ci, on considérera la théorie de l'effet de bord (*Boundary Effect theory*) sur laquelle se base le plan d'expérience des travaux de Lemery (2018) préalables à ce présent rapport.

2.1.3.2 Théorie de l'effet de bord et méthode expérimentale SBEM

D'après la théorie de l'effet de bord (Duan et al., 2002; Hu et Duan, 2004), lorsque la fissure approche une surface libre du spécimen, les dimensions de la FPZ diminuent. Ainsi, le champ de

pression cohésive (Figure 2.1 (c) et (d)) est réduit et il s'en suit de même pour l'énergie de fissuration reliée à ce champ (Figure 2.4). Hu et Wittmann (1992) proposent une variation bilinéaire de $G_F(x)$. Cette approximation bilinéaire illustrée à la Figure 2.4 consiste en une asymptote horizontale diminuant à partir d'une distance a_1 de la surface libre, appelée longueur d'influence. L'énergie asymptotique du segment horizontal correspond à l'énergie de fissuration indépendante de l'effet d'échelle $G_{F\infty}$. La relation entre l'énergie de fissuration expérimentale G_F et l'énergie de fissuration indépendante des effets d'échelles $G_{F\infty}$ est ainsi déduite (équation (2.1)).

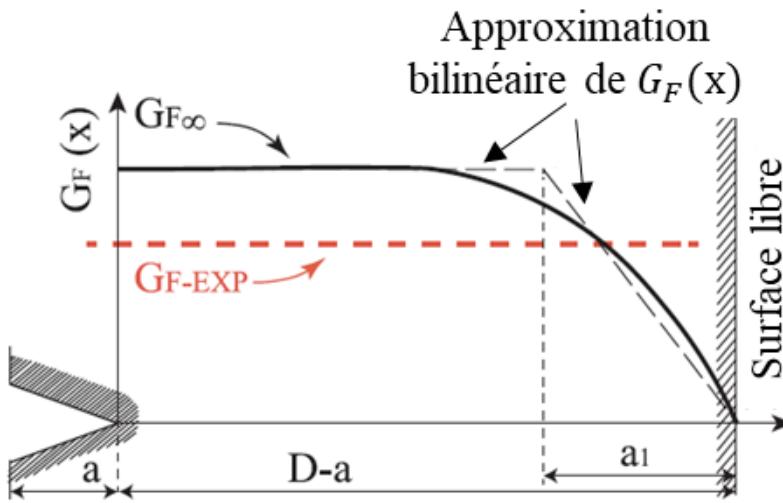


Figure 2.4 : Théorie de l'effet de bord et approximation bilinéaire de G_F (résumé par Lemery et al. (2020)

$$G_F\left(\frac{a}{D}\right) = \frac{1}{D-a} \int_0^{D-a} G_F(x) dx = \begin{cases} G_{F\infty} \left[1 - \frac{a_1/D}{2(1 - \frac{a}{D})} \right] & \text{si } D - a > a_1 \\ G_{F\infty} \left[\frac{1 - \frac{a}{D}}{2 a_1/D} \right] & \text{si } D - a \leq a_1 \end{cases} \quad (2.1)$$

Abdalla et Karihaloo (2003) ont proposé une méthode expérimentale simplifiée, appelée SBEM (pour *Simplified Boundary Effect Method*), afin d'estimer les paramètres a_1 et $G_{F\infty}$ de l'approximation bilinéaire. La méthode consiste en deux séries d'essais de fendage avec deux ratios d'entaille a/D bien différents : une entaille peu profonde (par exemple $a/D = 0,1$ ou $0,2$), et une entaille profonde ($a/D = 0,5$). La détermination de a_1 et $G_{F\infty}$ revient ainsi à résoudre un système de deux équations (deux configurations a/D) à deux inconnues grâce à l'équation (2.1).

2.1.3.3 Interprétation par la théorie DFPZ et méthode expérimentale associée

Les travaux de Lemery (2018) ont permis de développer une nouvelle théorie qui permet une interprétation mécanique de l'effet de bord : la théorie DFPZ pour *Disturbed Fracture Process Zone* (Lemery et al., 2020). D'après cette théorie, l'effet de bord est causé par le champ de compression généré par le moment fléchissant M (Figure 2.5 (a)), qui résulte de l'excentricité de l'effort P_s dans le cas d'un essai de fendage. Vers la fin de l'essai (Figure 2.5 (b)), la FPZ est perturbée par le champ de compression, ce qui réduit sa taille initiale et donc diminue la consommation d'énergie de fissuration locale. À partir de cette interprétation, l'équation (2.2) est déduite : la longueur d'influence a_1 est proportionnelle à la longueur de la FPZ initiale non perturbée L_{FPZ} . Le facteur α est relié au centre de gravité de la courbe $(\sigma - w)$ de la Figure 2.1 (d) et est suggéré égal à 0,75 (Lemery et al., 2020). La théorie DFPZ se base toujours sur une distribution locale bilinéaire de l'énergie de fissuration (Figure 2.4).

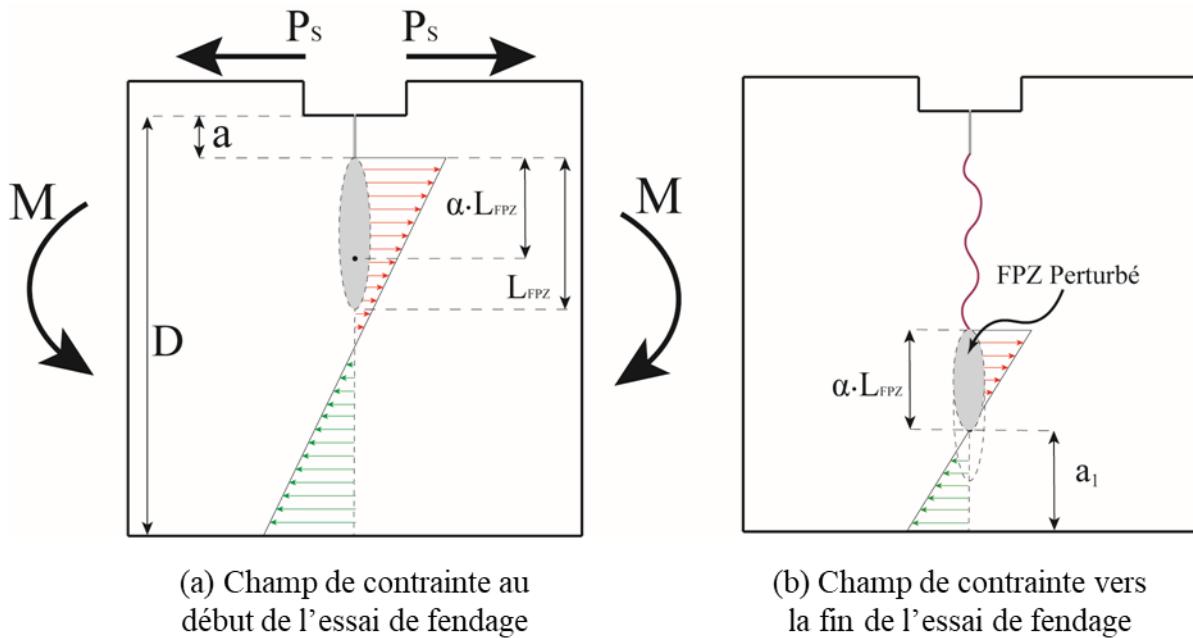


Figure 2.5 : Interprétation mécanique de l'effet de bord avec la théorie DFPZ (*Disturbed Fracture Process Zone*) (modifié de Lemery et al. (2020))

À partir de l'équation (2.2) et de l'équation (2.1) de la SBEM, en prenant le cas où $D - a > a_1$, l'équation (2.3) est déduite.

$$a_1 = \alpha L_{FPZ} \quad (2.2)$$

$$G_{F\infty} = G_F \left[\frac{1}{1 - \frac{\alpha L_{FPZ}}{2(D-a)}} \right] \quad (2.3)$$

Ainsi, il est possible de déterminer $G_{F\infty}$ à partir de l'équation (2.3) en évaluant l'unique inconnue L_{FPZ} pour une seule configuration de ratio d'entaille a/D , contrairement à la SBEM. La détermination expérimentale de L_{FPZ} peut se faire au moyen de l'instrumentation DIC (*Digital Image Correlation*) tel que suggéré par Lemery et al. (2020). Le choix des dimensions du spécimen et du ratio d'entaille doit être fait pour que la FPZ puisse se développer complètement dans le champ de traction, donc sans perturbation (Figure 2.5 (a)). Lemery et al. (2020) suggèrent ainsi une taille de ligament de fissuration $D - a > 6,6 \phi_{max}$.

2.2 Mécanismes de la Réaction Alcalis-Silice (RAS)

La réaction alcalis-silice (RAS) a été premièrement identifiée par Stanton sur un barrage américain dès 1940 (Stanton, 1940). Et depuis les dernières décennies, cette réaction est rapportée comme une des causes majeures de détérioration des ouvrages dans le monde, diminuant la durabilité et provoquant des coûts importants en maintenance et réparation (Sims et Poole, 2017). Deux exemples d'ouvrages affectés par la RAS sont fournis à la Figure 2.6. Les processus chimiques de la réaction, les paramètres influençant son développement, et les effets de son développement dans le béton sont encore actuellement source de nombreuses recherches (Figueira et al., 2019).



Figure 2.6 : Exemples d'ouvrages affectés par la RAS : (a) Aménagement hydraulique à l'étude dans ce projet (b) Pile de pont à Québec (Sanchez et al., 2020)

La suite de cette revue traitera du mécanisme de la RAS, des caractéristiques de l'expansion libre qu'elle provoque, et surtout, des effets de la RAS sur les propriétés mécaniques du béton. Dans cette section, le mécanisme réactionnel de la RAS sera résumé, puis les conséquences physiques du développement de cette réaction seront détaillées à deux échelles.

2.2.1 Mécanisme réactionnel

La RAS se déroule en deux étapes (Larive, 1997; Multon, 2003; Rajabipour et al., 2015; Figueira et al., 2019) :

- Attaque des granulats réactifs : les ions alcalins Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , et OH^- de la solution interstitielle migrent dans le granulat (Figure 2.7 (a)). Ces ions réagissent en présence d'eau avec les sites de silices réactives de ce granulat pour produire un gel silico-calco-alcalin (Figure 2.7 (b)).
- Développement de gels expansifs : Ce gel produit s'hydrate en présence d'eau et gonfle. Il se disperse ensuite des sites de réaction vers des zones accommodant son volume (fissures, porosités ...). Lorsqu'il n'y a plus d'espace localement pour accommoder le gel et son gonflement, une pression est générée, ouvrant et propageant les fissures existantes (Figure 2.7 (c)).

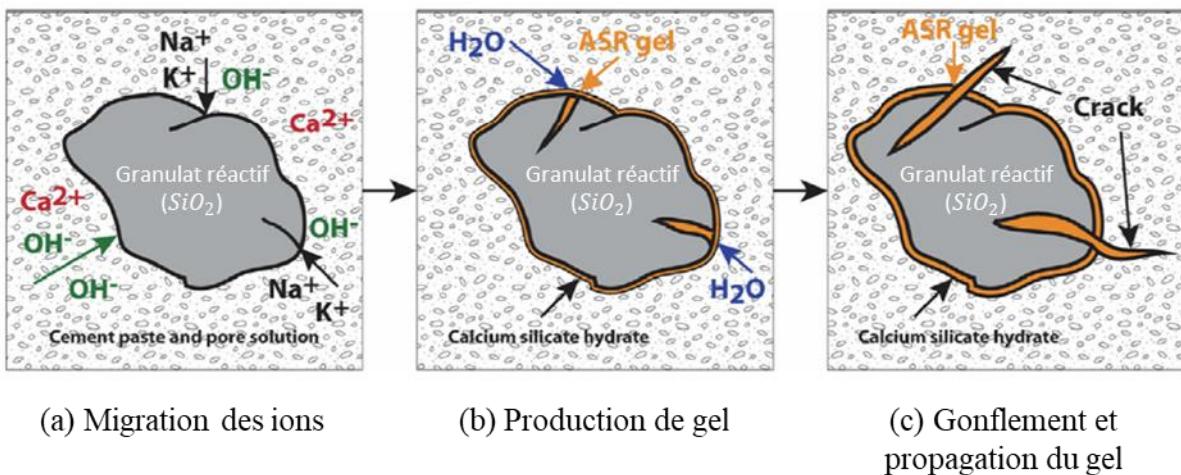


Figure 2.7 : Schéma simplifié du mécanisme réactionnel de la RAS (Figueira et al., 2019)

Ainsi, quatre conditions sont essentielles pour que la RAS se développe (Fournier et Bérubé, 2000; Figueira et al., 2019) :

- La présence de granulats avec suffisamment de sites de silices instables réactifs.
- La concentration suffisamment élevée d'alcalis actifs (Na^+ , K^+ , OH^-) dans la solution interstitielle.
- La présence d'une source de calcium soluble (Portlandite) pour former Ca^{2+} nécessaire à la formation du gel.
- Un degré de saturation en eau du béton suffisamment élevé, pour permettre la production du gel et son gonflement.

2.2.1 Mécanismes d'endommagement

2.2.1.1 À l'échelle du granulat

Le gel produit de la RAS s'accorde dans la microfissuration du granulat, gonfle en absorbant de l'eau et génère une pression et des contraintes de traction (6 à 7 MPa) qui ouvrent ces fissures. La Figure 2.8 (a) présente un granulat réactif avec des fissures remplies de gel. Les fissures se propagent à l'interface pâte-granulat (dont la microstructure est plus faible) et provoquent la décohésion du granulat avec la pâte. Le gel se propage autour du granulat (Figure 2.7 (c)) et continue de générer une pression, c'est un gonflement massique ou périphérique. À un certain avancement de la RAS, les fissures et le gel se propagent dans la pâte de ciment. À ce stade, Sanchez et al. (2017) indiquent que le taux de génération de nouvelles fissures a tendance à décroître, l'ouverture et la propagation des fissures existantes étant préférentielles. La Figure 2.8 (b) illustre la fissuration et la pression générée par le gel produit de la RAS dans le granulat et la pâte de ciment.

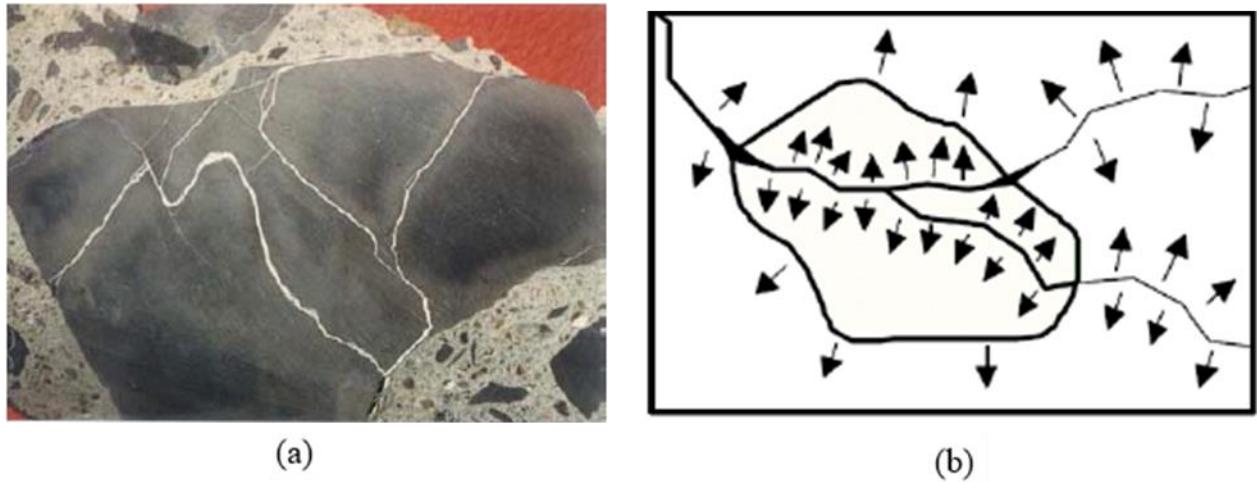


Figure 2.8 : (a) Fissuration du granulat réactif avec présence de gel produit de la RAS (b) Pression générée par le gel (Durand et Veilleux, 2003)

2.2.1.2 À l'échelle de la structure

À l'échelle d'une structure, le gonflement et l'endommagement ne sont pas uniformes en raison d'un gradient de déformation issu des conditions d'exposition différentes. Une expansion différentielle entre le béton en surface et le béton au cœur a lieu.

Le béton au cœur possède des conditions d'humidité élevées et stables, favorables à la RAS. Alors que le béton en surface est plus sec et est exposé aux cycles de mouillage-séchage. Le séchage implique moins d'eau permettant le développement de la RAS, mais aussi du retrait de séchage et donc de la fissuration. Le mouillage provoque le lessivage des alcalis et donc moins d'alcalis disponible pour réagir.

Ces conditions différentes génèrent des zones de réactivité différentes et donc des expansions différentes : le béton au cœur s'expand plus que le béton en surface (Figure 2.9 (a)). La fissuration provoquée par ce gonflement différentiel sera plus importante en surface (Figure 2.9 (b)).

Sur la Figure 2.9 (b), la zone au cœur est microfissurée aléatoirement, et la surface est macrofissurée aléatoirement en faïençage, comme illustrée sur une pile de pont à la Figure 2.6 (b). La macrofissuration de surface traduit en général un gonflement du béton au cœur assez important.

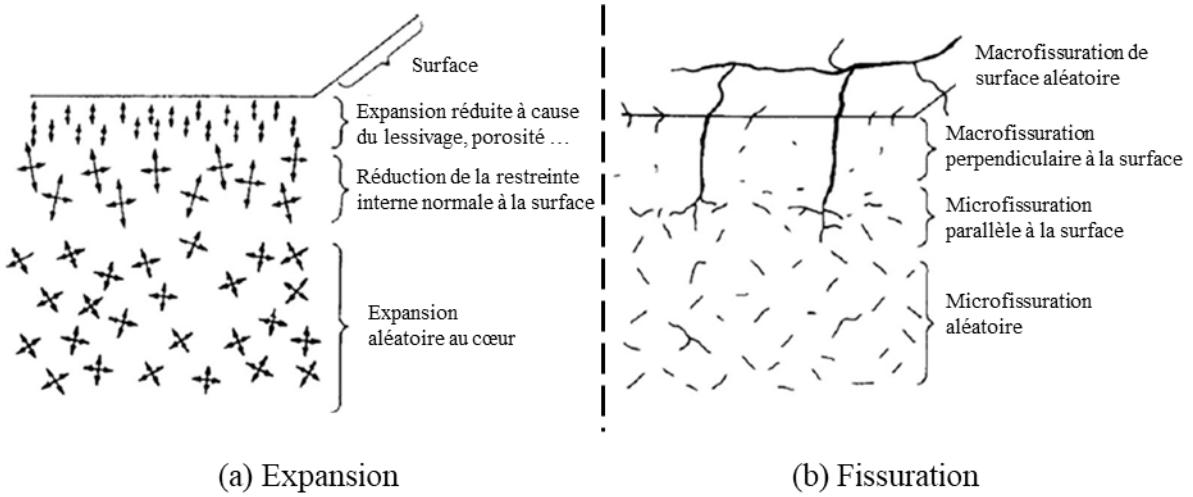


Figure 2.9 : Expansion libre de la RAS (a) générant de la fissuration (b) dans différentes zones du béton (adapté de Courtier (1990))

2.3 Caractéristiques de l'expansion libre de la RAS

2.3.1 Expansion macroscopique

L'expansion macroscopique est facilement mesurable et permet de quantifier l'avancement de la RAS. La courbe caractéristique de l'expansion libre (unidirectionnelle ou volumétrique) en fonction du temps est en forme de « S » (sigmoïde) comme illustrée à la Figure 2.10. Sur cette figure, sont inscrites les quatre grandes étapes de la RAS : amorce, développement, accélération et décélération, avec l'interprétation qualitative des phénomènes physiques (fissuration et propagation du gel) et chimiques observés. La cinétique de la RAS en l'expansion libre est usuellement modélisée par l'équation (2.4) déterminée expérimentalement par Larive (1997).

$$\varepsilon_{RAS}(t) = \varepsilon_\infty \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_c}}}{1 + e^{-\frac{t-\tau_l}{\tau_c}}} \quad (2.4)$$

t : Temps

$\varepsilon_{RAS}(t)$: Expansion générée par la RAS

ε_∞ : Expansion asymptotique (finale)

τ_l : Temps de latence (correspond au point d'inflexion de la courbe d'expansion de la Figure 2.10)

τ_c : Temps caractéristique (détermine la décroissance exponentielle causée par la perte d'efficacité des réactifs, après le point d'inflexion)

À titre indicatif, les expansions volumétriques typiquement constatées sur des ouvrages varient entre 0,2% et 0,5% (Saouma, 2014), ce qui correspond à une expansion thermique équivalente à une augmentation de température de 200°C à 500°C.

Beaucoup de facteurs influencent la cinétique de la réaction, les variations d'expansions dans différentes directions, et la valeur de l'expansion finale. Quelques-uns de ces facteurs sont décrits dans les sections suivantes.

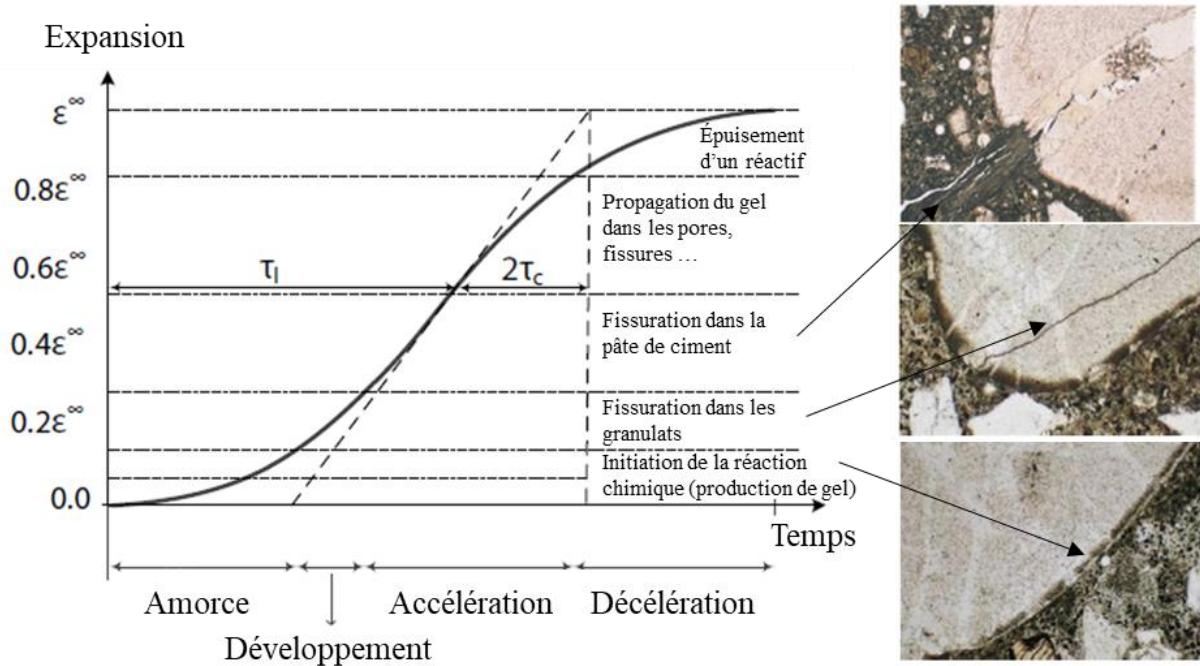


Figure 2.10 : Évolution de l'expansion macroscopique en fonction du temps et observations pétrographiques associées (adapté de Saouma et al. (2015))

2.3.2 Anisotropie de l'expansion libre

L'anisotropie de l'expansion est la différence entre les expansions constatées dans différentes directions de l'espace. Il faut distinguer le phénomène d'anisotropie selon si l'expansion est

restreinte mécaniquement ou pas. Dans le cadre de ce projet de recherche, on ne s'intéressera qu'à l'anisotropie en expansion libre. Pour quelques études traitant du sujet de l'anisotropie en expansion restreinte, l'auteur suggère de consulter entre autres : Larive (1997); Liaudat et al. (2018); Abd-Elssamad et al. (2020). En expansion libre, l'anisotropie de gonflement est généralement attribuée à trois effets : la fissuration, le sens de coulée et la forme des granulats.

2.3.2.1 Effet de la fissuration

Selon Larive (1997), le début de l'expansion causée par la RAS est isotrope. C'est dès l'apparition des premières fissures à de faibles expansions (0,02% à 0,04%) que l'anisotropie apparaît. Larive montre que peu importe la température de confinement, le coefficient d'anisotropie varie entre 1,3 et 2,8 et est en moyenne proche de 2. Il s'agit ici du rapport entre l'expansion longitudinale (la plus importante) et l'expansion transversale (la plus faible) pour le cas spécifique d'un cylindre. De manière similaire, Smaoui et al. (2004) relèvent des coefficients d'anisotropie variant entre 1,23 et 2,55 pour une moyenne de 1,8.

2.3.2.2 Effet du sens de coulée

Smaoui et al. (2004) montrent que l'expansion générée par la RAS est significativement plus importante dans la direction du sens de coulée, et cette anisotropie de gonflement est constante durant la RAS. Ces constatations sont faites peu importe la forme et la taille des spécimens, le type et la taille des granulats réactifs et peu importe le mode de consolidation. Larive (1997), Ahmed et al. (2003) et Multon et al. (2005) confirment ce comportement.

Cela signifie que la fissuration causée par la RAS se fait préférentiellement dans des plans perpendiculaires au sens de coulée. La forme des granulats et la vibration du béton peuvent expliquer cette orientation particulière.

2.3.2.3 Effet de la forme des granulats

L'anisotropie est plus importante lorsque les granulats réactifs sont élancés et/ou aplatis d'après Smaoui et al. (2004). Deux phénomènes peuvent expliquer l'effet de la forme du granulat :

- Cette forme favorise la concentration d'eau et d'air s'accumulant sous le granulat, d'autant plus lorsque la consolidation est vigoureuse. Cette concentration d'eau fait augmenter localement le rapport Eau/Ciment (E/C), la microstructure est donc plus poreuse et moins

résistante, ce qui favorise la fissuration dans l'axe d'élancement du granulat (Figure 2.11 (a)).

- La localisation du gel produit de la RAS autour du granulat plat génère une pression d'expansion plus importante dans l'axe perpendiculaire à l'élancement du granulat, comme une sorte de « vérin plat » (Larive, 1997). Cela génère de la fissuration préférentiellement dans l'axe d'élancement du granulat (Figure 2.11 (b)).

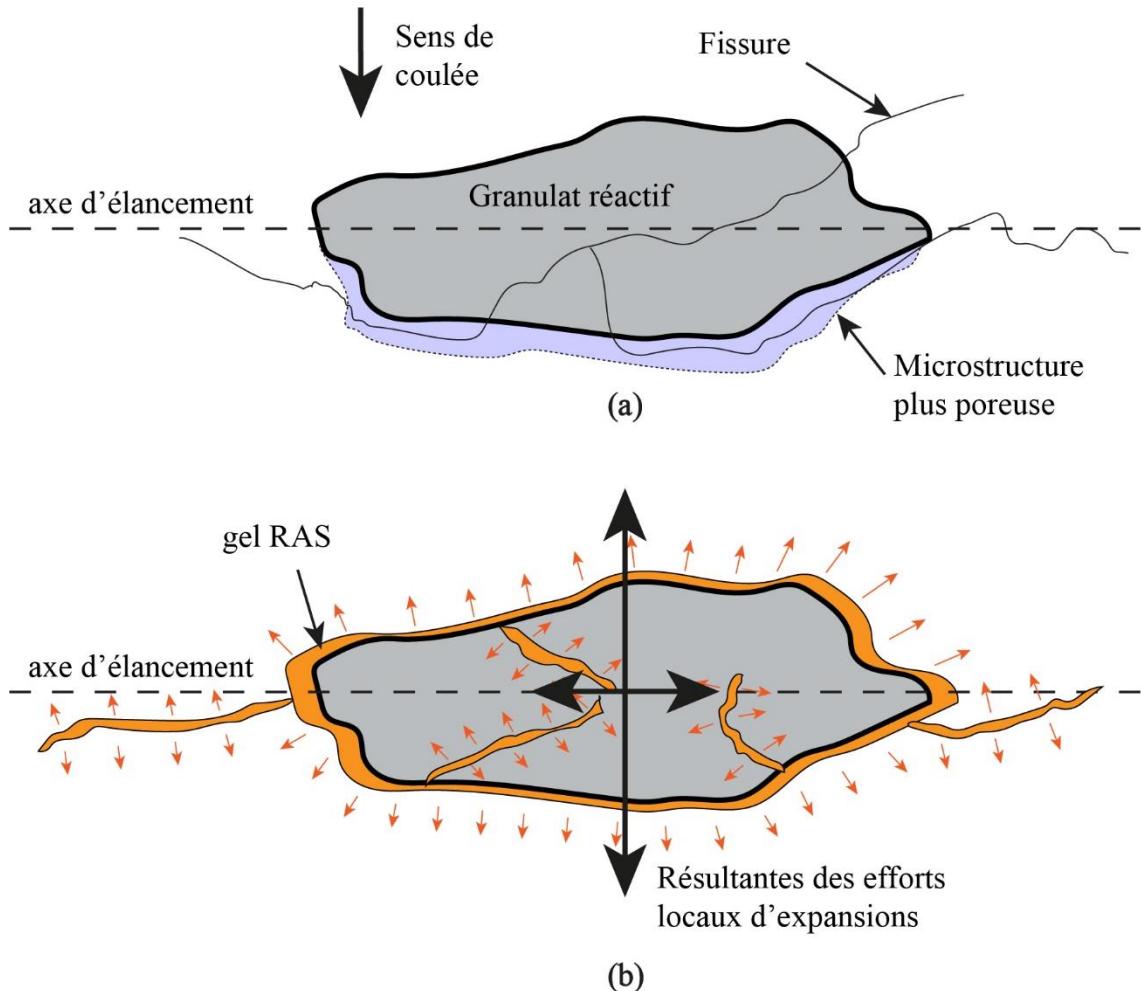


Figure 2.11 : Effet de l'élancement du granulat sur l'orientation de la fissuration RAS :
 (a) avant formation du gel; (b) après formation du gel

Ces deux phénomènes sont affectés par le mode de consolidation. Ainsi la vibration du béton a tendance à orienter les granulats élancés à plat, c'est-à-dire perpendiculaires au sens de coulée.

Smaoui et al. (2004) montrent que la consolidation par table vibrante et aiguille vibrante génère une anisotropie plus importante qu'une méthode de consolidation manuelle avec tige.

Cette fissuration préférentiellement transversale au sens de coulée est amplifiée lorsque l'eau externe pénètre par ces fissures, alimente le gel produit de la RAS, et que ce gel s'installe dans ces fissures et génère une pression d'expansion ouvrant davantage ces fissures.

L'anisotropie de gonflement libre est certes plus faible, mais quand même constatée pour des granulats réactifs sphériques comme du sable (Larive, 1997; Smaoui et al., 2004). Smaoui et al. (2004) constatent aussi que l'anisotropie est moins prononcée lorsque le spécimen est de grande dimension.

2.3.3 Effet de la température

Plus la température de confinement est élevée, plus la cinétique de la réaction est rapide (Larive, 1997). La Figure 2.12 illustre ce comportement pour un confinement à 23°C et à 38°C. L'effet de la température se modélise usuellement par la dépendance à la température du temps caractéristique et le temps de latence du modèle de Larive (équation (2.4)) selon la loi d'Arrhénius (Ulm et al., 2000).

L'effet de la température de confinement sur l'expansion finale d'un spécimen n'est pas clair. Les résultats de la littérature ne s'accordent pas : certains indiquent que la température n'affecte pas l'expansion finale (Larive, 1997; Gautam et Panesar, 2017), d'autres rapportent que l'élévation de température réduit l'expansion finale (Fournier et Bérubé, 2000; Lindgård et al., 2013; Kawabata et al., 2019), et certains affirment que l'élévation de température augmente l'expansion finale (Sanchez et al., 2008). L'augmentation de température favoriserait le lessivage des alcalis et l'exsudation du gel produit de la RAS en réduisant la viscosité de ce dernier (Kawabata et al., 2018; Kawabata et al., 2019), ce qui contribuerait à réduire l'expansion finale, bien que l'intensité de ces phénomènes dépende des dimensions des spécimens (détaillés à la section 2.3.6).

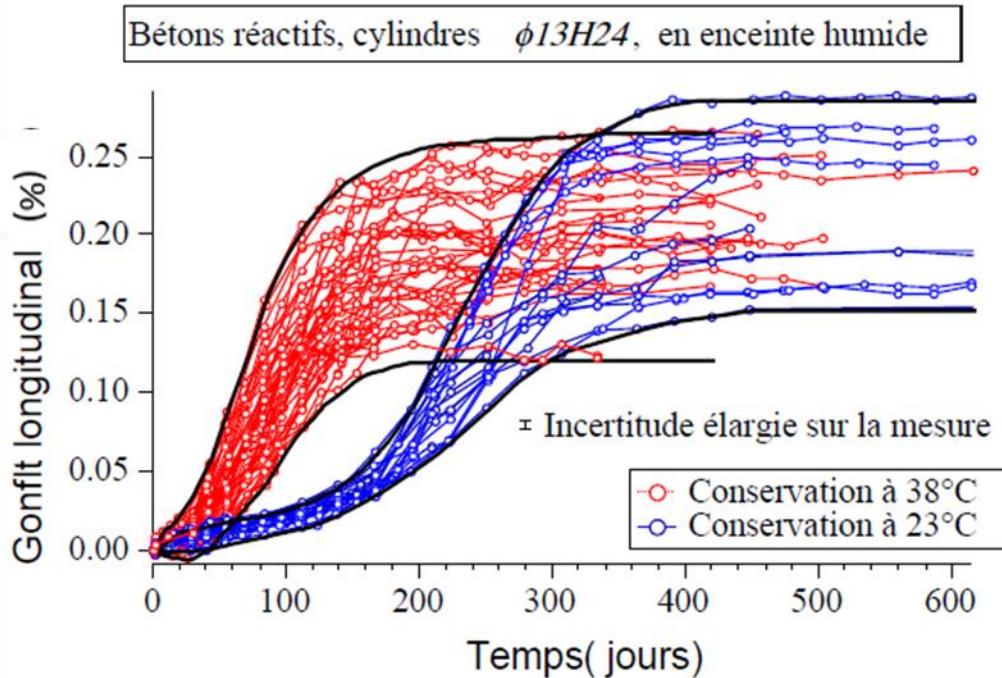


Figure 2.12 : Expansion de spécimens confinés à 23°C et 38°C (Larive, 1997)

2.3.4 Effet de l'eau

L'eau est l'élément essentiel permettant le développement de la RAS. Sa présence en quantité suffisante ou son absence dicte la cinétique de la réaction et l'expansion macroscopique.

2.3.4.1 Effet de l'humidité relative (HR)

Plus l'humidité relative du confinement est élevée, plus la cinétique de la réaction est rapide et l'expansion finale est grande. Poyet et al. (2006) le démontrent à la Figure 2.13 pour un confinement à 60°C et sous des conditions d'humidités relatives constantes allant de 59% d'HR à 100% d'HR. Plus le gain de masse d'eau des spécimens est important, plus l'expansion est grande (Poyet et al., 2006; Yamada et al., 2014; Kawabata et al., 2019). L'apport d'eau est donc essentiel pour développer la RAS, car cela permet (Larive, 1997) :

- La diffusion des ions alcalins dans la solution interstitielle (eau comme milieu réactionnel)
- La formation du gel produit de la RAS et l'alimentation en eau de ce gel, qui génère l'expansion (eau comme réactif)

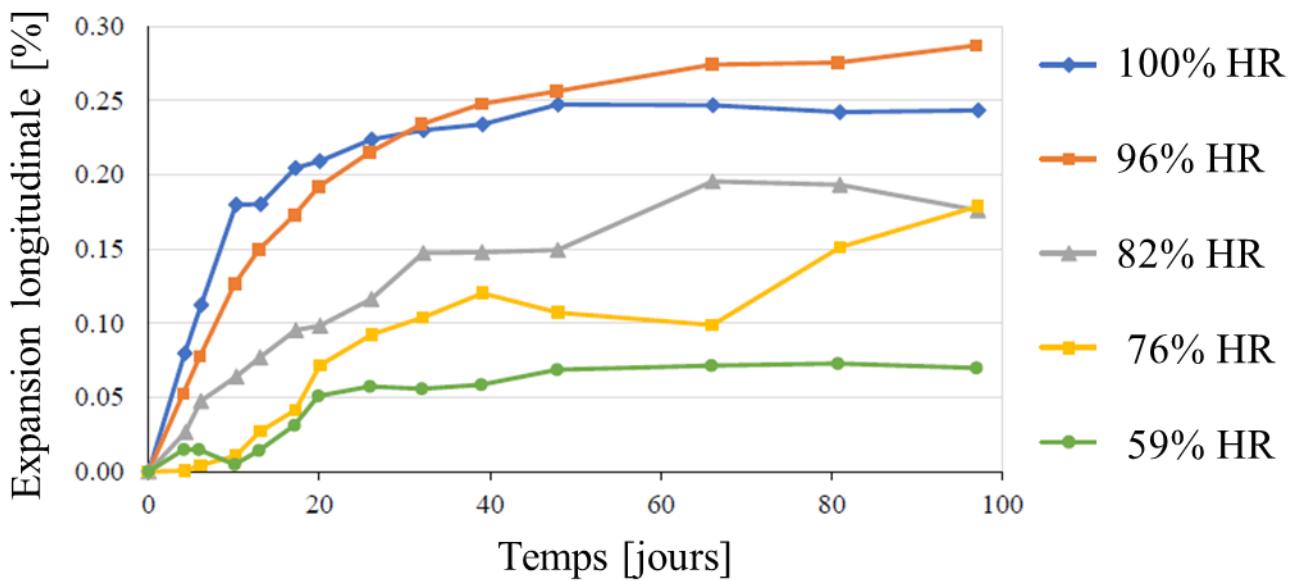


Figure 2.13 : Expansion longitudinale en fonction du temps pour des confinements à différentes humidités relatives (Poyet et al., 2006)

L'humidité relative doit être au moins de 80 à 85% pour constater le développement de la RAS en conditions réelles (pour une température de référence d'environ 23°C). Plus la température et/ou la quantité d'alcalis sont élevés, plus ce seuil d'humidité relative nécessaire au développement de la RAS est faible (Poyet et al., 2006; Figueira et al., 2019). L'eau de gâchage non consommée par la réaction d'hydratation est suffisante pour initier la RAS et provoquer des expansions non négligeables (Multon, 2003).

2.3.4.2 Effet d'une perte d'eau

Larive (1997) montre l'existence d'un seuil de perte de masse d'eau de 0,15% au-delà duquel l'expansion n'augmente plus et donc la RAS s'arrête. Larive (1997) note qu'une perte de poids après stabilisation de l'expansion n'a pas un effet aussi important sur l'expansion finale que si la perte de poids a lieu durant la phase critique de gonflement.

2.3.4.3 Effet d'un apport d'eau tardif

L'effet d'un apport tardif d'eau n'est pas le même selon l'âge des spécimens (Larive, 1997; Multon, 2003):

- Si la RAS n'a pas été bloquée par un manque d'apport d'eau, un spécimen âgé ne se remettra pas à gonfler.
- Cependant, si la RAS se développe toujours, une arrivée d'eau tardive va provoquer une forte expansion rapide (Larive, 1997; Multon et Toutlemonde, 2010). Larive (1997) montre par exemple qu'un spécimen au stade de « développement » décrit à la Figure 2.10 qui bénéficie d'un apport d'eau (après en avoir été privé pendant 82 jours) s'expand longitudinalement de 0,18% en un mois et rejoint l'expansion moyenne constatée des autres spécimens non privés d'eau.

2.3.4.4 Effet du rapport E/C

L'effet du rapport Eau/Ciment (E/C) sur la RAS n'est pas immédiat, des tendances contradictoires sont rapportées dans la littérature (Figueira et al., 2019). L'augmentation du rapport E/C a des effets contraires :

- Effets qui favorisent l'endommagement de la RAS :
 - La plus grande perméabilité permet une meilleure mobilité des alcalis vers les granulats et une meilleure mobilité de l'eau apportée en externe.
 - La microstructure plus poreuse implique de plus faibles propriétés mécaniques : la structure du béton peut moins s'opposer aux contraintes d'expansion générées par la RAS.
 - La plus grande quantité d'eau permet un degré de saturation interne plus élevé dès le jeune âge et donc plus d'eau disponible en tant que milieu réactionnel et réactif de la RAS.
- Effets qui défavorisent l'endommagement de la RAS :
 - La porosité plus importante alloue plus d'espace au gel produit par la RAS et inhibe le gonflement.
 - Le ciment est en moins grande proportion, donc il y a moins d'alcalis disponibles pour réagir.

L'effet du rapport E/C semble neutre pour des rapports inférieurs à 0,45, et semble plutôt favorable à la RAS pour des rapports supérieurs à 0,45 (Figueira et al., 2019).

2.3.5 Effets de la quantité d'alcalis

Les alcalis sont essentiels pour que la RAS se développe. Ils proviennent principalement du ciment, et parfois des granulats, des ajouts minéraux ou des adjuvants (Drolet et al., 2017; Saha et al., 2018; Figueira et al., 2019). La quantité d'alcalis d'un mélange se normalise à une valeur équivalente en $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (la section 2.4.2 décrivant la norme ASTM C1293 détaille le calcul de cette valeur).

2.3.5.1 Effet sur la cinétique et l'expansion de la RAS

De manière générale, plus il y a d'alcalis dans un mélange donné, plus l'expansion est importante. La quantité critique de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ dans le béton au-delà duquel l'expansion devient non négligeable se situe en général autour de 3 kg/m^3 (Bérubé et al., 2000; Fournier et Bérubé, 2000), valeur que la norme canadienne suggère de ne pas dépasser (CSA A23.1). Ce seuil varie selon le type de granulat réactif.

D'après Bérubé et al. (2000) et pour sept types de granulats calcaires réactifs, plus la quantité de ciment augmente et donc plus la quantité d'alcalis augmente, plus l'expansion finale est importante après un an, en conditions accélérées de l'essai ASTM C1293 (Figure 2.14). D'autres auteurs confirment cette tendance pour différentes quantités de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ et une quantité de ciment fixe du mélange (Sibbick et Page, 1992; Fournier et Bérubé, 2000; Multon et al., 2010; Costa et al., 2017; Bavasso et al., 2020).

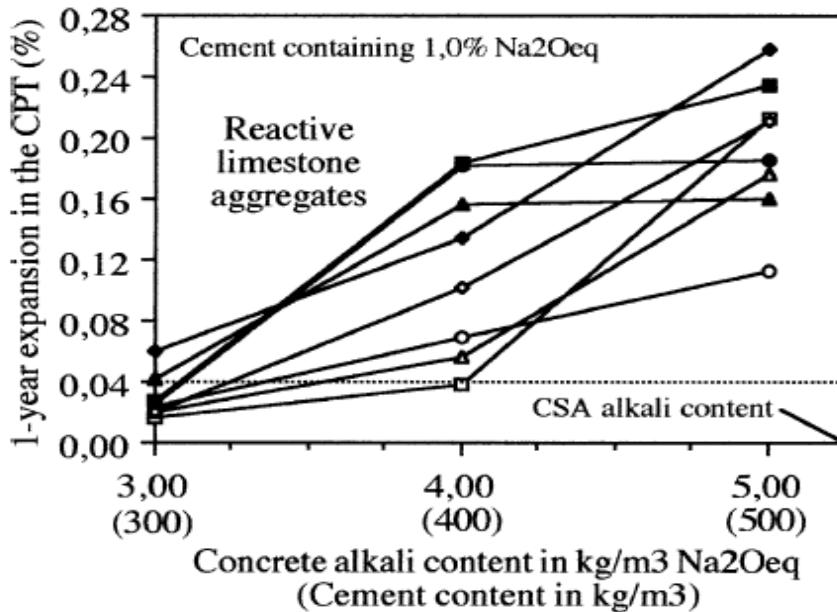


Figure 2.14 : Expansion finale d'un essai accéléré ASTM C1293 pour différents granulats réactifs et différents dosages de ciment (Bérubé et al., 2000)

L'effet de la quantité d'alcalis sur la cinétique de la RAS est moins évident et non quantifié dans la littérature. Il apparaît que plus la quantité d'alcalis est élevée, plus la cinétique de la RAS est rapide (Sibbick et Page, 1992; Bavasso et al., 2020). L'effet sur la cinétique semble cependant dépendre du type de granulat réactif et de son degré de réactivité (Sibbick et Page, 1992; Fournier et Bérubé, 2000; Bavasso et al., 2020).

2.3.5.2 Effet sur les propriétés mécaniques

Smaoui et al. (2005a) étudient l'effet du surdosage en alcalis sur les propriétés mécaniques d'un mélange usuellement utilisé pour des essais d'expansions accélérées (voir section 2.4.2) (1,25% de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ par masse de ciment pour le mélange surdosé, contre 0,6% de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ pour le mélange non surdosé). Ils montrent que la résistance en compression (-20%), la résistance en traction directe (-13%) et indirecte (-10%), le module de rupture (-6%) (définies à la section 2.5.3) et le module élastique (-5%) sont plus faibles pour le mélange surdosé en alcalis. Smaoui et al. (2005a) expliquent ce phénomène à l'échelle de la microstructure : le mélange surdosé en alcalis possède une microstructure plus réticulaire et plus poreuse. Ainsi, la présence excessive d'alcalis pour

accélérer la RAS provoque des pertes de propriétés mécaniques avant même que la RAS ne se développe.

2.3.6 Effets d'échelles sur l'expansion de RAS

Multon et Sellier (2016) identifient trois sources effets d'échelles souvent concomitants lors d'essais d'expansion en laboratoire qui nécessitent une étude découpée approfondie :

- Effet d'échelle causé par le transport hydrique : c'est la variation du degré de saturation du béton dans l'espace et le temps (Multon et al., 2005; Poyet et al., 2006; Multon et Toutlemonde, 2010), qui ne sera pas développé dans cette revue.
- Effet d'échelle causé par le transport ionique : c'est le phénomène de lessivage des alcalis, évoqué par de nombreux auteurs (Landry, 1995; Thomas et al., 2006; Lindgård et al., 2013; Multon et Sellier, 2016; Costa et al., 2017; Sinno et Shehata, 2019; Bavasso et al., 2020).
- Effet d'échelle causé par le transport du gel produit de la RAS dans le béton : c'est l'effet de la perméation du gel (Zhang et al., 1999; Gao et al., 2013; Takahashi et al., 2016; Kawabata et al., 2019), notamment modélisé par Takahashi et al. (2016).

2.3.6.1 Effet du lessivage des alcalis

Le lessivage des alcalis s'effectue par ruissellement de l'eau directement sur les spécimens, mais aussi par condensation de l'eau sur la surface des spécimens. Le gradient de concentration en ions entre l'eau extérieure pure et la solution interstitielle riche en alcalis provoque le transport par diffusion des alcalis vers l'extérieur. Ce lessivage est accentué par les variations de température, notamment lors des prises de mesures des essais accélérés. Selon Thomas et al. (2006), lors d'un essai standard ASTM C1293, jusqu'à 35% des alcalis initialement au sein du béton sont lessivés. Costa et al. (2017) ont établi une corrélation entre le ratio du volume du contenant hermétique de confinement sur le volume de béton confiné et le lessivage des alcalis. Plus le volume de vapeur d'eau dans le contenant est faible, plus le lessivage est faible.

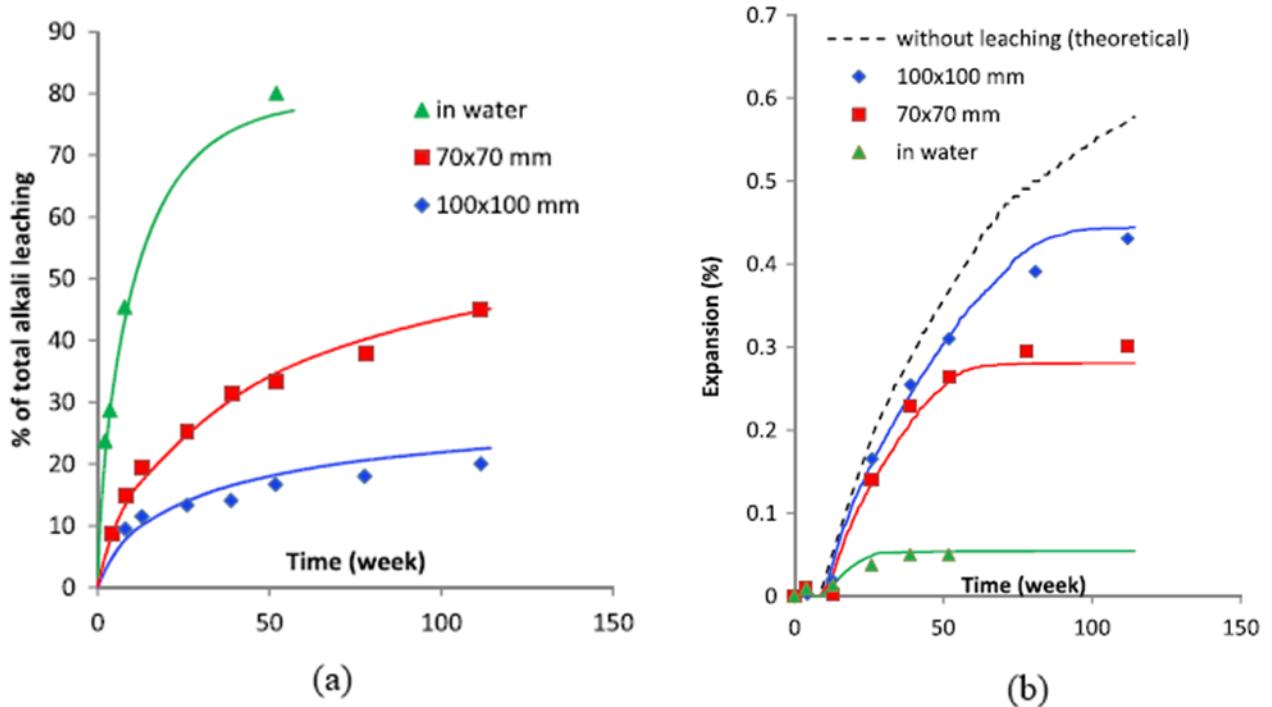


Figure 2.15 : (a) Lessivage d’alcalis total et (b) Expansion pour différentes sections de prisme et de confinement selon l’étude de Lindgård et al. (2013); Saouma (2014) (points expérimentaux) et modélisation numérique de Multon et Sellier (2016) (traits continus)

Lindgård et al. (2013) confirment que des prismes 100*100*280mm sont moins affectés par le lessivage des alcalis et s’expandent plus que des prismes 70*70*280mm (Figure 2.15 (a) et (b)). Ils affirment que pour un mélange et des conditions identiques, plus la section transversale du spécimen est grande, moins la quantité d’alcalis lessivée est importante, car les alcalis ont une plus grande distance à parcourir pour se diffuser à l’extérieur du spécimen. En condition complètement immergée dans l’eau, le lessivage des alcalis est très important et l’expansion finale est très faible.

2.3.6.2 Effet de la perméation du gel

À la connaissance de l’auteur, une seule étude avec campagne expérimentale et modélisation numérique évoque l’effet de la perméation du gel (Takahashi et al., 2016). Ces derniers montrent que plus un spécimen est grand, plus son expansion moyenne et finale est élevée. Pour cela, ils mesurent l’expansion moyenne de cubes de longueur 1cm, 2cm, 4cm et 10cm d’un béton avec un sable fin réactif. Les spécimens sont confinés avec des films plastiques pour spécifiquement minimiser le lessivage des alcalis. Des fissures multidirectionnelles surfaciques n’ont été observées

que sur les plus gros spécimens, alors que de l'exsudation de gel a été constatée sur tous les spécimens.

Selon cette étude, cet effet d'échelle s'explique par la migration du gel dans le spécimen : l'exsudation du gel produit de la RAS réduirait la pression interne générée par le gel et son transport. Plus le spécimen est petit, plus le gel peut s'évacuer rapidement par exsudation, donc la pression interne est moins importante au cours de la réaction et l'expansion finale est plus faible, comme illustrée sur la Figure 2.16. Sur cette même figure, ils comparent ce phénomène à l'expansion thermique, plus le spécimen est petit, plus l'énergie thermique s'évacue rapidement.

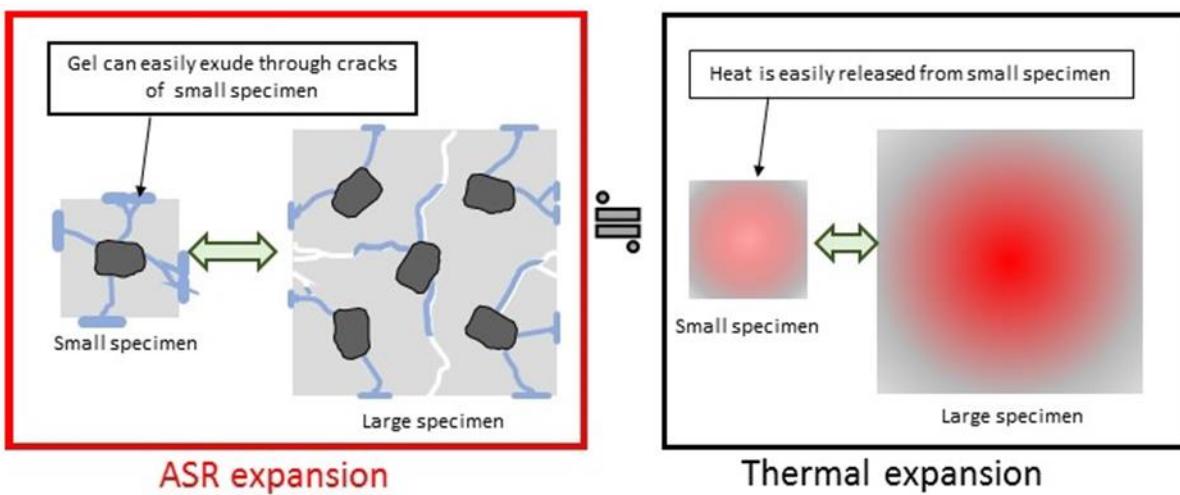


Figure 2.16 : Comparaison des effets d'échelle pour une expansion causée par la RAS et pour une expansion thermique (Takahashi et al., 2016)

Les auteurs suggèrent notamment que l'effet d'échelle causé par la perméation du gel est plus important que l'effet d'échelle causé par le lessivage des alcalis lorsque la cinétique de la RAS est rapide.

Ce processus de perméation dépend de la viscosité du gel. Et cette viscosité est influencée par la température (Kawabata et al., 2019) et par la composition chimique du gel (Panesar et Gautam, 2016; Gholizadeh-Vayghan et al., 2019).

2.3.6.3 Conclusion sur les effets d'échelles

De manière générale, les études s'intéressant aux effets d'échelles semblent indiquer que plus les spécimens sont grands, plus leur expansion finale sera élevée (Multon et Sellier, 2016), mais cette

expansion sera atteinte plus tardivement. Le lessivage des alcalis semble être le phénomène le plus prépondérant causant les effets d'échelles observés par de nombreux chercheurs.

2.3.7 Effet de la géométrie du spécimen

2.3.7.1 Effet sur l'expansion

Les études qui mentionnent l'effet de la géométrie du spécimen sur l'expansion négligent souvent l'effet de la direction de coulée, et l'effet de la taille du granulat par rapport aux dimensions du spécimen (Ahmed et al., 2003; Smaoui et al., 2004; Sinno et Shehata, 2019; Diab et al., 2020). Le lessivage des alcalis est quantifié et est plus important pour les prismes, mais les sections transversales des prismes et des cylindres ne sont jamais identiques : les cylindres ayant toujours une plus grande section transversale que les prismes dans toutes les comparaisons. Ce qui revient plus à étudier un effet d'échelle.

L'étude de Smaoui et al. (2004) est la plus rigoureuse à la connaissance de l'auteur : même direction de coulée, et mesure de l'expansion longitudinale et transversale pour des prismes 75*75*300mm et des cylindres 100*200mm. Cette étude indique que l'expansion volumétrique ne diffère pas significativement entre les deux géométries, mais que l'anisotropie d'expansion est plus importante pour les cylindres.

2.3.7.2 Effet sur la fissuration

La géométrie du spécimen influence le patron de fissuration surfacique généré par la RAS (Fournier et Bérubé, 2000; Ahmed et al., 2003; Giaccio et al., 2019). Par exemple, Ahmed et al. (2003) relèvent qu'une géométrie cylindrique provoque une fissuration axisymétrique, alors qu'une géométrie prismatique génère une fissuration plutôt dans l'axe long du prisme. Cet effet est plus ou moins important selon les dimensions du spécimen. De plus, le patron de fissuration externe ne reflète pas l'état de fissuration interne (Figure 2.9).

2.3.8 Effet de la taille du granulat

2.3.8.1 Effet du diamètre maximal du granulat

Beaucoup d'études (Zhang et al., 1999; Multon et al., 2008; Multon et al., 2010; Gao et al., 2013; Gautam et al., 2017; Giaccio et al., 2019) indiquent que la proportion et la taille du granulat réactif

impactent grandement l'expansion causée par la RAS. Il existerait une dimension critique de granulat réactif pour laquelle l'expansion est maximale : ce phénomène est qualifié d'effet pessimum. La plupart des études sur l'effet pessimum se sont concentrées sur des granulats réactifs fins dépassant rarement 2,5mm de diamètre maximal. Le diamètre critique du granulat réactif pour maximiser l'expansion varie selon le type et la composition du granulat réactif, mais se situe généralement entre 0,5mm et 2mm (Gautam et al., 2017).

Multon et al. (2010) assertent que pour maximiser l'expansion lors un essai accéléré et un type de granulat réactif, le diamètre du granulat doit être idéal pour remplir les porosités connectées du béton, et pour être pénétré rapidement et attaqué par les alcalis de la solution interstitielle.

Zhang et al. (1999) et Gao et al. (2013) montrent cependant qu'un effet d'échelle a lieu entre la taille du granulat et la taille du spécimen. En comparant uniquement l'expansion finale de prisme de mortier (essai accéléré de la norme ASTM C1260) de granulat réactif de différentes granulométries et pour différentes dimensions de prismes, Gao et al. (2013) montrent qu'un effet pessimum a lieu pour le prisme 20*20*160mm, mais que cet effet pessimum n'est pas constaté pour le prisme 70*70*280mm (Figure 2.17 (a)).

Ils proposent une explication à cet effet d'échelle : plus le rapport de diamètre du granulat sur la taille du spécimen est élevé, plus la concentration de contrainte est importante autour du granulat (Figure 2.17 (b)) et plus la fissuration est rapide autour de ce granulat, ce qui permet à une partie du gel produit de la réaction d'occuper ces nouvelles fissures, de réduire la pression interne de gonflement et donc de réduire l'expansion macroscopique.

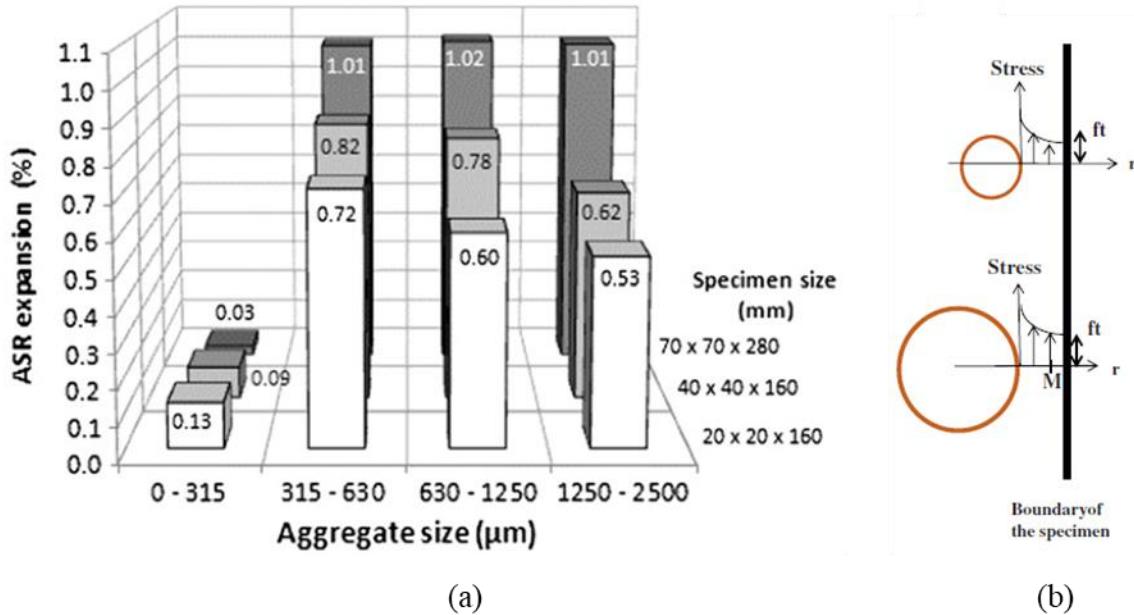


Figure 2.17 : (a) Expansion finale de spécimen pour différentes granulométries de granulats réactifs et différentes dimensions de spécimen. (b) Explication de l'effet d'échelle observé (Gao et al., 2013).

Gautam et al. (2017) soulignent que l'effet de la taille de gros granulats ($> 5 \text{ mm}$) sur l'expansion est mal connu et les résultats de la littérature ne s'accordent pas. De plus, les granulométries avec de gros granulats sont encore plus larges et l'expansion macroscopique d'un spécimen pourrait être composée de différentes contributions individuelles des différents fuseaux granulométriques.

2.3.8.2 Effet de la granulométrie

Ainsi, Gautam et al. (2017) se sont intéressés à l'effet d'une variation des fuseaux granulométriques requis par la norme d'essai d'expansion accéléré ASTM C1293 sur l'expansion causée par la RAS. Ils relèvent que l'expansion d'un mélange fin (avec 10% de masse de granulat fin en plus et 10% de masse de gros granulats en moins par rapport au mélange) était 50% plus importante que l'expansion d'un mélange standard de la norme ASTM C1293. En revanche, les dégradations des propriétés mécaniques (module de rupture, module d'élasticité et f'_c) engendrées par la RAS sont peu affectées par la variation de granulométrie des mélanges.

À la connaissance de l'auteur, aucune étude sur l'effet de très gros granulats typique d'ouvrages hydrauliques ($> 25\text{mm}$) sur l'expansion causée par la RAS n'a été réalisée.

2.4 Essais d'expansions accélérés

Au sein d'ouvrages en conditions réelles (barrages, ponts ...), les premiers signes distinctifs de la RAS s'observent usuellement au bout de 5 à 10 ans, et la réaction continue souvent de se développer jusqu'à 50 ans après la construction de l'ouvrage. Ainsi, pour étudier la RAS sur une échelle de temps raisonnable en laboratoire, des essais accélérés avec des conditions normées ont été mis en place.

2.4.1 Essai accéléré en bain d'alcalis (ASTM C1260)

Les conditions de l'essai accéléré ASTM C1260 avec prisme de mortier sont résumées au Tableau 2.1. Cet essai est très utilisé en phase préliminaire pour sa rapidité d'exécution, mais il a tendance à surestimer le potentiel réactif du granulat (Fournier et Bérubé, 2000) et devrait être utilisé en conjonction avec l'essai ASTM C1293.

Tableau 2.1 : Paramètres des normes ASTM C1260 et ASTM C1293

	ASTM C1260	ASTM C1293
Mélange	Mortier	Béton
Diamètre maximum de granulat	4,25 mm	19 mm
Surdosage en alcalis du mélange	x	1,25 % de la masse de ciment (420 kg/m ³) en Na ₂ O _{eq}
Durée de l'essai	14 jours	365 jours
Cure	24h dans le moule puis 24h dans un bain d'eau à 23°C	24h dans le moule à 23°C
Température de confinement	80°C	38°C
Conditions hydriques	Dans un bain de 1N de NaOH	Dans une chaudière hermétique avec un fond d'eau
Dimensions du prisme (mm*mm*mm)	25*25*285	70*70*285
Seuil de réactivité	0,1% à 14 jours	0,04% à 365 jours

2.4.2 Essai accéléré avec surdosage en alcalis (ASTM C1293)

Les conditions de l'essai accéléré ASTM C1293 sont aussi résumées au Tableau 2.1. Cet essai est plus long, mais plus représentatif des conditions rencontrées sur les ouvrages. La quantité de ciment est cependant plus élevée et la répartition granulométrique est différente de celle des mélanges usuels de chantiers. Cet essai accéléré est sujet au lessivage des alcalis par condensation de l'eau sur la surface des prismes (Thomas et al., 2006; Yamada et al., 2014; Costa et al., 2017; Sinno et Shehata, 2019; Bavasso et al., 2020).

L'essai est accéléré grâce à un surdosage en alcalis du mélange, en ajoutant généralement des pastilles de NaOH dans l'eau de gâchage. La quantité d'alcalis totale est la somme des alcalis présents dans le ciment et des alcalis ajoutés dans l'eau de gâchage, et est quantifiée en $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$. Le calcul de la quantité de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ se fait avec l'équation (2.5) et la conversion du NaOH en Na_2O avec l'équation (2.6). Les facteurs de conversions sont des rapports de masses molaires.

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O} \quad (2.5)$$

$$\text{Na}_2\text{O} = 0,775 \text{ NaOH} \quad (2.6)$$

2.4.3 Vers de nouveaux essais accélérés

Les deux essais décrits ci-haut sont très utilisés par les chercheurs et l'industrie, mais ils ne sont pas idéaux. De nombreux travaux récents s'efforcent de développer un essai accéléré plus robuste et plus rapide. Beaucoup se basent sur l'essai ASTM C1293 et tous s'y comparent.

2.4.3.1 Améliorations pour accélérer l'essai

L'élévation de la température de confinement apparaît comme la méthode la plus simple à mettre en œuvre pour accélérer davantage l'essai d'expansion. Ainsi, Gautam et Panesar (2017) montrent qu'un essai accéléré de type ASTM C1293 sous un confinement à 38°C ou 50°C provoque la même tendance et expansion finale des spécimens, mais trois fois plus rapidement à 50°C, et sans différence apparente sur l'évolution des propriétés mécaniques (**Figure A.2**). Cependant, augmenter la température jusqu'à 60°C et au-delà semble réduire l'expansion finale (Kawabata et al., 2018; Kawabata et al., 2019; Bavasso et al., 2020), notamment en favorisant le lessivage des alcalis comme évoqué à la section 2.3.3.

Bavasso et al. (2020) montrent qu'immerger le spécimen dans une solution d'alcalis de concentration identique à la solution interstitielle pourrait permettre de réduire le temps de l'essai par trois.

2.4.3.2 Améliorations pour réduire le lessivage des alcalis

Le lessivage des alcalis (détaillé à la section 2.3.6) est un problème majeur de l'essai traditionnel ASTM C1293 qui réduit sa fiabilité. Pour limiter ce phénomène, Lindgård et al. (2013) proposent d'augmenter la section du spécimen, et Costa et al. (2017) suggèrent de réduire le ratio volume net du contenant hermétique/volume du spécimen. Kawabata et al. (2018) proposent d'entourer le spécimen d'un linge imbibé d'alcalis avec une concentration identique à la solution interstitielle du spécimen. Toutes ces approches fonctionnent, mais plus d'essais avec de grandes variétés de granulats réactifs sont nécessaires pour confirmer la robustesse des méthodologies.

2.5 Effet de la RAS sur les propriétés mécaniques

Les effets de la RAS sur la résistance en compression, le module élastique, la résistance en traction et l'énergie de fissuration seront présentés. L'effet de la cinétique de la réaction sur les pertes de propriétés mécaniques, ainsi qu'une classification de l'endommagement seront aussi rapportés. Les propriétés du gel produit de la RAS sont détaillées en Annexe A.

2.5.1 Effet sur la résistance en compression

La résistance en compression (f'_c) est la propriété mécanique la plus évaluée en littérature. L'essai qui permet sa caractérisation (ASTM C39) est rapide et simple à réaliser. Pourtant f'_c est l'indicateur d'endommagement de la RAS le moins fiable (Swamy et Al-Asali, 1988a; Fournier et Bérubé, 2000; Smaoui et al., 2005b; Esposito et al., 2016; Sanchez et al., 2017; Kongshaug et al., 2020).

Esposito et al. (2016) regroupent les tendances d'évolution relative de la résistance en compression de 10 études sur 12 sélectionnées de la littérature en fonction de l'expansion axiale générée par la RAS (Figure 2.18). Ces études intègrent des types de granulats réactifs très variés, des rapports E/C variant de 0,30 à 0,61, des surdosages en alcalis de 0,4% à 2,25% en $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ et des conditions de confinement différentes.

Malgré de fortes disparités entre les études, une tendance se dégage : la résistance en compression augmente d'environ 15% dans les zones d'expansions modérées, puis diminue jusqu'à 46% lorsque l'expansion augmente.

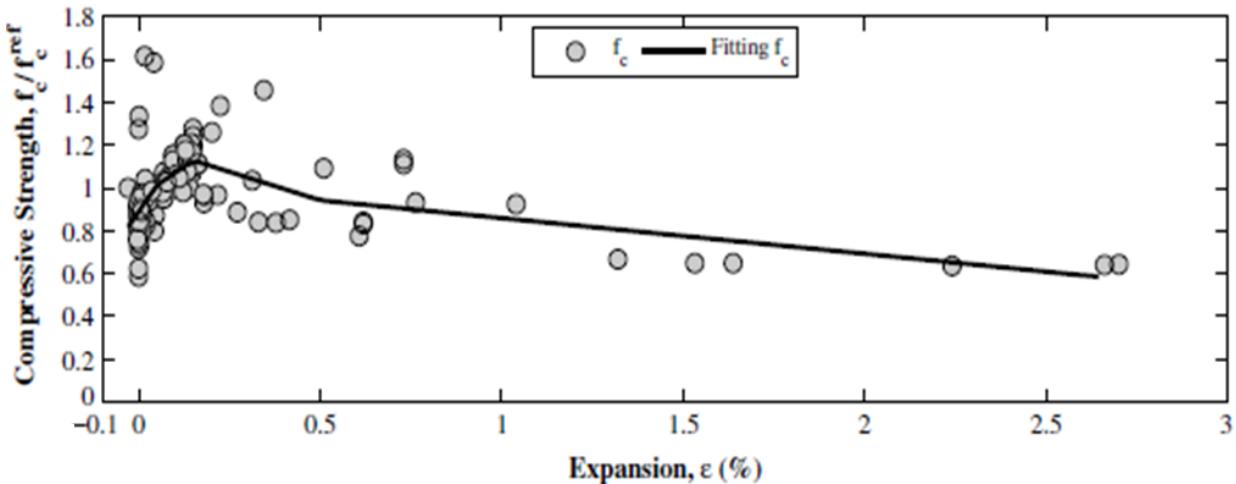


Figure 2.18 : Évolution relative de la résistance en compression en fonction de l'expansion axiale (Esposito et al., 2016)

L'évolution générale de la résistance en compression en fonction du développement de la RAS est affectée par deux phénomènes d'effets opposés :

- La poursuite du processus d'hydratation du ciment sous des conditions de cures optimales (usuuellement 38°C ou plus et 100% HR) lors du confinement accélérant la RAS.
- L'expansion provoquée par la RAS qui génère de la microfissuration et dégrade le béton.

