

Titre: Évaluation du coefficient d'orientation dans les bétons renforcés de fibres métalliques
Title: Evaluation of the orientation coefficient in fiber-reinforced concrete

Auteur: Sébastien Delsol
Author:

Date: 2012

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Delsol, S. (2012). Évaluation du coefficient d'orientation dans les bétons renforcés de fibres métalliques [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal].
Citation: PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/811/>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/811/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Jean-Philippe Charron
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉVALUATION DU COEFFICIENT D'ORIENTATION DANS LES BÉTONS
RENFORCÉS DE FIBRES MÉTALLIQUES

SÉBASTIEN DELSOL

DÉPARTEMENT DESGÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)

AVRIL 2012

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉVALUATION DU COEFFICIENT D'ORIENTATION DANS LES BÉTONS
RENFORCÉS DE FIBRES MÉTALLIQUES

Présenté par :DELSOL Sébastien

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

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

M. MASSICOTTE Bruno, Ph. D., président

M. CHARRON Jean-Philippe, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. LATASTE Jean-François, Ph. D., membre

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier mon directeur de recherche, Jean-Philippe Charron, pour son soutien et pour ses conseils qu'il m'a accordés tout au long de ce projet.

Je souhaite également remercier l'École de Mines d'Albi-Carmaux et le ministère français de l'Industrie pour m'avoir permis de réaliser ce double diplôme et pour avoir accepté ma réorientation.

Merci à toute l'équipe du laboratoire des structures et plus particulièrement à Cédric Androuët qui n'a conseillé et fait partagé son expérience tout au long du projet. Un grand merci également à Manon Leduc pour m'avoir laissé utiliser les équipements du génie géologique.

Je remercie également mes collègues de bureau et plus particulièrement, Clélia, Matthew, Marc-André, Fabien pour nos discussions, leurs conseils et l'ambiance de travail.

Enfin je remercie ma famille qui a su accepter mon choix de partir outre-Atlantique.

Résumé

Les bétons fibrés à ultra-haute performance(BFUP) offrent des propriétés mécaniques et de durabilité exceptionnelles. Cependant les difficultés rencontrées pour prédire leur comportement en traction directe ainsi que leur coût élevé limitent leur utilisation par le secteur industriel. L'orientation, la densité, la distribution des fibres sont autant de facteurs qui peuvent influencer leur comportement. Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont pour but de proposer une méthodologie pour prédire le comportement mécanique de poutres en BFUP sur la base du coefficient des fibres.

Dans un premier temps un algorithme de détection et de mesure automatique de l'angle d'inclinaison des fibres a été développé sur la plateforme Matlab®. Ce programme a été utilisé pour l'analyse des spécimens produits dans les programmes expérimentaux de ce projet.

Par la suite, un premier programme expérimental sur des spécimens de traction directe avec des angles d'inclinaison de fibres connus a été réalisé. Une méthode de coulée à l'aide de séparateurs a été utilisée pour la fabrication de ces spécimens. Ces essais ont permis de mettre en évidence que l'orientation des fibres pouvait réduire de 60 % la résistance en traction relevée ainsi que de 95 % la longueur de la phase écrouissante. L'orientation des fibres semble donc être le facteur prédominant dans la détermination de la loi de comportement en traction du BFUP. À partir de ces essais un système d'équations permettant de prédire le comportement en traction directe des BFUP en fonction de l'orientation des fibres a été développé.

Un deuxième programme expérimental sur des poutres en flexion a permis d'étudier les effets de bords sur l'orientation des fibres. Le carottage de ces poutres a mis en évidence que la présence d'armatures longitudinales conventionnelles ne perturbe pas l'orientation des fibres sous ou dans l'axe du renforcement. Cependant, la présence de chaises perturbe de façon importante l'écoulement et donc l'orientation des fibres. Ces essais de flexion ont par la suite servi à valider les calculs pour éléments finis basés sur les lois de comportement déterminé à partir du système d'équations et de la mesure du coefficient d'orientation.

Les calculs par éléments finis ont permis de bien reproduire le comportement en traction des spécimens de traction. De plus, les modélisations des poutres en flexion ont confirmé que

l'utilisation d'un coefficient d'orientation moyen des fibres est suffisante pour prédire la capacité portante en flexion de poutres en BFUP avec une précision de l'ordre de 96%.

Abstract

Ultra high performance fiber reinforced concrete's (UHPFRC) offer exceptional mechanical properties and durability. However difficulties predicting the uniaxial tensile performance and the high cost limit its use in the construction industry. Fiber orientation, density and distribution can each influence its mechanical behavior. The goal of the research work presented in this Master's Thesis is to propose a methodology to predict the flexural behavior of UHPFRC beams considering only the fiber orientation factor.

First, an image processing program was developed on Matlab®. The program automatically determines the fiber quantity, distribution, and orientation within a concrete section.

Then an initial experimental phase of uniaxial tensile tests with different fiber orientations was performed. The fiber orientation within the tensile specimens was controlled using inclined separators during casting. The uniaxial tensile tests showed that depending on the fiber orientation, the tensile strength can range from 4,5 MPa to 12MPa and the length of hardening behavior can be reduced up to 95%. The results indicate that fiber orientation is the dominant factor affecting the UHPFRC tensile behavior. A direct tensile law for different fiber orientation factors was then developed empirically from this experimental phase.

A second experimental phase on beams in flexure was performed to study the local effects of forms and steel reinforcement on the fiber orientation factor. Core samples of reinforced and unreinforced beams demonstrated that the reinforcement bar and the forms do not affect the fiber orientation. Furthermore, the bending tests were used to validate finite element models where the tensile behavior of the UHPFRC was determined using the measured fiber orientation factor and the empirical formulas developed in the first experimental phase.

The finite element models reproduced the tensile behavior well. The models confirmed that using an average orientation factor is sufficient to predict the flexural capacity of UHFR beams with 96% accuracy.

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT.....	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX	XII
LISTE DES FIGURES.....	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XXII
LISTE DES ANNEXES	XXIV
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte	1
1.2 Objectifs	2
1.3 Méthodologie	3
1.4 Organisation du mémoire	4
CHAPITRE 2 : MÉTHODES DE DÉTECTION ET D'ÉVALUATION DE L'ORIENTATION DES FIBRES DANS LES BÉTONS RENFORCÉS DE FIBRES MÉTALLIQUES.....	7
2.1 Généralités.....	7
2.1.1 Angle d'inclinaison et coefficient d'orientation d'une fibre	7
2.1.2 Effet de la mise en œuvre sur l'orientation des fibres	10
2.1.3 Loi de comportement d'un BRF et d'un BFUP	11
2.2 Influence de l'orientation des fibres sur les propriétés mécaniques des bétons	13
2.2.1 Résistance à la compression	13

2.2.2 Résistance à la traction.....	15
2.2.3 Résistance à la flexion.....	22
2.3 Détermination du coefficient d'orientation par méthode analytique	23
2.4 Détermination du coefficient d'orientation par méthode non destructive.....	27
2.4.1 Tomographie par méthode électrique.....	28
2.4.2 Tomographie par approche magnétique	34
2.4.3 Tomographie par rayons X.....	38
2.5 Détermination du coefficient d'orientation par méthode destructive.....	42
2.5.1 Comptage manuel.....	43
2.5.2 Traitement d'images.....	43
2.6 Conclusion.....	48
CHAPITRE 3 : MESURE DE LA DISTRIBUTION ET DE L'ORIENTATION DES FIBRES PAR ANALYSE D'IMAGES.....	50
3.1 Les algorithmes de détection d'une ellipse	50
3.1.1 Qu'est-ce qu'une image numérique?.....	51
3.1.2 Binarisation de l'image scannée d'une section de béton fibré	53
3.1.3 Évaluation des propriétés de l'ellipse représentant une fibre.....	61
3.2 Programme de détection de l'orientation des fibres proposé	65
3.2.1 Binarisation de l'image scannée.....	66
3.2.2 Mesure de l'orientation des fibres	69
3.2.3 Validation du programme.....	72
3.3 Processus de préparation des échantillons en vue de l'analyse d'images	76
3.3.1 Prélèvement des échantillons	76
3.3.2 Préparation des surfaces	77

3.3.3	Numérisation des surfaces.....	80
3.4	Conclusion.....	80
CHAPITRE 4 : INFLUENCE DE L'ORIENTATION DES FIBRES SUR LE COMPORTEMENT EN TRACTION.....		81
4.1	Présentation de l'essai de traction directe	81
4.2	Fabrication des spécimens.....	83
4.2.1	Choix de la géométrie et de la méthode de coulée	83
4.2.2	Choix de la méthode de coulée	85
4.3	Programme expérimental	91
4.4	Résultats expérimentaux	92
4.4.1	Caractérisation des gâchées.....	92
4.4.2	Loi de comportement en traction	93
4.4.3	Influence du coefficient d'orientation	98
4.4.4	Angles d'inclinaison souhaités versus angles d'inclinaison obtenus	102
4.4.5	Comparaison des méthodes de calcul de l'angle d'inclinaison des fibres	103
4.5	Systèmes d'équations décrivant le comportement en traction.....	105
4.5.1	Étude du comportement pré-pic	107
4.5.2	Étude du comportement post-pic.....	112
4.6	Conclusions	116
CHAPITRE 5 : INFLUENCE DE L'ORIENTATION DES FIBRES SUR LE COMPORTEMENT EN FLEXION		117
5.1	Programme expérimental	117
5.2	Spécifications et fabrication des spécimens testés	118
5.3	Caractérisation mécanique	119

5.4	Montage expérimental.....	120
5.4.1	Montage mécanique	120
5.4.2	Instrumentation.....	121
5.4.3	Protocole.....	122
5.5	Comportement en flexion.....	122
5.6	Angles d'inclinaison des fibres dans les poutres en flexion.....	127
5.6.1	Validation de la zone découpe	127
5.6.2	Effets de bords créés par les coffrages	128
5.6.3	Effets de bord créés par les armatures.....	132
5.6.4	Effets locaux des chaises.....	133
5.6.5	Estimation de l'angle d'inclinaison par méthode analytique et méthode d'analyse d'images	136
5.7	Conclusions	137

CHAPITRE 6 : MODÉLISATION DU COMPORTEMENT EN TRACTION ET EN FLEXION DU BFUP..... 139

6.1	Modélisation du comportement en traction du BFUP.....	139
6.1.1	Présentation du modèle CC3DNonLinCementitious2User.....	140
6.1.2	Calibration des lois de traction en vue de leur utilisation dans ATENA	142
6.1.3	Modèle utilisé.....	143
6.1.4	Influence de la longueur caractéristique Lch sur le comportement en traction	146
6.1.5	Influence de la contrainte de première fissuration	147
6.1.6	Validation des lois de comportement en traction	149
6.2	Modélisation du comportement en flexion.....	151
6.2.1	Modèle utilisé.....	151
6.2.2	Matériaux utilisés	153

6.2.3 Résultats obtenus.....	153
6.3 Conclusion.....	159
CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	161
BIBLIOGRAPHIE	165
ANNEXES.....	172

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Correspondance entre coefficient d'orientation et angle d'inclinaison	20
Tableau 2-2 : Valeurs des coefficients d'orientation dans les zones 1 et 3 selon différents auteurs adapté de Provost et al. (1991)	26
Tableau 2-3 : Avantages et inconvénients des méthodes de détermination de l'orientation des fibres dans les bétons renforcés de fibres.....	49
Tableau 3-1 : Exemple d'arbre de stockage	72
Tableau 3-2 : Pourcentage d'erreur sur le nombre de fibres comptabilisées	74
Tableau 3-3 : Répartition du temps de calcul.....	75
Tableau 4-1 : Composition du BFUP120	92
Tableau 4-2 : Résultats des essais à l'état frais	93
Tableau 4-3 : Résistance à la compression à 28 jours.....	93
Tableau 4-4 : Comparaison des angles d'inclinaison souhaités avec les angles d'inclinaison obtenus	102
Tableau 4-5 : Comparaison des angles d'inclinaison obtenus avec le programme proposé et avec les méthodes de calculs de Dupont et al. (2005) et Krenchel (1975).....	104
Tableau 4-6 : Données d'entrée pour l'élaboration du modèle pré-pic en traction.....	108
Tableau 4-7 : Erreurs relatives mesurées lors de l'utilisation d'une fonction linéaire basée sur le coefficient d'orientation et la densité des fibres.....	109
Tableau 4-8 : Erreurs relatives mesurées lors de l'utilisation d'une fonction bi-linéaire basée sur le coefficient d'orientation et la densité des fibres.....	110
Tableau 4-9 : Comparaison des modèles en terme d'énergie de rupture pour une ouverture de fissure de 3 mm	114
Tableau 5-1 : Propriétés des bétons entrant dans la composition des spécimens testés en flexion	119
Tableau 5-2 : Comparaison méthode analytique et méthode d'analyse d'image.....	137

Tableau 6-1 : Exemple de loi de traction calibrée pour ATENA (lch = 25 mm) 143

Tableau 6-2 : Propriétés mécaniques des bétons pour les poutres modélisées 153

Liste des figures

Figure 1-1 : Méthodologie et organisation du mémoire.....	6
Figure 2-1: Définition de l'orientation d'une fibre	8
Figure 2-2: Différentes définitions de l'angle d'inclinaison d'une fibre :	9
Figure 2-3 Méthode d'introduction de béton fibré favorisant une orientation préférentielle des fibres d'après Markovic (2006).....	10
Figure 2-4 : Influence de l'écoulement sur l'orientation des fibres (Stähli 2008)	10
Figure 2-5 : Réponse caractéristique d'un BRF et d'un BFUP soumis un effort de traction directe d'après Naaman (2008).....	12
Figure 2-6: Courbe contrainte-déformation d'un BFUP soumis à la compression géométrie des spécimens et du pourcentage de fibres (Mansur, 1999)	14
Figure 2-7: Indice de ductilité en fonction de la résistance en compression pour différente géométrie, direction de coulée et pourcentage de fibre. (Mansur, 1999).....	15
Figure 2-8: a) Force d'arrachement normalisée en fonction de l'angle d'inclinaison pour des fibres crochetées; b) force nécessaire pour atteindre une ouverture de fissure de 0,5mm (Markovic, 2006).....	17
Figure 2-9: Différentes géométries pour les spécimens en forme d'os.....	19
Figure 2-10:Relation entre le coefficient d'orientation et la résistance à la traction (Oesterlee, 2010).....	20
Figure 2-11 : Courbes contraintes-déformations pour différents coefficients d'orientation d'après Oesterlee (2010)	21
Figure 2-12 : Influence de l'angle d'inclinaison des fibres sur la résistance en traction pure de a) BFUP (Oesterlee, 2010) et b) SIFCON d'après Van Mier et al. (2002) et Markovic (2006).	21
Figure 2-13 : Courbes flèche-contrainte de flexion pour différents angles de prélèvement (Behloul, 1996).....	22

Figure 2-14: Répartition des conditions aux frontières dans une section rectangulaire (Dupont & Vandewalle, 2005)	24
Figure 2-15: Estimation théorique du coefficient d'orientation dans des poutres prismatiques (adaptée de Souroushian (1990)).....	27
Figure 2-16: Fonctions principales des méthodes non destructives (Hassani & Momayez, 2004)	28
Figure 2-17: Disposition générale des électrodes pour un quadripôle (Chapellier, 2000) et (Rentier, 2002)	29
Figure 2-18: Spectre d'impédance à 28 jours pour un béton ($E/C = 0,4$) avec 0% (neat) et 1% de fibres (1wt%) (Torrents, et al., 2001).....	30
Figure 2-19 Distribution des fibres déduite des mesures de résistivité et issue de l'analyse visuelle (Lataste, 2007).....	31
Figure 2-20 a) Réponse spectrale en fonction de l'angle d'inclinaison de la fibre, b) Relation entre angle d'inclinaison et γ (Torrents, et al., 2001).....	31
Figure 2-21: Conductivité normalisée en fonction du coefficient d'orientation (Ozyurt et al., 2006).....	32
Figure 2-22 : Évolution de la résistivité en fonction du temps et du rapport E/C (Chouteau, 2003).	33
Figure 2-23 : a) Schéma du montage de tomographie par champ magnétique, b) ligne de champs induite par le dispositif (Faifer et al., 2011)	36
Figure 2-24 : Auto-inductance et angle d'inclinaison des fibres (Faifer et al., 2011).	37
Figure 2-25 : Domaines du spectre électromagnétique en fonction de la longueur d'onde, de la fréquence ou de l'énergie des photons (Lours, 2009).....	38
Figure 2-26 : Système a) radiographique à rayons X (Mix, 2005) et b) radiométrique par rayons gamma (Mitchell, 2004)	40
Figure 2-27 : Tomographie à rayons X a) Éprouvette en BRF, b) reconstitution 3D à partir de radiographies, c) image filtrée (Krause et al. , 2010)	41

Figure 2-28 : Section d'un échantillon a) brute b) après polissage et contraste inversé (Wuest et al., 2009).....	44
Figure 2-29 : 5 cas supplémentaires d'intersection entre une fibre et un plan (Zhu et al., 1997) ..	46
Figure 2-30 : Plage d'erreur classique observée lors de l'évaluation de l'orientation de fibres (Kawamura et al., 2005).....	46
Figure 2-31 : Les 4 types d'erreur rencontrés par Wuest et al. (2009), erreur 1 : non prise en compte d'une fibre, erreur 2 : non dissociation de deux fibres collées, erreur 3 : certaines fibres ne sont pas considérées comme des ellipses, erreur 4 : Une seule fibre est subdivisée en plusieurs fibres.....	47
Figure 3-1 : Convention de notation pour la représentation d'une image sous Matlab®	51
Figure 3-2 : Codage d'une image en niveau de gris sur 8 bits	52
Figure 3-3: Histogramme idéalisé à niveau de gris pour l'utilisation d'un seuillage global	54
Figure 3-4: Histogramme global d'un échantillon de béton fibré.....	55
Figure 3-5 : Histogrammes obtenus par deux tailles de zonages différentes	56
Figure 3-6 : Principe de la ligne de partage des eaux, en 2D (Roduit, 2007).	57
Figure 3-7 : Modèles de contours (Maître, 2003).	58
Figure 3-8 : Filtres verticaux pour la détection de contours (Maître, 2003).	59
Figure 3-9 : exemples d'éléments structurants binaires	60
Figure 3-10:Exemples de « Bonding box » (Chang, 2006).....	62
Figure 3-11 : Points extremaums d'une ellipse selon Haralick et al. (1992)	63
Figure 3-12 : Logigramme des deux programmes développés à l'EPM	66
Figure 3-13 : Comparaison entre a) une binarisation par seuillage et b) une binarisation par analyse morphologique puis seuillage.....	67
Figure 3-14 : Image obtenue au cours des différentes étapes de la binarisation :.....	68
Figure 3-15 : Détermination du centre d'une ellipse à partir de 3 points de contour (triplet)	69
Figure 3-16 : Exemple d'intersection a) acceptée b) rejetée	70

Figure 3-17 : Erreur moyenne de mesure du coefficient d'orientation a) sur des ellipses idéales b) sur des ellipses tronquées	73
Figure 3-18 : Types d'erreurs constatées lors de la détection du nombre de fibres.....	75
Figure 3-19 : Schéma et nomenclature des échantillons prélevés sur les poutres.....	76
Figure 3-20 : Défauts constatés après le sciage, a) traces de la lame lors de la découpe, b) bavures autour des fibres.	77
Figure 3-21 : Surface obtenue d'un échantillon après le processus de préparation	78
Figure 3-22 : Problèmes rencontrés lors de la phase d'augmentation de contraste, a) contraste hétérogène de la matrice pour un BRF, b) empreinte de fibre et présence de pores.....	79
Figure 4-1 : Montage expérimental d'un essai de traction directe	82
Figure 4-2 : Instrumentation d'un spécimen de traction	83
Figure 4-3 : Géométries testées a) os de traction, b) plaquette, c) sciage de la section centrale, d) sciage de la section centrale avec angle droit, e) sciage de la section centrale à 45 degrés... <td>84</td>	84
Figure 4-4 : Réponse en traction pure des différentes géométries de spécimens étudiées.....	85
Figure 4-5 : Fissuration au niveau du changement de section sur les spécimens c et d.....	85
Figure 4-6: Coffrage os pour favoriser l'orientation a) séparateurs, b) système de bascule.....	87
Figure 4-7 : Modification de la disposition des plaquettes	87
Figure 4-8: Écoulement d'un fluide visqueux a) le long d'une paroi b) entre deux parois	88
Figure 4-9 : Montage final du système de coulée	89
Figure 4-10 : Comparaison du comportement en traction pure entre l'utilisation de séparateurs longs et de séparateurs courts	90
Figure 4-11 : Plan de faiblesse potentiel	90
Figure 4-12: Patrons de fissuration sur trois spécimens coulés à l'aide de séparateurs.....	91
Figure 4-13 : Réponse en traction d'un BFUP avec fibres orientées à 0 degré a) comportement pré-pic, b) comportement post-pic	94

Figure 4-14 : Réponse en traction d'un BFUP avec fibres orientées à 22,5 degrés a) comportement pré-pic, b) comportement post-pic	95
Figure 4-15 : Réponse en traction d'un BFUP avec fibres orientées à 45 degrés a) comportement pré-pic, b) comportement post-pic	96
Figure 4-16 : Profils de fissuration relevés sur les spécimens avec fibres orientées à 45 degrés a) spécimen 1, b) spécimen 6, c) spécimen 2	96
Figure 4-17 : Réponse en traction d'un BFUP avec fibres orientées à 67 degrés a) comportement pré-pic, b) comportement post-pic	97
Figure 4-18 : Réponse en traction d'un BFUP avec fibres orientées à 90 degrés a) comportement pré-pic, b) comportement post-pic	98
Figure 4-19 : Comportement pré-pic et post-pic du BFUP en traction directe pour différentes orientations théoriques de fibres	99
Figure 4-20 : Comparaison du comportement pré-pic en traction directe d'élément en BFUP pour différentes orientations de fibres mesurées a) selon la présente étude et b) selon Oesterlee (2010)	100
Figure 4-21 : Relation entre angle d'inclinaison et résistance à la traction	101
Figure 4-22: Distribution angulaire.....	103
Figure 4-23: Relation entre la densité de fibre et angle d'inclinaison	105
Figure 4-24 : Modèles de traction suggérés par Naaman et al. (2006) a) général b) minimal.....	106
Figure 4-25 : Modèles de traction suggérés dans la présente étude	107
Figure 4-26 : Comparaison modèle proposé et données expérimentales	112
Figure 4-27 : Comparaison des phases adoucissantes expérimentales et des modèles retenus pour des fibres orientées à a) 35 degrés, b) 36 degrés, c) 37 degrés, d) 44 degrés, e) 54 degrés .	115
Figure 5-1 : Dimensions des poutres pour l'étude des effets de bords a) des coffrages (présente étude), b) des armatures (Beaurivage, 2009).....	118
Figure 5-2 : Dispositif expérimental, a) vue d'ensemble, b) système d'appui.....	120
Figure 5-3 : LVDT de mesure de la flèche sud	121

Figure 5-4 : Système de mesure de l'ouverture de fissure	122
Figure 5-5 : Comportement en flexion 3 points des poutres étudiées	124
Figure 5-6 : Réactions aux appuis relevées pour la poutre 150 mm	124
Figure 5-7 : Écrasement aux appuis a) poutre de 75 mm, b) poutre de 125 mm	125
Figure 5-8 : Profil de fissuration observé pour les poutres a) 75 mm b) 125 mm c) 150 mm	126
Figure 5-9 : Charge appliquée versus ouverture de fissure a) Poutre de 150 mm, b) Poutre de 125 mm.....	126
Figure 5-10 : Zones de prélèvement des échantillons dans les poutres a) de la présente étude b) de Beaurivage (2009)	127
Figure 5-11 : Comparaison des angles d'inclinaison mesurés sur les deux faces d'un échantillon espacé d'une longueur de fibre (10 mm) a) analyse sur la hauteur b) analyse sur la largeur	128
Figure 5-12 : Angle d'inclinaison des fibres sur la hauteur et la largeur des poutres	129
Figure 5-13 Distribution des fibres sur la hauteur et la largeur a) des poutres, b) des spécimens de traction	130
Figure 5-14 : Écoulement du BFUP constaté lors du remplissage et orientation des fibres probable	131
Figure 5-15 : Influence d'une barre d'armature sur l'angle d'inclinaison pour des poutres isostatiques a) sur la demi-largeur, b) sur la hauteur.....	132
Figure 5-16 : Influence d'une barre d'armature sur l'angle d'inclinaison pour des poutres hyperstatiques.....	133
Figure 5-17 : Chaises utilisées	134
Figure 5-18 : Influence d'une chaise sur l'angle d'inclinaison pour des poutres hyperstatiques a) sur la demi-largeur, b) sur la hauteur	135
Figure 5-19 : Cartographie pour la demi-section inférieure d'une poutre à proximité d'une chaise de a) l'angle d'inclinaison des fibres, b) densité de fibres	136
Figure 5-20 : Réglettes continues pleines	136

Figure 6-1 : Définition d'une loi de comportement a) en traction b) en compression (Cervenka et al., 2011).....	141
Figure 6-2 : largeur de bande de fissuration (Cervenka et al. , 2011).....	142
Figure 6-3 : Loi de comportement en traction a) loi expérimentale b) loi calibrée pour ATENA	143
Figure 6-4 : Maillage d'un spécimen de traction (Beaurivage, 2009)	144
Figure 6-5 : Comparaison des conditions aux frontières des modèles de traction ATENA a) modèle de Beaurivage (2009), b) modèle proposé.....	145
Figure 6-6 : Maillage utilisé pour la modélisation des essais de traction	146
Figure 6-7 : Influence de la longueur caractéristique sur la loi de traction obtenue a) maillage avec éléments de 50 mm, b) maillage de 25 mm.	147
Figure 6-8 : Analyse d'une courbe de traction avec jeu mécanique dans la presse a) courbe zoomée b) courbe complète.....	147
Figure 6-9 : Loi de comportement obtenue par éléments finis pour différents ratios $ft/f't'$	148
Figure 6-10 : Comparaison des profils de fissuration expérimentaux et numériques pour des spécimens de traction avec fibres orientées favorablement à 0 degré.....	149
Figure 6-11 : Comparaison des lois de comportement en traction expérimentales et numériques	150
Figure 6-12 : Géométrie du modèle numérique	151
Figure 6-13 : Maillage utilisé pour la modélisation des essais de flexion	152
Figure 6-14 : Conditions aux frontières du modèle ATENA	152
Figure 6-15 : Prédition par éléments finis du comportement en flexion de poutres en BFUP à partir de la mesure de l'angle d'inclinaison des fibres mesuré.	155
Figure 6-16 : Comparaison des profils de fissuration modèle numérique-expérimental pour des ouvertures de fissures supérieures à 0,1mm.....	156
Figure 6-17 : Plage de comportement en flexion d'une poutre en BFUP pour une plage d'erreur du coefficient d'orientation de $\pm 2^\circ$	157

Figure 6-18 : Comportement en flexion isostatique des poutres de Beaurivage (2010) pour des taux de renforcement variant de 0% à 1%.....	159
--	-----

Liste des sigles et abréviations

Lettres grecques :

α	coefficient d'orientation (-)
β	paramètre du modèle de Behloul
γ	paramètre caractérisant la taille de l'arc des basses fréquences
ε_{loc}	déformation de localisation (ATENA)
ρ	résistivité
λ	longueur d'onde / paramètre divers
θ	angle d'inclinaison (Degrés)
τ	adhérence moyenne ou équivalente entre les fibres et la matrice cimentaire
σ	contrainte (MPa)
σ_{pc}	contrainte maximale atteinte en traction directe
σ_{cc}	contrainte élastique dans le modèle de Namaan
μ	perméabilité magnétique / coefficient d'atténuation du matériau

Lettres latines minuscules

a	petit axe d'une ellipse
b	largeur de la poutre / grand axe d'une ellipse
c	célérité de la lumière dans le vide
d_f	diamètre d'une fibre
f_t	contrainte de première fissuration
h	hauteur de la poutre / constante de Planck
l_f	longueur d'une fibre
n_f	nombre de fibres par unité de surface
w	ouverture de fissure
w_u	demi-longueur de fibre

Lettres latines majuscules

A	aire
\bar{B}	densité du flux magnétique
E	énergie d'un rayonnement (électron-Volts)
\bar{H}	champs magnétique
I	intensité du courant (Ampère) / intensité d'un photon
K	espacement inter électrodes
L_{ch}^t	longueur caractéristique (ATENA)
L_t	largeur de bande de fissuration
N_i	dépolarisation suivant l'axe i
R_{cusp}	impédance réelle
R_{dc}	impédance des électrodes seules
V	tension (Volts)
V_f	volume de fibre

Abréviations

BRF	bétons renforcés de fibres
BFUP	bétons fibrés ultra haute performance
LPE	ligne de partage des eaux
EPFL	École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse)
EPM	École Polytechnique de Montréal (Canada)

Liste des annexes

ANNEXE 1 – ÉQUATIONS POUR DÉTERMINER LE COEFFICIENT D'ORIENTATION.....	172
ANNEXE 2 – PROGRAMME DE DÉTECTION DES FIBRES.....	175
ANNEXE 3 – PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS EN VUE DE L'ANALYSE PAR TRAITEMENT D'IMAGES.....	187
ANNEXE 4 – PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE POUR LES ESSAIS DE TRACTION DIRECTE.....	188
ANNEXE 5 – PROCÉDURE DES ESSAIS DE FLEXION.....	198

Chapitre 1 : Introduction

1.1 Contexte

Depuis une cinquantaine d'années, la recherche dans le domaine des matériaux de construction s'est orientée vers une nouvelle gamme de bétons : les bétons renforcés de fibres métalliques. La forte compacité de la matrice cimentaire ainsi que l'ajout de fibres métalliques permettent d'accroître fortement la résistance à la compression, à la traction ainsi que la ductilité post-fissuration. Ainsi, l'usage de ces bétons permet dans certains cas de réduire la quantité d'armatures conventionnelles et offre une durabilité accrue comparativement à un mélange traditionnel grâce à un meilleur contrôle de la fissuration.

Les bétons fibrés conventionnels (BRF) ou les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) sont désormais arrivés à maturité et leur fabrication ne pose plus de problèmes majeurs. Qui plus est, les essais standards pour caractériser les propriétés à l'état frais et à l'état durci (affaissement, étalement, J-ring, module de rupture, flexion sur dalle circulaire...) ont été adaptés à ces nouveaux mélanges. Malgré ces avancées, ces bétons sont encore peu utilisés dans les structures au Canada.

Cette tendance semble principalement due au coût élevé des BRF et des BFUP et à l'incapacité des concepteurs à prédire leur comportement en traction. En effet, il n'existe toujours pas d'essais normés pour caractériser le comportement en traction directe de ces matériaux cimentaires atypiques (il existe cependant des méthodes de calcul inverse pouvant être couplées à des essais de flexion). Même si un tel essai existait, la forte dépendance du comportement en traction vis-à-vis de l'orientation des fibres demeure un problème majeur pour les bétons renforcés de fibres, car il peut exister une variation importante entre l'orientation des fibres dans les spécimens de caractérisation et celle des structures fabriquées.

La forte variabilité du comportement en traction des bétons renforcés de fibres en fonction de l'orientation des fibres a été peu étudiée jusqu'à l'heure actuelle. Ceci fait ressortir le besoin de mesurer précisément l'orientation et la densité des fibres dans le béton au moyen d'outils de détection automatisés. Or, la faible dimension des fibres, la différence de composition de la matrice entre les BRF et les BFUP et l'influence des conditions atmosphériques sur certaines

méthodes de détection complexifient le développement d'une méthode universelle de mesure de l'angle d'inclinaison des fibres.

À la vue de ces problématiques il apparaît parfois difficile dans le cadre d'une phase de conception de prédire précisément le comportement d'une structure en béton renforcé de fibres métalliques sans considérer de grande marge de sécurité. Si l'on admet qu'il est possible de prédire l'angle d'inclinaison des fibres dans une structure et dans les spécimens de caractérisation, aucune méthode n'a été proposée pour prendre en considération les différences éventuelles entre ces deux éléments. Le développement d'un système d'équations ou d'abaques semble donc indispensable pour faire le lien entre les propriétés mécaniques de la structure et des spécimens de caractérisation.

Par ailleurs, la présence d'armatures, des surfaces de coffrage ou de tous autres éléments dans les coffrages sont autant d'éléments qui influencent l'écoulement du béton et donc l'angle d'inclinaison des fibres. Or, lors d'un dimensionnement en béton fibré, l'utilisation de propriétés homogènes en traction peut s'avérer non conservatrice. Peu de travaux ont été réalisés sur le sujet.

Compte tenu de l'influence avérée de la méthode de coulée sur l'orientation des fibres, l'utilisation des bétons renforcés de fibres métalliques se concentre actuellement sur des applications en préfabrication où celle-ci est mieux contrôlée. Néanmoins, pour garantir un contrôle qualité fiable, il est nécessaire de déterminer au mieux la capacité en traction du béton utilisé. Dans ce contexte, la mesure de l'angle d'inclinaison des fibres peut être d'une grande utilité pour limiter les essais de caractérisation à réaliser.

1.2 Objectifs

Ce projet de recherche a pour objectif général de proposer une méthode de prédiction du comportement mécanique d'éléments de structure en BFUP sur la base d'une mesure du coefficient d'orientation des fibres. Celle-ci pourrait être intégrée dans un processus de conception ou à un processus de contrôle de la qualité lors de la fabrication des éléments de structure. Les objectifs spécifiques suivants ont été fixés pour le projet :

- Poursuivre le développement d'un programme sous Matlab[®] permettant de mesurer l'orientation des fibres dans les BRF et les BFUP;
- Évaluer l'influence de l'orientation des fibres sur le comportement en traction des BFUP;
- Évaluer les effets de bords, des coffrages et des armatures sur la distribution de l'angle d'inclinaison des fibres dans les poutres;
- Reproduire le comportement en traction du BFUP avec différents angles d'inclinaison;
- Reproduire le comportement en flexion du BFUP avec différents angles d'inclinaison.

1.3 Méthodologie

Pour parvenir à prédire le comportement mécanique de poutres en BFUP sur la base de l'angle d'inclinaison des fibres, la méthodologie en 4 étapes présentées à la Figure 1-1 a été adoptée. Il est à noter que pour des raisons pratiques et pour limiter l'importance du projet, il a été choisi de traiter la problématique avec le BFUP, car ce matériau présente un comportement en traction plus complexe à étudier. Les résultats obtenus avec ce matériau pourraient par la suite être adaptés au BRF.

La première étape de la méthodologie est consacrée au développement de l'algorithme de détection des fibres (Figure 1-1 étape 1.). L'efficacité de cet algorithme sera vérifiée par un comptage manuel et par des essais sur des fibres d'orientations connues. Ce programme devra permettre de mesurer dans un temps de traitement acceptable l'orientation des fibres et de compter automatiquement le nombre de fibres dans les bétons fibrés. Cet outil permettra par la suite de caractériser l'orientation des fibres dans les spécimens de traction et de flexion.

En deuxième étape, une méthode de coulée sera développée et des essais de traction directe seront réalisés pour évaluer les effets de l'angle d'inclinaison des fibres sur le comportement en traction directe (Figure 1-1 étape 2.). Des échantillons seront prélevés sur les spécimens testés et analysés grâce au programme développé à l'étape précédente afin d'établir des relations entre l'angle d'inclinaison des fibres et les caractéristiques de la loi de traction du BFUP. Sur la base de ces relations, un modèle prédictif empirique permettant de déterminer la loi de traction à partir

de la mesure du coefficient d'orientation sera proposé. Ce modèle servira par la suite à la détermination des lois de traction directe équivalentes dans les spécimens de flexion.

La troisième étape du travail consistera à évaluer les effets de bords à partir du carottage de poutres armées et non armées testées dans ce projet et par Beaurivage (2009) (Figure 1-1étape 3.). Ces poutres ayant des sections variables et des taux de renforcement différents permettront de connaître l'influence de la présence de barres d'armatures et des coffrages sur l'inclinaison des fibres. De plus, les essais de flexion qui seront réalisés sur les poutres permettront par la suite de vérifier s'il est possible de prédire leur comportement en flexion en prenant en considération l'angle d'inclinaison des fibres.

La quatrième et dernière étape utilisera l'ensemble des résultats obtenus lors des trois étapes précédentes (Figure 1-1étape 4.). Elle aura pour but de confirmer ou d'infirmer la validité de la démarche proposée. Dans un premier temps, le comportement en traction des spécimens de traction devra être reproduit avec un logiciel d'éléments finis pour valider les lois de matériaux utilisés lors de modélisation future. Par la suite, à l'aide des équations développées à l'étape 2.2 et des mesures de l'angle d'inclinaison dans les poutres réalisées à l'étape 3.3, le comportement en flexion de poutres sera modélisé.

1.4 Organisation du mémoire

Ce mémoire est composé de 7 chapitres incluant ce présent chapitre introductif et un chapitre de conclusions. Le deuxième chapitre fait état des connaissances sur les méthodes de mesures de l'orientation des fibres dans des éléments structuraux. Le troisième chapitre décrit l'algorithme développé au cours de ces travaux de recherche pour la détermination de l'orientation des fibres. Le quatrième chapitre porte sur l'influence de l'orientation des fibres sur le comportement en traction du BFUP et propose un modèle prédictif du comportement en traction. Le cinquième chapitre étudie l'influence des armatures et des coffrages sur l'orientation des fibres dans les poutres. Le sixième chapitre concerne la modélisation par éléments finis des essais de traction et de flexion d'éléments en BFUP. La Figure 1-1 résume la méthodologie utilisée dans ce projet et l'organisation du mémoire.

Cinq annexes viennent compléter le corps du mémoire. Elles présentent respectivement le système d'équations permettant de déterminer l'angle d'inclinaison des fibres, le programme de détection des fibres ainsi que les procédures expérimentales utilisées au cours de ce projet.

But : Prédiction du comportement mécanique de poutres en BFUP sur la base de l'angle d'inclinaison des fibres

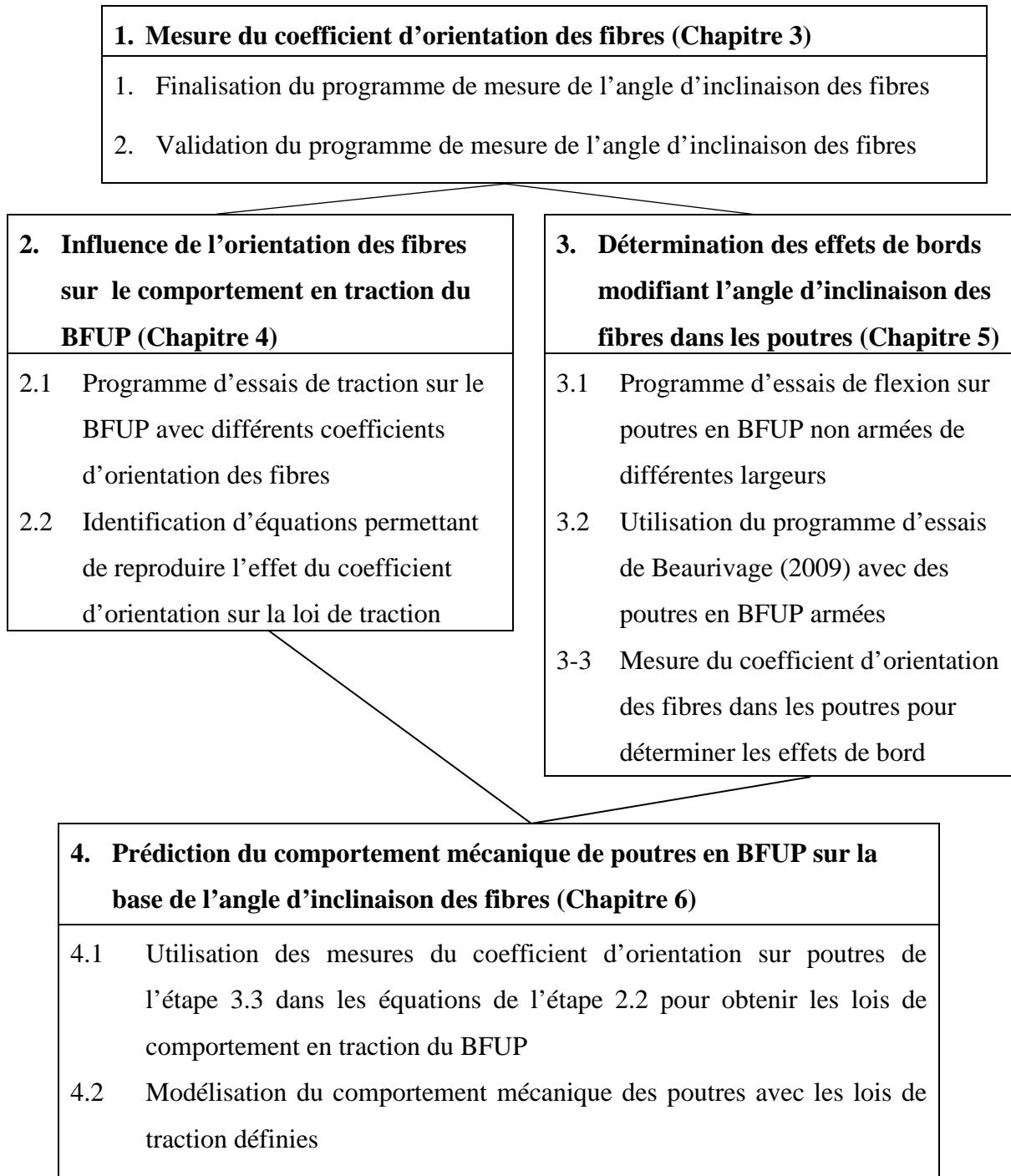


Figure 1-1 : Méthodologie et organisation du mémoire

Chapitre 2 : Méthodes de détection et d'évaluation de l'orientation des fibres dans les bétons renforcés de fibres métalliques

L'ajout de fibres, qu'elles soient en acier ou synthétiques, dans les nouvelles gammes de bétons (BRF et BFUP) entraîne une mise à jour des critères de conception pour tenir compte des propriétés mécaniques de ces nouveaux matériaux. Cependant, l'établissement de nouvelles règles de conception nécessite une bonne connaissance du matériau. Contrairement au béton conventionnel qui peut être considéré comme homogène à l'échelle structurale, les bétons renforcés de fibres peuvent présenter une forte hétérogénéité reliée à la répartition des fibres. Cette hétérogénéité se divise en deux composantes : la distribution des fibres (densité des fibres) et l'orientation des fibres.

L'orientation et la répartition des fibres dans les bétons renforcés de fibres sont des paramètres qui contrôlent le processus de fissuration lors de l'application d'une sollicitation et qui gouvernent donc la réponse globale du spécimen. Dans ce premier chapitre, les notions générales permettant de comprendre l'importance du coefficient d'orientation des fibres dans les structures seront définies. Ensuite, les méthodes existantes permettant de mesurer l'orientation des fibres seront détaillées.

2.1 Généralités

2.1.1 Angle d'inclinaison et coefficient d'orientation d'une fibre

L'angle d'inclinaison(θ) d'une fibre est défini comme étant l'angle formé entre un plan et l'axe longitudinal de la fibre (Figure 2-1).

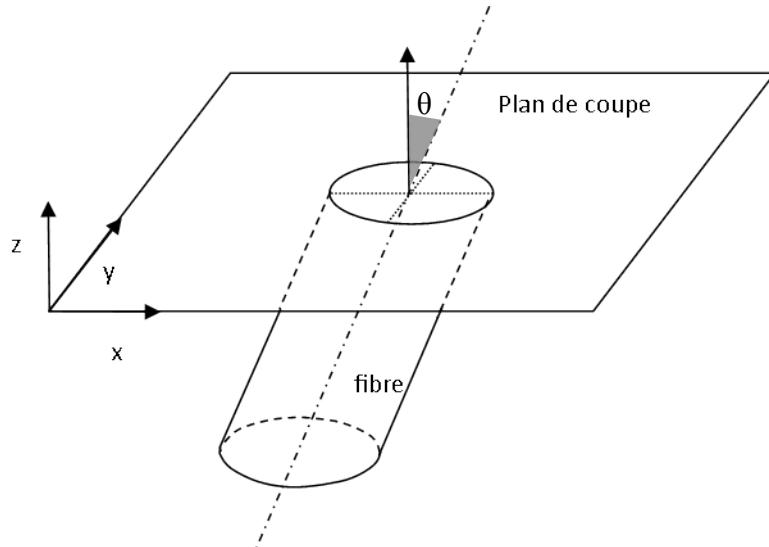


Figure 2-1: Définition de l'orientation d'une fibre

La notion de coefficient d'orientation (α) est également utilisée. Ce coefficient varie entre 0 et 1, où 1 correspond à une fibre perpendiculaire au plan et 0 correspond à une fibre parallèle au plan.

Lorsque le coefficient d'orientation est converti en degrés, il existe deux conventions qui sont illustrées à la Figure 2-2 :

Convention 1 : Le plan de la coupe effectuée dans les spécimens est la référence (Behloul, 1996), ainsi 0° correspond à une fibre orientée dans le sens perpendiculaire à l'effort de traction.

Convention 2 : Dans l'approche micromécanique considérée dans les tests d'arrachement (pull out), Naaman et al.(1975), Robins et al.(2002), Laranjeira et al.(2008) ou encore Lee et al.(2010) préfèrent utiliser l'angle d'inclinaison de la fibre par rapport à l'effort de traction. Dans ce cas, une fibre orientée à 0° sera parallèle à l'effort de traction.

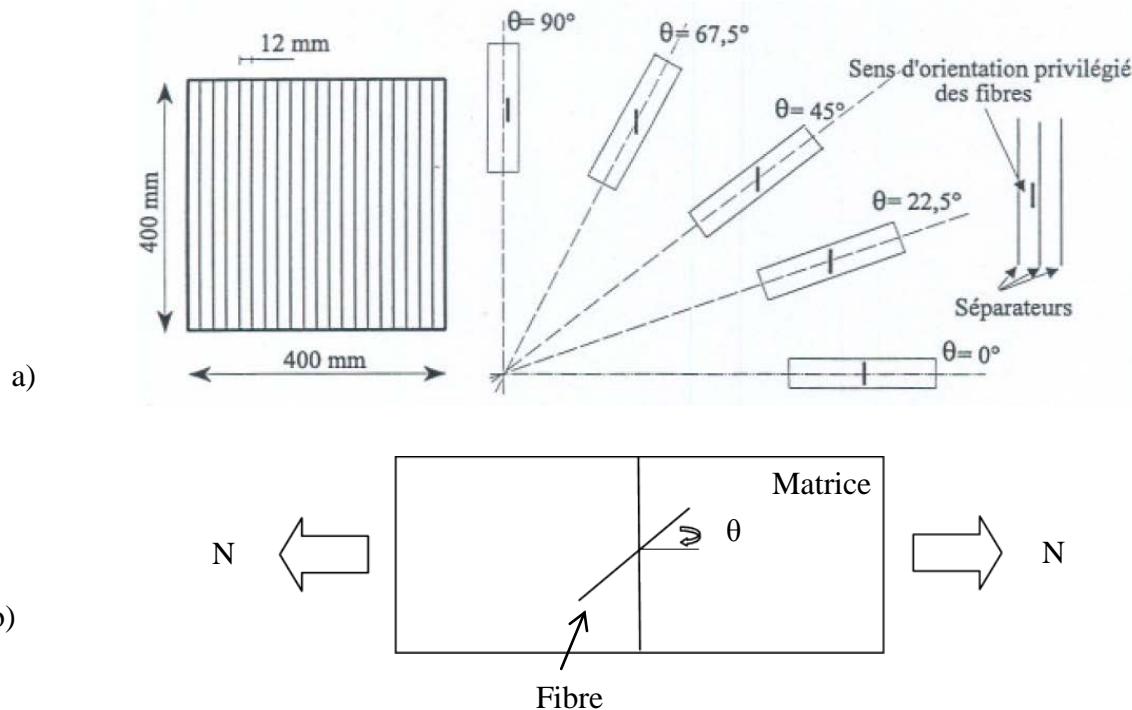


Figure 2-2: Différentes définitions de l'angle d'inclinaison d'une fibre :

a) d'après Behloul (1996) et b) d'après Lee (2010)

En fonction de la convention choisie, on obtient les relations suivantes entre le coefficient d'orientation et l'angle d'inclinaison:

$$\text{Convention 1 : } \alpha = \cos(90 - \theta) \quad (2-1)$$

$$\text{Convention 2 : } \alpha = \cos(\theta)$$

La convention 2 tirée des essais d'arrachement offre l'avantage d'utiliser le coefficient d'orientation réel des fibres dans la matrice de béton. L'angle obtenu par la convention 1 ne correspond qu'à un plan de découpe, et en aucune manière à l'angle réel de la fibre. Donc en travaillant avec la convention 2, des angles idéalisés sont considérés. C'est la raison pour laquelle, dans ce mémoire, la convention 2 a été choisie. Ainsi, un coefficient d'orientation α égale à 1 correspondra à un angle d'inclinaison θ de 0° .

2.1.2 Effet de la mise en œuvre sur l'orientation des fibres

Rossi (1998) répertorie deux paramètres qui influencent l'orientation des fibres :

- La technique de mise en œuvre;
- Les effets liés à l'écoulement.

Pour des échantillons fabriqués en laboratoire, l'utilisation d'une cuillère ou d'une chaudière est généralement la technique de mise en œuvre privilégiée. Les fibres s'orientent préférentiellement parallèlement au mouvement de l'outil de mise en place utilisé (Figure 2-3).