Au début, le processus d'hydratation du ciment est prépondérant et masque une potentielle dégradation de la résistance en compression. La pression de pore générée par le gel (produit de la RAS) peut aussi contribuer à résister aux chargements en compression. Plus la RAS se développe (l'expansion augmente), plus l'endommagement de la résistance en compression est marqué. Esposito et al. (2016) recommandent de ne plus utiliser les formules empiriques permettant d'obtenir E et f'_t à partir de f'_c lorsque le béton est affecté par la RAS.

La diminution de la résistance en compression semble plus importante lorsque l'orientation des fissures d'endommagement causées par la RAS est parallèle à la direction de chargement de l'essai de compression (Giaccio et al., 2008; Kongshaug et al., 2020).

2.5.2 Effet sur le module d'élasticité

Le module d'élasticité du béton est de loin la propriété mécanique la plus sensible à l'endommagement causé par la RAS. Il diminue sensiblement de 20% à 30% dès l'apparition des premières fissures à de faibles expansions.

Dans la même étude d'Esposito et al. (2016), les auteurs regroupent les tendances d'évolution relative du module d'élasticité statique (norme ASTM C469) et dynamique (norme ASTM C215) de 9 et 5 études respectivement sur 12 sélectionnées de la littérature en fonction de l'expansion axiale causée par la RAS (Figure 2.19).

Malgré les conditions très différentes de ces études, il apparaît clairement que le module d'élasticité diminue significativement lorsque l'expansion provoquée par la RAS augmente. Une diminution de 30% est en moyenne constatée pour une expansion de 0,25%. Les modules d'élasticité statique et dynamique ont la même évolution.

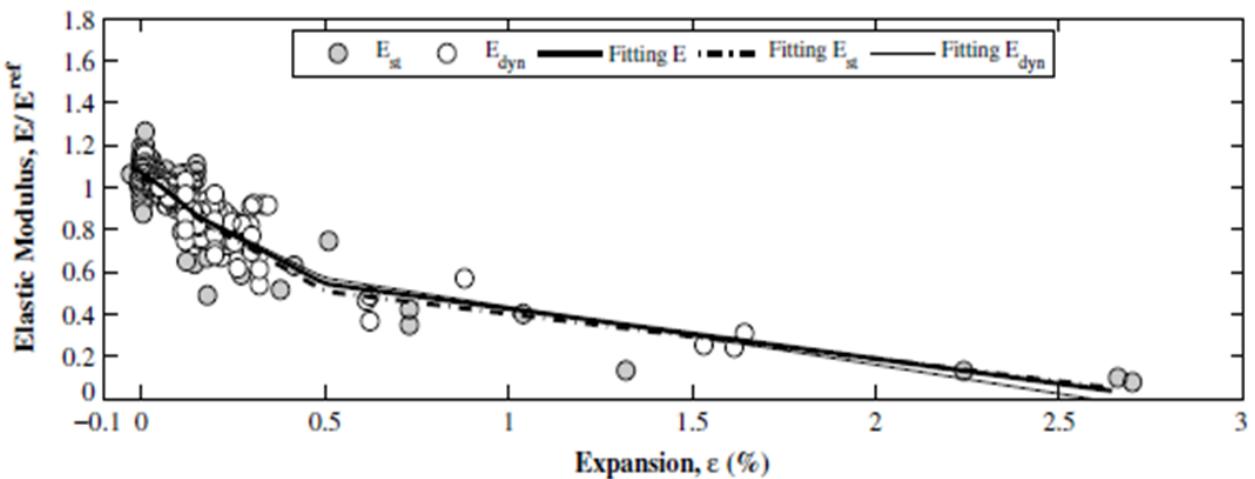


Figure 2.19 : Évolution relative du module d'élasticité statique et dynamique en fonction de l'expansion axiale (Esposito et al., 2016)

De plus, Smaoui et al. (2005b) montrent que les modules d'élasticité déterminés par essai de compression et par essai de traction sont très similaires, même lorsque la RAS se développe. Ils constatent aussi qu'à une expansion axiale donnée de 0,1%, la diminution du module d'élasticité d'un mélange avec du sable fin réactif (sable du Texas) est plus grande (-43%) que la diminution module d'élasticité d'un mélange avec de gros granulats réactifs (Calcaire de Québec) (-20%). Ils en concluent que la fissuration provoquée par la RAS est localisée et contenue plus longtemps dans les granulats pour les mélanges à gros granulats réactifs, alors que la fissuration se propage rapidement dans la pâte de ciment et provoque plus de dommage pour les mélanges avec du sable réactif.

Kongshaug et al. (2020) indiquent que l'orientation et l'intensité de la microfissuration engendrée par la RAS provoquent une anisotropie de la réduction du module d'élasticité au sein du béton affecté. Plus particulièrement, Abd-Elssamad et al. (2020) montrent que la diminution du module d'élasticité est plus grande quand les fissures de la RAS sont majoritairement orientées perpendiculairement à la direction de chargement de l'essai de caractérisation.

2.5.3 Effet sur la résistance en traction

2.5.3.1 Essai de caractérisation

Il existe trois grandes familles d'essai de caractérisation en traction, schématisées à la Figure 2.20. L'essai de traction directe uniaxial permet de caractériser la résistance en traction directe, l'essai brésilien ou essai de traction indirecte (ASTM C496) permet de caractériser la résistance en traction indirecte et l'essai de flexion (ASTM C78 ou ASTM C293) permet de caractériser le module de rupture aussi nommé résistance en flexion.

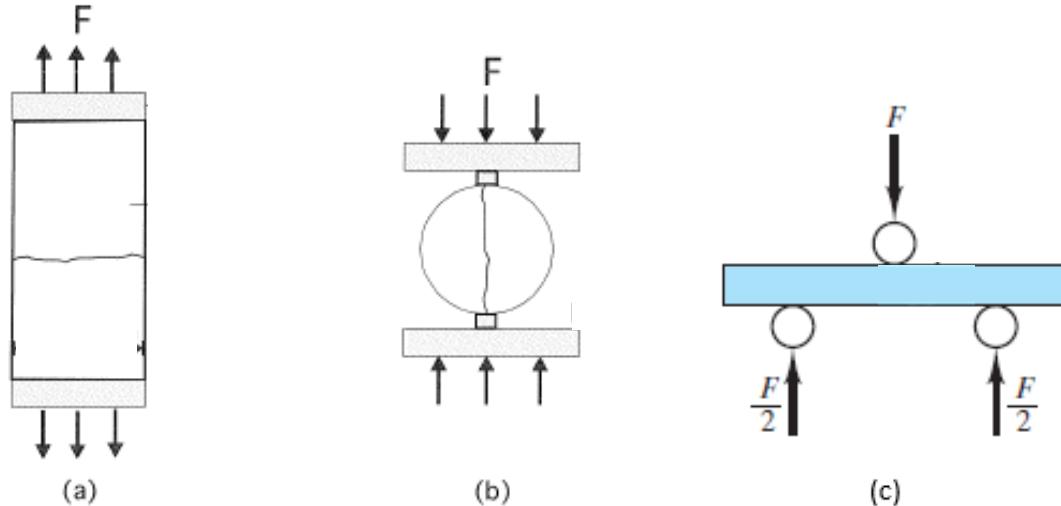


Figure 2.20 : (a) Essai de traction directe (b) Essai de traction indirecte (Essai brésilien) (Siemes et al., 2002) (c) Essai de flexion

Contrairement à la résistance en compression et au module d'élasticité, la méthode de caractérisation a une grande influence sur la valeur de résistance obtenue. C'est d'autant plus vrai lorsque le béton est affecté par la RAS (Pleau et al., 1989; Fournier et Bérubé, 2000; Siemes et al., 2002; Esposito et al., 2016).

D'après Siemes et al. (2002), le transfert de contrainte lors d'un essai de traction indirecte est davantage similaire à celui d'un essai de compression, plutôt qu'à celui d'un essai de traction directe. C'est pourtant cet essai Brésilien qui est le plus répandu. L'essai de traction directe nécessite un contrôle en déplacement et un centrage parfait de la charge, plus difficile à mettre en œuvre.

2.5.3.2 Influence de la RAS

Dans la même étude d'Esposito et al. (2016), les auteurs regroupent les tendances d'évolution relative de la résistance en traction indirecte ($f_{t,sp}$), de la résistance en traction directe ($f_{t,dir}$) et du module de rupture (MOR) d'études sélectionnées dans la littérature en fonction de l'expansion axiale causée par la RAS (Figure 2.21).

Pour de faibles expansions (<0,2%), les propriétés en traction ne semblent pas affectées. Pour des expansions environ supérieures à 0,25%, le module de rupture et la résistance en traction indirecte

diminuent significativement, alors que la résistance en traction directe ne semble affectée qu'à des expansions supérieures à 2%. À des expansions très importantes, le module de rupture diminue de 89%, la résistance en traction indirecte de 53% et la résistance en traction directe de 38%.

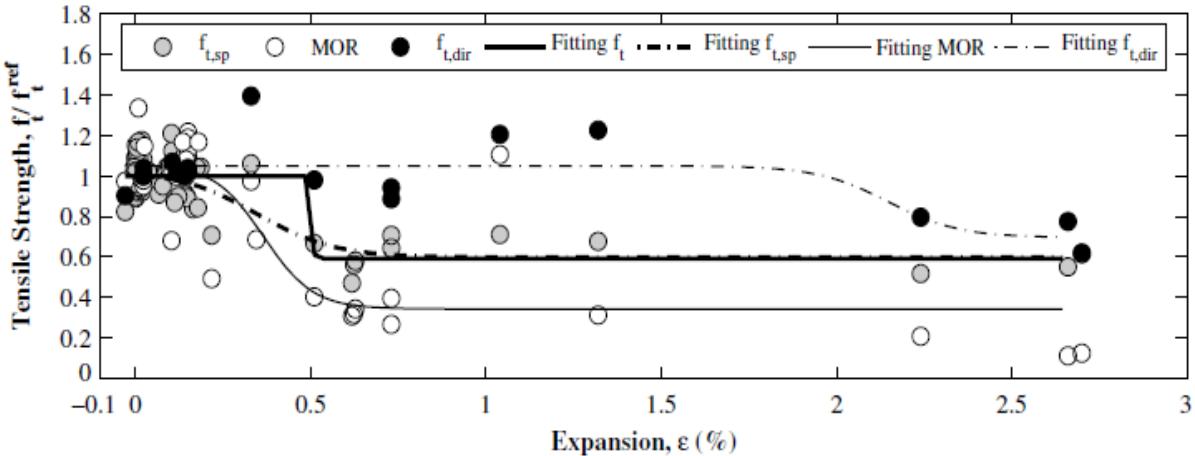


Figure 2.21 : Évolution relative de la résistance en traction indirecte ($f_{t,sp}$), directe ($f_{t,dir}$) et du module de rupture (MOR) en fonction de l'expansion axiale (Esposito et al., 2016)

Cependant, la synthèse de Esposito et al. (2016) ne considère que l'étude de Ahmed et al. (2003) pour obtenir l'évolution de la résistance en traction directe. Siemes et al. (2002) indiquent que la résistance en traction directe de carottes prélevées sur des ouvrages est très faible. La résistance en traction diminue jusqu'à 82% pour des expansions entre 0,5% et 1% alors que des diminutions significatives ne sont pas observées sur la résistance à la traction indirecte et la résistance en compression. Ils expliquent néanmoins que ces faibles valeurs sont peut-être causées par la grande sensibilité de l'essai de caractérisation à l'excentricité du chargement et/ou du patron de fissuration de l'endommagement de la RAS, la présence plus probable d'un défaut dans la plus grande section sollicitée en traction, ou bien des effets structuraux des ouvrages indépendants de la RAS (fatigue, retrait, ...). Enfin, Smaoui et al. (2005b) indiquent une diminution de 52% de cette résistance en traction directe pour du sable fin réactif à 0,39% d'expansion, et une diminution de 35% à 0,16% d'expansion pour de gros granulats (calcaire de Québec).

2.5.4 Effet de la cinétique de la réaction

La cinétique de la RAS est directement liée au type de granulat réactif et son degré de réactivité lorsque les paramètres de confinement (température, humidité relative) sont identiques. Notamment, le degré de réactivité influence l'évolution des propriétés mécaniques lorsque la RAS se développe (Swamy et Al-Asali, 1988b; Ahmed et al., 2003; Marzouk et Langdon, 2003; Giaccio et al., 2008; Abd-Elssamad et al., 2020).

Une récente étude extensive de la littérature réalisée par Abd-Elssamad et al. (2020) différencie le degré de réactivité en trois catégories selon le taux d'expansion axiale par an : réactivité très rapide (VHR) pour un taux d'expansion supérieur à 0,24%/an, réactivité rapide (HR) pour un taux d'expansion entre 0,12%/an et 0,24%/an, et réactivité lente (SR) pour un taux d'expansion inférieur à 0,12%/an. Abd-Elssamad et al. (2020) montrent à la Figure 2.22 l'évolution normalisée des propriétés mécaniques de résistance en compression, de module d'élasticité et de résistance en traction indirecte pour chacun des trois degrés de réactivités, en fonction de l'expansion volumétrique. Cette expansion est estimée pour la majorité des études sélectionnées, et cette estimation est basée sur la quantification du phénomène d'anisotropie de l'expansion libre évoquée à la section 2.3.2, et sur l'effet de la géométrie des spécimens.

Au même niveau d'expansion volumétrique, les bétons avec des granulats de réactivité très élevée (VHR) ont des propriétés mécaniques significativement plus faibles (Figure 2.22 (a)) que les bétons avec des granulats de réactivité lente (SR) (Figure 2.22 (c)). Comme évoqué à la section 2.5.1, le béton est soumis à l'effet concourant du processus d'hydratation et du processus d'endommagement de la RAS. Lorsque le processus d'endommagement est plus rapide que le processus d'hydratation, les propriétés mécaniques sont impactées plus rapidement et plus fortement (Abd-Elssamad et al., 2020).

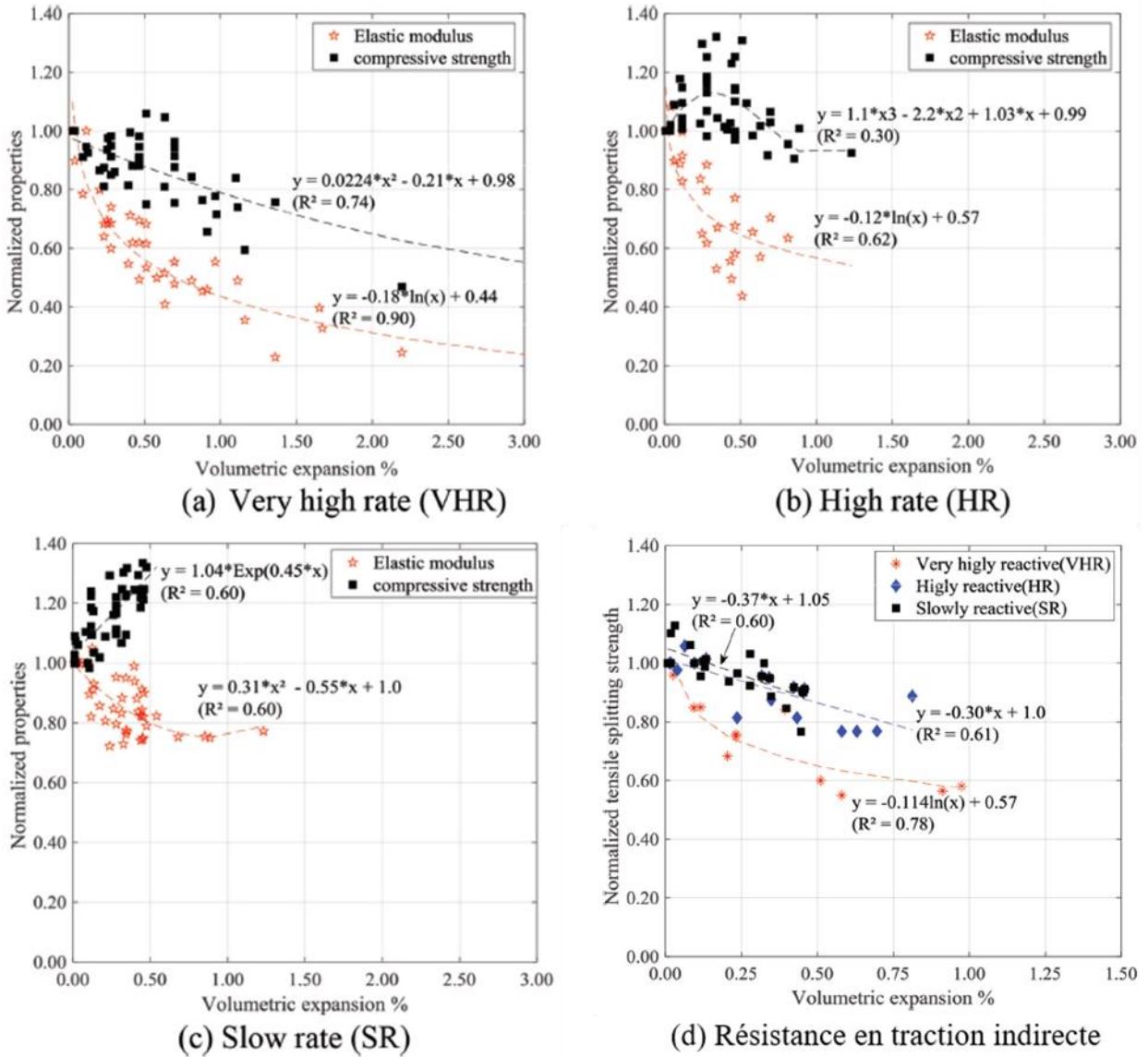


Figure 2.22 : Effet du degré de réactivité de la RAS sur l'évolution de la résistance en compression, du module d'élasticité ((a), (b) et (c)) et de la résistance en traction indirecte (d) tiré de 17 études de la littérature (Abd-Elssamad et al., 2020)

2.5.5 Classification de l'endommagement

Une classification de l'endommagement causée par la RAS basée sur l'expansion et les pertes de propriétés mécaniques est proposée par Sanchez et al. (2017) au Tableau 2.2. Cette classification est issue d'une campagne expérimentale extensive réalisée par Leandro Sanchez avec dix types de

granulats réactifs et vingt mélanges différents avec des résistances en compression de 25, 35 et 45 MPa (Sanchez, 2014).

Tableau 2.2 : Classification de l'endommagement causée par la RAS (adapté de Sanchez et al. (2017))

Classification de l'endommagement	Niveau d'expansion longitudinale	Diminution du module d'élasticité	Diminution de la résistance en compression	Diminution de la résistance en traction
Négligeable	0,00 à 0,03 %	-	-	-
Marginal	0,04	-5 à -37 %	+10 à -15 %	-15 à -60 %
Modéré	0,11	-20 à -50 %	0 à -20 %	-40 à -65 %
Élevé	0,2	-35 à -60 %	-13 à -25 %	-45 à -80 %
Très élevé	0,30 à 0,50 %	-40 à -67 %	-20 à -35 %	-

Il est à noter que la résistance en traction n'est pas évaluée par l'un des essais usuels illustrés à la Figure 2.20, mais avec un essai de traction par pression (« pressure tension test »). Une pression est appliquée radialement autour de la carotte à l'aide d'un gaz, ce qui génère un mode de sollicitation biaxial.

Cette classification développée à l'aide d'essais en laboratoire semble pertinente pour évaluer l'état de structures réelles affectées par la RAS d'après Sanchez et al. (2020). Ils notent que l'inspection visuelle externe n'est pas révélatrice de l'état d'endommagement interne de la structure à l'étude.

2.5.6 Effet sur l'énergie de fissuration

L'énergie de fissuration est sans doute la propriété mécanique du béton la moins évaluée dans le contexte d'un endommagement par la RAS. La difficulté de son obtention par essai mécanique par rapport aux autres propriétés, l'importance de l'effet d'échelle du spécimen testé, couplé à l'hétérogénéité du développement et de l'endommagement causé par la RAS contribuent à rendre l'énergie de fissuration évasive dans le cadre de la RAS. Cette propriété mécanique est pourtant essentielle comme intrant de la modélisation numérique ANLEF des ouvrages existants.

À la connaissance de l'auteur, sept études ont traité l'effet de la RAS sur l'énergie de fissuration, en utilisant l'essai de flexion trois-points (TPBT) ou l'essai de fendage (WST) (Rotter, 1996; Rotter et al., 1998; Giaccio et al., 2008; Miki et Tsukahara, 2016; Liaudat et al., 2018; Pathirage et al., 2019; Hayes et al., 2020).

2.5.6.1 Effet sur la courbe Effort-Déplacement

Telle que définie à la section 2.1.2, l'énergie de fissuration caractérisée expérimentalement est proportionnelle à l'aire sous la courbe Effort-Déplacement de l'essai de caractérisation. L'effet de la RAS sur cette courbe est donc essentiel à comprendre et caractériser.

La Figure 2.23 de l'étude de Rotter et al. (1998) présente les courbes Effort-Déplacement d'un spécimen de contrôle non affecté par la RAS et d'un spécimen affecté par la RAS avec une expansion axiale à 2 ans de 0,19%. L'effort au pic de chargement diminue lorsque le spécimen est affecté par la RAS, l'aire sous la courbe et donc l'énergie de fissuration diminue. Tous les auteurs constatent la plus grande ductilité de la courbe d'adoucissement post-pic des spécimens affectés par la RAS. Particulièrement, Giaccio et al. (2008) notent une augmentation de la non-linéarité avant le pic de chargement et un comportement adoucissant plus graduel en post-pic.

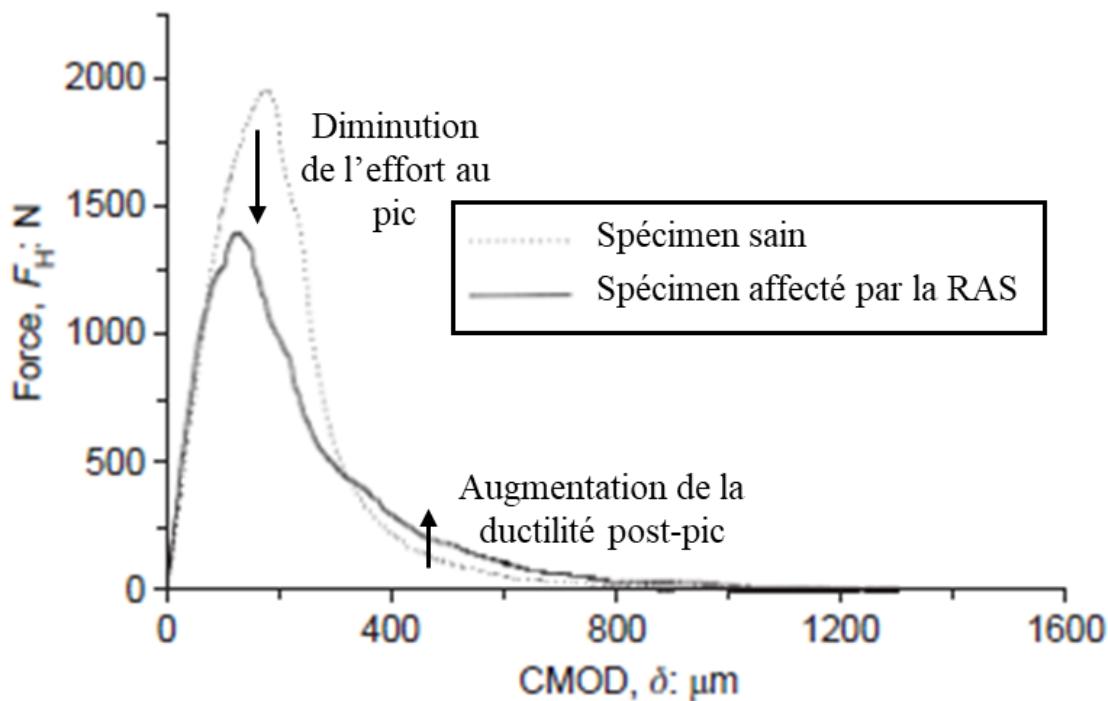


Figure 2.23 : Courbes Effort-CMOD pour un spécimen sain et un spécimen affecté par la RAS
(Rotter et al., 1998)

Ainsi, lorsque les spécimens sont affectés par la RAS, deux effets contraires sur la valeur de G_F sont observés sur la courbe Effort-Déplacement :

- Le pic correspondant à la force de macrofissuration diminue.
- La ductilité post-pic augmente pour une certaine valeur d'ouverture de fissure.

Ces deux effets peuvent survenir en même temps à différentes intensités : G_F peut donc parfois ne pas beaucoup varier.

2.5.6.2 Meilleure ductilité dans la courbe d'adoucissement

Cette plus grande ductilité observée par tous les auteurs étudiant l'effet de la RAS sur la mécanique de rupture du béton est plus ou moins marquée selon l'avancement, le type de granulat réactif et la cinétique de la RAS (Giaccio et al., 2008). Hayes et al. (2020) suggèrent un mécanisme de rupture sensiblement différent lorsque la RAS se développe. Selon eux, une instrumentation acoustique permettrait d'étudier l'effet de la RAS sur la formation et la propagation de la FPZ.

La plupart des auteurs estiment que ce gain de ductilité est causé par la ramifications (multifissuration) de la fissure principale de l'essai de caractérisation. Cette fissure principale se propage en partie en se connectant au réseau de fissures préexistant causé par la RAS. Ce gain de ductilité peut aussi être affecté lorsque le gel produit de la RAS cicatrice partiellement les fissures de la RAS à un certain avancement de la réaction (voir Annexe A).

Ce réseau d'endommagement varie fortement d'un spécimen à l'autre. Et l'orientation particulière de ce réseau (si l'expansion est restreinte par exemple) peut grandement influencer la ramifications de la fissuration de l'essai de caractérisation.

2.5.6.3 Effet de l'orientation du réseau de fissures

Hayes et al. (2020) étudient l'effet de l'orientation du réseau de fissures causé par la RAS sur l'énergie de fissuration. Pour contrôler la direction principale d'endommagement causé par la RAS, des cylindres de 66cm de diamètre sont restreints radialement par des tubes en acier. L'expansion est donc principalement selon l'axe du cylindre et le réseau de fissures se développe dans des plans perpendiculaires à cet axe. Des spécimens cubiques 200*200*100mm pour des essais WST sont sciés dans ces cylindres selon l'angle d'orientation de l'endommagement attendu (0° , 45° et 90° par rapport au ligament de fissuration). L'énergie de fissuration en fonction de ces orientations et à trois dates de mesures est tracée à la Figure 2.24.

Hayes et al. (2020) notent que les spécimens de contrôle (CON) ont une énergie de fissuration statistiquement égale ou supérieure à l'énergie de fissuration de la majorité des spécimens affectés par la RAS. Cependant, les spécimens avec une orientation d'endommagement perpendiculaire au ligament de fissuration (00D) ont une énergie de fissuration moyenne plus élevée que les spécimens de contrôle (CON). Ils expliquent que pour les spécimens affectés par la RAS, le réseau de fissures est activé par la fissuration principale de l'essai WST. Plus l'orientation de ce réseau de fissures est différente de l'orientation du ligament de fissuration mécanique de l'essai, plus la ramifications de la fissure du WST génère des surfaces fissurées et donc plus l'énergie de fissuration est importante. Au contraire lorsque le réseau de fissures est préférentiellement dans la direction du ligament de fissuration (90D), la fissure principale de l'essai de fendage se propage en se connectant au réseau existant, et l'énergie de fissuration nécessaire est plus faible.

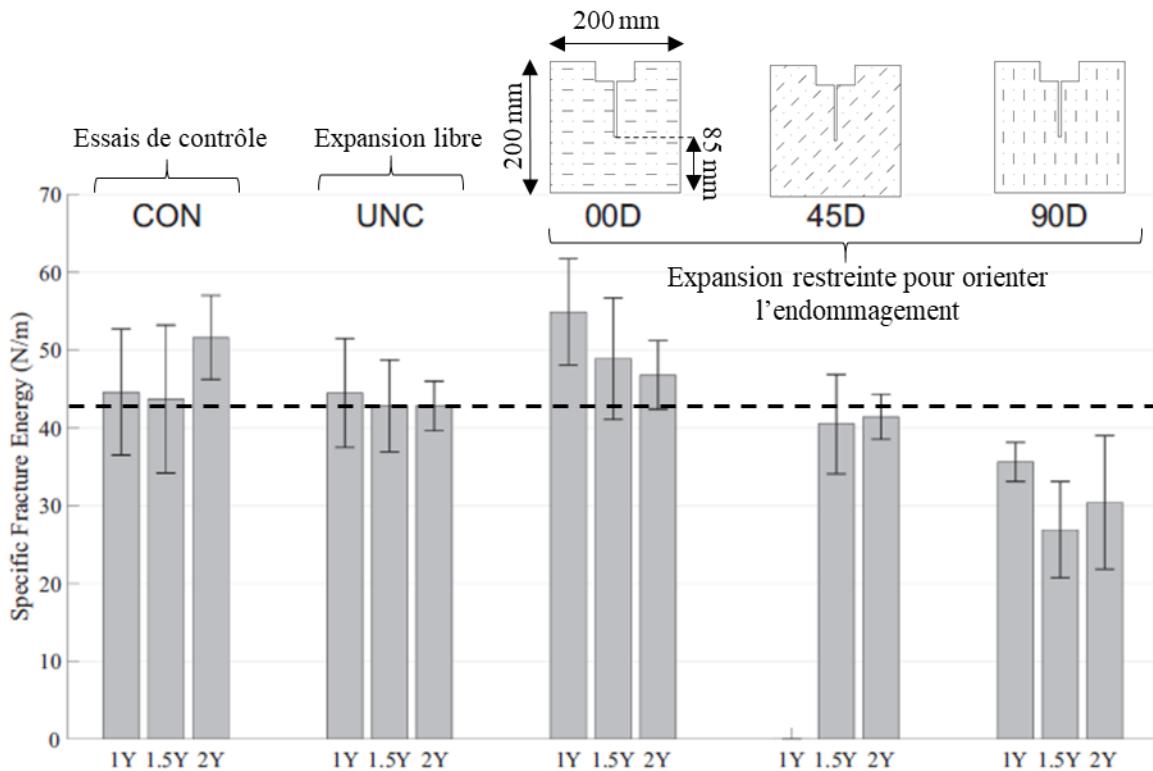


Figure 2.24 : Énergie de fissuration à 1 an, 1,5 an et 2 ans pour différentes orientations d'endommagement (adapté de Hayes et al. (2020))

2.5.6.4 Caractérisation de l'énergie de fissuration

Les paramètres et conclusions des études menées pour caractériser l'effet de la RAS sur l'énergie de fissuration sont résumés au Tableau 2.3. Le type d'essai, les dimensions des spécimens, les conditions de confinement, le rapport de la longueur du ligament de fissuration sur le diamètre maximal de granulat $\frac{L}{\phi_m}$, l'expansion atteinte après un an, l'effet qualitatif de la RAS sur G_F et le coefficient de variation sur la mesure de G_F sont décrits pour cinq études. Les coefficients de variation sont notés en $\pm X \%$ de la valeur moyenne. Cette notation sera utilisée dans le reste de ce mémoire.

Tableau 2.3 : Résumé des études de l'effet de la RAS sur l'énergie de fissuration

Auteurs	Type d'essai	Dimensions du spécimen testé (mm*mm*mm)	$\frac{L}{\phi_m}$	Confinement		Expansion axiale de spécimen compagnon à 1 an (%)	Effet qualitatif de la RAS sur G_F	Coefficient de variation (G_F)
				T°C	Conditions hydriques			
Rotter (1996)	WST	150*150*130	90/22 = 4	38	Bain de 1N NaOH	0,01 à 0,06%	Diminution peu significative	$\pm 5 \text{ à } 40\%$
Rotter et al. (1998)	WST	75*75*75	60/19 = 3,2	38	100% HR	0,190%	Diminution significative	$\pm 11\%$
Giaccio et al. (2008)	TPBT	75*105*430	52,5/19 = 2,8	38	Sac plastique avec 5mL d'eau	0,08 à 0,26%	Diminution peu significative	$\pm 10 \text{ à } 32\%$
Miki et Tsukahara (2016)	TPBT	100*50*840	50/20 = 2,5	Extérieur		0,12% (après 4 ans)	Augmentation significative	$\pm 36\%$
Hayes et al. (2020)	WST	200*200*100	85/25 = 3,4	38	95% HR	0,42% (volumétrique)	Diminution peu significative	$\pm 10 \text{ à } 30\%$

Les études évoquées précédemment comportent toutes des défauts ou des lacunes, mais elles permettent d'illustrer la difficulté rencontrée depuis ces dernières années par les chercheurs pour quantifier l'effet de la RAS sur l'énergie de fissuration. De ces études, les conclusions suivantes sont tirées :

- G_F est sensiblement affecté par la RAS, même lorsque les expansions sont faibles.
- Lorsque les spécimens sont affectés par la RAS, deux effets contraires sur la valeur de G_F sont observés sur la courbe Effort-CMOD :
 - o Le pic correspondant à la force de macrofissuration diminue, car la résistance en traction diminue.

- La ductilité post-pic augmente, car la fissure de l'essai de caractérisation se ramifie.
- Ainsi G_F étant l'aire sous la courbe Effort-CMOD, ces deux effets peuvent survenir à différentes intensités et G_F peut ne pas beaucoup varier.
- De manière générale, G_F a tendance à diminuer lorsque la RAS se développe. Cependant, l'effet de la réaction d'hydratation du ciment et l'effet de la RAS sont concourants.
- Les coefficients de variation des mesures de G_F sont très importants (10 à 40%). À l'hétérogénéité intrinsèque du béton s'ajoute l'endommagement hétérogène causé par la RAS.
- L'orientation du réseau de fissures causé par la RAS affecte beaucoup la propagation de la fissuration principale de l'essai de caractérisation. Des fissures de la RAS dans l'axe du ligament de fissuration facilitent cette propagation, alors que des fissures de la RAS plutôt perpendiculaires à l'axe du ligament de fissuration vont générer une ramifications de la fissuration de l'essai de caractérisation.

2.6 Conclusion de la revue de littérature

Pour rappel, la conception et coulée des spécimens, les paramètres d'accélération de la RAS en chambre climatique, et le plan d'expérience des essais de fendage ont déjà été orchestrés par Lemery (2018). Cette revue a donc été réalisée dans l'objectif d'interpréter les résultats de la phase suivante du projet : les mesures d'expansions et la caractérisation de l'effet de la RAS sur les propriétés mécaniques.

Il convient de situer l'étude rapportée dans ce mémoire par rapport aux travaux de la littérature. Les spécimens réactifs à l'étude dans ce projet sont en expansion libre RAS. Des éprouvettes cylindriques témoins sont confinées selon la norme ASTM C1293, et les blocs de caractérisation des essais de fendage sont confinés selon un système hydrique spécial détaillé dans le prochain chapitre 3 (car aucune norme n'existe pour ce type de spécimen).

Ainsi les informations les plus pertinentes de cette revue pour les prochains chapitres sont les suivantes :

- L'expansion RAS est soumise aux effets d'échelles : lessivage des alcalis, effet de forme, perméation du gel, degré de saturation en eau, rapport taille du granulat max / dimensions

du spécimen ...etc. Pour ces raisons, l'expansion de petits spécimens témoins (prisme, éprouvette cylindrique) n'est pas identique à l'expansion de plus gros spécimens.

- De manière générale, l'endommagement causé par la RAS dépend de la cinétique de la RAS, de la minéralogie du granulat réactif et sa taille, ainsi que des caractéristiques et localisation du réseau de fissures engendrés par la RAS (Giaccio et al., 2008; Esposito et al., 2016; Sanchez et al., 2017; Abd-Elssamid et al., 2020; Kongshaug et al., 2020; Mohammadi et al., 2020). De plus, chaque propriété mécanique est sensible au mode d'essai et aucune ne se comporte de la même manière lorsque la RAS se développe. C'est pourquoi les résultats de la littérature sont très variables, et seules quelques tendances générales peuvent se dessiner.
- Seule la diminution du module d'élasticité lorsque la RAS se développe fait l'unanimité parmi les chercheurs du domaine. C'est la seule diminution de propriété mécanique statistiquement significative d'après Sanchez et al. (2017).
- Particulièrement pour un degré de réactivité lent de la RAS, comme c'est le cas pour les mélanges ce projet, les propriétés mécaniques sont faiblement impactées par la RAS, car le processus d'hydratation du ciment s'est suffisamment poursuivi en conditions optimales de cure (Abd-Elssamid et al., 2020).
- L'effet de la RAS sur l'énergie de fissuration G_F est encore incertain. L'orientation de l'endommagement interne RAS apparaît comme le facteur influençant le plus G_F (Hayes et al., 2020).

Enfin, les études de la littérature traitant de l'effet de la RAS sur l'énergie de fissuration apportent des conclusions mitigées avec des tendances peu significatives. Aucunes ne considèrent l'effet d'échelle sur l'énergie de fissuration, et aucunes ne considèrent des granulats de dimension supérieur à 25 mm. En cela ce projet expérimental apporte des contributions notables. L'effet d'échelle sur l'énergie de fissuration est bien considéré et deux méthodes expérimentales (SBEM et DFPZ) seront employées pour filtrer cet effet. Les tailles de granulats maximales de deux mélanges sont de 38 mm et 76 mm, représentatifs des ouvrages hydrauliques.

CHAPITRE 3 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Maintenant que les mécanismes à l'étude sont bien cernés, il convient de détailler le plan d'expérience de ce projet (mélanges, spécimens, techniques de mesure et d'essais ...) et comment les objectifs de ce mémoire vont être accomplis. Ce chapitre explique donc les moyens et méthodes mis en place pour :

- Accélérer le développement de la RAS au sein des spécimens en chambre climatique.
- Mesurer l'expansion générée par la RAS de ces spécimens avec deux méthodes : traditionnelle avec l'instrumentation mécanique, et novatrice avec la technologie de scanner 3D laser.
- Réaliser les essais de fendage permettant de caractériser l'énergie de fissuration G_F .

On rappellera tout d'abord les caractéristiques des mélanges et des spécimens réalisés par Lemery (2018). Puis les deux méthodes de mesure de l'expansion seront présentées. Les caractéristiques du confinement en chambre climatique seront ensuite détaillées. Enfin, on rappellera le protocole des essais de fendage et l'instrumentation utilisée.

3.1 Distinction des travaux réalisés

Les travaux de ce mémoire représentent l'aboutissement d'un projet plus large initié par Lemery (2018). Aussi, il est important de distinguer les travaux réalisés par l'auteur de ce mémoire des travaux préalables de Lemery (2018). La Figure 3.1 récapitule les travaux réalisés par chacun : les travaux encadrés en bleu ont été réalisés au cours de la maîtrise de Joffrey Lemery, et les travaux en rouge au cours de la maîtrise présentée dans ce mémoire. Ainsi, le lecteur est invité à consulter le mémoire de Joffrey Lemery pour plus de détail sur ces travaux susmentionnés.

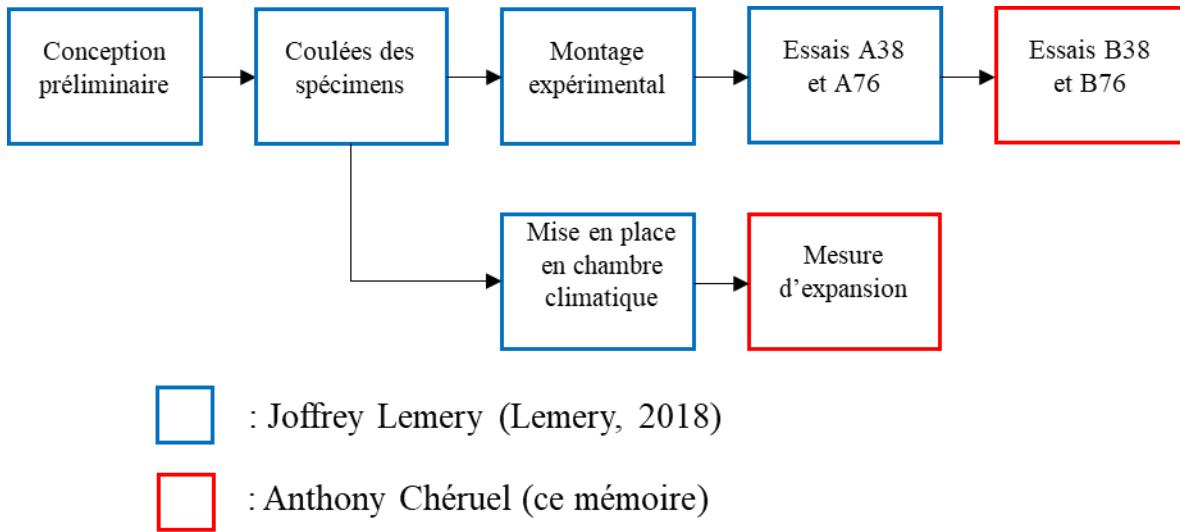


Figure 3.1 : Organigramme sommaire du projet et distinction des travaux réalisés

3.2 Spécimens, mélanges et coulées

Les caractéristiques et le nombre de spécimens à l'étude seront présentés, puis les mélanges seront décrits. On rappellera les conditions de cure et d'entreposage avant la mise en confinement, et comment les carottes de suivi d'expansion ont été préparées.

3.2.1 Dimensions des spécimens

Deux mélanges principaux avec chacun un diamètre maximal de granulat sont caractérisés lors de ce projet. Ces deux diamètres de granulats sont illustrés à la Figure 3.2, avec leur localisation dans l'aménagement considéré de Hydro-Québec : petit granulat 38 mm (B38) utilisés dans les structures armées de l'aménagement (ex : centrales) et gros granulat 76 mm (B76) dans les structures non armées ou légèrement armés (ex : barrages, évacuateurs) (Figure 1.1 (b)). Ainsi, pour accommoder ces deux tailles de granulat, deux configurations de spécimens ont été réalisées par Lemery (2018), tel qu'illustré à la Figure 3.3. Les détails de l'étude préliminaire menant à ce choix sont décrits dans Lemery (2018).

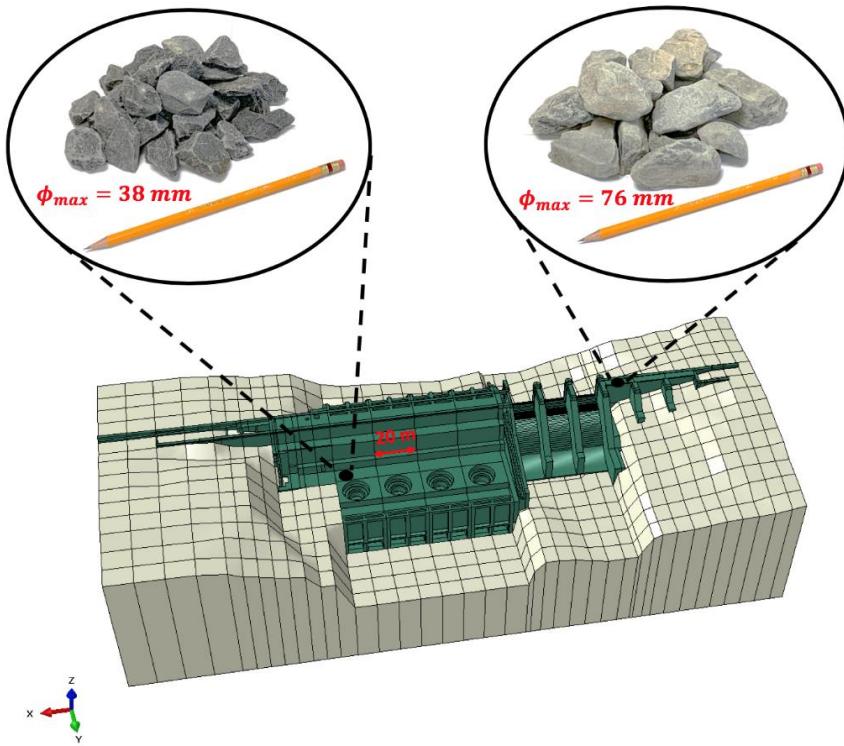


Figure 3.2 : Deux diamètres de granulat utilisés lors de ce projet et leur localisation dans un barrage type (Bernard, 2020)

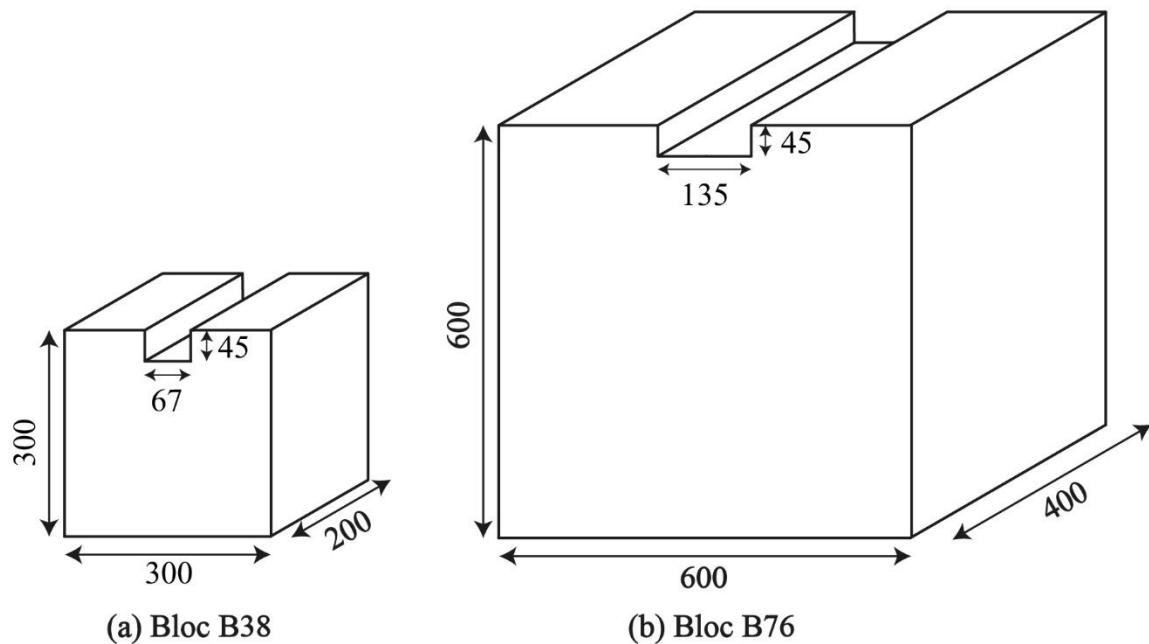


Figure 3.3 : Dimensions en mm des spécimens B38 (a) et B76 (b)

3.2.2 Nombre de spécimens et sens de coulée

3.2.2.1 Nombre de spécimens

Les spécimens testés et analysés dans le cadre de ce projet de maîtrise sont récapitulés au Tableau 3.1. La nomenclature des spécimens testés est détaillée à la Figure 3.4. Une première campagne de 12 spécimens a été menée en même temps que la campagne expérimentale de Lemery (2018) à l'été 2018 (0Y), avant le début de la maîtrise de l'auteur de ce mémoire. La campagne de 18 spécimens a été menée deux ans plus tard à l'été 2020 (2Y). Une différence majeure entre les deux campagnes est que le ratio a/D des spécimens a été modifié de a/D=0,1 à a/D=0,2 à la suite des suggestions émises en conclusion des travaux de Lemery (2018).

Tableau 3.1 : Spécimens analysés dans ce rapport de maîtrise

Identification	Diamètre de granulat (mm)	Ratio a/D	RÉPLICATION
Campagne été 2018 (0Y)			
B38-0Y-WS01	38	0,1	3
B38-0Y-WS05	38	0,5	3
B76-0Y-WS01	76	0,1	3
B76-0Y-WS05	76	0,5	3
Campagne été 2020 (2Y)			
B38-2Y-WS02	38	0,2	3
B38-2Y-WS05	38	0,5	3
B38c-2Y-WS02	38	0,2	3
B38c-2Y-WS05	38	0,5	3
B76-2Y-WS02	76	0,2	3
B76-2Y-WS05	76	0,5	3
Total		30	

Lemery (2018) a de plus coulé 24 autres spécimens (12 B38, 6 B38c et 6 B76) qui devraient être testés à des avancements ultérieurs de RAS. En raison des imprévus expérimentaux et du retard sur l'expansion des spécimens, il a été jugé plus pertinent de les tester après la fin de ce projet de maîtrise.

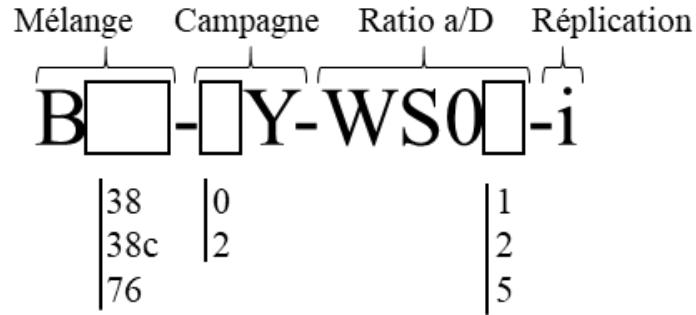


Figure 3.4 : Nomenclature complète des spécimens

La notation « c » dans « B38c » à la campagne 2Y indique un sens de coulée différent, ce qui est détaillé dans la section suivante.

3.2.2.2 Sens de coulée

La forme particulièrement allongée des granulats a potentiellement un effet sur l'expansion provoquée par la RAS (section 2.1.2.2 du chapitre 2) et sur la mécanique de la rupture. Dans l'objectif d'investiguer l'effet du sens de coulée, Lemery (2018) a réalisé une série supplémentaire B38c coulée par le côté, comme illustré à la Figure 3.5. Malheureusement cette série B38c n'a pas été instrumentée pour le suivi d'expansion traditionnel, et aucun spécimen n'a été testé durant la première campagne 0Y avant que la RAS ne se développe, ce qui va limiter l'interprétation des essais réalisés à la campagne 2Y.

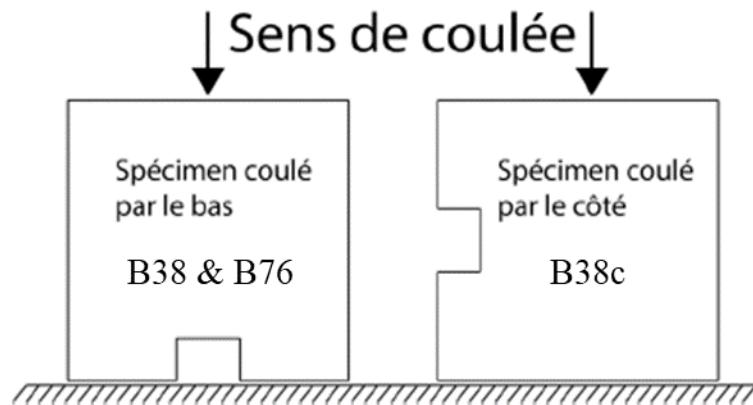


Figure 3.5 : Sens de coulée des spécimens (Lemery, 2018)

3.2.3 Type de granulat

D'après les travaux de caractérisations des granulats de l'aménagement, réalisés par le partenaire industriel et collègues (Béland et Champagne, 2016; Hydro-Québec, 2018), les informations essentielles sont résumées :

- Les granulats utilisés pour reconstituer les mélanges de l'aménagement existant sont prélevés d'une paroi rocheuse située dans la carrière d'extraction proche de l'aménagement. Les granulats échantillonnés de cette paroi se révèlent être à plus de 90% réactifs.
- Les granulats sont particulièrement aplatis, et de faciès d'origine méta-sédimentaire comme ce qui est observé au sein de l'aménagement.
- Un essai d'accélération de la RAS suivant la norme ASTM C1260 (section 2.4.1) confirme que le granulat d'origine est bien réactif. Des barres de mortier du mélange reconstitué de l'aménagement ont une expansion longitudinale de 0,24% à 14 jours (0,41 % à 28 jours), soit une expansion dépassant le seuil de réactivité de 0,1 % de la norme.
- Le granulat est de réactivité lente et tardive.

3.2.4 Mélanges

Les mélanges seront décrits, puis le surdosage en alcalis sera détaillé. On effectuera un rapide comparatif des mélanges de ce projet à la norme ASTM C1293.

3.2.4.1 Description des mélanges

Les différents mélanges du projet sont récapitulés au Tableau 3.2. Un mélange type pour des essais d'expansions de la RAS tiré la norme ASTM C1293 y figure aussi à titre comparatif. La formulation des deux mélanges principaux (à granulat 38 mm et à granulat 76 mm) a été choisie pour reconstituer le mélange original de l'aménagement choisi d'Hydro-Québec. Ainsi le ciment est de type *Low Heat* pour limiter le gradient de température élevé causé par la réaction d'hydratation exothermique et les grandes quantités de béton utilisées pour ces ouvrages. Ce ciment est en faible proportion en pratique pour limiter les coûts en matériau, donc le rapport E/C est élevé (0,57). La formulation comprend aussi des adjuvants entraîneur d'air et réducteur d'eau, ainsi qu'un surdosage en alcalis qui sera détaillé dans la section suivante. À noter que la série B38c coulée de côté est de mélange identique à la série B38.

Tableau 3.2 : Mélanges B38 et B76 et comparaison avec le mélange requis par la norme ASTM C1293

Unités (kg/m ³)	B38	B76		ASTM C1293
Ciment	241,8	235,5	Ciment	420,0
Eau	138,2	134,6	Eau	189,0
E/C	0,57	0,57	E/C	0,45
Sable	720,0	727,1		
Granulométrie				
6-19 mm	256	463	4,75-9,5 mm	1/3
19-38 mm	769	309	9,5-12,5 mm	1/3
38-76 mm < 38 mm	256	0	12,5-19 mm	1/3
38-76 mm	0	644		
Masse de granulat	1281	1416		
Adjuvant				
Entraîneur d'air	0,12	0,12	Entraîneur d'air	x
Réducteur d'eau	1,17	1,27	Réducteur d'eau	x
Surdosage alcalis				
<i>NaOH</i> ajouté	1,98	2,03		
<i>Na₂O_{eq}</i> totale	3,00	3,00	<i>Na₂O_{eq}</i> totale	5,25

3.2.4.2 Calcul du surdosage en alcalis

Afin d'accélérer la cinétique et l'intensité de la RAS, les mélanges sont surdosés artificiellement en alcalis *Na₂O_{eq}* à hauteur de 1,25% de la masse du ciment, comme le requiert la norme ASTM C1293. En pratique, ce surdosage est effectué en dissolvant des pastilles d'alcalis *NaOH* dans une partie de l'eau de gâchage. À noter qu'il ne faut pas confondre le *NaOH* et le *Na₂O_{eq}* : le *NaOH* est un composé chimique utilisé en pratique, alors que le *Na₂O_{eq}* définit une quantité d'alcalis équivalente à partir de différentes espèces chimiques. La conversion entre ces deux quantités est faite via les équations énoncées à la section 2.4.2.

Pour ces mélanges d'après ASTM C1293, le surdosage requis en *Na₂O_{eq}* est donc d'environ $0,0125 * 240 = 3 \text{ kg/m}^3$. Le calcul du surdosage en alcalis du mélange B38 est détaillé au Tableau 3.3 à titre indicatif. Ce calcul s'appuie sur la section 2.4.2 du chapitre 2 et sur les propriétés

du ciment LH fourni par Hydro-Québec (2018), qui indique notamment que le ciment contient 0,6 % d'alcalis (en Na_2O_{eq}).

Tableau 3.3 : Calcul détaillé du surdosage en alcalis du mélange B38

Quantité de Na_2O_{eq} présente dans le ciment	= 0,006*241,8 = 1,45 kg/m ³
Quantité de Na_2O_{eq} requise par la norme ASTM C1293	= 0,0125*241,8 = 3,02 kg/m ³
Quantité de Na_2O_{eq} à ajouter pour surdoser	= 3,02 – 1,45 = 1,57 kg/m ³
Conversion du Na_2O_{eq} en $NaOH$ (Facteur de conversion issu du rapport des masses molaires)	= 1,291*1,57 = 2,02 kg/m ³

3.2.4.3 Écart à la norme ASTM C1293

Les mélanges de ce projet s'écartent significativement de la norme ASTM C1293 (Tableau 3.2) qui fait référence en matière d'essai accéléré d'expansion de la RAS. Le surdosage en alcalis respecte bien le taux de 1,25% en masse de ciment requis, cependant les masses de ciment des mélanges de cette étude sont plus faibles ($240 \text{ kg}/\text{m}^3$ par rapport à $420 \text{ kg}/\text{m}^3$), donc les quantités d'alcalis sont aussi plus faibles en valeur absolue ($3 \text{ kg}/\text{m}^3$ par rapport à $5,25 \text{ kg}/\text{m}^3$). La section 2.3.5.1 du chapitre 2 indiquait qu'en pratique, c'est précisément ce seuil de $3 \text{ kg}/\text{m}^3$ qui est respecté pour limiter le développement de la RAS. Le surdosage en alcalis des mélanges n'est donc potentiellement pas suffisant pour accélérer la RAS à court terme. De plus, la présence d'air entraîné dans les mélanges de cette étude risque de limiter l'expansion générée par la RAS.

C'est cependant un choix délibéré fait par Hydro-Québec (2018), ayant pour objectif de caractériser au mieux le mélange reconstitué de l'aménagement existant.

3.2.5 Conditions de cure

Après les différentes coulées, les spécimens ont été entreposés 28 jours avec des toiles de jute humidifiées tous les deux jours, le tout sous des bâches plastiques pour conserver une humidité relative localement élevée.

3.2.6 Préparation des carottes de caractérisation

Huit dalles de 450*650*650 mm (quatre pour la formule B38 et quatre pour la formule B76) ont été coulées en parallèle des blocs B38 et B76 pour prélever des carottes nécessaires à la caractérisation des mélanges. Le processus de carottage est montré à la Figure 3.6 (a). Six carottes ont été prélevées par dalle, puis chacune a été coupée et polie. Lemery (2018) a veillé à ce que le carottage soit fait sur une hauteur de 450 mm, pour qu'après la coupe il y ait 75 mm d'écart de chaque côté de la carotte par rapport à la surface de la dalle. Les carottes ont donc un diamètre de 150 mm et une hauteur de 300 mm, comme illustré à la Figure 3.8 (a).

Une carotte par dalle a ensuite été instrumentée pour le suivi en expansion, à l'aide de plots en acier couplés à des *wood insert* (Figure 3.6 (d)). Pour se faire, les carottes sont percées à l'aide d'un gabarit (Figure 3.6 (b)) pour assurer un écart constant entre les plots et permettre la bonne utilisation des outils de mesures DEMEC. Les plots sont ensuite collés avec de la résine époxy à l'intérieur des trous percés (Figure 3.6 (c)).

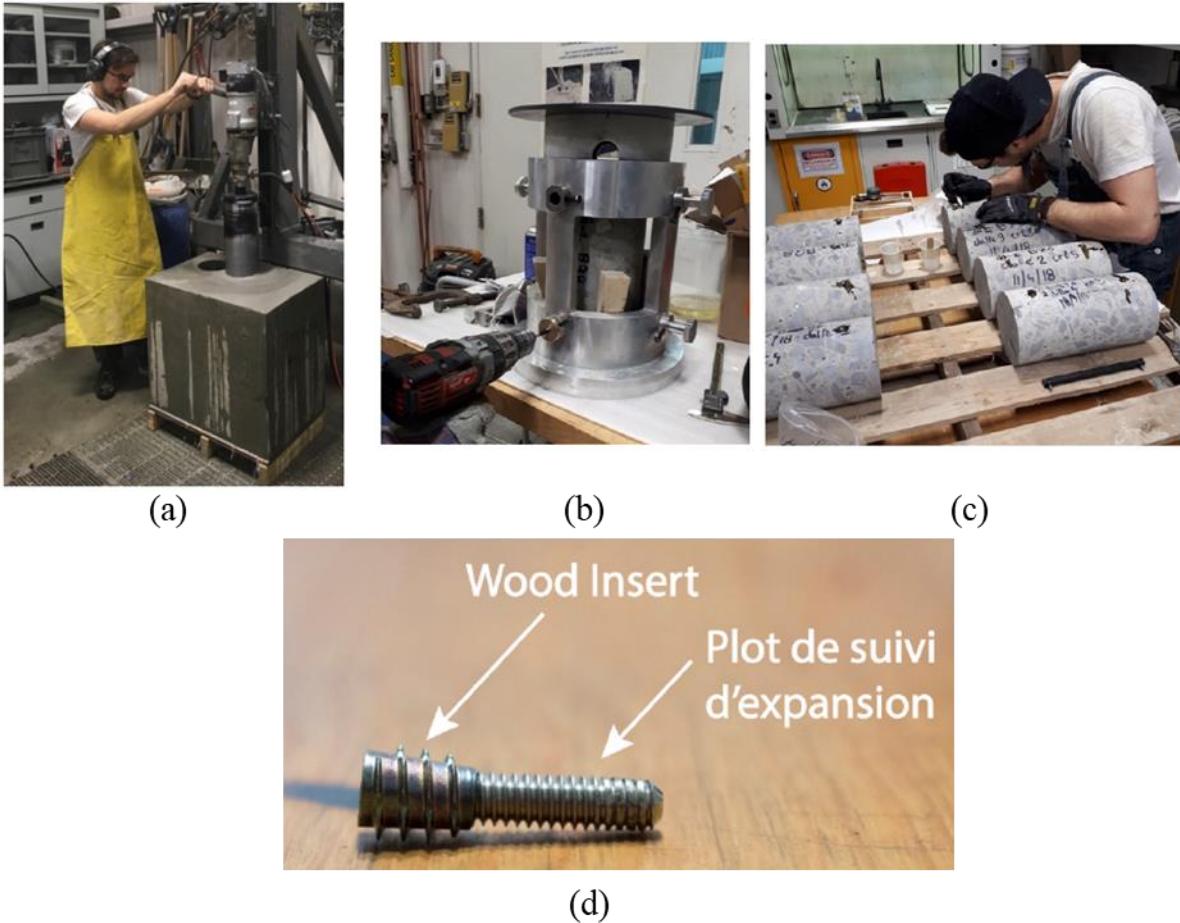


Figure 3.6 : (a) Carottage d'une dalle (b) Perçage des carottes via un gabarit spécifique (c) Collage des plots de suivi d'expansion (d) Plot de suivi d'expansion avec *wood insert* (Lemery, 2018)

3.2.7 Entreposage temporaire des spécimens

Après la cure au jeune âge, les spécimens ont été entreposés environ un mois dans une chambre climatique annexe à 100% d'humidité relative. C'était le temps nécessaire pour préparer les carottes suivies en expansion et apprêter la chambre climatique principale n°1. C'est dans cette dernière section que sera détaillé le confinement des spécimens. L'expansion n'a pas été mesurée pendant cette période d'entreposage temporaire.

3.3 Méthodes de suivi de l'expansion

La quantification de l'expansion générée par la RAS est essentielle au projet, puisque des campagnes expérimentales seront menées une fois certains avancements cibles de la RAS atteints. L'innovation de ce projet réside dans l'utilisation d'un scanner tridimensionnel au laser en plus des instruments de mesure conventionnels largement utilisés dans la littérature. Le fonctionnement de ces derniers sera d'abord décrit, et les incertitudes de mesures associées seront fournies. Puis, la technologie de scan 3D sera présentée, avec de même ses incertitudes.

3.3.1 Outils de mesures mécaniques

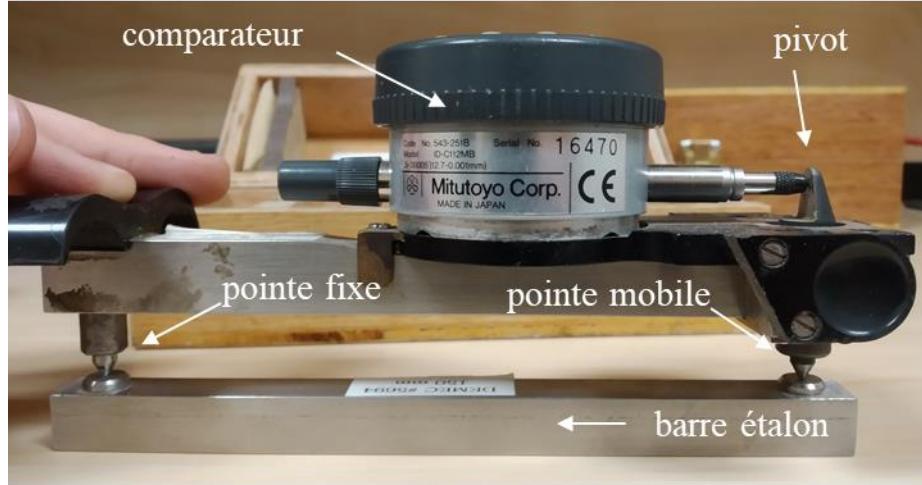
La mesure de l'expansion causée par la RAS se fait usuellement grâce à des micromètres ou des jauge d'extensométries. L'instrumentation est en effet simple, robuste et portative. Elle nécessite cependant d'accommoder le spécimen pour accueillir des plots de mesures dédiées.

3.3.1.1 Description de l'instrumentation

Les instruments de mesure utilisés lors de cette étude sont deux DEMEC (*DEmoutable MEchanical strain gauge*) de longueur de référence 150 mm et 200 mm, et un micromètre en demi-lune de diamètre de référence 150 mm.

Le DEMEC de longueur 150 mm et sa barre étalon sont illustrés à la Figure 3.7 (a). Il est constitué d'un comparateur numérique monté sur une barre d'*Invar* (alliage de fer de très faible coefficient de dilatation thermique). Une pointe conique fixe est disposée à une extrémité de la barre, et une pointe conique mobile montée sur un pivot est disposée à l'autre extrémité. Le mouvement de pivot de cette pointe conique mobile est mesuré par le comparateur. Les deux pointes coniques sont insérées dans les plots dédiés, en commençant par la pointe mobile, et une lecture du comparateur est réalisée. L'instrument est toujours étalonné avant chaque utilisation à une barre étalon *Invar* de longueur fixe. La mobilité de la pointe conique permet un écart de [-1,6 mm ; + 3,2 mm] par rapport à la longueur de référence.

Le micromètre demi-lune (Figure 3.7 (b)) est un micromètre numérique *Mitutoyo* modifié avec des pointes coniques. L'étalonnage est effectué avec un cylindre d'acier de 150 mm dont les extrémités sont usinées pour recevoir les pointes coniques du micromètre.



(a) DEMEC



(b) Micromètre demi-lune

Figure 3.7 : Outils de mesures mécaniques de l'expansion

3.3.1.2 Mesures dimensionnelles réalisées

Les plots de mesures ont été disposés sur les spécimens selon la Figure 3.8 pour les trois types de spécimens suivis en expansion. Les surfaces non représentées des spécimens disposent aussi de plots de mesure, répartis de manière identique aux faces visibles de la Figure 3.8. L'utilisation des trois instruments de mesure est symbolisée par un code couleur pour chaque mesure, en rouge pour le DEMEC 200 mm, en vert pour le DEMEC 150 mm et en bleu pour le micromètre demi-lune 150 mm. Le nombre de mesures par spécimen et par direction est récapitulé entre autres au Tableau

3.4. Les directions d'expansions mesurées ainsi que leur dénomination pour la suite de ce mémoire sont schématisées à la Figure 3.9.