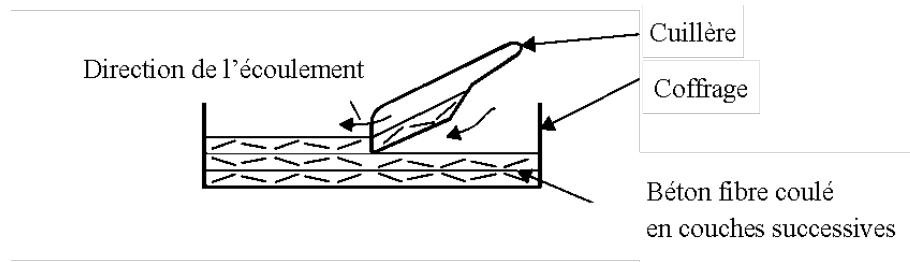


Figure 2-3 Méthode d'introduction de béton fibré favorisant une orientation préférentielle des fibres d'après Markovic (2006)

Dans le cas où le béton est introduit sans mouvement de l'outil de mise en place, le béton s'écoule librement dans le coffrage et les fibres s'orientent parallèlement aux lignes de courant de l'écoulement (Figure 2-4).

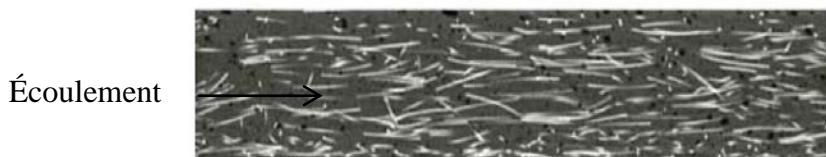


Figure 2-4 : Influence de l'écoulement sur l'orientation des fibres (Stähli, 2008)

Ainsi, pour garantir une orientation contrôlée dans l'ensemble du spécimen, Behloul (1996) conseille de favoriser des vitesses de coulées lentes afin que l'écoulement reste laminaire et éviter des turbulences qui modifieraient localement l'orientation des fibres.

2.1.3 Loi de comportement d'un BRF et d'un BFUP

Les bétons renforcés de fibres, qu'ils soient à haute ou ultra-haute performance sont considérés comme des matériaux composites. Il se décompose en deux éléments : la matrice qui à elle seule peut être considérée comme un matériau composite et les fibres. Les propriétés mécaniques propres de la matrice et des fibres de même que leur interaction donnent les propriétés mécaniques des bétons renforcés de fibres. La matrice regroupe le ciment, les granulats, l'eau et les adjuvants (superplastifiant et viscosant). L'air entraîné dans le mélange au cours du malaxage est considéré comme faisant partie intégrante de la matrice. Il est à noter que, par défaut, les fibres sont considérées comme orientées et distribuées de façon aléatoire dans le béton.

Le comportement d'un béton renforcé de fibres en traction est caractérisé par trois phases distinctes (Figure 2-5): une phase élastique (I), suivie dans certains cas par une phase écrouissante (II), puis une phase adoucissante (III). La phase élastique est définie par une résistance et une déformation élastique qui permettent de calculer le modèle élastique. La résistance obtenue à la fin de la phase élastique correspond à la première fissuration de la matrice. La phase écrouissante correspond à une multi-fissuration de la matrice marquée par le développement de plusieurs micro et macro fissures et par une augmentation de la résistance jusqu'à une valeur ultime appelée résistance en traction. Lorsque cette résistance est atteinte, une seule macro fissure localisée se développe et la résistance en traction du matériau décroît progressivement. Il s'agit de la phase adoucissante.

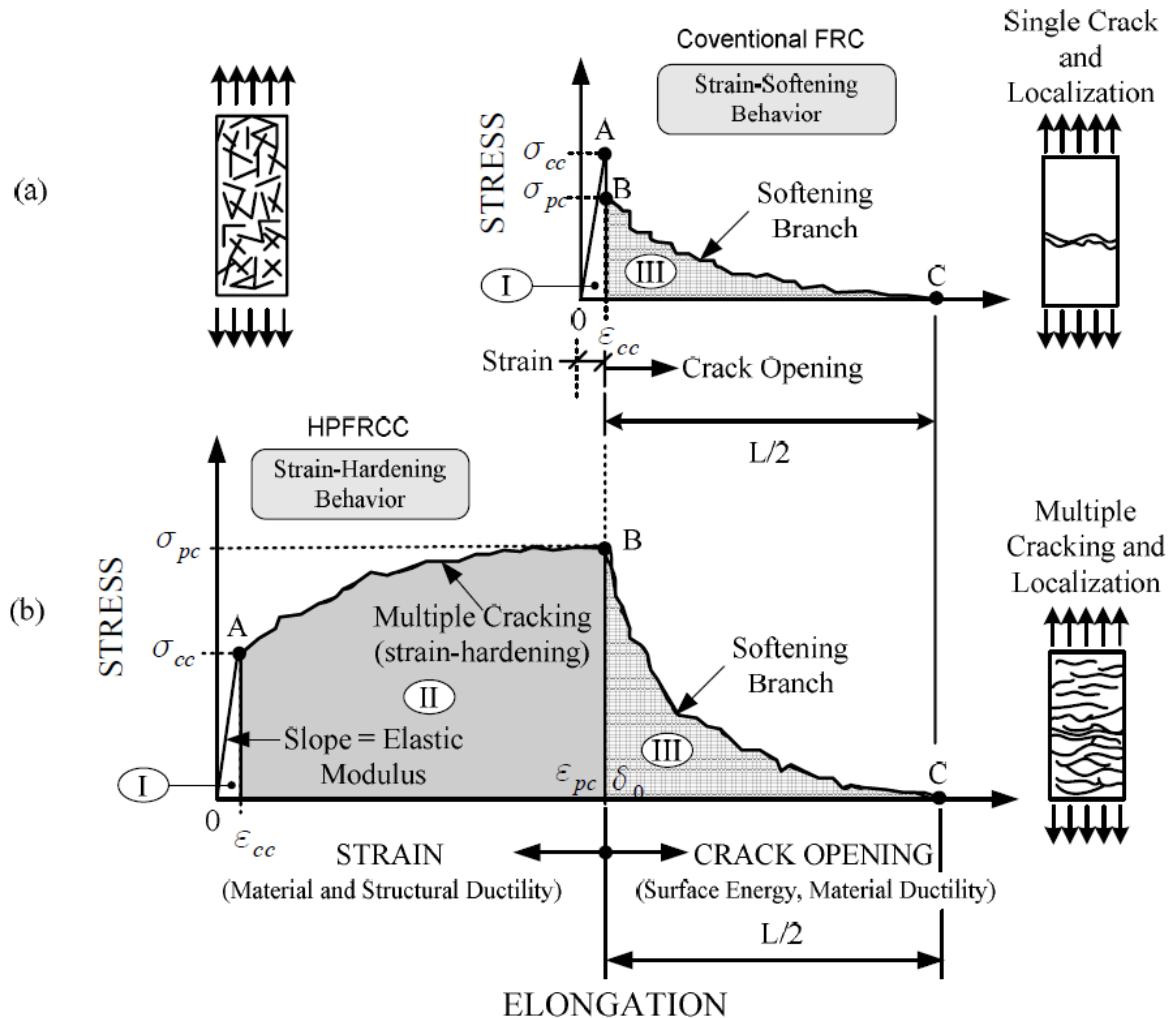


Figure 2-5 : Réponse caractéristique d'un BRF et d'un BFUP soumis un effort de traction directe
d'après Naaman (2008)

Pour différencier un béton fibré conventionnel d'un béton fibré à ultra-haute performance, il existe deux écoles de pensée. La pensée européenne, calquée sur le modèle français (AFGC, 2002), considère qu'un béton fibré est dit à ultra-haute performance lorsque :

- la résistance à la compression de la matrice cimentaire dépasse 150 MPa;
- la présence de fibres, qui assure la ductilité du matériau, permet de réduire la quantité d'armatures actives ou passives;
- le dosage en liant est très élevé et les granulats sélectionnés sont très petits.

Dans une autre approche, Naaman (2008) différencie un béton fibré conventionnel d'un béton fibré à ultra-haute performance en se basant sur le comportement en traction directe de ces bétons. Ainsi, si une phase écrouissante (phase II sur la Figure 2-5b) apparaît après la première fissuration, alors le matériau pourra être considéré comme un BFUP. Dans le cas des BRF la phase écrouissante n'existe pas, seule la phase adoucissante est présente (phase III sur la Figure 2-5 a).

Dans ce mémoire, l'approche de Naaman sera utilisée.

2.2 Influence de l'orientation des fibres sur les propriétés mécaniques des bétons

2.2.1 Résistance à la compression

La présence de fibres dans les BRF entraîne une augmentation de la résistance en compression uniquement pour des dosages en fibres supérieurs à 2 % (Schachinger, 2007). Cependant, comme cette augmentation ne dépasse pas 15% (ACI Committee 544.1 R, 1996), elle peut être considérée comme négligeable.

Sur la Figure 2-6 on peut constater que le module d'élasticité reste inchangé (variation inférieure à 2%), quel que soit le dosage de fibres dans la matrice (ACI Committee 544.1 R, 1996). Les mêmes tendances ont été observées pour le coefficient de poisson. Cependant, le principal effet de la présence des fibres sur le comportement en compression est l'apparition d'une phase adoucissante de plus en plus marquée (réduction de résistance plus progressive).

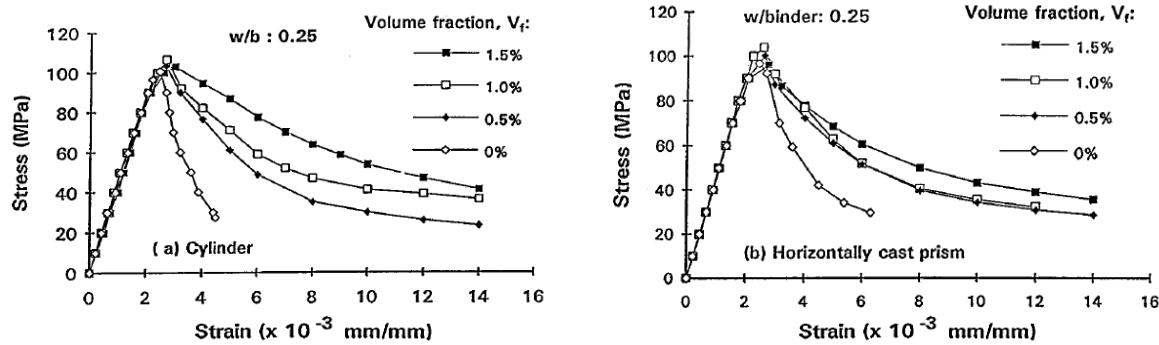


Figure 2-6: Courbe contrainte-déformation d'un BFUP soumis à la compression géométrie des spécimens et du pourcentage de fibres(Mansur, 1999)

Mansur (1999) a mis en évidence que la résistance à la compression est très peu influencée par le sens de coulée du béton et donc par l'orientation des fibres. En effet, les échantillons coulés horizontalement présentaient une résistance à la compression réduite de 4 % par rapport aux spécimens coulés verticalement, et un module de Young augmenté de 7%. Cependant, la ductilité des spécimens était grandement influencée par l'orientation des fibres pour des bétons de résistances inférieures à 90 MPa. Comme le montre la Figure 2-7, les spécimens coulés horizontalement offrent un indice de ductilité environ 25% supérieur aux mêmes spécimens coulés verticalement. La tendance semble disparaître pour des bétons de résistances supérieures à 90 MPa.

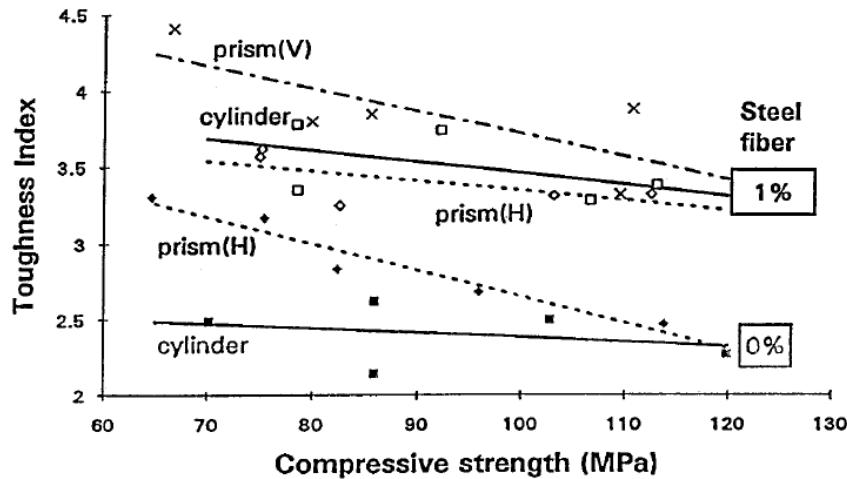


Figure 2-7: Indice de ductilité en fonction de la résistance en compression pour différente géométrie, direction de coulée et pourcentage de fibre. (Mansur, 1999)

Les travaux de Mansur, sur l'influence du sens de coulée en compression, ont montré que lorsque les fibres sont orientées parallèlement à l'effort appliqué au spécimen, la résistance est moindre. Cette conclusion reste à confirmer, car cette tendance semble fortement influencée par le rapport eau/liant et ont été observé uniquement avec un seul type de fibres.

2.2.2 Résistance à la traction

Depuis une dizaine d'années, de nombreuses recherches ont été réalisées pour caractériser l'influence de l'orientation des fibres sur les propriétés mécaniques des BRF et des BFUP sollicités en traction pure. Deux axes de recherche ont alors été privilégiés : des essais à l'échelle d'une ou d'un nombre réduit de fibres sous forme d'un essai d'arrachement (Robin et al., 2002; Laranjeira et al., 2008; Lee et al., 2010), ou des essais à une échelle intermédiaire sur des tirants ou sur des spécimens en forme d'os (Wuest, 2007; Oesterlee, 2010).

2.2.2.1 Essai d'arrachement (pull-out) d'une fibre

Dans le but de comprendre les mécanismes en jeu au cours d'un essai de traction directe, de nombreux chercheurs ont choisi l'option d'étudier les phénomènes à l'échelle locale. L'essai d'arrachement permet de s'affranchir des effets des groupes qui amplifient ou atténuent l'action des fibres.

De nombreux facteurs affectent la réponse d'une fibre. Selon Markovic (2006), les 6 facteurs principaux sont: la géométrie de la fibre, la composition de la fibre, la zone où la fissuration apparaît par rapport au centre la fibre, la composition de la matrice, la vitesse de chargement et l'inclinaison de la fibre. L'influence de ces facteurs est décrite dans les travaux de Van Gysel (2000). Sur le marché il existe une grande variété de fibres (ondulées, crochetées, vrillées, lisses, etc.) avec pour chaque catégorie plusieurs diamètres et plusieurs longueurs possibles. Par exemple, la force d'arrachement des fibres crochetées peut être multipliée par 6 par rapport à une fibre droite.

La Figure 2-8 a) présente l'influence de l'angle d'inclinaison sur la force d'arrachement d'une fibre crochetée de 50 mm de longueur et de 0,5 mm de diamètre. On constate que, dans la majorité des expériences menées, l'angle d'inclinaison de la fibre ne semble pas influencer de façon probante la force d'arrachement nécessaire pour la déchausser. Les forces obtenues étant relativement proches de la valeur de référence (fibre parfaitement alignée avec l'effort de traction), on peut supposer que certaines variations peuvent être imputables aux différences de montages expérimentaux et la présence de défauts ponctuels dans les matériaux étudiés. Les mêmes tendances ont été observées par Ramusen (1997) et Naaman et al. (1976) sur des fibres droites.

Toutefois, les travaux de Bartos et al.(1994) et de Maage (1977)ont révélé la présence d'une forte dépendance entre la force à appliquer à la fibre pour un déchaussement et son orientation. La force de déchaussement décroît de façon quasi linéaire avec l'augmentation de l'angle. Ainsi pour un angle de 60°, la force nécessaire est réduite de plus 50%.

La Figure 2-8 b) présente la force nécessaire pour atteindre une ouverture de fissure de 0,5mm en fonction de l'angle. Dans ce cas, les tendances sont sensiblement les mêmes pour l'ensemble des expérimentations. Lorsque l'angle d'inclinaison de la fibre dépasse 20 degrés, la force décroît comparativement à une fibre parfaitement alignée.

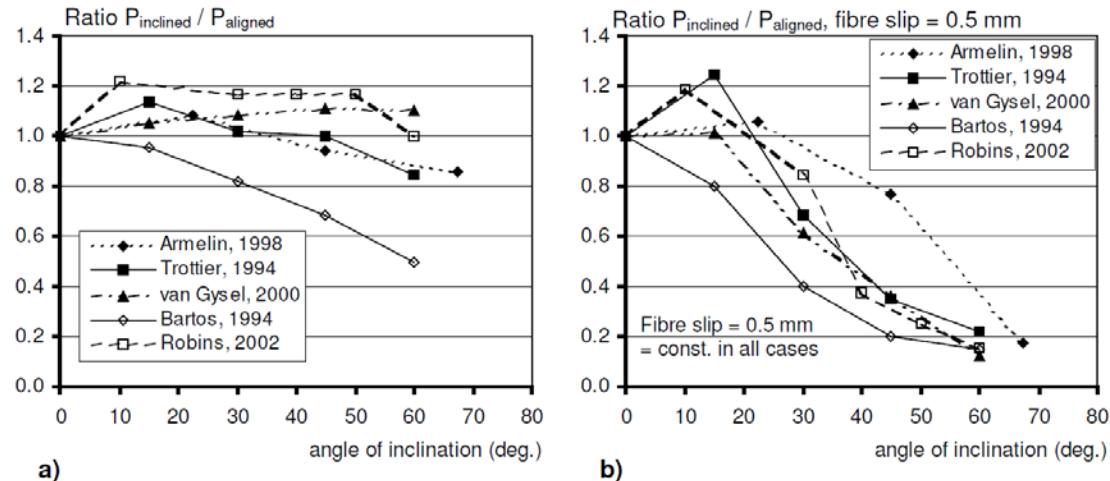


Figure 2-8: a) Force d'arrachement normalisée en fonction de l'angle d'inclinaison pour des fibres crochetées; b) force nécessaire pour atteindre une ouverture de fissure de 0,5mm
(Markovic, 2006)

Grâce à l'essai d'arrachement, on obtient un aperçu de la réponse du matériau en fonction de l'angle d'inclinaison des fibres. Cependant, en prenant en compte les constatations de Rossi (1998) sur l'effet de groupe à l'échelle de la structure, les tendances observées peuvent se révéler contradictoires. En effet, chaque fibre adopte une direction propre qui peut être variable donc sa longueur d'ancre peut varier dans des éléments industriels.

La définition de cet effet de groupe permet de mieux comprendre la complexité du passage d'un essai à l'échelle locale au comportement global d'une structure (Casanova, 1995; Rossi, 1998):

Effet de groupe positif : « Imaginons deux fibres, l'une perpendiculaire au plan de fissure, l'autre inclinée par rapport à cette fissure. Si les deux fibres sont suffisamment éloignées l'une de l'autre, elles agissent indépendamment vis-à-vis de la fissure, la fibre perpendiculaire était plus efficace que la fibre inclinée. Le bilan « couple » se résume alors à l'action individuelle. En revanche, si la distance entre les deux fibres est telle que l'action de la fibre qui travaille le mieux conduit, en outre, à confiner la fibre qui fonctionne le moins bien [...], cette dernière verra son efficacité vis-à-vis de la fissure accrue. Le bilan du « couple » devient alors la somme de leurs actions individuelles plus quelque chose qui est la conséquence de leur « entraide » [...], qu'on peut [...] qualifier d'entraide positive. Le passage du fonctionnement individuel des fibres à un

fonctionnement d'entraide peut se caractériser par un seuil sur le pourcentage de fibre [...] appelé seuil d'efficacité. »

Effet de groupe négatif : « Lorsque l'on rapproche de plus en plus les deux fibres, il arrive un moment où la quantité de [matrice] qu'il y a entre elles devient tellement faible que l'enrobage fibre devient insuffisant [...] pour assurer un fonctionnement correct de l'interface [matrice-fibre]. Donc chaque fibre travaillera moins bien que si elles avaient travaillé sans interaction. Le bilan du « couple » est la somme de leurs actions individuelles moins quelque chose qui est la conséquence de leur « promiscuité », qu'on peut qualifier d'entraide négative. Le passage de l'effet de groupe positif à l'effet de groupe négatif peut également se caractériser sur un seuil sur le pourcentage de fibre que [Rossi] propose d'appeler seul de saturation. »

Ces seuils de dosage dépendent de la géométrie des fibres, de leurs orientations vis-à-vis de la fissure et du type de matrice. Il est possible d'agir sur la géométrie des fibres, le type de matrice et le dosage des fibres. En revanche, agir sur l'orientation des fibres est plus laborieux.

Ainsi, si les fibres sont distribuées de manière hétérogène dans une structure, des effets de groupe peuvent apparaître en divers endroits et, de ce fait, modifier le comportement global de la structure. Les prédictions tirées des essais d'arrachement peuvent alors donner des résultats plus ou moins réalistes.

2.2.2.2 Essai de traction directe

Depuis le début des années 2000, de nombreux chercheurs se sont lancés dans la conception d'essais de traction directe dans le but de caractériser les nouveaux bétons développés. Actuellement il n'existe pas d'essai normalisé pour mesurer la résistance en traction d'un béton renforcé de fibres (Naaman et al., 2006). Néanmoins deux types de géométrie se sont dégagés : les éprouvettes en forme d'os (Boulay et al., 2004; Kanakubo et al., 2006; Markovic, 2006; Denarié et al., 2006) et les éprouvettes prismatiques ou rectilignes (Habel, 2004; Yang et al., 2006; Oestrelee, 2010). La Figure 2-9 met en évidence la grande variabilité qui peut exister entre différents spécimens de traction en forme d'os.

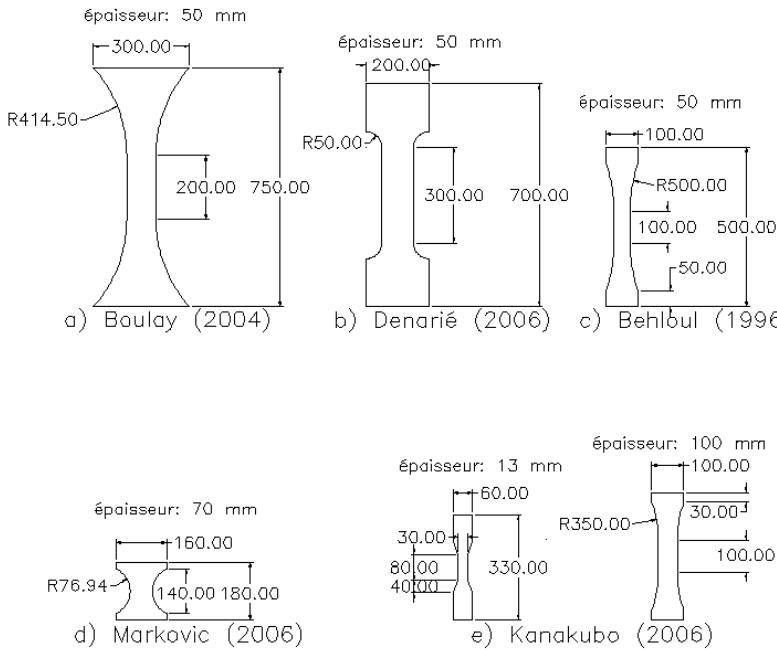


Figure 2-9: Différentes géométries pour les spécimens en forme d'os

Les dimensions des éprouvettes varient aussi bien en termes d'épaisseur, de hauteur et de changement de section. Il est à noter que les spécimens présentant un rayon de courbure élevé favorisent un écoulement du béton le long de l'axe du chargement et une orientation favorable des fibres. Il est donc fort probable qu'avec ces géométries la résistance en traction atteinte soit supérieure à celle obtenue avec des spécimens au rayon de courbure réduit.

Depuis 2007, des travaux de recherches réalisés à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) ont permis de caractériser l'influence de l'orientation des fibres sur la résistance en traction et sur le comportement des BFUP. Wuest (2007) a développé une méthode de mesure de l'orientation des fibres et a montré que le comportement en traction du BFUP était directement dépendant du coefficient d'orientation. Oesterlee (2010) a ensuite démontré que la résistance en traction du BFUP pouvait être considérée comme directement proportionnelle au coefficient d'orientation (Figure 2-10). Ce dernier a toutefois déduit le coefficient d'orientation des fibres de ses spécimens à partir de la densité des fibres traversant une fissure. Une variabilité importante des résultats est à déplorer, par exemple un coefficient d'orientation de 0,55 a conduit à une résistance en traction variant de 7 à 15 MPa. Ainsi, la seule étude du coefficient d'orientation moyen des fibres ne suffirait donc pas à prédire la résistance en traction d'un BRF.

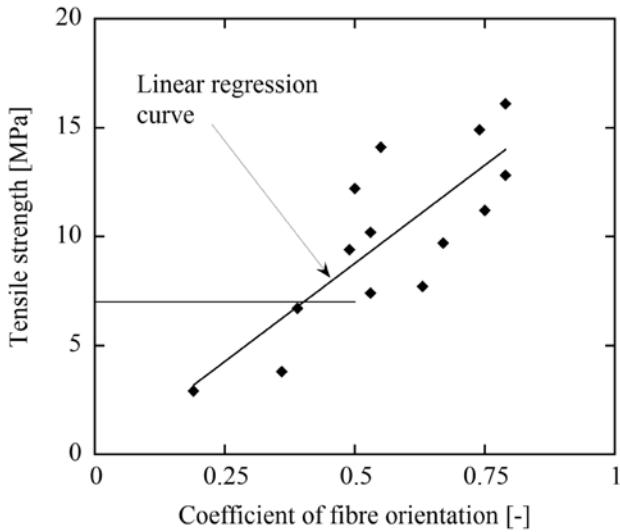


Figure 2-10: Relation entre le coefficient d'orientation et la résistance à la traction(Oesterlee, 2010)

La Figure 2-11et le Tableau 2-1 présentent la réponse de 7 éprouvettes prélevées dans une plaque selon différentes directions (Oesterlee, 2010). La corrélation entre le coefficient d'orientation et la résistance à la traction est fortement discutable dans ces résultats. Certaines courbes avec un coefficient d'orientation moindre présentent une phase écrouissante beaucoup plus marquée qu'attendu. Par exemple, pour un coefficient d'orientation de 0,55 (57 degrés) une résistance de 14 MPa est atteinte, alors que pour un coefficient d'orientation de 0,79 (38 degrés) la résistance obtenue est inférieure de 10% (12,7 MPa). De plus, la déformation à la résistance maximale est 5 fois inférieure. Les différences observées peuvent être imputables à des défauts ponctuels dans la matrice (présence de bulles d'air, grain de ciment anhydre...) ou à des distributions de fibres variables dans la section des spécimens.

Tableau 2-1 : Correspondance entre coefficient d'orientation et angle d'inclinaison

Coefficient d'orientation	Angle d'inclinaison (degrés)
0,2	80
0,5	60
0,67	48
0,74	42
0,79	38

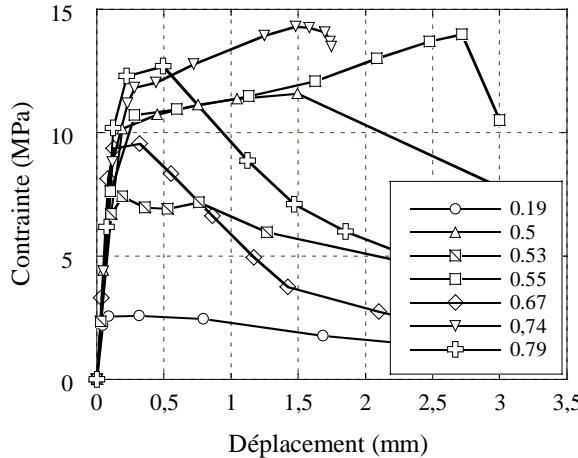


Figure 2-11 : Courbes contraintes-déformations pour différents coefficients d'orientation d'après Oesterlee (2010)

Si l'on considère seulement les courbes ayant un déplacement au pic du même ordre de grandeur (Figure 2-12 a), la résistance à la traction et la phase élastique croient avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison. On remarque aussi que la rigidité n'est pas affectée par l'orientation des fibres. Van Mier et al. (2002) a constaté des tendances similaires sur des échantillons entaillés de SIFCOM (Figure 2-12 b).

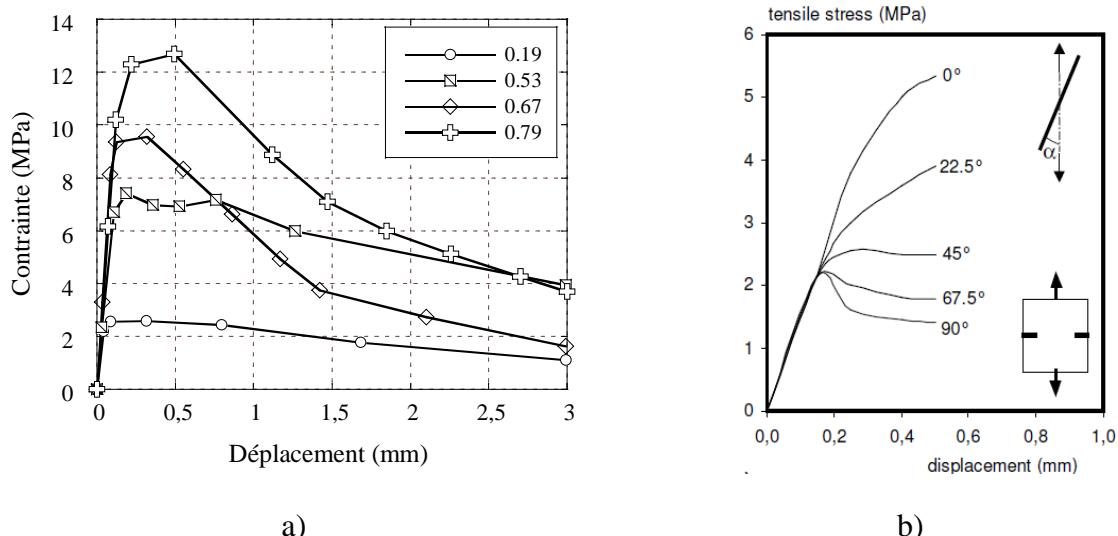


Figure 2-12 : Influence de l'angle d'inclinaison des fibres sur la résistance en traction pure de a) BFUP (Oesterlee, 2010) et b) SIFCON d'après Van Mier et al. (2002) et Markovic (2006).

2.2.3 Résistance à la flexion

Behloul (1996) a mis en évidence que l'orientation des fibres jouait un rôle non négligeable dans le comportement en flexion de prisme. Ces essais ont porté sur 5 éprouvettes découpées selon 5 angles (0° , 22.5° , 45° , 67.5° et 90°) dans une dalle coulée à l'aide d'un grillage favorisant l'orientation préférentielle des fibres (Figure 2-2a). Pour rappel, l'angle de prélèvement est opposé à l'angle d'inclinaison utilisé dans les travaux d'Oesterlee (2010) et de Van Mier et al. (2002). Ces éprouvettes de faibles dimensions ont par la suite été testées en flexion 4 points. Le comportement de ces éprouvettes varie fortement (Figure 2-13).

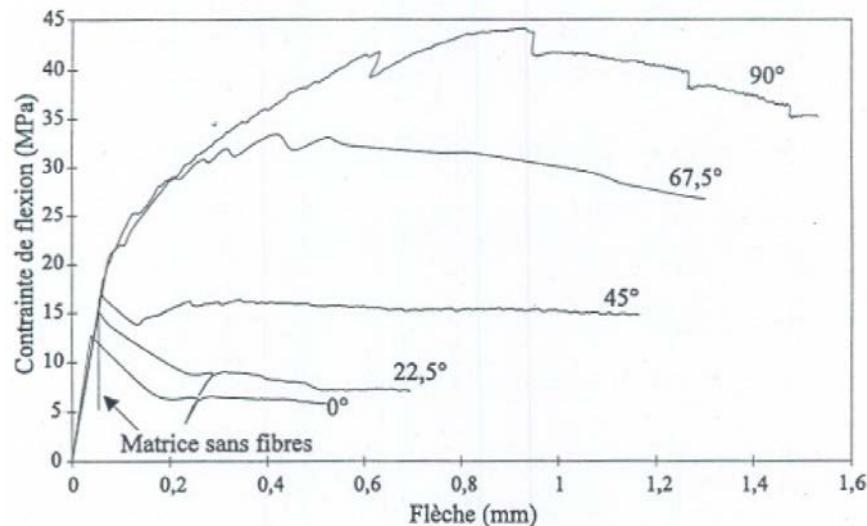


Figure 2-13 : Courbes flèche-contrainte de flexion pour différents angles de prélèvement(Behloul, 1996)

Le comportement mécanique en flexion peut être divisé en 3 catégories :

- Pseudo fragile pour des angles de découpe inférieurs à 45° ;
- Plastique pour un angle de 45° avec la présence d'un long plateau;
- Écrouissant pour des angles de découpe supérieurs à 45° .

Ces angles n'étant pas l'angle réel des fibres, il est difficile de comparer de façon précise ces résultats avec ceux obtenus par Oesterlee (2010) et Van Mier et al. (2002). On retrouve tout de

même des tendances similaires; soit une diminution de la résistance des spécimens par rapport au même spécimen sans fibres pour les orientations défavorables et une forte augmentation pour des orientations préférentielles. En effet, pour un angle de découpe de 0° , la contrainte de rupture atteinte est 33% inférieure à celle de la matrice seule. Sur ces spécimens, Behloul (1996) a remarqué que le profil de fissuration était parallèle à l'orientation des fibres. Ceci confirme l'hypothèse selon laquelle les fibres, lorsqu'elles sont mal orientées, représentent des défauts dans la structure. Inversement, une orientation favorable permet de multiplier par 3 la résistance maximale atteinte.

2.3 Détermination du coefficient d'orientation par méthode analytique

Sorouشian (1990) a été l'un des premiers à s'intéresser au problème de la prédiction du coefficient d'orientation moyen des fibres de façon analytique. Par la suite, Dupont et al. (2005) a repris une partie de son travail et a développé une équation, facile d'utilisation, permettant de calculer le coefficient moyen des fibres dans une poutre de section rectangulaire constante. Sorouشian (1990) et Dupont et al.(2005) ont distingué 3 cas de figure qui correspondent chacun à un changement de conditions aux frontières (Figure 2-14) :

- Zone 1 : la fibre est libre de s'orienter dans chacune des directions;
- Zone 2 : l'inclinaison de la fibre est influencée par un bord du coffrage;
- Zone 3 : l'inclinaison de la fibre est influencée par un coin du coffrage (2 bords du coffrage).

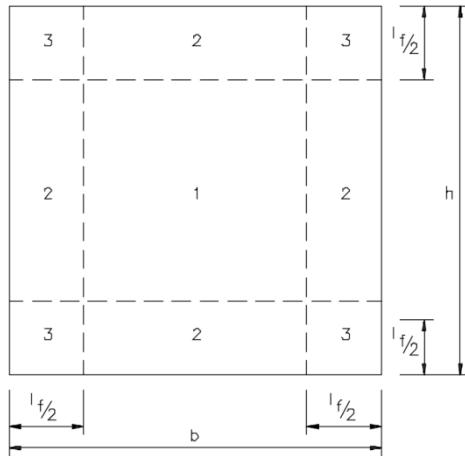


Figure 2-14: Répartition des conditions aux frontières dans une section rectangulaire(Dupont & Vandewalle, 2005).

Contrairement à Soroushian (1990) qui n'a pas présenté ses hypothèses de travail, Dupont et al.(2005) a considéré les 5 principes suivants :

- Les fibres sont droites. Cependant, il a précisé que ses équations peuvent être utilisées dans le cas de fibre crochétée à condition que la partie crochétée soit de longueur négligeable.
- L'effet de la vibration sur l'orientation des fibres n'est pas pris en compte.
- Chaque section de fibre présente dans un plan de coupe est considérée comme étant le point de gravité de la fibre. Par définition cette section est positionnée au centre de la fibre à $l_f/2$.
- Les 3 zones de répartition de fibres sont indépendantes (aucune interaction).
- La surface supérieure de la poutre a les mêmes conditions aux frontières que la surface inférieure coffrée (la finition de la surface supérieure du béton reproduit la présence d'un coffrage). Ainsi, aucune fibre ne peut dépasser de la poutre.

Même si Dupont et al. (2005) ne l'a pas mentionné, les interactions fibres-fibres et fibres-granulats ne sont pas prises en considération.

Différents auteurs ont calculé le coefficient d'orientation des fibres pour des cas 2D et 3D en se basant sur diverses hypothèses. Les résultats sont consignés dans le Tableau 2-2 pour les zones illustrées à la Figure 2-14. Pour le calcul de la zone 1, les valeurs 0,5 et 0,405 sont proposées régulièrement; alors que pour la zone 3 Dupont est le seul à proposer une valeur supérieure à 0,637. Seuls Soroushian et Dupont ont présenté leurs équations pour les 3 zones de répartition de fibres (Annexe 1), ainsi qu'une équation ou un abaque pour le calcul du coefficient d'orientation dans la poutre complète.

Dans la pratique, il est inconcevable pour des ingénieurs d'utiliser les équations de l'annexe 1. Les approximations numériques et les abaques proposés par Soroushian et Dupont permettent un gain de temps significatif. Comme le coefficient d'orientation dans chacune des zones est indépendant du diamètre et de la longueur des fibres, ces abaques conviennent à tout type de fibres et de mélange.

Le coefficient d'orientation moyen des fibres dans une section peut alors être calculé à partir de l'équation (2-2) (Dupont & Vandewalle, 2005) :

$$\alpha = \frac{\alpha_1 \times (b - l_f)(h - l_f) + \alpha_2 \times [(b - l_f)l_f + (h - l_f)l_f] + \alpha_3 \times l_f^2}{bh} \quad (2-2)$$

avec

$$\alpha_1 = 0,5 \quad \alpha_2 = 0,6 \quad \alpha_3 = 0,84$$

Tableau 2-2 : Valeurs des coefficients d'orientation dans les zones 1 et 3 selon différents auteurs
adapté de Provost et al.(1991)

Auteurs	Coefficient d'orientation	
	Zone 3	Zone 1
Krenchel	0,637	0,405
Romualdi – Mandel	-	0,405
Aveston – Kelly	0,637	0,5
Parimi – Rao	0,637	0,5
Karl – Pal	-	0,333; 0,444; 0,825
Rajagopalan – Parameswaran	0,637	0,405
Dehouse	-	$25 \cdot E \left(\frac{\pi d^2}{V_f} \right)$
Soroushian	-	0,405
Dupont	0,84	0,5
Van Gysel	-	0,5
Stroeven	-	0,5

La Figure 2-15 compare le coefficient d'orientation moyen de fibres obtenu en considérant différentes géométries de poutre et différentes longueurs de fibres. La formule de Dupont et al.(2005) donne des coefficients d'orientation environ 10% supérieur pour un ratio h/l_f (hauteur de la poutre sur longueur de fibre) de 4. Pour des poutres industrielles dont le ratio h/l_f dépasse 10, cette différence va s'amplifier pour atteindre 25%. En effet, pour des poutres de rapport hauteur/largeur constant, si on augmente la hauteur du coffrage, les effets de bord deviennent de plus en plus négligeables. Le coefficient d'orientation tend vers le coefficient d'orientation de la zone 1, à savoir respectivement 0,405 pour Souroushian et 0,5 pour Dupont.

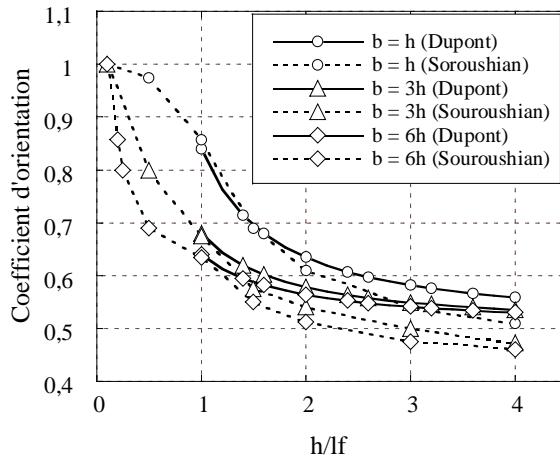


Figure 2-15: Estimation théorique du coefficient d’orientation dans des poutres prismatiques
(adaptée de Souroushian et al. (1990))

Les nombreuses hypothèses de calcul à la base des équations sont très restrictives pour représenter au mieux la réalité. La méthode de coulée et les interactions des fibres dans le béton jouent un rôle non négligeable sur la valeur du coefficient d’orientation, or les équations présentées ne les considèrent pas. La formulation de Dupont et al.(2005) est tout de même facile à utiliser, elle peut ainsi permettre dans une phase de conception d’obtenir une estimation rapide de ce coefficient pour une géométrie donnée.

2.4 Détermination du coefficient d’orientation par méthode non destructive

Pour assurer un contrôle de la qualité du béton, de nombreuses méthodes non destructives ont été développées. Chacune de ses méthodes présente des avantages et des inconvénients et permet d’estimer qu’un certain nombre de propriétés. La Figure 2-16présente les principales fonctions des méthodes non destructives. Ces méthodes font actuellement l’objet de nombreuses recherches afin de pouvoir s’adapter au BRF et au BFUP.

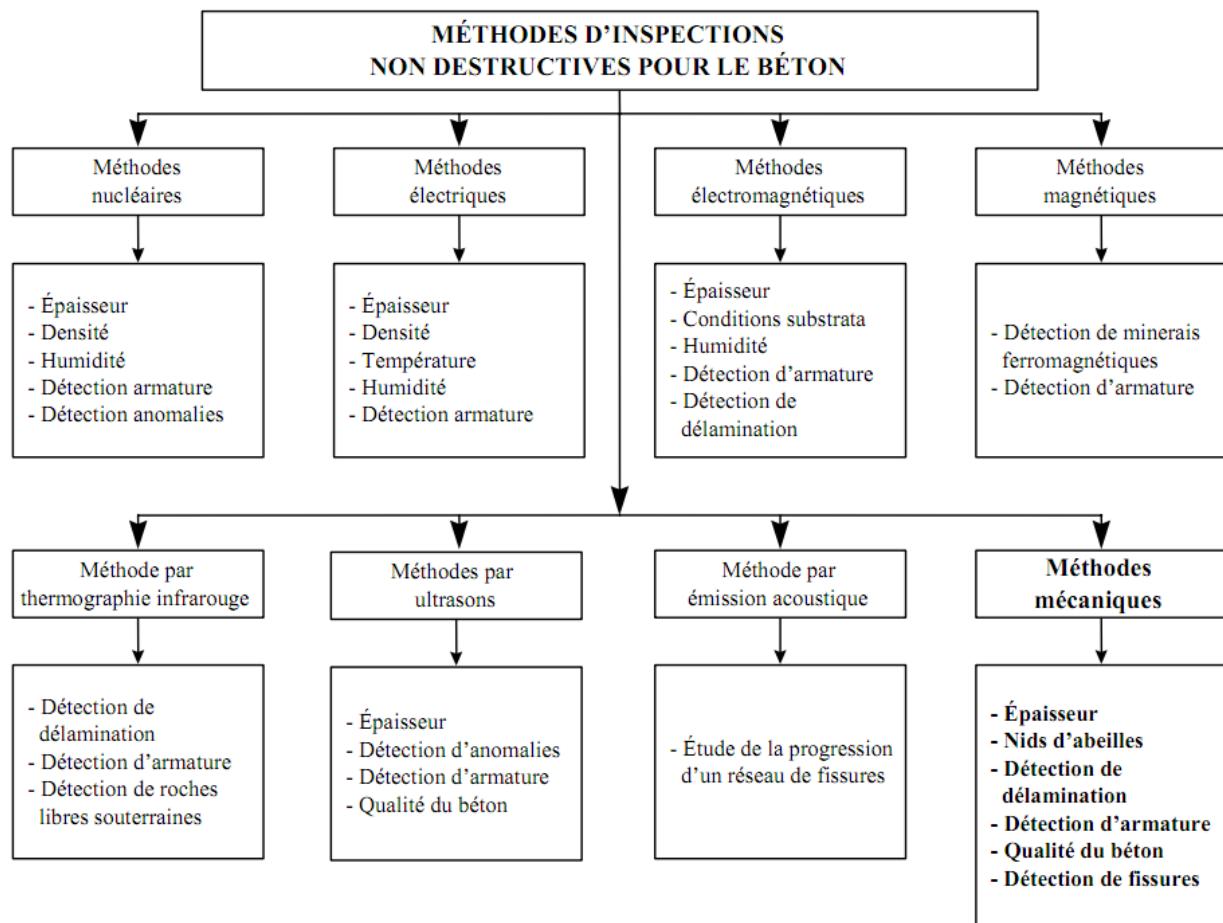


Figure 2-16: Fonctions principales des méthodes non destructives (Hassani & Momayez, 2004)

2.4.1 Tomographie par méthode électrique

La méthode électrique est utilisée depuis de nombreuses années dans les domaines de la recherche géologique, de l'archéologie, de l'environnement, dans l'industrie des semi-conducteurs et plus récemment dans le domaine du génie civil (Chouteau, 2003). Cette technique appliquée pour la première fois au béton par Stratfull en 1968 n'a cessé de se développer. La principale application est le contrôle de la corrosion des barres d'armatures(Polder, 2000). Cependant, depuis le début des années 2000, de nombreux chercheurs tels que Torrents et al. (2001), Woo (2005), Ozyurt et al.(2006), Lataste et al. (2008) et plus récemment Faifer et al.(2009) ont appliqué cette méthode à la caractérisation de l'orientation des fibres métalliques dans les BRF.

Le principe de cette méthode est assez simple. Il consiste à faire circuler un courant électrique d'intensité connue I , qui entraîne le mouvement des ions dans le matériau entre deux électrodes de courant; et de mesurer la différence de potentiel ΔV induite dans une paire d'électrodes (Figure 2-17). À partir de la différence de potentiel mesurée (ΔV) et de l'espacement inter électrodes (K), on calcule la résistivité apparente du matériau avec la loi d'Ohm:

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (2-3)$$

où

$$K = 2\pi \cdot \left[\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} \right]^{-1} \quad (2-4)$$

Les paramètres r_{11} , r_{12} , r_{21} et r_{22} sont définis à partir de la Figure 2-17. Il est à noter que la distance inter électrodes influence directement la profondeur d'étude depuis la surface (Lataste, 2007). Selon la composition du matériau, la profondeur d'auscultation peut varier de $\overline{D_1 D_2}/8$ à $\overline{D_1 D_2}$.

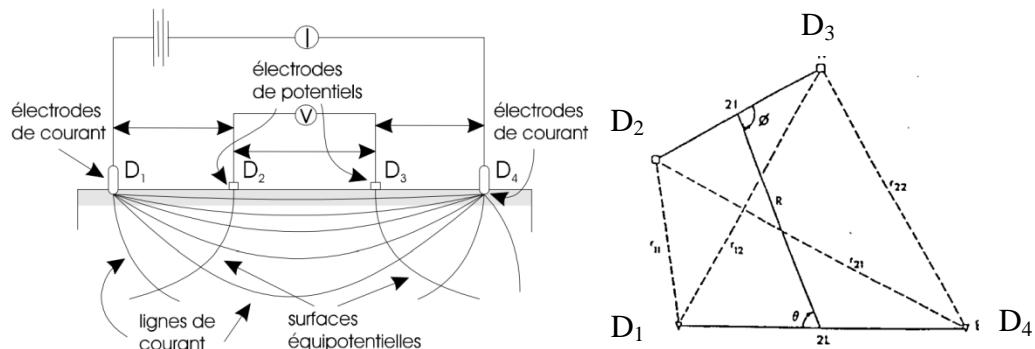


Figure 2-17: Disposition générale des électrodes pour un quadripôle(Chapellier, 2000) et (Rentier, 2002)

La forte différence de résistivité entre la matrice en béton (de 10 à $10^6 \Omega.m$) et de l'acier (10^{-8} à $10^{-7} \Omega.m$) rend cette méthode applicable. Cependant, la complexité des matériaux étudiés a obligé les chercheurs à passer à la notion d'impédance complexe. Il s'agit de relever en fonction de la fréquence du signal la différence de potentiel et de la comparer à l'intensité du courant.

Torrents et al. (2001) et Woo (2005) ont mis en évidence que la présence de fibres dans du béton modifie la résistivité du matériau (Figure 2-18). La réponse du matériau composite est alors caractérisée par un double arc séparé par une impédance réelle (R_{cusp}). Pour des impédances réelles supérieures à R_{dc} , seule la réponse des électrodes est mesurée.

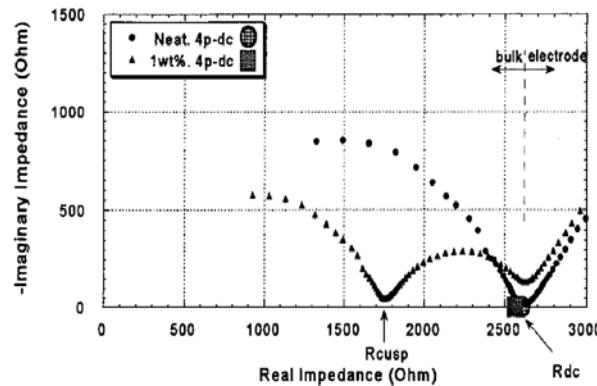


Figure 2-18: Spectre d'impédance à 28 jours pour un béton ($E/C = 0,4$) avec 0% (neat) et 1% de fibres (1wt%)(Torrents, et al., 2001)

De par cette contestation on définit un ratio γ caractérisant la taille de l'arc des basses fréquences :

$$\gamma = (R_{dc} - R_{cusp})/R_{dc} \quad (2-5)$$

Lataste (2007), en couplant une étude visuelle et des mesures de résistivité, a montré que les fibres orientées perpendiculairement au champ électrique présentent la plus forte résistivité (Figure 2-19).