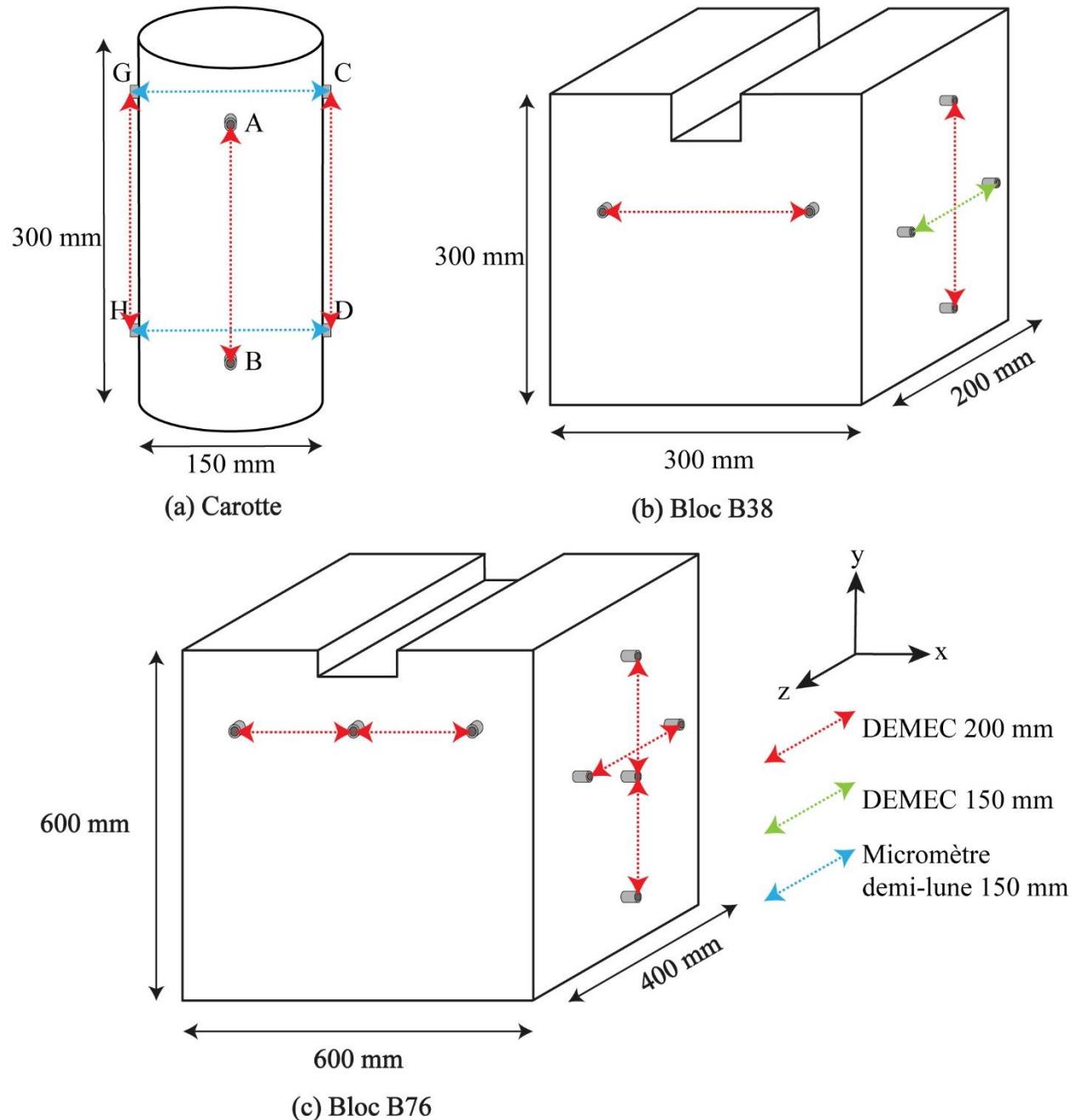


Figure 3.8 : Dispositions des plots et mesures effectuées au DEMEC et micromètre demi-lune sur les trois types de spécimens

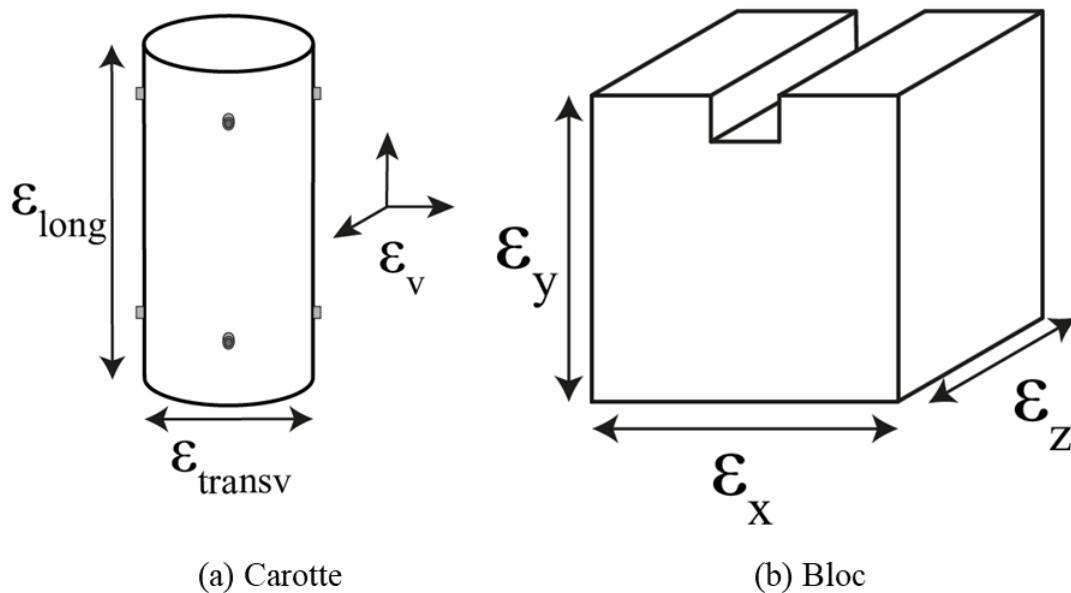


Figure 3.9 : Notation des expansions mesurées

3.3.1.3 Incertitudes de mesures

Les incertitudes de mesure de ces outils mécaniques sur l'expansion unidirectionnelle et l'expansion volumétrique des spécimens atteints par la RAS sont résumées au Tableau 3.4. La méthodologie des calculs est détaillée à l'annexe C. Les incertitudes seront matérialisées sur les courbes d'expansions du chapitre 4 par des incertitudes élargies à $k = 1,96$ représentées par des barres d'erreurs, ce qui correspond à une probabilité de 95% d'encadrer la vraie valeur, sous réserve d'une distribution normale des résultats.

Tableau 3.4 : Incertitude de mesure des outils mécaniques (DEMEC et micromètre demi-lune)
(tiré de l'annexe C)

Type de spécimen	Carotte 150*300mm		Bloc 300*300*200mm			Bloc 600*600*400mm		
Direction	ϵ_{long}	ϵ_{transv}	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z
Nombre de mesure / direction	4	4	2	2	2	4	4	2
Incertitude sur l'expansion unidirectionnelle moyenne pour un spécimen (%)	0,0015	0,002	0,002	0,002	0,0027	0,0015	0,0015	0,002
Incertitude sur l'expansion volumétrique moyenne pour un spécimen (%)	0,0043		0,0039			0,0029		

3.3.2 Scanner 3D

En plus des mesures traditionnelles, l'expansion est mesurée avec un scanner 3D au laser. La métrologie par scan tridimensionnelle est en plein essor, et la précision des appareils de mesure s'améliore sans cesse (CREAFORM, 2020). La technique de mesure est portative, non-invasive, et ne nécessite pas d'intégrer des plots de mesures dans les spécimens scannés, ce qui est très avantageux. La technologie de scan 3D portative n'a jamais été utilisée dans la littérature (à la connaissance de l'auteur) pour suivre l'expansion de spécimen atteint par la RAS. L'objectif est donc de déterminer si cette technologie est capable de mesurer une telle expansion.

3.3.2.1 Description de la technologie de scan

Le modèle utilisé lors ce projet pour mesurer l'expansion est un *HandyScan 300* acheté en 2016 au fabricant Québécois *Créaform*, un des leaders mondiaux de la métrologie par scan. Les caractéristiques principales de ce modèle sont résumées au Tableau 3.5. À noter que la résolution réfère au niveau de détail que le scan est capable d'acquérir et n'est pas à confondre avec

l'exactitude. Cette exactitude est quantifiée par la performance volumétrique, notion qui sera détaillée dans le prochain chapitre 4.

Tableau 3.5 : Caractéristiques du scanner *HandyScan 300* (CREAFORM, 2018)

	HandyScan 300
Fréquence des mesures	205 000 mesures/s
Surface de numérisation	225 x 250 mm
Source de lumière	3 croix laser
Résolution	0,1 mm
Performance volumétrique	0,02 mm + 0,1 mm/m (> 0,04 mm)
Taille des pièces (recommandée)	0,1 m à 4 m

L'appareil de mesure portatif est constitué de deux caméras haute vitesse, de DEL rouge et d'un projecteur laser, tel qu'illustré par le fabricant à la Figure 3.10 (a). L'appareil permet de numériser automatiquement la surface d'un objet en le scannant en trois dimensions. Pour cela, le dispositif projette des croix laser sur la surface de l'objet (Figure 3.10 (d)), ces lasers se déforment en fonction de la géométrie et cette déformation est enregistrée par les deux caméras haute vitesse. Le dispositif est portatif et donc ne nécessite pas de système de positionnement externe : il est possible de se mouvoir avec le scanner en main lors de l'acquisition. La position de l'appareil dans l'espace est triangulée en temps réel lorsque les caméras détectent les cibles de positionnement dédiée, collée sur la surface de l'objet (Figure 3.10 (c)). Les DEL rouges servent à détecter efficacement ces cibles. Un étalonnage du scanner doit être effectué à chaque utilisation, à l'aide d'une surface plane de référence (Figure 3.10 (b)).

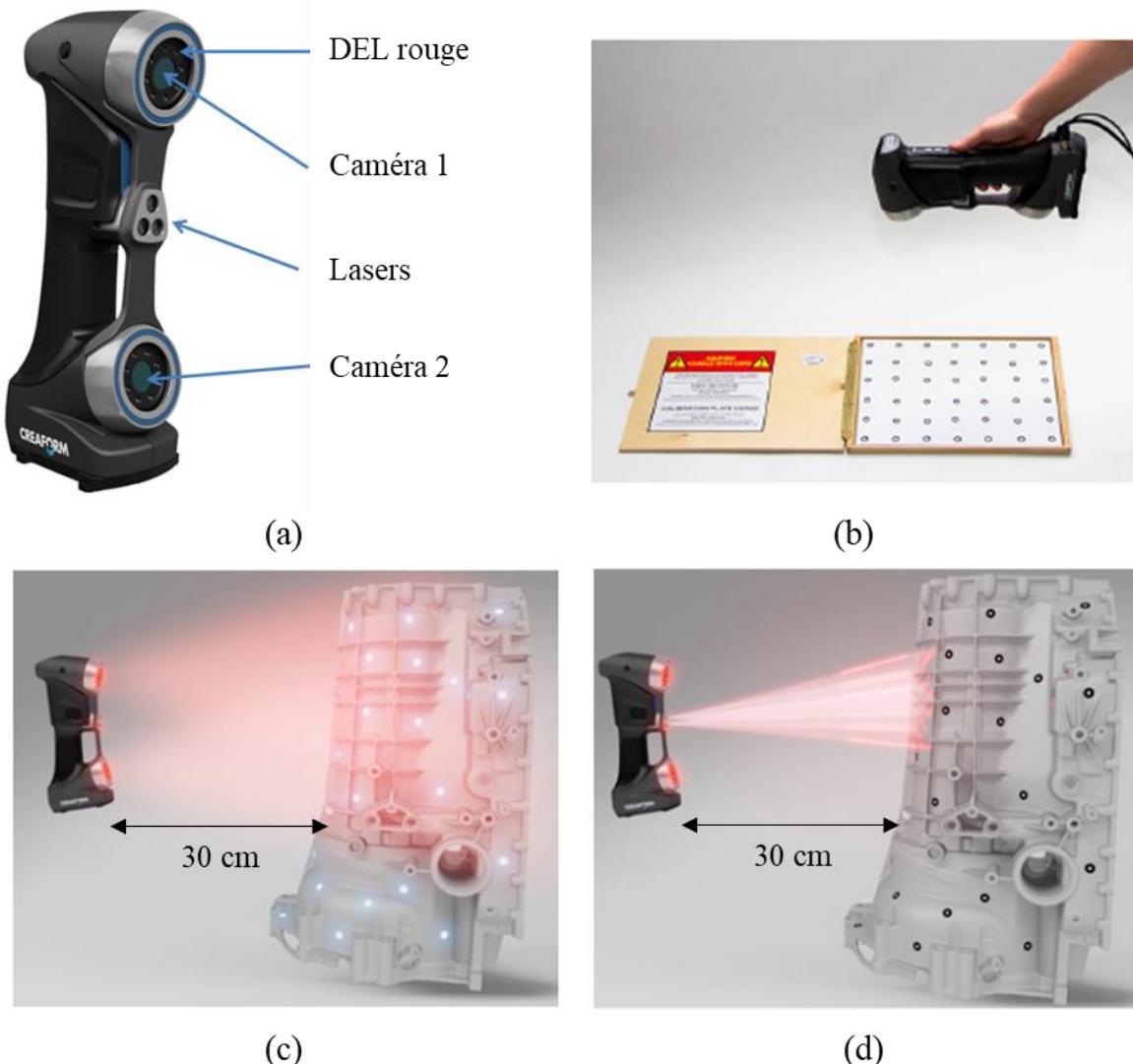


Figure 3.10 : (a) Éléments constitutifs du scanner (b) Étalonnage (c) Acquisition de la surface de l'objet avec les cibles de positionnement (d) Projection des croix lasers sur la surface (adapté de CREAFORM (2018))

La position et la densité des cibles collées sur l'objet sont donc essentielles pour assurer la bonne acquisition de la surface. Deux exemples de disposition de cibles satisfaisantes sont illustrés à la Figure 3.11 pour une carotte et un bloc B38. Une fois un spécimen numérisé, des mesures dimensionnelles variées peuvent être effectuées à volonté via la suite de logiciel *Vxelements* fourni par *Créaform*. Les mesures réalisées en post-traitement pour cette étude seront détaillées au chapitre 4.



(a) Carotte



(b) Bloc B38

Figure 3.11 : Disposition des cibles sur deux types de spécimens

3.3.2.2 Incertitudes de mesures

Les incertitudes de mesure du scanner 3D sur l’expansion unidirectionnelle et l’expansion volumétrique des spécimens atteints par la RAS sont résumées au Tableau 3.6. Ces incertitudes sur l’expansion sont calculées à partir des incertitudes sur les mesures dimensionnelles réalisées en post-traitement sous *Vxelements*. Ces incertitudes sont significativement plus importantes que celles des outils mécaniques et cette différence est inhérente à la technologie de mesure. Pour le scanner 3D, la notion de performance volumétrique, présentée au Tableau 3.5, dicte la précision d’acquisition : plus le spécimen scanné est de grande dimension, plus les erreurs de positionnement s’accumulent. Les calculs d’incertitudes et le principe de performance volumétrique sont détaillés respectivement à l’annexe D et au chapitre 4. De la même manière que pour les outils mécaniques, les incertitudes élargies seront visuellement représentées par des barres d’erreurs.

Tableau 3.6 : Incertitudes de mesure du scanner 3D (tiré de l'annexe D)

Type de spécimen	Carotte 150*300mm		Bloc 300*300*200mm			Bloc 600*600*400mm		
	ϵ_{long}	ϵ_{transv}	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z
Direction								
Longueur de mesure (mm)	300	150	300		200	600		400
Incertitude sur l'expansion unidirectionnelle (%)	0,036	0,072	0,059		0,088	0,054		0,081
Incertitude sur l'expansion volumétrique calculée (%)	0,148		0,121			0,111		

3.3.3 Résumé des spécimens suivis en expansion

Les spécimens dont l'expansion est suivie au cours de ce projet sont indiqués au Tableau 3.7. Un spécimen de chaque type est scanné depuis le début de la campagne de mesure. D'autres spécimens ont été scannés plus tardivement : ces scans ne seront pas traités dans le cadre de cette maîtrise.

Tableau 3.7 : Spécimens suivis en expansion avec les outils mécaniques et/ou le scanner 3D

	Identification	Mesuré au DEMEC	Scanné
Carotte B38	B38-CAR-1	✓	
	B38-CAR-2	✓	✓
	B38-CAR-3	✓	
	B38-CAR-4	✓	
Carotte B76	B76-CAR-1	✓	
	B76-CAR-2	✓	
	B76-CAR-3	✓	✓
	B76-CAR-4	✓	
Bloc B38	B38-16	✓	✓
	B38-17	✓	
	B38-18	✓	
Bloc B76	B76-13	✓	✓
	B76-14	✓	
	B76-15	✓	

3.4 Confinement des spécimens pour accélérer la RAS

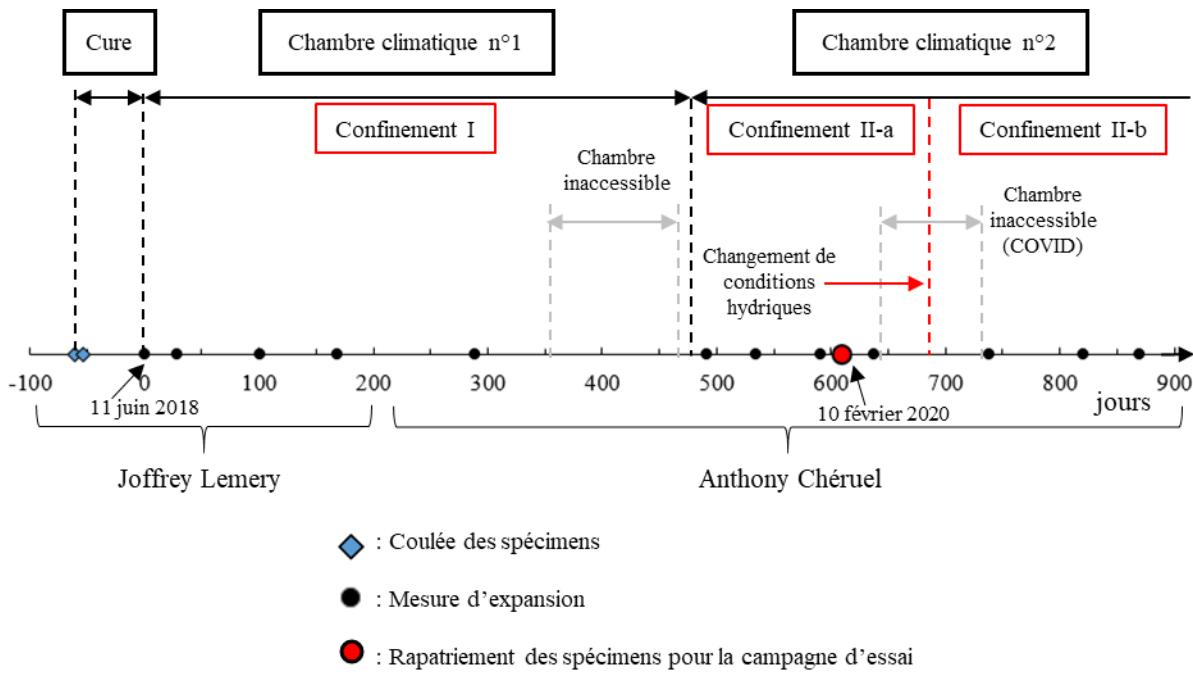
Un historique du confinement sera présenté, puis les chambres climatiques seront décrites et les conditions hydriques des carottes et des blocs seront illustrées.

3.4.1 Historique du confinement

L'historique des mesures d'expansion, des événements rendant ces mesures impossibles, la date de rapatriement de spécimens pour essais ainsi que les durées de confinement dans chacune des chambres climatiques sont détaillés à la Figure 3.12. Les spécimens ont été placés dans la chambre climatique n°1 deux mois après leur coulée. Le suivi de l'expansion des spécimens est encore en cours à date de l'écriture de ce mémoire.

Idéalement, le confinement des spécimens pour accélérer la RAS doit être fait dans un même environnement pendant toute la durée du projet. Mais des circonstances en dehors de la portée des acteurs de ce projet ont contraint le changement de chambre climatique à $t = 475$ jours après le

début du confinement des spécimens. La disposition des spécimens et les paramètres de confinement dans les deux chambres climatiques sont détaillés dans les sections suivantes.



3.4.2 Disposition des spécimens par palette

La Figure 3.13 détaille tous les blocs B38 et B76 en chambre climatique. Sur cette figure sont encadrés en rouge les blocs B38, B38c et B76 qui ont été rapatriés à $t = 609$ jours pour la campagne d'essai de fendage. Le choix des blocs rapatriés est justifié à la section 4.1.4 du chapitre 4. Les blocs suivis en expansion sont décrits avec l'appellation supplémentaire « DEMEC ».

3.4.3 Description des chambres climatiques

Les paramètres de confinement et le détail des chambres climatiques sont résumés au **Tableau 3.8**. Trois configurations de confinement sont distinguées : confinement I dans la chambre climatique n°1, confinements II-a et II-b dans la chambre climatique n°2. Ces appellations sont aussi inscrites sur l'historique de la Figure 3.12.

Chambre climatique n°1 (confinement I)

Dans la chambre climatique n°1 (Figure 3.14 (a)), l'espace n'était pas suffisant pour accueillir les six palettes de spécimens sans les superposer. Ainsi, comme mentionné sur la Figure 3.13, les palettes 1, 3 et 5 étaient respectivement superposées sur les palettes 2, 4 et 6. Les conséquences d'un tel empilement seront révélées au chapitre 4. La chambre climatique n°1 permet d'avoir un environnement à environ 50% d'humidité relative (HR), mais sans système de régulation en boucle de contrôle fermée. La chambre ne permet donc pas d'avoir une $HR > 80\%$, taux qui est requis pour accélérer suffisamment la RAS et atteindre l'asymptote de l'expansion au bout d'une durée cible de deux ans (section 2.3.4.1 du chapitre 2). Il a donc été mis en place un système d'apport d'eau annexe automatisé se déclenchant tous les jours pendant une dizaine de minutes. Ce système est visible sur la Figure 3.14 (a) et consiste en tuyaux d'arrosage déversant de l'eau directement sur les blocs. Le confinement hydrique des blocs dans cette chambre est schématisé à la Figure 3.16 (a).

Chambre climatique n°2 (confinement II-a et II-b)

La chambre climatique n°2 est visible sur la Figure 3.14 (b) durant le confinement II-b. La dimension de la chambre a permis de ne pas superposer les palettes de blocs. La chambre permet de réguler l'environnement à 60% d'HR et un système de régulation en boucle fermée permet le maintien fiable de cette commande.

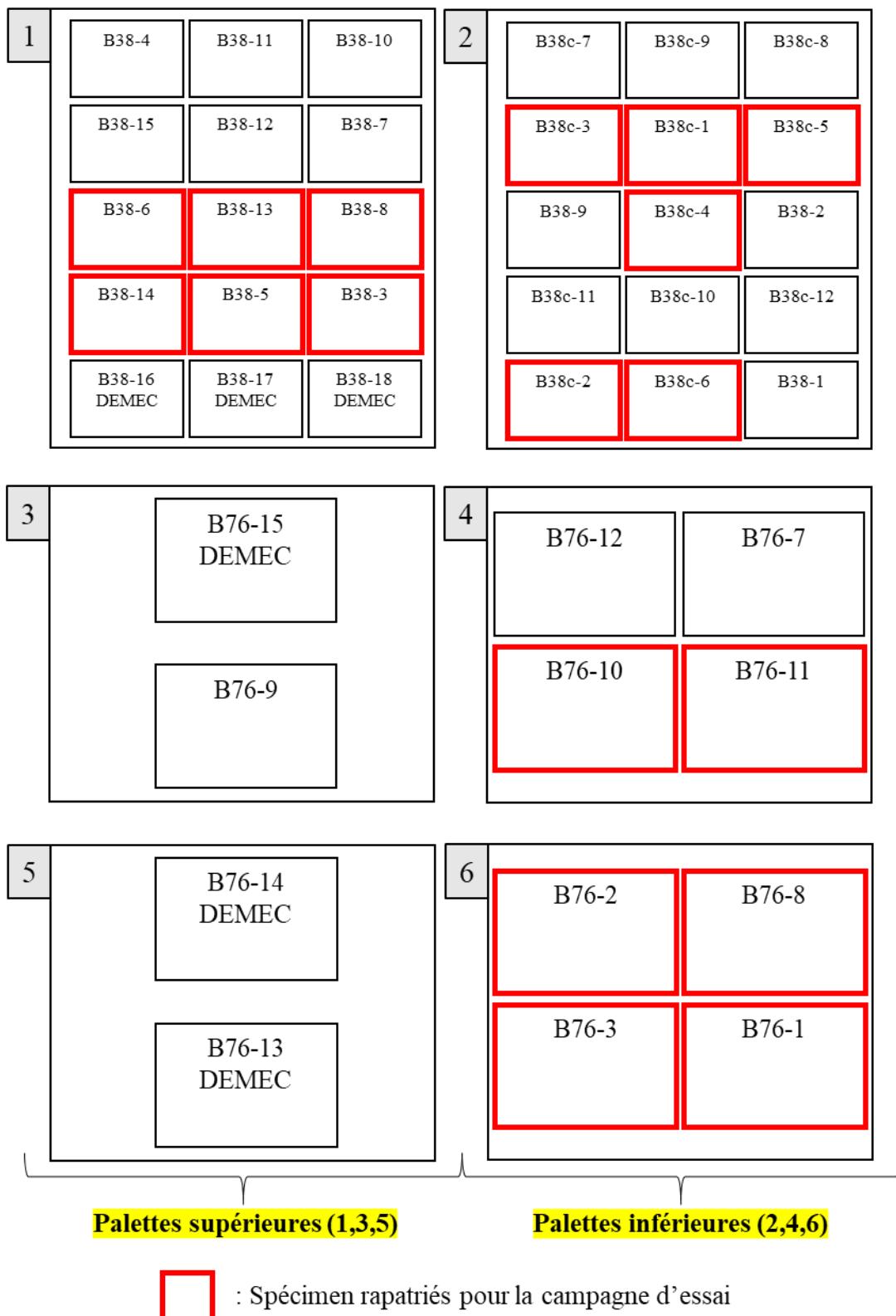


Figure 3.13 : Disposition des spécimens confinés par palette numérotée et indication des spécimens rapatriés pour la campagne d'essai de cette étude

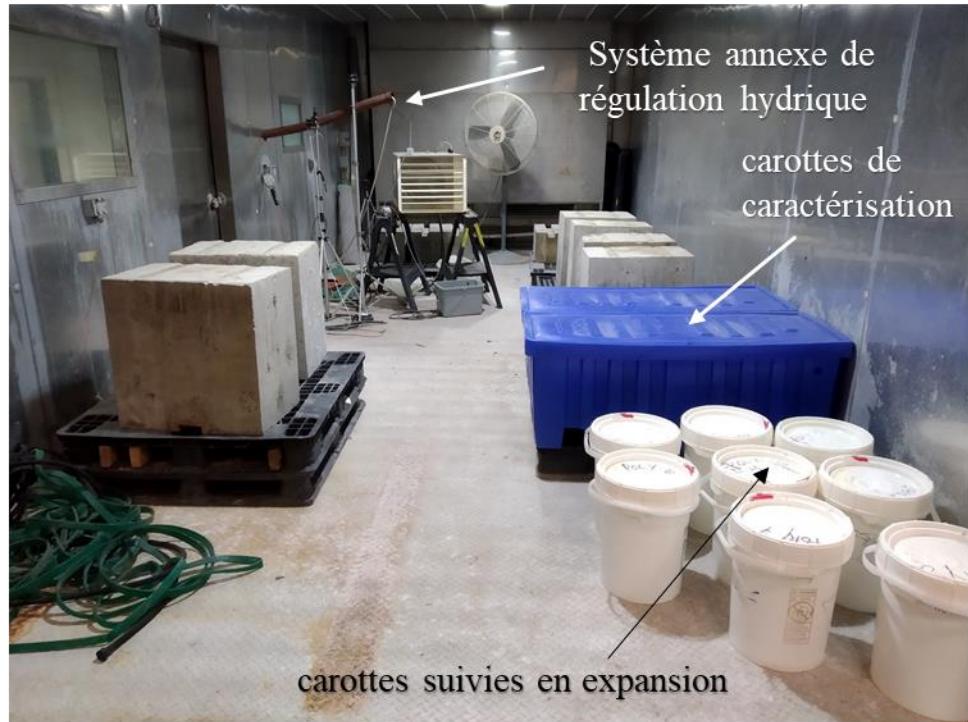
La chambre n°2 n'est cependant pas équipée de drain, ce qui n'a pas permis de réutiliser le système d'arrosage automatique de la précédente chambre. Aussi, la chambre n°2 était déjà occupé par un autre projet, nécessitant une humidité ambiante maintenue à 60% HR. Un compromis a donc été trouvé (confinement II-a) en arrosant manuellement des tissus tous les 1 à 3 jours, recouvrant les blocs comme schématisé à la Figure 3.16 (b). Cette méthode d'apport d'eau annexe est peu effective et nécessite un arrosage manuel régulier. Après avoir déplacé tardivement l'autre projet occupant la chambre et mis la régulation d'humidité de la chambre au maximum, il a été décidé de mettre en plus en place un régulateur d'humidité annexe visible à la Figure 3.14 (b) permettant d'atteindre un environnement saturé à environ 95% d'HR en système boucle fermée (confinement II-b). Ce dernier système en place, les bâches plastiques et tissus imbibés ont été retirés (Figure 3.16 (c)).

Tableau 3.8 : Détails des périodes de confinement

	Confinement I	Confinement II-a	Confinement II-b
Chambre climatique	n°1	n°2	n°2
Durée	t = 0 à 481 jours (481 jours)	t = 481 à 682 jours (201 jours)	t = 682 jours et + (200 + jours)
Température	38 ± 2°C	38 ± 2°C	38 ± 2°C
Humidité relative (HR) de la chambre	50%	60%	95%
Présence d'un système de régulation de l'HR ?	x	✓	✓
Arrosage supplémentaire des blocs ?	✓	✓	x
Type d'arrosage	Automatisé	Manuel	x
Fréquence d'arrosage	10min/jour	Variable	x
Confinement des blocs avec des bâches ?	✓	✓	x
Superposition des palettes de blocs ?	✓	x	x



(a) Chambre climatique n°1 (confinement I)



(b) Chambre climatique n°2 (confinement II-b) après le rapatriement de quelques spécimens pour essais

Figure 3.14 : Chambres climatiques utilisées durant ce projet

3.4.4 Description des conditions hydriques des spécimens

Les différents types de spécimens n'ont malheureusement pas été confinés de la même façon par considération purement technique. Le détail du confinement des carottes sera présenté, puis les différents confinements des blocs seront schématisés.

3.4.4.1 Carottes

La condition hydrique des carottes de suivi d'expansion est schématisée à la Figure 3.15 (a). Ce confinement a été constant malgré les trois types de confinement rencontrés (**Tableau 3.8**). Les recommandations de la norme ASTM C1293 ont été respectées: le spécimen est contenu dans une chaudière hermétique, surélevé d'environ 30 mm au-dessus d'un fond d'eau de 20 ± 5 mm, avec un tissu imbibé d'eau collé sur la paroi intérieure qui trempe dans le fond d'eau. La carotte n'est pas en contact avec l'eau. L'étanchéité de la chaudière n'est cependant pas parfaite en pratique, et de l'eau est parfois rajoutée pour pallier aux légères fuites.

Le confinement hydrique des carottes de caractérisation est schématisé à la Figure 3.15 (b). Ce confinement diffère des carottes suivies en expansion par considération technique étant donné le nombre important de ces carottes de caractérisation (48). Deux bacs bleus non hermétiques visibles sur la Figure 3.14 (b) contiennent séparément les carottes B38 et B76. Les carottes sont empilées et des tissus imbibés d'eau automatiquement (lors du confinement I) ou manuellement (lors du confinement II-a et II-b) recouvrent les carottes supérieures. De l'eau stagnante s'accumule au fond des bacs, mais n'entre pas directement en contact avec les carottes inférieures.

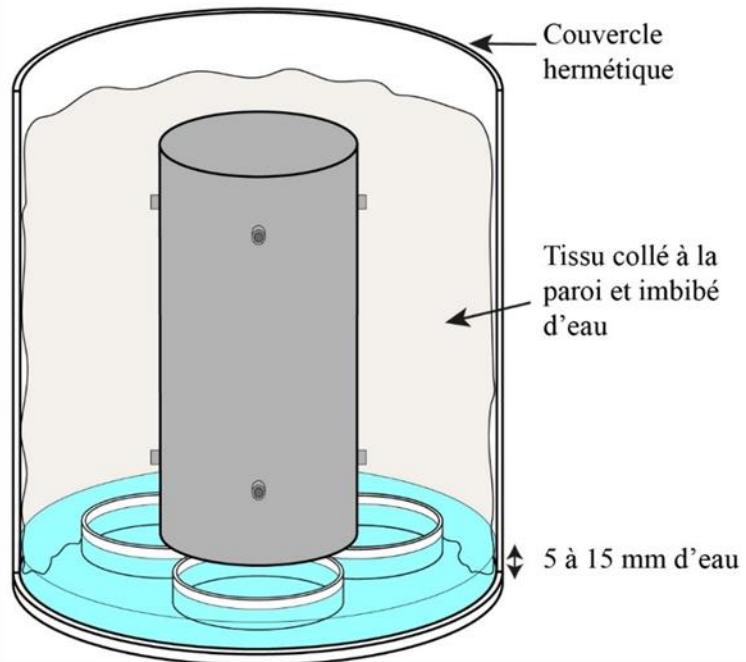
3.4.4.2 Blocs

Les trois conditions hydriques des blocs B76 sont schématisées à la Figure 3.16 :

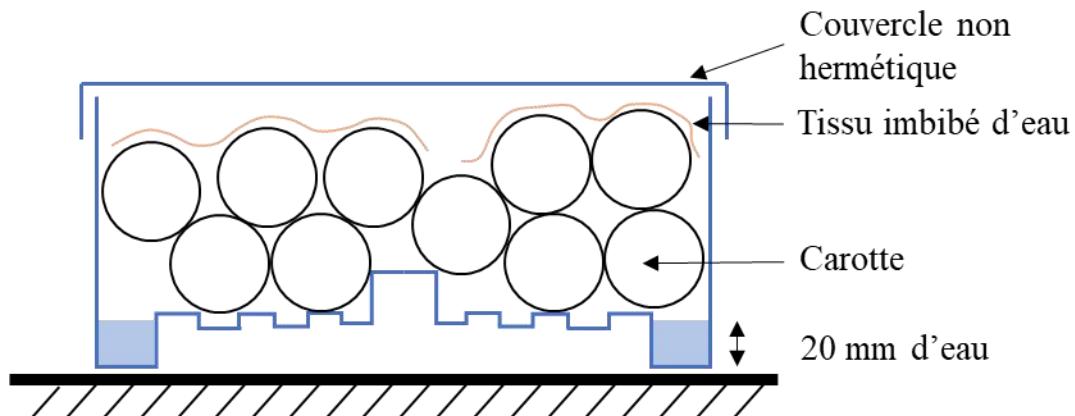
- Confinement I (Figure 3.16 (a)) : les palettes de blocs sont empilées et des bâches plastiques non hermétiques recouvrent l'ensemble. Un système d'arrosage automatique positionné au sommet de la palette supérieure s'active 10 minutes par jour : de l'eau ruisselle sur les spécimens et stagne au fond.
- Confinement II-a (Figure 3.16 (b)) : les blocs ne sont plus empilés. Le système d'arrosage automatique est remplacé par des tissus imbibés manuellement d'eau à une fréquence variable, au maximum tous les trois jours. Peu ou pas d'eau stagne au fond.

- Confinement II-b (Figure 3.16 (c)) : l'apport hydrique se fait uniquement via l'environnement saturé en eau à hauteur d'environ 95% d'humidité relative.

Les blocs B38 sont soumis aux mêmes conditions hydriques que les blocs B76.



(a) Carotte suivie en expansion



(b) Carottes de caractérisation

Figure 3.15 : Schémas des conditions hydriques des carottes durant les trois phases de confinement

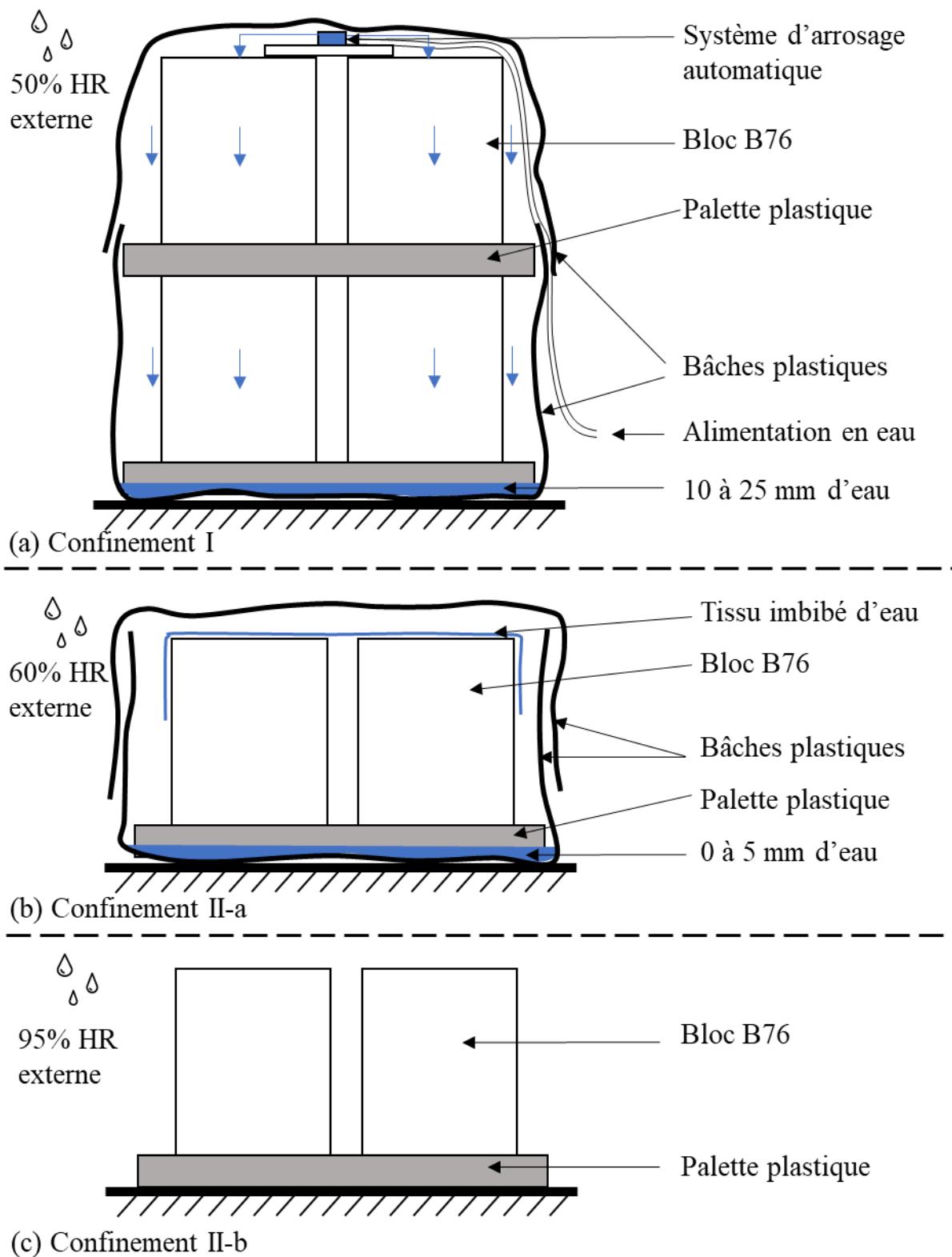


Figure 3.16 : Schéma des trois types de confinement hydrique des blocs B76

3.4.5 Protocole de déconfinement avant chaque mesure d'expansion

La norme ASTM C1293 recommande de placer les chaudières contenant les spécimens de suivi d'expansion dans un environnement contrôlé à $23 \pm 2^\circ\text{C}$, 16 \pm 4 heures avant la mesure d'expansion. Un résultat similaire est obtenu dans ce projet en arrêtant la régulation thermique et hydrique de la chambre climatique 24 \pm 4 heures avant la mesure, et en mesurant les spécimens directement dans la chambre. La température en surface des blocs est toujours relevée avec un thermomètre portatif infrarouge avant chaque mesure pour assurer une température d'environ $23 \pm 2^\circ\text{C}$ au moment de la mesure.

Une discussion sur l'application de ce protocole dans la pratique et sur les variations de température est menée à la section 4.2.4 du chapitre 4.

3.5 Essai de fendage

Tout le montage expérimental qui permet de réaliser des essais de fendage a été mis en place au cours de la maîtrise de Lemery (2018). Les détails de ce montage y sont donc disponibles. On rappellera brièvement ici l'instrumentation utilisée, et les protocoles des essais.

3.5.1 Instrumentation des essais

Deux types d'instrumentations sont mises en place : des capteurs linéaires de déplacements LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), et un système de corrélation d'images DIC (*Digital Image Correlation*). À noter que Lemery (2018) a mis en place un système de capteurs acoustiques, mais cette instrumentation n'a pas été utilisée pour la campagne 2Y et les résultats de son utilisation pour la campagne 0Y ne sont pas traités dans ce mémoire.

3.5.1.1 Capteurs de déplacement LVDT

Trois paires de capteurs LVDT sont mises en place pour un essai, visibles à la Figure 3.17. Ils sont disposés symétriquement sur les deux faces d'un bloc. Le pilotage de l'essai de fendage se fait grâce à la paire de LVDT sur les chapeaux (Figure 3.17 (a)), en contrôlant l'ouverture moyenne de ces capteurs à un taux constant de $0,5 \mu\text{m}/\text{s}$. La précision des LVDT est de $2 \mu\text{m}$.



Figure 3.17 : Disposition des capteurs LVDT sur un bloc B76

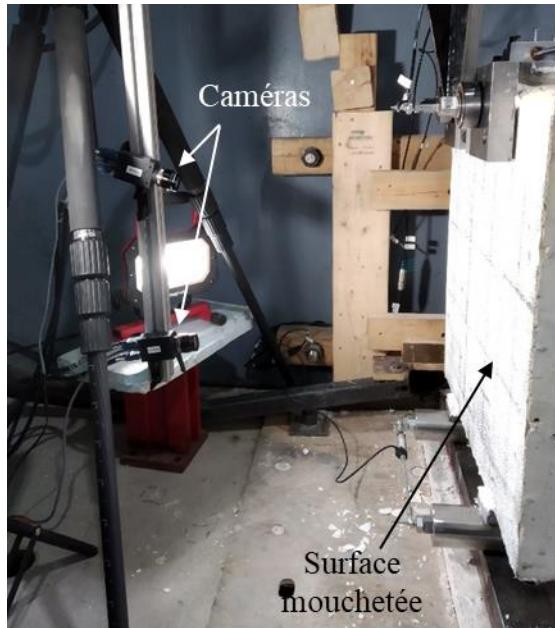
3.5.1.2 Système de corrélation d'image (DIC)

La technologie de corrélation d'image (DIC) permet de mesurer un champ de déplacement à l'aide d'une paire de caméras photographiant périodiquement la surface d'un objet préalablement préparée. C'est une méthode non intrusive puisqu'aucune jauge n'est en contact avec le spécimen testé, et les images peuvent être traitées ultérieurement.

Le système utilisé au cours de ce projet consiste en deux caméras monochromes de résolution 2048×2048 (4 Mégapixels), équipées de lentilles de distance focale 23 mm (Figure 3.18 (a)). La surface des spécimens est préparée avec deux couches de peinture blanche, puis un mouchetis de points noirs est appliqué avec un tampon encreur pour garantir un contraste optimal (Figure 3.18 (b)). Une vue depuis l'une des caméras sur le mouchetis d'un bloc B76 est illustrée à la Figure 3.18 (c). Pour une zone d'intérêt d'environ $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ sur les blocs B76, la précision est d'environ $1\text{ }\mu\text{m}$. Les images sont capturées à un taux d'une image toutes les 5 secondes de manière

générale, excepté pour les essais de la campagne 2Y où le taux est à une image par seconde au début de l'essai. Cette durée transitoire d'acquisition est détaillée pour chaque essai à l'Annexe B. Un exemple de champ de déformation principale majeure est illustré à la Figure 3.18 (d), 1000 secondes après le début de l'essai du spécimen B76-2Y-WS02-1.

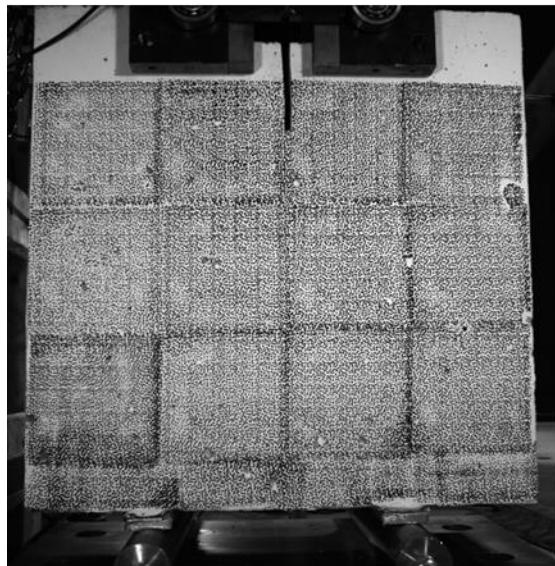
Pour quelques essais, un second système DIC (une autre paire de caméras) est installé sur l'autre face du spécimen pour des fins de comparaison. La seconde paire de caméra est similaire et les lentilles les équipant sont de distance focale 24 mm. Ce double dispositif est par exemple illustré à la Figure 3.20 (e). La corrélation des images et leur traitement se font via le logiciel *Vic3D V8*.



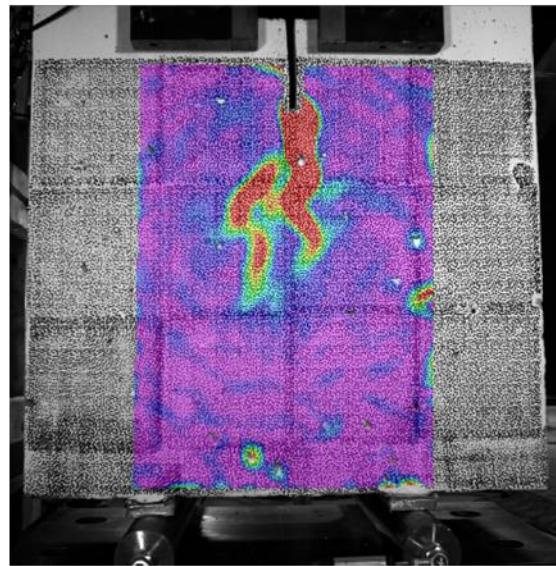
(a) Paire de caméras



(b) Création du mouchetis



(c) Image brute prise par une caméra



(d) Champ de déformation principale après corrélation des images

Figure 3.18 : Utilisation de la technologie de corrélation d'images

3.5.2 Protocole des essais

Les protocoles d'essais de fendage établis par Lemery (2018) sont rappelés aux Figure 3.19 et Figure 3.20, pour les blocs B38 et B76 respectivement. Beaucoup d'efforts ont été investis pour

rendre ce montage le plus rigide possible, le rendre modulable selon la dimension des spécimens et pour garantir la transmission d'effort la plus symétrique possible. À titre indicatif, un essai de fendage est lancé en fin de journée et dure dix heures pour garantir le comportement quasi statique du béton. La préparation et la mise en place d'un spécimen B38 nécessitent une journée, et deux journées pour un spécimen B76, pour deux opérateurs entraînés.

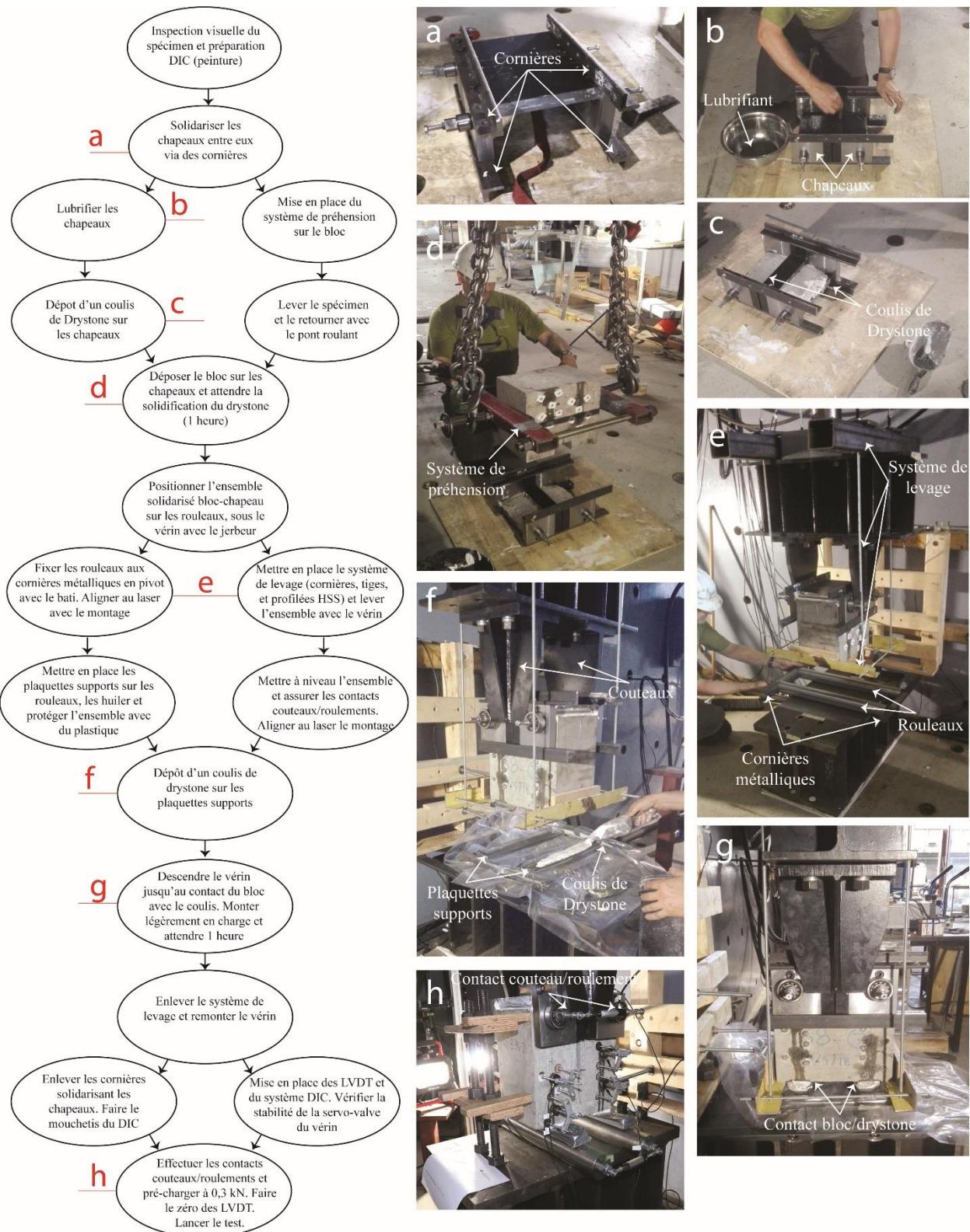


Figure 3.19 : Protocole de l'essai de fendage pour un bloc B38 (modifié de Lemery (2018))

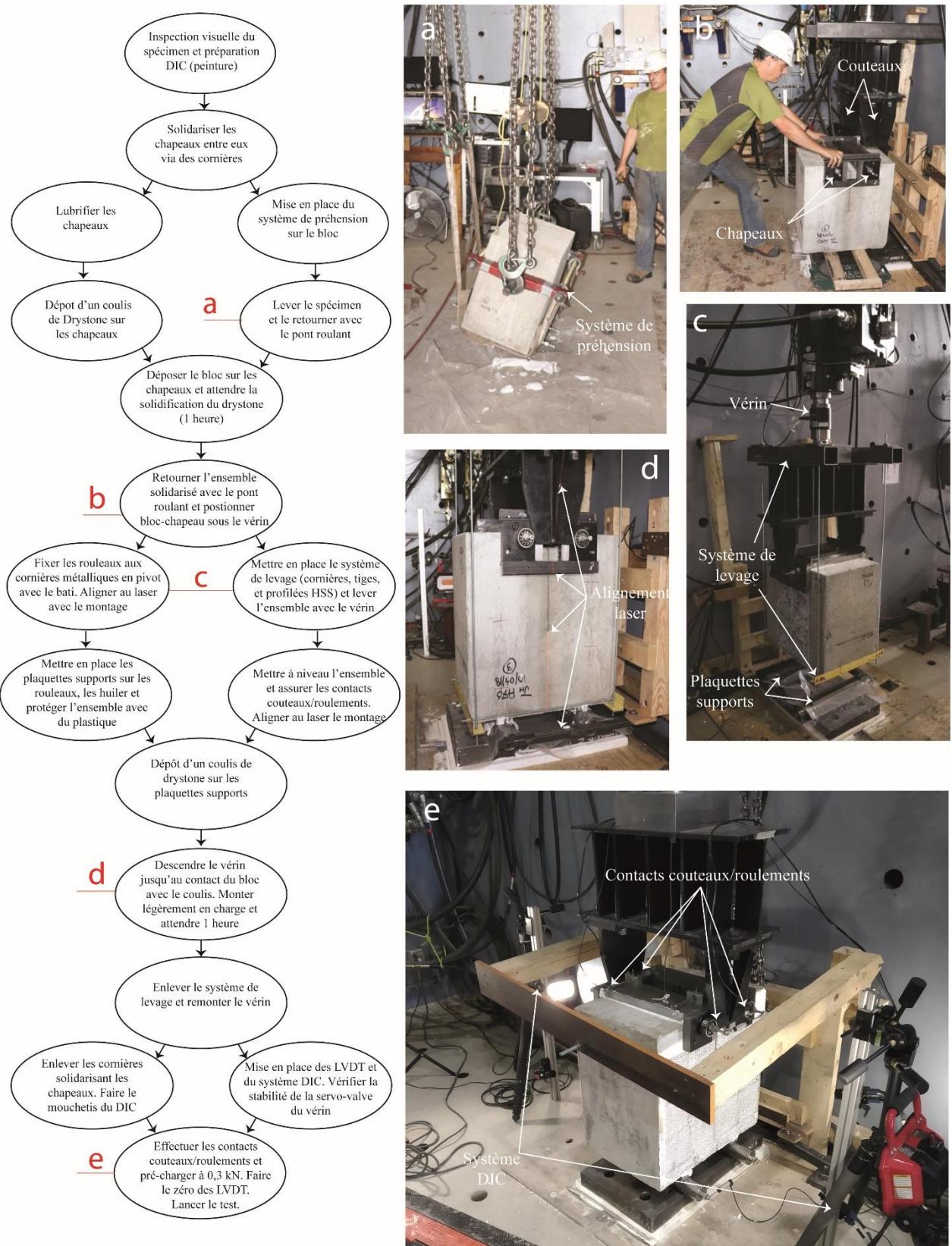


Figure 3.20 : Protocole de l'essai de fendage pour un bloc B76 (modifié de Lemery (2018))

3.5.3 Réalisation des essais

L'ordre des essais ainsi que les opérateurs les réalisant sont récapitulés à la Figure 3.21. Comme mentionné précédemment, une première campagne d'essais a eu lieu à l'été 2018 (0Y) sur des spécimens n'ayant pas été confinés en chambre climatique pour accélérer le RAS. La campagne menée par l'auteur de ce mémoire est celle de l'été 2020 (2Y). Un changement de montage est nécessaire pour accommoder les dimensions différentes des blocs B38 et B76 (Figure 3.3).

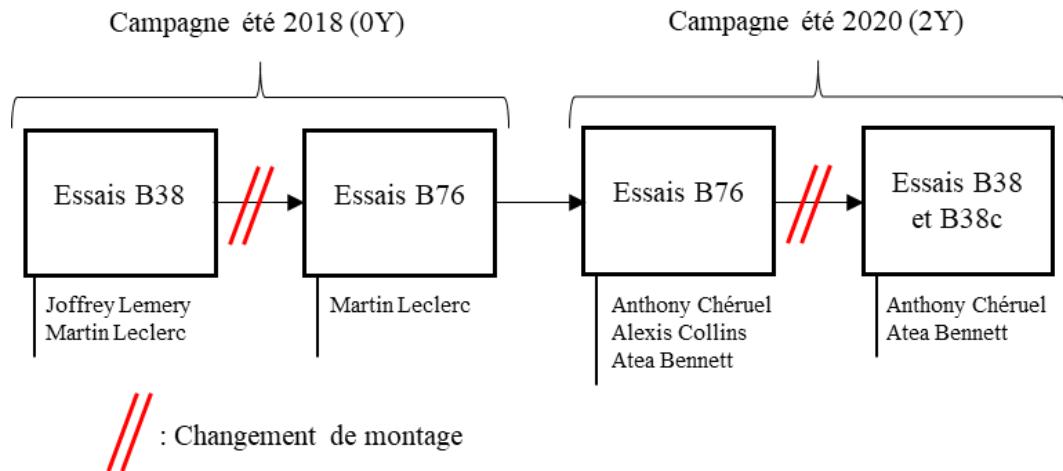


Figure 3.21 : Ordre et opérateurs des essais

Le suivi des essais est détaillé à l'annexe B, et les résultats des essais de fendage seront présentés et discutés au chapitre 5.

CHAPITRE 4 MESURES D'EXPANSIONS

Pour quantifier l'état d'avancement de la RAS au sein des spécimens, une campagne de suivi de l'expansion a été planifiée. Dans un premier temps, les résultats de l'inspection visuelle des spécimens discutés. Dans un second temps, les mesures d'expansions traditionnelles au DEMEC et au micromètre demi-lune seront présentées. Une comparaison des expansions volumétriques des carottes et des blocs sera menée et des conclusions essentielles seront tirées. Dans la dernière section de ce chapitre, les résultats des mesures au scanner tridimensionnel seront comparés aux mesures avec instrumentation mécanique.

Les objectifs principaux de ce chapitre sont de :

- Quantifier l'expansion volumétrique des spécimens.
- Repérer d'éventuels effets d'échelles entre les carottes et les blocs.
- Montrer que la technologie de scan 3D est capable de détecter et quantifier l'expansion causée par la RAS.
- Comparer les expansions mesurées au scan 3D avec l'instrumentation traditionnelle.

4.1 Inspection visuelle

Une inspection visuelle exhaustive de tous les spécimens a été réalisée à $t = 591$ jours pour sélectionner les spécimens de la campagne d'essai de fendage (voir la chronologie de la Figure 3.12). Des inspections visuelles sommaires sont faites à chaque date de mesure. Et ces inspections révélaient déjà des signes caractéristiques de la RAS sur certaines carottes et certains blocs, après le changement de chambre.

4.1.1 Inspection visuelle des carottes

Sur les quatre carottes B76 et les quatre carottes B38 suivies en expansion, seules trois carottes B76 ont montré des signes de développement de la RAS lors de l'inspection visuelle exhaustive. À savoir : de la fissuration surfacique, sans exsudation de gel, visible à la **Figure 4.1**. Les fissures en surfaces sont observées au sein des granulats (Figure 4.1 (a) et (c)), autour des granulats (Figure 4.1 (a), (b) et (d)) et se propageant dans la pâte de ciment, ce qui signifie un développement avancé

de la réaction d'après la section 2.3.1 du chapitre 2. La carotte B38-CAR-4 exhibe tardivement de la fissuration surfacique, observée après 821 jours.

Le patron de fissuration en surface a tendance à s'orienter vers les plots en acier incrustés dans les carottes, nécessaire aux mesures d'expansions (Figure 4.1 (b), (c) et (d)). Les plots semblent ainsi provoquer l'initiation de ces fissures de RAS. Les dispositions prises pour accommoder l'instrumentation influent donc sur le phénomène mesuré : ce résultat n'est pas en faveur de la technique de mesure traditionnelle d'expansion.

4.1.2 Inspection visuelle des blocs

Le résultat de l'inspection visuelle des blocs est récapitulé à la Figure 4.2 : les palettes de blocs sont numérotées 1 à 6, les spécimens exhibant une ou deux fissures visibles à l'œil nu sans exsudation de gel sont colorés en orange claire, et les spécimens exhibant beaucoup de fissuration surfacique et parfois de l'exsudation de gel sont colorés en orange foncée. Sur l'ensemble des blocs réactifs, seule une dizaine de blocs B38 coulés de côté (Figure 4.3 (a) et (b)), situés sur la palette n°2, et les deux blocs B76 (Figure 4.3 (c) et (d)), situé sur la palette n°3, ont montré des signes visuels distinctifs de la RAS. Des patrons de fissurations typiques de la RAS sont observés sur de nombreux spécimens. De l'exsudation de gel est même constatée sur quelques-uns (Figure 4.3 (a) et (c)), témoignant d'un stade avancé de développement de la réaction. Le fait que seuls les spécimens situés sur certaines palettes en particulier montrent de la fissuration extensive n'est pas le fruit du hasard.

4.1.3 Effet de la superposition des palettes de spécimens

Pour rappel, dans la première chambre climatique, le manque d'espace avait contraint la superposition des palettes de spécimens durant le confinement de type « I » (Figure 3.16 (a) du chapitre 3). Cette superposition a probablement entraîné des différences dans l'intensité de l'arrosage en eau, la localisation des spécimens par rapport à la source d'eau et par rapport à l'eau stagnante. Les conditions hydriques n'étant pas similaires entre tous les spécimens, le développement de la RAS n'a sans doute pas suivi la même intensité et la même cinétique.

4.1.3.1 Palettes de blocs B38 et B38c

Il est intéressant de noter que ce sont les blocs B38 et B38c de la palette inférieure n°2 qui sont les plus visiblement affectés par la RAS (Figure 4.2) par rapport aux blocs B38 de la palette supérieure n°1. On pourrait d'abord penser que c'est le sens de coulée qui provoque cette différence de développement de la RAS, puisque la palette n°1 consiste en 15 blocs B38 alors que la palette n°2 consiste en 12 blocs B38c et 3 blocs B38. Mais ces 3 seuls blocs B38 de la palette n°2 sont tous aussi affectés par la RAS que les blocs B38c adjacents, infirmant cette hypothèse. Ce sont donc bien les conditions hydriques variables qui provoquent cette différence : les blocs B38/B38c sont plus proches de l'eau stagnante (Figure 3.16 (a) du chapitre 3) et profitent donc d'un environnement localement plus humide (puisque leur palette n°2 est inférieure), ce qui favorise la RAS.

4.1.3.2 Palettes de blocs B76

Cependant l'inverse est observé pour les blocs B76. Ce sont les deux blocs B76 de la palette supérieure n°3 qui sont les seuls très affectés par la RAS, par rapport aux autres blocs B76 sur les palettes inférieures n°4 et n°6 (Figure 4.2). Ce ne sont donc pas les blocs les plus proches de l'eau stagnante au fond des bâches plastiques qui ont développé le plus de signes visibles distinctifs de la RAS, contrairement aux blocs B38. On peut émettre l'hypothèse que les dimensions plus importantes des blocs B76 limitent l'impact de l'eau stagnante sur les conditions hydriques locales des blocs (effet d'échelle).

Aussi il est important de remarquer que, bien que les palettes n°3 et n°5 soient toutes deux des palettes supérieures supportant chacune deux blocs B76, seuls les blocs de la palette n°3 exhibent des caractéristiques avancées typiques de la RAS. On peut potentiellement attribuer cette différence à l'hétérogénéité de développement de la RAS, puisque les conditions hydriques sont censées être identiques entre ces deux palettes.

4.1.4 Choix des blocs pour la campagne d'essai

Les blocs rapatriés au laboratoire de Polytechnique Montréal en vue des essais de fendage sont encadrés en rouge sur la Figure 4.2. Le choix a été fait après l'inspection visuelle exhaustive, en essayant de sélectionner les classes de blocs par catégories d'affectation de la RAS, pour avoir des réPLICATIONS d'essais les plus similaires possible.

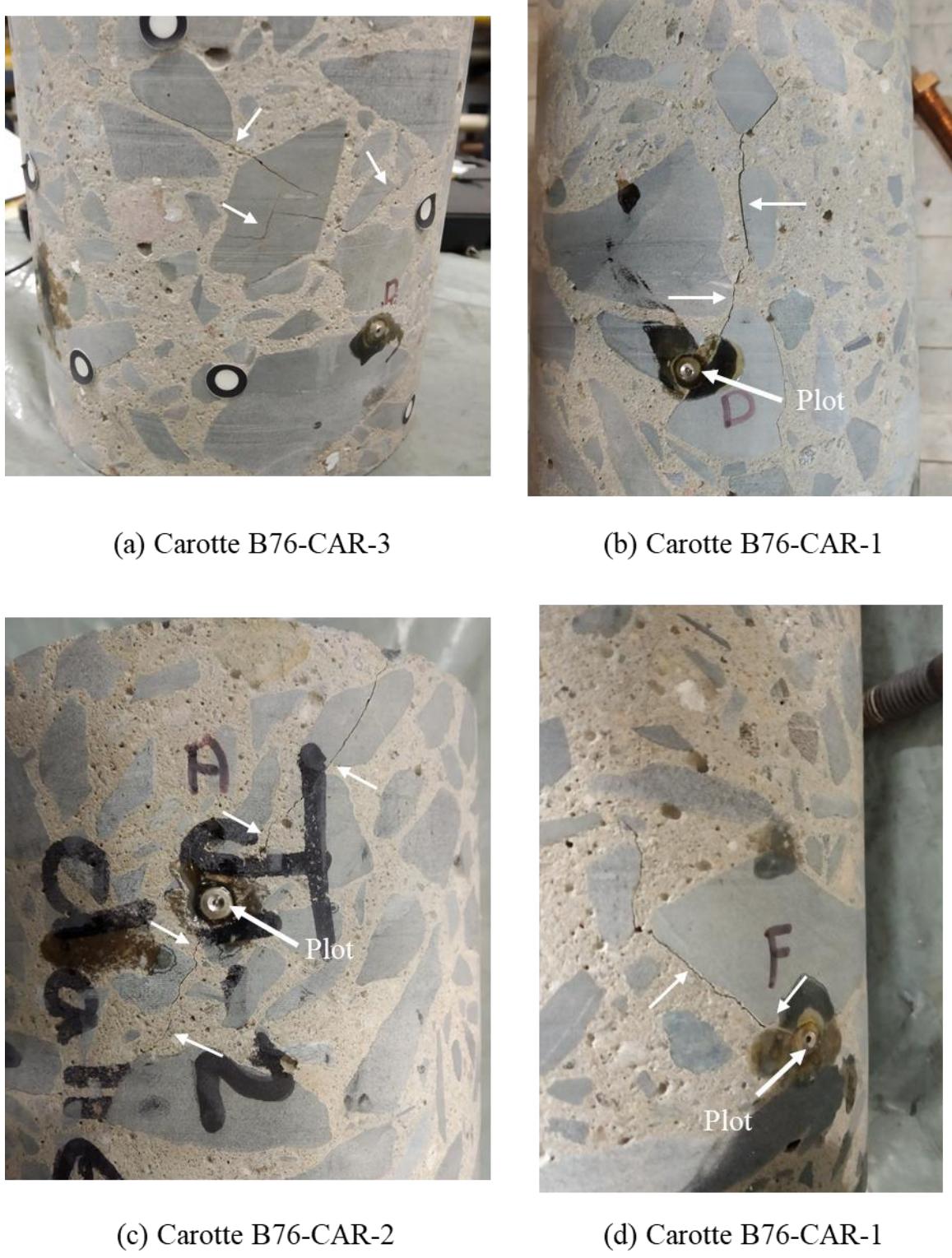


Figure 4.1 : Fissuration sans exsudation de gel sur trois des quatre carottes B76 suivies en expansion

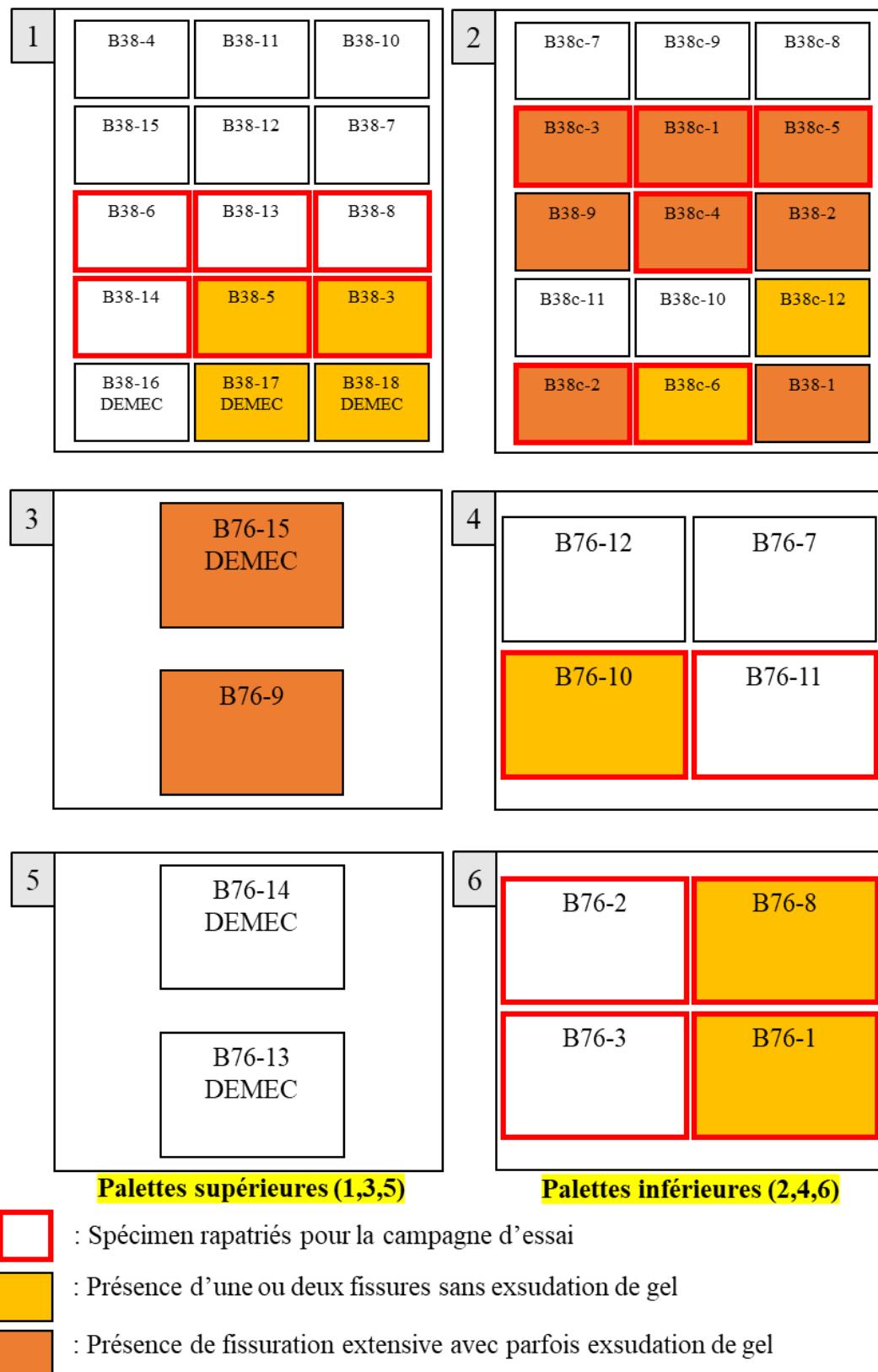


Figure 4.2 : Disposition des blocs par palette et résultat de l'inspection visuelle



Figure 4.3 : Fissuration avec et sans exsudation de gel sur les blocs B38c ((a) et (b)) et sur les blocs B76 ((c) et (d))

4.2 Mesure avec l'instrumentation mécanique traditionnelle

Les mesures d'expansions des carottes et des blocs instrumentés seront présentées. Une discussion sur la température des spécimens lors des mesures d'expansions sera menée et enfin, une comparaison des expansions volumétriques des quatre types de spécimens sera entreprise.

Les incertitudes de mesures sont illustrées sur la plupart des figures. Par souci de lisibilité, les barres d'incertitudes ne sont pas tracées à chaque point de mesure, mais illustrées une seule fois, à l'échelle, à côté des courbes. Le calcul de ces incertitudes est détaillé à l'annexe C. Le seuil de réactivité de 0,04% de la norme ASTM C1293 est représenté sur les prochaines figures par un trait pointillé noir horizontal, sur toutes les mesures d'expansions, peu importe la direction. Il servira de référence pour comparer les expansions négligeables des expansions significatives, même si la norme ASTM C1293 n'applique ce seuil de réactivité qu'à l'expansion longitudinale de prisme.

4.2.1 Expansion des carottes

Quatre carottes à granulats 76 mm (B76) et quatre carottes à granulat 38 mm (B38) sont instrumentés pour suivre leur expansion.

4.2.1.1 Carottes B76

Les variations de masse, les expansions longitudinales et les expansions transversales des carottes B76 sont illustrées à la Figure 4.4 (a), (b) et (c) respectivement. À noter que l'expansion d'une carotte représente l'expansion moyenne sur quatre mesures. Donc l'expansion moyenne des carottes B76 est une moyenne de seize mesures d'expansion sur quatre carottes distinctes.

Les carottes B76-CAR-1, B76-CAR-2 et B76-CAR-3 ont bien une expansion en sigmoïde caractéristique de la RAS (Figure 4.4 (b)). Ces carottes ont fortement gonflé, atteignant jusqu'à 0,25% d'expansion longitudinale à 800 jours. Seule la carotte B76-CAR-4 semble ne pas avoir beaucoup réagi : à la Figure 4.4 (b), son expansion longitudinale ne dépasse pas le seuil de 0,04 % à 365 jours, seuil de réactivité de la norme ASTM C1293 sur lequel ces essais d'expansions sont basés. Ce seuil est cependant dépassé après $t = 730$ jours, ce qui suggère que la carotte est néanmoins réactive. Cette faible expansion est corrélée à sa très faible prise de masse, voire sa perte de masse observée à la Figure 4.4 (a) qui n'est pas similaire aux tendances de prises de masse des trois autres carottes. La section 2.3.4.2 du chapitre 2 a permis de comprendre que l'apport d'eau

était essentiel pour développer la RAS et qu'une perte de masse (donc d'eau) de plus de 0,15% provoquait l'arrêt de la RAS. C'est l'ordre de grandeur de perte de masse que cette carotte B76-CAR-4 subit. Dans la suite des analyses des mesures d'expansions, cette carotte B76-CAR-4 ne sera pas considérée, car elle se comporte trop différemment de ses compères, même en considérant le caractère fortement hétérogène des expansions causées par la RAS.

De manière générale, plus les carottes B76 prennent du poids, et donc plus l'apport d'eau externe est important, plus les expansions longitudinales et transversales sont importantes.

4.2.1.2 Carottes B38

Les variations de masse, les expansions longitudinales et les expansions transversales des carottes B38 sont illustrées à la Figure 4.5 (a), (b) et (c) respectivement.

Les quatre carottes B38 semblent n'avoir été que très peu affectées par la RAS. À 365 jours, aucune carotte ne dépasse le seuil de réactivité de 0,04 % de la norme ASTM C1293, et ce seuil n'est dépassé qu'à partir de $t = 550$ jours environ pour la plus réactive des quatre (B38-CAR-4 à la Figure 4.5 (b)). Cette dernière carotte exhibe d'ailleurs de la fissuration importante à partir de $t = 821$ jours. Pourtant sa variation de masse est aussi négligeable que les trois autres carottes du même type. Les expansions transversales sont quant à elles négligeables et tendent même vers un retrait. Ces faibles expansions sont corrélées avec les tendances de pertes de masse constatées pour les quatre carottes (Figure 4.5 (a)). Les faibles expansions des carottes B38 semblent donc être liées à un manque d'apport d'eau externe.

4.2.2 Expansion des blocs

Trois blocs 300*300*200mm à granulat 38 mm (B38) et trois blocs 600*600*400mm à granulat 76 mm (B76) sont instrumentés pour mesurer leur expansion.

4.2.2.1 Blocs B76

Les expansions selon l'axe x, y et z des blocs B76 sont illustrées à la Figure 4.6 (a), (b) et (c) respectivement. La mesure de la variation de masse de ces blocs n'a pas été prévue, par considération purement technique compte tenu de leur poids (350 kg). Les traits pointillés verticaux noir et rouge indiquent respectivement les dates de changement de chambre (noir) et de changement de conditions hydriques (rouge).

Les expansions des blocs B76 sont négligeables, ne dépassant pas le seuil de réactivité (0,04%) de la norme ASTM C1293 peu importe la direction, excepté pour le bloc B76-15 qui atteint une expansion de 0,05 % à 0,10 % après 500 jours selon la direction de mesure. C'est d'ailleurs le seul bloc suivi en expansion sur lequel des signes distinctifs de la RAS ont été observés (Figure 4.3 (d)). Cependant, ces blocs démontrent une période prolongée de retrait compte tenu de leur dimension (600*600*400mm) qui peut masquer l'expansion causée par la RAS, comme le mentionne notamment Saouma (2014).

Les effets sur les expansions selon x, y et z des changements de chambre (trait noir vertical) et de conditions hydriques (trait rouge vertical) sont plus prononcés que pour les blocs B38.

4.2.2.2 Blocs B38

Les expansions selon l'axe x, les variations de masse tardives, et les expansions selon les axes y et z des blocs B38 sont illustrés à la Figure 4.7 (a), (b), (c) et (d) respectivement. Malheureusement la mesure de la variation de masse des blocs n'avait pas été initialement prévue.

De manière générale, les expansions des blocs B38 sont très faibles et ne dépassent jamais le seuil de réactivité de la norme ASTM C1293 peu importe la direction de mesure, même après plus de 800 jours de confinement en conditions accélérées. C'est corrélé avec le fait que peu ou pas de signes visuels distinctifs de la RAS n'aient été observés sur ces trois blocs B38 durant cette campagne. Pourtant, le mélange est bien réactif puisque quelques blocs B38 coulés de côté exhibent des traces caractéristiques de RAS (Figure 4.3 (a) et (b)).

Le changement de chambre (trait noir vertical) semble avoir provoqué une légère diminution de l'expansion. Les conditions d'apport d'eau dans la deuxième chambre climatique semblent donc ne pas avoir été appropriées pour favoriser le développement de la RAS. C'est confirmé par la tendance d'expansion à la hausse une fois les conditions hydriques changées (trait rouge vertical).

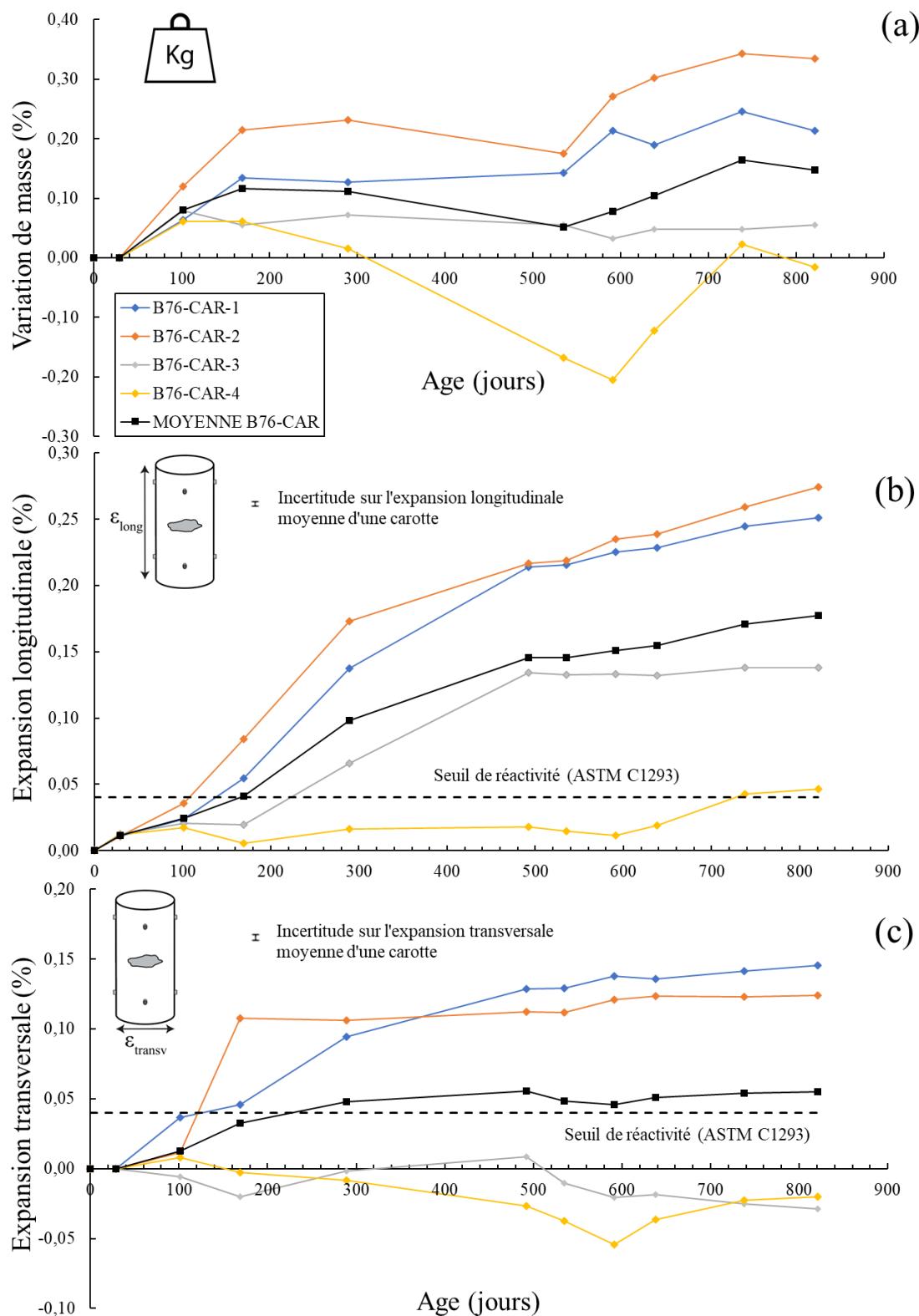


Figure 4.4 : Variations de masse (a), expansions longitudinales (b) et transversales (c) des carottes B76

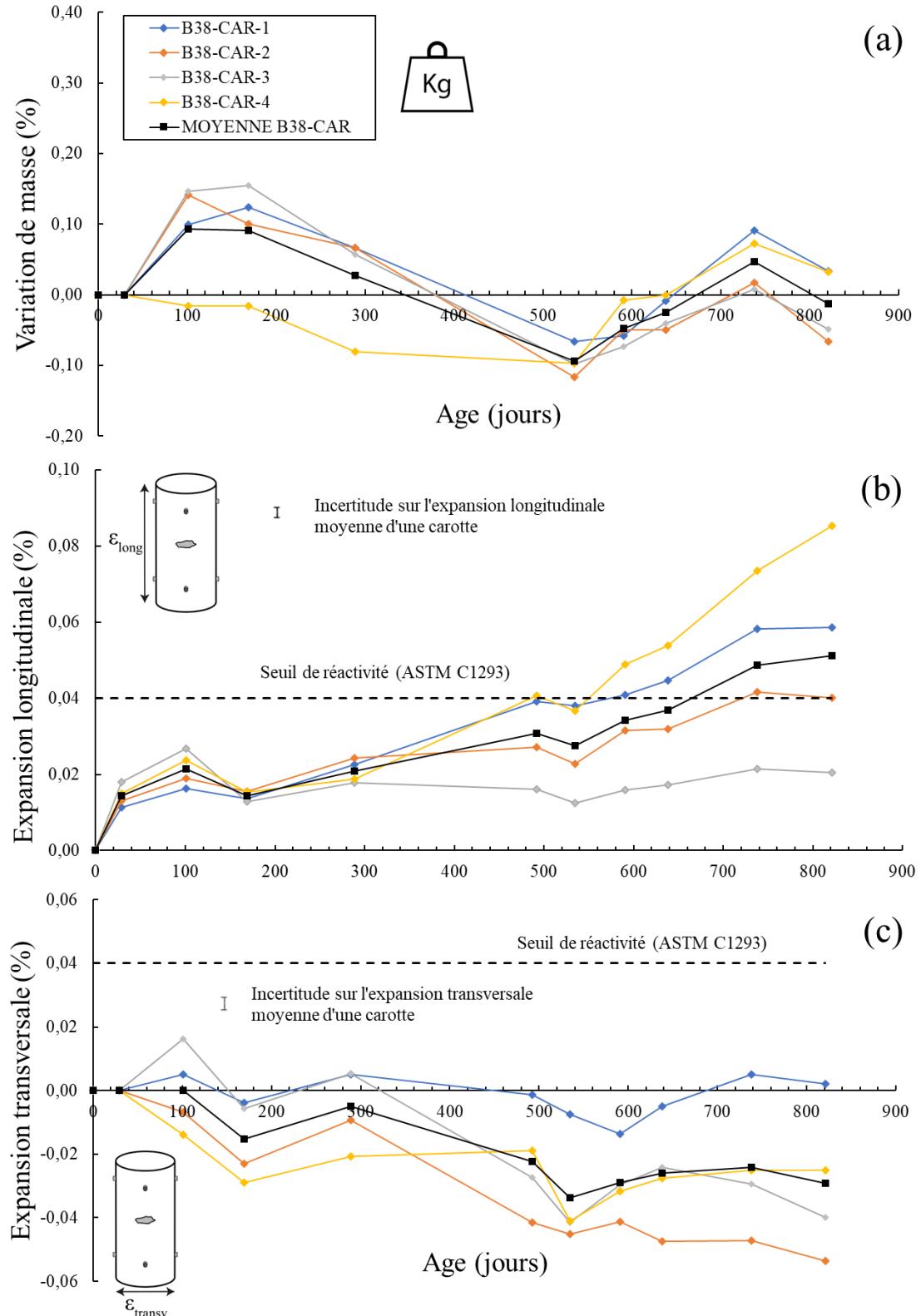


Figure 4.5 : Variations de masse (a), expansions longitudinales (b) et transversales (c) des carottes B38

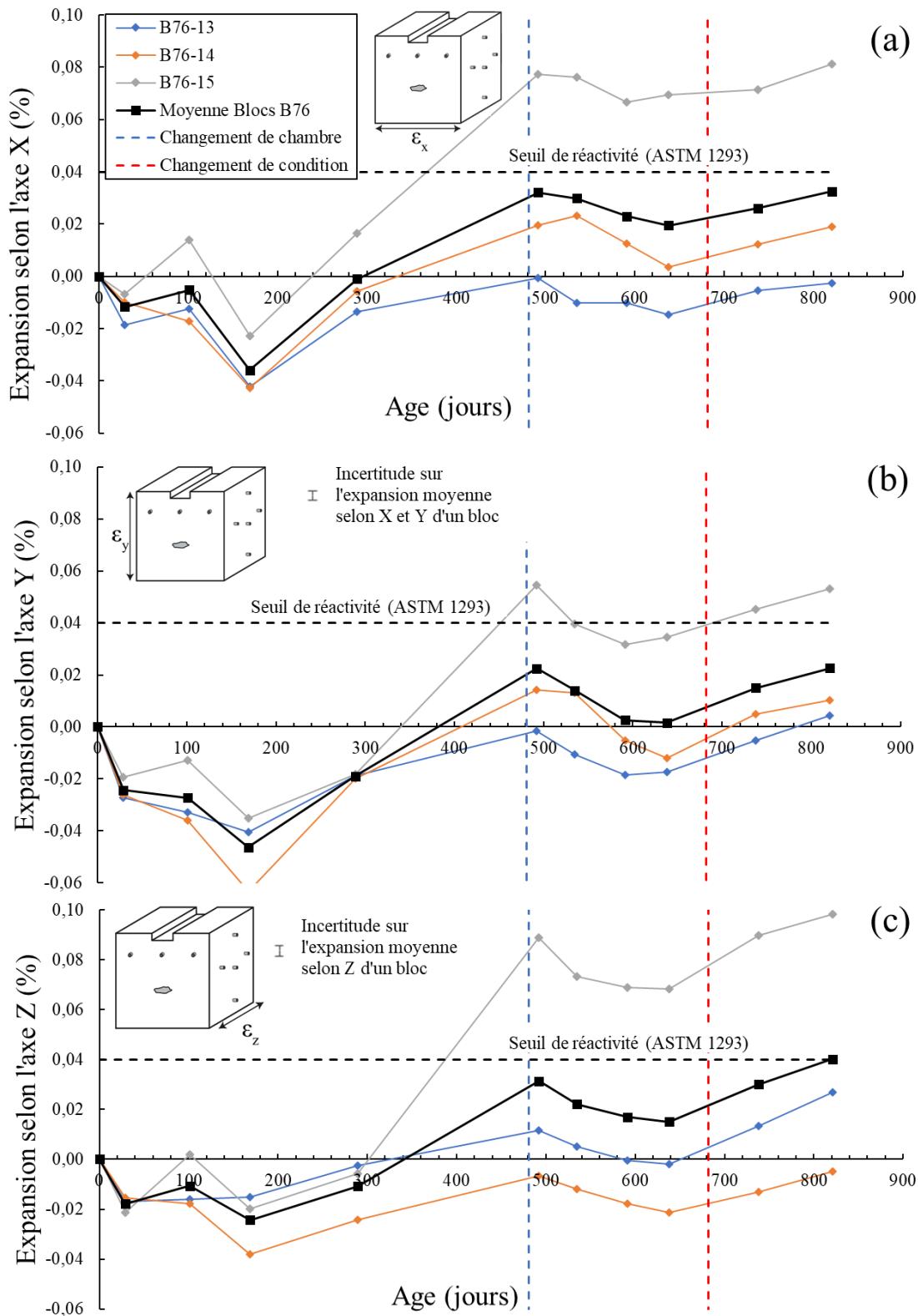


Figure 4.6 : Expansions selon l'axe X (a), l'axe Y (b) et l'axe Z (c) des blocs B76

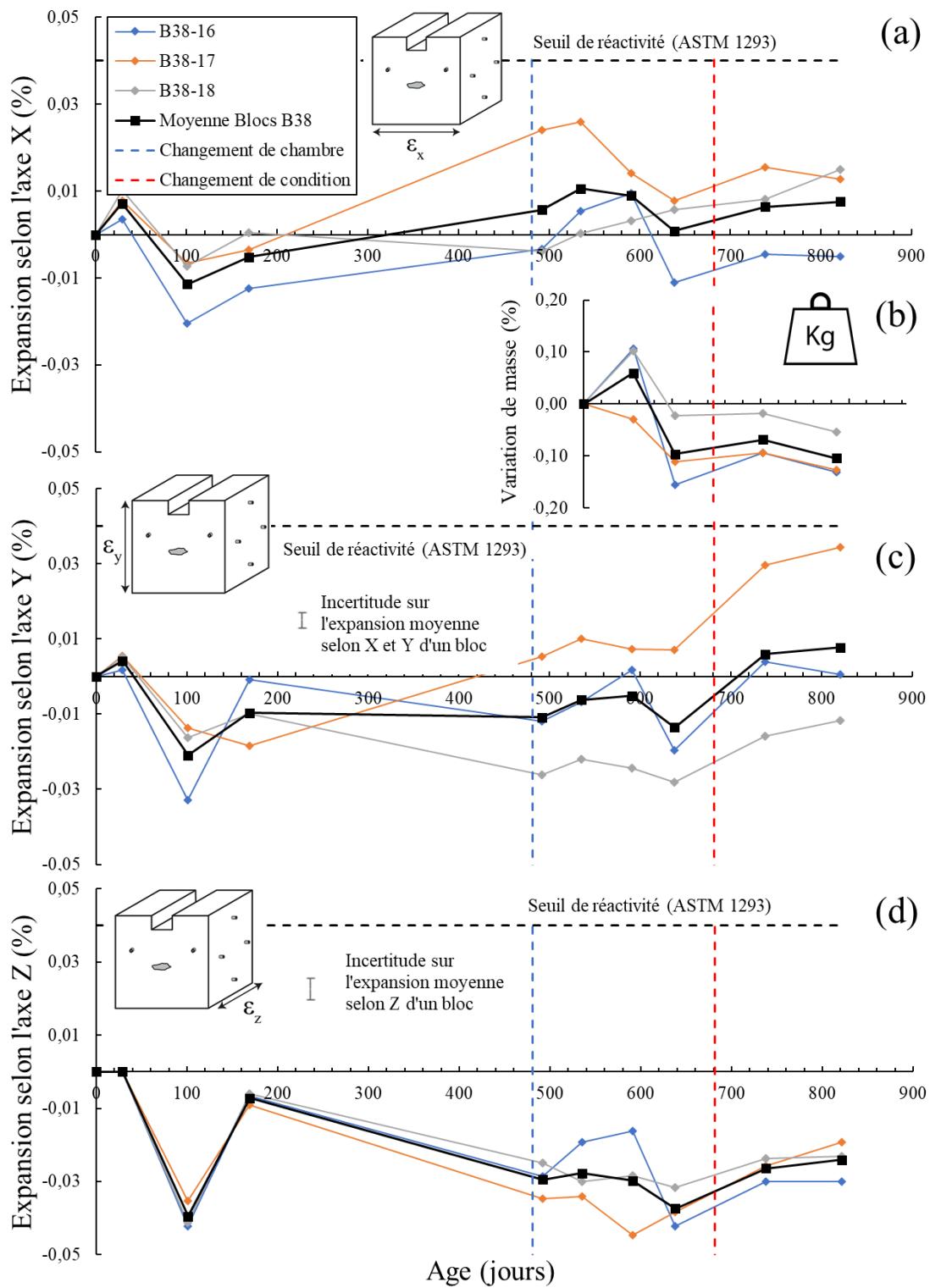


Figure 4.7 : Expansions selon l'axe X (a), variations de masse (b), expansions selon les axes Y (c) et Z (d) des blocs B38

4.2.3 Anisotropie de l'expansion

D'après les figures précédentes, l'anisotropie de l'expansion des spécimens peut être quantifiée.

4.2.3.1 Carottes

On ne sélectionne que les expansions des carottes B76-CAR-1 et B76-CAR-2, car les autres carottes ont des expansions transversales négligeables (inférieur au seuil de réactivité). Le coefficient d'anisotropie se calcule comme le rapport entre l'expansion longitudinale et l'expansion transversale : il est en moyenne de 1,7 après 500 jours d'expansions. C'est une valeur proche des coefficients d'anisotropie des études de Larive, Multon et Smaoui de la section 2.3.2 sur des éprouvettes cylindriques. Comme ces études, l'expansion est plus importante selon le sens de coulée.

4.2.3.2 Blocs

Bien que les expansions des blocs B38 et B76 soient pour la majorité négligeables (inférieures au seuil de réactivité), on remarque que les gonflements sont quasiment isotropes pour les blocs B38 et B76. Ainsi en expansion libre, l'anisotropie de gonflement semble beaucoup moins prononcée pour des blocs de grandes dimensions que pour des éprouvettes cylindriques, comme le remarquent Larive et Smaoui (section 2.3.2). Il est encore prématûr d'affirmer ceci dans le cadre de ce projet étant donné les faibles expansions mesurées, les mesures futures viendront confirmer ou non cette tendance.

4.2.4 Température surfacique des spécimens aux instants de mesures

La température surfacique des spécimens est relevée avec un thermomètre infrarouge avant chaque mesure. Cette température est mesurée sur chaque face d'un spécimen, et une moyenne est ensuite réalisée. La Figure 4.8 récapitule la température surfacique moyenne par type de spécimen. Par exemple, à $t = 289$ jours pour les carottes B76, la température moyenne des quatre carottes B76 est $24,1^{\circ}\text{C}$. Idéalement le laboratoire de mesure est climatisé, et les mesures d'expansions ne sont prises que dans un intervalle de température donné une fois les spécimens à température ambiante en équilibre thermique. Par exemple $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, comme le recommande la norme ASTM C1293 et comme illustré par les fuseaux en pointillés gris sur la Figure 4.8. En pratique, plusieurs problématiques ont été rencontrées au cours de ce projet :

- Le protocole pré-mesure d'arrêt de la régulation hydrique et thermique et de sortie des spécimens (section 3.4.5) n'a pas été établi dès le début du projet et n'a parfois même pas été rigoureusement suivi. Par exemple, à $t = 101$ jours, les températures des blocs B38 et B76 dépassent largement les $30^{\circ}C$, les blocs n'étaient donc pas en équilibre thermique au moment de la mesure.
- Contrairement aux autres types de spécimens, les blocs B76 sont de grandes dimensions (600*600*400mm) et ont donc plus d'inertie thermique. Ils se refroidissent moins rapidement et présentent un gradient thermique entre le cœur et la surface lors de la mesure d'expansion. C'est pourquoi, avec le même protocole de pré-mesure pour tous les types de spécimens, les blocs B76 sont toujours plus chauds (courbe jaune sur la Figure 4.8).
- Le changement de chambre climatique à $t = 481$ jours a aussi provoqué un changement de condition de mesure. Le laboratoire de mesure où se situait la première chambre climatique était réglé à $23 \pm 1^{\circ}C$ alors que le couloir de hangar à côté de la seconde chambre climatique a une régulation en température plus erratique, de l'ordre de $20 \pm 3^{\circ}C$. Sur la Figure 4.8, les températures des spécimens sont plus faibles dans la configuration de mesure liée la seconde chambre climatique.

Ainsi en pratique, il a été décidé de quand même effectuer les mesures d'expansions, même si les températures surfaciques des spécimens étaient plus faibles ou plus élevées que la tolérance initiale de $23 \pm 2^{\circ}C$. Certains auteurs recommandent d'appliquer un correctif d'expansion thermique sur l'expansion générée par la RAS (Fournier et al., 2010) pour isoler l'effet de la réaction. Si l'on considère un écart de température de $\Delta T = 10^{\circ}C$ entre deux mesures d'un même spécimen et un coefficient de dilatation thermique usuel du béton de $1,2 * 10^{-5}^{\circ}C^{-1}$, l'expansion thermique entre les deux mesures sera de $\epsilon_{thermique} = 10 * 1,2 * 10^{-5} = 120 \mu\epsilon$ soit 0,012 % d'expansion thermique linéaire. L'effet de la température s'observe particulièrement sur les courbes d'expansions des blocs B76 à $t = 101$ jours (Figure 4.6). Pendant la période caractéristique de retrait, les mesures d'expansions à cette date sont légèrement en hausse et ne suivent pas la tendance vers un retrait. L'expansion thermique est de l'ordre de 0,01 % environ dans les trois directions de mesures, pour un écart de $7^{\circ}C$ avec la mesure précédente à $t = 29$ jours. C'est cohérent avec l'ordre de grandeur de 0,012 % calculé précédemment.

Cette valeur d'expansion thermique rencontrée dans un cas extrême est non négligeable en comparaison aux faibles expansions causées par la RAS observées sur la majorité des spécimens. Mais généralement, les variations de température entre chaque mesure sont faibles et les températures des mesures initiales à $t = 0$ jours sont toutes à 23°C excepté pour les blocs B76, comme illustré à la Figure 4.8. Il n'a donc pas été jugé nécessaire d'appliquer de correction thermique aux expansions mesurées dans ce projet.

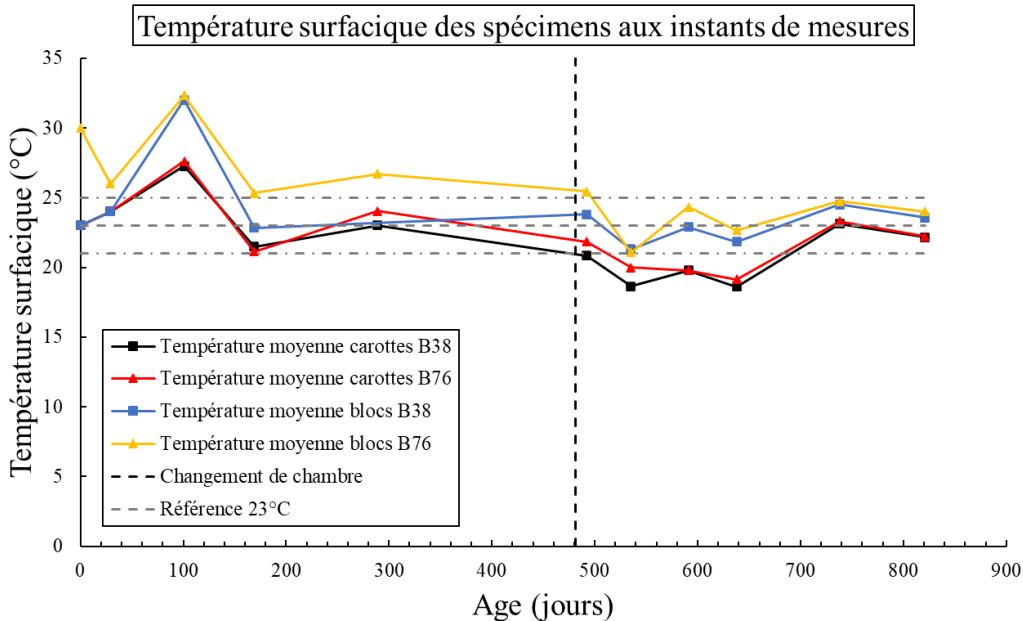


Figure 4.8 : Température surfacique moyenne de chaque type de spécimen aux instants de mesures

4.2.5 Comparaison des expansions volumétriques

La comparaison des expansions volumétriques des spécimens est menée dans cette section et va permettre de statuer sur la présence d'effets d'échelles. La variation de masse et l'expansion volumétrique des carottes à granulat 38 mm et 76 mm sont d'abord analysées. Puis les expansions volumétriques des blocs B38 et B76 sont superposées, et enfin une comparaison des expansions volumétriques des quatre types de spécimens est menée.

4.2.5.1 Expansion volumétrique des carottes

Les variations de masses et les expansions volumétriques des carottes sont illustrées à la Figure 4.9 (a) et (b). Les moyennes de ces grandeurs sont tracées en traits pleins et les fuseaux minimum et

maximum en traits pointillés, les grandeurs associées aux carottes B76 sont en rouge et celles associées aux carottes B38 sont en noir. L’expansion volumétrique ϵ_v d’un élément cylindrique se calcule d’après l’équation (4.1) à partir des expansions longitudinales ϵ_{long} et des expansions transversales ϵ_{transv} . Les détails de l’obtention de cette équation sont rappelés à l’annexe C.

$$\epsilon_v = \epsilon_{long} + 2 \epsilon_{transv} \quad (4.1)$$

Constatations expérimentales

L’expansion volumétrique moyenne des carottes B76 est significativement plus élevée que celle des carottes B38. Sur la Figure 4.9 (b), le fuseau minimum d’expansion volumétrique des carottes B76 (qui correspond à l’expansion volumétrique moyenne minimale des carottes B76 à chaque date de mesure) est toujours supérieur au fuseau maximum d’expansion volumétrique des carottes B38. Cette différence d’expansion entre les deux types de carottes peut s’expliquer par les différences de variation de masse qui apparaissent dès $t = 101$ jours sur la Figure 4.9 (a). De $t = 101$ jours à $t = 535$ jours les carottes B76 ont une masse constante, ce qui signifie qu’il n’y a pas d’apport ni de pertes d’eau au sein des spécimens. Alors que durant cette période, les carottes B38 perdent de la masse de manière continue, ce qui signifie une perte d’eau continue et donc un ralentissement voire un arrêt du développement de la RAS. En effet, comme évoqué au chapitre 2, Larive (1997) indique qu’au-delà de 0,15% de perte de masse d’eau, la RAS est arrêtée. C’est bien l’ordre de grandeur de perte de masse constaté entre $t = 101$ jours et $t = 535$ jours.

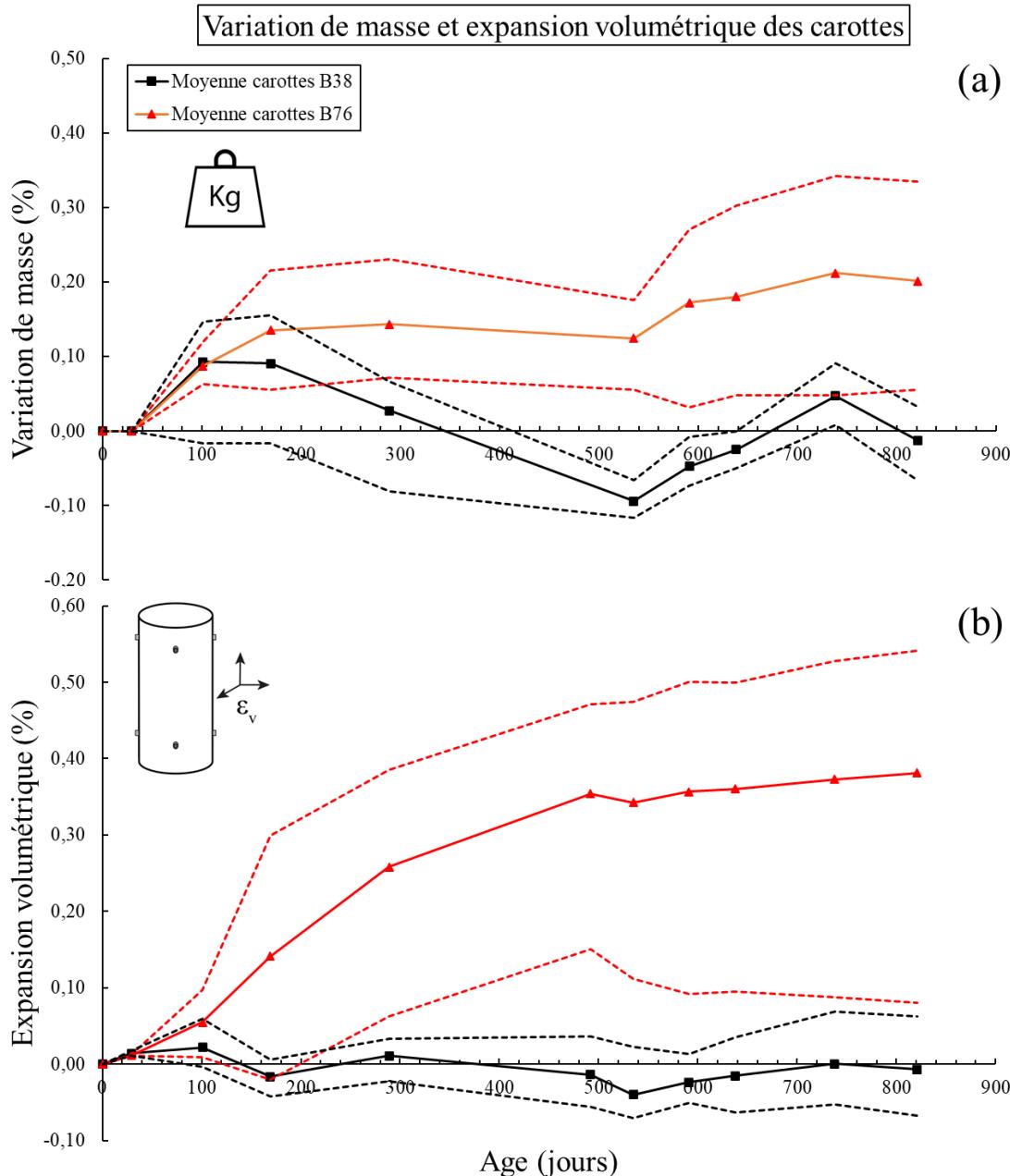


Figure 4.9 : Variations de masse (a) et expansions volumétriques moyennes (b) des deux types de carottes

Explication des différences d'expansions entre les deux types de carottes

Les conditions hydriques et thermiques des deux types de carottes sont censées être rigoureusement identiques puisque les huit carottes instrumentées sont chacune dans une chaudière hermétique standard tel que décrit à la section 3.4.4.1 du chapitre 3. On s'attend donc à ce que les variations

de masses et les expansions soient du même ordre de grandeur entre les carottes. La différence d'expansion entre les deux types de carottes pourrait s'expliquer de plusieurs manières :

Hypothèse 1 : Les chaudières contenant les carottes à granulats 38 mm ne sont pas hermétiques.

L'eau n'a pas été renouvelée au fond des chaudières supposées hermétiques de $t = 0$ jours à $t = 535$ jours, et par malchance, les chaudières où l'eau s'est évaporée / a fuité le plus rapidement sont peut-être les chaudières contenant les carottes à granulat 38 mm. À partir de $t = 535$ jours sur la Figure 4.9 (a), les carottes B38 et dans une moindre mesure les carottes B76 reprennent de la masse de manière continue. Cette date correspond au moment où les huit chaudières contenant les carottes ont été généreusement réapprovisionnées en eau, car certaines chaudières n'avaient quasiment plus d'eau au fond. À noter que deux chaudières contenant des carottes B76 (B76-CAR-1 et B76-CAR-2, soit les deux les plus réactives d'après la Figure 4.4) ont été remplacées à $t = 535$ jours car elles étaient percées. C'est donc peut-être une erreur expérimentale de non-réapprovisionnement en eau qui provoque la différence d'expansion entre les carottes B38 et B76.

Hypothèse 2 : Les granulats de diamètre 38mm sont moins réactifs à cause du concassage.

Le concassage des granulats vers un diamètre 38mm a peut-être réduit considérablement les sites de silices réactives au sein des granulats, les rendant moins réactifs en moyenne. Cependant, un projet de caractérisation précédent mené par Hydro-Québec (2018) sur le même type de granulat à l'étude semble infirmer cette hypothèse. La caractérisation a en effet montré qu'en concassant respectivement trois diamètres de granulats (19mm, 38mm et 76mm) en trois mélanges distincts de fuseaux granulométriques et de proportions respectant la norme ASTM C1293 (Tableau 3.2 du chapitre 3), les variations de masse et les expansions longitudinales des trois mélanges étaient sensiblement identiques.

Hypothèse 3 : Il existe un effet d'échelle entre le diamètre de granulat et la dimension de la carotte.

Toute chose étant égale par ailleurs, on s'attend à ce que le mélange avec les plus petits granulats 38mm réagisse plus pour deux raisons :

- La surface spécifique des granulats 38mm est plus grande, donc la migration des alcalis du ciment vers les sites réactifs des granulats est favorisée et la RAS devrait être plus rapide et l'expansion plus importante.

- D'après Saouma (2014), environ un granulat sur dix est réactif. Donc plus il y a de granulat dans un volume donné, plus il y aura de sites réactifs et donc de sites locaux d'expansions.

Cependant, l'inverse est observé : le mélange avec les granulats 76mm réagit beaucoup plus et l'expansion est sensiblement plus importante que le mélange avec des granulats 38mm. Comme évoqué dans la section 2.3.8.1 du chapitre 2, l'effet de la taille du granulat sur l'expansion pour des diamètres supérieurs à $> 5 \text{ mm}$ est mal connu et – à la connaissance de l'auteur – aucune étude ne traite de ce sujet pour des granulats $> 25 \text{ mm}$. On ne peut ainsi pas invoquer l'effet pessimum décrit à la section 2.3.8.1. On peut émettre l'hypothèse d'un autre type d'effet d'échelle : plus le rapport du diamètre maximum de granulat sur le diamètre de la carotte est élevé, plus la RAS est favorisée. Cela rentre cependant directement en contradiction avec ce que Gao et al. (2013) suggèrent.

Hypothèse 4 : Les granulométries des mélanges 38mm et 76mm diffèrent et provoquent des expansions radicalement différentes.

Les deux mélanges des deux diamètres de granulats sont très similaires (Tableau 3.2 du chapitre 3), excepté ce qui a trait à la répartition des fuseaux granulométriques. Le mélange avec granulat 76mm a environ 1,8 fois plus de masse de granulat dans le fuseau $6 - 19 \text{ mm}$ que le mélange avec granulat 38mm, et 135 kg/m^3 de masse de granulat totale supplémentaire. Gautam et al. (2017), à la section 2.3.8.2, indiquaient que lorsque les fuseaux granulométriques sont légèrement modifiés entre des mélanges, les expansions de ces mélanges pouvaient varier de l'ordre de 50% entre eux. Aussi, d'après les deux raisons évoquées à l'hypothèse 3 précédente, le fuseau $6 - 19 \text{ mm}$ est censé plus favoriser le développement de la RAS que les autres fuseaux. Cependant, un autre projet de caractérisation mené par Hydro-Québec (2018) sur le même mélange à granulat 38mm, avec notamment les mêmes fuseaux granulométriques que le mélange de ce projet, démontre que l'expansion longitudinale atteint 0,18% après 476 jours. Soit une expansion non négligeable bien supérieure au seuil de réactivité de 0,04% la norme ASTM C1293.

La différence importante d'expansion entre les deux types de carottes est inattendue, et pourrait s'expliquer par une combinaison des hypothèses proposées précédemment. D'après les pertes de masses importantes des carottes B38, l'hypothèse la plus probable semble être le manque d'apport d'eau dans l'enceinte confinée des chaudières de ces carottes.

4.2.5.2 Expansion volumétrique des blocs

Les expansions volumétriques des blocs sont illustrées à la Figure 4.10. Les expansions volumétriques moyennes sont tracées en traits pleins et les fuseaux minimum et maximum en traits pointillés, les blocs B76 sont en jaune et les blocs B38 sont en bleu. L'expansion volumétrique des blocs ϵ_v est obtenue en sommant les expansions dans les trois directions de mesures (expansions selon l'axe X ϵ_x , selon l'axe Y ϵ_y et selon l'axe Z ϵ_z) :

$$\epsilon_v = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z \quad (4.2)$$

Les blocs B76 semblent avoir plus gonflé que les blocs B38 en moyenne (Figure 4.10 (a)). A priori, les tendances d'expansions devraient être similaires puisque les conditions thermiques et hydriques sont supposées identiques. Cependant, comme mentionné au chapitre 3, dans la première chambre climatique les palettes de blocs étaient empilées par manque de place, ce qui a entraîné des différences d'apport d'eau entre les palettes supérieures et inférieures. Particulièrement, un des trois blocs B76 instrumentés, B76-15, était situé sur une palette ayant bénéficié d'un apport d'eau plus important que les deux autres blocs B76 instrumentés situés sur une autre palette.

C'est ce bloc B76-15 qui a significativement plus gonflé dans les trois directions sur la Figure 4.6. C'est d'ailleurs le seul bloc B76 instrumenté sur lequel des signes distinctifs de la RAS ont été observés (Figure 4.3 (d)). Si l'on ne considère pas ce bloc B76-15 ayant bénéficié de meilleures conditions d'apport d'eau que ses compères, l'expansion volumétrique moyenne des deux autres blocs B76 est aussi négligeable que celle des trois blocs B38 (Figure 4.10 (b)). Les blocs B76 et B38 instrumentés ont donc en majorité des expansions négligeables.

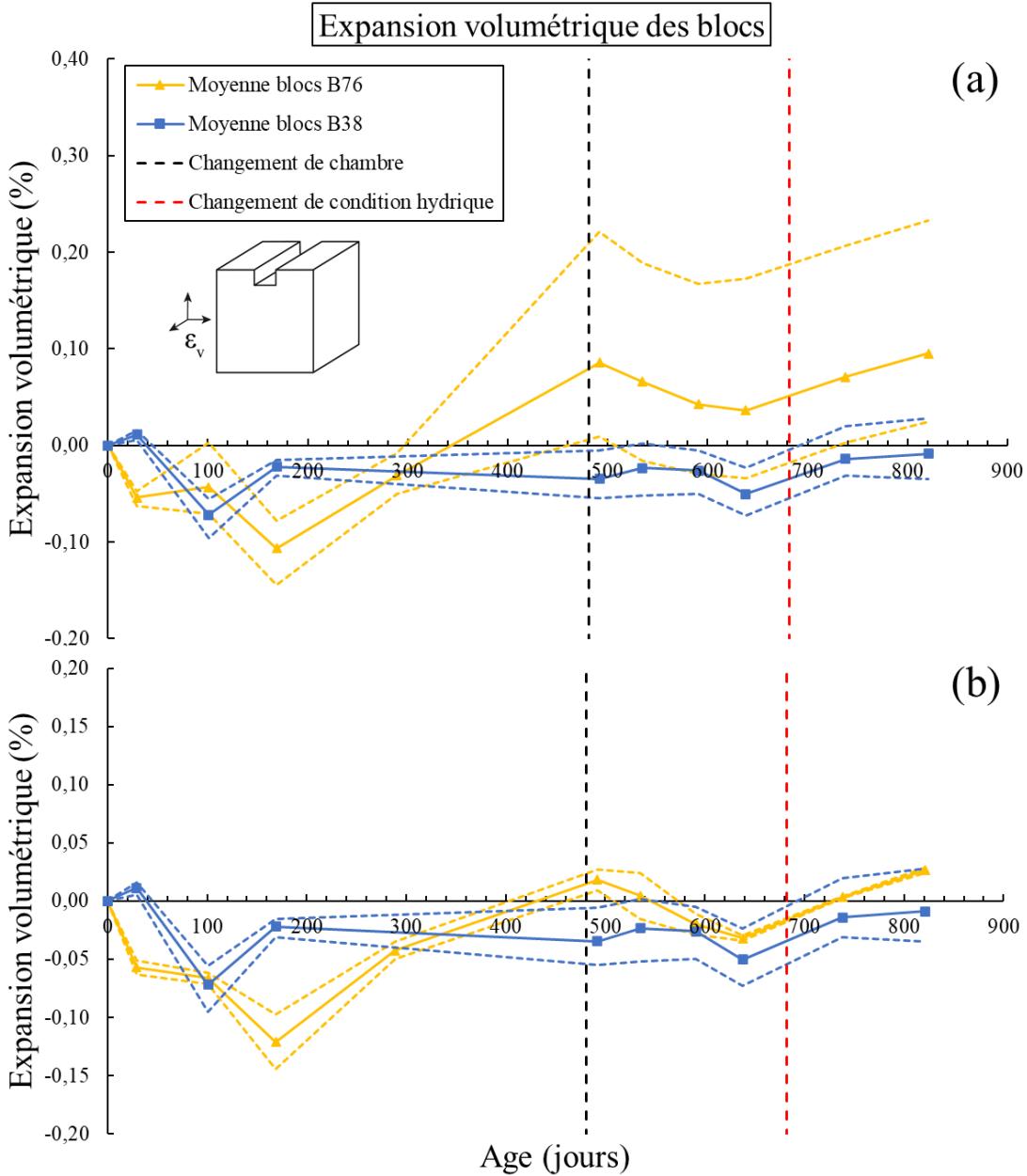


Figure 4.10 : Expansions volumétriques moyennes des blocs B38 et B76 en considérant le bloc B76-15 (a), et sans le considérer (b)

L'effet délétère sur l'expansion du premier changement de condition hydrique en changeant de chambre à $t = 491$ jours est similaire entre les deux types de blocs. L'effet bénéfique sur l'expansion du second changement de condition hydrique à $t = 682$ jours est aussi semblable.

4.2.5.3 Comparaison des carottes et des blocs

Les expansions volumétriques moyennes des quatre types de spécimens (carottes B38, carottes B76, blocs B38 et blocs 76) étudiées précédemment sont regroupées sur la même Figure 4.11. Les fuseaux minimum et maximum ne sont pas tracés par souci de lisibilité du graphe. Pour rappel, la carotte B76-CAR-4 a été omise pour sa réactivité trop faible par rapport aux carottes B76. Le bloc B76-15 a été conservé dans la moyenne des blocs B76, malgré sa réactivité plus importante.

Si l'on ne considère pas les carottes B38 qui n'ont pas gonflé comme attendu, les blocs B38 et B76 ont beaucoup moins gonflé que les carottes B76. Pourtant la section 2.3.6 du chapitre 2 avait permis de mettre en évidence l'importance des effets d'échelles : à conditions hydriques identiques, plus un spécimen est de grande dimension, plus son expansion volumétrique est importante. Comme cet effet d'échelle n'est pas constaté ici, c'est que les conditions hydriques diffèrent significativement entre les blocs et les carottes. Les blocs B38 et B76 ne semblent pas avoir eu assez d'eau pour que la RAS se développe convenablement et qu'une expansion significative soit mesurée.

Un autre facteur pouvant en partie expliquer les faibles expansions des blocs est l'intensité du lessivage des alcalis. L'apport d'eau des blocs se fait par ruissèlement d'eau directement sur les blocs avant le second changement de condition hydrique (Figure 3.16 du chapitre 3). Ce qui favorise un plus fort lessivage des alcalis que lorsque le mécanisme d'apport d'eau est par saturation d'eau dans un milieu confiné, comme c'est le cas pour les carottes dans les chaudières supposées hermétiques. Plus le lessivage des alcalis est important, moins l'expansion volumétrique sera grande (d'après la section 2.3.6.1 du chapitre 2).

Aussi, la quantité d'alcalis dans le mélange du projet, de 3 kg/m^3 , correspond à la limite fixée en pratique pour précisément éviter des expansions trop grandes, comme évoqué à la section 2.3.5.1 du chapitre 2. Cette relativement faible quantité d'alcalis dans le mélange pourrait expliquer les faibles expansions observées. À la Figure 2.14 du chapitre 2, pour un surdosage en alcalis de 3 kg/m^3 et une quantité de ciment de 300 kg/m^3 (soit un mélange assez similaire à celui de ce projet), les expansions longitudinales à un an d'un essai ASTM C1293 varient entre 0,02% et 0,06%. Malgré ce faible surdosage en alcalis, les mélanges des carottes et des blocs sont quasiment identiques (Tableau 3.2), et pourtant, les carottes B76 gonflent fortement.

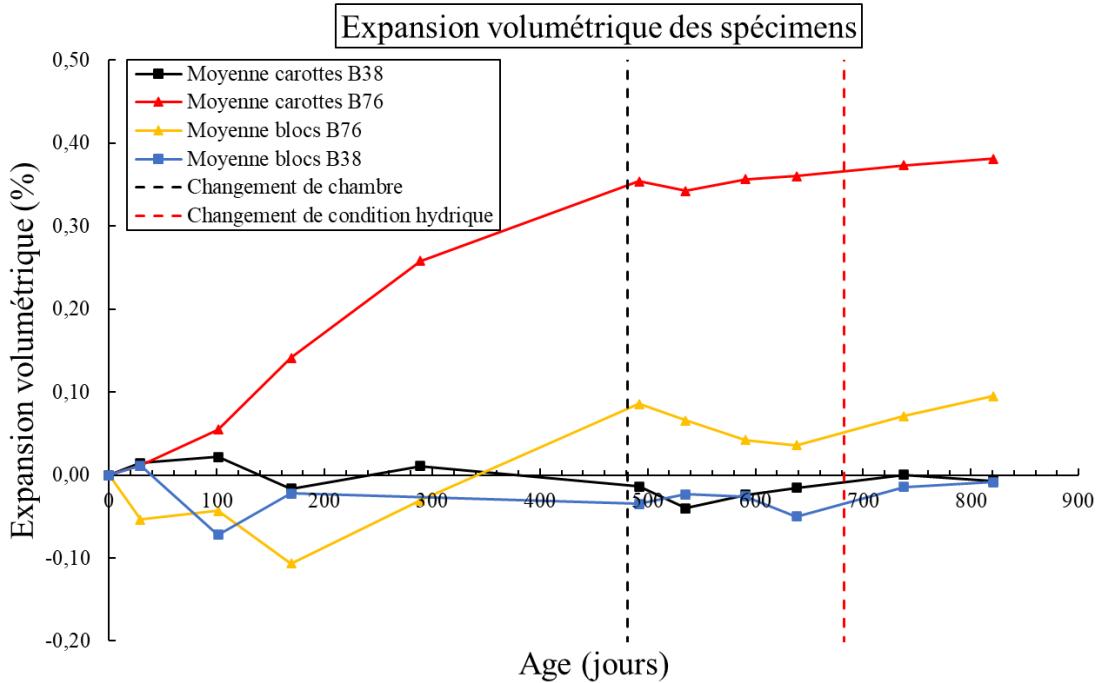


Figure 4.11 : Expansions volumétriques moyennes des quatre types de spécimens

4.2.6 Synthèse des différences entre les types de spécimens

La Figure 4.12 récapitule les différences entre les types de spécimens à date du rapatriement des spécimens à $t = 609$ jours. Cette classification est basée sur la comparaison des expansions longitudinales et volumétriques, l'inspection visuelle, et les réflexions sur l'effet de la superposition des palettes de spécimens des sections précédentes.

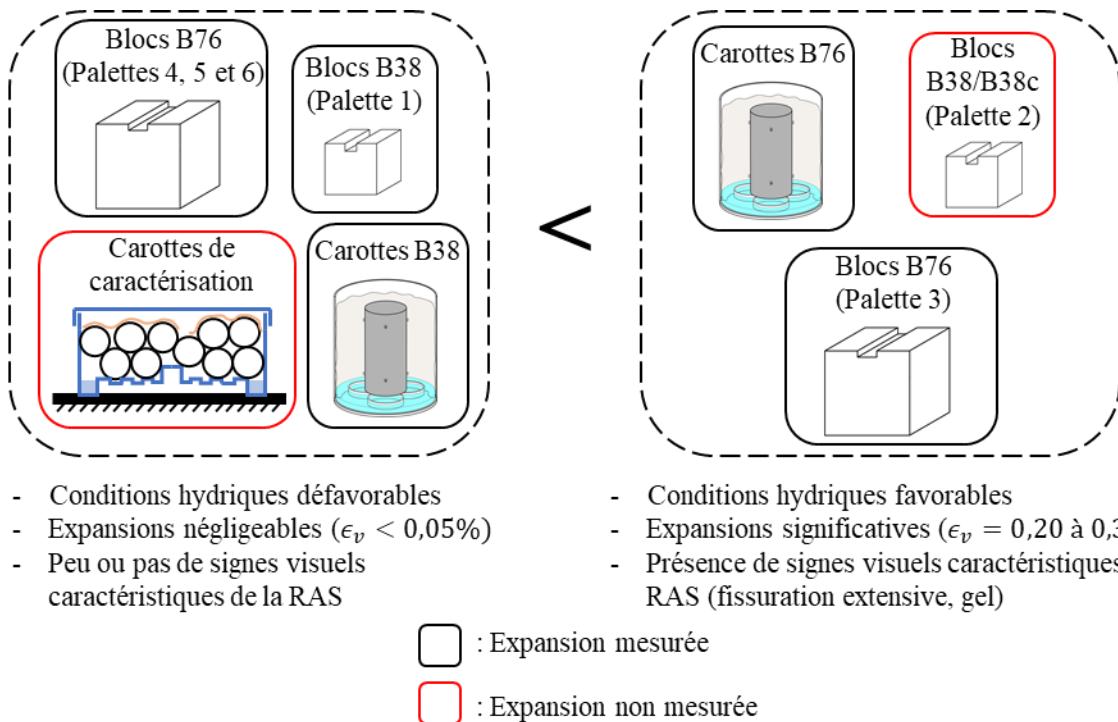


Figure 4.12 : Résumé des différences entre les types de spécimens à date du rapatriement pour essais ($t = 609$ jours)

L’expansion n’a pas été suivie pour chaque classe de condition hydrique. La condition hydrique d’un spécimen influence directement le développement de la RAS et l’expansion associée (section 2.3.4 du chapitre 2). Ainsi, pour quantifier le développement de la RAS de tous les spécimens, on pourrait procéder de deux manières :

- Quantifier l’état d’endommagement interne des spécimens avec la méthode du DRI (*Damage Rating Index*). C’est une méthode semi-quantitative basée sur le comptage visuel au microscope optique des caractéristiques pétrographiques internes de la RAS (Sanchez et al., 2015). Une corrélation entre le DRI et l’expansion des spécimens pourra ensuite être faite puisque cet index DRI est proportionnel à l’expansion générée par la RAS (Sanchez et al., 2015; Sanchez et al., 2017).
- Quantifier le degré de saturation en eau des spécimens à partir de la prise de masse d’eau, et confirmer les résultats avec une nouvelle campagne d’accélération de la RAS sur quelques spécimens dédiés. Bernard (2020) a proposé dans ce sens un protocole de quantification de ce degré de saturation. Un lien avec l’expansion des spécimens pourra

ensuite être fait puisque le degré de saturation est directement corrélé à l'expansion générée par la RAS (Comi et al., 2012; Bernard, 2020).

Ces caractérisations ne seront pas réalisées dans le cadre de ce mémoire.

4.2.7 Problèmes et limitations de la technique de mesure traditionnelle

La méthode de mesure traditionnelle de l'expansion avec des micromètres est utilisée par la majorité des chercheurs et de l'industrie du génie civil. Elle est simple d'utilisation, suffisamment précise et portative. Cependant, cette technique de mesure a ses limites et de nombreux problèmes sont rencontrés lors de son utilisation :

- La mise en place de plots d'acier accommodant la mesure au micromètre est chronophage.
- La mise en place de plots d'acières nécessite un gabarit sur mesure pour les carottes, et un tel gabarit n'est pas envisageable pour des blocs de dimensions plus importantes. Les plots d'acier destinés aux blocs B38 et B76 ont été disposés préalablement dans les coffrages avant la coulée (Lemery, 2018), ce qui a entraîné des travaux de correction importants du positionnement de certains plots.
- Étant donné la longueur fixe du DEMEC et le faible débattement autour de cette longueur ($[-1,6 \text{ mm} ; +3,2 \text{ mm}]$) : si les plots ne sont pas parfaitement positionnés et/ou si l'expansion générée par la RAS est très importante, l'écartement maximum du DEMEC n'est pas suffisant pour mesurer la distance entre les plots. Ainsi dans ce projet, un nombre de mesures non négligeable est impossible à cause de ces deux raisons.
- Les plots d'acières ancrés dans les spécimens semblent initier et diriger la fissuration générée par la RAS (Figure 4.1). Ce sont des points où la concentration de contrainte est localement importante. La technique de mesure est donc invasive et influence le phénomène mesuré.
- Pour la mesure transversale, les plots d'acier opposés sont ancrés dans la carotte sur une distance de 10 mm (Figure 4.13 (a)). Donc seul un diamètre effectif de 130 mm est réellement mesuré en expansion puisque les plots ne gonflent pas. La longueur effective est prise en compte dans le calcul des expansions transversales présentées

précédemment. Ainsi, si un gonflement se localise très proche de la surface, la mesure transversale ne rendra pas ou peu compte de ce gonflement.

- Pour la mesure longitudinale, chaque plot suit le gonflement local proche de son ancrage, si gonflement il y a. Les deux plots d'une paire de plots de mesure ne s'écartent donc pas nécessairement en translation unidirectionnelle, et un des plots peut par exemple effectuer une rotation (Figure 4.13 (b)). Une certaine distance $L_{non\ mesuré}$ représentée à la Figure 4.13 (b) n'est ainsi pas mesurée par le DEMEC. Cela peut provoquer un effet de « filtre de l'expansion » qui rend compte d'une expansion plus faible qu'en réalité.

Toutes ces limitations sont peu évoquées par les chercheurs, et comme aucune alternative à la mesure traditionnelle n'est disponible et démontrée fiable, son utilisation reste généralisée. C'est tout l'intérêt de la technique de mesure par scan 3D présentée dans la suite de ce chapitre : montrer qu'une alternative est désormais disponible.

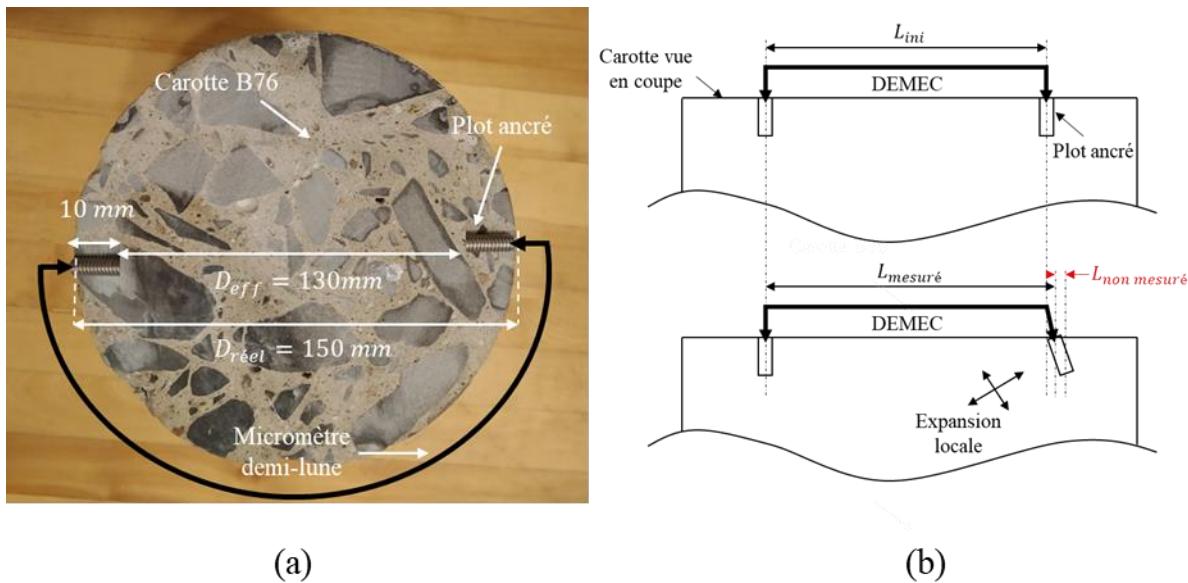


Figure 4.13 : Limitations des mesures transversales (a) et longitudinales (b)

4.3 Mesure avec le scanner 3D

Des mesures au scanner 3D des spécimens ont été réalisées en parallèle des mesures traditionnelles au DEMEC et micromètre. Étant donné que cette instrumentation n'a jamais été utilisée dans le cadre d'expansion causée par la RAS – à la connaissance de l'auteur -, l'objectif principal est surtout de montrer la faisabilité des mesures et si les résultats corroborent les mesures traditionnelles. La suite de logiciel *Vxelements* fournie avec le scanner par le constructeur *Créaform* répond au besoin de ce projet pour mesurer l'expansion des spécimens. Les trois logiciels *Vxscan*, *Vxinspect* et *Vxmodel* sont employés, et les fonctions utilisées de chacun sont récapitulées à la Figure 4.14.

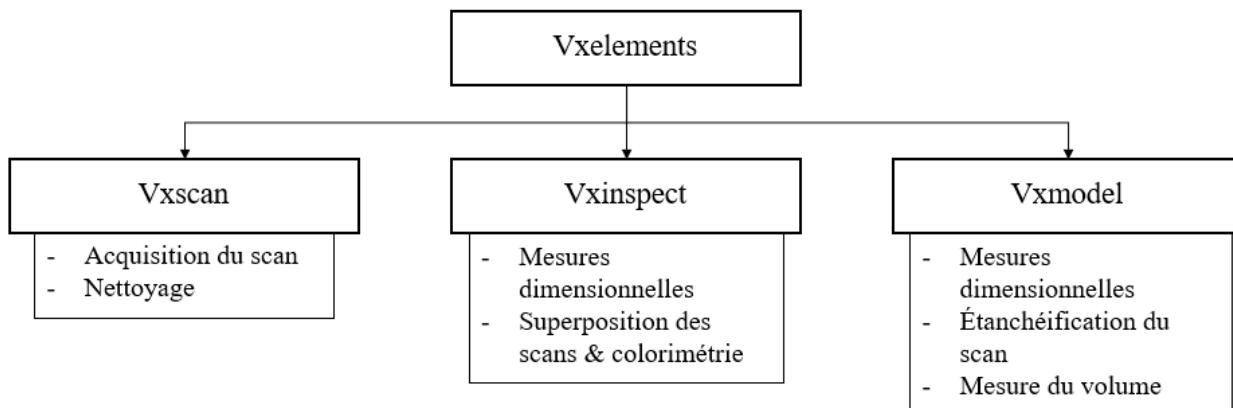


Figure 4.14 : Utilisation des logiciels de la suite *Vxelements* pour les mesures d'expansions

4.3.1 Protocole de mesure des carottes

L'objectif est d'obtenir des mesures dimensionnelles d'un spécimen scanné à une certaine date. La comparaison entre les mesures dimensionnelles à plusieurs dates permet ensuite d'établir une expansion. La mesure volumétrique ne peut être réalisée que sur *Vxmodel*, alors que les autres mesures dimensionnelles peuvent être réalisées sous *Vxinspect* et *Vxmodel*, comme indiqué à la Figure 4.14. Le protocole de mesure présenté ci-dessous est simple, rapide, répétable et reproductible. Il a été obtenu à la suite de nombreuses itérations.

4.3.1.1 Mesure longitudinale

La mesure longitudinale s'effectue sur la hauteur de la carotte. Deux plans sont respectivement créés sur les faces supérieures et inférieures avec l'outil de sélection par « normale similaire » et

une tolérance de sélection de triangles maximale (100/100). La distance entre le centre du premier plan et sa projection orthogonale sur le deuxième plan est ensuite mesurée. Le choix du « premier plan » est arbitraire, et une vérification est systématiquement faite en réalisant la projection opposée du centre du deuxième plan vers le premier plan. Pour les carottes, les deux distances projetées donnent toujours des distances très proches à quelques micromètres près. Cette mesure est illustrée à la Figure 4.15 (a).

Il est important de considérer que la face de la carotte en contact avec le bâti n'a pas été scannée lors des deux premières mesures. Par la suite, la carotte a toujours été retournée pour pouvoir la scanner entièrement. Sans une des faces de la carotte, il est très difficile de faire une mesure longitudinale reproductible et même répétable, ce qui est très handicapant pour la mesure de la carotte au temps de référence. C'est pourquoi beaucoup d'efforts ont été investis pour reconstruire la partie non scannée de la carotte aux deux premières dates de mesure, ce qui est détaillé à l'annexe E.

4.3.1.2 Mesure transversale

La mesure transversale s'effectue sur le diamètre de la carotte. Un cylindre est approximé sur la surface de la carotte scannée et son diamètre est relevé. L'approximation cylindrique est réalisée avec l'outil de sélection par « courbure similaire » et une tolérance de sélection de triangles intermédiaire (50/100), et est illustrée à la Figure 4.15 (b). La cylindricité de la carotte est cependant de moins en moins respectée au fur et à mesure que l'expansion se développe, par exemple lorsqu'un granulat proche de la surface gonfle localement de manière importante. La section 4.3.6 adressera plus en détail cet aspect important et qui ne peut être pris en compte avec les techniques conventionnelles de mesure.

4.3.1.3 Mesure volumétrique

Le volume du scan est une propriété calculée directement par Vxmodel à condition que le maillage du scan soit étanche. Tous les scans bruts des spécimens comportent des trous, aussi petite soit la résolution d'acquisition, comme illustrée par la Figure 4.16 (a). Ainsi, il est nécessaire de remplir ces trous pour étanchéifier le maillage : l'outil « remaillage étanche » est employé avec le niveau de résolution intermédiaire par défaut, qui correspond à la résolution du scan d'origine (soit 0,2 mm). Le résultat de ce remaillage étanche est montré à la Figure 4.16 (b). Le volume en mm^3 peut

ensuite être déterminé par Vxmodel en consultant l'onglet « Propriétés » du scan, présenté à la Figure 4.15 (c).

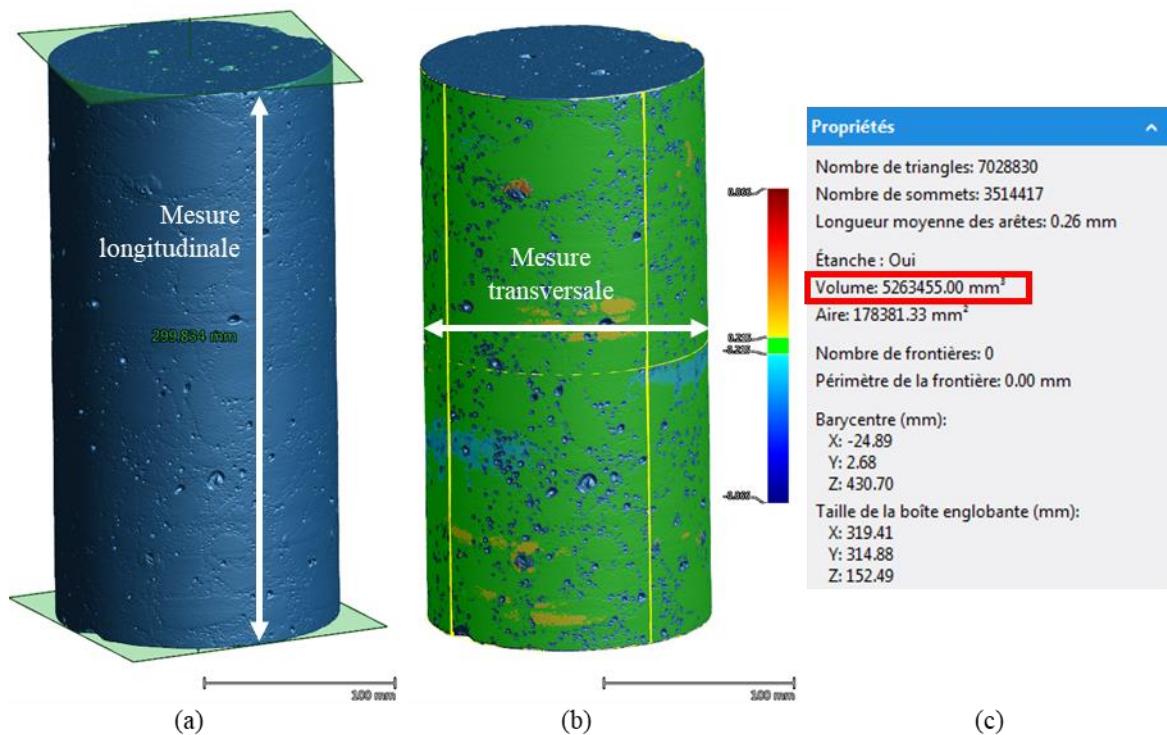


Figure 4.15 : Protocole de mesure d'une carotte scannée : (a) Mesure longitudinale (b) Mesure transversale (c) Propriétés du scan (dont le volume) de la carotte B76-CAR-3

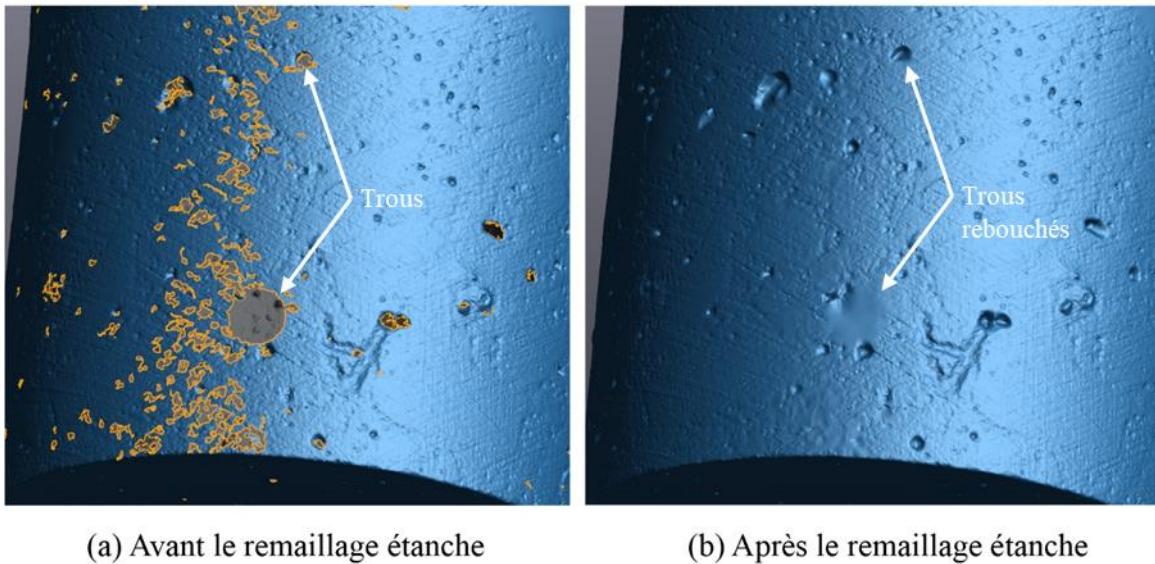


Figure 4.16 : Application de l'outil de remaillage étanche du scan d'une carotte

4.3.2 Protocole de mesure des blocs

Le protocole de mesure des blocs est similaire à celui employé pour la mesure longitudinale d'une carotte.