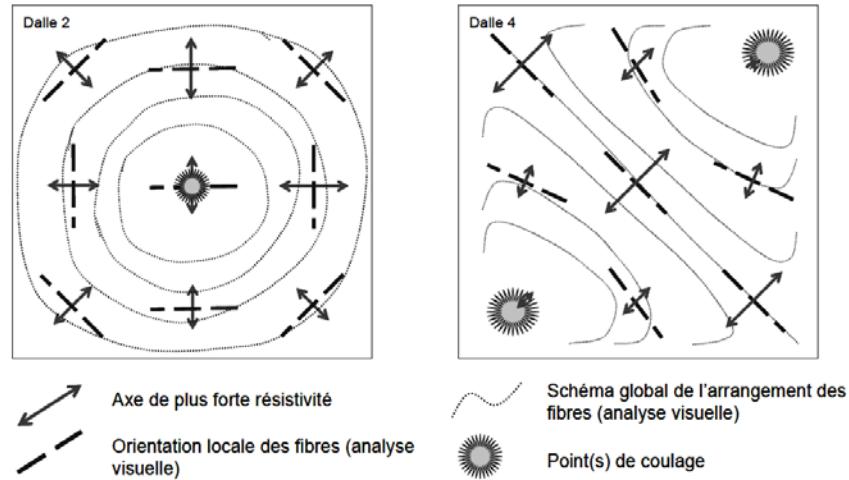


Figure 2-19 Distribution des fibres déduite des mesures de résistivité et issue de l'analyse visuelle (Lataste, 2007).

Torrents et al.(2001) va plus loin dans ses conclusions en étudiant une fibre de 25 mm de long et ayant un diamètre de 0,5 mm plongée dans une solution de résistivité similaire au celle de la matrice de béton. Il conclut que la résistivité du composite est influencée par l'angle formé par la fibre et le courant (Figure 2-20).

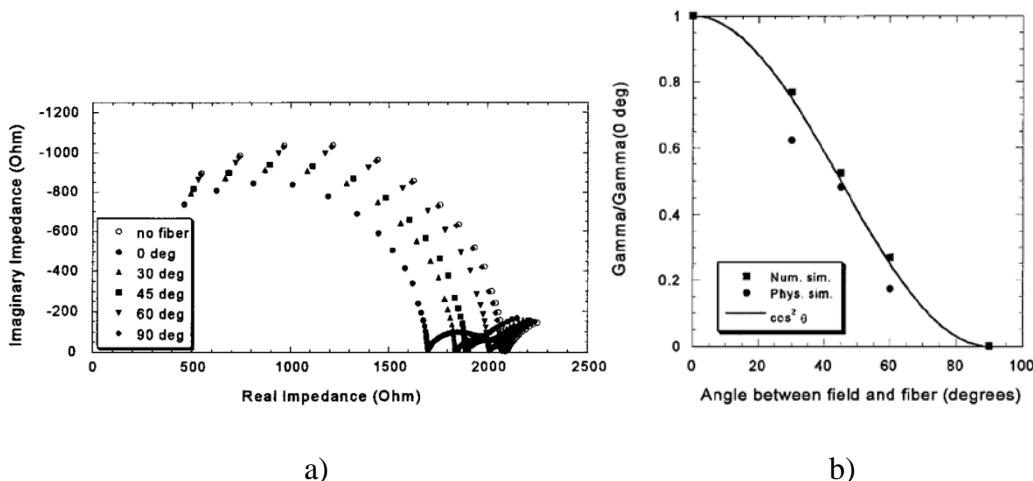


Figure 2-20 a) Réponse spectrale en fonction de l'angle d'inclinaison de la fibre, b) Relation entre angle d'inclinaison et γ (Torrents, et al., 2001)

Lorsque la fibre est perpendiculaire au champ électrique appliqué, la réponse spectrale est identique à la réponse de la matrice seule. Plus l'angle d'inclinaison de la fibre augmente, plus la valeur de R_{cusp} croît et donc γ diminue. Cette tendance confirme bien les résultats de Lataste. Torrents et al.(2001) proposent alors la corrélation suivante :

$$\gamma(\theta) = \gamma(0)\cos^2\theta \quad (2-6)$$

À partir d'une simple mesure de la résistivité, il est donc possible d'évaluer l'orientation des fibres dans une section. En corrélant les relevées d'impédance et les coefficients d'orientation mesurés par traitement d'image sur une poutre en BRF, Ozyurt et al.(2006) a mis en évidence que l'équation de Torrents pouvait être simplifiée par une simple relation linéaire. (Figure 2-21)

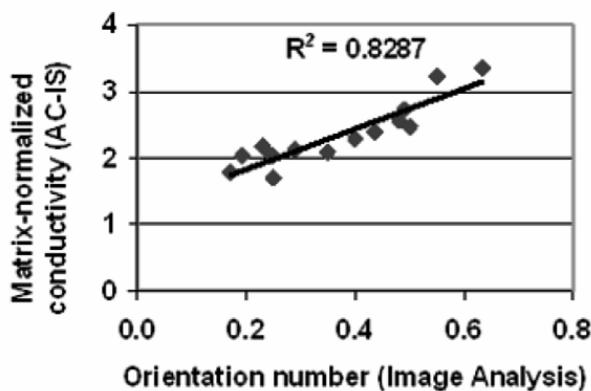


Figure 2-21: Conductivité normalisée en fonction du coefficient d'orientation (Ozyurt et al., 2006)

La méthode électrique présente l'avantage d'être non destructive. Elle peut être utilisée sur des surfaces de grandes dimensions et de façon rapide. Avec des mesures dans plusieurs directions et sur plusieurs faces, la ségrégation des fibres peut aussi être visualisée (Ozyurt et al., 2006).

Cependant, la mesure étant de surface, il est nécessaire de disposer de quadripôle de différentes tailles pour pouvoir sonder l'épaisseur complète du spécimen. En outre, ce dispositif possède un gros défaut : sa sensibilité. Un béton peut avoir une résistivité variant de 10^1 à $10^6 \Omega \cdot \text{m}$ en fonction des conditions expérimentales et de sa composition. La liste des facteurs pouvant influencer les mesures est assez conséquente. Polder (2000) répertorie 3 grands paramètres :

- La date de prise de la mesure : la résistivité augmente avec l'avancement de l'hydratation. Aucune prise de mesure ne peut être effectuée dans les premières heures de la gâchée sous peine de ne mesurer que les bruits dus aux électrodes et aux câbles (Woo et al. 2007).
- La composition du béton et des électrodes : avec une réduction du rapport E/C la résistivité augmente significativement (Figure 2-22). La présence de laitier, de fumée de silice et d'air entraîné modifient la résistivité béton ainsi que les ions en présence. Le choix des électrodes devra donc être réalisé en fonction du mélange étudié. De plus, il a été constaté que de fines couches d'oxygène, d'hydrogène et d'autres gaz peuvent se former à la surface des électrodes et fausser la mesure. À chaque mélange l'appareil doit donc être entièrement calibré.

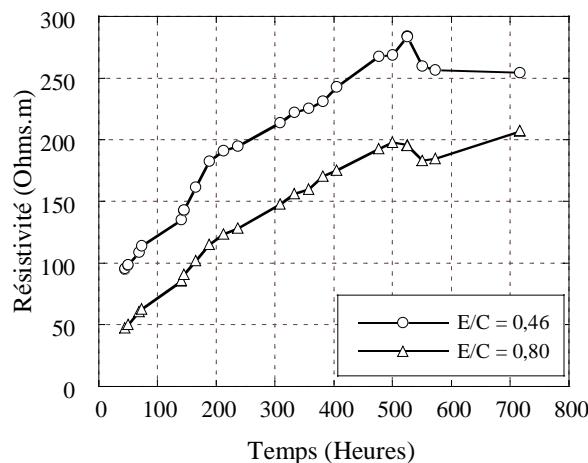


Figure 2-22 : Évolution de la résistivité en fonction du temps et du rapport E/C (Chouteau, 2003).

- Les conditions environnementales : l'humidité relative et la température modifient les mesures effectuées. L'humidité qui pénètre progressivement dans le matériau modifie localement la résistivité et rend l'interprétation des mesures complexe. La température qui a une influence sur la mobilité des ions modifie aussi la conductivité du matériau. Des températures élevées vont entraîner une diminution de la résistivité, pour une humidité relative fixée. Ces mesures ne peuvent être réalisées à des températures négatives. Un environnement contrôlé est donc requis pour avoir des données fiables. Une nouvelle méthode appelée ERT (Electrical Resistance Tomography) est en cours de développement

pour pallier les problèmes d'humidité relative et donc la différence de conductivité de la matrice dans un même échantillon (Karhunen, 2010). Sur le même principe, des recherches sont en cours sur l'utilisation de câbles coaxiaux (Torrents, 2007), mais les épaisseurs d'études restent minimes (15mm).

À ces facteurs viennent s'ajouter les problèmes suivants :

- Les études réalisées ont porté uniquement sur des spécimens de faible épaisseur et sur des BRF : 25 mm pour Torrents et al.(2001), 30 à 50 mm pour Lataste (2007). Seuls les travaux de Ozyurt et al. (2006) et Woo et al. (2006) portent sur des épaisseurs sensiblement identiques à celles pouvant être couramment utilisées dans le domaine de la construction (150 mm).
- La présence d'une armature passive ayant la même résistivité que celle des fibres devrait perturber l'étude de l'orientation des fibres, mais aucun essai n'a encore été réalisé.
- La géométrie des spécimens. Seuls des prismes et le centre de dalles circulaires ont été étudiés. La géométrie complexe de certains éléments, formes curvilignes avec réduction progressive de l'épaisseur, paraissent difficilement analysables avec cette méthode.
- La sensibilité des mesures aux microfissures de retrait et de séchage. Ces microfissures remplies d'air augmentent significativement la résistivité locale du matériau.

La méthode électrique apparaît comme une méthode encore à l'état de développement où beaucoup de questions restent en suspens. De plus, le balayage de fréquence allant de quelques Hertz au MégaHertz nécessite une instrumentation dispendieuse.

2.4.2 Tomographie par approche magnétique

Au vu des problèmes rencontrés lors du développement d'un dispositif *in situ* de tomographie par méthode électrique, Faifer et al.(2010) a décidé de changer de champs d'investigation et de développer une approche magnétique. Cette technique, déjà utilisée depuis près d'un siècle pour le contrôle qualité de pièce en acier, a fait l'objet de recherche plus poussée avec l'avènement des matériaux composites dans l'aéronautique (Watanabe 2003). Tout comme la résistivité, cette méthode se base sur les différences de caractéristique entre l'acier et le béton. En effet, l'acier a

une perméabilité magnétique (μ) 10000 fois supérieure à celle du béton non armé. La densité macroscopique du flux magnétique \overline{B} étant directement proportionnelle au champ magnétique appliqué \overline{H} :

$$\overline{B} = \overline{\mu_{eff}} \cdot \overline{H} \quad (2-7)$$

on peut calculer μ_{eff} la perméabilité magnétique du composite. Lorsque toutes les fibres sont orientées dans le sens du champ appliqué, cette perméabilité s'exprime de la façon suivante :

$$\overline{\mu_{eff}} = \begin{vmatrix} \mu_{eff,1} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{eff,2} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{eff,3} \end{vmatrix}_{(x;y;z)} \quad (2-8)$$

Où

$$\mu_{eff,i} = \mu_0 + \frac{\mu_0 \cdot f \cdot \frac{\mu_{Fe} - \mu_0}{\mu_0 + N_i(\mu_{Fe} - \mu_0)}}{1 - f \cdot \frac{N_i(\mu_{Fe} - \mu_0)}{\mu_0 + N_i(\mu_{Fe} - \mu_0)}} \quad (2-9)$$

avec N_i la valeur de la dépolarisat ion suivant l'axe i, et f la fraction volumique de fibre.

Ainsi, en mesurant la perméabilité magnétique du milieu, on peut avoir accès à la densité de fibre et à l'orientation de ces dernières dans le spéimen considéré. Pour évaluer cette perméabilité, Faifer (2010) propose de mesurer l'inductance équivalente dans le spéimen due au champ magnétique. Seuls une bobine et un générat eur sont nécessaires (Figure 2-23).

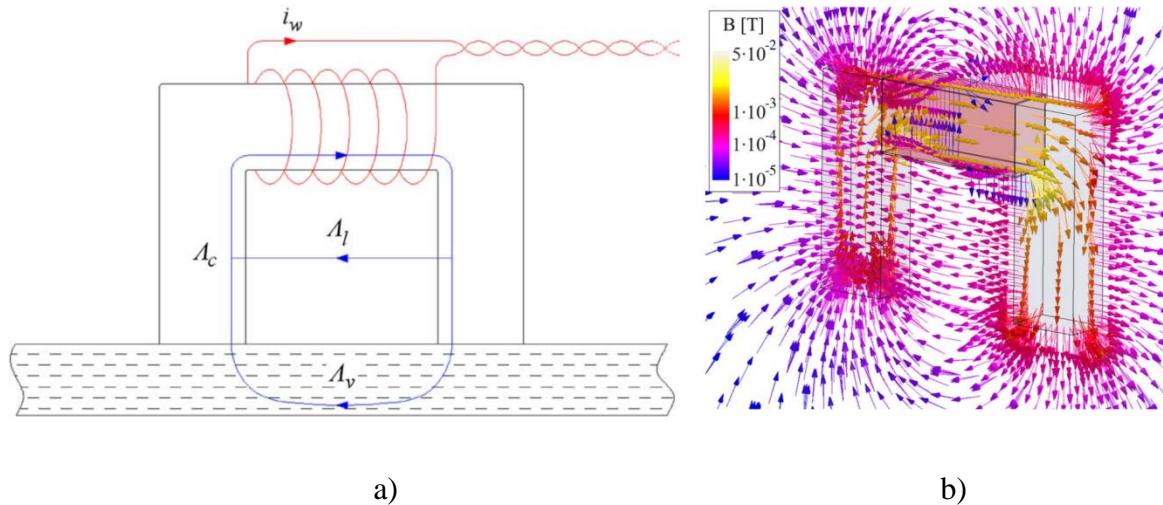


Figure 2-23 : a) Schéma du montage de tomographie par champ magnétique, b) ligne de champs induite par le dispositif (Faifer et al., 2011)

On applique au spécimen un champ magnétique connu à l'aide d'un courant électrique I circulant dans une bobine autour d'un noyau en acier, puis on obtient l'auto-inductance du circuit en mesurant la tension dans la bobine. À partir de cette inductance, on peut déterminer la densité moyenne des fibres. Plus le nombre de fibres est important, plus l'impédance du circuit est grande. Pour définir l'orientation des fibres, il faut faire pivoter le dispositif. En effet, quand l'axe de la bobine et le champ magnétique sont alignés avec les fibres, l'auto-inductance relevée est maximale. Comme le montre la Figure 2-24, l'inductance est d'autant plus forte que l'angle d'inclinaison des fibres est faible. Le fait que l'on observe une symétrie entre les angles positifs et négatifs est important puisque le comportement mécanique d'une fibre est aussi symétrique par rapport à son angle d'inclinaison.

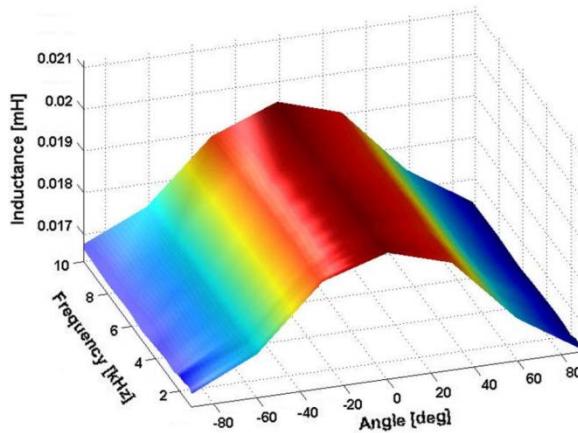


Figure 2-24 : Auto-inductance et angle d'inclinaison des fibres (Faifer et al., 2011).

Le découplage entre la densité de fibre et l'orientation des fibres est toutefois difficile. De plus, les essais réalisés à ce jour concernent des spécimens de faible épaisseur (25 mm) à faible densité de fibres. Lorsque la densité de fibre est trop élevée, ou que des fibres sont trop rapprochées, une interaction se crée entre ces dernières et modifie l'impédance relevée. Il apparait donc difficile d'utiliser cette technique pour des BFUP.

Bien qu'en phase de développement, cette méthode présente les défauts suivants :

- Plusieurs mesures sont nécessaires pour déterminer l'orientation préférentielle des fibres;
- La distribution des fibres ne peut être calculée;
- La faible dimension du système expérimental (130 mm environ) rend cette technique lente
- La présence de barres d'armature avec des fibres rend toutes mesures caduques.
- La méthode est limitée à une faible profondeur d'investigation;
- L'information porte seulement sur l'orientation moyenne des fibres.

2.4.3 Tomographie par rayons X

Les rayons X, découverts en 1895 par Wilhelm Röntgen, ont tout d'abord trouvé leur application dans le domaine médical. Ce n'est qu'en 1949 que Mullins et Pearson ont pour la première fois utilisé cette méthode pour ausculter des pièces en béton. L'utilisation des rayons X, bien que très développée dans l'industrie aéronautique pour le contrôle de pièces de petite taille, peine à se faire une place dans le domaine du génie civil. Son utilisation se limite aux laboratoires de recherche. La tomographie par rayons X a ainsi permis d'observer l'existence de cavité dans le béton, la présence de coulis d'injection dans les conduits de précontrainte, la position des aciers passifs et leur diamètre, les hétérogénéités et les fissures dans le béton, ou encore les défauts de soudure dans les assemblages métalliques(Mix, 2005).

Le rayonnement X, tout comme la lumière visible ou le rayonnement gamma(γ), est un rayonnement électromagnétique (Figure 2-25). Il est caractérisé par un champ électromagnétique sinusoïdal qui se propage à la vitesse de la lumière.

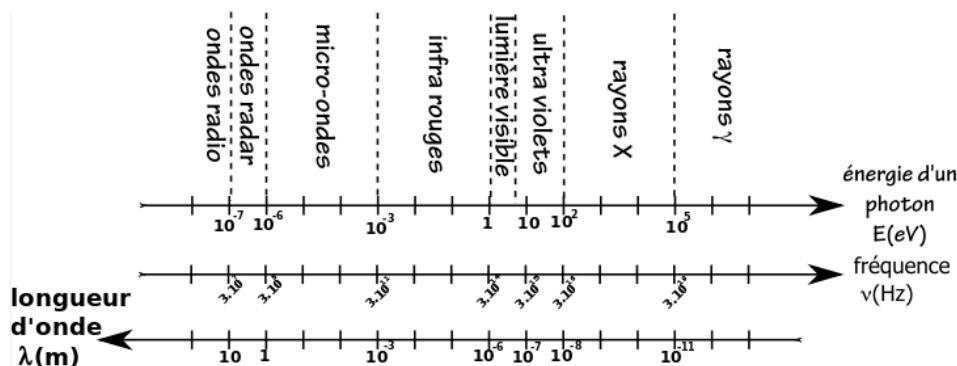


Figure 2-25 : Domaines du spectre électromagnétique en fonction de la longueur d'onde, de la fréquence ou de l'énergie des photons(Lours, 2009).

Les principales caractéristiques de ce rayonnement définies par l'équation (2-10) sont :

- sa fréquence ν exprimée en Hertz;
- sa longueur d'onde λ exprimée en mètres ou en Angströms ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{ m}$);
- son énergie E exprimée en électron-Volts ($1\text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ J}$);

$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \quad (2-10)$$

avec - h est la constante de Planck $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s;

- c la célérité de la lumière dans le vide $c = 3 \times 10^8$ m.s⁻¹.

On distingue deux types de radiographie : la radiographie par rayons X et par rayons gamma. Cette dernière est la plus utilisée, car les rayons gamma sont générés par un radio-isotope spécialement conçu pour pénétrer le béton (Hassani et al. 2004). Le principe de la méthode repose sur la différence d'absorption entre les fibres métalliques et la matrice. La matrice de béton, ayant une densité environ 3,5 fois supérieure aux fibres métalliques, absorbe une plus grande partie du rayonnement. En effet, quand un faisceau de rayons X entre en collision avec de la matière, différents types d'interaction apparaissent en plus d'un dégagement de chaleur (Lours, 2009):

- les rayons sont transmis sans changer de directions;
- Les rayons sont transmis en changeant de direction;
- Les rayons sont absorbés par les atomes. Sous l'action du rayonnement incident, un électron d'un atome de l'échantillon peut être éjecté de la couche électronique qu'il occupait, c'est l'effet photoélectrique. Ce photoélectron peut être remplacé par un électron d'une couche supérieure. Ce saut électronique s'accompagne d'un rayonnement X appelé rayonnement de fluorescence.

La dernière interaction est celle exploitée. La diminution de l'intensité des rayons dépend de la qualité du faisceau, de la densité du matériau et de son épaisseur. La relation entre l'intensité du photon incident et du photon transmis est la suivante :

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (2-11)$$

Avec I : l'intensité du photon transmis;

I_0 : l'intensité du photon incident;

μ : coefficient atténuation du matériau;

x : l'épaisseur de l'objet ausculté.

Le dispositif de mesure classique par radiographie (Figure 2-26b) est composé d'un tube à rayon X, d'un diaphragme qui permet de limiter l'exposition du milieu environnant aux radiations, d'un filtre qui conserve uniquement les longueurs d'onde pour interagir avec le spécimen, d'un écran d'intensification, d'un film correspondant à l'image radio, et d'un écran de plomb pour absorber les radiations résiduelles. Pour le système de radiométrie, le film est remplacé par un détecteur. Le film ou le détecteur est conçu avec un matériau sensible à l'intensité des photons incidents.

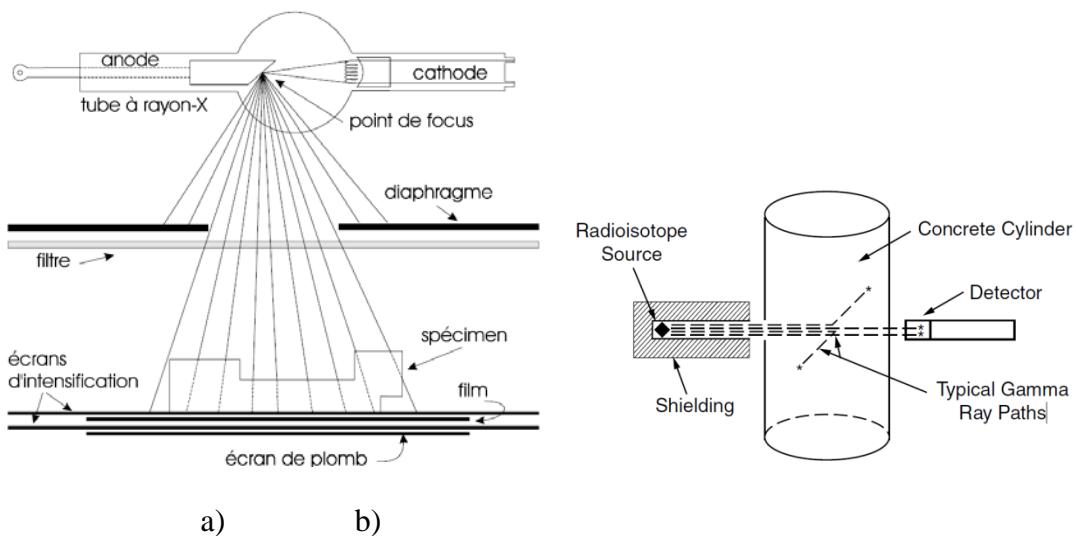


Figure 2-26 : Système a) radiographique à rayons X(Mix, 2005)et b) radiométrique par rayons gamma(Mitchell, 2004)

Pour réaliser une radiographie ou une radiométrie dans les conditions optimales et ainsi accroître de façon significative la qualité des images en sortie, Mix (2005) répertorie cinq grandes règles :

- Le faisceau source doit être aussi petit que possible, idéalement il avoir l'apparence d'un point;
- La source des rayons X doit être éloignée de l'échantillon tout faisant en sorte que la capacité de pénétration des rayons soit suffisante;
- La distance film – spécimen doit être la plus faible possible;
- Les rayons doivent percuter de façon perpendiculaire la surface du spécimen;

- Le film doit être parallèle au spécimen.

Lataste (2009) et Provost (1991) ont utilisé la radiographie pour étudier l'orientation et la ségrégation des fibres dans des échantillons de faibles épaisseurs (15 et 50 mm). La recherche allemande est de son côté allée plus loin en reconstituant des éléments complets en BRF tel qu'illustré à la Figure 2-27 (Weidemann et al., 2008; Krause et al., 2010).