4.3.2.1 Mesure selon les directions X et Z

Deux plans sont créés sur les faces opposées avec l'outil de sélection par « normale similaire » et une tolérance de sélection de triangles maximale (100/100). La distance entre le centre du premier plan et sa projection orthogonale sur le deuxième plan est ensuite mesurée. De même que pour le protocole des carottes, le choix du « premier plan » est arbitraire, et une vérification est systématiquement faite en réalisant la projection opposée du centre du deuxième plan vers le premier plan. Pour les blocs, les deux distances projetées peuvent différer significativement. Ainsi, lorsque les deux distances obtenues par projection diffèrent de plus de 0,05 mm, une moyenne des deux distances projetées est réalisée. Cette mesure dans la direction X est illustrée à la Figure 4.17 (a) pour un le bloc B38-16 et à la Figure 4.17 (b) pour le bloc B76-13.

4.3.2.2 Mesure selon la direction Y

La mesure selon la direction Y est problématique. Pour le bloc B76, cette mesure n'est pas réalisable de la même manière que pour les mesures selon X ou Z. En effet la face en contact avec le sol n'est jamais scannée, car il est techniquement difficile de retourner le bloc B76 de 350 kg

dans la chambre climatique. Et toutes les autres méthodes employées pour mesurer l'expansion dans cette direction sont difficilement répétables. Il a donc été décidé d'abandonner la mesure d'expansion dans cette direction pour le bloc B76.

Pour le bloc B38, bien qu'il soit techniquement possible de retourner à la main de bloc B38, cela n'a pas été fait pour les quatre premiers scans, ce qui les rend incomplets. Il n'a pas été entrepris de reconstruire les parties non scannées. Lorsque les scans étaient complets, le même protocole que pour les mesures selon X et Z a été appliqué.

4.3.2.3 Mesure volumétrique

Pour les mêmes raisons qui rendent la mesure d'expansion selon la direction Y difficile, la mesure du volume est impossible, car la plupart des scans sont incomplets et donc non étanches.

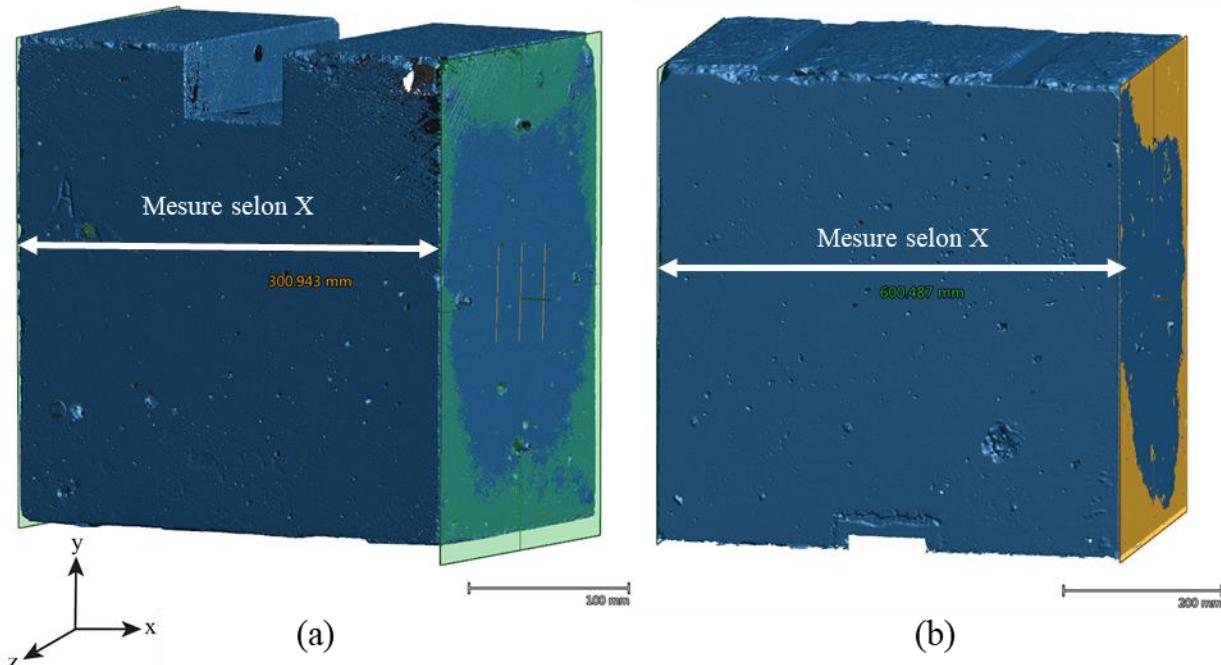


Figure 4.17 : Exemple de mesures dimensionnelles pour (a) le bloc B38-16 et (b) le bloc B76-13 scannés avant la mise en confinement

4.3.3 Performance volumétrique des scans

Avant d'appliquer les protocoles de mesures aux spécimens scannés, il convient de faire le point sur la précision atteignable par le scanner et ses limitations techniques. Cette précision n'est pas aussi évidente à établir que pour les outils de mesures conventionnels, et dépend fortement des technologies d'acquisition employées. Le calcul de la précision de l'outil utilise la notion de performance volumétrique, selon les indications fournies par le constructeur.

4.3.3.1 Définition de la performance volumétrique

La performance volumétrique est affectée par une erreur s'accumulant en fonction des dimensions de la pièce à scanner. Cette performance dépend de l'exactitude de la position spatiale du scanner lors d'un déplacement autour de la pièce. Et l'erreur est directement liée à l'acquisition des cibles de positionnement collée sur la pièce.

La performance volumétrique u_{va} (en mm) du scanner 3D utilisé pour les mesures d'expansions se calcule ainsi d'après le constructeur (CREAFORM, 2020) :

$$u_{va} = 0,02 + 0,1 L_{max} \quad (4.3)$$

Avec L_{max} la longueur caractéristique maximale du spécimen à scanner en mètre. La relation entre la performance volumétrique et la longueur caractéristique maximale est affine : plus L_{max} est grand, plus la performance volumétrique est grande et donc plus l'incertitude de mesure est importante. Le constructeur indique que cette valeur u_{va} ne peut être inférieure à 0,04 mm pour le modèle utilisé dans ce projet.

4.3.3.2 Détermination de la longueur caractéristique d'un spécimen

La manière de scanner influence grandement la valeur de L_{max} . Ce concept est illustré à la Figure 4.18. Pour une géométrie plane de portière de voiture, si la trajectoire de scan suit la périphérie de la pièce (Figure 4.18 (a)), alors la longueur caractéristique maximale sera le périmètre de la pièce. Si la trajectoire de scan est « en étoile » comme à la Figure 4.18 (b), L_{max} sera la diagonale de la portière. D'après le constructeur (CREAFORM, 2018), plus le nombre de cibles de positionnement acquises augmente, plus l'erreur cumulative augmente en suivant la trajectoire du scanner. Il faut donc minimiser au possible les trajectoires entre les points pendant l'acquisition du modèle entier

pour minimiser L_{max} . Pour une géométrie tridimensionnelle, la longueur caractéristique L_{max} se détermine en déployant la surface de la pièce scannée. Particulièrement, pour des géométries cylindriques et prismatiques et une trajectoire de scan optimale « en étoile », L_{max} est illustrée à la Figure 4.19 (a) pour les carottes, et Figure 4.19 (b) pour un bloc B76. La détermination de L_{max} pour un bloc B38 se fait de manière similaire.

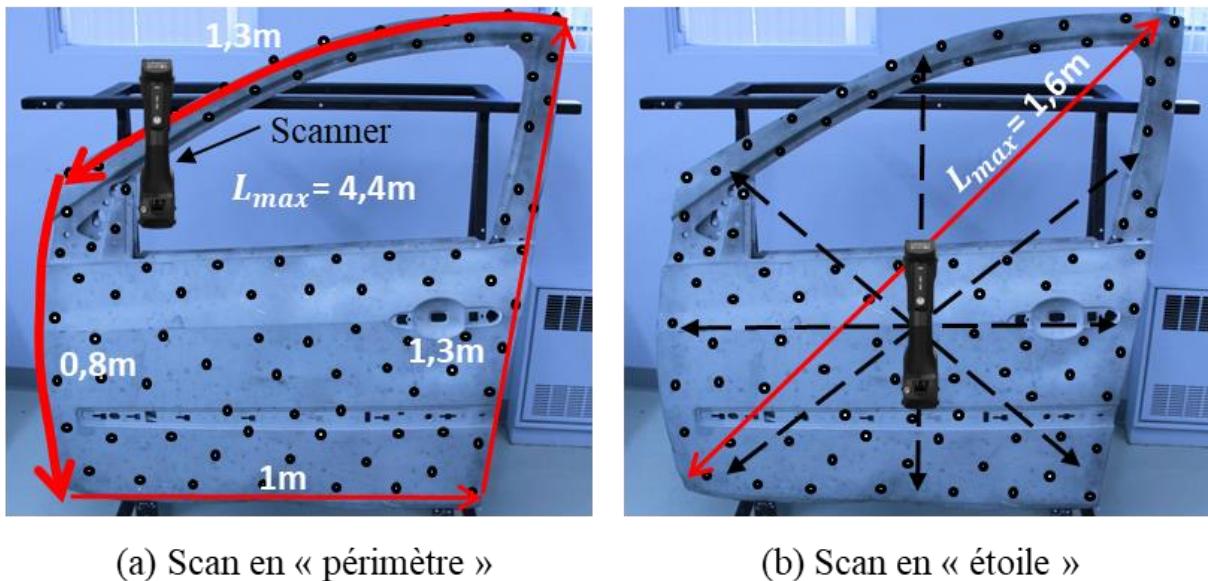


Figure 4.18 : Effet de la trajectoire de scan sur la détermination de la longueur caractéristique maximale (adapté de CREAFORM (2018))

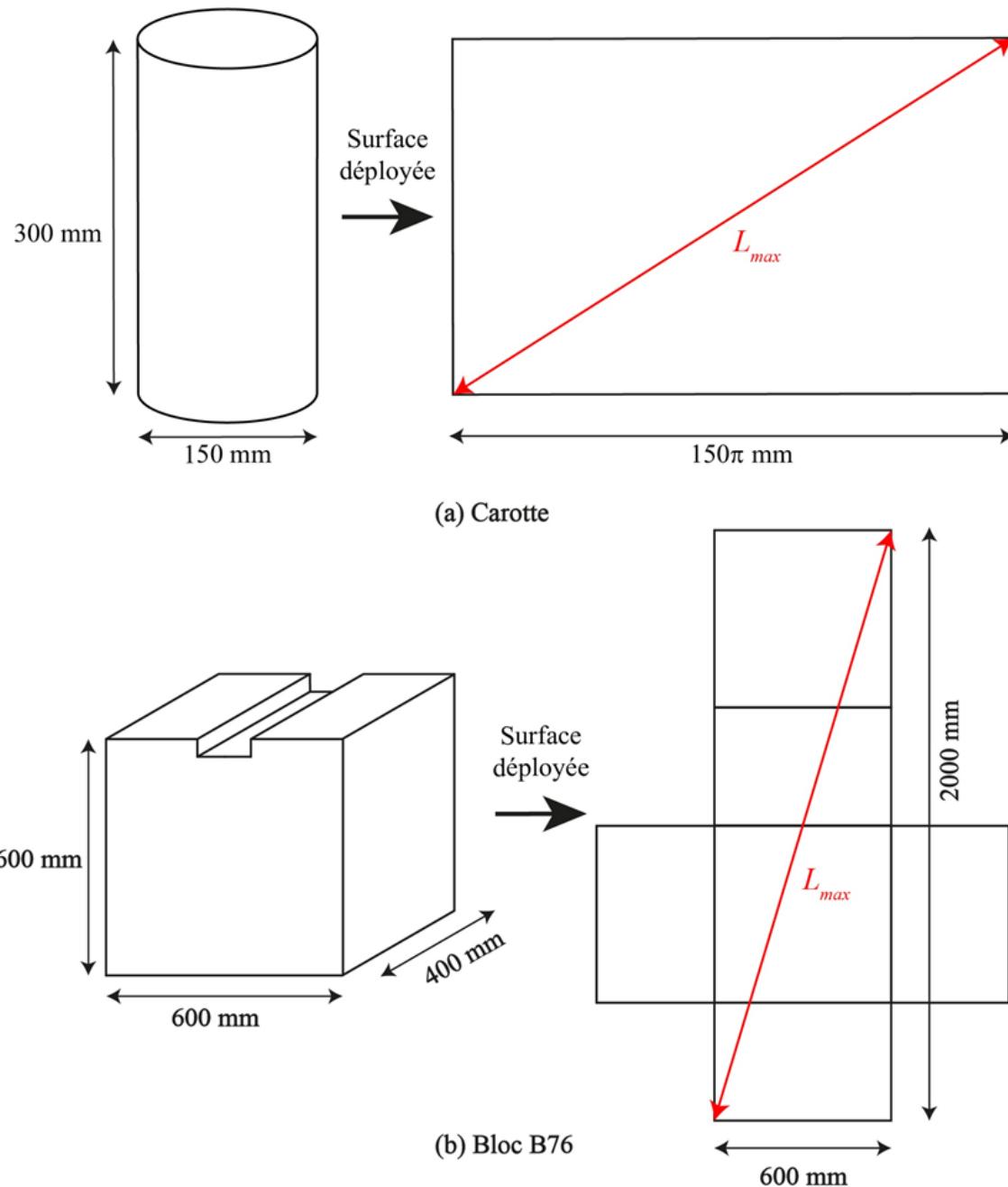


Figure 4.19 : Détermination de la longueur caractéristique maximale des géométries cylindriques (a) et prismatiques (b)

Ainsi, pour les trois types de spécimens scannés lors de cette campagne, les performances volumétriques respectives sont calculées au Tableau 4.1 grâce à l'équation (4.3).

Tableau 4.1 : Calcul des performances volumétriques pour chaque type de spécimen

Type de spécimen	Longueur caractéristique L_{max} (m)	Performance volumétrique u_{va} (mm)
Carotte 150*300mm	$\sqrt{(3,14 * 0,15)^2 + 0,3^2} = 0,558 \text{ m}$	0,076
Bloc B38 300*300*200mm	$\sqrt{1^2 + 0,3^2} = 1,044 \text{ m}$	0,125
Bloc B76 600*600*400mm	$\sqrt{2^2 + 0,6^2} = 2,088 \text{ m}$	0,223

Les valeurs de performance volumétriques sont dans l'ordre de grandeur des élongations attendues provoquées par la RAS. En effet, une expansion de 0,04% (seuil de réactivité de la norme ASTM C1293) correspond à une élongation de 0,12 mm sur une distance de 200 mm. Aussi, plus le spécimen est de grande dimension, plus la valeur de performance volumétrique est grande et moins bonne est la précision du scan.

À noter que ce calcul de performance volumétrique est valide lorsque la manière de scanner le spécimen est faite « en étoile » comme illustrée à la Figure 4.18 (b). Cette figure décrit le procédé sur un objet 2D. Mais en pratique sur un objet 3D, scanner « en étoile » est moins évident : on peut scanner « en étoile » chaque face d'un prisme, mais on doit nécessairement scanner « en périmètre » pour acquérir toutes les faces de ce prisme. Ainsi, les performances volumétriques calculées au Tableau 4.1 et les incertitudes de mesures qui en découlent doivent être considérées comme des bornes inférieures.

4.3.4 Comparaison des expansions avec les mesures traditionnelles

Les protocoles de mesures décrits aux sections 4.3.1 et 4.3.2 sont appliqués aux spécimens. Les expansions mesurées au scanner 3D sont ensuite comparées à celles obtenues à la section 4.2 avec l'instrumentation traditionnelle. Le calcul des incertitudes associées aux mesures du scanner est détaillé à l'annexe B et fait appel à la notion de performance volumétrique présentée précédemment.

4.3.4.1 Carotte B76-CAR-3

Parmi les quatre carottes B76, seule la carotte B76-CAR-3 a été scannée depuis le début de la campagne de mesure d'expansion. Les expansions longitudinale, transversale et volumétrique mesurées au scanner 3D sont illustrées à la Figure 4.20 et comparées aux mesures traditionnelles au DEMEC ou au micromètre demi-lune.

À la Figure 4.20 (a), l'expansion longitudinale mesurée au scanner 3D (en rouge) est bien corrélée avec l'expansion moyenne mesurée au DEMEC (en noir) et est non négligeable, de l'ordre de 0,1 % après 500 jours, compte tenu des incertitudes élevées. En revanche, à la Figure 4.20 (b), l'expansion transversale mesurée au scanner 3D est significativement supérieure à l'expansion moyenne mesurée au micromètre demi-lune. La section prochaine montrera que cette expansion plus élevée relevée au scanner a une raison physique et n'est pas liée à une erreur d'acquisition. L'observation faite pour l'expansion transversale est réitérée pour l'expansion volumétrique (Figure 4.20 (c)). À noter que l'expansion volumétrique « directe » (scan 3D) est celle déterminée via le protocole de la section 4.3.1, et l'expansion volumétrique « calculée » est celle déterminée indirectement à partir des expansions longitudinales et transversales obtenues avec le scan en utilisant l'équation (4.3). Les expansions volumétriques déterminées par ces deux méthodes sont presque identiques, ce qui signifie que l'approximation de gonflement cylindrique est valide même lorsque l'expansion est avancée.

4.3.4.2 Carotte B38-CAR-2

Parmi les quatre carottes à granulat 38mm, seule la carotte B38-CAR-2 a été scannée depuis le début de la campagne de mesure d'expansion. Les expansions longitudinale, transversale et volumétrique mesurées au scanner 3D sont illustrées à la Figure 4.21.

De manière similaire à la carotte B76, à la Figure 4.21 (a), l'expansion longitudinale mesurée au scanner 3D est corrélée avec l'expansion moyenne mesurée au DEMEC compte tenu des incertitudes élevées : elle est négligeable, ne dépassant pas 0,07 %. En revanche, à la Figure 4.21 (b), et dès les premières mesures à $t = 29$ jours, l'expansion transversale mesurée au scanner 3D est significativement supérieure (jusqu'à 0,18%) à l'expansion moyenne mesurée au micromètre demi-lune. Après $t = 289$ jours, l'expansion transversale mesurée au scanner diminue progressivement. Ces observations suggèrent une mauvaise acquisition au scan de la carotte aux

dates de mesure entre $t = 29$ jours et $t = 591$ jours. Les sections suivantes viennent conforter cette hypothèse. Les mêmes observations sont aussi faites concernant l'expansion volumétrique à la Figure 4.21 (c).

4.3.4.3 Bloc B76-13

Seul le bloc B76-13 a été scanné - parmi les trois blocs B76 instrumentés - depuis le début de la campagne de mesure d'expansion. Les expansions selon l'axe X et l'axe Z sont illustrées à la Figure 4.22. Pour rappel, les mesures dimensionnelles selon l'axe Y n'ont pas été réalisées.

Les expansions relevées au scan 3D sont erratiques et non corrélées aux expansions moyennes mesurées au DEMEC, même en tenant compte des incertitudes de mesures importantes. Les mesures traditionnelles au DEMEC suggèrent des expansions négligeables durant toute la campagne (en dessous du seuil de réactivité de la norme ASTM C1293) alors que les mesures au scan 3D indiquent de fortes expansions (0,1%) à certaines dates ($t = 169, 492, 738$ jours) et des expansions négligeables (< 0,04%) à d'autres dates ($t = 289, 535, 591$ jours). La technologie de scan 3D est clairement limitée techniquement pour mesurer l'expansion des spécimens de grandes dimensions (600*600*400 mm), comme attendu d'après le concept de performance volumétrique détaillé précédemment.

4.3.4.4 Bloc B38-16

Seul le bloc B38-16 a été scanné - parmi les trois blocs B38 instrumentés - depuis le début de la campagne de mesure d'expansion. Les expansions selon l'axe X, l'axe Y et l'axe Z sont illustrées à la Figure 4.23. Pour rappel, les mesures dimensionnelles selon l'axe Y n'ont été réalisées qu'à partir de $t = 492$ jours. De manière générale pour les directions de mesures X et Y (Figure 4.23 (a) et (b)), l'expansion mesurée au scan 3D est aussi négligeable (en dessous du seuil de réactivité) que l'expansion moyenne au DEMEC, malgré les fortes incertitudes. Cependant, dans la direction Z (Figure 4.23 (c)), les mesures sont erratiques, de manière similaire au bloc B76-13.

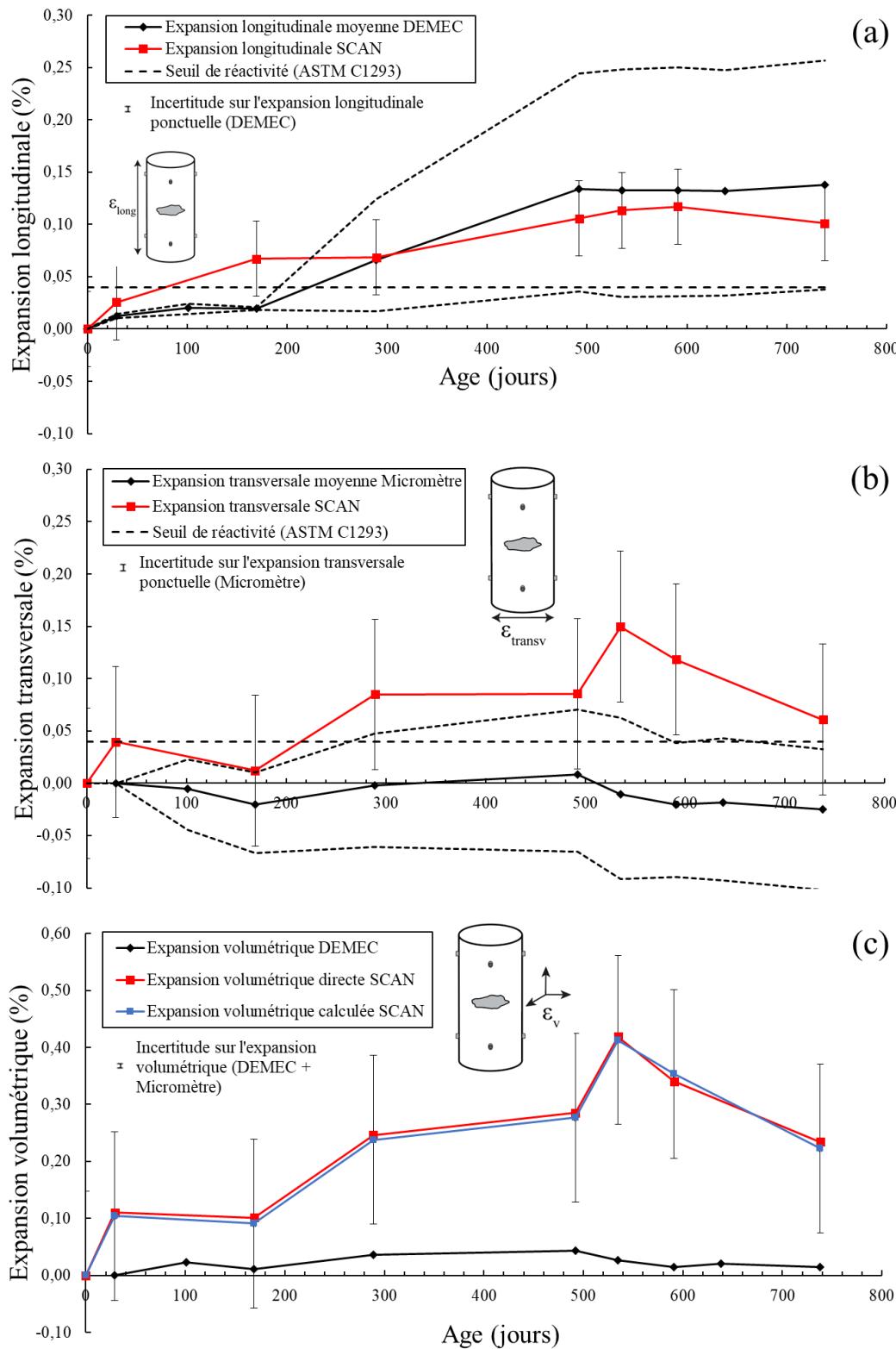


Figure 4.20 : Comparaison des expansions longitudinales (a), transversales (b) et volumétriques (c) mesurées avec le scanner et le DEMEC, pour la carotte B76-CAR-3

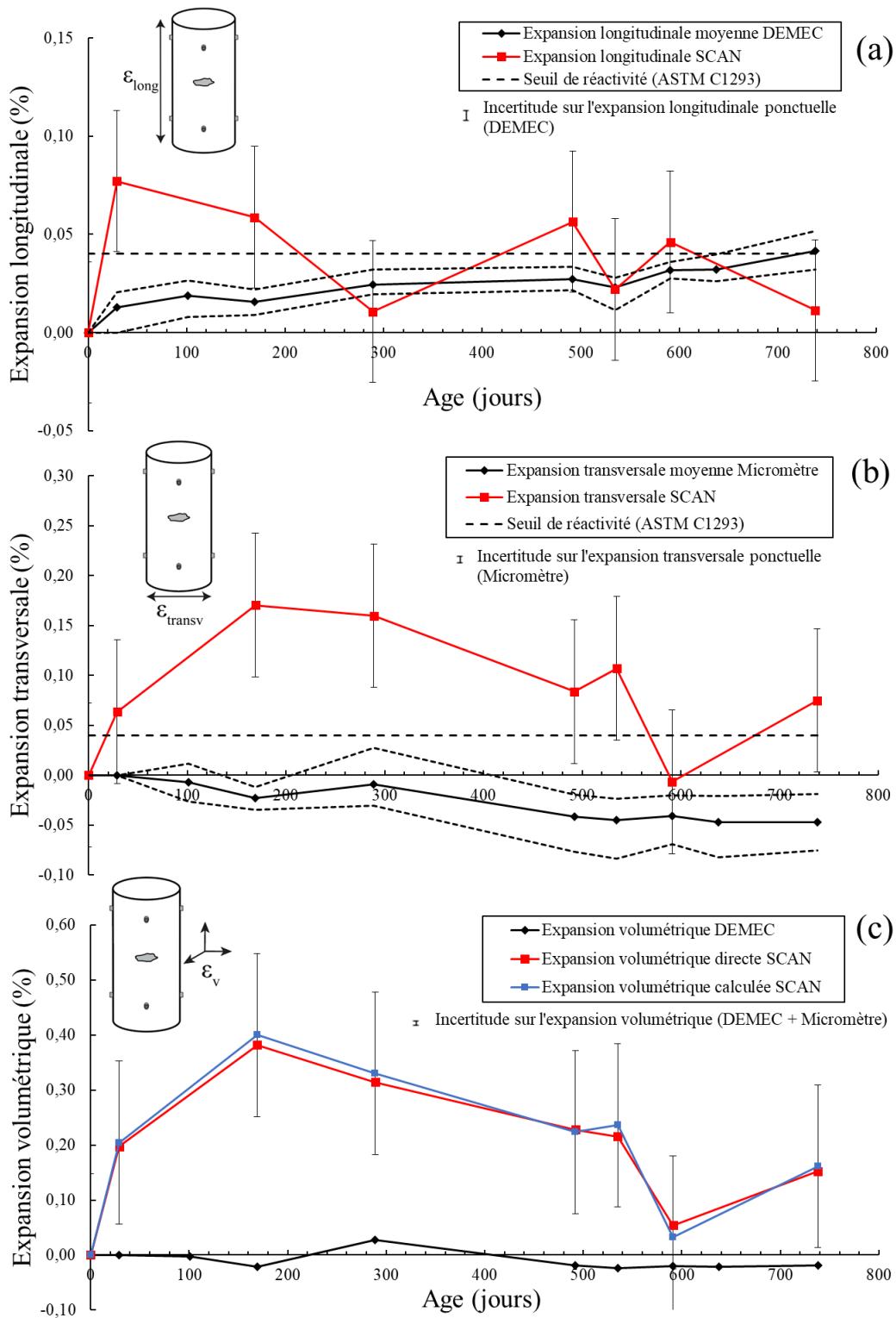


Figure 4.21 : Comparaison des expansions longitudinales (a), transversales (b) et volumétriques (c) mesurées avec le scanner et le DEMEC, pour la carotte B38-CAR-2

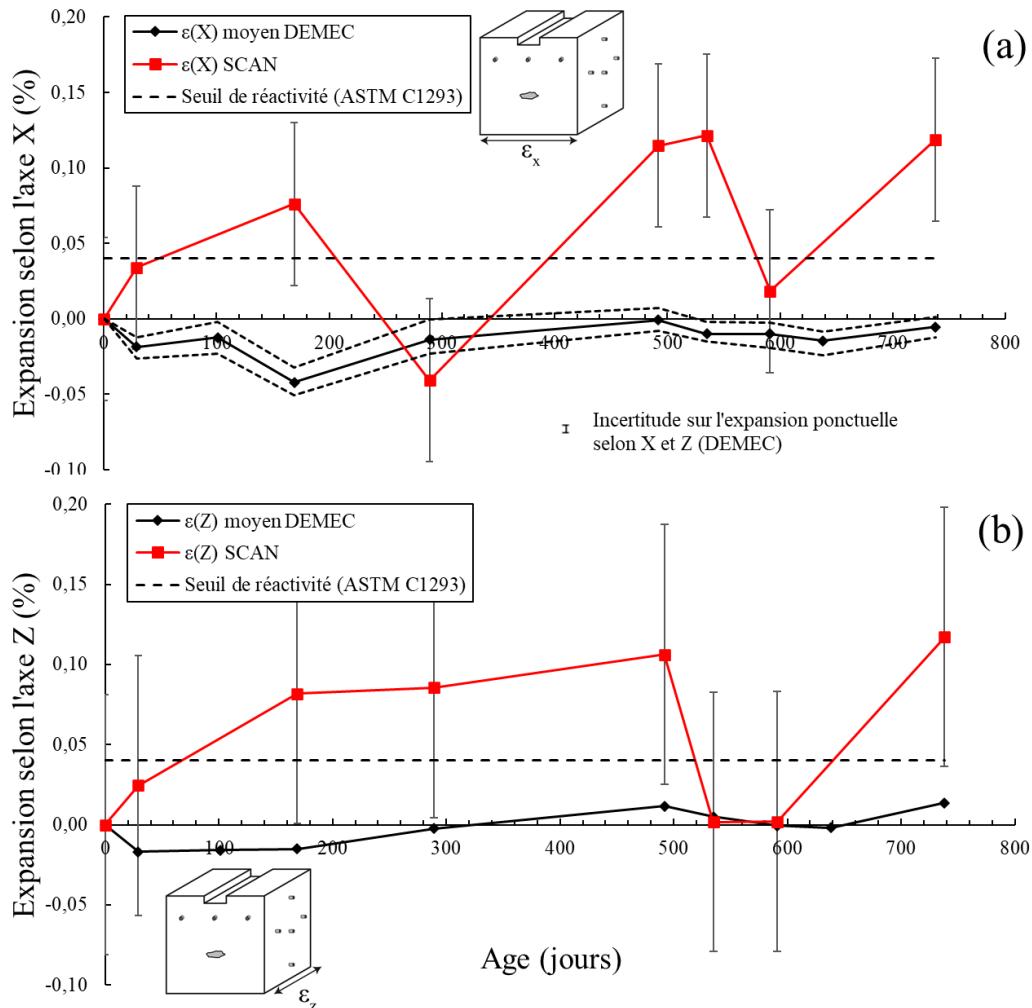


Figure 4.22 : Comparaison des expansions selon les axes X (a), et Z (b) mesurées avec le scanner et le DEMEC, pour le bloc B76-13

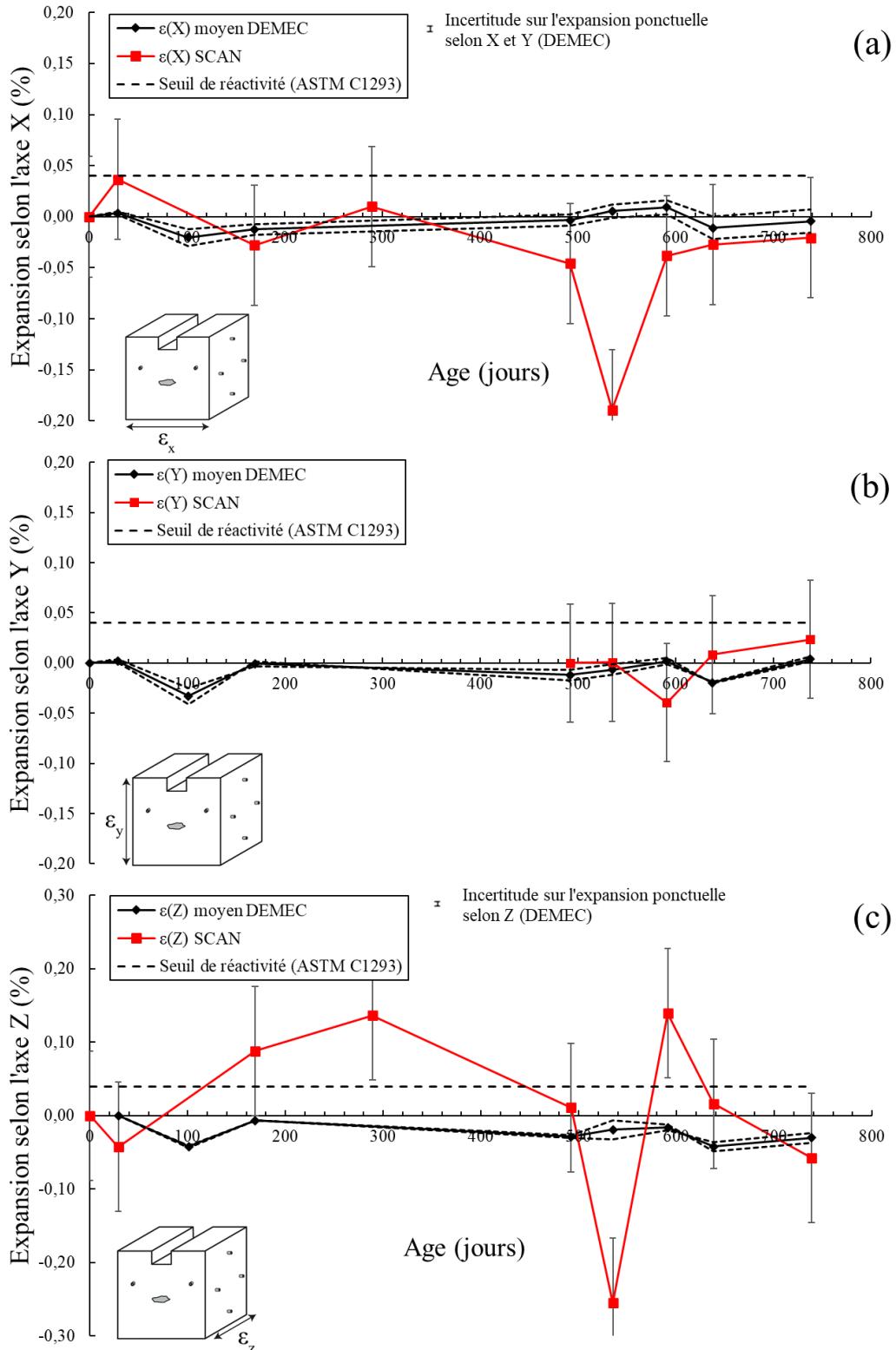


Figure 4.23 : Comparaison des expansions selon les axes X (a), Y (b) et Z (c) mesurées avec le scanner et le DEMEC, pour le bloc B38-16

4.3.5 Superposition des scans

La suite de logiciel *Vxelements* offre la possibilité d’aligner des scans et d’afficher une colorimétrie des écarts entre ces scans. Ces fonctionnalités vont potentiellement permettre de visualiser le gonflement des spécimens. Dans cette section, un protocole de superposition sera présenté, puis appliqué aux spécimens à l’étude.

4.3.5.1 Protocole de superposition

Le protocole de superposition est résumé à la Figure 4.24. Il est possible d’effectuer l’alignement automatiquement de deux scans sous *Vxinspect* ou manuellement avec des plans de symétrie sous *Vxmodel*. Une étude comparative des deux outils sur un bloc B38 permet de conclure que l’alignement automatique des scans est plus précis et plus rapide. C’est cet outil qui sera utilisé par la suite pour toute superposition de scans. Une fois les deux scans importés sous *Vxinspect*, l’alignement automatique s’effectue avec l’option « meilleur ajustement », des paramètres de filtre de calcul par défaut et aucune contrainte. Les valeurs de ces paramètres de filtre de calcul ont très peu d’effet sur l’alignement des scans et les observations qui en découlent.

Une colorimétrie est ensuite appliquée avec l’outil « colorimétrie », les paramètres de filtre de calcul et de sélection automatique sont laissés par défaut. Les bornes extreums du graphe de « distribution des erreurs » (qui sera nommé dans la suite de ce mémoire « distribution des écarts ») dictent l’échelle de couleur de la colorimétrie et sont changées arbitrairement pour $\pm 0,4$ mm (bornes décrites sur la Figure 4.25). Une grille uniforme d’annotation de déviation peut ensuite être activée pour observer les écarts locaux entre les scans.

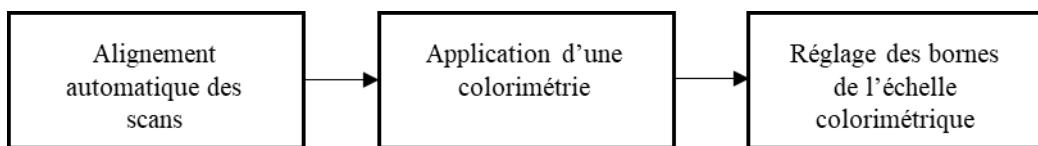


Figure 4.24 : Protocole de superposition des scans

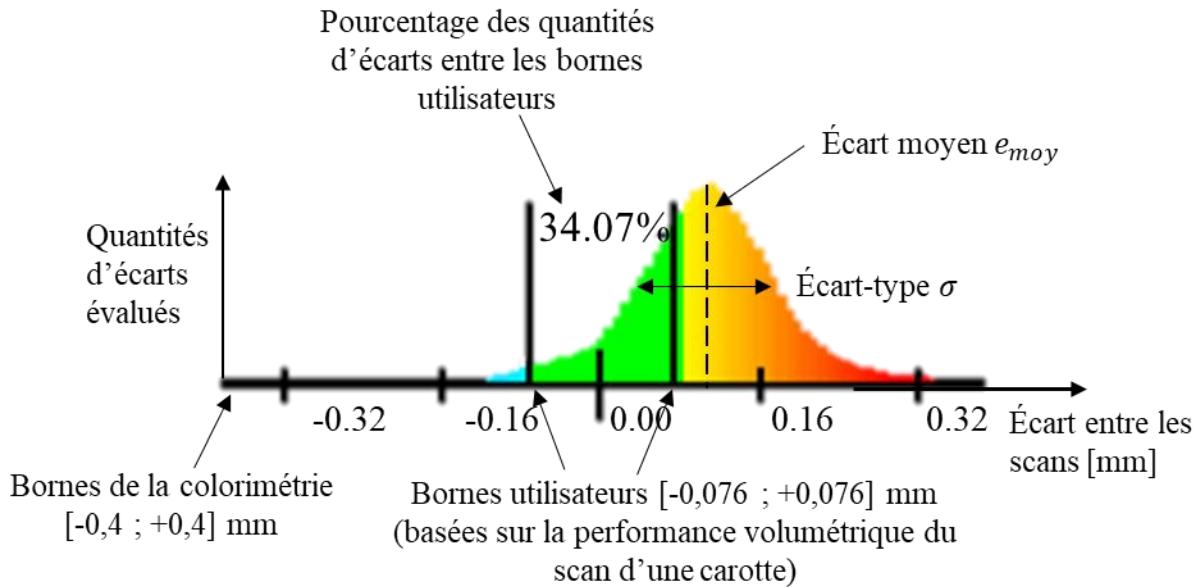


Figure 4.25 : Description d'un graphe de distribution des écarts de superposition entre deux scans d'une carotte

4.3.5.2 Interprétation du graphe de distribution des écarts

Le graphe de distribution des écarts entre deux scans superposés est obtenu en appliquant une colorimétrie à la superposition, un exemple descriptif est donné à la Figure 4.25. Les valeurs en abscisses représentent des écarts en millimètres entre les centres des triangles du scan de référence et leur projection locale orthogonale sur le scan superposé, ces écarts sont ensuite regroupés à la valeur la plus proche à $0,05\text{ mm}$ près environ. Les valeurs en ordonnées sont des quantités d'écarts évaluées entre les scans, dont la valeur n'est pas indiquée par le logiciel. On peut émettre l'hypothèse que ces quantités sont de l'ordre de grandeur du millier d'évaluations d'écart, sachant qu'un scan de carotte avec une résolution de $0,2\text{ mm}$ comporte plus de sept millions de triangles (Figure 4.15 (c)). La valeur en pourcentage indique la quantité d'écarts évalués compris entre les bornes utilisateurs, représentées graphiquement par deux traits noirs verticaux toujours centrés sur l'origine des abscisses. Les bornes utilisateurs sont d'ailleurs choisies à $\pm 0,076\text{ mm}$ d'après le calcul de performance volumétrique du scan d'une carotte menée à la section 4.3.3.

La distribution des écarts suit généralement une distribution normale, ainsi le principe de l'écart-type d'une distribution normale est utilisable. L'interprétation graphique de cet écart-type σ est

rappelée à la Figure 4.26 : 68% des valeurs de la distribution normale sont comprises entre $\pm \sigma$, et 95 % de valeurs entre $\pm 2\sigma$, autour de la moyenne.

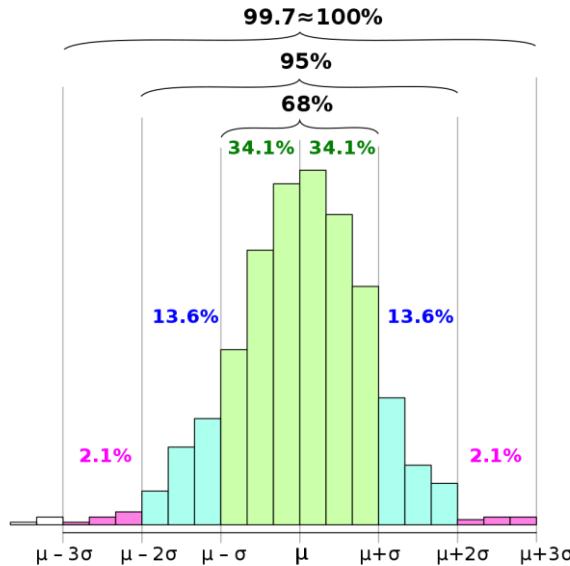


Figure 4.26 : Exemple de distribution normale avec le pourcentage compris dans chaque borne d'écart-type standard (Kernler, 2014)

4.3.5.3 Superposition des scans

Le protocole de superposition est appliqué à la carotte B76-CAR-3. L'application de ce protocole aux autres spécimens est réalisée en annexe G. Pour chaque superposition, le scan de référence est toujours celui à $t = 0$ jours. Les colorimétries des superpositions de la carotte B76-CAR-3 à différents âges sont illustrées à la Figure 4.27. Les graphes de distribution des écarts des superpositions sont compilés au Tableau 4.2.

Les colorimétries des superpositions de la Figure 4.27 permettent de mettre en évidence un gonflement local important évoluant en fonction de l'âge de la carotte B76-CAR-3, et donc de l'avancement de la RAS. Ce gonflement local est causé par un granulat réactif en surface tel qu'observé sur la photo de la zone en question à la Figure 4.29 (c).

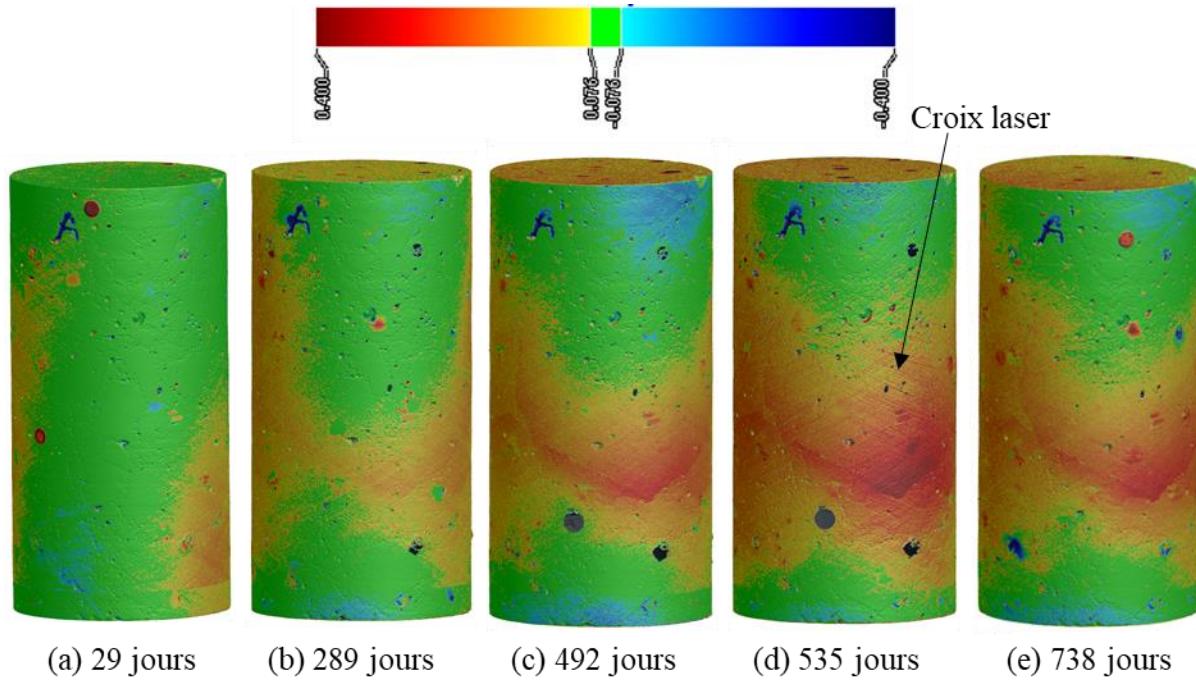


Figure 4.27 : Superposition des scans de la carotte B76-CAR-3 à différents âges avec le scan de référence

Les graphes de distribution des écarts du Tableau 4.2 pour la carotte B76-CAR-3 confirment qu'une expansion volumétrique significative a lieu : l'écart moyen e_{moy} (voir Figure 4.25) augmente au fil du temps. À $t = 29$ jours, e_{moy} est d'environ 0,04 mm et est situé entre les bornes utilisateurs représentant l'incertitude élargie associée à la performance volumétrique de 0,076 mm. Alors qu'à $t = 738$ jours, e_{moy} est d'environ 0,1 mm et se situe en dehors des bornes utilisateurs.

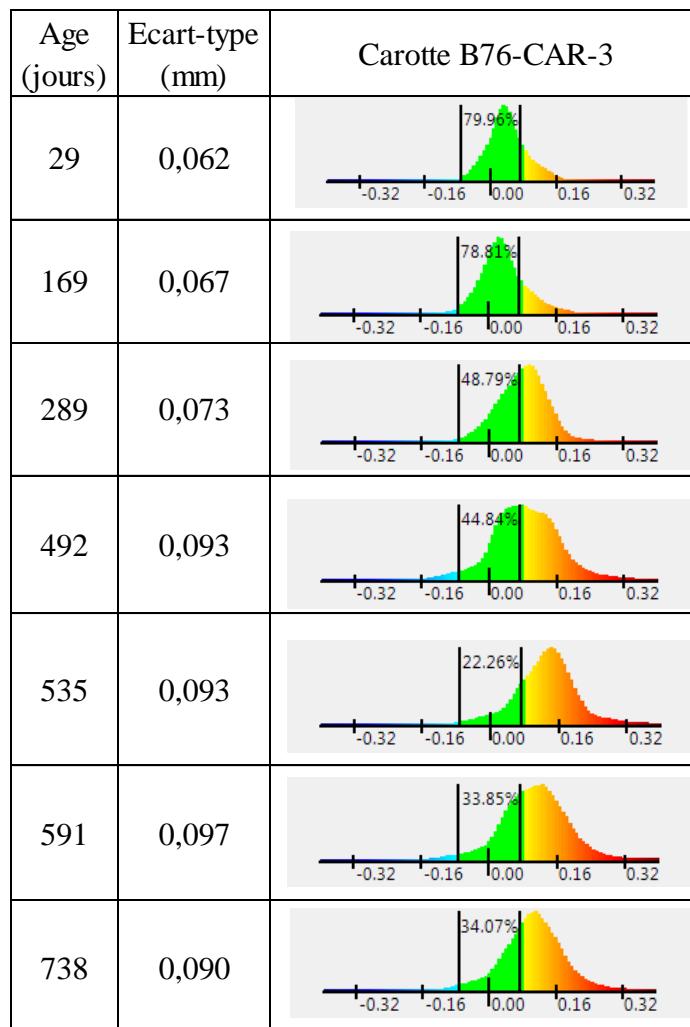
L'écart-type σ de la distribution assumée normale augmente lorsque la RAS se développe : à $t = 0$ jours cet écart-type vaut 0,062 mm alors qu'il vaut 0,090 mm à $t = 738$ jours. L'interprétation physique de cette augmentation est que la RAS se développe de manière hétérogène dans le béton : seuls quelques granulats sont réactifs et provoquent une expansion, ainsi l'expansion volumétrique est localement plus importante autour de ces granulats. Il y a donc de plus grandes différences entre les zones de faibles expansions locales et des zones de fortes expansions locales, ce qui se traduit par un écart-type de l'expansion totale plus important. Particulièrement, entre la superposition à $t = 289$ jours et $t = 492$ jours, e_{moy} est quasi-identique, mais l'écart-type σ de la distribution augmente significativement de 0,073 mm à

0,093 mm. Cela coïncide avec l'apparition marquée du gonflement local d'un granulat entre les deux dates aux Figure 4.27 (b) et (c).

La superposition à $t = 535$ jours, illustrée à la Figure 4.27 (d) révèle une valeur particulièrement élevée de e_{moy} , phénomène qui ne se reproduit pas avec les scans aux dates ultérieures. Des marques caractéristiques en croix sont observables en rouge sur la superposition de la Figure 4.27 (d), liée à la technique d'acquisition du scanner par laser en croix. Cela signifie probablement un défaut d'acquisition du scan de la carotte et peut expliquer le gonflement plus important à cette date en particulier.

Tableau 4.2 : Graphes de distribution des écarts entre les scans superposés de la carotte B76-

CAR-3 à toutes les dates de mesures



4.3.6 Variation de l'expansion transversale selon la hauteur des carottes

La technique de superposition de scans a permis de mettre en évidence un gonflement localement important d'un granulat sur la carotte B76-CAR-3. Il a donc été entrepris de quantifier cette hétérogénéité de gonflement selon la hauteur de la carotte en question.

4.3.6.1 Protocole de mesure de l'expansion transversale

Un protocole a été pensé pour investiguer cette variation d'expansion selon la hauteur d'une carotte. Il est applicable uniquement sous Vxinspect et est résumé à la Figure 4.28. Un scan est d'abord superposé à son scan de référence à $t = 0$ jours en suivant le protocole décrit à la section 4.3.5.1. Une fois les scans superposés, toute entité créée sur le scan mesuré est aussi créée sur le scan de référence. Un plan de référence est créé sur la face supérieure de la carotte et un plan parallèle à ce plan référence est construit avec un écart d'une distance h indiquée par l'utilisateur, comme illustré à la Figure 4.29 (a). Ce dernier plan construit intersecte les deux scans superposés en deux sections, visibles à la Figure 4.29 (b). Ces deux sections sont ensuite approximées par des cercles. Les diamètres des cercles sont mesurés et l'expansion transversale se calcule avec la différence des diamètres.

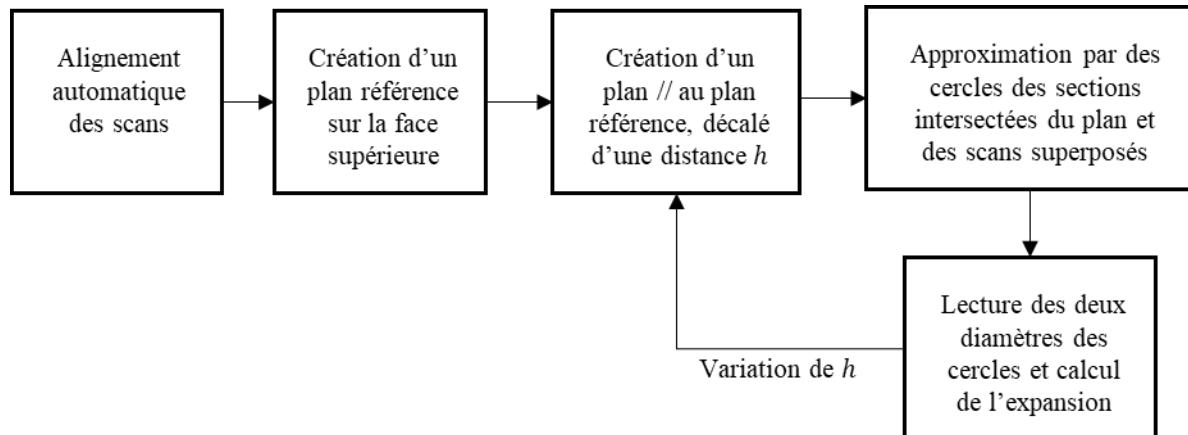


Figure 4.28 : Protocole de mesure de l'expansion transversale selon la hauteur d'une carotte

4.3.6.2 Confirmation du gonflement localisé

Le gonflement localement important de la carotte est deviné à $t = 289$ jours sur la Figure 4.27 (b) et est observé distinctement à partir de $t = 492$ jours sur la Figure 4.27 (c). À cette dernière

date, en appliquant le protocole précédent à une hauteur correspondant à la zone de gonflement locale (Figure 4.29 (a)), on observe les différences locales entre les deux sections des scans à $t = 492$ jours et $t = 0$ jours sur la Figure 4.29 (b). La partie de la section ayant fortement gonflé atteint des déviations de $0,25\text{ mm}$ à $0,33\text{ mm}$ dans un arc de cercle représentant un quart du périmètre de la section totale. Le reste de la section voit des gonflements significativement plus faibles, de $0,05\text{ mm}$ à $0,12\text{ mm}$. C'est donc bien un phénomène local. Cette observation correspond avec l'inspection visuelle à la Figure 4.29 (c), qui montre un réseau de fissures dans un granulat en surface, et des fissures se propageant orthoradialement dans la pâte de ciment à partir de ce granulat. L'inspection visuelle n'a pas dévoilé d'autres fissures sur le reste de la surface de la carotte à cette date.

4.3.6.3 Variation de l'expansion transversale selon la hauteur après 591 jours

Le protocole de mesure est appliqué à tous les 50 mm selon la hauteur de la carotte. Les résultats de l'expansion transversale en fonction de la hauteur de la carotte B76-CAR-3 sont illustrés à la Figure 4.30, après 591 jours d'accélération de la RAS.

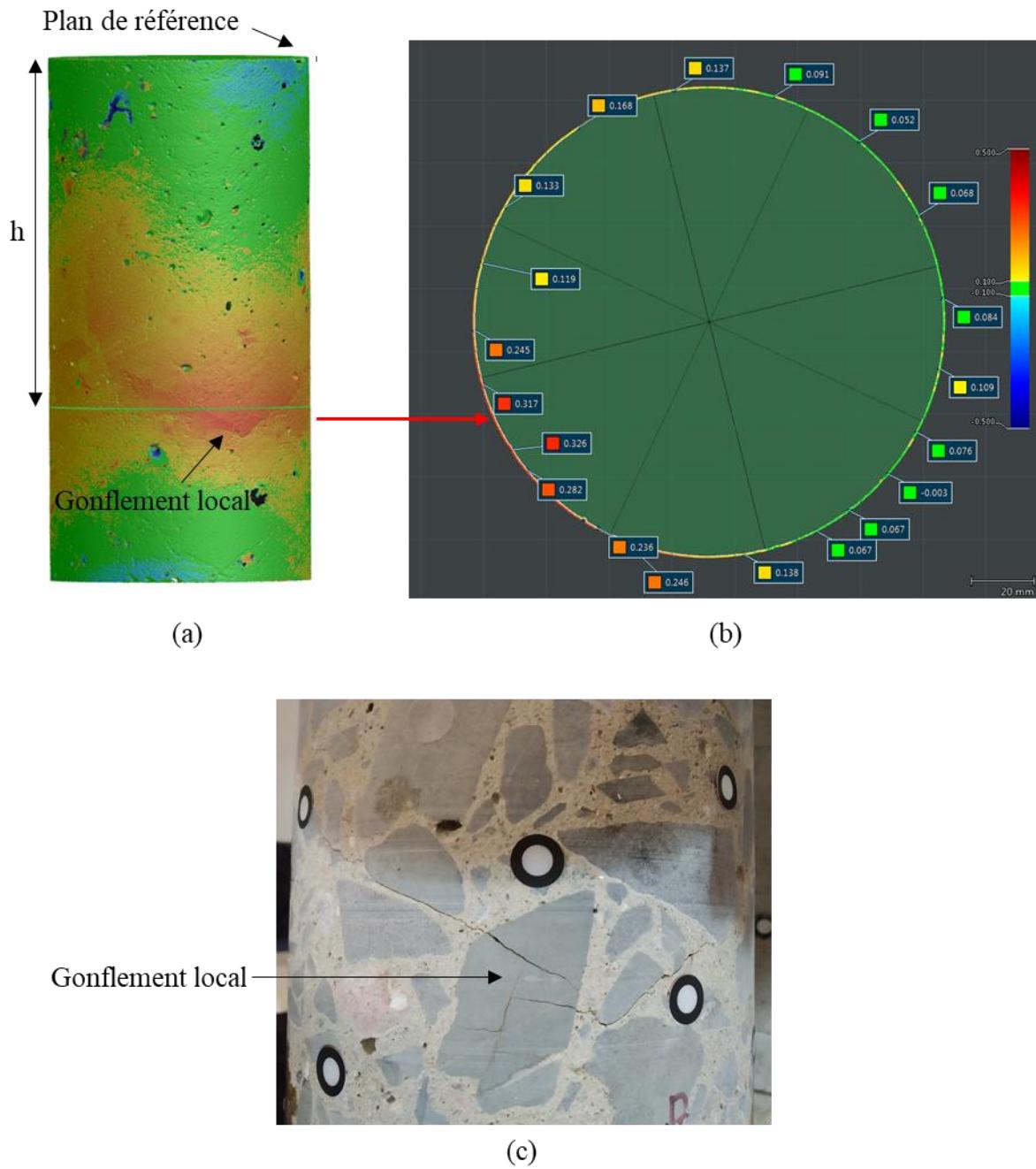


Figure 4.29 : (a) Colorimétrie de la superposition de la carotte B76-CAR-3 (b) Vue de la section d'intérêt avec les informations de déviations des superpositions sur le périmètre de la section (c) Inspection visuelle de la zone correspondant au gonflement local

Le profil d'expansion transversale permet bien de distinguer un gonflement transversal local de 0,2 % vers $h = 100 \text{ mm}$ là où le gonflement local est observé sur la colorimétrie et sur le spécimen (Figure 4.29), malgré les fortes incertitudes de mesures. À noter que le gonflement transversal moyen de 0,12% (droite en pointillé rouge) est obtenu avec l'approximation cylindrique du protocole de la Figure 4.15 (b). Les mesures au micromètre demi-lune sont représentées à titre comparatif. Pour rappel, quatre mesures au micromètre sont effectuées par carotte selon la disposition des plots (Figure 3.8 du chapitre 3) : deux mesures dans la partie supérieure de la carotte ($h = 250 \text{ mm}$), et deux mesures dans la partie inférieure ($h = 50 \text{ mm}$). Sur la Figure 4.30, la valeur moyenne des deux mesures dans chaque partie de la carotte est représentée par un point rectangulaire, et les extrémités de la barre d'incertitude associée représentent (dans ce cas-ci uniquement) les valeurs des deux mesures ponctuelles. L'expansion transversale mesurée au micromètre est significativement plus faible que l'expansion transversale mesurée au scanner 3D. La mesure au micromètre semble sous-évaluer l'expansion de la carotte et ne permet pas de détecter l'expansion localement importante.

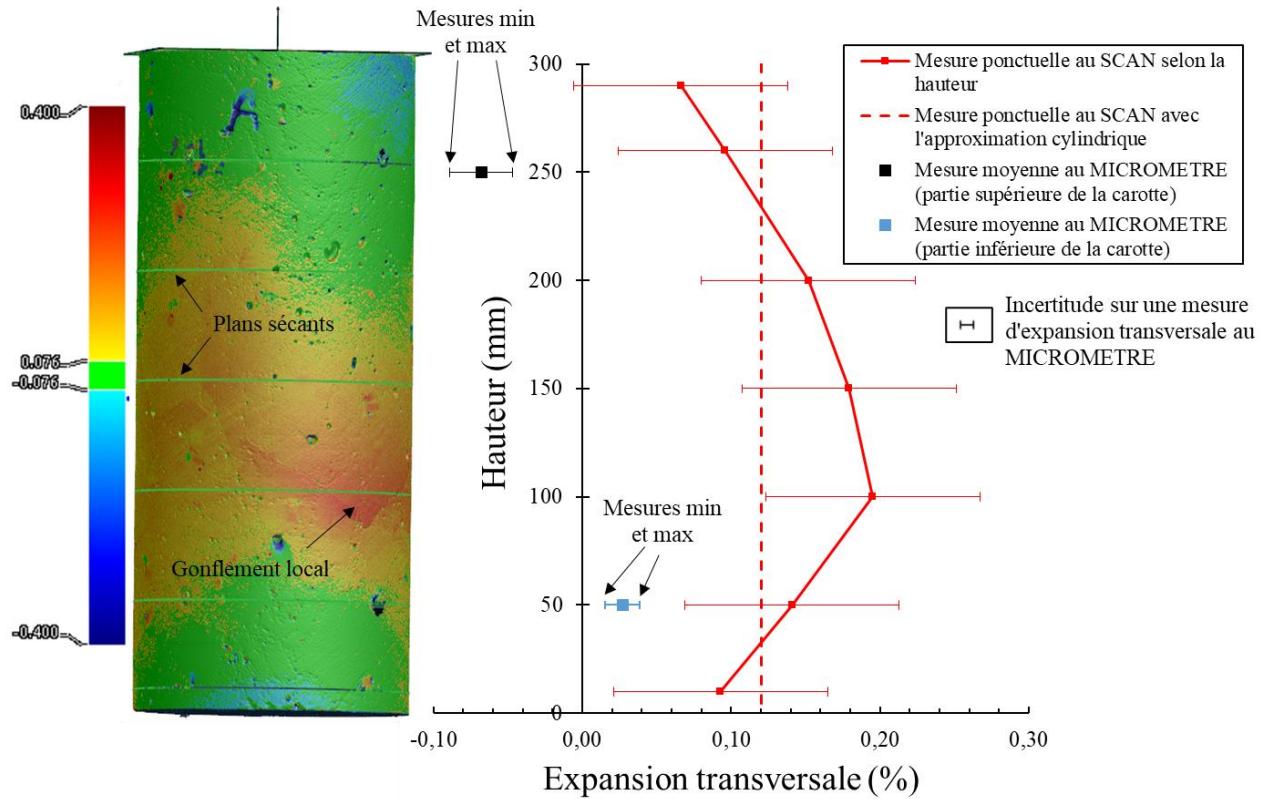


Figure 4.30 : Expansion transversale de la carotte B76-CAR-3 en fonction de la hauteur après 591 jours

4.3.6.4 Variation de l'expansion transversale selon la hauteur à différents âges

Il a été entrepris de quantifier comment cette hétérogénéité de gonflement s'est développée au cours du temps. Pour se faire, le protocole de mesure de la section 4.3.6.1 est appliqué aux scans de la carotte B76-CAR-3 à différentes dates de mesures, et les résultats sont présentés à la Figure 4.31. L'expansion transversale augmente quasi uniformément, jusqu'à la mesure à $t = 492$ jours, où à cette date le gonflement est localement plus important entre $h = 50\text{mm}$ et $h = 150\text{mm}$. L'expansion continue à se développer avec ce gonflement local après cette date. La mesure à $t = 535$ jours d'expansion anormalement élevée est, pour rappel, supposée erronée à cause d'une mauvaise acquisition.

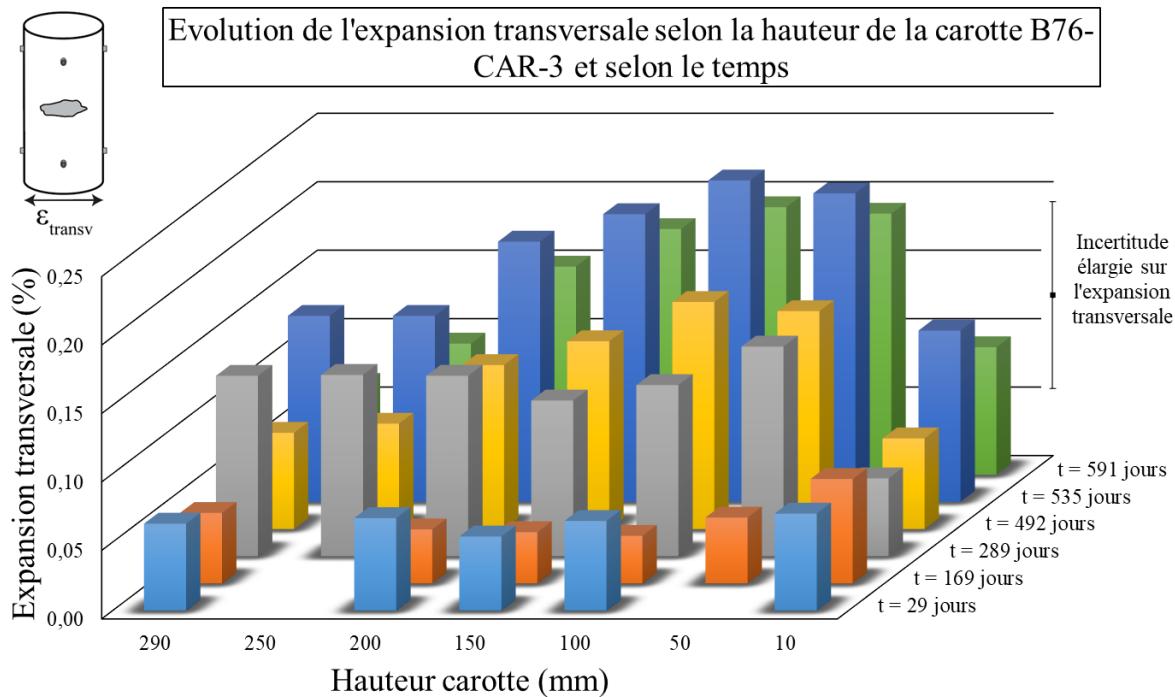


Figure 4.31 : Évolution de l'expansion transversale selon la hauteur de la carotte B76-CAR-3 et selon le temps

4.3.7 Problématiques de la technologie de scan

Les résultats présentés ci-dessus sont très encourageants pour l'application de la technologie de scan 3D aux mesures d'expansions. Cependant, seuls les résultats des protocoles appliqués à la carotte B76-CAR-3 ont été détaillés. Lorsqu'on présente une nouvelle application d'une technologie de mesure, il est très commode de montrer ce qui fonctionne, mais il est tout aussi important d'exposer les limitations et les problèmes d'utilisations. Cette section a donc pour objectif d'illustrer cet aspect.

4.3.7.1 Problèmes liés à la technologie

Comme détaillé à la section 4.3.3, la notion de performance volumétrique dicte la précision de la technologie de scan. Plus un spécimen est de grande dimension, plus la valeur de performance volumétrique sera grande et donc moins bonne sera la précision. C'est ce qu'on observe clairement sur les Figure 4.22 et Figure 4.23 pour les blocs B76 et B38 respectivement.

Ce problème est aussi illustré par les essais de répétabilité des mesures dimensionnelles et des superpositions pour des carottes et des blocs B38 menés en annexe D. Même en scannant de la même manière, plusieurs fois à la suite le même spécimen dans les mêmes conditions, la répétabilité des mesures n'est pas optimale, en comparaison aux techniques de mesure traditionnelles (annexe C).

4.3.7.2 Problèmes causés par l'utilisation non adéquate

Bien que certains problèmes soient inhérents à la technologie et aux spécifications techniques d'un modèle de scanner, des erreurs peuvent aussi survenir à la suite d'une utilisation non adéquate par l'utilisateur. Quelques exemples de ces défauts d'utilisations sont listés ci-après :

- Comme évoqué à la section 4.3.3 et illustré par la Figure 4.18, la manière de scanner impacte grandement le scan et les mesures subséquentes. Il faut parcourir le moins de distance possible en scannant « en étoile » dès que possible. Si l'utilisateur scanne « en périmètre » ou par des gestes aléatoires, la performance volumétrique augmente et la précision diminue.
- La vitesse de scan importe, et si l'utilisateur scanne trop vite en faisant des gestes brusques, des marques caractéristiques de croix laser peuvent être observées sur le scan comme montré à la Figure 4.32 (b) et (c) ou la Figure 4.27 (d).
- La bonne détection des cibles de positionnement est essentielle, puisque c'est grâce à ces cibles que le scanner se positionne dans l'espace et reconstruit le volume de l'objet. Ainsi, si ces cibles sont sales, endommagées ou légèrement décollées, le scanner ne pourra pas les détecter. Dans un environnement humide comme ce que subissent les spécimens de ce projet, les cibles se décollent facilement. À noter que les cibles sont réutilisées entre chaque mesure par souci de temps et d'économie, mais remplacées lorsqu'elles sont endommagées. Cependant, il arrive que l'utilisateur ne perçoive pas toutes les cibles défectueuses : alors l'appareil ne les détecte pas pour se positionner et scanne ces cibles comme faisant partie intégrante du spécimen (disques rouges de la Figure 4.32 (b)) ou bien laisse un vide (trous de la Figure 4.32 (c) et (d)).

Ces défauts d'utilisations peuvent être simultanés. Ce sont par exemple eux qui permettent d'expliquer les mesures aberrantes d'expansion transversale de la carotte B38-CAR-2 à la Figure

4.21 (b). En effet, les superpositions des scans de cette carotte à différents âges à la Figure 4.32 (b), (c) et (d) montrent des défauts d'acquisition qui augmentent artificiellement les expansions mesurées sur les scans.