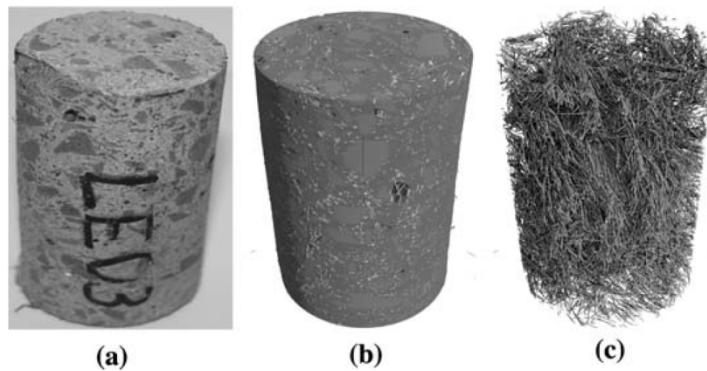


Figure 2-27 : Tomographie à rayons X a) Éprouvette en BRF, b) reconstitution 3D à partir de radiographies, c) image filtrée (Krause et al. , 2010)

Pour arriver à reconstituer de telles éprouvettes en trois dimensions, de nombreuses mesures de radiométrie sont nécessaires. Par exemple, pour reconstituer en 3D un cube de $0,087\text{m}^3$, Weidemann et al.(2008) ont dû réaliser 900 radios avec chacune un angle d'attaque des rayons différents, ce qui lui a pris une trentaine de minutes. À l'heure actuelle, la majeure partie des publications sur cette technique traite des algorithmes de détections et de caractérisation des fibres (Redon et al., 1998 et 1999; Robb et al., 2007; Axelsson et al., 2008). Cette méthode permettrait de déterminer l'orientation et la distribution des fibres, la présence de ségrégation ou de défaut dans la matrice, et ce dans l'ensemble d'une structure en béton fibré. De plus, contrairement à la méthode de résistivité, les barres d'armatures ne posent aucun problème et l'inspection de section de 500 mm de profondeur est parfaitement réalisable.

L'utilisation de cette technique à grande échelle dans des usines de préfabrication reste mitigée. D'une part, Hassani et al. (2004) assurent que cette possibilité est parfaitement envisageable. D'autre part Reinhardt et al.(2001) rappellent que pour simplement radiographier (sans

reconstruction 3D) une poutre à échelle réelle, plus de 2 heures sont parfois nécessaires et des distances de sécurité pouvant avoisiner les 50 mètres sont à prévoir.

Comme le rappelle Mitchell, pour tout appareil contenant une source de matière radioactive, une licence de détention et d'utilisation délivrée par les autorités gouvernementales est obligatoire. Cette licence permet de garantir qu'aucun membre du personnel ne sera exposé de façon inappropriée à des radiations, et qu'un programme de prévention a été mis en place. Ce programme de prévention doit inclure une liste des responsables et des utilisateurs du système ainsi que les formations qu'ils ont suivies, la description des sources radioactives utilisées et des locaux accueillants ces dernières. En effet, il est très important de contrôler l'exposition du personnel aux radiations, car elles sont très nocives pour la santé. À titre indicatif, au Canada la réglementation fixe la dose maximale admissible par personne de radiation ionisante à 50 mSv par an jusqu'à occurrence de 100 mSv tous les 5 ans.

La tomographie par rayons X apparaît comme une méthode possédant un fort potentiel. Une fois les algorithmes de détection des fibres opérationnels et optimisés, cette méthode sera complète, car elle permettra aussi bien de repérer des zones de ségrégation, de déterminer la distribution des fibres, de repérer les défauts dans la matrice, et de calculer l'orientation de chacune de fibres. Cependant, elle se heurte à son caractère dangereux qui peut effrayer bon nombre d'industriel et de membre du personnel. L'acquisition du matériel, la création de lieu dédié, la formation du personnel sont des investissements financiers conséquents et nécessaires, mais qui peuvent à long terme apporter un véritable avantage pour le contrôle qualité et le développement de méthode de coulée.

2.5 Détermination du coefficient d'orientation par méthode destructive

À l'heure actuelle deux méthodes destructrices existent : le comptage et la reconnaissance de formes. Cette dernière n'étant qu'un développement plus poussé de la première. Ces deux méthodes peuvent être appliquées de façon manuelle ou automatisée.

2.5.1 Comptage manuel

En 1975, Krenchel a mis en évidence que l'on pouvait directement déterminer le coefficient d'orientation des fibres à partir du nombre de fibres traversant une section avec l'équation (2-12):

$$n_f = \alpha \frac{V_f}{A_f} = \alpha \frac{V_f}{\frac{\pi d_f^2}{4}} \quad (2-12)$$

où : - n_f est le nombre de fibres par unité de surface;

- α est le coefficient d'orientation;
- V_f est le pourcentage de fibres dans le mélange.

De nombreux travaux de recherche utilisent cette méthode pour valider le développement de méthode alternative (Soroushian et al., 1990; Dupont et al., 2005) ou pour analyser l'influence de l'orientation des fibres sur les propriétés mécaniques du béton (Boulekbache et al. , 2009;Oesterlee,2010). En comparant sur 107 poutres le nombre de fibres traversant une fissure et le nombre théorique de fibres (voir section2.3), Dupont et al.(2005) a montré qu'en moyenne les méthodes expérimentales et théorique sont donné des résultats équivalents. Malgré un ratio nombre de fibre expérimental/nombre de fibre calculé proche de 1, l'écart type constaté est relativement important (0,36). Il n'est pas rare de voir des ratios avoisinants 0,32 ou 2,71. Pour les BRF on peut s'attendre à avoir 1,68 fibre / cm², un comptage manuel est donc envisageable. Il en est autrement pour les BFUP, où l'on peut facilement atteindre les 150 fibres / cm². De plus, cette méthode de comptage manuel ne permet pas d'obtenir la distribution des fibres.

2.5.2 Traitement d'images

Le traitement d'images permet decompter automatiquement le nombre de fibres dans une section et de connaitre la distributionet l'orientation des fibres en une seule analyse. Cette méthode a été sélectionnée pour le projet et sera présentée en détail dans le chapitre 2. Le processus d'analyse est réalisé en 3 étapes :

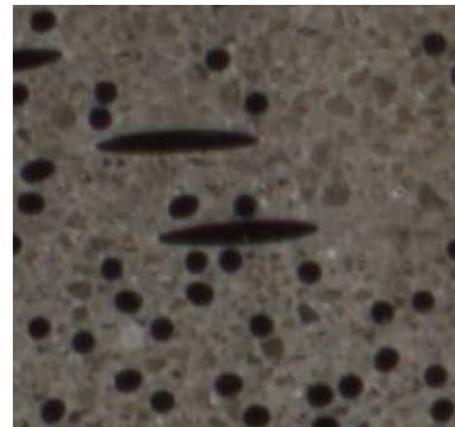
La préparation des échantillons : Des échantillons sont prélevés dans les spécimens de béton à étudier. La découpe est réalisée à l'aide d'une scie à eau, ellesubit localement une forte

augmentation de la température qui se caractérise par des phénomènes de « bavure » autour des fibres. Ces bavures, qui peuvent dans certain cas se rejoindre, empêchent toute automatisation de l'analyse. Afin d'éliminer ce problème, Mlekusch et al.(1999), Hegger et al.(2008) et Wuest et al. (2009) préconisent un polissage minutieux de la surface. Le polissage est essentiel pour la qualité de la surface à analyser.

Comme le montre la Figure 2-28, le polissage, même s'il ne semble pas jouer à première vue un rôle important dans le comptage de fibre, est primordial pour l'évaluation des propriétés des fibres. L'échantillon une fois poli reflète la lumière comme un miroir, ce qui pose problème lors de la numérisation de l'image. Pour résoudre ce problème, Wuest et al. (2009) repolit grossièrement l'échantillon pour rendre la matrice un peu plus rugueuse et ainsi diminuer sa luminosité. Dépendamment du mode de numérisation, une couche d'encre de chine ou une légère humidification est appliquée pour augmenter le contraste entre les fibres et la matrice.



a)



b)

Figure 2-28 : Section d'un échantillon a) brute b) après polissage et contraste inversé (Wuest et al., 2009)

Numérisation de l'image : Deux types de numérisation sont utilisés :

- Hegger et al.(2008) et Grünwald et al. (2002) utilisent un appareil photo pour prendre un cliché numérique de l'échantillon. L'échantillon est éclairé intensément pour augmenter le contraste. Pour éviter tout problème d'ombre, l'appareil est incliné. Pour éliminer

l'inclinaison de l'appareil et la déformation induite par la lentille, une première photo d'un quadrillage est prise. Une deuxième photo est prise une fois le spécimen mis en place. À partir de la différence des deux photos, des paramètres correctifs sont calculés et appliqués à la photo de l'échantillon.

- Wuest et al.(2009) utilisent un scanner grand public de résolution minimale de 2400 dpi (2400 pixels par pouce). L'avantage d'utiliser un scanner est qu'aucune correction de l'image n'est nécessaire après la numérisation.

Le traitement de l'image : La première étape consiste à la binarisation de l'image. À partir d'opérateurs morphologiques ou d'algorithmes de seuillage (chapitre 2) l'image est transformée en noir et blanc. Les fibres potentielles sont représentées par des zones blanches et la matrice de béton par des zones noires. Les propriétés de chaque zone sont évaluées. Si le petit diamètre mesuré est identique au diamètre d'une fibre, alors cet élément est considéré comme étant une fibre. Lorsqu'un plan de coupe intercepte une fibre, l'équation de la section de la fibre dans ce plan est une ellipse d'équation :

$$\frac{x^2}{b} + \frac{y^2}{a} = 1 \quad (2-13)$$

avec

$$b = \frac{d_f}{\cos\theta} = \frac{d_f}{\alpha} \quad (2-14)$$

$$a = d_f \quad (2-15)$$

Ainsi, en mesurant seulement le petit axe et le grand axe des fibres identifiées, on peut facilement obtenir leur coefficient d'orientation. Cependant, ce cas théorique ne s'applique que lorsque la fibre est de longueur infinie. Lorsque l'on considère une fibre de longueur finie, 5 cas de figure supplémentaires sont à considérer (Figure 2-29). L'algorithme de détection des fibres doit alors pouvoir s'adapter et trouver l'ellipse qui correspond le mieux à la géométrie étudiée.

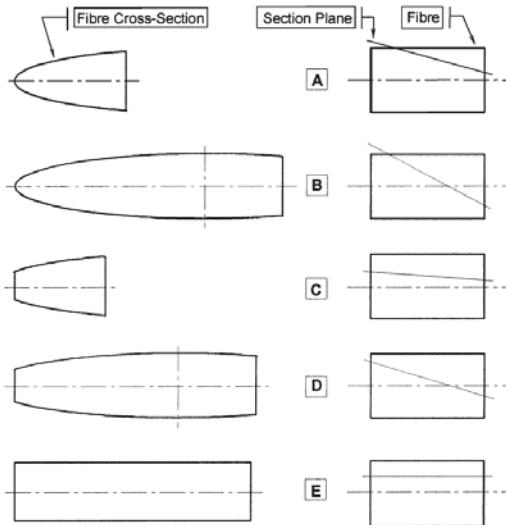


Figure 2-29 : 5 cas supplémentaires d'intersection entre une fibre et un plan (Zhu et al., 1997)

Dépendamment de la méthode d'estimation des propriétés d'une ellipse, l'erreur sur l'angle d'inclinaison mesuré peut varier d'une vingtaine de degrés pour les fibres parfaitement orientées, à moins de deux degrés pour des fibres parallèles au plan de coupe (Figure 2-30).

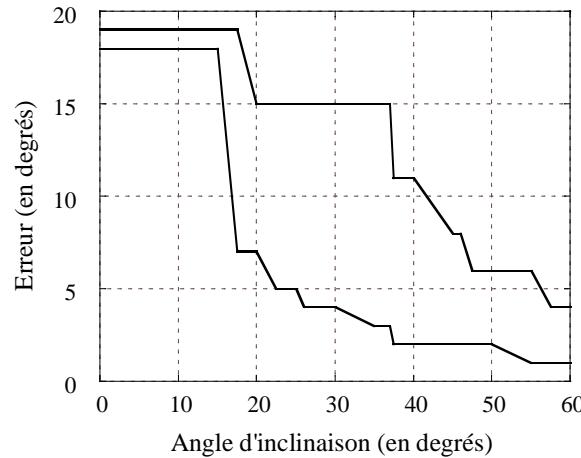


Figure 2-30 : Plage d'erreur classique observée lors de l'évaluation de l'orientation de fibres (Kawamura et al., 2005)

En plus de l'erreur de mesure décrite précédemment, Wuest et al.(2009) énumèrent 4 autres types d'erreur dans le comptage de fibres qui sont illustrées à la Figure 2-31:

- Certaines fibres ne sont pas comptabilisées dû à une mauvaise planéité de l'échantillon;
- Plusieurs fibres sont considérées comme une seule;
- Certaines fibres ne sont pas considérées comme des ellipses;
- Une seule fibre est subdivisée en plusieurs fibres.

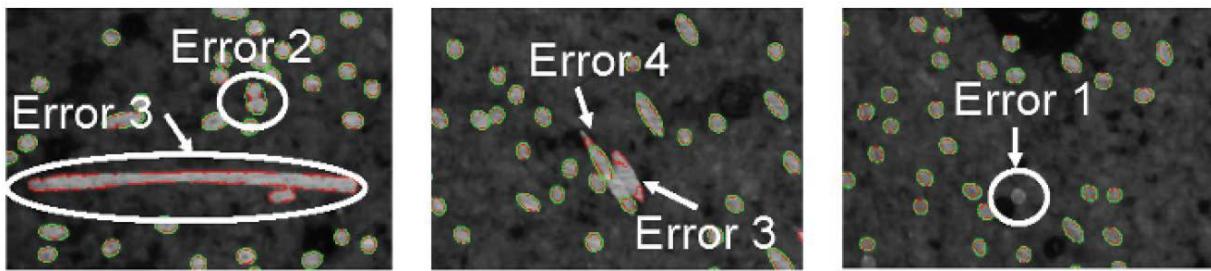


Figure 2-31 : Les 4 types d'erreur rencontrés par Wuest et al.(2009), erreur 1 : non prise en compte d'une fibre, erreur 2 : non dissociation de deux fibres collées, erreur 3 : certaines fibres ne sont pas considérées comme des ellipses, erreur 4 : Une seule fibre est subdivisée en plusieurs fibres

Ces problèmes surviennent à la fois d'erreur lors de la binarisation et lors de l'évaluation des fibres potentielles. Wuest a évalué que ces erreurs ne dépassent pas 5% en nombre de fibres comptabilisées. Lors de l'utilisation de la méthode de traitement d'images, il faut donc s'attendre à une sous-estimation du coefficient d'orientation. Dans le cadre d'un contrôle qualité, ceci est préférable au vu des résultats présentés à la section 2.2.2. On se trouve ainsi du côté sécuritaire.

La méthode de traitement d'images apparaît comme l'une des plus complètes. En effet, elle permet en une seule analyse d'obtenir les informations suivantes :

- Le nombre de fibres;
- La position des fibres dans la section;
- La distribution du coefficient d'orientation dans la section.

L'emploi de cette méthode présente deux désavantages :

- La distribution et le nombre de fibres obtenus ne sont valables que pour un seul plan de coupe. Il serait intéressant de coupler cette méthode à une des méthodes non destructives, par exemple la méthode par résistivité. Ce couplage permettrait de réduire le temps de préparation des échantillons et de se concentrer uniquement sur des zones d'analyse essentielles.
- L'allocation mémoire nécessaire à la réalisation des calculs limite la taille des échantillons à 50 cm^2 . Cependant, en décomposant l'image de base en plusieurs sous-images il est possible d'analyser des surfaces bien plus grandes.
- Le temps requis pour la préparation des surfaces à analyser est important (carottage et polissage).

2.6 Conclusion

La compréhension du rôle de la distribution et du coefficient d'orientation des fibres dans les bétons renforcés de fibres apparaît primordiale pour promouvoir leur utilisation dans l'industrie de la construction et de la préfabrication. De plus, une bonne connaissance des propriétés mécaniques du béton en fonction du coefficient d'orientation permettrait d'optimiser les sections et ainsi réduire les coûts de fabrication. De nombreuses méthodes de détection de l'orientation des fibres sont en cours de développement, mais leur utilisation reste pour la grande majorité réduite à une utilisation en laboratoire. La tomographie par rayons X et la méthode destructive par traitement d'images sont les deux techniques qui permettent d'obtenir à la fois la distribution des fibres, la distribution du coefficient d'orientation et le nombre de fibres en une seule mesure. Le couplage de plusieurs techniques pourrait réduire de façon significative les temps de travail et de traitement des données. Le Tableau 2-3 résume les avantages et les inconvénients de chacune des méthodes décrites. La suite de ce mémoire portera sur le développement et l'utilisation de la méthode de traitement d'images.

Tableau 2-3 : Avantages et inconvénients des méthodes de détermination de l'orientation des fibres dans les bétons renforcés de fibres

Méthode	Avantages	Inconvénients
Méthode analytique	<ul style="list-style-type: none"> Rapide à utiliser Indépendant du type de fibres utilisées 	<ul style="list-style-type: none"> Indépendante de méthode de coulée Non applicable à des géométries complexes Non-unanimité dans les résultats
Résistivité électrique	<ul style="list-style-type: none"> Méthode non destructive Rapide d'exécution 	<ul style="list-style-type: none"> Sensible aux facteurs environnementaux Faibles profondeurs d'auscultation Pas d'essais en présence d'armature et de fibres
Approche magnétique	<ul style="list-style-type: none"> Méthode non destructive 	<ul style="list-style-type: none"> Nombreuses mesures nécessaires Applicable seulement au faible dosage sans armatures passives Faible profondeur d'investigation
Rayons X	<ul style="list-style-type: none"> Méthode non destructive Information sur la distribution, l'orientation et la répartition des fibres dans tout l'échantillon 	<ul style="list-style-type: none"> Licence et lieu dédié nécessaires Personnels qualifiés La durée d'analyse peut vite devenir longue
Traitement d'images	<ul style="list-style-type: none"> Information sur la distribution, l'orientation et la répartition des fibres dans tout l'échantillon Matériel peu onéreux et non spécialisé 	<ul style="list-style-type: none"> Méthode destructive Dépend de la qualité des échantillons Temps de préparation long Une seule section étudiée

Chapitre 3 : Mesure de la distribution et de l'orientation des fibres par analyse d'images

De nombreuses techniques présentées au chapitre 2 sont en cours de développement pour caractériser l'orientation des fibres dans les bétons renforcés de fibres métalliques. Une ébauche de programme automatisé de détection de fibres basée sur la méthode de Wuest et al. (2009) a été développée par Lee (2009) à l'École Polytechnique de Montréal. Cependant, la précision des résultats est demeurée limitée dans cette phase de développement. Dans le cadre du présent projet, une refonte du programme de Lee (2009) a été planifiée afin d'améliorer la précision de la détection des fibres et de la mesure du coefficient d'orientation des fibres. Ce chapitre traite des modifications apportées au programme. Dans un premier temps, les divers algorithmes testés permettant la détection automatique d'ellipses seront présentés, puis l'algorithme développé sera décrit. Enfin, la méthode de préparation des échantillons sera détaillée.

3.1 Les algorithmes de détection d'une ellipse

Le développement d'algorithme pour la détection automatique de forme a connu un développement important ces dernières décennies avec les progrès de l'informatique. Ils ont avant tout été développés pour créer des systèmes de sécurité et pour automatiser les productions industrielles. Ces algorithmes permettent en plus de détecter certaines formes géométriques et de mesurer les dimensions des objets recherchés. Le tri automatique du courrier ou encore l'assistance pour stationner les voitures sont deux exemples d'applications qui sont utilisées quotidiennement.

Le traitement d'images est un domaine complexe, car il n'existe pas de méthode universelle pour analyser une image. La méthode de numérisation, la résolution ou encore la qualité de l'échantillon de base sont autant de paramètres qui peuvent influencer le succès d'une méthode comparativement à une autre. Le traitement d'une image est une succession d'opérations, dont les résultats dépendent directement de l'opération précédente, permettant de répondre à une ou des problématiques. Dans ce domaine, Serra (2000) répertorie trois grands types de problèmes : la codification, l'extraction de caractéristiques et la segmentation. La codification et l'extraction

sont les deux aspects présents dans notre problématique. En effet, dans un premier temps une numérisation des surfaces des échantillons en béton est nécessaire (codification), puis une amélioration de la qualité de l'image obtenue pour mettre en évidence quelques-unes de ses caractéristiques (extraction) est à envisager. L'une des caractéristiques recherchées est la taille des ellipses formées par la coupe des fibres sur la surface de béton analysée. Pour obtenir les paramètres d'une ellipse, trois grandes étapes sont alors utilisées: l'acquisition, la binarisation et l'estimation des paramètres. Cette section du chapitre n'a pas pour but de présenter de façon détaillée les aspects théoriques des différents algorithmes, mais présente de façon brève les choix disponibles au programmeur.

3.1.1 Qu'est-ce qu'une image numérique?

Une image numérique est un signal 2-D qui représente généralement une réalité 3-D (Figure 3-1). Ce signal peut être composé de valeurs scalaires (image à niveaux de gris) ou vectorielles (image couleur). Une image est représentée par une matrice I de n lignes et m colonnes. Les éléments de cette matrice sont appelés pixel. Ce dernier est désigné par un couple $(i,j) \in \llbracket 1; p - 1 \rrbracket \times \llbracket 1; q - 1 \rrbracket$ où p est la hauteur de l'image (c'est-à-dire indice de ligne) et q la largeur de l'image (c'est-à-dire indice de colonne). Par convention Matlab[®] considère le pixel en haut à gauche comme étant le pixel d'origine $I(0,0)$.

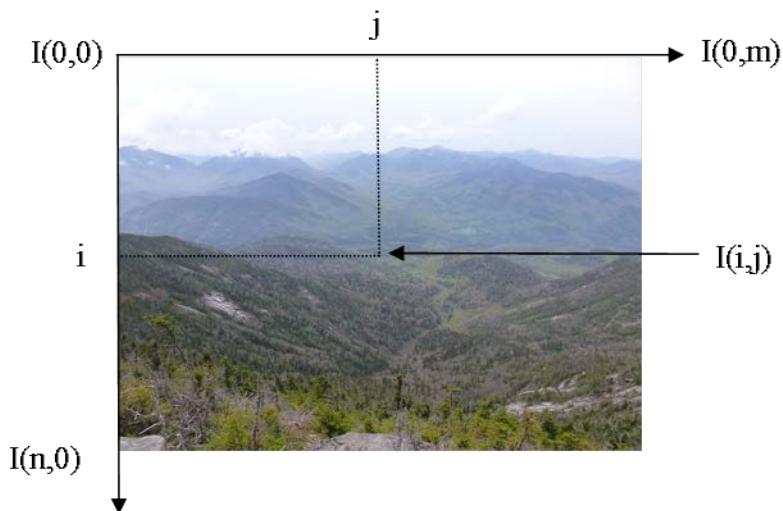
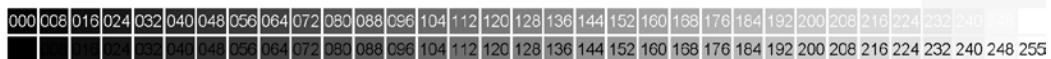


Figure 3-1 : Convention de notation pour la représentation d'une image sous Matlab[®]

Une image numérique peut être formalisée comme un modèle mathématique comprenant une représentation fonctionnelle de la scène et celui d'un processus de capture, auquel s'ajoute un bruit (Solomon et al., 2010). La représentation fonctionnelle de la scène correspond à la lumière renvoyée par l'objet sur l'instrument de capture. Le processus de capture est quant à lui la façon dont l'instrument de capture, caméra ou scanner, transcrit l'information en binaire. Enfin, le bruit correspond à toutes les perturbations non désirées qui apparaissent lors de la prise de l'image. L'utilisation d'un scanner permet de diminuer le bruit additionnel en supprimant les défauts de planéité, de parallélisme entre le système de capture et l'échantillon, les ombres et les jeux de lumière intempestifs.

La qualité de l'image est limitée par la capacité du capteur, sa résolution exprimée en dpi (pixels par pouce) et par résolution tonale qui est le nombre de bits d'information pour coder une image. Plus la résolution est élevée, plus les petits détails seront discernables. Il en est de même pour le nombre de bits, plus ce nombre est élevé, plus les petits changements seront observables. La majorité des scanners utilise actuellement un système de codage sur 8 bits. Ainsi, pour coder une image en niveau de gris, la plage de couleur allant du blanc ($2^8 - 1 = 255$) au noir ($2^0 - 1 = 0$) va s'échelonner de 0 à 255 (la Figure 3-2).



Le format d'enregistrement de l'image numérisée est tout aussi important. Plus de 5 formats sont actuellement disponibles : JPEG, GIF, PNG (Portable Network Graphic), BMP (BitMap) et RAW. Le format JPEG est à l'heure actuelle le format le plus utilisé de par le monde, car il offre une taille réduite des images en les compressant, ce qui le rend pratique pour l'affichage ou le transfert d'images. Cependant ce fort taux de compression entraîne une forte perte d'information. Ce format est donc à éviter pour le traitement des images. Le format GIF présente lui aussi des tailles de fichiers assez réduites, mais les images ne peuvent être enregistrées qu'avec 256 couleurs. Le PNG est un des formats les performants, car il permet combiner les avantages des deux formats précédents. Il permet un codage sur 24 bits, identique au JPEG. Son avantage réside dans le fait qu'il inclut un algorithme de compression sans perte de données. Son principal défaut est que peu de logiciels proposent son utilisation. Le BMP et le RAW n'incluent aucun algorithme de compression, ainsi l'image obtenue est l'exacte représentation des informations reçues par le capteur. Cependant, la non-utilisation d'un algorithme de compression est aussi leur plus gros défaut, puisque les fichiers obtenus nécessitent des espaces de stockage importants. Il est à noter que le RAW est seulement disponible sur certains types d'appareil photo. Les formats à privilégier lors de la numérisation des échantillons sont donc le PNG, le BMP et le RAW.

3.1.2 Binarisation de l'image scannée d'une section de béton fibré

Le traitement d'une image étant séquentielle, une attention particulière doit être portée à cette étape, car elle conditionne les étapes suivantes et peut porter préjudice à la suite du processus de reconnaissance de forme. En effet, la binarisation étant une étape irréversible, les informations supprimées le sont de façon irréversible.

3.1.2.1 Seuillage de l'image

Dans le cadre de la problématique étudiée, l'image issue de la numérisation en niveaux de gris comporte deux types d'informations, le fond (matrice cimentaire) et les objets (fibres métalliques). La binarisation permet de convertir l'image numérique en une image bicolore (noir et blanc) et ainsi fait ressortir de façon plus marquée les fibres de la matrice cimentaire. De plus, l'image obtenue est codée seulement sur 1 bit, ce qui diminue de façon significative la taille du fichier. La majorité des méthodes de binarisation sont basées sur la détermination d'un seuil afin

de limiter les deux classes d'objets. L'évaluation de la valeur seuil peut être réalisée de façon globale ou locale. L'approche globale considère l'ensemble de l'image pour déterminer ce seuil et l'applique à chacun des pixels. Dans l'approche locale, le seuil est calculé au voisinage du pixel, sans ou en considérant le pixel traité (seuillage local dynamique). Il existe plus d'une cinquantaine de méthodes pour évaluer la valeur des seuils locaux ou globaux. Sezgin et al. (2004) ont comparé une quarantaine de méthodes différentes.

- Seuillage global :

Le principe consiste à analyser l'histogramme des niveaux de gris de l'image (Figure 3-3) et de déterminer le seuil qui permet de séparer les deux classes d'objets (le fond et l'objet). Ce seuil est ensuite appliqué à l'ensemble de l'image selon l'équation (3-1) :

$$I(i,j) = \begin{cases} 0, & I(i,j) > \text{seuil} \\ 1, & I(i,j) < \text{seuil} \end{cases} \quad (3-1)$$

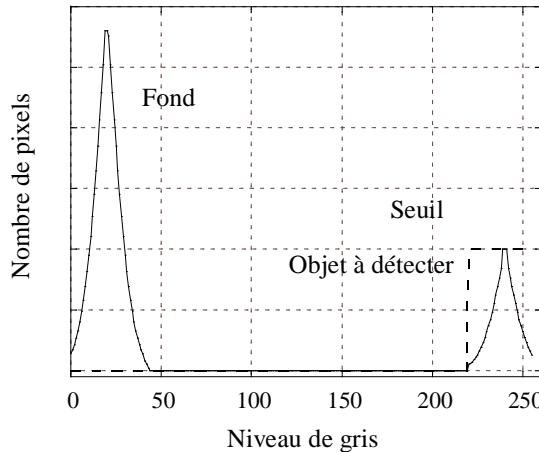


Figure 3-3: Histogramme idéalisé à niveau de gris pour l'utilisation d'un seuillage global

Les méthodes de seuillage global sont simples et rapides à paramétrier. Toutefois, pour être applicable l'image doit présenter un contraste très élevé, ce qui est rarement le cas. L'utilisation de l'histogramme complet de l'image rend la détection de maximum locaux difficile. Sur l'histogramme d'un échantillon de béton fibré présenté à la Figure 3-4, la détermination du seuil global de binarisation est très difficile à déterminer. La taille des objets à détecter comparée à la

taille de l'image étant très faible, les pixels correspondants aux objets potentiels ne sont généralement pas détectés. Ces deux classes d'objets peuvent ponctuellement présenter des valeurs de niveaux de gris similaires et un niveau de gris inconstant dans l'échantillon rendant l'analyse encore plus complexe.

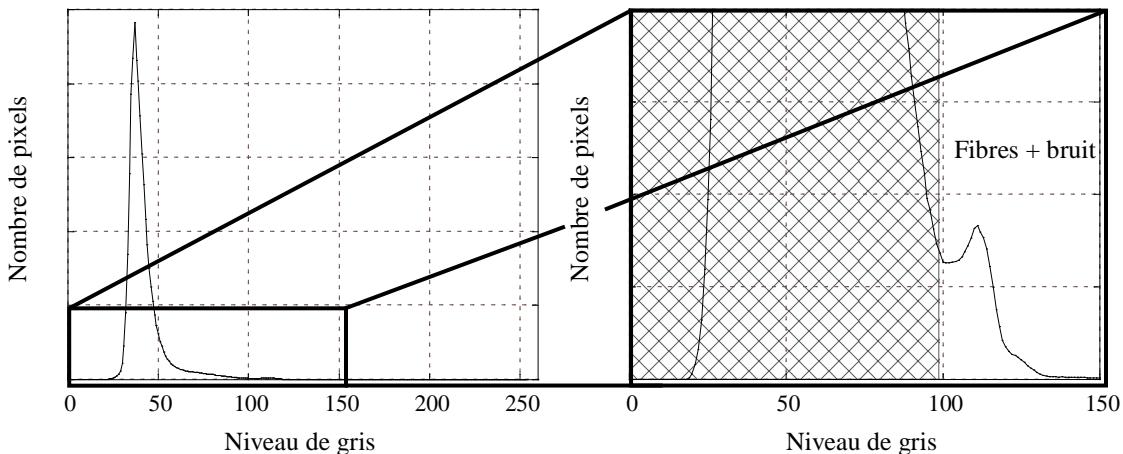


Figure 3-4: Histogramme global d'un échantillon de béton fibré

- Seuillage local :

Le calcul du seuil est déterminé pour chaque pixel ou un groupe de pixel et non pour l'ensemble de l'image. Néanmoins, la détermination de la taille des zones est complexe, et la qualité du résultat dépend de sa réussite. La Figure 3-5 présente deux histogrammes, de la même image, obtenus à partir de deux tailles de zonages différentes. Le caractère bimodal du premier zonage étant plus marqué, la détermination du seuil de binarisation sera plus aisée. Le découpage en zone va entraîner la dissociation de nombreuses fibres en morceaux. Certaines parties de la fibre vont alors être confondues avec le fond ce qui va réduire par la suite la qualité de l'analyse. Cette méthode va être très sensible au bruit, dans le cas de zones stationnaires par exemple (fond ou nombre de fibres important).

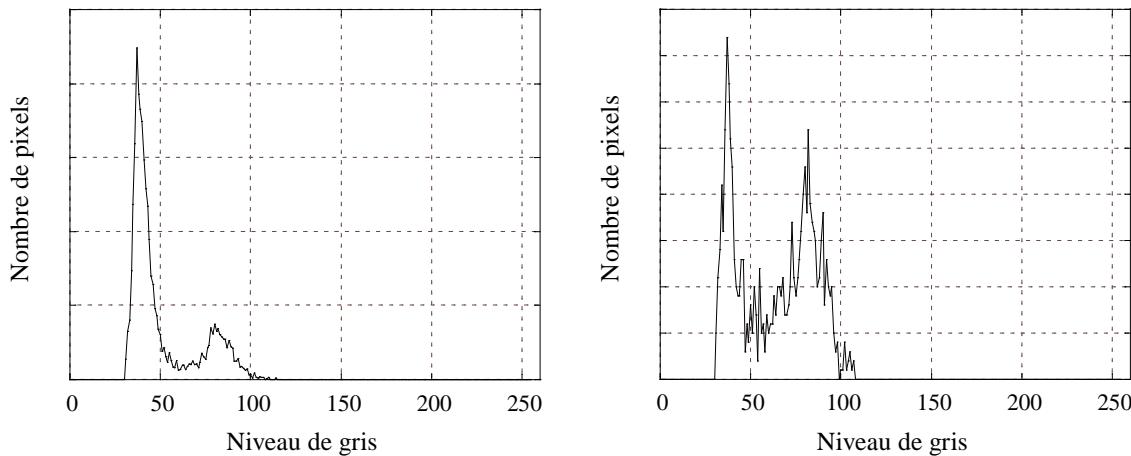


Figure 3-5 : Histogrammes obtenus par deux tailles de zonages différentes

Une taille de zonage mal évaluée peut entraîner la suppression d'informations ou l'apparition de zones fortement bruitées. Les méthodes de détermination de seuils locaux pouvant être les mêmes que pour les seuils globaux, on retrouve dans une moindre mesure les mêmes problèmes.

- Seuillage par ligne de partage des eaux (LPE) :

La segmentation par la ligne de partage des eaux, développée par Beucher et Lantuejoul, est une méthode issue de la morphologie mathématique (domaine des mathématiques qui traite de la théorie des ensembles appliquée à la reconnaissance de forme). La LPE peut être programmée de deux manières : par distances géodésiques (méthode de Meyer), ou par immersion (méthode de Vincent-Soille). Bien que l'algorithme programmé dans Matlab® soit celui de Meyer(The MathWorks, 2011b), la méthode proposée par Vincent-Soille sera utilisée à des fins d'illustration. Le concept de la LPE provient de l'hydrogéologie. Il considère une image à niveaux de gris comme un relief topographique. La limite de partage des eaux est considérée comme étant la crête formant la limite entre deux bassins versants. La méthode par immersion consiste, à partir du plus petit minimum régional (Figure 3-6 a), à éléver progressivement le niveau d'eau jusqu'au niveau de gris maximal équivalent. Lorsque les eaux de deux minima différents se rencontrent (Figure 3-6 d), un barrage est construit pour éviter tout mélange. Ce barrage est appelé ligne de partage des eaux.

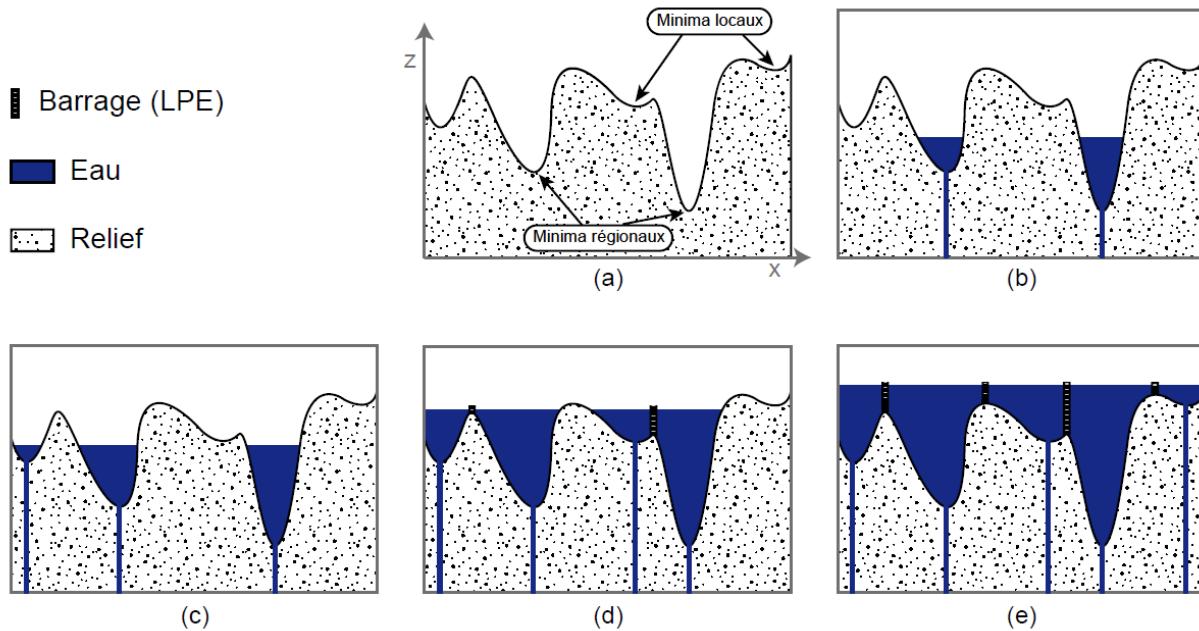


Figure 3-6 : Principe de la ligne de partage des eaux, en 2D(Roduit, 2007).

Généralement, la LPE n'est pas directement appliquée à l'image brute, mais à son gradient. Si cette méthode est appliquée à l'image de base, on constate une très forte sursegmentation, car tous les minimums sont pris en considération. Pour pallier à cette sursegmentation, il existe trois méthodes : le filtrage de l'image originale permet de supprimer tous minima non significatifs, choisir le nombre de minima locaux que l'on souhaite analyser grâce à l'utilisation de marqueurs, réappliquer une seconde LPE (Serra, 2000). Néanmoins la LPE présente les désavantages suivants (Makni et al., 2003):

- Même après le filtrage de l'image à analyser, plusieurs minima locaux indésirables perdurent. Ainsi, de nombreuses zones parasites apparaissent lors de l'analyse;
- Lorsque l'on choisit le nombre de minima, il faut déterminer de façon manuelle les marqueurs;
- Cette méthode ne permet pas de dissocier à elle seule le fond des objets à analyser;
- Elle utilise une mémoire vive importante, représentant de 3,5 à 11 fois le nombre de pixels de l'image.

3.1.2.2 Détection des contours des ellipses représentant les fibres

La détection des contours consiste à repérer les changements brutaux de niveaux de gris dans une image. Cette méthode consiste à utiliser des opérateurs mathématiques permettant d'étudier les variations de la dérivée première et de la dérivée seconde des niveaux de gris. La présence d'un contour est caractérisée par une dérivée première maximale et une dérivée seconde nulle. Trois modèles de contours idéalisés sont actuellement utilisés dans l'ordre(Maître, 2003) : la marche d'escalier, la rampe et le toit (Figure 3-7).

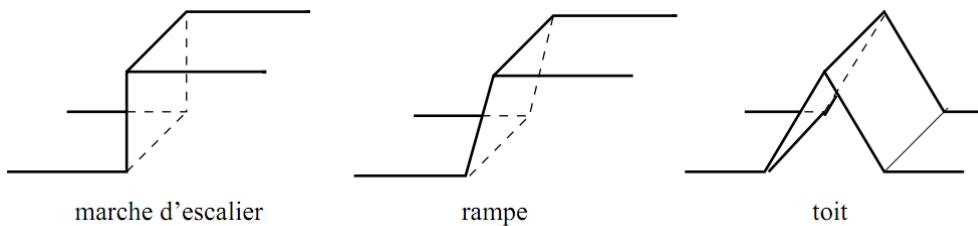


Figure 3-7 : Modèles de contours (Maître, 2003).

- Détecteurs par filtrage :

Cette méthode consiste à appliquer dans un premier temps, un filtre passe-bas pour lisser le fond et ainsi réduire le bruit, puis à appliquer un filtre passe-haut. Néanmoins, elle est difficilement applicable lorsque la différence de niveaux de gris entre le fond et les objets est faible.

- Détecteurs par masques :

Cette méthode permet d'estimer la valeur des dérivées premières et/ou secondes en un pixel donné, pour cela un filtre ou un masque est utilisé. Un filtre se présente sous la forme d'une matrice généralement 2x2 ou 3x3. Les filtres les plus courants sont présentés à la Figure 3-8. Le filtre Sobel étant le plus utilisé.

$\begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{vmatrix}$
Sobel	Roberts	Gradient	Prewitt

Figure 3-8 : Filtres verticaux pour la détection de contours (Maître, 2003).

Le filtre étudie successivement chacun des pixels de l'image. Pour chaque pixel considéré, il multiplie la valeur de ce pixel et des 8 pixels qui l'entourent par la valeur correspondante dans la matrice filtre ou la matrice de convolution. Il additionne l'ensemble des résultats et le pixel initial prend alors la valeur du résultat final.

Des filtres plus évolués tels que les filtres de Canny, de Deriche ou de Shen et Castan permettent généralement d'obtenir des résultats de meilleure qualité. En effet, leur principe est d'optimiser trois fonctions qui correspondent aux 3 critères suivants (Maître, 2003):

- Garantir une bonne détection, et ce, même dans le cas où les contours ne sont pas marqués;
- Garantir une bonne localisation;
- Garantir une seule détection par contour.

Pour obtenir le filtrage complet de l'image, tous les filtres présentés doivent être appliqués dans les deux directions, puis les deux matrices obtenues doivent être combinées pour former l'image finale. Ainsi, cette dernière image présente une accentuation des contours et un lissage du fond. Le problème de ces filtres est qu'ils sont isotropes, en fonction du sens de lecture, l'image obtenue peut être de plus ou moins bonne qualité.

D'autres techniques de contour existent telles que les contours actifs, ou snake, mais elles nécessitent que l'utilisateur trace un premier contour grossier. Ces filtres ne sont pas abordés, car ils ne sont pas automatisables.

- Filtrage par morphologie :

Le filtrage par morphologie est basé sur la théorie des ensembles. Les opérateurs morphologiques privilégient la notion de forme plutôt que l'information sur les niveaux de gris. Les méthodes de filtrage par morphologie sont issues de la morphologie mathématique développée dans les années soixante par J. Serra et G. Matheron pour étudier les matériaux poreux. Ce filtrage consiste à étudier les relations entre une image et un élément structurant dont l'utilisateur détermine la taille et la forme.

$\begin{matrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{matrix}$
Croix	Carré

Figure 3-9 : exemples d'éléments structurants binaires

Le filtrage morphologique s'appuie sur deux opérateurs duals, l'érosion et la dilatation. Le principe de ces deux opérateurs est de placer successivement sur chaque pixel l'élément structurant. Dans le cas de l'érosion sur une image en niveau de gris, le pixel central prend la valeur minimale des pixels voisins. La dilation prend à l'inverse la valeur maximale.

L'érosion d'une image en niveaux de gris va permettre de diminuer le bruit dans les zones de fond et uniformiser les niveaux de gris dans les objets. Il est à noter que les objets restants vont être de taille réduite par rapport aux objets de l'image de référence. Il est possible d'utiliser par la suite une dilatation pour récupérer partiellement les contours d'origine des objets restants. Après une opération d'érosion ou une opération de dilation, il faut reconstruire l'image.

La binarisation de l'image apparaît comme une étape cruciale dans le développement d'un programme de reconnaissance de forme. De plus, le nombre important de techniques, leur combinaison et le caractère unique de chaque image rend complexe sa réalisation de manière automatique tout en préservant au mieux les informations pertinentes. Seul l'essai de chacune de ces méthodes permettra de déterminer quelle est la méthode la plus adaptée à résoudre la problématique rencontrée.

3.1.3 Évaluation des propriétés de l'ellipse représentant une fibre

Une fibre interceptée par un plan de coupe prend la forme d'une ellipse. Pour déterminer les propriétés dans une image quelconque, cinq paramètres sont à identifier : le centre de l'ellipse, le grand axe, le petit axe et l'inclinaison de l'ellipse dans le plan. Une fois ces cinq paramètres identifiés, l'orientation hors plan de l'ellipse ou le coefficient d'orientation est évalué selon l'équation (2-15). Quatre méthodes sont utilisées régulièrement dans la littérature : la transformée de Hough, la « bounding box », les points extrêums et le second moment d'aire

3.1.3.1 La transformée de Hough

Cette méthode a fait l'objet de nombreuses publications ces dernières années (McLaughlin, 1985; Aguado et al. 1995; Yonghong et al., 2002; Hahn et al., 2007; Fei et al., 2009). Elle consiste à évaluer pour chaque point de contour les propriétés associées à la forme recherchée, à partir de considérations géométriques. Pour chacun de ces points, les valeurs calculées sont accumulées dans un tableur. Les propriétés finales de l'objet sont alors considérées comme étant les valeurs qui reviennent le plus souvent dans le tableur. Cette méthode demande un grand nombre de points de contours pour pouvoir être effective. De plus, l'étude d'une partie ou de tous les points nécessite un temps de calcul et une capacité mémoire importante. Néanmoins, cette méthode permet de limiter les effets du bruit sur le résultat final.

3.1.3.2 La « bounding box »

Pour déterminer les cinq paramètres de l'ellipse, Chang (2006) propose d'utiliser les propriétés de la « bonding box » (BB). Elle est définie comme étant le plus petit rectangle pouvant contenir une ellipse (Figure 3-10).

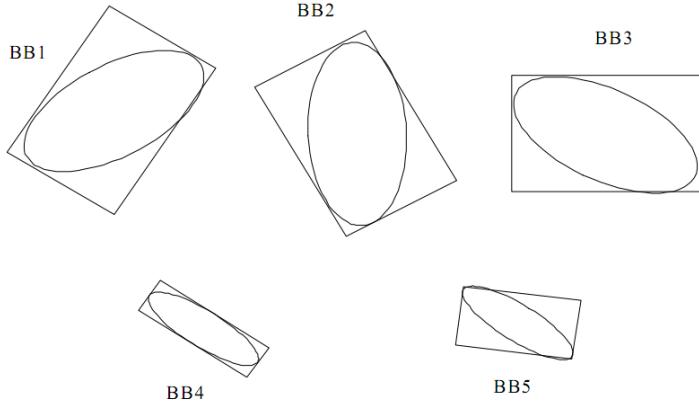


Figure 3-10: Exemples de « Bonding box » (Chang, 2006)

Cette approche se déroule de la façon suivante. Dans un premier temps, l'image est balayée pour déterminer les « bounding box » de chaque ellipse. Le centre de la BB coïncidant avec le centre de l'ellipse, le centre de l'ellipse est facilement évalué. Puis, pour chaque pixel appartenant au contour de l'objet, la distance pixel centre est évaluée. La distance maximale est considérée comme étant égale au demi-grand axe. Le petit axe correspond quant à lui à la plus petite distance en partant du centre dans la direction orthogonale au grand axe.

Chang (2006) considère cette méthode comme plus rapide que la transformée de Hough et moins exigeante en mémoire vive. Cependant, aucun tableau comparatif n'est présenté concernant le temps de calcul ou les erreurs obtenues. Enfin, les exemples fournis ne considèrent que des ellipses parfaites.

3.1.3.3 Points extrêums de l'ellipse :

Dans une approche de base similaire à Chang (2006), Haralick et al.(1992) évalue les axes de l'ellipse à partir de 4 points extrêums. Il définit les points extrêums d'une ellipse comme étant les points présentant les plus grandes ou les plus petites coordonnées dans chacune des directions (Figure 3-11)

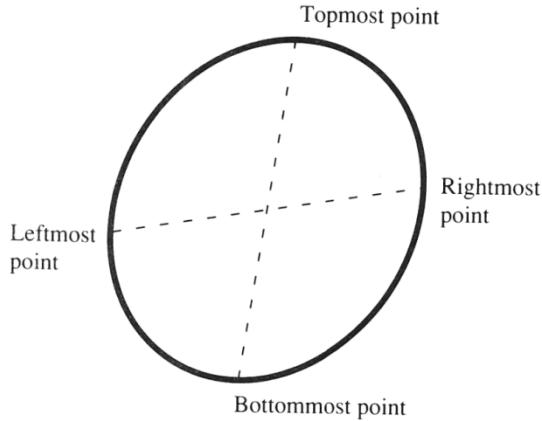


Figure 3-11 : Points extréums d'une ellipse selon Haralick et al.(1992)

La démarche de base consiste à balayer l'image pour en obtenir les 4 points extréums. Le calcul des axes se fait alors de la façon suivante :

Si l'on note $\binom{r_1}{c_1} \binom{r_2}{c_2} \binom{r_3}{c_3} \binom{r_4}{c_4}$ les coordonnées respectives des extréums de l'objet et s'il l'on pose

$$\binom{r_5}{c_5} = \binom{r_1}{c_1} - \binom{r_2}{c_2} \quad \text{et} \quad \binom{r_6}{c_6} = \binom{r_3}{c_3} - \binom{r_4}{c_4}$$

Alors le grand axe et le petit axe de l'ellipse ont pour expression : $\frac{2}{\sqrt{\lambda_{petit}}}$ et $\frac{2}{\sqrt{\lambda_{grand}}}$ avec

$$\lambda = \frac{2 \sqrt{\frac{r_5 c_6}{r_6 c_5}}}{r_6 c_5 - r_5 c_6} \left\{ \left| \frac{c_5}{r_5} + \frac{r_6}{c_6} \right| \pm \sqrt{\left(\frac{c_5}{r_5} - \frac{r_6}{c_6} \right)^2 + 4} \right\} \quad (3-2)$$

Cette méthode semble tout aussi rapide que la précédente, puisqu'elle ne fait intervenir qu'un nombre très restreint de points, ce qui est aussi son principal défaut. En effet, sur des objets de très petite dimension et en présence de bruit, une telle méthode risque de se révéler trompeuse. Dans le cas d'ellipses tronquées comme présentées à la Figure 2-29, les chances de détection correcte restent limitées.