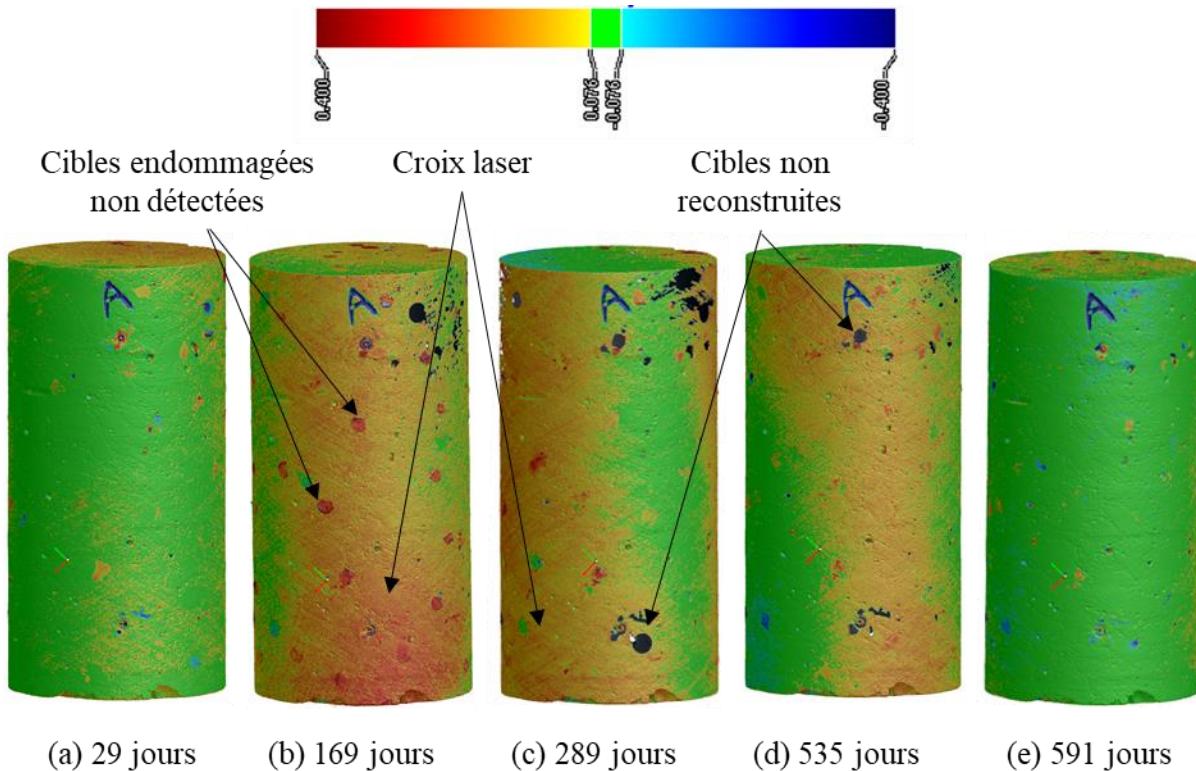


Figure 4.32 : Superposition des scans de la carotte B38-CAR-2 à différents âges avec le scan de référence et illustration des erreurs liées à l'utilisation du scan

4.4 Conclusions sur les mesures d'expansions

4.4.1 Mesures d'expansion traditionnelles

Les mesures d'expansions traditionnelles au DEMEC/micromètre montrent des expansions différentes selon le mélange (B38 ou B76) et pour un même mélange selon le type de spécimen (carotte ou bloc). Le gonflement le plus important et qui indique la présence de la RAS est celui des carottes B76 qui atteignent une expansion volumétrique moyenne de presque 0,40 % après 800 jours (0,28% à 365 jours). Cependant la plupart des blocs B38 et B76 dont l'expansion a été suivie et à fortiori la majorité des blocs de la série B réactive démontrent des expansions négligeables (expansion volumétrique inférieure à 0,05 % même après 800 jours).

On ne peut ainsi pas extrapoler l'expansion des carottes pour évaluer l'état d'avancement de la RAS au sein des blocs testés en essai de fendage, comme ce qui est souvent fait dans la littérature. Il est aussi délicat d'évaluer l'état d'avancement de la RAS des blocs dont l'expansion n'est pas suivie, à partir des expansions des blocs instrumentés en raison d'une variabilité observée au niveau des conditions hydriques.

4.4.2 Mesures d'expansion avec la technologie de scan 3D

Plus les spécimens sont de grandes dimensions, plus les mesures dimensionnelles au scanner sont erratiques et non fiables. En effet, plus le spécimen scanné est de grande dimension, plus les erreurs d'acquisitions sont importantes d'après le principe de performance volumétrique. Pour ce modèle de scanner et les ordres de grandeur d'expansions mesurées au cours de ce projet, la technologie de scan 3D fournit des mesures d'expansions cohérentes uniquement pour les carottes.

La technologie est cependant très prometteuse : les mesures au scanner 3D permettent d'observer le gonflement localement important causé par un granulat particulièrement réactif sur la carotte B76-CAR-3, et de quantifier cette hétérogénéité d'expansion selon la hauteur de la carotte, ce que les mesures traditionnelles ne permettent pas de faire. C'est une technologie qui permet d'obtenir de l'information qualitative attrayante : des colorimétries de gonflement à différents stades d'avancement de la RAS ; et de quantifier ces gonflements à volonté en post-traitement. Pour tirer de l'information de ces scans, il faut cependant limiter au maximum les erreurs d'acquisition liées à l'utilisation en changeant les cibles de positionnement dès qu'elles sont endommagées, et en scannant chaque spécimen à chaque date au moins trois fois.

CHAPITRE 5 CAMPAGNES D'ESSAIS DESTRUCTIFS

L'expansion générée par la RAS étant maintenant quantifiée, il faut désormais caractériser les mélanges de béton de l'aménagement existant par des essais destructifs. Ce chapitre traite ainsi des résultats des essais de caractérisation et des essais de fendage menés lors de deux campagnes : l'une à l'été 2018 (0Y) (avant le développement de la RAS) et l'autre à l'été 2020 (2Y) sur les spécimens rapatriés après 609 jours en chambre climatique.

L'objectif de ce chapitre est donc de :

- Caractériser les propriétés mécaniques des mélanges B38 et B76, particulièrement l'énergie de fissuration.
- Quantifier l'impact de la RAS sur ces propriétés.
- Étudier l'effet du sens de coulée sur l'énergie de fissuration du mélange B38.
- Mettre en évidence l'effet d'échelle sur l'énergie de fissuration et appliquer la méthode SBEM pour s'affranchir de cet effet.

5.1 Essais de caractérisation

Les résultats des essais de caractérisation pour les deux mélanges B38 et B76 et pour les deux campagnes 0Y et 2Y sont présentés au Tableau 5.1. Les données des essais de caractérisation de la campagne 0Y sont reprises de Lemery (2018). Il convient de rappeler que les conditions hydrauliques qu'ont subies les carottes de caractérisation ne sont pas identiques à celles des carottes suivies en expansion ni celles des blocs B38 et B76 et que l'expansion de ces carottes de caractérisation n'a pas été mesurée (Figure 4.12).

Les coefficients de variations des valeurs calculées sont assez élevés. Ce pourrait être expliqué par la taille des gros granulats (38 ou 76 mm) par rapport au diamètre d'une carotte (150 mm), comme l'avait fait remarquer Lemery (2018). La norme A23.2-14C préconise en effet un diamètre de carotte au moins trois fois plus grand que le diamètre maximum de granulat, ce qui n'est pas respecté pour le mélange B76. Il semble que même avec la procédure de carottage à partir d'une dalle (Figure 3.6 (a)), le ratio diamètre du spécimen testé / diamètre granulat maximum est encore important à considérer. Les essais de résistance à la traction indirecte montrent une diminution de la résistance à la traction sous l'effet de RAS pour le mélange B38 (pas de résultats disponibles

pour B76). Ce résultat est à considérer avec prudence sachant l'absence de réPLICATION pour ces essais.

Tableau 5.1 : Résultats des essais de caractérisation (données à 0Y tiré de Lemery (2018))

		B38		B76	
Essais	Unités	0Y	2Y	0Y	2Y
Durée de confinement en chambre climatique	jours	x	609	x	609
Echéance des essais après la coulée	jours	103	925	194	925
Résistance à la compression f'_c (ASTM C39)	MPa	21,4 ($\pm 8,1\%$)	28,0 ($\pm 4,7\%$)	25,7 ($\pm 18,6\%$)	32,3 ($\pm 6,3\%$)
Module d'élasticité E (ASTM C469)	MPa	25560 (-)	26685 ($\pm 8,6\%$)	38991 ($\pm 27,7\%$)	23221 (-)
Résistance à la traction indirecte f'_t (ASTM C496)	MPa	2,58 (-)	1,88 (-)	-	2,77 (-)
Coefficient de Poisson ν (ASTM C469)	-	0,252 (-)	0,242 ($\pm 12,9\%$)	0,3 ($\pm 10,3\%$)	0,172 (-)

5.1.1 Effet de la RAS sur la résistance en compression

Pour les deux mélanges B38 et B76, la résistance en compression f'_c augmente significativement après presque 2 ans d'accélération de la RAS (Tableau 5.1). Ce gain de résistance est provoqué par la réaction d'hydratation du ciment étant très favorisé dans les conditions de confinement à 38°C et haute humidité relative (décris au chapitre 3). Cette tendance de gain de résistance en compression est suggérée par Abd-Elssamad et al. (2020) pour des mélanges de réactivité RAS lente (Figure 2.22 (c) du chapitre 2), et est observée par de nombreux chercheurs (section 2.5.1). Ainsi, il est de difficile de distinguer ici l'effet de la RAS.

5.1.2 Effet de la RAS sur le module d'élasticité

Le module d'élasticité du mélange B38 ne varie pas significativement après presque 2 ans d'accélération de la RAS (Tableau 5.1). Au contraire, le mélange B76 voit son module d'élasticité

diminuer d'environ 40%. Puisque l'altération du module d'élasticité est un des meilleurs indicateurs de l'endommagement provoqué par la RAS (section 2.5.2), cela va dans le sens des résultats d'expansion, suggérant que les carottes B38 sont moins atteintes par la RAS que les carottes B76. Cette diminution de 40% du module d'élasticité du mélange B76 pour une expansion longitudinale d'environ 0,18% est en accord avec les ordres de grandeur présentés à la section 2.5.2 du chapitre 2.

5.2 Essais de fendage

La méthodologie de traitement des données brut d'un essai de fendage sera détaillée. Les courbes « Effort de fendage – ROD » seront ensuite illustrées pour les mélanges B38 et B76, et les résultats des valeurs d'intérêts des essais seront analysés.

5.2.1 Méthode d'analyse

Il convient de détailler comment les données brutes issues d'un essai de fendage sont traitées pour tracer les courbes d'adoucissement de la section suivante. Le principe de l'essai de fendage est rappelé à la Figure 5.1 (a), et les ouvertures caractéristiques de l'essai sont schématisées à la Figure 5.1 (b). Il est important de déterminer la variation de déplacement au niveau du point d'application de l'effort afin de déterminer le véritable travail de fissuration. L'effort de fendage P_s sera donc tracé en fonction de l'ouverture moyenne des axes des roulements (ROD pour *Roller Opening Displacement*).

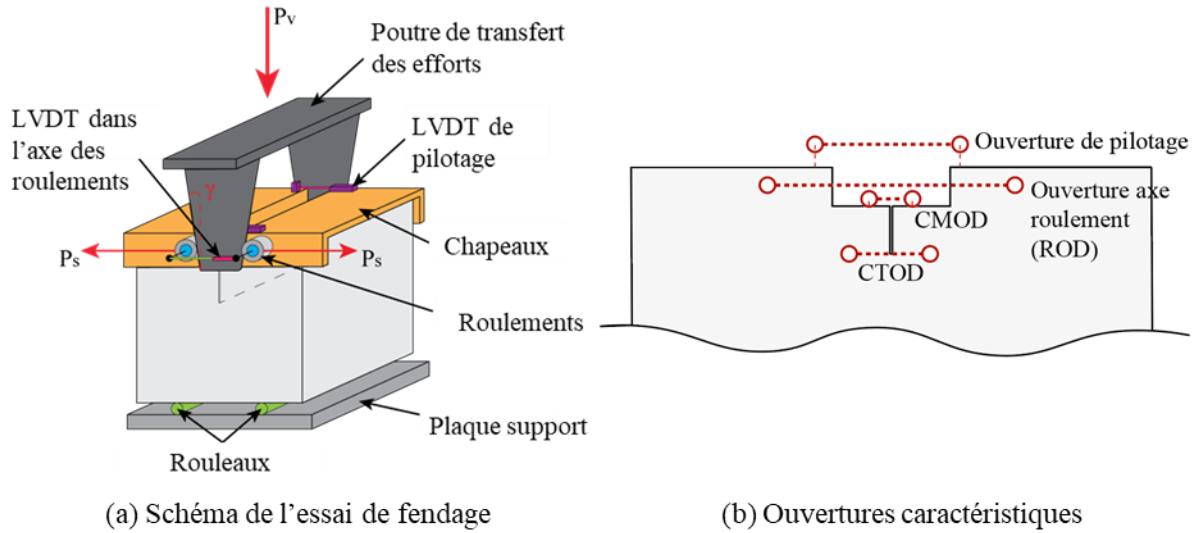


Figure 5.1 : Essai de fendage et instrumentation (traduit de Lemery et al. (2020))

Le protocole de traitement des données d'un essai de fendage est détaillé à la Figure 5.2. La méthodologie est identique à celle de Lemery (2018), elle a été cependant automatisée sous *Matlab* permettant un gain de temps considérable. Les courbes résultantes du traitement d'un essai sont illustrées à la Figure 5.3 pour l'essai B76-2Y-WS05-3. Il est jugé pertinent de rappeler trois points de cette méthodologie :

- Les axes des roulements fléchissent lorsque l'effort de fendage P_s est important vers le pic de chargement (courbe bleue « ROD brut » à la Figure 5.3 (a)). Pour filtrer cette flexion parasite, une régression linéaire du ROD est effectuée.
- Il reste toujours un effort résiduel faible à la fin de l'essai. Ainsi le signal de queue est approximé par une droite à partir d'une certaine ouverture ROD_{seuil} (Figure 5.3 (d)). Ce seuil a été choisi arbitrairement par comparaison des courbes des essais, afin de n'approximer qu'un signal brut asymptotique. Les coefficients de corrélation R^2 de toutes les approximations des signaux sont toujours supérieures à 95%.
- Pour rappel, l'énergie de fissuration G_F expérimentale est définie comme le travail de fissuration normalisé par la surface de fissuration projetée (section 2.1.2). Ce travail de fissuration est décomposé en deux aires :
 - o L'aire sous la courbe « Effort de fendage – ROD » (Figure 5.3 (b)) jusqu'à ROD_{seuil} , calculée par intégration avec la méthode des trapèzes.

- L'aire du triangle sous l'approximation linéaire du signal de queue, après ROD_{seuil} (Figure 5.3 (d)).

Une nouvelle valeur d'intérêt est déterminée lors de ce protocole de traitement des données, en s'inspirant des travaux de Hayes et al. (2020) : la pente en régime élastique, s'apparentant à un module élastique. Pour l'obtenir, la courbe « Effort de fendage – ROD » est approximée linéairement jusqu'à un effort correspondant à 40% de l'effort au pic de chargement. La pente de cette approximation linéaire est le module élastique apparent E_{app} , illustré à la Figure 5.3 (c).

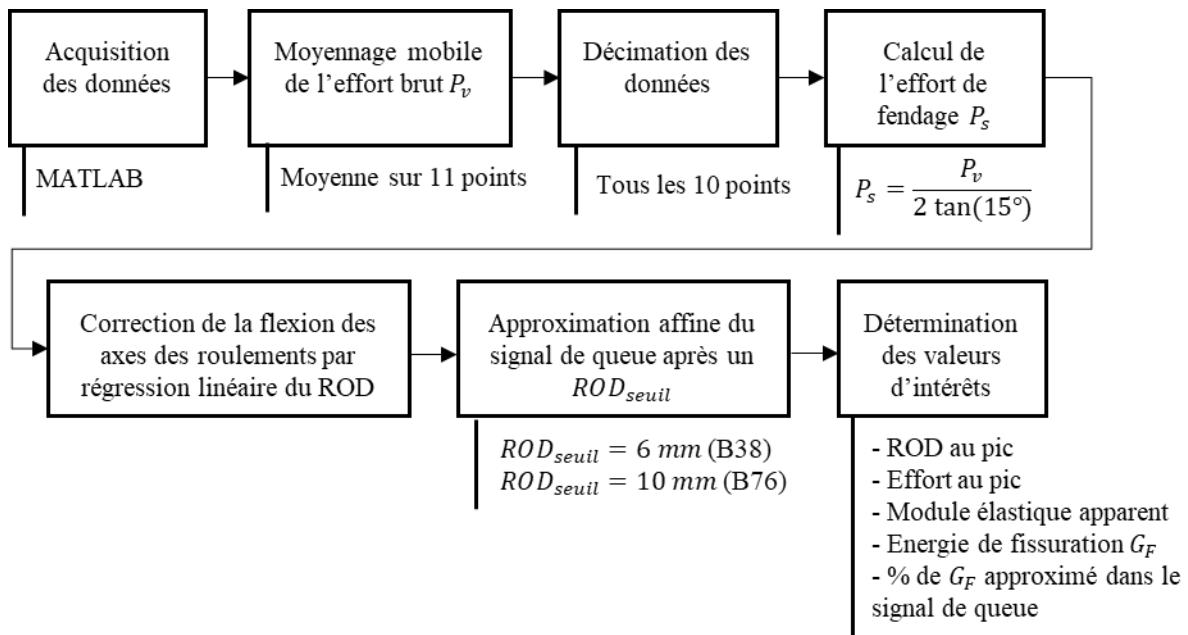


Figure 5.2 : Protocole de traitement des données d'un essai de fendage

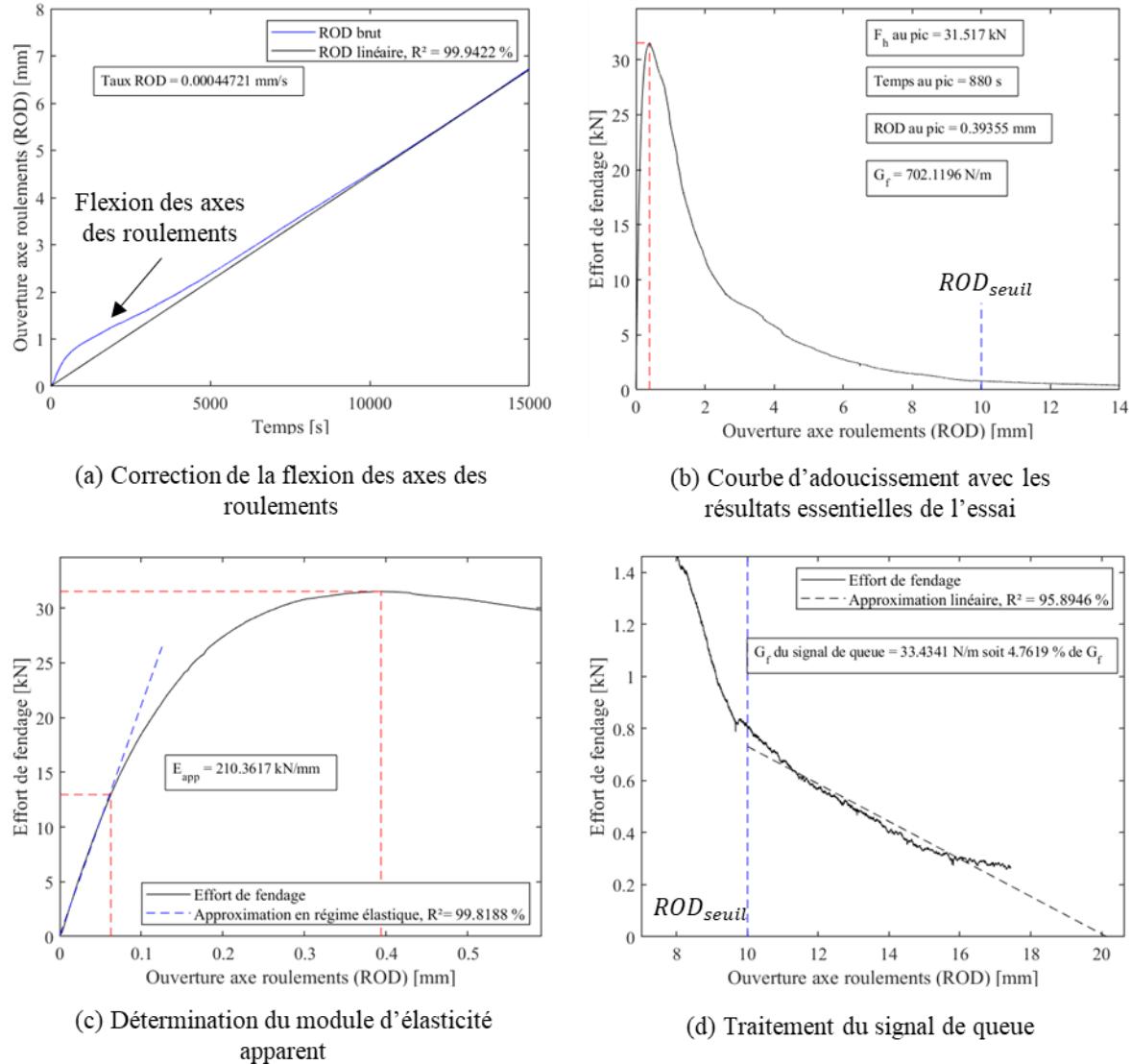


Figure 5.3 : Exemple du traitement des données de l'essai B76-2Y-WS05-3 avec Matlab

5.2.2 Exploitabilité d'un essai de fendage

Un essai de fendage est considéré exploitable lorsque la fissure de fendage est relativement centrée dans le ligament de fissuration (D - a) d'un spécimen (Figure 5.4 (a)). Au contraire, un essai de fendage est considéré « inexploitable » lorsque la fissure de fendage dévie du ligament, par exemple à 90° comme illustrée par la Figure 5.4 (b).

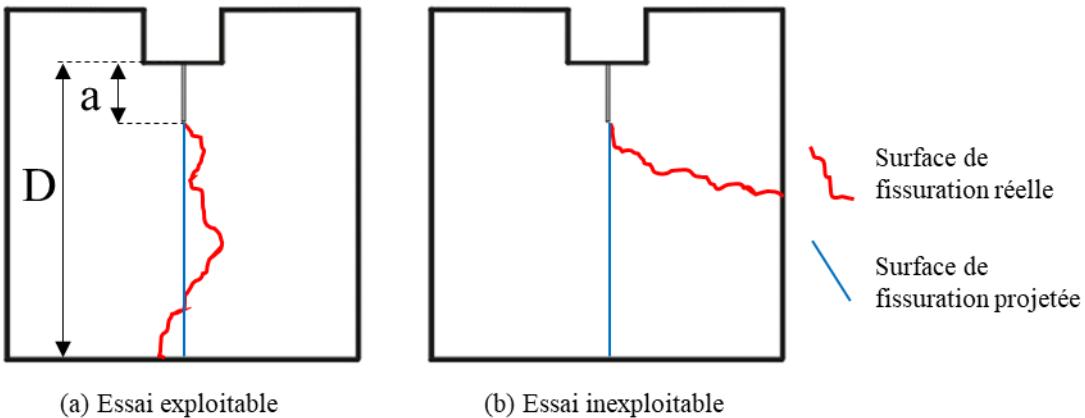


Figure 5.4 : Exemple d'essai exploitable et inexploitable en fonction du profil de fissuration

La déviation de la fissure de fendage par rapport au ligament peut être causée par :

- Un endommagement préalable à l'essai (des fissures générées par la RAS par exemple).
 - L'hétérogénéité du béton. Le diamètre important des granulats des mélanges de ce projet augmente davantage les probabilités d'une grande déviation.
 - Un mauvais positionnement du bloc lors de la mise en place de l'essai, qui provoque une dissymétrie des efforts transmis.
 - Une entaille d'amorce de fissure non centrée par rapport au bloc.

La modification du petit ratio d'entaille a/D de 0,1 à la campagne 0Y, à 0,2 à la campagne 2Y a été décidé spécifiquement pour limiter le nombre d'essais inexploitables.

Des photos de ces essais inexploitables sont illustrées à l'annexe B de suivi des essais de fendage.

5.2.3 Courbes « Effort de fendage – ROD »

5.2.3.1 Spécimens B38

Les courbes « Effort de fendage – ROD » des essais du mélange B38 sont présentées à la Figure 5.5 (a) pour la campagne 0Y (été 2018), et aux Figure 5.5 (b) et (c) pour la campagne 2Y (été 2020). Les valeurs d'intérêts des essais sont récapitulées au Tableau 5.2. Pour rappel, aucun essai B38c de référence n'a été effectué à la campagne 0Y.

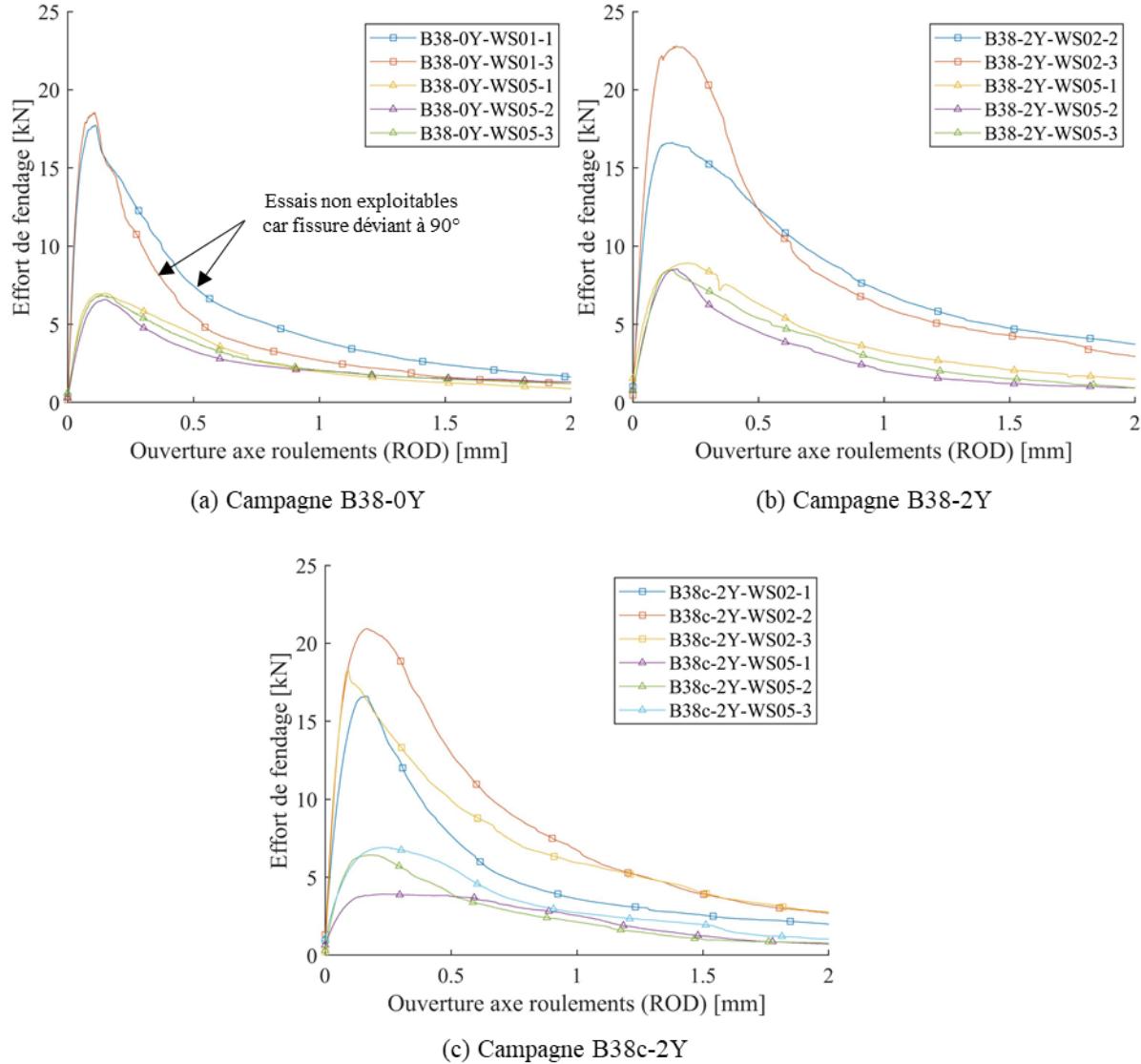


Figure 5.5 : Courbes "Effort de fendage - ROD" des essais B38 et B38c

Tableau 5.2 : Valeurs d'intérêts des essais B38 et B38c

Campagne	Identification des spécimens	Ratio a/D	ROD au pic	Effort au pic	Module élastique apparent	GF expérimental	% de GF dans le signal de queue
			mm	kN	kN/mm	N/m	%
0Y	B38-0Y-WS01-1	0,1	0,11	17,74	370	318,2	3,9
	B38-0Y-WS01-2		x	x	x	x	x
	B38-0Y-WS01-3		0,11	18,57	435	260,5	7,1
	MOYENNE		0,11	18,16	402	289,3	5,3
	COV (%)		1,1	3,2	11,4	14,1	
	B38-0Y-WS05-1	0,5	0,15	6,98	112	324,9	13,2
	B38-0Y-WS05-2		0,15	6,58	90	371,4	19,8
	B38-0Y-WS05-3		0,13	6,89	100	446,6	26,4
	MOYENNE		0,14	6,82	101	381,0	20,5
	COV (%)		6,7	3,1	10,9	16,1	
2Y	B38-2Y-WS02-1	0,2	x	x	x	x	x
	B38-2Y-WS02-2		0,16	16,63	252	656,3	11,0
	B38-2Y-WS02-3		0,17	22,80	324	696,7	16,4
	MOYENNE		0,16	19,72	288	676,5	13,8
	COV (%)		7,5	22,1	17,5	4,2	
	B38-2Y-WS05-1	0,5	0,21	8,94	94	440,5	4,3
	B38-2Y-WS05-2		0,18	8,54	87	363,4	14,6
	B38-2Y-WS05-3		0,15	8,45	80	399,5	15,4
	MOYENNE		0,18	8,64	87	401,1	11,1
	COV (%)		18,9	3,0	8,1	9,6	
2Y	B38c-2Y-WS02-1	0,2	0,16	16,63	214	384,0	7,7
	B38c-2Y-WS02-2		0,17	20,94	284	598,4	9,3
	B38c-2Y-WS02-3		0,09	18,29	304	494,0	10,2
	MOYENNE		0,14	18,62	267	492,1	9,2
	COV (%)		30,1	11,7	17,6	21,8	
	B38c-2Y-WS05-1	0,5	0,23	3,93	42	310,8	25,9
	B38c-2Y-WS05-2		0,18	6,43	84	286,5	10,3
	B38c-2Y-WS05-3		0,24	6,93	65	353,9	6,6
	MOYENNE		0,22	5,76	64	317,1	14,0
	COV (%)		15,2	27,9	33,5	10,8	

: Essais inexploitables

5.2.3.2 Spécimens B76

Les courbes « Effort de fendage – ROD » des essais du mélange B76 sont présentées à la Figure 5.6 (a) pour la campagne 0Y (été 2018), et à la Figure 5.6 (b) pour la campagne 2Y (été 2020). Les valeurs d'intérêts des essais sont récapitulées au Tableau 5.3.

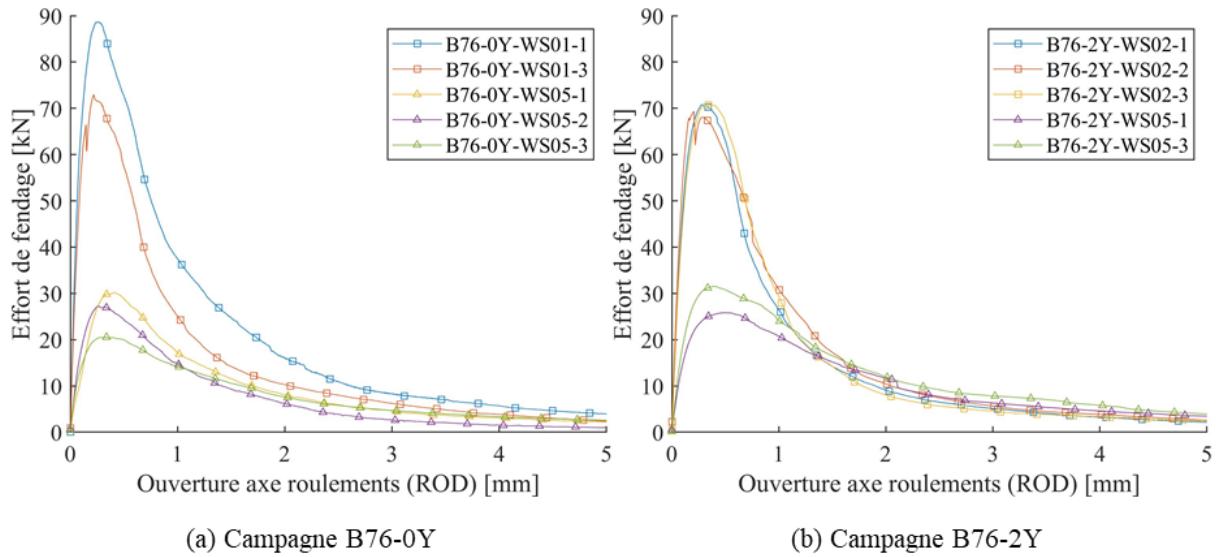


Figure 5.6 : Courbes "Effort de fendage - ROD" des essais B76

Tableau 5.3 : Valeurs d'intérêts des essais B76

Campagne	Identification des spécimens	Ratio a/D	ROD au pic	Effort au pic	Module élastique apparent	GF expérimental	% de GF dans le signal de queue
			mm	kN	kN/mm	N/m	%
0Y	B76-0Y-WS01-1	0,1	0,27	88,74	882	640,1	4,2
	B76-0Y-WS01-2		x	x	x	x	x
	B76-0Y-WS01-3		0,22	72,99	728	436,1	2,0
	MOYENNE		0,24	80,87	805	538,1	3,3
	COV (%)		13,6	13,8	13,6	26,8	
	B76-0Y-WS05-1	0,5	0,41	30,23	109	500,4	5,9
	B76-0Y-WS05-2		0,26	27,28	205	384,2	4,7
	B76-0Y-WS05-3		0,32	20,56	189	478,8	9,9
	MOYENNE		0,33	26,02	168	454,5	6,9
	COV (%)		22,8	19,0	30,5	13,6	
2Y	B76-2Y-WS02-1	0,2	0,29	70,86	549	492,4	4,0
	B76-2Y-WS02-2		0,21	69,37	625	541,2	4,1
	B76-2Y-WS02-3		0,36	70,81	540	507,8	4,1
	MOYENNE		0,28	70,35	571	513,8	4,1
	COV (%)		27,2	1,2	8,2	4,9	
	B76-2Y-WS05-1	0,5	0,50	25,86	162	609,8	7,4
	B76-2Y-WS05-2		x	x	x	x	x
	B76-2Y-WS05-3		0,39	31,52	210	702,1	4,8
	MOYENNE		0,45	28,69	186	655,9	6,0
	COV (%)		17,2	13,9	18,3	10,0	

: Essais inexploitables

5.2.4 Analyse des résultats

Le ROD au pic, l'effort au pic et le module élastique apparent moyens sont résumés au Tableau 5.4 en distinguant la campagne 0Y ou 2Y pour isoler l'effet de la RAS. Un tableau spécifique à l'énergie de fissuration sera présenté par la suite.

Tableau 5.4 : Valeurs d'intérêts moyennes par classe d'essai

Classe	ROD au pic (mm)		Effort au pic (kN)		Module élastique apparent (kN/mm)	
	Campagne 0Y	Campagne 2Y	Campagne 0Y	Campagne 2Y	Campagne 0Y	Campagne 2Y
B38-WS01/WS02	x	0,16 (± 7,5%)	x	19,72 (± 22,1%)	402 (± 11,4%)	288 (± 17,5%)
B38-WS05	0,14 (± 6,7%)	0,18 (± 18,9%)	6,82 (± 3,1%)	8,64 (± 3,0%)	101 (± 10,9%)	87 (± 8,1%)
B76-WS01/WS02	0,24 (± 13,6%)	0,28 (± 27,2%)	80,87 (± 13,8%)	70,35 (± 1,2%)	805 (± 13,6%)	571 (± 8,2%)
B76-WS05	0,33 (± 22,8%)	0,45 (± 17,2%)	26,02 (± 19,0%)	28,69 (± 13,9%)	168 (± 30,5%)	186 (± 18,3%)

: Comparaison délicate entre les deux campagnes car le ratio d'entaille a/D change

5.2.4.1 Répétabilité des essais et causes d'hétérogénéité

Les courbes « Effort de fendage – ROD » entre chaque classe de spécimen suggèrent la bonne répétabilité des essais. La variabilité de l'effort au pic de chargement est importante, et est attribuée à la taille importante des granulats couplée à l'hétérogénéité de leur répartition et de leur orientation dans le ligament de fissuration. À cette hétérogénéité intrinsèque au béton devrait se rajouter l'hétérogénéité du développement de la RAS (voir chapitre 2) pour les spécimens testés à 2Y (B38-2Y, B38c-2Y et B76-2Y). Pourtant cette potentielle hétérogénéité supplémentaire ne se traduit pas par une augmentation significative des coefficients de variation des valeurs d'intérêts à 2Y.

5.2.4.2 ROD au pic

Le ROD au pic augmente significativement entre 0Y et 2Y pour la classe B76-WS05. Comme le taux d'ouverture ROD est constant au cours du temps ($0,5 \mu\text{m}/\text{s}$), cela signifie que le pic de chargement de l'essai est plus tardif. Le ROD au pic ne varie pas significativement entre les deux campagnes pour les autres classes.

5.2.4.3 Effort au pic

Pour les deux classes d'essais comparables, B38-WS05 et B76-WS05, l'effort au pic semble augmenter entre les deux campagnes. Cette augmentation est plus significative pour la classe B38-WS05. Cela suggère un gain de résistance en traction du béton, peut-être provoqué par la continuation du processus d'hydratation du ciment pendant le confinement. Il semble que l'effet de la RAS soit minime et masqué par cette hydratation du ciment.

5.2.4.4 Module d'élasticité apparent

Pour les classes de spécimens comparables, le module élastique apparent ne varie pas significativement.

5.2.4.5 Énergie de fissuration

Les valeurs moyennes d'énergie de fissuration sont rappelées au Tableau 5.5. Il faut souligner que la comparaison entre les classes B76-0Y-WS01 et B76-2Y-WS02 est possible même si le ratio d'entaille a/D diffère. En effet, le travail de fissuration est normalisé par la surface de fissuration projetée.

Il apparaît que, pour deux classes d'essais B38-WS05 et B76-WS01/WS02, l'énergie de fissuration ne varie pas significativement entre les deux campagnes. En revanche pour la classe B76-WS05, l'énergie de fissuration augmente significativement. Cette augmentation de l'énergie est visuellement constatée en comparant les courbes d'adoucissement des Figure 5.6 (a) et Figure 5.6 (b) : l'effort au pic est similaire, mais l'adoucissement est plus important pour les B76-2Y-WS05 que pour les B76-0Y-WS05. Comme présenté à la section 2.5.6.2, c'est le phénomène de multifissuration (ou ramification de la macrofissure) en post-pic qui génère cette plus grande ductilité post-pic. La prochaine section va mettre en évidence ce phénomène de multifissuration.

Tableau 5.5 : Énergie de fissuration moyenne par classe d'essai

Classe	G_F (N/m)	
	Campagne 0Y	Campagne 2Y
B38-WS01/WS02	x	676,5 ($\pm 4,2\%$)
B38-WS05	381 ($\pm 16,1\%$)	401 ($\pm 9,6\%$)
B76-WS01/WS02	538,1 ($\pm 26,8\%$)	513,8 ($\pm 4,9\%$)
B76-WS05	454,5 ($\pm 13,6\%$)	655,9 ($\pm 10,0\%$)

5.3 Profil de fissuration

Cette section va permettre d'illustrer le phénomène de multifissuration observé lors des essais de la campagne 2Y. On en profitera également pour visualiser la propagation de la macrofissure de fendage à l'aide du DIC.

5.3.1 Phénomène de multifissuration

Contrairement à la campagne 0Y, la macrofissure de l'essai de fendage se ramifie (multifissuration) au cours de plusieurs essais de la campagne 2Y. Ce phénomène est illustré à la Figure 5.7 sur quelques essais. C'est une caractéristique de la présence d'endommagement RAS, comme de nombreux auteurs le mentionnent à la section 2.5.6.2. Une interprétation de la cause de cette ramifications est discutée dans la prochaine section 5.4.2.

5.3.2 Visualisation via le DIC de la propagation de la fissure

L'instrumentation DIC permet d'observer le champ de déformation lors de l'essai de fendage. Un exemple de propagation de la fissure d'un essai de fendage est illustré à la Figure 5.8, pour l'essai B76-2Y-WS05-3. De cette visualisation, les observations suivantes sont faites :

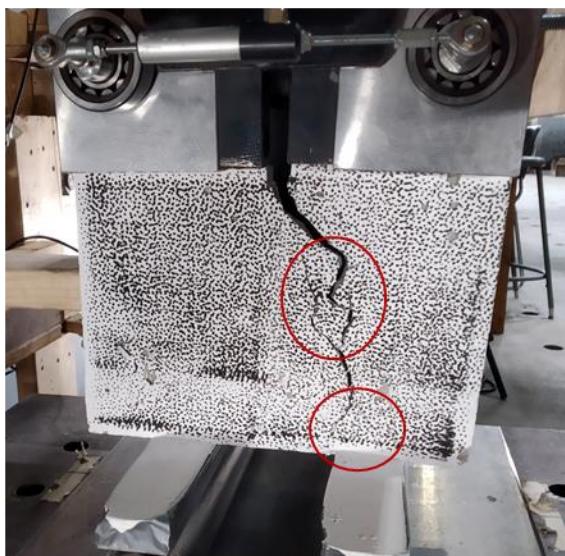
- Sur la Figure 5.8 (a), juste avant le pic de chargement, une fissure isolée s'active. À la Figure 5.8 (c) juste après le pic de chargement, la coalescence de microfissures (FPZ) s'initiant au fond de l'entaille se connecte à cette fissure isolée. On peut émettre l'hypothèse que cette fissure isolée a été générée par la RAS.
- Une ramification du réseau de microfissures (FPZ) est observée juste après le pic de chargement (Figure 5.8 (d)), et une ramification de la macrofissure de fendage est observée à la fin de l'essai (Figure 5.8 (h)).
- De manière générale, le développement de la macrofissure de fendage et sa propagation ne sont pas identiques de chaque bord d'un spécimen. Il est donc recommandé d'instrumenter ces deux bords avec le DIC lorsqu'on souhaite obtenir de l'information quantitative de cette instrumentation.



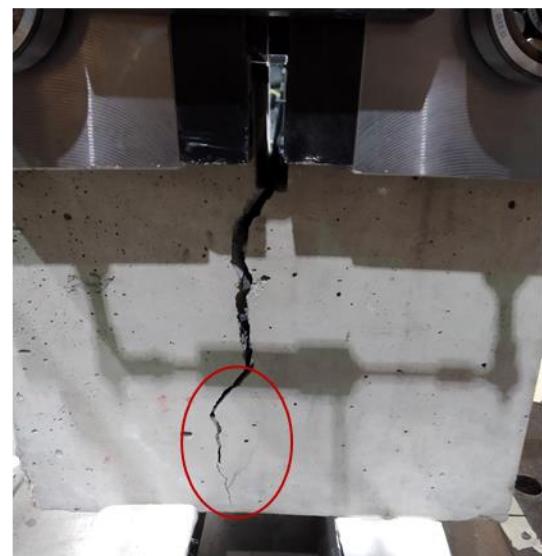
(a) B76-2Y-WS05-1



(b) B38-2Y-WS02-2



(c) B38-2Y-WS02-3



(d) B38c-2Y-WS02-1

Figure 5.7 : Exemples de multifissuration de quelques essais

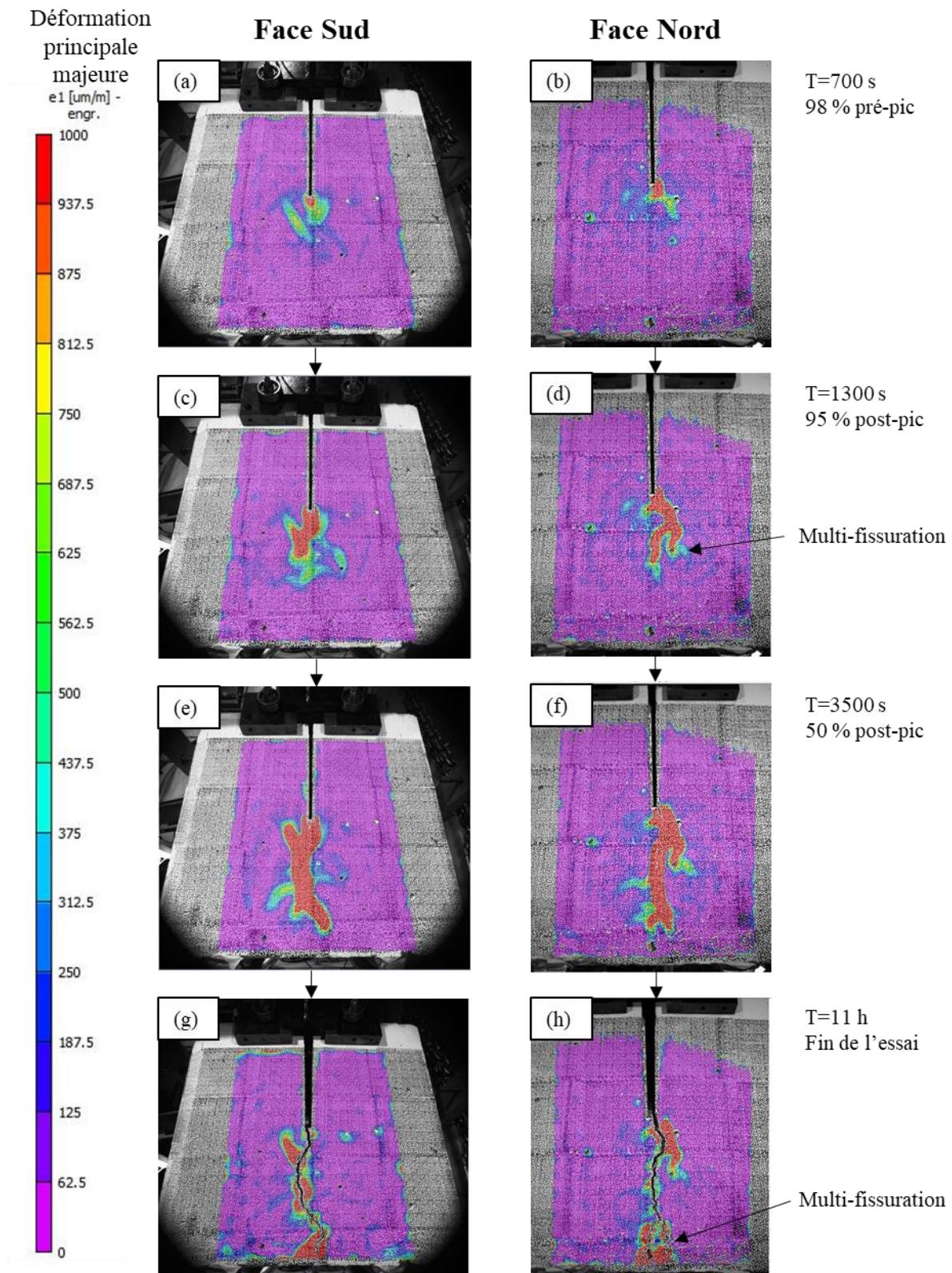


Figure 5.8 : Champ de déformation à différents temps de l'essai B76-2Y-WS05-3

5.4 Effet du sens de coulée

Des spécimens de même mélange B38 ont été coulés selon deux directions différentes (Figure 3.5 du chapitre 3), et 6 répliques de chaque sens de coulée ont été testées durant la campagne 2Y. On montrera dans un premier temps que l'énergie de fissuration diffère entre ces deux classes de spécimens, et on proposera deux hypothèses pour expliquer cette différence.

5.4.1 Effet sur les propriétés mécaniques

Les courbes « Effort de fendage – ROD » des essais B38 et B38c de la campagne 2Y sont illustrées à la Figure 5.9, les essais B38 sont en bleu et les essais B38c sont en rouge. Le ROD au pic moyen, l'effort au pic moyen, le module élastique apparent moyen et l'énergie de fissuration G_F moyenne sont récapitulés au Tableau 5.6. Les tendances suivantes sont remarquées :

- Pour la classe de ratio WS05, l'effort moyen au pic de chargement est significativement plus faible pour les spécimens coulés de côté B38c.
- Surtout, pour les deux classes de ratio WS02 et WS05, l'énergie de fissuration moyenne est significativement plus faible pour les spécimens coulés de côté B38c.

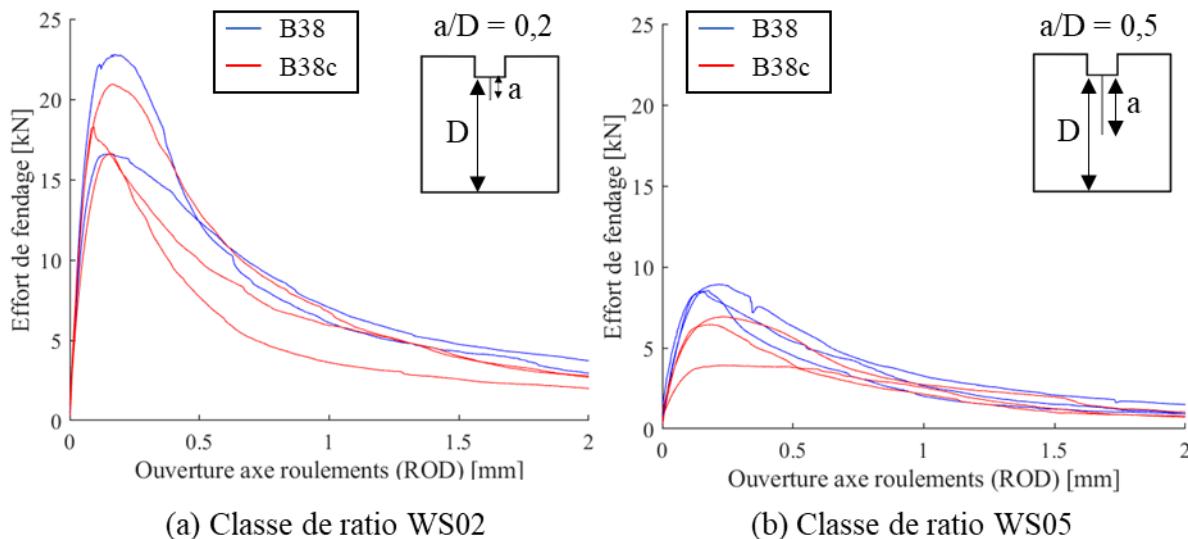


Figure 5.9 : Effet du sens de coulée sur les courbes « Effort de fendage – ROD » des essais B38-2Y et B38c-2Y

Tableau 5.6 : Valeurs d'intérêts des essais B38 de la campagne 2Y, distinguées selon le sens de coulée

Classe	ROD au pic (mm)		Effort au pic (kN)		Module élastique apparent (kN/mm)		G _F (N/m)	
	B38	B38c	B38	B38c	B38	B38c	B38	B38c
2Y-WS02	0,16 (± 7,5%)	0,14 (± 30,1%)	19,72 (± 22,1%)	18,62 (± 11,7%)	288 (± 17,5%)	267 (± 17,6%)	676,5 (± 4,2%)	492,1 (± 21,8%)
2Y-WS05	0,18 (± 18,9%)	0,22 (± 15,2%)	8,64 (± 3,0%)	5,76 (± 27,9%)	87 (± 8,1%)	64 (± 33,5%)	401 (± 9,6%)	317,1 (± 10,8%)

Deux hypothèses peuvent expliquer cette diminution de l'énergie de fissuration :

- Le sens de coulée provoque une ségrégation de l'orientation des granulats, ce qui entraîne une anisotropie de l'endommagement généré par la RAS.
- La RAS s'est plus développée au sein des spécimens B38c.

5.4.2 Orientation de l'endommagement RAS

D'après la section 2.3.2 du chapitre 2 sur l'anisotropie de l'expansion libre, la fissuration générée par la RAS se propage préférentiellement dans des plans perpendiculaires au sens de coulée et l'élancement des granulats accentue cette tendance (Figure 2.11 du chapitre 2). Pour rappel, les granulats utilisés dans les mélanges de ce projet sont particulièrement aplatis. Ainsi, dépendamment de l'orientation des fissures de RAS par rapport au ligament de fissuration, deux tendances sur le développement de la macrofissure de fendage peuvent être observées :

- Lorsque les fissures RAS sont préférentiellement perpendiculaires au ligament de fissuration, comme inféré pour les blocs B38 (Figure 5.10 (a)), la macrofissure de fendage se connecte au réseau de fissures RAS existant et va potentiellement se ramifier (Figure 5.10 (b)). Des surfaces de fissurations additionnelles seront créées et donc de l'énergie supplémentaire sera consommée.
- Lorsque les fissures RAS sont préférentiellement dans l'axe du ligament de fissuration, tel que supposé pour les blocs B38c (Figure 5.10 (c)), la macrofissure de fendage se connecte au réseau d'endommagement existant pour se propager (Figure 5.10 (d)). L'énergie consommée pour propager la macrofissure diminue.

Ainsi par rapport à un état sans endommagement RAS : dans le premier cas (B38) l'énergie de fissuration sera identique ou plus importante, et dans le deuxième cas (B38c) l'énergie de

fissuration sera plus faible. Ce sont les mêmes conclusions que l'étude de Hayes et al. (2020) détaillée à la section 2.5.6.3 du chapitre 2.

Cependant, le sens de coulée n'est pas la seule différence entre les blocs B38 et B38c : l'état d'avancement de la RAS au sein des spécimens B38 et B38c n'est sans doute pas similaire, tel que détaillé dans la prochaine section.

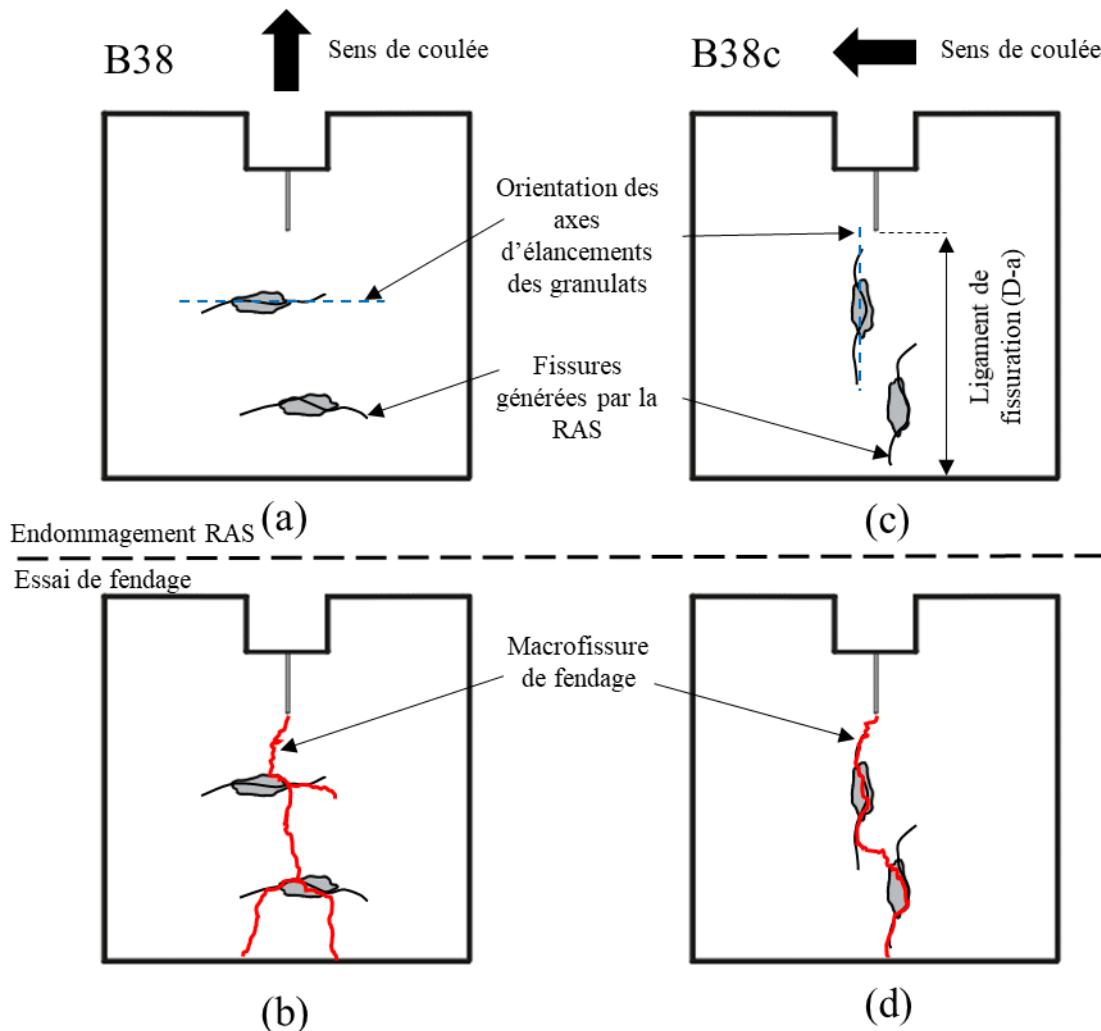


Figure 5.10 : Effet du sens de coulée sur l'orientation de l'endommagement RAS ((a) et (c)) et la propagation de la macrofissure de fendage ((b) et (d))

5.4.3 Deux degrés de développement de la RAS

Pour rappeler les conclusions du chapitre 4, les conditions hydrauliques sont très probablement différentes entre les blocs B38 et B38c : la palette de bloc B38 était empilée sur la palette de bloc

B38c dans la première chambre climatique (voir chapitre 3). L'apport d'eau a donc différé, car les blocs B38c étaient plus proches de l'eau stagnante (voir Figure 3.16 (a)). Cela a sans doute provoqué un plus fort développement de la RAS au sein de ces derniers. L'inspection visuelle exhaustive du chapitre 4 avait notamment mis en lumière la fissuration surfacique importante de quelques spécimens B38c.

Deux indices visuels supplémentaires laissent supposer que les spécimens B38c sont significativement plus affectés par la RAS :

- Le taux de fissuration dans les granulats semble plus important pour les spécimens B38c. C'est observable à la Figure 5.11 (a), (b) et (c) : la macrofissuration de l'essai de fendage s'est davantage propagée au travers des granulats des essais B38c en comparaison aux essais B38 (Figure 5.11 (d), (e) et (f)). Les granulats sont fragilisés par le gonflement du gel RAS et le développement de fissures subséquentes en leur sein (voir chapitre 2), donc plus la RAS s'est développée, plus il y a de granulats affaiblis. Il sera intéressant de quantifier ce taux de rupture dans les granulats en scannant en 3D les surfaces fissurées, dans la continuité des travaux de Croteau (2020).
- Des traces de RAS visibles à l'œil nu sont uniquement observées sur les spécimens B38c. Du gel blanc caractéristique de la RAS est entouré en rouge sur la Figure 5.11 (a), (b) et (c). La Figure 5.12 permet de mieux apercevoir le gel RAS autour des granulats, et se propageant même dans la pâte pour le spécimen B38c-2Y-WS05-1 (Figure 5.12 (a)).

D'après les conclusions de la section 2.5.6.4 du chapitre 2, plus la RAS se développe, plus l'énergie de fissuration diminue, bien que la tendance ne soit pas significativement marquée. L'énergie de fissuration plus faible des B38c par rapport aux B38 pourrait ainsi s'expliquer par l'avancement plus important de la RAS en leur sein. Cependant cette tendance à la diminution de G_F s'oppose aux observations menées précédemment, qui suggèrent une non-altération ou une augmentation de G_F lorsque la RAS se développe. De plus, l'état de référence des spécimens B38c avant développement de la RAS n'a pas été testé, ce qui limite quelque peu l'interprétation des résultats.

Ainsi, à date des résultats de ce mémoire, la première hypothèse est privilégiée (orientation de l'endommagement). Les essais ultérieurs à des degrés d'avancement RAS plus grand des spécimens B38 et B38c permettront de confirmer ou infirmer cette conclusion.

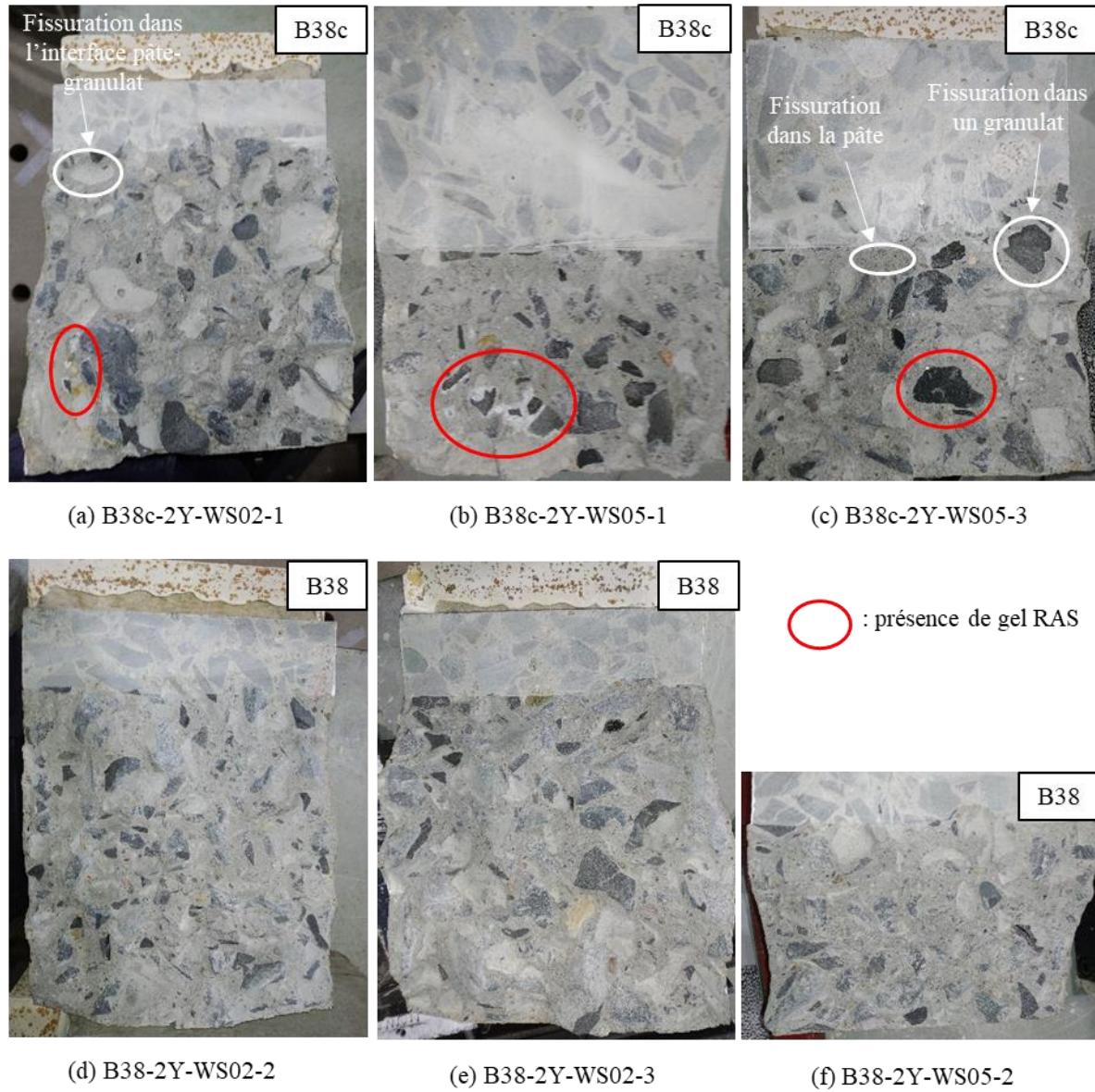


Figure 5.11 : Surfaces de fissuration des essais B38c ((a), (b) et (c)) et des essais B38 ((d), (e) et (f))

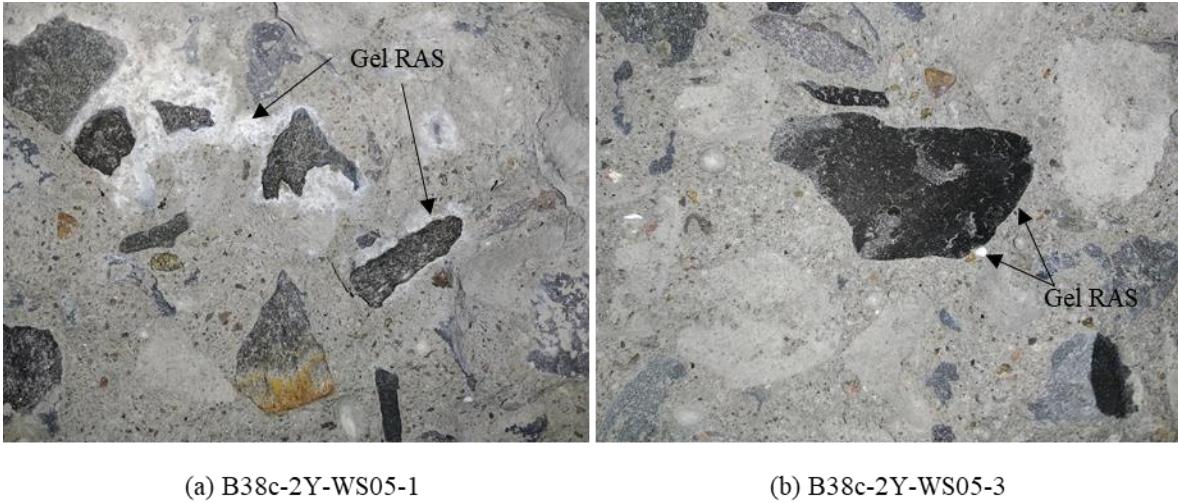


Figure 5.12 : Présence de gel caractéristique de la RAS sur deux spécimens B38c

5.5 Effet d'échelle sur G_F

On confirmera d'abord la présence de l'effet d'échelle, puis les méthodes SBEM et DFPZ seront appliquées pour déterminer l'énergie de fissuration asymptotique $G_{F\infty}$.

5.5.1 Constatation de l'effet d'échelle

Lemery (2018) avait déjà mis en évidence l'effet d'échelle sur l'énergie de fissuration décrit à la section 2.1.3 pour les mélanges A38 et A76 (sans surdosage en alcalis). Ainsi, il convient de montrer cet effet d'échelle pour les mélanges B38 et B76, en reprenant les résultats de Lemery (2018) à titre comparatif. C'est chose faite à la Figure 5.13 pour les mélanges à granulats 38 mm. Les essais B38 de la campagne 0Y n'y sont pas représentés, car, pour rappel, les essais de la classe B38-WS01 sont inexploitables. La Figure 5.14 présente l'effet d'échelle pour les mélanges à granulats 76 mm. À noter que les barres d'incertitudes représentent les valeurs minima et maxima d'énergie de fissuration pour chaque classe.

De ces figures, les conclusions suivantes sont tirées :

- L'effet d'échelle est constaté pour la plupart des spécimens (B38-2Y, B38c-2Y, et B76-0Y), exception faite de B76-2Y (Figure 5.13 et Figure 5.14). L'énergie de fissuration obtenue des essais B76-2Y avec grande entaille ($a/D = 0,5$), est étrangement très élevée, ce qui donne une conclusion qui va à l'encontre de l'effet d'échelle.

- L'effet d'échelle est constaté, peu importe le sens de coulée des spécimens B38 (Figure 5.13).

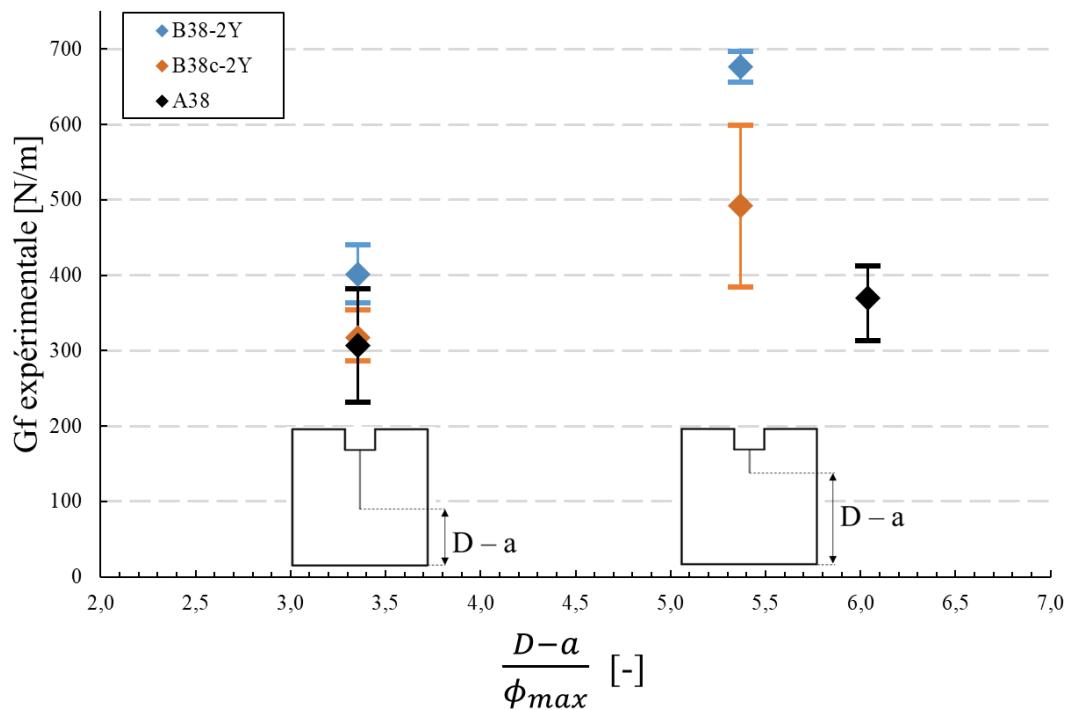


Figure 5.13 : Effets d'échelles pour les mélanges à granulats 38 mm

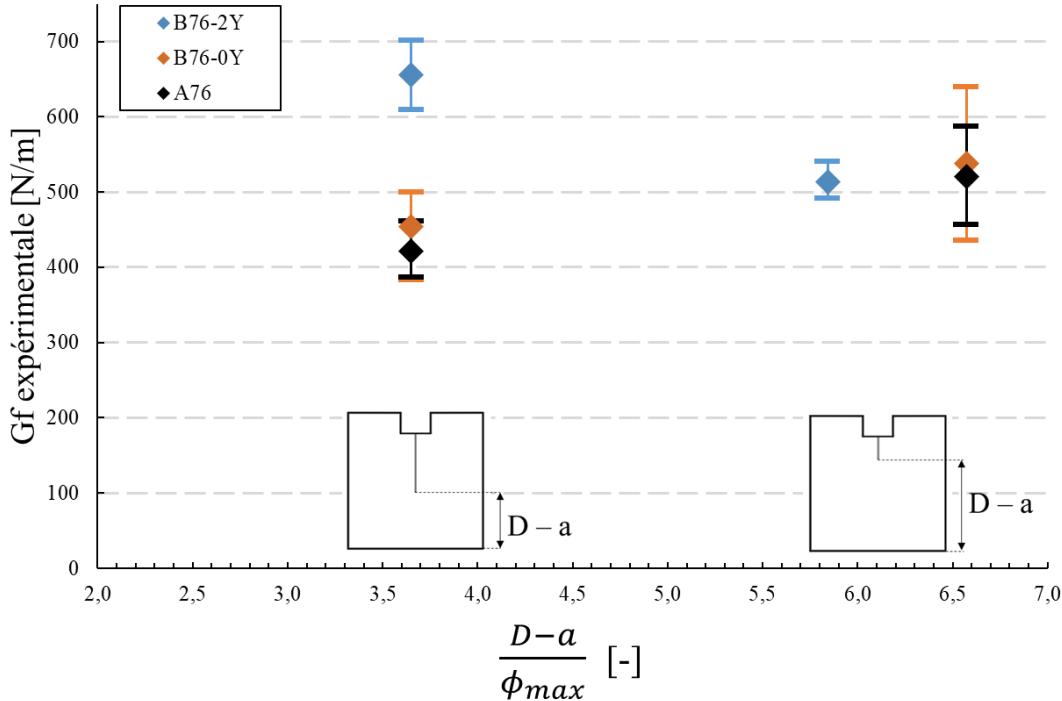


Figure 5.14 : Effets d'échelles pour les mélanges à granulats 76 mm

5.5.2 Détermination de $G_{F\infty}$ avec la méthode SBEM

Afin de s'affranchir de cet effet d'échelle, la résolution des équations de la méthode SBEM, présentées à la section 2.1.3.2 du chapitre 2, est considérée, afin d'estimer l'énergie de fissuration asymptotique $G_{F\infty}$. L'équation de la SBEM est celle du chapitre 2 (2.1), et la procédure d'application de la méthode dans le contexte du projet est illustrée à la Figure 5.15.

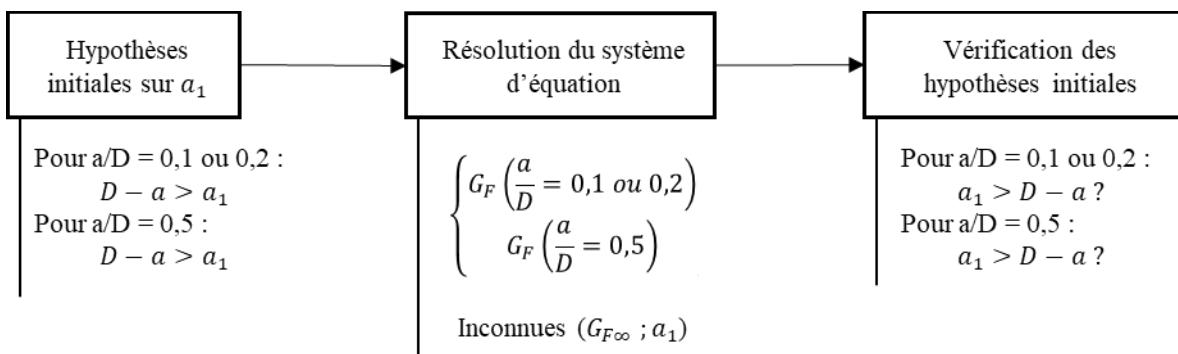


Figure 5.15 : Procédure d'application de la méthode SBEM

Les résultats sont récapitulés au Tableau 5.7 pour toutes les classes de spécimens, y compris les essais de la série A de Lemery (2018) à titre comparatif.

Tableau 5.7 : Application de la méthode SBEM

Classe	G_F a/D = 0,5	G_F a/D = 0,1 ou 0,2	SBEM applicable ?	$G_{F\infty}$	Longueur d'influence a_1
	N/m	N/m		N/m	mm
A76	422	521	✓	644	191
B76-0Y	455	538	✓	642	162
B76-2Y	656	514	✗	-	-
A38	306	370	✓	450	82
B38-0Y	381	✗	✗	-	-
B38-2Y	401	676	✗	-	-
B38c-2Y	317	492	✗	-	-

Il apparaît deux familles de problèmes dans la résolution des systèmes d'équations de la SBEM :

Le système d'équations est impossible à résoudre.

C'est le cas de la classe B38-0Y, car il n'y a pas d'essais valides pour le petit ratio d'entaille a/D = 0,1. Le système de deux équations (deux configurations de ratios) à deux inconnus ($G_{F\infty}$ et a_1) n'est donc pas solvable lorsqu'il manque une équation (configuration a/D = 0,1 où tous les essais sont inexploitables).

C'est aussi le cas de la classe B76-2Y, car le G_F des essais de ratio a/D = 0,5 est supérieur au G_F des essais de ratio a/D = 0,2 à cause du phénomène de multifissuration, ce qui est l'opposé du principe de l'effet d'échelle sur G_F (section 2.1.3). Comme la SBEM se base sur cet effet d'échelle, s'il n'est pas constaté, la méthode ne peut être appliquée.

L'hypothèse sur la longueur d'influence $D - a > a_1$ n'est pas respectée pour les spécimens a/D = 0,5.

C'est le cas des classes B38-2Y et B38c-2Y. Lors de la résolution du système d'équations, on assume par défaut que la longueur d'influence a_1 est inférieure au ligament de fissuration $D - a$ pour les deux configurations de ratio a/D = 0,2 et a/D = 0,5, comme indiqué dans la procédure de la Figure 5.15 et illustré sur la Figure 5.16 (a). Une fois le système résolu, il faut vérifier que la solution a_1 respecte ces hypothèses préalables. Dans le cas des classes B38-2Y et B38c-2Y, les longueurs d'influences a_1 sont supérieures au ligament $D - a = 127,5 \text{ mm}$ de la configuration a/D = 0,5 (Tableau 5.7). Même si l'on fait l'hypothèse préalable que $D - a < a_1$ pour la

configuration $a/D = 0,5$ (Figure 5.16 (b)), la résolution du système d'équations mène à des valeurs de $G_{F\infty}$ incohérentes.

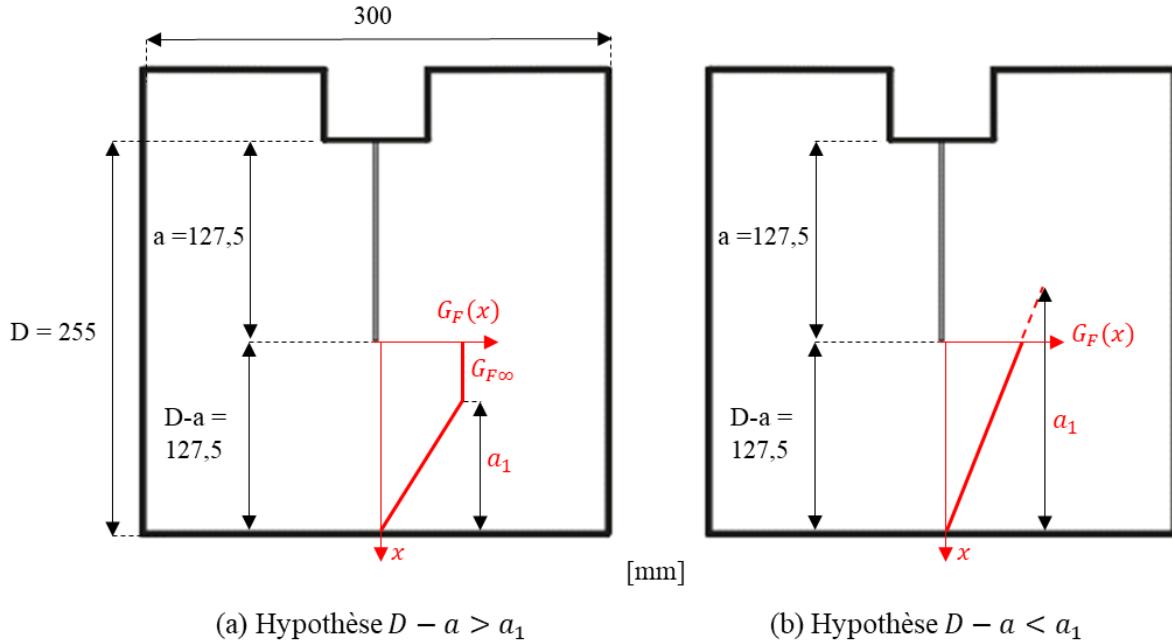


Figure 5.16 : Hypothèses sur a_1 lors de l'application de la SBEM pour le ratio $a/D = 0,5$ et un spécimen B38

Ainsi, avec le développement de la RAS, l'hétérogénéité entre les configurations de spécimens et l'hétérogénéité au sein d'un spécimen le long du ligament (apparition de la multifissuration) ne permettent pas de résoudre les équations non linéaires de la méthode SBEM. L'hypothèse de bilinéarité de l'énergie de fissuration ($G_F(x)$ à la Figure 2.4) peut être remise en question.

5.5.3 Détermination de $G_{F\infty}$ avec la méthode DFPZ

5.5.3.1 Méthode

La nouvelle méthode de détermination expérimentale de $G_{F\infty}$ développée par Lemery et al. (2020) est employée dans cette section. Conformément aux recommandations de cette étude, elle est employée sur les spécimens de ratio $a/D=0,1$ ou $a/D=0,2$ pour que la FPZ soit initialement complètement développée sans perturbation par le champ de compression (voir section 2.1.3.3). L'obtention de la longueur de la FPZ complètement développée L_{FPZ} est faite en post-traitant les données de jauge extensométriques virtuels via le système DIC et le logiciel *Vic3D* de la même

manière que décrit dans Lemery et al. (2020). Ce traitement a cependant été complètement automatisé sous *Matlab* permettant un gain de temps très considérable. Le protocole de post-traitement est résumé à la Figure 5.17, et les figures caractéristiques de ce traitement de données pour l'essai B76-0Y-WS01-3 sont illustrées à la Figure 5.18.

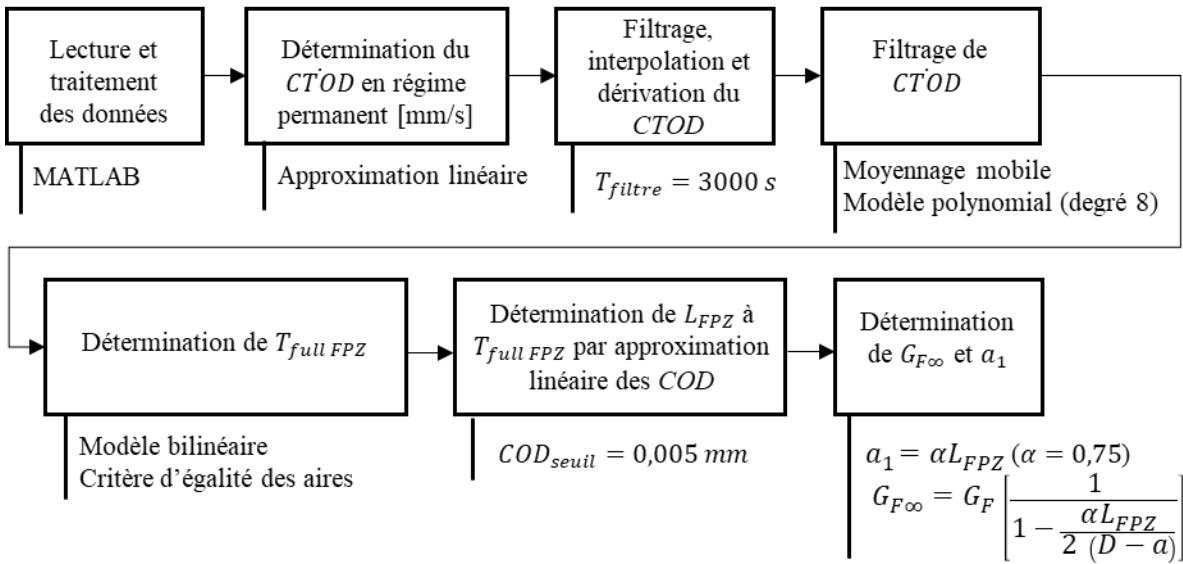


Figure 5.17 : Protocole de traitement des extensomètres virtuels DIC pour déterminer L_{FPBZ}

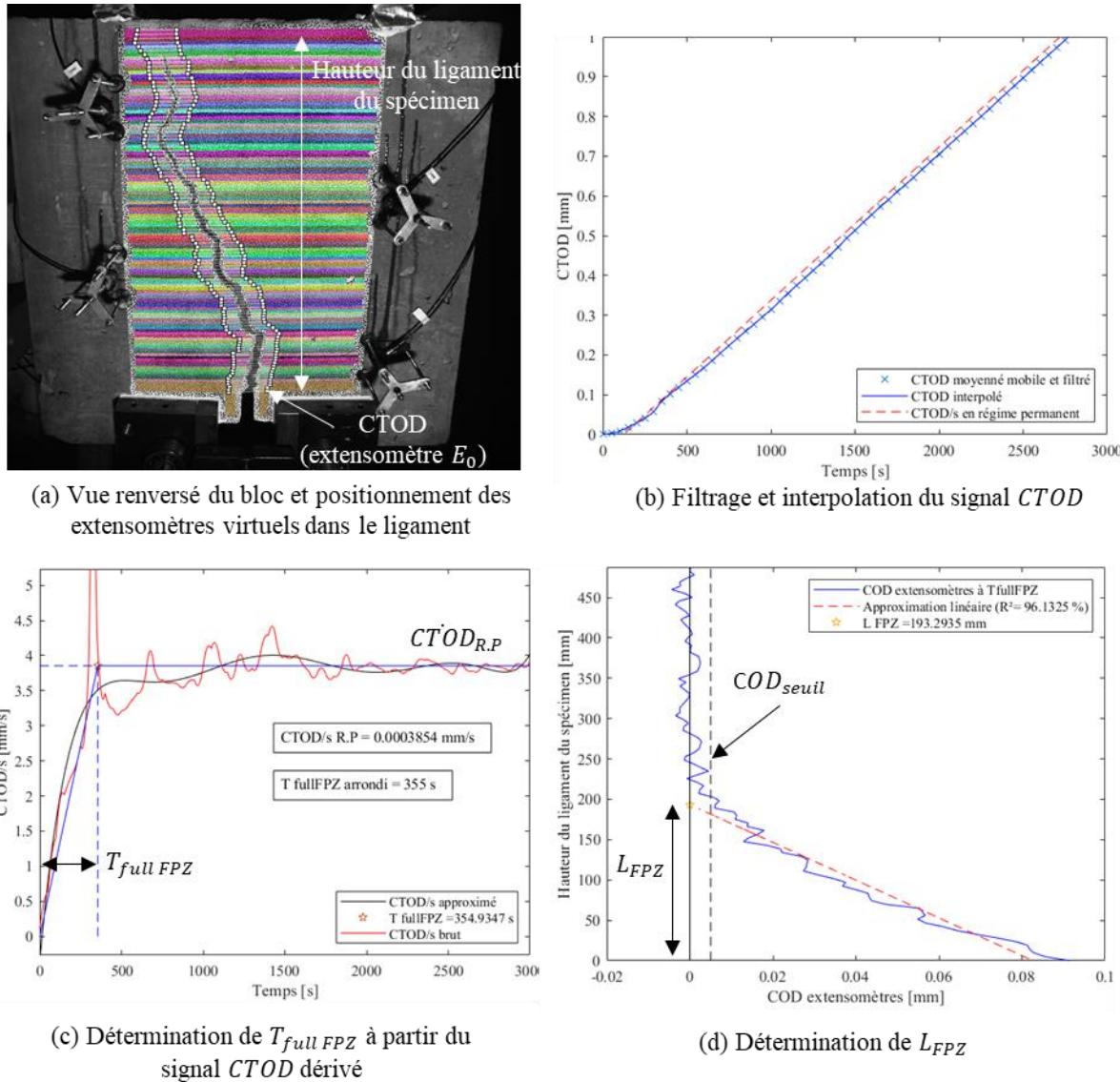


Figure 5.18 : Exemple de traitement des données extensométriques DIC sur l'essai B76-0Y-WS01-3

5.5.3.2 Résultats

L'application de la théorie DFPZ couplée à la méthode de détermination de L_{FPZ} via le DIC permet d'obtenir les résultats du Tableau 5.8. La détermination de $G_{F\infty}$ par les méthodes SBEM et DFPZ est synthétisée au Tableau 5.9, pour tous les mélanges du projet (y compris les séries A de Lemery et al. (2020) à titre comparatif).

Tableau 5.8 : Application de la méthode DFPZ

Classe de spécimen	Identification	G_F expérimentale	L_{FPZ} (DIC)	$G_{F\infty}$ (DFPZ)
		N/m	mm	N/m
B76-0Y	B76-0Y-WS01-1	640,1	185,6	743,7
	B76-0Y-WS01-3	436,1	193,3	510,1
	Moyenne	538,1	189,5	626,9
	COV (%)	26,8	2,9	26,3
B76-2Y	B76-2Y-WS02-1	492,4	180,1	580,7
	B76-2Y-WS02-2	541,2	219,5	664,4
	B76-2Y-WS02-3	507,8	208,7	616,5
	Moyenne	513,8	202,8	620,5
	COV (%)	4,9	10,0	6,8
B38-2Y	B38-2Y-WS02-2	656,3	117,2	836,6
	B38-2Y-WS02-3	696,7	121,0	896,0
	Moyenne	676,5	119,1	866,3
	COV (%)	4,2	2,3	4,9
B38c-2Y	B38c-2Y-WS02-1	384,0	62,0	433,4
	B38c-2Y-WS02-2	598,4	93,2	722,1
	B38c-2Y-WS02-3	494,0	125,3	641,8
	Moyenne	492,1	93,5	599,1
	COV (%)	21,8	33,8	24,9

Du Tableau 5.9, les conclusions suivantes sont tirées :

- Les méthodes SBEM et DFPZ, lorsqu'applicables, indiquent des $G_{F\infty}$ similaires, tel que mentionné par Lemery et al. (2020) et Ben Ftima et Lemery (2020).
- Le surdosage en alcalis de la série B ne semble pas avoir altéré $G_{F\infty}$ lorsqu'on compare la série A76 et B76-0Y. Ainsi pour les mélanges à granulats 38 mm, on peut faire l'hypothèse que le $G_{F\infty}$ de la série B38-0Y est égal au $G_{F\infty}$ de la série A38.
- En comparant la série B76-0Y à la série B76-2Y, c'est-à-dire après 609 jours de développement de la RAS, $G_{F\infty}$ ne semble pas varier. En comparant la série B38-0Y/A38 aux séries B38-2Y et B38c-2Y, $G_{F\infty}$ semble augmenter significativement.
- En comparant la série B38-2Y et B38c-2Y, l'effet du sens de coulée détaillé à la section 5.4.2 est retrouvé sur $G_{F\infty}$.

Tableau 5.9 : Comparaison de $G_{F\infty}$ obtenu via les méthodes SBEM et DFPZ

	Classe	$G_{F\infty}$ (SBEM)	$G_{F\infty}$ (DFPZ)
		N/m	N/m
Avant la RAS	A76	646	613 ($\pm 12,3\%$)
	B76-0Y	643	627 ($\pm 26,3\%$)
Après la RAS	B76-2Y	x	620 ($\pm 6,8\%$)
Avant la RAS	A38	450	438 ($\pm 20,2\%$)
	B38-0Y	x	x
Après la RAS	B38-2Y	x	866 ($\pm 4,9\%$)
	B38c-2Y	x	600 ($\pm 24,9\%$)

CHAPITRE 6 CONCLUSIONS

6.1 Rappel des objectifs

Ce projet de maîtrise fait partie d'un projet de collaboration avec le partenaire industriel Hydro-Québec qui porte sur l'étude d'un aménagement hydraulique atteint par la RAS. L'objectif à long terme est de pouvoir prédire le comportement futur de l'ouvrage via la modélisation numérique par éléments finis non-linéaires. L'énergie de fissuration du béton G_F étant un intrant important pour ces analyses, l'objectif principal de ce projet de maîtrise est d'évaluer l'impact de la RAS sur cet intrant. L'essai de fendage sur des gros blocs de béton est utilisé pour l'évaluation expérimentale de G_F . Deux mélanges de béton représentatifs de l'aménagement notés B38 et B76 avec respectivement des granulats max. 38 mm et 76 mm ont été reconstitués. Au total 30 blocs de béton B38 et 12 blocs de béton B76 ont été coulés et entreposés dans les chambres climatiques de l'IREQ depuis juin 2018. Deux tailles différentes d'entailles ont été réalisées pour chaque série de blocs, afin de quantifier l'effet d'échelle. En plus de ces blocs, 48 éprouvettes cylindriques ont été stockées dans les chambres climatiques, afin de caractériser l'impact de la RAS sur les propriétés conventionnelles du matériau : résistance à la compression, module d'élasticité et résistance à la traction. Un suivi d'expansion a été réalisé à la fois sur les blocs et les éprouvettes cylindriques, en utilisant les techniques de mesures usuelles (DEMEC/micromètre) et pour la première fois une technique de mesure basée sur le scan laser 3D.

Ce présent rapport a donc résumé les mesures d'expansions effectuées durant 820 jours par ces deux méthodes de mesures, et les résultats de 30 essais de fendage répartis en deux campagnes : l'une menée à l'été 2018 avant que la RAS ne soit accélérée, et l'autre à l'été 2020, après un certain avancement de la RAS. Les 24 autres spécimens toujours en chambre climatique seront caractérisés ultérieurement à deux autres avancements de la RAS.

6.2 Conclusions

Les conclusions de ce rapport sont présentées en trois parties : le bilan des mesures d'expansions, les conclusions de l'utilisation de la technologie de scan laser 3D pour mesurer l'expansion RAS, et enfin l'effet de la RAS sur les propriétés mécaniques du béton.

6.2.1 Mesures d’expansions

Les expansions mesurées traditionnellement (DEMEC) diffèrent selon le mélange (B38 ou B76), et pour un même mélange selon le type de spécimen (carotte ou bloc) :

- Pour la plupart des mélanges, l’expansion asymptotique ne semble pas être atteinte et le gonflement de la RAS se poursuit encore, même après plus de 820 jours d’accélération de la RAS.
- L’expansion la plus importante est celle des carottes B76, atteignant une expansion volumétrique moyenne de 0,35 % après 800 jours (0,28 % après 365 jours). Les carottes B38, pourtant dans les mêmes conditions que les carottes B76, ont significativement moins gonflées (expansion volumétrique inférieure à 0,05 % après 800 jours). Plusieurs hypothèses ont été proposées dans section 4.2.5.1 pour expliquer cette différence entre les deux mélanges. L’hypothèse la plus probable est que l’apport d’eau n’a pas été suffisant pour les carottes B38.
- Les blocs B38 et B76 instrumentés pour le suivi démontrent tous (sauf un bloc B76) des expansions volumétriques inférieures à 0,05 % après plus de 800 jours en chambre climatique.
- Cette différence d’expansion entre les carottes et les blocs est attribuée en grande partie aux conditions hydriques différentes qui ont potentiellement causé des avancements différents de la RAS. Il semble aussi y avoir un « retard » dans l’expansion des gros blocs, dû à un manque en apports d’eau lors de la première année de confinement qui a même causé des expansions « négatives » qui s’apparentent aux déformations de retrait. Admettant même des conditions hydriques externes identiques entre carottes et blocs, il est difficile de statuer sur la variation du degré de saturation en eau à l’intérieur des gros blocs en raison de leurs grandes dimensions. Ainsi, il est délicat d’extrapoler l’expansion des spécimens témoins (carottes) à celle des spécimens de caractérisation (blocs). C’est pourtant pratique courante dans la littérature.
- Même s’il est encore prématué de statuer sur l’anisotropie en expansion libre, les résultats en date de ce rapport indiquent une plus grande anisotropie mesurée dans le cas des éprouvettes cylindriques, comparativement au cas des gros blocs de béton.

De plus, il s'est avéré que la technique de mesure traditionnelle d'expansion est invasive : les plots ancrés dans les spécimens nécessaires à la prise de mesure initient et dirigent la fissuration générée par la RAS. Aussi, une forte expansion localisée peut potentiellement décaler les plots et filtrer la mesure d'expansion au DEMEC, voir empêcher la prise de mesure.

6.2.2 Pertinence de la technologie de mesure par scan laser 3D

En plus des mesures traditionnelles au DEMEC, la technologie de scan laser 3D a été employée. L'utilisation novatrice de cette technologie amène les conclusions suivantes :

- Plusieurs itérations ont permis d'élaborer un protocole de mesure en utilisant la technologie de scan laser 3D.
- L'expansion longitudinale d'une carotte B76 mesurée avec le scanner 3D est très bien corrélée à la mesure traditionnelle DEMEC. L'expansion transversale de cette même carotte est significativement plus importante avec la mesure scanner, car la technologie a permis de détecter le gonflement local d'un granulat particulièrement réactif.
- Contrairement aux mesures traditionnelles, la technologie de scan 3D permet de visualiser et quantifier les gonflements locaux induits par les expansions transversales de gros granulats.
- Des colorimétries sont obtenues par superposition d'une carotte à différents avancements de la RAS; et le développement du gonflement peut être commodément visualisé (Figure 6.1).
- Contrairement aux mesures traditionnelles, la technologie de scan 3D est réellement non-invasive.
- Cependant, plus le spécimen scanné est de grande dimension, moins les scans 3D sont précis, en accord avec la notion de performance volumétrique de la technologie. Les mesures d'expansions sur les scans des blocs B38 et B76 sont ainsi aberrantes.
- L'utilisation non adéquate de la technologie par l'opérateur provoque des erreurs d'acquisitions importantes. Ainsi, il faut prêter particulièrement attention à la manière de scanner et au bon état des cibles de positionnement. Il est recommandé de scanner trois

fois chaque spécimen à chaque date de mesure, et de renouveler toutes les cibles de positionnement endommagées (sales, décollées ...) avant chaque mesure.

Ces mesures au scanner 3D ne peuvent remplacer les mesures traditionnelles au DEMEC, et ne doivent avoir pour but qu'un complément d'information. Aussi, le temps et la compétence requise pour post-traiter ces scans sont beaucoup plus importants que de simplement mesurer au DEMEC.

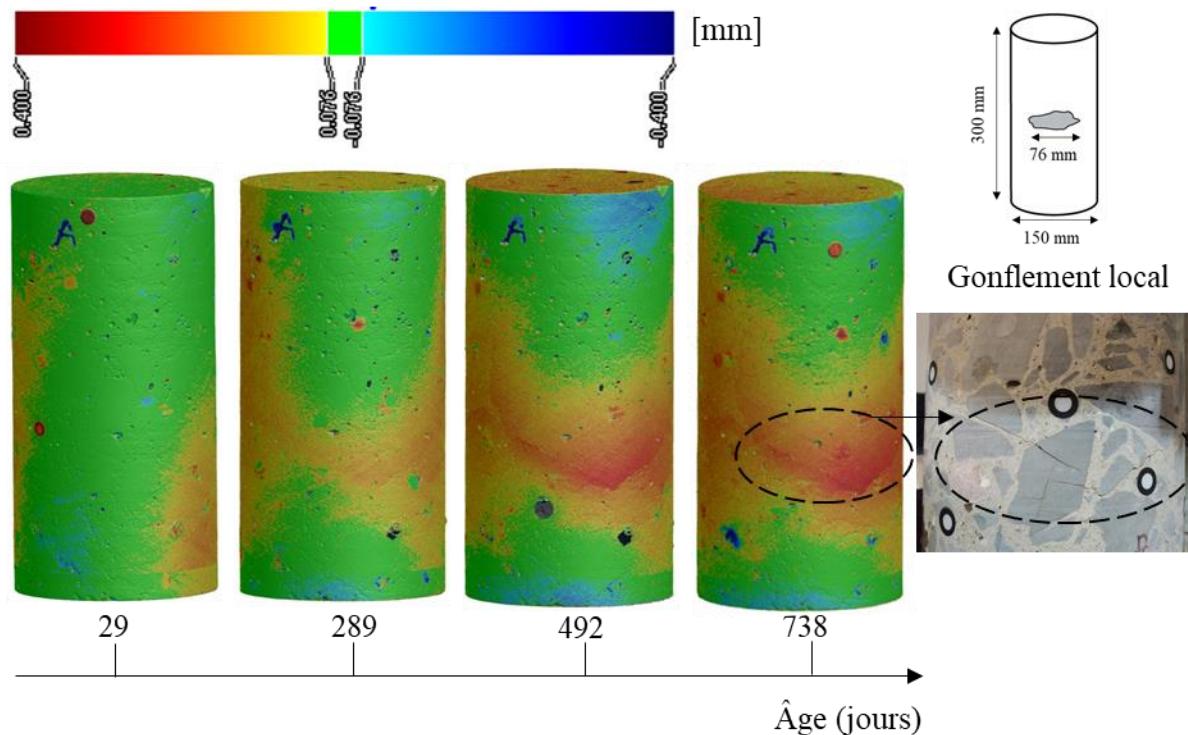


Figure 6.1 : Visualisation du gonflement RAS local sur une carotte B76, avec la technologie de scan laser 3D

6.2.3 Effet de la RAS sur les propriétés mécaniques

6.2.3.1 Effet sur la résistance en compression et le module élastique

L'effet de la RAS sur la résistance en compression des mélanges B38 et B76 n'est pas distinguable. En effet, le processus d'hydratation du ciment, favorisé lors du confinement en chambre climatique, a permis un gain de résistance du béton.

Le module élastique du mélange B76 a diminué d'environ 40% lorsque l'expansion volumétrique des carottes témoins atteignait 0,35 % après 609 jours en chambre climatique. Cette forte

diminution du module élastique est à prendre avec précaution. Le diamètre de granulat (76 mm) est non négligeable par rapport au diamètre de la carotte (150 mm), ce qui ne respecte pas les recommandations de la norme A23.2-14C. Aucune diminution du module élastique n'est constatée pour le mélange B38, comme attendu puisque l'expansion de ce mélange est négligeable.

6.2.3.2 Effet sur l'énergie de fissuration

Énergie de fissuration expérimentale

L'énergie de fissuration expérimentale ne varie pas ou augmente lorsque la RAS se développe. Cette augmentation est probablement provoquée par la ramification (multifissuration) de la macrofissure de fendage en post-pic, causée par le réseau d'endommagement RAS préalablement existant (Figure 6.2).

Anisotropie de l'énergie de fissuration

D'après la comparaison des essais sur deux classes de blocs B38 coulées dans deux directions différentes : l'orientation des granulats aplatis semble provoquer une anisotropie de l'endommagement générée par la RAS. Cette anisotropie d'endommagement provoque donc une anisotropie de l'énergie de fissuration caractérisée. Tel qu'illustré par la Figure 5.10 :

- Lorsque l'endommagement est orienté dans l'axe du ligament de fissuration (B38c) la macrofissure de fendage peut se connecter au réseau existant, et l'énergie de fissuration consommée est plus faible.
- À l'inverse, lorsque l'endommagement s'oriente perpendiculairement au ligament (pour B38 et par extension B76) la macrofissure de fendage peut se ramifier : des surfaces de fissuration supplémentaires sont créées et l'énergie de fissuration consommée est plus importante.

Ces résultats s'accordent avec les travaux de Hayes et al. (2020) récemment publiés, détaillés au chapitre 2.

Énergie de fissuration asymptotique

En filtrant l'effet d'échelle via la méthode DFPZ, les mêmes conclusions sont faites sur l'énergie de fissuration asymptotique : $G_{F\infty}$ ne varie pas ou augmente lorsque la RAS se développe et $G_{F\infty}$ est anisotope (dépendamment du sens de coulée).

Ainsi, lorsque $G_{F\infty}$ est utilisé comme intrant de modèles ANLEF, ne pas considérer l'effet de la RAS sur cet intrant parait conservateur selon les résultats en date de ce rapport. Aussi, il semble nécessaire de considérer l'anisotropie relevée sur l'intrant $G_{F\infty}$, particulièrement lorsque les granulats des mélanges sont aplatis.

La détermination de l'énergie de fissuration asymptotique $G_{F\infty}$ via la méthode SBEM à un avancement de la RAS est compromise par le développement de cette dernière. L'augmentation de l'hétérogénéité due à la RAS occasionne des difficultés pour la comparaison de deux configurations différentes de l'essai de fendage (avec $a/D = 0.2$ et $a/D = 0.5$). Pour l'exemple du spécimen B76-2Y-WS05 (Figure 6.2), la ramifications vers la fin de l'essai cause une augmentation de l'énergie de fissuration qui rend impossible la résolution des équations non-linéaires de la méthode SBEM (équation (2.1)). Cette multifissuration rend même questionnable l'hypothèse de bilinéarité de l'énergie de fissuration locale ($G_F(x)$ à la Figure 2.4), hypothèse forte à l'origine des équations de la SBEM et DFPZ.

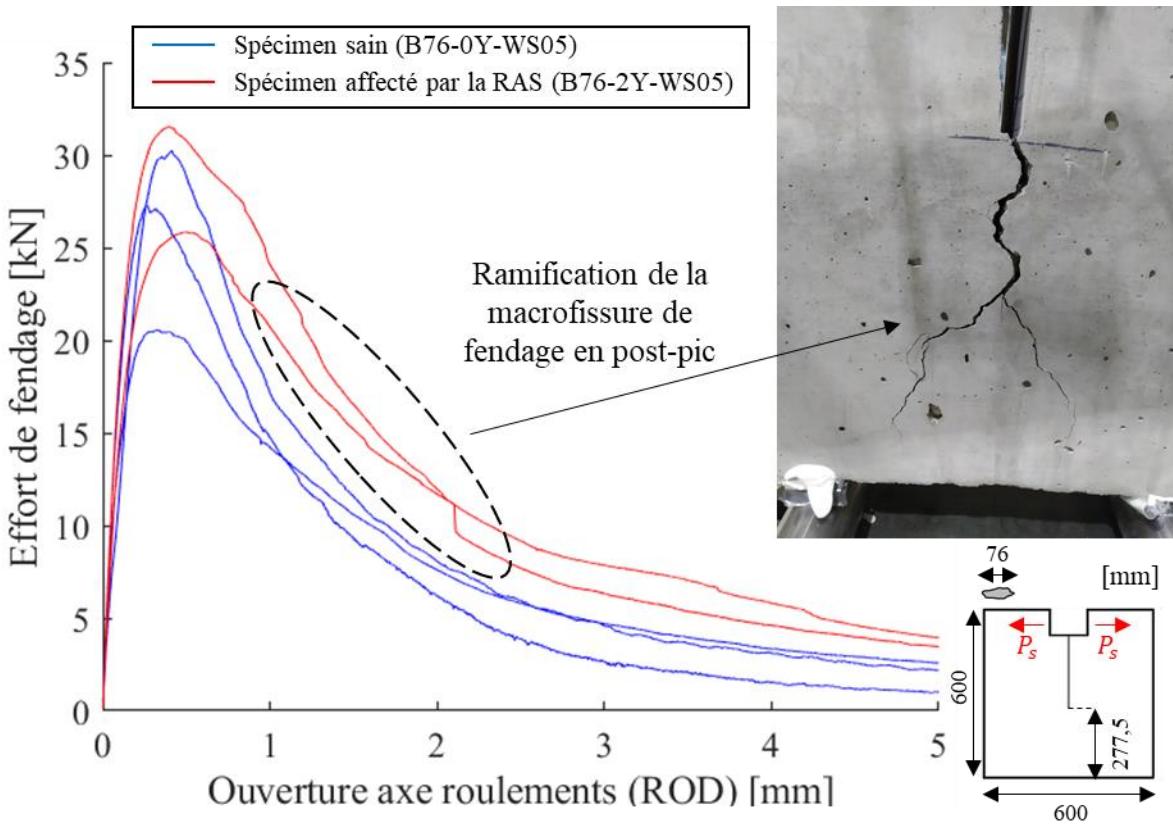


Figure 6.2 : Effet de la RAS sur l'énergie de fissuration

6.3 Recommandations

Les conclusions précédentes amènent les recommandations suivantes pour la suite du projet (deux séries d'essais destructifs pour deux avancements différents de RAS, restent à réaliser), et de manière générale pour les futurs projets reliés à la problématique de RAS :

- Il est essentiel de garantir des conditions hydriques identiques entre tous les spécimens confinés en chambre climatique, que ce soit les spécimens témoins ou les spécimens de caractérisation (les spécimens de caractérisation dans ce projet sont les cylindres pour la caractérisation des résistances de compression/traction et du module d'élasticité et les gros blocs pour la caractérisation de l'énergie de fissuration).
- Afin de valider/invalider l'hypothèse de bilinéarité de l'énergie de fissuration locale, à la base des méthodes SBEM et DFPZ, il est recommandé de faire le suivi des émissions acoustiques pendant le déroulement de l'essai de fendage. Il sera possible ainsi de déduire une évolution de l'énergie de fissuration locale plus représentative du phénomène de multifissuration observé lorsque la RAS se développe.
- Le confinement hydrique idéal des blocs de béton est délicat à réaliser et n'est pas encore normalisé. Ce projet a montré que l'utilisation de système d'arrosage automatique sous des bâches plastiques n'est pas adéquate (condition de confinement I utilisée à l'IREQ lors de la première année (Figure 3.16 (a) et Tableau 3.8)). La condition de confinement avec une humidité relative externe régulée à 95% et sans arrosage semble la plus appropriée (condition de confinement II-b décrite dans la **Figure 3.16 (c)** et **Tableau 3.8**).
- De manière générale dans les projets caractérisant l'effet de la RAS, il est fortement recommandé de suivre l'expansion des spécimens caractérisés, surtout lorsque ceux-ci sont de géométries et dimensions très différentes des prismes ou carottes témoins. Même sous conditions hydriques externes idéales (ex : HR = 95%) et identiques, les effets de forme et d'échelle seront présents. La méthode DRI (*Damage Rating Index*) de quantification de l'endommagement interne provoqué par la RAS (présenté à la section 4.2.6) pourrait être un outil de caractérisation supplémentaire adéquat.
- La technologie de scan 3D est très prometteuse pour mesurer l'expansion RAS, et s'améliore sans cesse. Les nouveaux scanners sur le marché sont plus performants que le

modèle utilisé dans ce projet (acheté en 2016), et promettent une bien meilleure performance volumétrique (CREAFORM, 2020). Par exemple, le modèle de scanner portatif haut de gamme le plus récent à date d'écriture de ce mémoire (*HandyScan Black Elite* avec technologie *MaxSHOT*) permettrait d'améliorer la performance volumétrique du scan des carottes d'environ 60%.

RÉFÉRENCES

- Abd-Elssamid, A., Ma, Z., Le Pape, Y., Hayes, N., & Guimaraes, M. (2020). Effect of alkali-silica reaction expansion rate and confinement on concrete degradation. *ACI Materials Journal*, 117(1), 265-277.
- Abdalla, H., & Karihaloo, B. L. (2003). Determination of size-independent specific fracture energy of concrete from three-point bend and wedge splitting tests. *Magazine of concrete research*, 55(2), 133-141.
- Ahmed, T., Burley, E., Rigden, S., & Abu-Tair, A. I. (2003). The effect of alkali reactivity on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 17(2), 123-144.
- Bavasso, I., Costa, U., Mangialardi, T., & Paolini, A. E. (2020). Assessment of alkali–silica reactivity of aggregates by concrete expansion tests in alkaline solutions at 38° C. *Materials*, 13(2), 288.
- Béland, F., & Champagne, M. (2016). *Rapport d'observations pétrographiques sur les particules de granulat de l'aménagement et sur les plaques de béton polies provenant de carottes du barrage*.
- Ben Ftima, M., & Lemery, J. (2020). Asymptotic fracture energy for nonlinear simulation of mass concrete structures. *Construction and Building Materials*, 121-134.
- Ben Ftima, M., Sadouki, H., & Brühwiler, E. (2016). *Development of a computational multi-physical framework for the use of nonlinear explicit approach in the assessment of concrete structures affected by alkali-aggregate reaction*. Communication présentée à FRAMCOS.
- Bernard, P. (2020). *Simulation numérique de la réaction alcali-granulats dans le contexte d'ouvrages hydrauliques en béton*. (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal (Canada)).
- Bérubé, M.-A., Durand, B., Vézina, D., & Fournier, B. (2000). Alkali-aggregate reactivity in Quebec (Canada). *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(2), 226-245.
- Brühwiler, E., & Wittmann, F. (1990). The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics tests. *Engineering Fracture Mechanics*, 35(1-3), 117-125.
- Comi, C., Kirchmayr, B., & Pignatelli, R. (2012). Two-phase damage modeling of concrete affected by alkali–silica reaction under variable temperature and humidity conditions. *International Journal of Solids and Structures*, 49(23-24), 3367-3380.
- Costa, U., Mangialardi, T., & Paolini, A. (2017). Minimizing alkali leaching in the concrete prism expansion test at 38° C. *Construction and Building Materials*, 146, 547-554.
- Courtier, R. (1990). The assessment of ASR-affected structures. *Cement and Concrete composites*, 12(3), 191-201.
- CREAFORM (2018). [Vxelements 5.0 SR1 Manuel de l'utilisateur].
- CREAFORM. (2020). Tiré de <https://www.creaform3d.com>
- Croteau, M. (2020). *Investigations numériques à l'échelle mésoscopique de l'essai de fendage de béton d'ouvrages hydrauliques*. (Rapport de recherche, École Polytechnique de Montréal (Canada)).

- Diab, S., Soliman, A., & Nokken, M. (2020). Effect of triggering material, size, and casting direction on ASR expansion of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 121323.
- Drolet, C., Duchesne, J., & Fournier, B. (2017). Validation of the alkali contribution by aggregates to the concrete pore solution. *Cement and Concrete Research*, 98, 10-23.
- Duan, K., Hu, X.-Z., & Wittmann, F. H. (2002). Explanation of size effect in concrete fracture using non-uniform energy distribution. *Materials and Structures*, 35(6), 326.
- Duan, K., Hu, X., & Wittmann, F. (2001). Boundary effect on concrete fracture induced by non-constant fracture energy distribution. *Fracture Mechanics of Concrete Structures (R. de Borst, J. Mazars, G. Pijaudier-Cabot and JGM Van Mier (Eds))*, Proc FRAMCOS-4, Balkema, Rotterdam, 49-55.
- Duan, K., Hu, X., & Wittmann, F. H. (2003). Boundary effect on concrete fracture and non-constant fracture energy distribution. *Engineering Fracture Mechanics*, 70(16), 2257-2268.
- Durand, B., & Veilleux, M. (2003). [Communication interne].
- Esposito, R., Anaç, C., Hendriks, M. A., & Çopuroğlu, O. (2016). Influence of the alkali-silica reaction on the mechanical degradation of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(6), 04016007.
- Figueira, R., Sousa, R., Coelho, L., Azenha, M., de Almeida, J., Jorge, P., & Silva, C. (2019). Alkali-silica reaction in concrete: Mechanisms, mitigation and test methods. *Construction and Building Materials*, 222, 903-931.
- Fournier, B., & Bérubé, M.-A. (2000). Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(2), 167-191.
- Fournier, B., Bérubé, M.-A., Folliard, K. J., & Thomas, M. (2010). *Report on the diagnosis, prognosis, and mitigation of Alkali-Silica Reaction (ASR) in transportation structures*. United States. Federal Highway Administration. Office of Pavement Technology.
- Gao, X. X., Multon, S., Cyr, M., & Sellier, A. (2013). Alkali–silica reaction (ASR) expansion: pessimum effect versus scale effect. *Cement and Concrete Research*, 44, 25-33.
- Gautam, B. P., & Panesar, D. K. (2017). The effect of elevated conditioning temperature on the ASR expansion, cracking and properties of reactive Spratt aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 140, 310-320.
- Gautam, B. P., Panesar, D. K., Sheikh, S. A., & Vecchio, F. J. (2017). Effect of coarse aggregate grading on the ASR expansion and damage of concrete. *Cement and Concrete Research*, 95, 75-83.
- Geng, G., Shi, Z., Leemann, A., Borca, C., Huthwelker, T., Glazyrin, K., . . . Dähn, R. (2020). Atomistic structure of alkali-silica reaction products refined from X-ray diffraction and micro X-ray absorption data. *Cement and Concrete Research*, 129, 105958.
- Gholizadeh-Vayghan, A., Rajabipour, F., Khaghani, M., & Hillman, M. (2019). Characterization of viscoelastic behavior of synthetic alkali–silica reaction gels. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103359.

- Giaccio, G., Torrijos, M. C., Milanesi, C., & Zerbino, R. (2019). Alkali–silica reaction in plain and fibre concretes in field conditions. *Materials and Structures*, 52(2), 31.
- Giaccio, G., Zerbino, R., Ponce, J., & Batic, O. R. (2008). Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 38(7), 993-1004.
- Guan, J., Li, Q., Wu, Z., Zhao, S., Dong, W., & Zhou, S. (2015). Minimum specimen size for fracture parameters of site-casting dam concrete. *Construction and Building Materials*, 93, 973-982.
- Hayes, N. W., Giorla, A. B., Trent, W., Cong, D., Le Pape, Y., & Ma, Z. J. (2020). Effect of alkali-silica reaction on the fracture properties of confined concrete. *Construction and Building Materials*, 238, 117641.
- Hillerborg, A. (1985). The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete. *Materials and structures*, 18(4), 291-296.
- Hu, C., Gautam, B. P., & Panesar, D. K. (2018). Nano-mechanical properties of alkali-silica reaction (ASR) products in concrete measured by nano-indentation. *Construction and Building Materials*, 158, 75-83.
- Hu, C., & Li, Z. (2015). A review on the mechanical properties of cement-based materials measured by nanoindentation. *Construction and Building Materials*, 90, 80-90.
- Hu, X.-Z., & Wittmann, F. (1992). Fracture energy and fracture process zone. *Materials and Structures*, 25(6), 319-326.
- Hu, X., & Duan, K. (2004). Influence of fracture process zone height on fracture energy of concrete. *Cement and concrete research*, 34(8), 1321-1330.
- Hydro-Québec (2018). [Communication interne].
- Kawabata, Y., Dunant, C., Yamada, K., & Scrivener, K. (2019). Impact of temperature on expansive behavior of concrete with a highly reactive andesite due to the alkali–silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 125, 105888.
- Kawabata, Y., Yamada, K., Sagawa, Y., & Ogawa, S. (2018). Alkali-Wrapped Concrete Prism Test (AW-CPT)—New Testing Protocol Toward a Performance Test against Alkali-Silica Reaction-. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 16(9), 441-460.
- Kernler, D. (2014). *Empirical rule*. Tiré de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Empirical_Rule.PNG
- Khalilpour, S., BaniAsad, E., & Dehestani, M. (2019). A review on concrete fracture energy and effective parameters. *Cement and Concrete research*, 120, 294-321.
- Kongshaug, S. S., Oseland, O., Kanstad, T., Hendriks, M. A., Rodum, E., & Markeset, G. (2020). Experimental investigation of ASR-affected concrete—The influence of uniaxial loading on the evolution of mechanical properties, expansion and damage indices. *Construction and Building Materials*, 245, 118384.
- Landry, M. (1995). *Influence de l'air occlus, du rapport eau/ciment, de la granulometrie des granulats et de la dimension des éprouvettes testées sur la réaction alcalis-granulats dans le béton*. (Mémoire de maîtrise, Université de Laval (Canada)).

- Larive, C. (1997). *Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques*. (Thèse de doctorat, École nationale des ponts et chaussées (France)).
- Leemann, A., & Lura, P. (2013). E-modulus of the alkali–silica-reaction product determined by micro-indentation. *Construction and Building Materials*, 44, 221-227.
- Lemery, J. (2018). *Étude expérimentale via l'essai de fendage, de l'énergie de fissuration des bétons des ouvrages hydrauliques*. (Mémoire de maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal (Canada)).
- Lemery, J., Ftima, M. B., Leclerc, M., & Wang, C. (2020). The disturbed fracture process zone theory for the assessment of the asymptotic fracture energy of concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 231, 107022.
- Liaudat, J., Carol, I., López, C. M., & Saouma, V. E. (2018). ASR expansions in concrete under triaxial confinement. *Cement and Concrete Composites*, 86, 160-170.
- Lindgård, J., Thomas, M. D., Sellevold, E. J., Pedersen, B., Andiç-Çakır, Ö., 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.
- Marzouk, H., & Langdon, S. (2003). The effect of alkali-aggregate reactivity on the mechanical properties of high and normal strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 25(4-5), 549-556.
- Miki, T., & Tsukahara, H. (2016). *Crack propagation in ASR damaged concrete detected by image analysis*. Communication présentée à Proceedings of 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (vol. 9, p. 1-7).
- Mohammadi, A., Ghiasvand, E., & Nili, M. (2020). Relation between mechanical properties of concrete and alkali-silica reaction (ASR); a review. *Construction and Building Materials*, 258, 119567.
- Mohammed, T. U., Hamada, H., & Yamaji, T. (2003). Alkali-silica reaction-induced strains over concrete surface and steel bars in concrete. *Materials Journal*, 100(2), 133-142.
- Moon, J., Speziale, S., Meral, C., Kalkan, B., Clark, S. M., & Monteiro, P. J. (2013). Determination of the elastic properties of amorphous materials: case study of alkali–silica reaction gel. *Cement and concrete research*, 54, 55-60.
- Multon, S. (2003). *Evaluation expérimentale et théorique des effets mécaniques de l'alcali-réaction sur des structures modèles*. (Thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée (France)).
- 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(4), 508-516.
- 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*, 38(3), 350-359.
- Multon, S., Seignol, J.-F., & Toutlemonde, F. (2005). Structural behavior of concrete beams affected by alkali-silica reaction. *ACI Materials Journal*, 102(2), 67.

- 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.
- Multon, S., & Toutlemonde, F. (2010). Effect of moisture conditions and transfers on alkali silica reaction damaged structures. *Cement and Concrete Research*, 40(6), 924-934.
- Panesar, D., & Gautam, B. (2016). *The mechanisms behind the partial recovery in the degraded mechanical properties of ASR-affected concrete*. Communication présentée à Fib Symp., Cape Town, South Africa.
- Pathirage, M., Bousikhane, F., D'Ambrosia, M., Alnaggar, M., & Cusatis, G. (2019). Effect of alkali silica reaction on the mechanical properties of aging mortar bars: experiments and numerical modeling. *International Journal of Damage Mechanics*, 28(2), 291-322.
- Phair, J. W., Tkachev, S. N., Manghnani, M. H., & Livingston, R. A. (2005). Elastic and structural properties of alkaline-calcium silica hydrogels. *Journal of Materials Research*, 20(2), 344-349.
- Pleau, R., Bérubé, M., Pigeon, M., Fournier, B., & Raphaël, S. (1989). *Mechanical behaviour of concrete affected by ASR*. Communication présentée à Proc., 8th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction (p. 721-726).
- 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(4), 588-596.
- Rajabipour, F., Giannini, E., Dunant, C., Ideker, J. H., & Thomas, M. D. (2015). Alkali–silica reaction: current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. *Cement and Concrete Research*, 76, 130-146.
- Rotter, H. (1996). *The impact of alkali-aggregate reaction on the fracture mechanics of concrete*. (Thèse de doctorat, University of Vienna (Autriche)).
- Rotter, H., Tscheegg, E., Nadu, M., & Schieber, M. (1998). Determination of the specific fracture energy of AAR-affected concrete using the wedge-splitting method. *Magazine of Concrete Research*, 50(3), 257-262.
- Saha, A. K., Khan, M., Sarker, P. K., Shaikh, F. A., & Pramanik, A. (2018). The ASR mechanism of reactive aggregates in concrete and its mitigation by fly ash: A critical review. *Construction and Building Materials*, 171, 743-758.
- Sanchez, L. (2014). *Contribution to the assessment of damage in aging concrete infrastructures affected by alkali-aggregate reaction*. (Citeseer).
- Sanchez, L., 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., Fournier, B., Jolin, M., Mitchell, D., & Bastien, J. (2017). Overall assessment of Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in concretes presenting different strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures. *Cement and Concrete Research*, 93, 17-31.

- Sanchez, L., Fournier, B., Mitchell, D., & Bastien, J. (2020). Condition assessment of an ASR-affected overpass after nearly 50 years in service. *Construction and Building Materials*, 236, 117554.
- Sanchez, L., Kuperman, S., HELENE, P., & Kihara, Y. (2008). *Trials to correlate the accelerated mortar bar test, the standard and the accelerated concrete prism tests*. Communication présentée à 13th International conference on alkali-aggregate reaction (ICAAR), Norway.
- Saouma, V. (2014). *Numerical modeling of AAR*: CRC press.
- Saouma, V. E., Martin, R. A., Hariri-Ardebili, M. A., & Katayama, T. (2015). A mathematical model for the kinetics of the alkali–silica chemical reaction. *Cement and Concrete Research*, 68, 184-195.
- Sargolzahi, M., Kodjo, S. A., Rivard, P., & Rhazi, J. (2010). Effectiveness of nondestructive testing for the evaluation of alkali–silica reaction in concrete. *Construction and Building Materials*, 24(8), 1398-1403.
- Sibbick, R., & Page, C. (1992). Threshold alkali contents for expansion of concretes containing British aggregates. *Cement and Concrete Research*, 22(5).
- Siemes, T., Han, N., & Visser, J. (2002). Unexpectedly low tensile strength in concrete structures. *Heron*, 47(2), 111-124.
- Sims, I., & Poole, A. B. (2017). *Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World Review*: CRC Press.
- Sinno, N., & Shehata, M. H. (2019). Effect of sample geometry and aggregate type on expansion due to alkali-silica reaction. *Construction and Building Materials*, 209, 738-747.
- Smaoui, N., Bérubé, M., Fournier, B., & Bissonnette, B. (2004). Influence of specimen geometry, orientation of casting plane, and mode of concrete consolidation on expansion due to ASR. *Cement, Concrete and Aggregates*, 26(2), 1-13.
- Smaoui, N., Bérubé, M., Fournier, B., Bissonnette, B., & Durand, B. (2005a). Effects of alkali addition on the mechanical properties and durability of concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(2), 203-212.
- Smaoui, N., Bissonnette, B., Bérubé, M., Fournier, B., & Durand, B. (2005b). Mechanical properties of ASR-affected concrete containing fine or coarse reactive aggregates. *Journal of ASTM International*, 3(3), 1-16.
- Stanton, T. E. (1940). *Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate*.
- Strack, C. M., Barnes, E., Ramsey, M. A., Williams, R. K., Klaus, K. L., & Moser, R. D. (2020). Impact of aggregate mineralogy and exposure solution on alkali-silica reaction product composition and structure within accelerated test conditions. *Construction and Building Materials*, 240, 117929.
- Swamy, & Al-Asali. (1988a). Engineering properties of concrete affected by alkali-silica reaction. *Materials Journal*, 85(5), 367-374.
- Swamy, & Al-Asali. (1988b). Expansion of concrete due to alkali-silica reaction. *Materials Journal*, 85(1), 33-40.

- Takahashi, Y., Ogawa, S., Tanaka, Y., & Maekawa, K. (2016). Scale-dependent ASR expansion of concrete and its prediction coupled with silica gel generation and migration. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 14(8), 444-463.
- Thomas, M., Fournier, B., Folliard, K., Ideker, J., & Shehata, M. (2006). Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali–silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research*, 36(10), 1842-1856.
- Trunk, B., & Wittmann, F. (2001). Influence of size on fracture energy of concrete. *Materials and structures*, 34(5), 260-265.
- Ulm, F.-J., Coussy, O., Kefei, L., & Larive, C. (2000). Thermo-chemo-mechanics of ASR expansion in concrete structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(3), 233-242.
- Yamada, K., Karasuda, S., Ogawa, S., Sagawa, Y., Osako, M., Hamada, H., & Isneini, M. (2014). CPT as an evaluation method of concrete mixture for ASR expansion. *Construction and Building Materials*, 64, 184-191.
- Zhang, C., Sorelli, L., Fournier, B., Duchesne, J., Bastien, J., & Chen, Z. (2017). Stress-relaxation of crystalline alkali-silica reaction products: characterization by micro-and nanoindentation and simplified modeling. *Construction and Building Materials*, 148, 455-464.
- Zhang, C., Wang, A., Tang, M., Wu, B., & Zhang, N. (1999). Influence of aggregate size and aggregate size grading on ASR expansion. *Cement and Concrete Research*, 29(9), 1393-1396.
- Zheng, K., Lukovic, M., De Schutter, G., Ye, G., & Taerwe, L. (2016). Elastic modulus of the alkali-silica reaction rim in a simplified calcium-alkali-silicate system determined by nano-indentation. *Materials*, 9(9), 787.

ANNEXE A : PROPRIÉTÉS DU GEL PRODUIT DE LA RAS

Le gel produit de la RAS est complexe : sa microstructure et ses propriétés diffèrent dans l'espace et le temps : selon que le gel se situe dans le granulat, dans l'interface pâte-granulat ou dans la pâte de ciment et selon l'avancement de la RAS.

A.1 Microstructure du gel

Hu et al. (2018) ont montré par une analyse au microscope électronique à balayage et par nano-indentation que le gel produit dans les fissures à l'intérieur des granulats réactifs se décomposait en deux phases distinctes (Figure A.1) :

- Une phase cristalline en forme de rosette ou de plaque,
- Une phase amorphe granulaire.

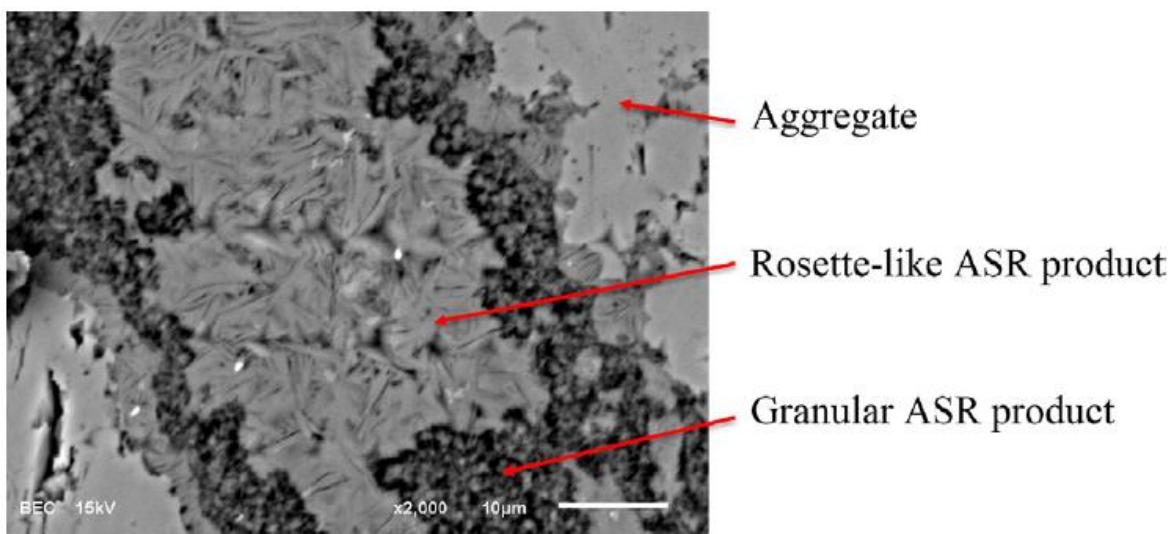


Figure A.1 : Différentes phases du gel produit de la RAS présent dans une fissure à l'intérieur d'un granulat (Hu et al., 2018)

Geng et al. (2020) indiquent que la microstructure du gel produit de la RAS en dehors du granulat est très similaire à celui de gel C-S-H produit de la réaction d'hydratation. La composition et la structure du gel dépendent de la minéralogie du granulat réactif, et de l'environnement local de formation du gel (Strack et al., 2020).

A.2 Module d'élasticité du gel

Le module d'élasticité du gel mesuré par micro-indentation dans les fissures de granulats réactifs est de 5 à 15 GPa (Leemann et Lura, 2013; Zhang et al., 2017) alors qu'il est plus important lorsqu'il est mesuré par nano-indentation : 24 à 62 GPa (Zheng et al., 2016; Hu et al., 2018). Zhang et al. (2017) expliquent que l'échelle nanométrique de la mesure par nano-indentation est de l'ordre de grandeur des cristaux du gel. Les mesures à cette échelle ne prennent peu ou pas en compte les défauts, les porosités, les microfissures et sont particulièrement impactées par l'orientation de la structure du gel.

D'après Moon et al. (2013), le module élastique est de 25 GPa pour un gel prélevé sur la paroi d'un barrage affecté par la RAS, par analyse spectroscopique Brillouin.

Pour le gel présent à l'interface pâte-granulat/dans la pâte de ciment, Leemann et Lura (2013) indiquent un module élastique allant jusqu'à 30 GPa. D'après ces auteurs, le module élastique du gel est plus grand quand le gel produit de la RAS se mélange avec le gel C-S-H produit de l'hydratation du ciment, à l'interface pâte-granulat et dans la pâte de ciment.

Pour un gel synthétisé peu dense (Phair et al., 2005), le module élastique varie de 4-8 GPa (peu de calcium) à 16-25 GPa (beaucoup de calcium). Le module élastique augmente lorsque le taux de calcium du gel augmente (Phair et al., 2005; Leemann et Lura, 2013; Zheng et al., 2016; Gholizadeh-Vayghan et al., 2019; Strack et al., 2020) et lorsque la densité du gel augmente (Phair et al., 2005; Moon et al., 2013).

Hu et al. (2018) notent que le module élastique du gel produit de la RAS est similaire au module élastique du gel C-S-H de la pâte de ciment produit de la réaction d'hydratation (Hu et Li, 2015), et que ce gel produit de la RAS pourrait avoir un effet non négligeable sur les propriétés mécaniques macroscopiques du béton.

A.3 Viscosité du gel

Le gel produit de la RAS migre dans le béton au cours du développement de la réaction. Il est donc nécessairement fluide et possède une certaine viscosité, qui semble évoluer au cours du temps : très fluide au début de la réaction, et se solidifiant au fur et à mesure de l'avancement de la réaction (Panesar et Gautam, 2016). La viscosité du gel évoluerait en fonction de sa composition chimique. Ainsi Gholizadeh-Vayghan et al. (2019) montrent que la viscosité et le module élastique du gel

diminuent lorsque la concentration en alcalis du gel augmente. À l'inverse, la viscosité et le module élastique du gel augmentent quand la concentration du gel en calcium augmente.

A.4 Regain partiel des propriétés mécaniques

Le gel produit par la RAS pourrait être responsable de l'amélioration partielle des propriétés mécaniques du béton par un effet de cicatrisation de l'endommagement provoqué par la RAS, constatée par différents auteurs. Notamment :

- L'augmentation légère du module d'élasticité après stabilisation de l'expansion après environ un an de développement de la RAS (Larive, 1997; Mohammed et al., 2003; Multon, 2003; Sargolzahi et al., 2010; Panesar et Gautam, 2016).
- Le comportement ductile en essai de flexion post-pic lors d'essais destructif (Rotter, 1996; Rotter et al., 1998; Giaccio et al., 2008; Miki et Tsukahara, 2016; Giaccio et al., 2019; Hayes et al., 2020) (voir section 2.5.6).

Panesar et Gautam (2016) postulent le mécanisme de regain des propriétés mécaniques suivant :

- Phase 1 (« Early stage ») : Le gel produit de la RAS est un fluide qui génère une pression de pore sur la microstructure. Cette pression peut permettre de résister aux chargements compressifs externes et masquer les pertes de résistance en compression, mais pas aux chargements en tension des essais de caractérisation. La pression de pore facilite encore plus l'ouverture de fissures des essais de traction.
- Phase 2 (« Later stage ») : Le gel produit de la RAS se solidifie et par action de pontage coule les fissures d'endommagement de la RAS. C'est un phénomène de cicatrisation. Le gel produit de la RAS se charge en calcium dans la pâte de ciment en réagissant avec la Portlandite et forme un complexe stable et de module élastique non négligeable qui améliore légèrement la microstructure endommagée du béton.

Ils postulent la transition entre les deux phases à un taux d'expansion longitudinale de 0,2%. Ces mécanismes peuvent expliquer le regain partiel de propriétés mécaniques sur le module de rupture et le module élastique constaté dans leur campagne expérimentale (Figure A.2).

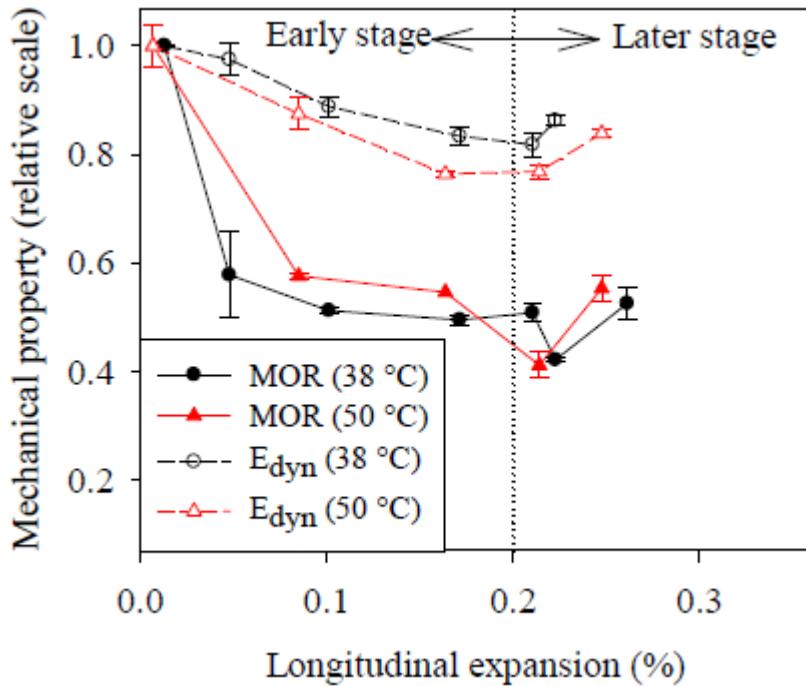


Figure A.2 : Évolution normalisée du module d'élasticité dynamique et du module de rupture en fonction de l'expansion (Panesar et Gautam, 2016)

ANNEXE B : SUIVI DES ESSAIS DE FENDAGE

Le suivi des essais de fendage est détaillé dans cette annexe, au Tableau B.1 pour les essais B76, et au Tableau B.2 pour les essais B38.

Tableau B.1 : Suivi et nomenclature des essais B76

Campagne	Ancienne identification	Ratio a/D	Nouvelle identification	Date de l'essai	Durée de l'acquisition transitoire DIC (s)	Essais exploitable ?	Commentaires
0Y	J1-2 B76-1	0,1	B76-0Y-WS01-1	04/10/2018	x	✓	
	J2 B76-5		B76-0Y-WS01-2	20/09/2018	x	x	Fissure double et déviant à 90°
	J1-2 B76-3		B76-0Y-WS01-3	27/09/2018	x	✓	
	J2 B76-4	0,5	B76-0Y-WS05-1	25/09/2018	x	✓	
	J1-2 B76-2		B76-0Y-WS05-2	02/10/2018	x	✓	
	J2 B76-6		B76-0Y-WS05-3	18/09/2018	x	✓	
2Y	B76-1	0,2	B76-2Y-WS02-1	30/07/2020	3600*	✓	
	B76-11		B76-2Y-WS02-2	22/07/2020	4200	✓	Déchargement au pic et rechargement
	B76-3		B76-2Y-WS02-3	16/07/2020	3600	✓	
	B76-10	0,5	B76-2Y-WS05-1	13/03/2020	3600	✓	
	B76-2		B76-2Y-WS05-2	20/02/2020	x	x	Endommagement pendant la manipulation
	B76-8		B76-2Y-WS05-3	28/07/2020	3600*	✓	

* Les deux faces du bloc ont été instrumentées pour appliquer le DIC

Tableau B.2 : Suivi et nomenclature des essais B38

Campagne	Ancienne identification	Ratio a/D	Nouvelle identification complète	Date de l'essai	Durée de l'acquisition transitoire DIC (s)	Essais exploitable ?	Commentaires
0Y	J1-2 B38-1	0,1	B38-0Y-WS01-1	24/07/2018	x	x	Fissure dévie à 90°
	J1-2 B38-5		B38-0Y-WS01-2	17/07/2018	x	x	Fissure dévie à 90°
	J1-2 B38-3		B38-0Y-WS01-3	25/07/2018	x	x	Fissure dévie à 90°
	J1-2 B38-4	0,5	B38-0Y-WS05-1	26/07/2018	x	✓	
	J1-2 B38-2		B38-0Y-WS05-2	20/07/2018	x	✓	
	J1-2 B38-6		B38-0Y-WS05-3	27/07/2018	x	✓	
2Y	B38-6	0,2	B38-2Y-WS02-1	18/08/2020	1800	x	Fissure dévie à 90°
	B38-8		B38-2Y-WS02-2	24/08/2020	1800	✓	
	B38-14		B38-2Y-WS02-3	26/08/2020	1800*	✓	
	B38-13	0,5	B38-2Y-WS05-1	17/08/2020	1800	✓	
	B38-5		B38-2Y-WS05-2	01/09/2020	1800	✓	
	B38-3		B38-2Y-WS05-3	03/09/2020	1800	✓	
2Y	B38c-6	0,2	B38c-2Y-WS02-1	20/08/2020	1800	✓	
	B38c-5		B38c-2Y-WS02-2	25/08/2020	1800	✓	
	B38c-3		B38c-2Y-WS02-3	27/08/2020	1800*	✓	
	J1-2 B38c-1	0,5	B38c-2Y-WS05-1	02/09/2020	3600	✓	
	B38c-1		B38c-2Y-WS05-2	19/08/2020	3600	✓	
	B38c-4		B38c-2Y-WS05-3	31/08/2020	1800*	✓	

* Les deux faces du bloc ont été instrumentées pour appliquer le DIC

L'identification des blocs est modifiée par rapport à Lemery (2018) par souci de clarté, pour que dans la nomenclature figure l'année de la campagne d'essai (0Y ou 2Y), le ratio a/D (WS01, WS02 ou WS05), et la réplication (1, 2 ou 3). Pour rappel, cette nomenclature est résumée à la Figure 3.4. Un des roulements s'est brisé au pic de chargement de l'essai B76-2YWS02-2 ce qui a contraint à décharger le spécimen, remplacer le roulement et recharger le spécimen. Une erreur de manipulation a endommagé gravement le spécimen B76-2Y-WS05-2, l'essai de fendage n'a donc pas été menée sur ce dernier. Enfin, les fissures de fendage d'un spécimen B76 et de quatre spécimens B38 ont dévié à 90° , ce qui rend leurs essais inexploitables (Figure B.1).



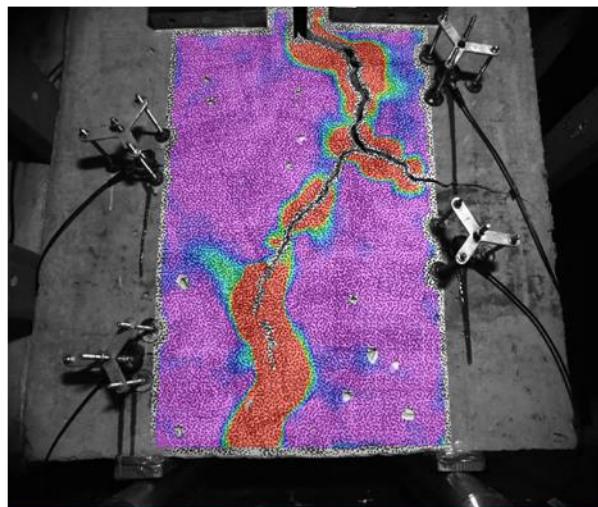
(a) B38-0Y-WS01-1



(b) B38-0Y-WS01-2



(c) B38-0Y-WS01-3



(d) B76-0Y-WS01-2

Figure B.1 : Exemples d'essais inexploitables

ANNEXE C : INCERTITUDES DE MESURES (DEMEC ET MICROMETRE DEMI-LUNE)

L'objectif de cette annexe est de quantifier l'incertitude associée aux mesures d'expansions ponctuelles et moyennes dans chaque direction et pour tous les types de spécimens pour les outils de mesures mécaniques. L'incertitude sur ces expansions dépend des incertitudes sur la variation de longueur et sur la longueur initiale.

La méthodologie adoptée pour calculer l'incertitude de mesure de l'extensomètre DEMEC (*DEmountable MEchanical strain gauge*) et du micromètre en demi-lune est similaire à celle employée par Larive (1997) dans son annexe 3 sur les mesures dimensionnelles. Bien que le fonctionnement mécanique des outils de mesure soit différent, le principe de calcul d'incertitude s'applique de manière similaire.

C.1 Incertitudes de mesures du DEMEC

L'extensomètre DEMEC est le principal outil de mesure utilisé dans ce projet pour mesurer l'expansion des spécimens. Pour rappel, un extensomètre DEMEC a une longueur fixée par une barre étalon de référence. La mesure brute affichée par un DEMEC est nommée ΔG_i et est par définition une différence entre une longueur réelle G_i et une longueur de référence E étalonnée avant chaque mesure :

$$\Delta G_i = G_i - E$$

Deux types de DEMEC sont utilisés : un DEMEC avec une longueur de référence de 200 mm, pour la plupart des mesures, et un DEMEC de longueur de référence 150 mm pour uniquement mesurer l'expansion dans une direction des blocs B38. Les incertitudes de lecture, de référence et de répétabilité seront déterminées, puis les incertitudes d'expansions sur les variations de longueur et sur l'expansion seront établies.

C.1.1 Incertitude constructeur

Les mesures sont faites en salle climatisée à $21 \pm 3^\circ C$. Ainsi l'effet de la température sur la mesure d'incertitude ne sera pas pris en compte.

Les principales sources d'incertitudes proviennent donc de :

- 1) L'incertitude de lecture :

Le DEMEC est à affichage numérique et de résolution $1 \mu m$, l'incertitude-type de lecture est $u_{lecture} = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0,29 \mu m$ (loi rectangulaire).

2) L'incertitude de référence indiquée par le constructeur :

Cette incertitude vaut $u_{ref} = 1 \mu m$.

Ainsi, l'incertitude-type constructeur est $u_{constr} = \sqrt{u_{lecture}^2 + u_{ref}^2} = 1,04 \mu m$.

C.1.2 Répétabilité des mesures

Idéalement, avant chaque mesure, l'outil est étalonné à la longueur de référence E . En condition d'utilisation recommandée par le constructeur (mesure réalisée à plat et à l'horizontale), l'outil ne s'écarte pas de la longueur de référence même après une dizaine de mesures. Par souci de gain de temps, l'étalonnage du DEMEC n'est ainsi réalisé qu'au début de la procédure de mesure d'un spécimen. Cependant, lorsque la mesure doit être réalisée dans une position différente de celle recommandée par le constructeur, par souci d'accessibilité ou, car techniquement contraignante, une attention particulière est portée à l'étalonnage entre les mesures. L'effet de la fréquence d'étalonnage est donc à considérer dans cette étude.

Aussi, l'extensomètre DEMEC est sensible à l'angle et la force appliquée par l'opérateur lors du maintien en position pour la mesure. Comme les cinq premières campagnes de mesures ont été réalisées par un premier opérateur, et les suivantes par l'auteur de ce mémoire : l'effet d'un changement d'opérateur devrait être considéré.

Ces deux problématiques sont quelque peu prises en compte dans le calcul de l'incertitude au travers des mesures de répétabilité :

- L'étalonnage de l'outil n'est spécifiquement réalisé qu'une fois avant chaque série de mesure de répétabilité (10 mesures) pour considérer le pire scénario où l'étalonnage n'est jamais fait entre les mesures d'un même spécimen.
- Une variation légère de l'angle et l'effort appliqué lors des mesures de répétabilité est effectuée pour reproduire l'effet d'un changement d'opérateur.

Les mesures de répétabilité sont réalisées sur la valeur affichée par le DEMEC (ΔG_i) en conditions de mesures réelles pour chaque type de spécimen (Tableau C.1). Ces mesures sont plutôt des

mesures hybrides entre répétabilité et reproductibilité, mais permettent une approche jugée suffisamment conservatrice pour déterminer des incertitudes de mesures.

Tableau C.1 : Mesure de répétabilité du DEMEC et du micromètre demi-lune pour les 3 types de spécimens

Mesure	Carotte B76-CAR-3 : Longueur LA-LB 200mm	Carotte B76-CAR-3 : Diamètre DA-DE 150mm	Bloc B38-16 : Longueur HA-HB 200mm	Bloc B76-3 Longueur HA-HB 200mm	Bloc B76-13 Longueur VG-VH 200mm
	mm	mm	mm	mm	mm
1	0,891	0,029	1,008	0,178	1,048
2	0,892	0,023	1,009	0,180	1,052
3	0,893	0,019	1,007	0,183	1,054
4	0,894	0,017	1,011	0,179	1,057
5	0,897	0,024	1,011	0,183	1,057
6	0,894	0,017	1,010	0,182	1,061
7	0,893	0,020	1,011	0,184	1,056
8	0,895	0,022	1,008	0,182	1,055
9	0,897	0,022	1,009	0,181	1,051
10	0,898	0,020	1,007	0,180	1,057
Moyenne	0,894	0,021	1,009	0,181	1,055
Ecart type	0,0023	0,0036	0,0016	0,0019	0,0037
Ecart min-max	0,0070	0,0120	0,0040	0,0060	0,0130

L'écart-type maximal est retenu soit $u_{répétabilité} = 3,7 \mu m$, ce qui est conservateur. Idéalement, une étude de reproductibilité des mesures entre les deux opérateurs du projet aurait été menée.

C.1.3 Incertitude sur une mesure brute

L'incertitude globale sur une mesure brute ΔG_i (valeur affichée par le DEMEC) est donc :

$$u_{\Delta G_i} = \sqrt{u_{répétabilité}^2 + 2 u_{constr}^2} = \sqrt{3,7^2 + 2 * (1,04)^2} = 4 \mu m.$$

L'incertitude-type constructeur intervient une fois lors de l'étalonnage et une fois lors de la mesure, d'où le facteur 2 devant u_{constr} .

C.1.4 Incertitude sur les mesures exploitées

Mesure ponctuelle de déplacement

La variation de longueur ponctuelle ΔL_i au jour j est calculée comme la différence entre la mesure brute au jour j et la mesure brute initiale soit :

$$\Delta L_i = \Delta G_i(jour\ j) - \Delta G_i(j = 0)$$

Les incertitudes des deux mesures brutes sont indépendantes et valent $u_{\Delta G_i}$ donc par propagation des incertitudes (composition des variances), l'incertitude-type sur une mesure ponctuelle ΔL_i est :

$$u_{\Delta L_i} = \sqrt{2u_{\Delta G_i}^2} = \sqrt{2 * (4)^2} = 5,7\ \mu m$$

Mesure moyenne de déplacement pour un spécimen

La variation de longueur moyenne ΔL pour un spécimen et dans une direction est calculée comme la moyenne des variations de longueur ponctuelles sur n mesures :

$$\Delta L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta L_i$$

Tous les ΔL_i sont indépendants, donc l'incertitude sur la variation de longueur moyenne est :

$$u_{\Delta L} = \frac{u_{\Delta L_i}}{\sqrt{n}}$$

Plus le nombre de mesures n augmente, plus l'incertitude globale sur la moyenne diminue. Le nombre de mesures n varie selon le type de spécimen et la direction de mesure. Il y a seulement deux nombres de mesures différents : 2 et 4. Le calcul de $u_{\Delta L}$ pour ces deux cas est réalisé au Tableau C.2.

Tableau C.2 : Calcul de l'incertitude sur la variation de longueur moyenne pour deux nombres de mesures (DEMEC)

Nombre de mesure n	$u_{\Delta L}$
2	$4\ \mu m$
4	$2,9\ \mu m$

Calcul de l'expansion

L'expansion (plus généralement la déformation) unidirectionnelle se calcule comme le rapport entre une variation de déplacement, normalisée par la longueur initiale (norme ASTM C157) :

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

L'incertitude sur l'expansion unidirectionnelle dépend donc de l'incertitude sur la variation de longueur et de l'incertitude sur la longueur initiale. Comme la longueur initiale est désormais considérée, il faut distinguer le DEMEC de longueur de référence 200mm et celui de longueur de référence 150mm. On différencie cette équation pour déterminer les coefficients de propagation des incertitudes :

$$d\epsilon = \frac{\partial \epsilon}{\partial (\Delta L)} d(\Delta L) + \frac{\partial \epsilon}{\partial L_0} dL_0 = \left(\frac{1}{L_0} \right) d(\Delta L) + \left(-\frac{\Delta L}{L_0^2} \right) dL_0$$

Ainsi, l'incertitude sur l'expansion unidirectionnelle est, d'après la règle de composition des variances :

$$u_\epsilon = \sqrt{\left(\frac{1}{L_0} \right)^2 u_{\Delta L}^2 + \left(\frac{\Delta L}{L_0} \cdot \frac{1}{L_0} \right)^2 u_{L_0}^2}$$

On approximera l'incertitude sur la longueur initiale à l'incertitude sur une mesure brute $u_{L_0} = u_{\Delta G_i}$, ne connaissant pas l'incertitude sur la longueur de l'étalement. De plus, pour être conservateur, on majore le facteur $\frac{\Delta L}{L_0}$ du coefficient de sensibilité de l'incertitude sur la longueur initiale par 0,5 %, valeur d'expansion qui n'est jamais atteinte par aucun des spécimens. Ainsi, on peut calculer l'incertitude sur une mesure ponctuelle d'expansion, et sur une mesure moyenne d'expansion.

Pour une mesure ponctuelle d'expansion unidirectionnelle

Ce calcul fait intervenir l'incertitude sur la variation de longueur ponctuelle $u_{\Delta L_i}$. Les incertitudes sont matérialisées sur les figures d'expansions par des incertitudes élargies (à $k = 1,96$) représentées par des barres d'erreurs, ce qui correspond à une probabilité de 95% d'encadrer la vraie valeur, sous réserve d'une distribution normale des résultats. Le résultat des calculs est présenté au Tableau C.3.

Tableau C.3 : Calcul de l'incertitude sur la mesure d'expansion ponctuelle (DEMEC)

Longueur initiale	200 mm	150 mm
Incertitude sur l'expansion u_{ϵ_i} ($\mu m/m$)	28,5	38,0
Incertitude sur l'expansion u_{ϵ_i} (%)	0,003	0,004
Incertitude élargie sur u_{ϵ_i} (%)	0,006	0,008

Le détail du calcul de l'incertitude u_{ϵ_i} pour la longueur initiale $L_0 = 200 \text{ mm}$ est donné :

$$u_{\epsilon_i} = \sqrt{\left(\frac{1}{200 * 10^{-3}}\right)^2 * 5,7^2 + \left(\frac{0,5}{100} * \frac{1}{200 * 10^{-3}}\right)^2 * 4^2} = 28,5 \mu m/m$$

Dans le calcul de l'incertitude sur l'expansion, l'incertitude introduite par la longueur initiale est négligeable (de quatre ordres de grandeur) par rapport à l'incertitude introduite par la variation de longueur.

Pour une mesure moyenne de l'expansion unidirectionnelle sur un spécimen

Ce calcul fait intervenir l'incertitude sur la variation de longueur moyenne $u_{\Delta L}$. Il faut donc prendre en compte le nombre de mesures n qui diffère selon le type de spécimen et la direction. L'unique direction nécessitant le DEMEC de longueur 150mm comporte $n = 2$ mesures, pour le bloc B38.

Il y a donc trois cas, présentés au Tableau C.4.

Tableau C.4 : Calcul de l'incertitude sur la mesure d'expansion moyenne pour un spécimen (DEMEC)

Longueur initiale	200 mm		150 mm
Nombre de mesure n	2	4	2
Incertitude sur l'expansion u_ϵ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	20,0	14,5	26,7
Incertitude sur l'expansion u_ϵ (%)	0,002	0,0015	0,0027
Incertitude élargie sur u_ϵ (%)	0,004	0,003	0,0054

Pour une mesure moyenne de l'expansion unidirectionnelle sur plusieurs spécimens

L'hétérogénéité de la RAS provoque des expansions radicalement différentes entre des spécimens de la même coulée et exposé aux mêmes conditions d'accélération. C'est pourquoi le calcul d'incertitude sur l'expansion moyenne entre plusieurs spécimens n'a pas grand intérêt. Car plus le nombre de mesures n augmente, plus l'incertitude sur l'expansion va diminuer, ce qui ne retranscrit pas le comportement hautement hétérogène de la RAS. On illustrera cette hétérogénéité en traçant les fuseaux d'expansions maximales et minimales rencontrés sur les séries de spécimens supposés identiques.

C.2 Incertitudes de mesures du micromètre demi-lune

Le micromètre demi-lune n'est utilisé que pour la mesure de l'expansion transversale des carottes 150*300 mm avec une longueur de référence de 150 mm. Et le nombre de mesures par spécimen est de $n = 4$. Bien que le fonctionnement mécanique diffère entre l'extensomètre DEMEC et le micromètre demi-lune, l'utilisation d'un système d'étalonnage est commune et le principe de calcul d'incertitude est identique. Puisque la résolution de l'affichage numérique et l'incertitude de référence du micromètre demi-lune sont identiques au DEMEC, et que la mesure de répétabilité indique $u_{répétabilité} = 3,6 \mu\text{m}$ (que l'on peut arrondir de manière conservatrice à la même valeur que le DEMEC soit $u_{répétabilité} = 3,7 \mu\text{m}$), la démarche de calcul et les applications numériques sont sensiblement les mêmes que pour le DEMEC.

L'incertitude sur la mesure ponctuelle de l'expansion transversale est alors identique $u_{\epsilon_i} = 0,004 \%$ et l'incertitude sur la mesure moyenne de l'expansion transversale pour un spécimen ($n = 4$ mesures) est :

$$u_{\epsilon} = \sqrt{\left(\frac{1}{150 * 10^{-3}}\right)^2 * 2,9^2 + \left(\frac{0,5}{100} * \frac{1}{150 * 10^{-3}}\right)^2 * 4^2} = 19,3 \mu\text{m}/\text{m}$$

Soit $u_{\epsilon} = 0,002 \%$. On néglige le fait que le diamètre réel de carotte sujette à la RAS est de $150 - 2 * 9,525 = 131 \text{ mm}$ au niveau des plots de mesures (en retirant la longueur des plots de mesure en acier noyés dans la carotte $L_{plot} = 9,525 \text{ mm}$). Faire cette approximation sous-estime les incertitudes ponctuelles et moyennes d'environ $3 \mu\text{m}/\text{m}$, ce qui est négligeable.

Ainsi, l'incertitude élargie (à $k = 1,96$) sur la mesure ponctuelle d'expansion transversale est de $0,004 \%$ et l'incertitude élargie sur la mesure moyenne d'expansion transversale est de $0,008 \%$.

C.3 Incertitude sur l'expansion volumétrique

L'expansion volumétrique se calcule différemment selon que le spécimen est une carotte ou un bloc (prisme). Le calcul d'incertitude sur l'expansion volumétrique diffère donc de même.

C.3.1 Calcul pour les carottes

On démontre la formule usuelle utilisée pour déterminer l'expansion volumétrique d'un cylindre.

Soit le volume V d'un cylindre de diamètre D et de longueur L :

$$V = \frac{L\pi D^2}{4}$$

Si l'on fait l'hypothèse de petites déformations, c'est-à-dire que le cylindre déformé restera cylindrique, et qu'on néglige le phénomène d'anisotropie de gonflement lié à la RAS, la variation de volume s'écrit :

$$dV = \frac{\partial V}{\partial L} dL + \frac{\partial V}{\partial D} dD = \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) dL + 2 \left(\frac{L\pi D}{4}\right) dD$$

En divisant par le volume pour obtenir la variation de volume relative :

$$\frac{dV}{V} = \frac{dL}{L} + 2 \frac{dD}{D}$$

En posant $\epsilon_v = \frac{dV}{V}$, $\epsilon_{long} = \frac{dL}{L}$ et $\epsilon_{transv} = \frac{dD}{D}$, on retrouve la formule usuelle de l'expansion volumétrique pour un cylindre, communément utilisée par de nombreux auteurs dans le cadre d'expansions causées par la RAS (Larive, 1997; Abd-Elssamad et al., 2020) :

$$\epsilon_v = \epsilon_{long} + 2\epsilon_{transv}$$

La composition des variances permet de déterminer l'incertitude sur l'expansion volumétrique à partir des incertitudes sur les deux expansions unidirectionnelles (longitudinales et transversales) :

$$u_{\epsilon_v} = \sqrt{u_{\epsilon_{long}}^2 + 2^2 u_{\epsilon_{transv}}^2}$$

L'application numérique pour les carottes 150*300 mm est :

$$u_{\epsilon_v} = \sqrt{(0,0015)^2 + 4 * (0,002)^2} = 0,0043 \%$$

L'incertitude élargie (à $k = 1,96$) sur l'expansion volumétrique moyenne pour une carotte est donc de 0,0083 %.

C.3.2 Calcul pour les blocs

L'expansion volumétrique d'un prisme se détermine en sommant les expansions dans les trois directions orthogonales de l'espace :

$$\epsilon_v = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$$

Ainsi, la composition des variances permet de déterminer l'incertitude sur l'expansion volumétrique à partir des incertitudes sur les trois expansions unidirectionnelles :

$$u_{\epsilon_v} = \sqrt{u_{\epsilon_x}^2 + u_{\epsilon_y}^2 + u_{\epsilon_z}^2}$$

Pour les petits blocs 300*300*200mm, l'application numérique est :

$$u_{\epsilon_v} = \sqrt{(0,002)^2 + (0,002)^2 + (0,0027)^2} = 0,0039 \%$$

L'incertitude élargie sur l'expansion volumétrique moyenne pour un petit bloc est donc de 0,0077 %.

Pour les gros blocs 600*600*400mm, l'application numérique donne :

$$u_{\epsilon_v} = \sqrt{(0,0015)^2 + (0,0015)^2 + (0,002)^2} = 0,0029 \%$$

L'incertitude élargie sur l'expansion volumétrique moyenne pour un gros bloc est donc de 0,0057 %.

C.4 Bilan

Les incertitudes globales sur les expansions unidirectionnelles et volumétriques des trois types de spécimens sont résumées au Tableau C.5.

Tableau C.5 : Résumé des incertitudes d'expansions pour tous les types de spécimens et toutes les directions (DEMEC et micromètre demi-lune)

Type de spécimen	Carotte 150*300mm		Bloc 300*300*200mm			Bloc 600*600*400mm		
Direction	ϵ_{long}	ϵ_{transv}	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z
Incertitude sur l'expansion unidirectionnelle ponctuelle (%)	0,003	0,004	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003
Nombre de mesure n	4	4	2	2	2	4	4	2
Incertitude sur l'expansion unidirectionnelle moyenne pour un spécimen (%)	0,0015	0,002	0,002	0,002	0,0027	0,0015	0,0015	0,002
Incertitude sur l'expansion volumétrique moyenne pour un spécimen (%)	0,0043		0,0039			0,0029		

ANNEXE D : INCERTITUDES DE MESURES (SCANNER)

Les incertitudes unidirectionnelles et volumétriques seront déterminées à partir des valeurs de performances volumétriques déterminées à la section 4.3.3 du chapitre 4. Puis la répétabilité des scans et des mesures dimensionnelles seront évaluées.

D.1 Incertitude sur l'expansion

Pour rappel, à la section 4.3.3 du chapitre 4, la notion de performance volumétrique avait été introduite. La suite de cette section se base sur les calculs menés dans cette section 4.3.3.

On reprend l'équation dérivée à l'annexe C permettant de calculer l'incertitude sur l'expansion unidirectionnelle :

$$u_\epsilon = \sqrt{\left(\frac{1}{L_0}\right)^2 u_{\Delta L}^2 + \left(\frac{\Delta L}{L_0} \cdot \frac{1}{L_0}\right)^2 u_{L_0}^2}$$

Bien que la performance volumétrique u_{va} se détermine à partir du volume de la pièce scannée, c'est une valeur en unité de longueur (mm) qui s'utilise comme une incertitude de mesure sur une distance L quelconque de la pièce : $L \pm u_{va}$ peu importe la valeur de L . Ainsi, l'incertitude sur la longueur initiale est $u_{L_0} = u_{va}$ et l'incertitude sur une mesure de variation de longueur $\Delta L = L - L_0$ est, d'après la composition des variances :

$$u_{\Delta L} = \sqrt{u_L^2 + u_{L_0}^2} = \sqrt{2u_{va}^2}$$

La méthodologie employée en post-traitement du scan dans ce projet implique que les mesures de variations de longueur sont ponctuelles : il n'y a pas différentes mesures effectuées puis moyennées pour réduire les incertitudes comme pour les mesures DEMEC. On considère toujours le même majorant conservateur sur l'expansion $\frac{\Delta L}{L_0}$ de 0,5 %, utilisé pour le calcul d'incertitude sur l'expansion du DEMEC. Ainsi, les incertitudes sur l'expansion de chaque type de spécimen et dans chaque direction sont résumées au Tableau D.1. Les incertitudes sur l'expansion volumétrique déterminées à partir des expansions unidirectionnelles sont calculées de la même manière qu'en annexe C.

Tableau D.1 : Résumé des incertitudes d’expansions pour tous les types de spécimens et toutes les directions (Scan)

Type de spécimen	Carotte 150*300mm		Bloc 300*300*200mm			Bloc 600*600*400mm		
Direction	ϵ_{long}	ϵ_{transv}	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z
Longueur L_0 (mm)	300	150	300		200	600		400
Incertitude sur l’expansion unidirectionnelle (%)	0,036	0,072	0,059		0,088	0,054		0,081
Incertitude sur l’expansion volumétrique calculée (%)	0,148		0,121		0,111			

Le calcul d’incertitude sur l’expansion longitudinale d’une carotte de longueur $L_0 = 300\text{ mm}$ est détaillé à titre d’exemple :

$$u_\epsilon = 100 * \sqrt{\left(\frac{1}{300}\right)^2 * 2 * (0,076)^2 + \left(\frac{0,5}{100} * \frac{1}{300}\right)^2 * 0,076^2} = 0,036\%$$

De manière similaire au calcul d’incertitude du DEMEC (annexe C), l’incertitude introduite par la longueur initiale est négligeable devant l’incertitude introduite par la variation de longueur.

Les incertitudes élargies sont calculées en multipliant chaque incertitude sur l’expansion par $k = 1,96$, ce qui correspond à une probabilité de 95% d’encadrer la vraie valeur, sous réserve d’une distribution normale des résultats. Ces incertitudes élargies apparaîtront sur les figures sous forme de barre d’erreur.

D.2 Répétabilité des scans

Il a été décidé d’évaluer pragmatiquement la répétabilité des scans et des mesures dimensionnelles qui en découlent, pour les carottes et pour les blocs B38.

D.2.1 Répétabilité des mesures dimensionnelles des carottes

Pour vérifier la répétabilité des mesures dimensionnelles des carottes, cinq scans consécutifs ont été réalisés par le même opérateur, dans les mêmes conditions, sur la carotte B76-CAR-3 à $t =$

738 *jours*. Les mesures longitudinales, transversales et volumétriques sont évaluées avec le protocole décrit à la section 4.3.1. Les résultats sont présentés au Tableau D.2.

Tableau D.2 : Répétabilité des mesures dimensionnelles des carottes

	Mesure longitudinale	Mesure transversale	Mesure volumétrique
	mm	mm	cm ³
Scan 1	300,125	149,746	5281,0
Scan 2	300,127	149,595	5270,6
Scan 3	300,184	149,672	5276,9
Scan 4	300,105	149,686	5276,1
Scan 5	300,150	149,646	5274,4
Moyenne	300,138	149,669	5275,8
Ecart type	0,030	0,055	3,8
Ecart max-min	0,079	0,151	10,4

Les écarts-types des mesures longitudinales et transversales sont inférieurs à la valeur de performance volumétrique de 0,076 mm calculée au Tableau 4.1, ce qui confirme que cette performance volumétrique est établie de manière conservatrice. La mesure longitudinale a un plus faible écart-type que la mesure transversale, ce qui suggère que la méthode d'obtention de l'expansion transversale en approximant le scan par un cylindre est moins répétable que la mesure longitudinale. Les écarts entre les valeurs maximum et minimum des mesures longitudinales et transversales sont plus grands que la performance volumétrique. Cela signifie que scanner une unique fois chaque spécimen par date de mesure n'est pas suffisant : il faut dans l'idéal scanner au moins trois fois le même spécimen pour obtenir des mesures dimensionnelles moyennes. Cependant, cette étude de répétabilité a été menée tardivement au cours du projet, et tous les scans réalisés n'ont été faits qu'une fois par spécimen et par date de mesure.

D.2.2 Répétabilité de la superposition des carottes

La répétabilité de la superposition des scans a aussi été vérifiée : les cinq scans de la carotte B76-CAR-3 à $t = 738 \text{ jours}$ ont été superposé au scan de référence à $t = 0 \text{ jours}$. Le protocole de superposition est celui décrit à la section 4.3.5.1 du chapitre 4. Les colorimétries des cinq superpositions sont observables à la Figure D.1 et les graphes de distribution des écarts des superpositions sont illustrés au Tableau D.3.

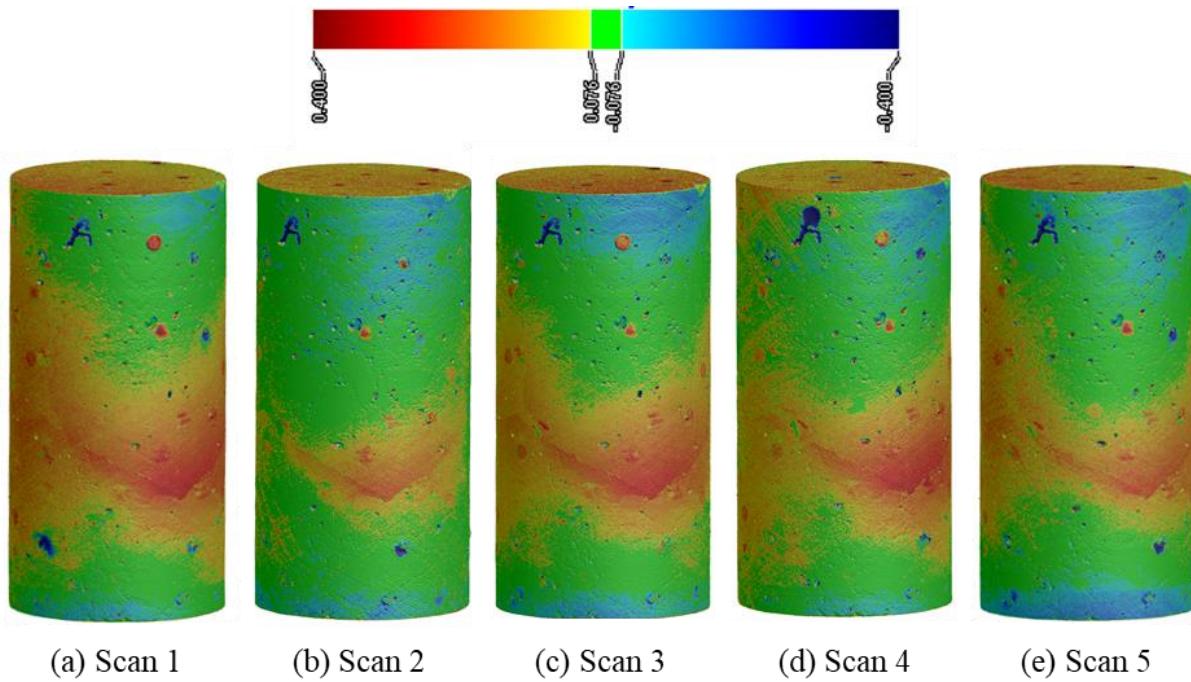
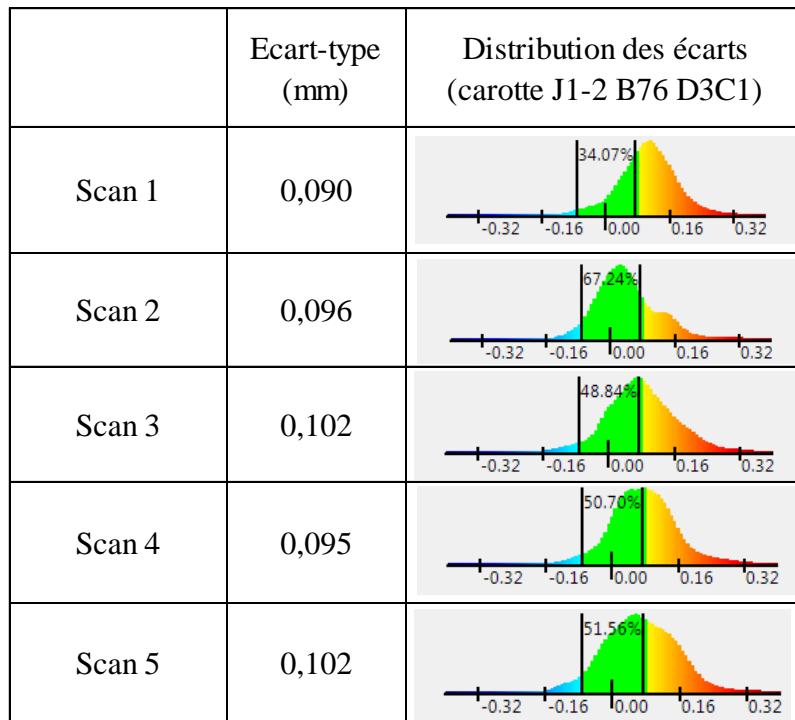


Figure D.1 : Superposition des cinq scans avec le scan de référence pour la carotte B76-CAR-3 à $t = 738$ jours

Le gonflement local du granulat est toujours observable, mais l'intensité de ce gonflement est qualitativement plus faible au scan n°2 de la Figure D.1 (b). Cette plus faible intensité de gonflement par rapport aux quatre autres superpositions se retrouve au Tableau D.2 où le diamètre du scan n°2 est significativement plus faible que les autres diamètres ainsi qu'au Tableau D.3, où le graphe de distribution des écarts du scan n°2 est significativement différent des autres graphes. C'est le graphe où le plus d'écarts se situent entre les bornes utilisateurs et où le pic de la distribution se situe entre ces bornes.

Hormis le scan n°2, les graphes de distribution des écarts des quatre autres superpositions sont similaires : les distributions s'apparent toutes à des distributions normales, et les pics des distributions sont situés vers $0,08\text{ mm}$, aux environs de la borne utilisateur supérieure correspond à la performance volumétrique du scan d'une carotte, ce qui indique une expansion volumétrique significative. Les informations tirées de la superposition des scans des carottes sont donc jugées répétables. Mais il convient de scanner au moins trois fois la carotte par date de mesure pour ne pas avoir pour unique scan à une date donnée un scan non représentatif de l'état de la carotte, comme c'est le cas ici avec le scan n°2.

Tableau D.3 : Répétabilité du graphe de distribution des écarts pour la carotte B76-CAR-3 à $t = 738 \text{ jours}$



D.2.3 Répétabilité des mesures dimensionnelles des blocs B38

De la même manière que pour les carottes, on souhaite vérifier la répétabilité des mesures dimensionnelles des blocs B38 : trois scans consécutifs ont été réalisés par le même opérateur, dans les mêmes conditions, sur le bloc B38-16 à $t = 638 \text{ jours}$. Les mesures de volume et selon les axes X, Y et Z sont évaluées avec le protocole décrit à la section 4.3.2 du chapitre 4. Les résultats sont présentés au Tableau D.4.

Tableau D.4 : Répétabilité des mesures dimensionnelles des blocs B38

	Mesure selon l'axe X mm	Mesure selon l'axe Y mm	Mesure selon l'axe Z mm	Mesure volumétrique cm ³
Scan 1	301,127	303,994	201,641	17890,6
Scan 2	300,861	303,929	201,789	17884,3
Scan 3	300,877	303,896	201,750	17880,5
Moyenne	300,955	303,940	201,727	17885,1
Ecart type	0,149	0,050	0,077	5,1
Ecart max-min	0,266	0,098	0,148	10,1

Les écarts types des mesures selon Y et Z sont inférieurs à la performance volumétrique de $0,125 \text{ mm}$ calculée au Tableau 4.1, alors que l'écart type de la mesure selon X est plus grand que cette performance volumétrique. Bien que conservatrice, la valeur de performance volumétrique représente bien l'incertitude de mesure des blocs B38, compte tenu des écarts importants de mesures dimensionnelles entre deux scans consécutifs du même spécimen. Encore une fois, il semble essentiel de scanner au moins trois fois les spécimens à chaque date de mesure.

D.2.4 Répétabilité de la superposition des blocs B38

Les trois scans du bloc B38-16 à $t = 638 \text{ jours}$ ont été superposé au scan de référence à $t = 0 \text{ jours}$. Les colorimétries des trois superpositions sont observables à la Figure D.2 et les graphes de distribution des écarts des superpositions sont illustrés au Tableau D.5.

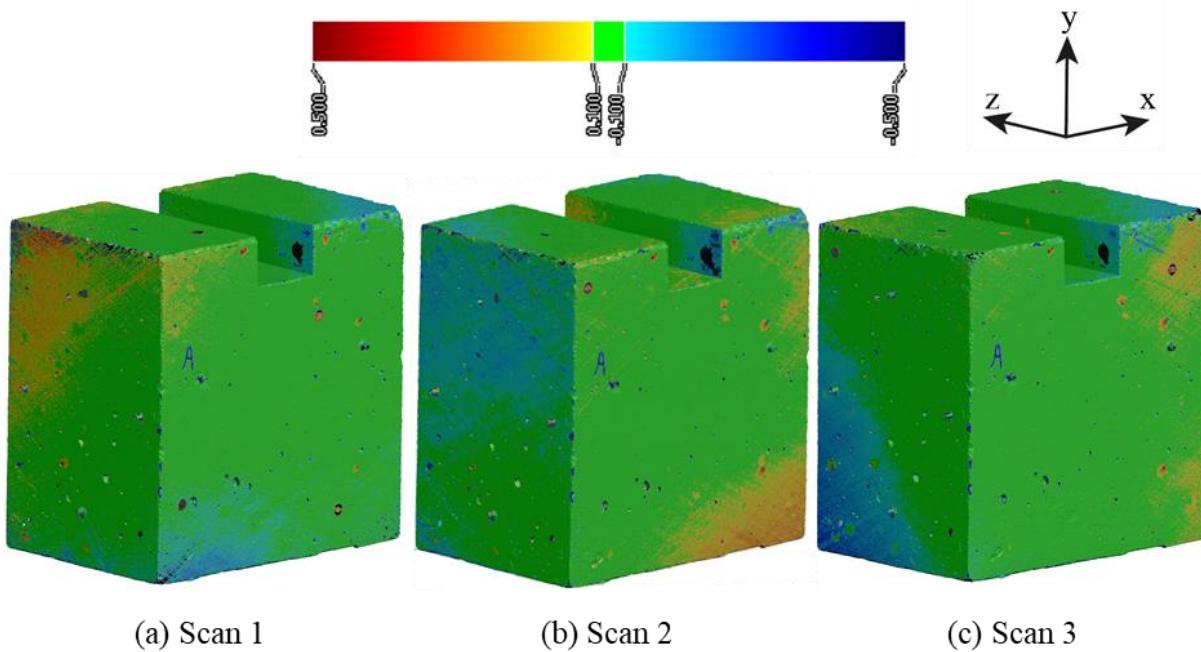


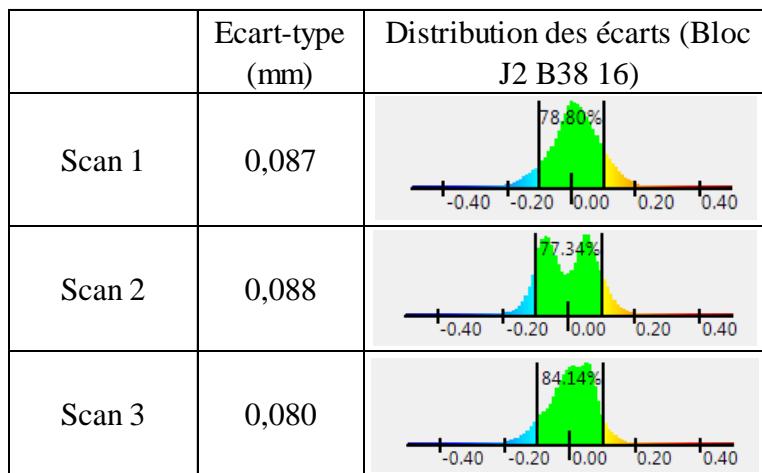
Figure D.2 : Superposition des trois scans avec le scan de référence pour le bloc B38-16 à $t = 638 \text{ jours}$

Les trois superpositions de la Figure D.2 sont similaires : une majorité de la colorimétrie est verte. La majorité des écarts entre les scans est donc comprise entre les bornes utilisateurs [-0,1 mm ; +0,1 mm], ce qui est inférieur à l'incertitude élargie liée à la performance volumétrique de $\pm 0,125 \text{ mm}$. C'est confirmé au Tableau D.5 par les trois distributions des écarts dont plus de 75% des écarts évalués sont compris entre les bornes utilisateurs.

Cependant, des zones scannées sont parfois rouges comme à la Figure D.2 (a) puis deviennent bleues comme à la Figure D.2 (b), ce qui traduit dans le premier cas une zone soumise à un gonflement, puis dans le deuxième cas une zone soumise à un retrait. Pourtant les deux scans sont réalisés consécutivement et superposés au même scan de référence. Ces zones sont délimitées de manière régulière comme si le plan de la face scannée avait été reconstruit avec un décalage angulaire. Ces zones ne sont donc pas à interpréter comme des zones de gonflement ou de retrait local, mais plutôt comme une erreur de scan du spécimen.

Enfin, on remarque que la distribution des écarts de la superposition du scan n°2 avec le scan de référence au Tableau D.5 a une forme particulière : c'est une somme de deux distributions normales de moyennes significativement différentes. Cette distribution particulière n'a pas d'explication physique et des scans réalisés avant (n°1) et après (n°3) ne confirment pas cette distribution, c'est donc probablement lié à une mauvaise acquisition du scan du spécimen.

Tableau D.5 : Répétabilité du graphe de distribution des écarts pour le bloc B38-16 à $t = 638$ jours



D.3 Conclusion

La méthode de calcul de l'incertitude de mesure du scan des spécimens est certes conservatrice, mais permet de pallier en partie au fait qu'un seul scan par spécimen et par date de mesure a été réalisé au cours de ce projet. En effet des essais tardifs de répétabilité des mesures dimensionnelles après plusieurs scans consécutifs révèlent la forte variabilité des mesures dimensionnelles qui peut avoir lieu entre deux scans consécutifs. Idéalement, il faut scanner au moins trois fois chaque spécimen par date de mesure pour moyenner cette variabilité.

Quant à la répétabilité de la superposition des scans et des graphes de distributions des écarts, celle-ci est satisfaisante pour les carottes et moins pour les blocs B38. Les superpositions de ces blocs illustrent parfois des incohérences tel que des zones soumises au gonflement dans un scan, et soumises au retrait dans un autre scan à la même date.

La répétabilité des mesures dimensionnelles et de superposition des scans n'a pas été évaluée pour les blocs B76, mais il est logique de s'attendre à ce que les écarts types soient encore plus importants et les superpositions encore moins répétables.

ANNEXE E : RECONSTRUCTION DES SCANS INCOMPLETS DES CAROTTES

Malheureusement, les premiers scans des carottes n'ont pas été réalisés adéquatement. En effet, les parties inférieures des carottes en contact avec le support n'ont pas été scannées. C'est un problème majeur, car cela empêche de mesurer l'expansion longitudinale de ces carottes. Particulièrement, la longueur initiale L_0 des carottes au temps initial avant la mise en confinement dans la chambre climatique n'est pas mesurable avec le même protocole que celui décrit au chapitre 4. C'est pourtant cette longueur L_0 qui sert de référence pour calculer l'expansion longitudinale aux dates suivantes : $\epsilon = \frac{L-L_0}{L_0}$. Il a donc été jugé essentiel d'obtenir cette mesure de L_0 le plus rigoureusement possible.

Un scan incomplet à une date donnée est reconstruit en fusionnant la partie inférieure d'un scan complet ultérieur avec ce scan incomplet. Un protocole de reconstruction est mis en place puis une étude de faisabilité est réalisée. La répétabilité du protocole est ensuite vérifiée lors de la reconstruction des scans incomplets.

E.1 Protocole de reconstruction

Le protocole de reconstruction adopté et applicable uniquement sous Vxmodel est le suivant :

Étape 1 : Prélèvement de la partie inférieure d'un scan complet

Un plan est créé à une certaine distance orthogonale à la face inférieure du scan (Figure E.1 (a)). La partie inférieure au plan est ensuite isolée du reste du scan avec l'outil « couper le maillage » (Figure E.1 (b)).

Étape 2 : Alignement du scan incomplet avec la partie prélevée du scan complet

Il faut désormais aligner le scan incomplet avec la partie prélevée du scan complet avant de les fusionner. Pour ce faire, l'outil « meilleur ajustement » dans le groupe d'outil « aligner » est utilisé en mode manuel. L'option d'alignement automatique de Vxmodel donne des alignements aberrants dans cette situation. Une dizaine de points est sélectionnée manuellement sur tout le périmètre d'un scan, et les mêmes points sont sélectionnés manuellement sur l'autre scan, en essayant à l'œil de faire correspondre le plus possible chaque paire de points, comme illustrée à la Figure E.1 (c)) Les

défauts et aspérités du scan sont utilisés comme repères visuels. L'alignement est validé qualitativement à l'œil.

Étape 3 : Fusion des scans

Une fois l'alignement réalisé, l'outil « fusionner maillages » est employé pour fusionner les deux scans, avec les options de lissage par défaut (5) et une « distance maxi » entre les triangles de 0,5 mm. Le scan final fusionné est illustré à la Figure E.1 (d).

E.2 Étude de faisabilité de la reconstruction

La faisabilité de ce protocole de reconstruction est vérifiée à partir de deux scans consécutifs de la même carotte B76-CAR-3 $t = 492$ jours après la mise en confinement : le premier scan est complet, et le deuxième est incomplet (il manque la partie en contact avec le support, de la même manière que les premiers scans incomplets). Les mesures longitudinales et volumétriques sont effectuées sur le scan complet et comparées à celles faites sur le scan reconstruit avec le protocole de reconstruction décrit précédemment. Deux essais ont été faits avec une hauteur de partie inférieure prélevée à l'étape 1 du protocole de 6 cm ou 2 cm (pour une hauteur totale de la carotte de 30 cm). Ces mesures sont indiquées au Tableau E.1.

Les différences entre la hauteur du scan complet et des deux scans reconstruits sont minimes : 0,019 mm pour le scan reconstruit avec une partie inférieure de 6 cm et 0,031 mm pour le scan reconstruit avec une partie inférieure de 2 cm. Ces valeurs sont inférieures à la performance volumétrique d'une carotte, calculée au Tableau 4.1 à 0,076 mm. Les mesures dimensionnelles et volumétriques faites sur un scan reconstruit sont donc jugées suffisamment proches d'un scan de référence complet.

Tableau E.1 : Comparaison des mesures longitudinales et volumétriques entre un scan complet et des scans incomplets reconstruits

B76-CAR-3 à $t = 492$ jours	Scan complet	Fusion du scan incomplet + partie inférieure de hauteur 6 cm	Fusion du scan incomplet + partie inférieure de hauteur 2 cm
Mesure longitudinale (mm)	300,152	300,133	300,121
Mesure volumétrique (cm^3)	5278,4	5278,0	5277,8

E.3 Reconstruction des scans incomplets

Le protocole de reconstruction est ensuite appliqué aux quatre scans de carottes incomplets : les scans à $t = 0$ jours et $t = 29$ jours des carottes B76-CAR-3 et B38-CAR-2. Pour l'étape 1 du protocole, la partie inférieure est prélevée sur le scan complet à $t = 169$ jours pour la carotte J1-2 B76 D3C1, et le scan complet à $t = 591$ jours pour la carotte J1-2 B38 D2C1. Ces dates de scans pour le prélèvement de la partie inférieure n'ont pas une grande importance, mais elles n'ont néanmoins pas été choisi au hasard : ce sont les dates où les graphes de distribution des écarts du Tableau 4.2 possèdent des distributions normales les plus entre les bornes utilisateurs [-0,076 mm ; +0,076 mm], ce qui signifie des expansions les plus négligeables possible.

La répétabilité de la reconstruction a été systématiquement vérifiée. En itérant la reconstruction suffisamment de fois pour que trois scans reconstruits aient des mesures longitudinales très similaires, comme illustré au Tableau E.2. Les écarts entre les reconstructions sont bien inférieurs à la performance volumétrique du scan d'une carotte (0,076 mm). Le protocole est jugé répétable et la mesure longitudinale de chaque scan est prise comme la moyenne des trois reconstructions du Tableau E.2.

Tableau E.2 : Répétabilité de la reconstruction des scans incomplets

Mesure longitudinale (mm)	B76-CAR-3 reconstruit à partir du scan à $t = 169 \text{ jours}$		B38-CAR-2 reconstruit à partir du scan à $t = 591 \text{ jours}$	
Date du scan incomplet	$t = 0 \text{ jours}$	$t = 29 \text{ jours}$	$t = 0 \text{ jours}$	$t = 29 \text{ jours}$
Reconstruction 1	299,837	299,904	299,679	299,907
Reconstruction 2	299,835	299,912	299,683	299,910
Reconstruction 3	299,835	299,912	299,722	299,909
Écart min-max	0,002	0,008	0,043	0,003

Cependant la reconstruction n'est pas parfaite. La Figure E.2 illustre deux exemples de superposition entre un scan complet et un scan reconstruit avec les distributions des écarts de superposition. Le scan complet est le scan de la carotte B76-CAR-3 à $t = 169 \text{ jours}$, et les deux scans incomplets sont deux reconstructions de la carotte B76-CAR-3 à $t = 29 \text{ jours}$. La variation de couleur qui correspond à une variation des écarts entre les deux scans est régulière et indique que les plans des faces ne sont pas rigoureusement parallèles. Bien que ce décalage angulaire de plan soit visuellement significatif (surtout pour la Figure E.1 (b)), l'écart entre les mesures longitudinales des deux scans reconstruits n'est que de $0,008 \text{ mm}$ et la différence entre les deux distributions des écarts de superposition à l'échelle du scan entier est négligeable. Le scan reconstruit de la Figure E.1 (a) est typiquement choisi pour effectuer les superpositions de la section 4.3.5.3 du chapitre 4.

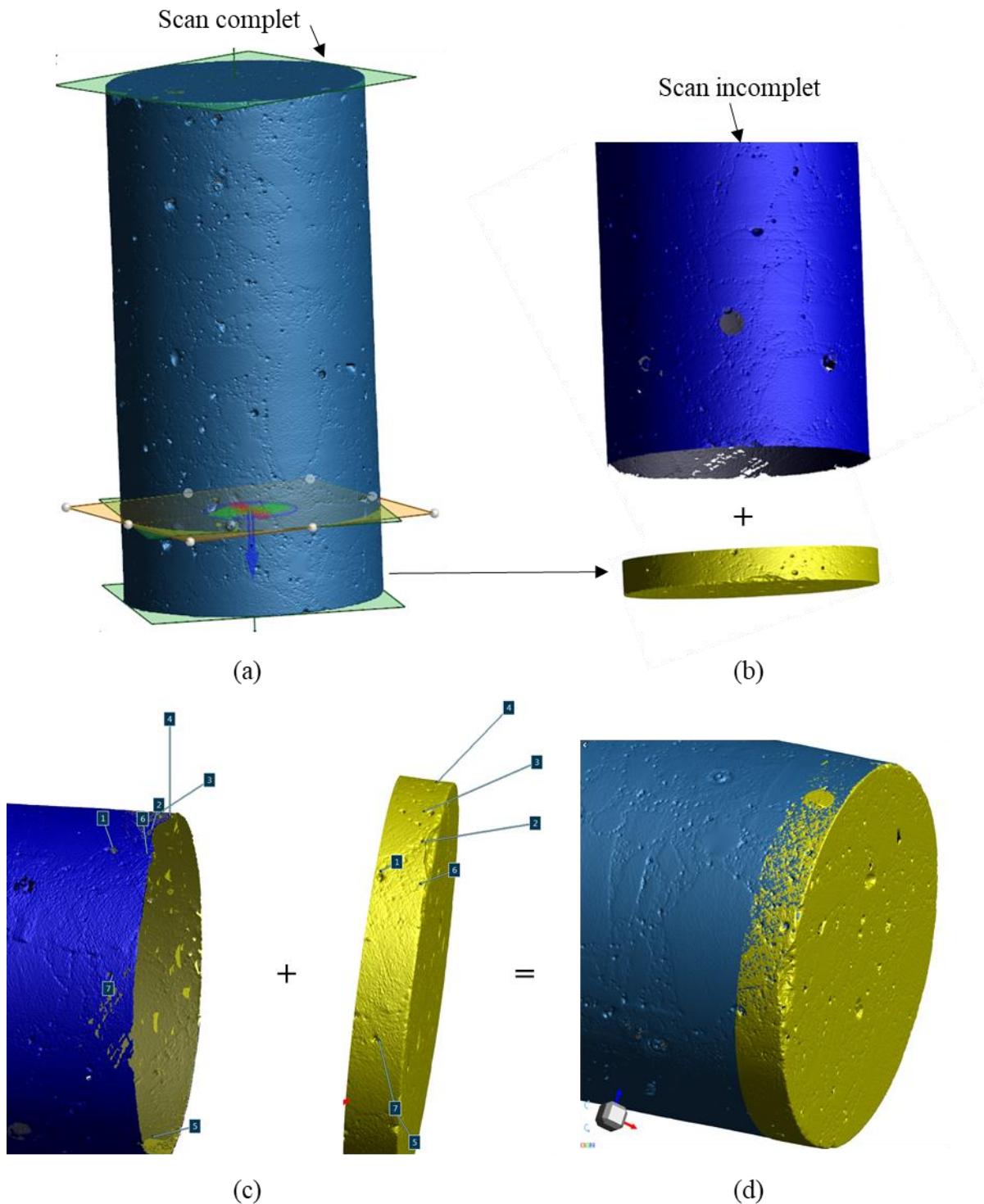


Figure E.1 : Protocole de reconstruction de la partie inférieure d'un scan incomplet de carotte

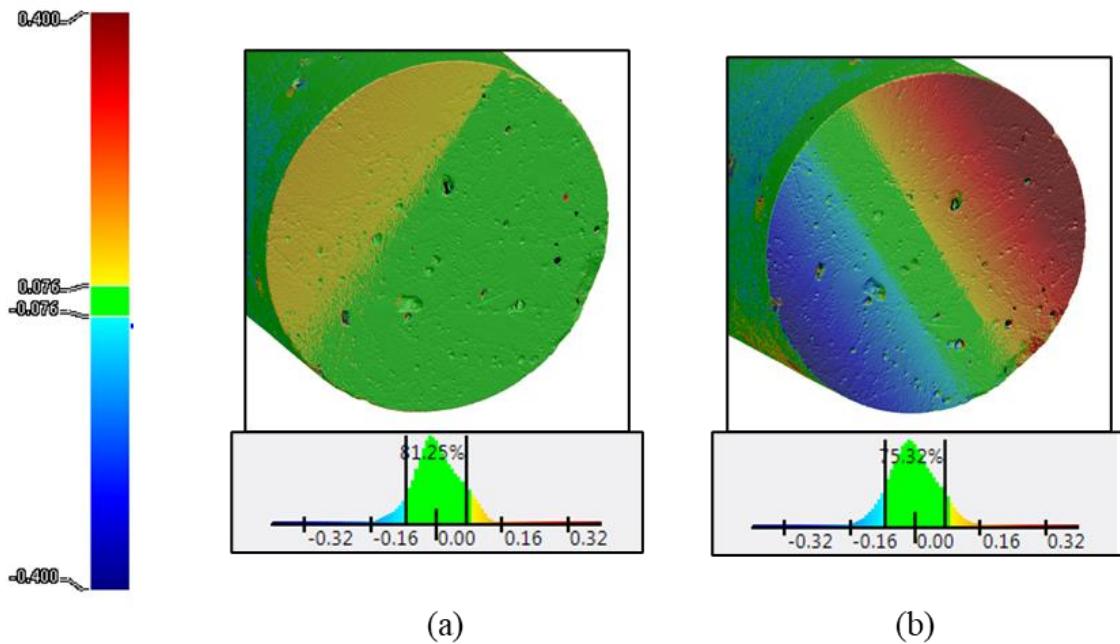


Figure E.2 : Deux exemples de superposition entre un scan complet et un scan reconstruit avec les distributions des écarts de superposition sur la totalité des scans

ANNEXE F : OBSERVATION DE L'EFFET DU SCIAGE DE BLOCS B38 AVEC LE SCANNER 3D

Les essais de fendage nécessitent d'entailler les spécimens pour amorcer la fissuration de l'essai de caractérisation de manière contrôlée. Cette entaille est souvent réalisée en sciant le spécimen. Dans un contexte tout autre, le sciage d'une partie d'un ouvrage hydraulique est communément réalisé en pratique pour relâcher les contraintes d'expansions causées par la RAS. L'opportunité s'est donc présentée au cours de ce projet de quantifier l'effet du sciage d'un spécimen de béton sur les déformations volumétriques provoquées par la RAS, en utilisant la technologie de scan laser 3D.

L'objectif est surtout de voir si la technologie de scan 3D permet une telle observation, et si celle-ci a un sens physique. L'étude porte sur deux blocs B38 retirés de la chambre climatique à $t = 609$ jours pour être testés en fendage. Les blocs sont scannés à $t = 616$ jours une heure avant d'être sciés, puis scannés une nouvelle fois à $t = 618$ jours une fois le sciage effectué, les deux scans sont réalisés dans un environnement de température et d'humidité contrôlé identique. Les mesures dimensionnelles des blocs sont réalisées suivant le protocole décrit à la section 4.3.2 du chapitre 4 et sont inscrites au Tableau F.1. Les superpositions des scans avant et après sciage sont illustrées à la Figure F.1, ainsi que les graphes de distribution des écarts associés.

Bloc B38-2Y-WS05-2

Ce bloc ne montre aucun signe extérieur de développement avancé de la RAS, i.e. pas de fissuration visible à l'œil nu ni d'exsudation de gel. Les mesures dimensionnelles indiquent une expansion significative uniquement dans la direction X. En effet l'écart de mesure entre les faces est de 0,292 mm, soit bien plus grand que la valeur de la performance volumétrique d'un bloc B38 calculée au Tableau 4.1 de 0,125 mm. C'est une expansion cohérente : le bloc peut s'être relâché dans l'axe normal (axe X) au plan de sciage. Cependant la colorimétrie de la Figure F.1 (a) montre des faces avec des signes typiques d'une mauvaise acquisition du spécimen : des zones rouges, vertes puis bleus délimitées régulièrement, indiquant probablement un décalage angulaire du plan de la face. De plus le graphe de distribution des écarts entre les scans avant et après sciage suggère une distribution normale entre les bornes utilisateurs [-0,1 mm ; +0,1 mm], ce qui indique une expansion volumétrique négligeable.

Bloc B38-2Y-WS05-2

Ce bloc était sans doute, à date de mesure, le spécimen exhibant le plus de signes externes liés à la RAS : fissuration prononcée et quantité importante de gel exsudant de ces fissures. Les mesures dimensionnelles indiquent des expansions significatives selon Y et Z et un retrait selon X, soit une configuration d'expansion parfaitement opposée au premier bloc J2 B38 5. Ces expansions selon Y et Z n'ont pas à priori lieu d'être, et les colorimétries de la Figure F.1 (b) semblent suggérer une mauvaise acquisition des scans. La distribution des écarts associée se distingue par deux pics, un entre les bornes [-0,1 mm ; +0,1 mm] et l'autre en dehors de ces bornes vers des valeurs d'expansions significatives : ce comportement ne semble pas avoir de raison physique et confirme la mauvaise acquisition des scans.

Tableau F.1 : Mesures dimensionnelles avant et après le sciage de deux blocs B38

		Mesure selon l'axe X	Mesure selon l'axe Y	Mesure selon l'axe Z
		mm	mm	mm
B38-2Y-WS05-2	Avant sciage	299,330	307,410	201,403
	Après sciage	299,622	307,430	201,399
	Ecart	0,292	0,020	-0,004
B38c-2Y-WS05-3	Avant sciage	303,472	300,612	200,460
	Après sciage	303,319	300,968	200,725
	Ecart	-0,153	0,356	0,265

Conclusion

La technologie de scan 3D ne semble pas permettre d'observer et de quantifier un quelconque effet volumétrique du sciage d'un spécimen de béton dans les conditions présentées ci-dessus. Une campagne d'essai plus conséquente est recommandée, avec des scans répétés au moins trois fois pour distinguer les mauvaises acquisitions des phénomènes physiques.

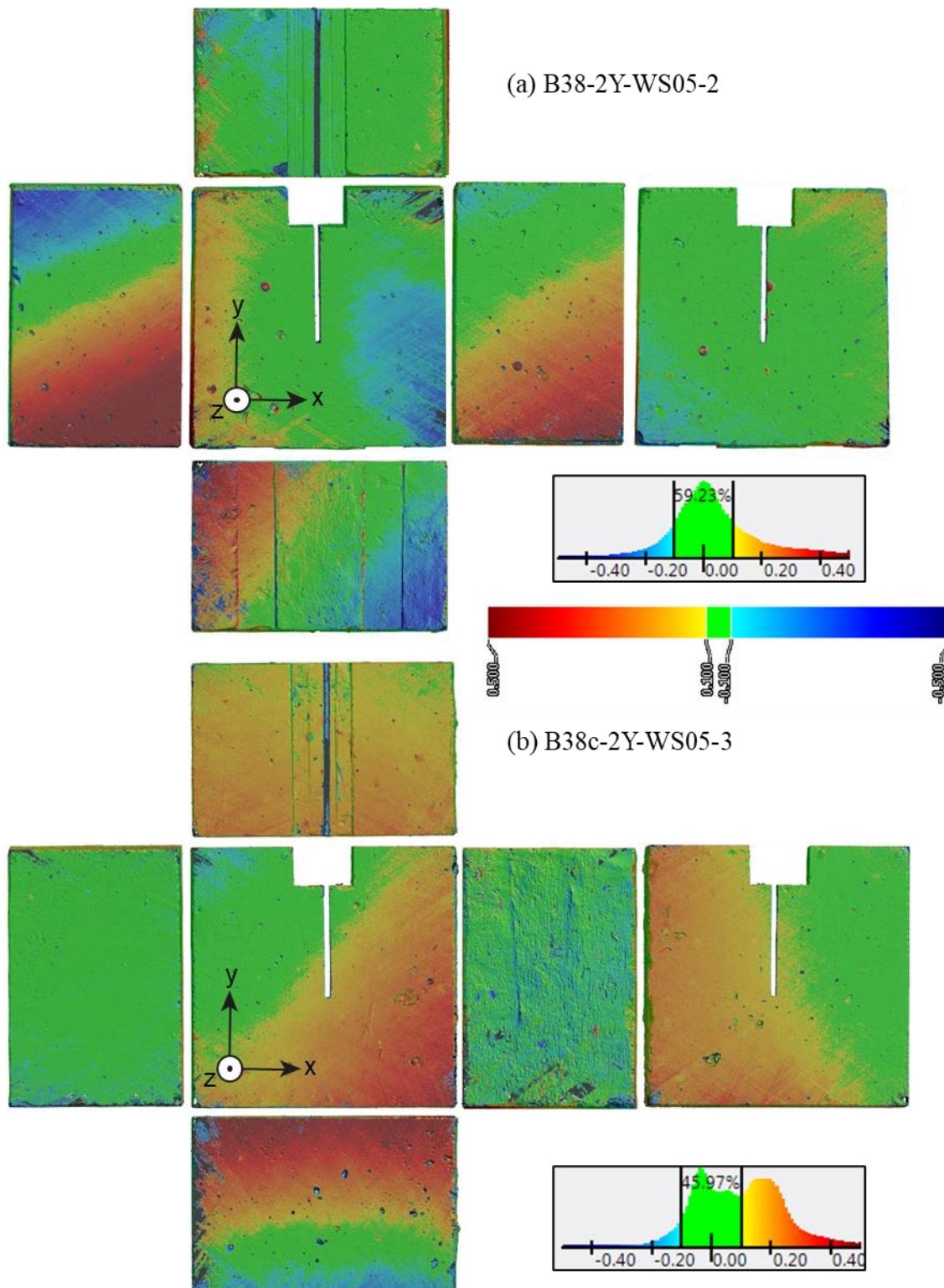


Figure F.1 : Colorimétries des superpositions des scans avant sciage et après sciage et graphes de distribution des écarts associés

ANNEXE G : SUPERPOSITION DES SCANS DES BLOCS

Le protocole de superposition des scans, détaillé à la section 4.3.5.1 du chapitre 4, est appliqué dans cette annexe aux blocs B38-16 et B76-13. Les colorimétries des superpositions du bloc B38 à différents âges sont illustrées à la Figure G.1, et les colorimétries des superpositions du bloc B76 sont illustrées à la Figure G.2. Les graphes de distribution des écarts des superpositions sont compilés pour les deux spécimens au Tableau G.1.

Tel qu'expliqué à la section du chapitre 4, plus un spécimen scanné est de grande dimension, plus la performance volumétrique du scan est grande et moins bonne est la précision. Ajoutant à cela l'utilisation parfois inadéquate de la technologie par l'opérateur, les scans des blocs B38 et B76 ne sont pas suffisamment précis pour détecter la faible expansion RAS mesurée au DEMEC. Cette mauvaise précision s'illustre par des zones de superpositions de scans parfois bleues (retrait), vertes (expansion négligeable) ou rouges (forte expansion) suivant la date de mesure, et jamais localisées au même endroit. Les graphes de distribution des écarts associés sont eux aussi pour la plupart aberrants.

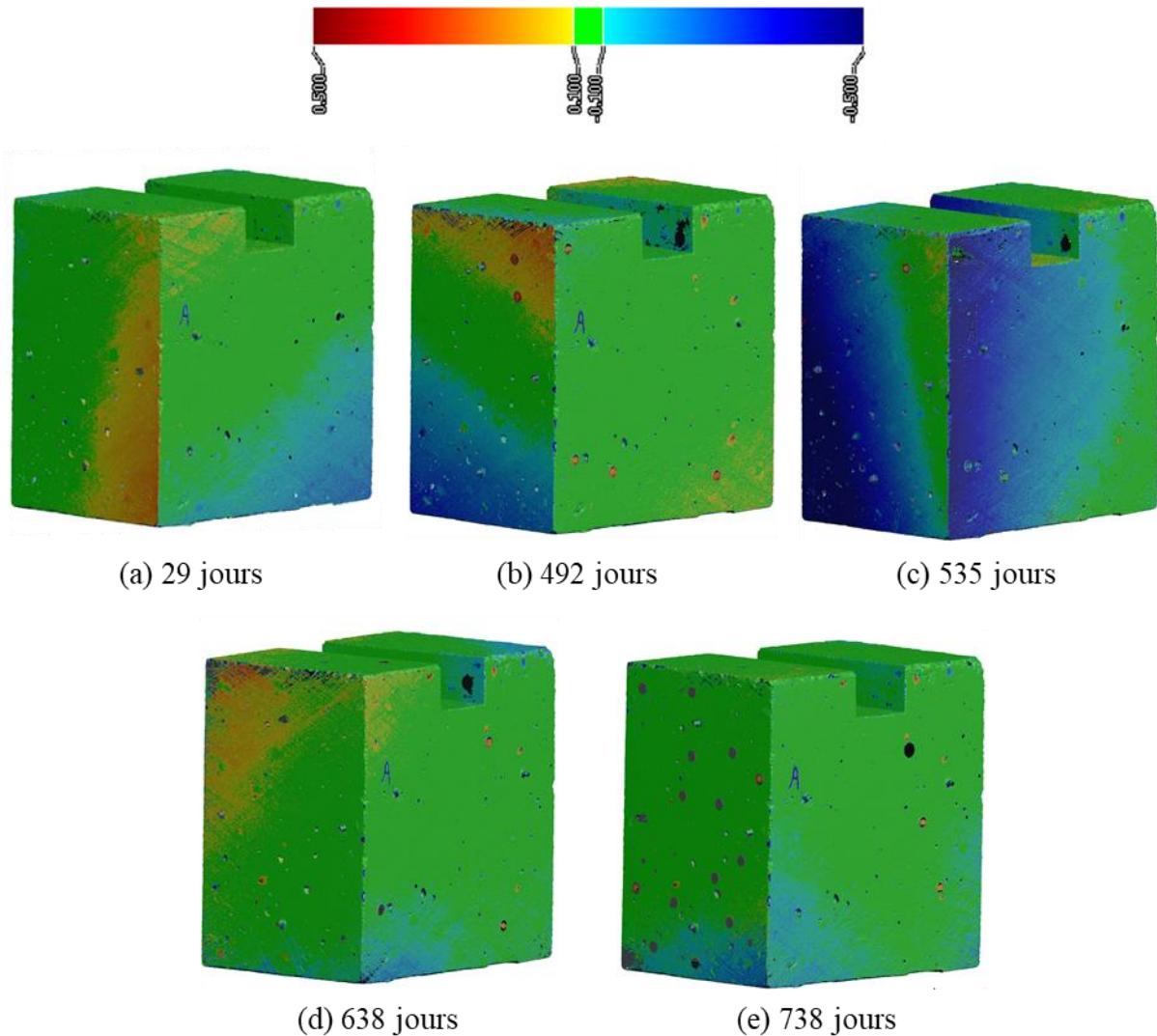


Figure G.1 : Superposition des scans du bloc B38-16 à différents âges avec le scan de référence

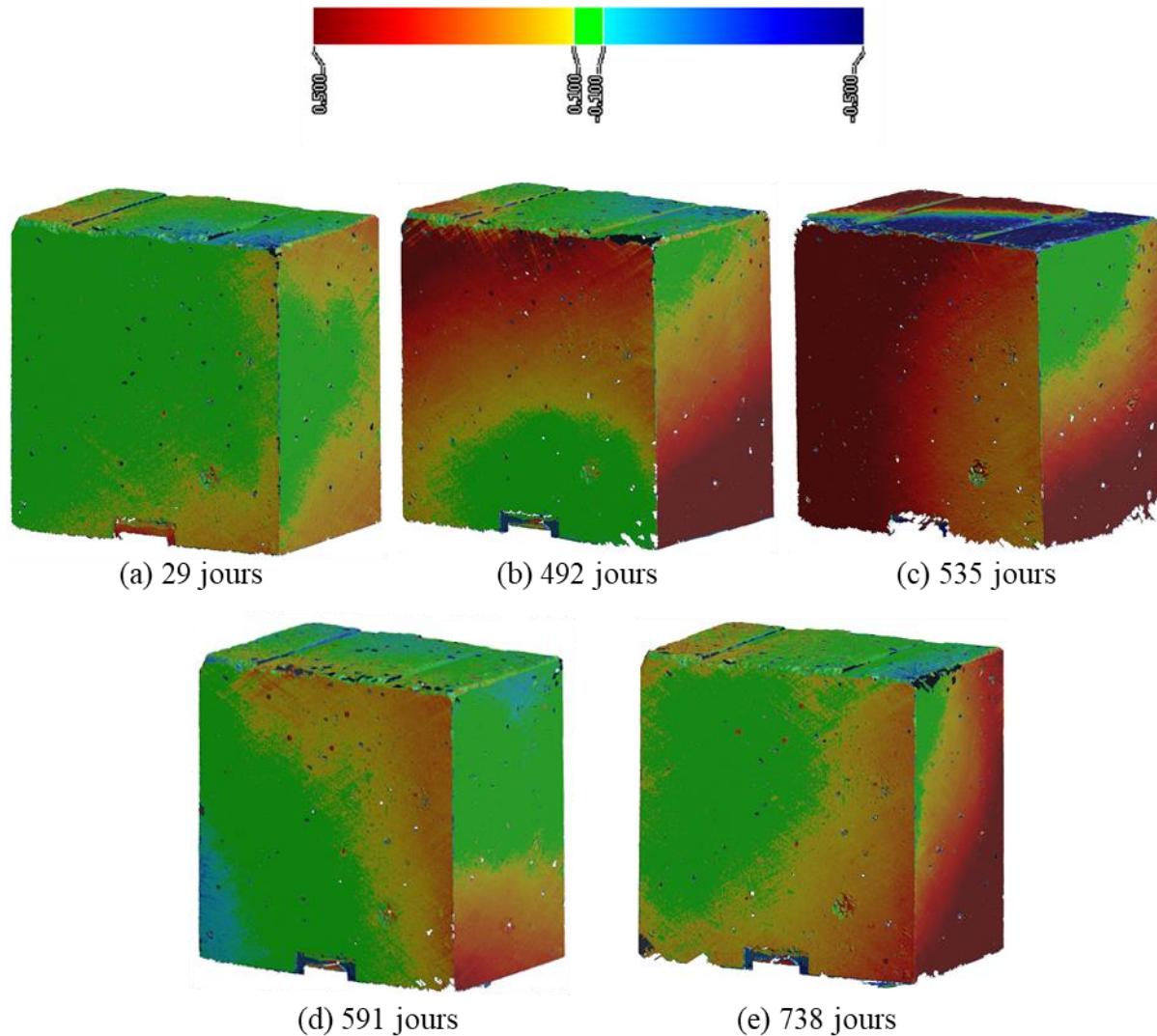


Figure G.2 : Superposition des scans du bloc B76-13 à différents âges avec le scan de référence

Tableau G.1 : Graphes de distribution des écarts entre les scans superposés du bloc B38 et du bloc B76