3.1.3.4 Second moment d'aire :

Il s'agit de la méthode préprogrammée dans la toolbox de traitement d'image de Matlab® (The MathWorks, 2011a) et utilisée par Lee (2009). Elle s'appuie sur le calcul du second moment d'aire estimé à partir des points de contours de l'objet considéré. La procédure de détermination est la suivante (les détails des démonstrations sont présentés dans Haralick et al.(1992) :

Le centre de l'objet est estimé à partir du nombre de pixels appartenant à l'objet :

- Abscisse :

$$\bar{r} = \frac{1}{A} \sum_{(r,c) \in R} r = \frac{1}{A} \sum_r r P_H(r) \quad (3-3)$$

- Ordonnée :

$$\bar{c} = \frac{1}{A} \sum_{(r,c) \in R} c = \frac{1}{A} \sum_r c P_v(c) \quad (3-4)$$

où P_v et P_H sont respectivement les projections verticales et horizontales et où A représente l'aire de l'objet au sens binaire du terme

$$A = \sum_{(r,c) \in R} 1 \quad (3-5)$$

L'évaluation des seconds moments d'aire est réalisée en prenant en considération chacun des points de contour de l'objet dans le repère de l'ellipse, et selon la procédure suivante :

- On se place dans le repère propre à l'ellipse :

$$x = r - \bar{r} \quad (3-6)$$

$$y = c - \bar{c} \quad (3-7)$$

- On évalue les seconds moments d'aire normalisés :

$$u_{xx} = \frac{\sum_x x^2}{\sum_x 1} + \frac{1}{12} \quad (3-8)$$

$$u_{yy} = \frac{\sum_y y^2}{\sum_x 1} + \frac{1}{12} \quad (3-9)$$

$$u_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{\Sigma_x 1} x_i y_i}{\sum_x 1} + \frac{1}{12} \quad (3-10)$$

où 1/12 correspond au second moment d'aire normalisé d'un pixel.

- On calcule le grand axe et le petit axe :

$$Grandaxe = 2\sqrt{2} \sqrt{u_{xx} + u_{yy} + \sqrt{(u_{xx} + u_{yy})^2 + 4u_{xy}^2}} \quad (3-11)$$

$$Petitaxe = 2\sqrt{2} \sqrt{u_{xx} + u_{yy} - \sqrt{(u_{xx} + u_{yy})^2 + 4u_{xy}^2}} \quad (3-12)$$

Les incertitudes sur la réponse proviennent principalement du fait que le calcul du centre est approximatif et des approximations sont effectuées dans le calcul du second moment d'aire. En effet, dans la définition du second moment d'aire l'expression de l'aire intervient. Or tel que mentionné précédemment, plus le bruit est important et plus l'ellipse est tronquée, plus la valeur de l'aire est affectée. Enfin, l'étude d'objets de faibles dimensions conduit à une augmentation de l'erreur due au bruit.

3.2 Programme de détection de l'orientation des fibres proposé

Toutes les méthodes présentées dans la section précédente ont été testées sur échantillons en béton fibré. Suite à ces essais, une binarisation par analyse morphologique suivie d'une transformée de Hough a été choisie. L'algorithme proposé est disponible en Annexe 2 et sera détaillé dans les sous-sections suivantes. Les résultats obtenus seront comparés au programme proposé par Lee (2009). La Figure 3-12 présente les grandes étapes de ces deux programmes.

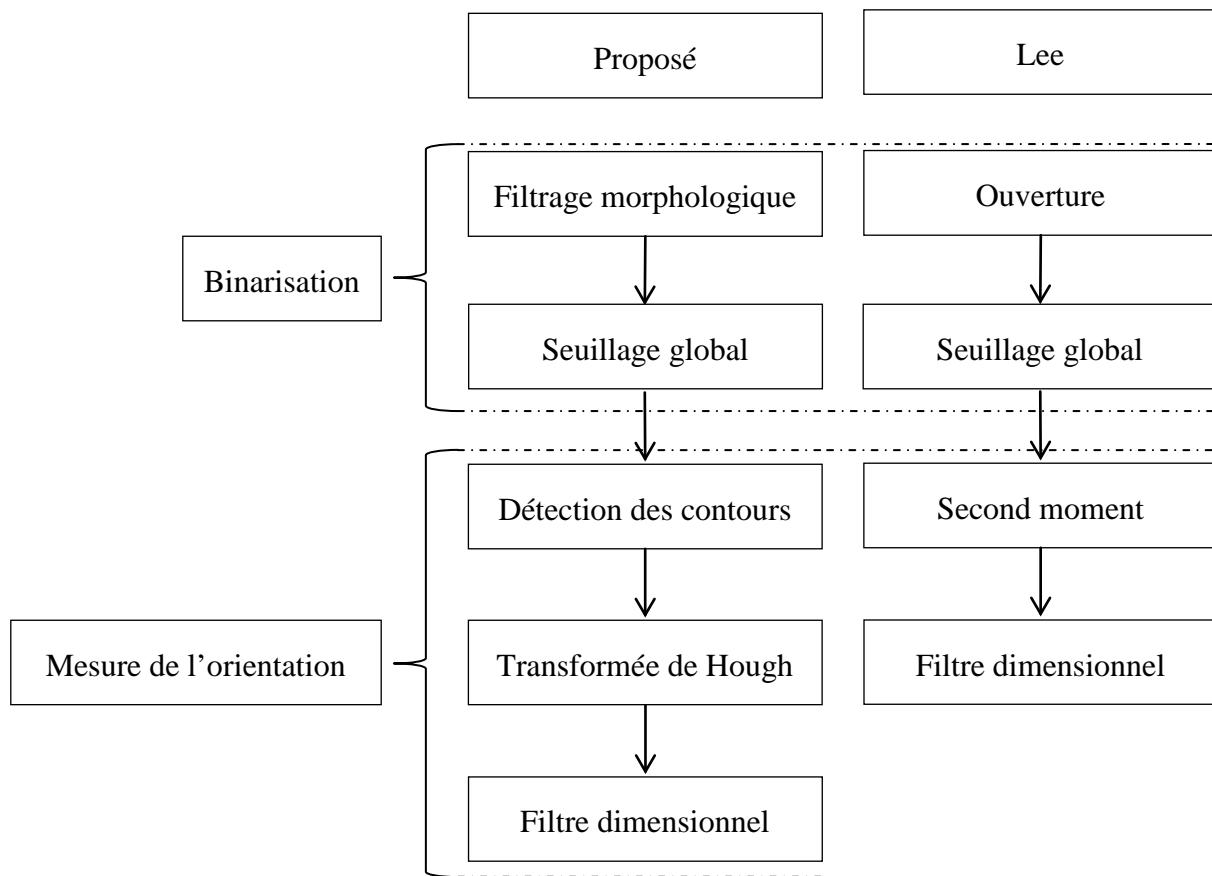


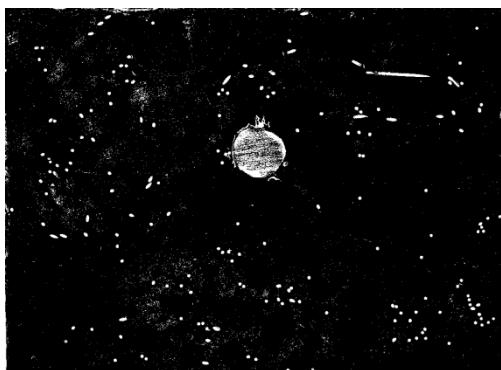
Figure 3-12 : Logigramme des deux programmes développés à l'EPM

3.2.1 Binarisation de l'image scannée

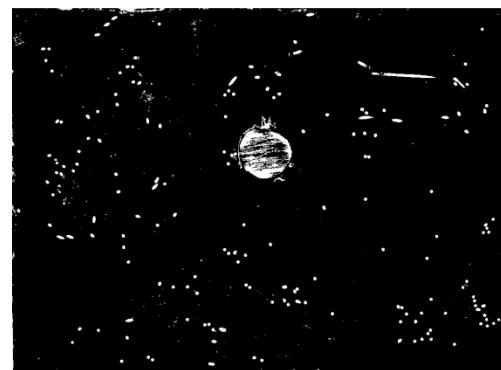
Un filtrage morphologique, suivi d'un seuillage global a donné les résultats les plus satisfaisants en terme de qualité de contour et de défauts répertoriés. L'évolution de l'image après chaque opération est illustrée à la Figure 3-14. Ce filtrage est divisé en trois étapes distinctes. Afin d'uniformiser l'arrière-plan, une opération d'ouverture est appliquée. Elle consiste en une érosion suivie d'une dilatation. Suite à l'étape d'érosion, l'intensité et la superficie des fibres a fortement diminué. Pour rehausser et uniformiser le contraste dans les fibres, une opération de dilatation est appliquée. L'élément structurant utilisé est un cercle de diamètre 10 pixels. Ces deux images

érodées et dilatées ont servi à la reconstruction de l'image. Enfin, un seuillage global est réalisé sur l'image ainsi reconstruite.

La Figure 3-13 met en évidence l'avantage d'une analyse morphologique dans un processus de binarisation. On constate que le nombre de fibres potentielles, représentées par les zones blanches, est fortement diminué, ce qui correspond à autant d'objets qui ne seront pas analysés.



a)



b)

Figure 3-13 : Comparaison entre a) une binarisation par seuillage et b) une binarisation par analyse morphologique puis seuillage.

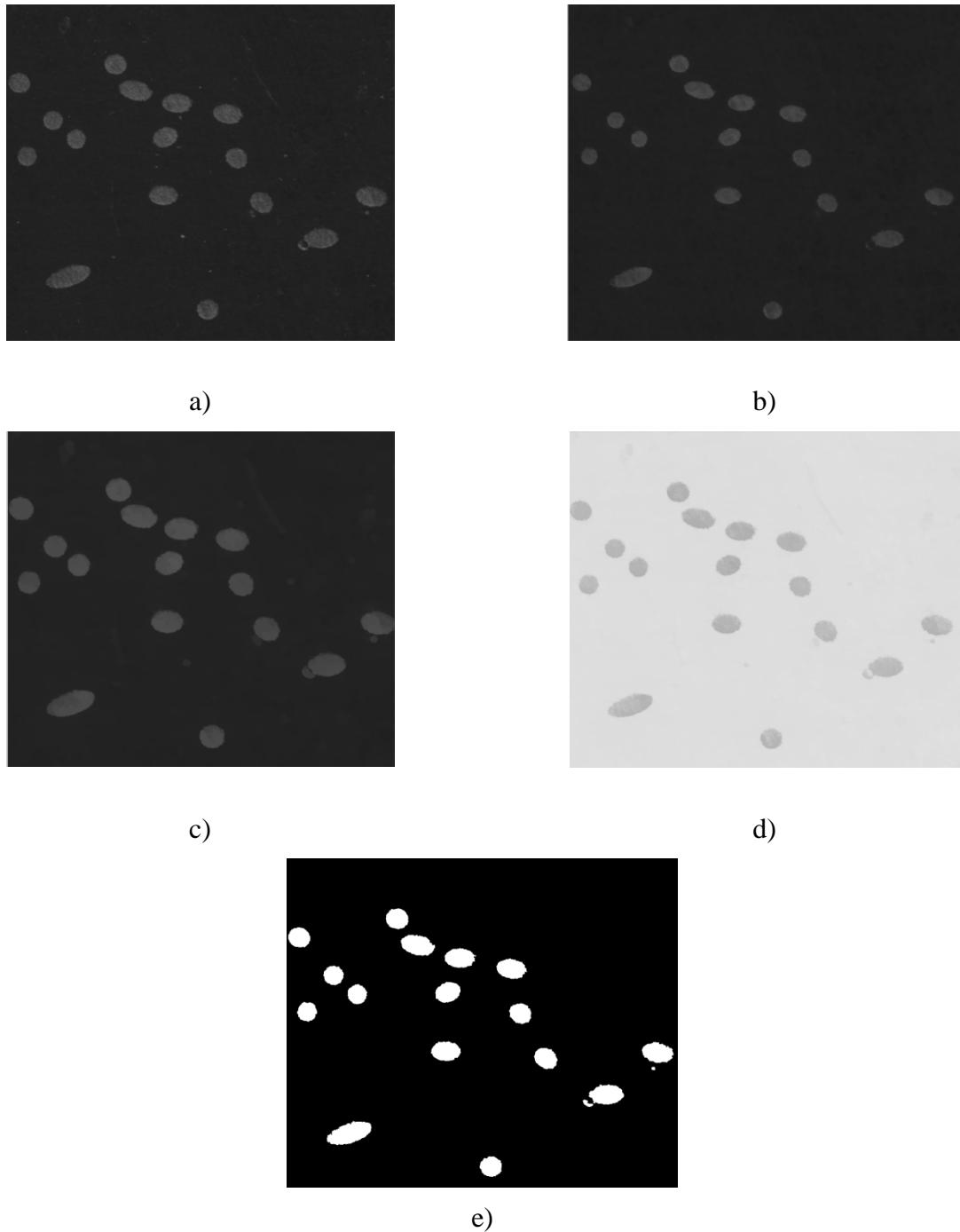


Figure 3-14 : Image obtenue au cours des différentes étapes de la binarisation :

- a) image originale, b) image érodée, c) image dilatée,
- d) masque servant à la reconstruction e) image binarisée

3.2.2 Mesure de l'orientation des fibres

Bien qu'une analyse par calcul du second moment d'aire est plus rapide que l'application de la transformée de Hough, cette dernière donne une meilleure estimation de l'orientation des fibres. Le principe appliqué est repris de Inverso (2002). Il consiste à déterminer les paramètres de l'ellipse étudiée en évaluant la meilleure ellipse possible passant par chaque triplet de points constituant son contour. Cependant pour réduire le temps de calcul il a été choisi de ne tester qu'un nombre limité de triplets. Ce choix s'explique par le fait que le nombre de combinaison de triplet possible par ellipse à tester dépasse les 120 millions. En évaluant un nombre réduit de triplets, le temps de calcul nécessaire pour évaluer l'orientation d'une fibre est passé de 2 heures à moins d'une seconde.

Pour la détermination du centre de l'ellipse O , la procédure suivante est utilisée (Figure 3-15). Considérant deux tangentes à l'ellipse en $X1$ et $X2$, et $I12$ l'intersection de ces deux tangentes, le centre de l'ellipse se trouve sur la droite passant par $I12$ et le milieu du segment $[X1, X2]$, soit $M12$. Ainsi, à partir d'un triplet de points de contour le centre de l'ellipse peut être évalué.

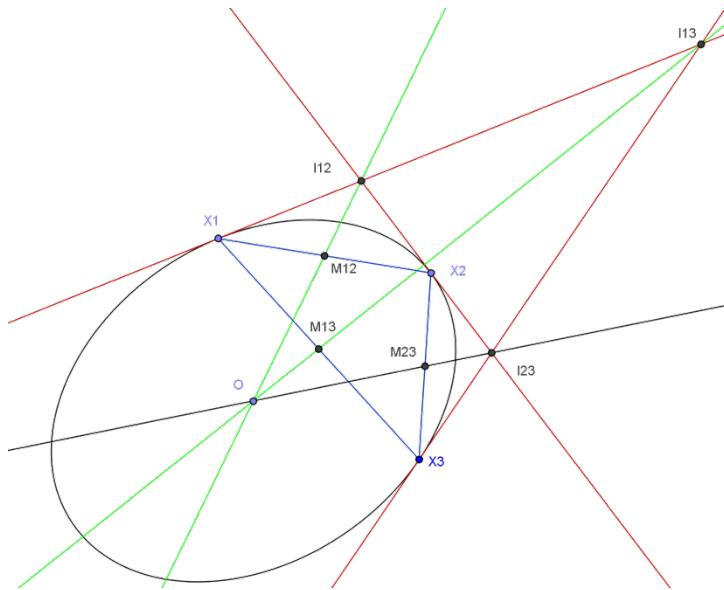


Figure 3-15 : Détermination du centre d'une ellipse à partir de 3 points de contour (triplet)

Les tangentes à l'objet passant par les points $X1$, $X2$ et $X3$ sont évaluées en suivant le principe de la dérivée centrée (équation 3-13).

$$f'(x_i) \approx \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (3-13)$$

Pour chaque triplet de points, un centre est considéré comme acceptable si les intersections des tangentes 2 à 2 ne diffèrent pas de plus ou moins 1 pixel de la moyenne des intersections (Figure 3-16). De plus, toutes les intersections situées en dehors de la « Bounding Box » sont rejetées.

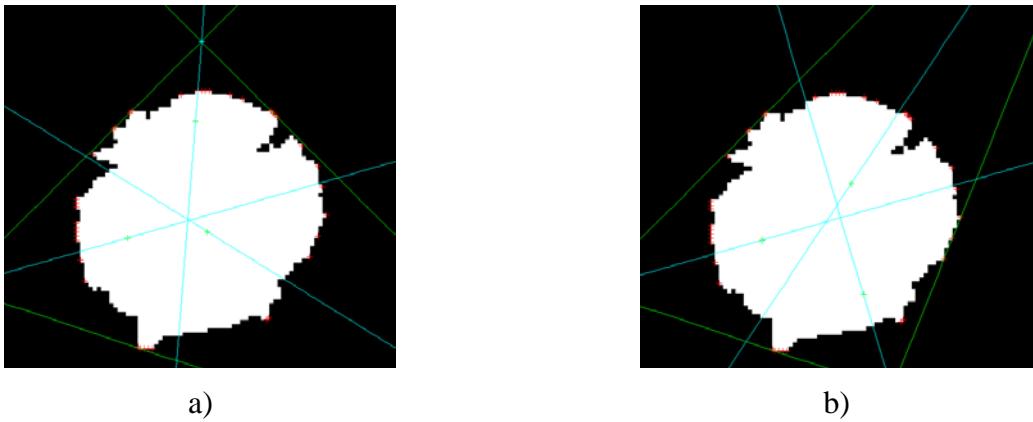


Figure 3-16 : Exemple d'intersection a) acceptée b) rejetée

Pour rappel l'équation d'une ellipse dans un repère quelconque est la suivante :

$$a(x - p)^2 + 2b(x - p)(y - q) + c(y - q)^2 = 1 \quad (3-14)$$

où (p,q) sont les coordonnées du centre de l'ellipse.

Une fois le centre déterminé l'équation (3-14) devient :

$$ax^2 + 2bxy + cy^2 = 1 \quad (3-15)$$

Ainsi seuls les paramètres (a,b,c) restent à déterminer pour évaluer les propriétés de l'ellipse. Or chacun des points de contour vérifie l'équation de l'ellipse. La résolution du système matriciel suivant permet d'obtenir ces paramètres :

$$\begin{pmatrix} x_1^2 & 2x_1y_1 & y_1^2 \\ x_2^2 & 2x_2y_2 & y_2^2 \\ x_3^2 & 2x_3y_3 & y_3^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3-16)$$

Afin de valider que les paramètres obtenus correspondent bien à une ellipse, le critère suivant doit être respecté :

$$4ac - b^2 > 0 \quad (3-17)$$

Les axes de l'ellipse sont alors déterminés en diagonalisant la matrice suivante :

$$Q = \begin{pmatrix} a & b \\ b & c \end{pmatrix} = {}^t P \begin{pmatrix} \frac{1}{grandaxe^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{petitaxe^2} \end{pmatrix} P \quad (3-18)$$

Ainsi, pour chaque triplet donné, les cinq paramètres (5-uplets) caractérisant une ellipse ont été déterminés et sont placés dans un arbre de stockage (Tableau 3-1) de la façon suivante. Pour chaque nouveau 5-uplets estimé, la valeur de chacun des paramètres va être comparée avec les n 5-uplets précédemment calculés. Si l'un des 5-uplets déjà présents dans l'arbre de stockage vérifie pour tous ses paramètres la condition (3-19), alors il est remplacé par un nouveau 5-uplets calculé à partir de l'équation (3-20) et son pointage est crédité d'un point supplémentaire.

$$|Nouvelle\text{-}valeur - Ancienne\text{-}valeur| < 1 \quad (3-19)$$

$$Nouvelle_valeur = [Ancienne_valeur \times Pointage + valeur_calculée] / (Pointage + 1) \quad (3-20)$$

L'ellipse présentant le pointage le plus élevé est considérée comme l'ellipse représentant au mieux l'objet étudié. Dans l'exemple du Tableau 3-1, seule l'ellipse ayant un pointage de 6 est conservée pour l'évaluation du coefficient d'orientation. Dans l'éventualité où deux ellipses auraient le même pointage, l'ellipse ayant le périmètre le plus proche de l'objet étudié sera conservée. Le périmètre d'un point de vue numérique est considéré comme étant égal aux nombres de points de contours de l'ellipse considérée.

Tableau 3-1 : Exemple d'arbre de stockage

Coordonnées du centre	Grand axe	Petit axe	Matrice de rotation P	Pointage
(150,87 ; 200,45)	25,78	20,3	$\begin{pmatrix} 0,789 & 0,456 \\ 0,63 & 0,759 \end{pmatrix}$	6
(159,01 ; 200,45)	27,78	20,4	$\begin{pmatrix} 0,89 & -0,456 \\ 0,63 & 0,903 \end{pmatrix}$	1
(155,02 ; 206,3)	29,9	20,5	$\begin{pmatrix} 0,89 & -0,456 \\ 0,63 & 0,903 \end{pmatrix}$	2

3.2.3 Validation du programme

Afin de valider l'algorithme développé, deux phases de validation ont été utilisées. La première phase a consisté à mesurer l'orientation d'ellipses à géométrie connue pour valider l'algorithme par transformée de Hough. La deuxième phase a consisté à valider l'ensemble du programme en se basant sur le nombre de fibres comptées dans un spécimen en BRF et en BFUP. L'ensemble des résultats sera comparé avec ceux obtenus avec le programme développé par Lee (2009).

3.2.3.1 Mesure de l'angle d'inclinaison :

Une première évaluation de la performance des programmes de détection a été réalisée sur des ellipses parfaites dont l'angle d'inclinaison était connu. On constate sur la Figure 3-17a que l'utilisation de la transformée de Hough du programme proposé donne de moins bon résultat comparativement à la méthode du second moment d'aire utilisée par Lee (2009). Cependant, dans le cas d'ellipses tronquées ou rallongées de quelques pixels, les tendances sont inversées avec de bien meilleurs résultats avec la transformée de Hough pour les BRF (Figure 3-17b). Dans le cas des BFUP, la tendance pour les ellipses modifiées est moins marquée pour des angles variant de 10 à 55 degrés avec une erreur moyenne constatée de 7,3 degrés environ, mais les diamètres obtenus à l'aide de la transformée de Hough sont beaucoup plus proches du diamètre d'une fibre réelle. La plage d'erreur constatée est conforme aux plages d'erreur relevée par Kawamura et al. (2005) (Figure 2-30).

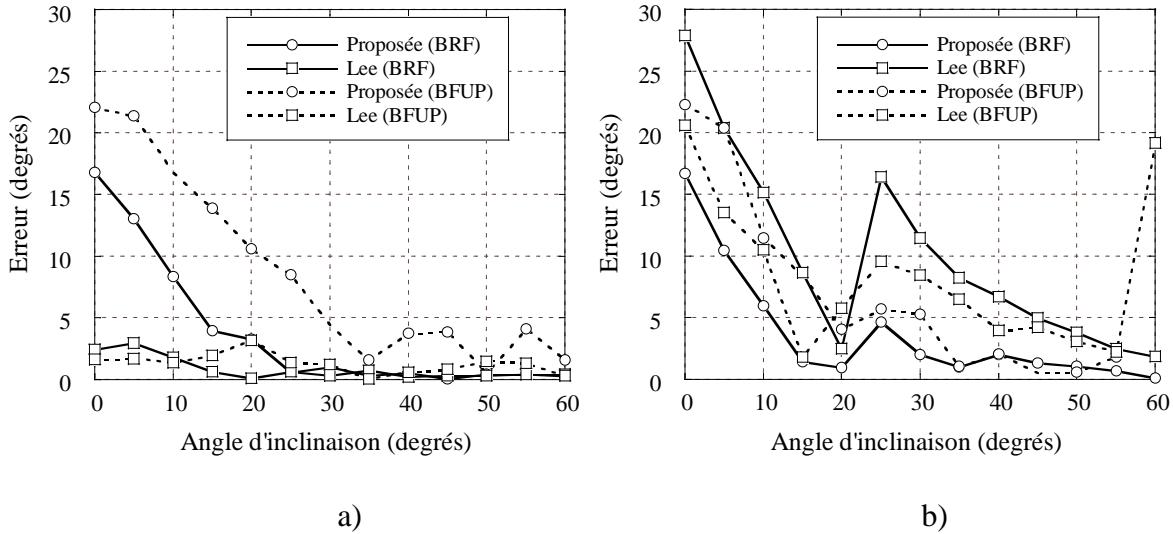


Figure 3-17 : Erreur moyenne de mesure du coefficient d'orientation a) sur des ellipses idéales b)
sur des ellipses tronquées

Globalement la transformée de Hough du programme proposé permet d'obtenir des résultats deux fois plus précis dans le cadre de son utilisation pour des fibres partiellement tronquées ou bruitées attendues dans les images scannées. C'est pourquoi cette méthode a été sélectionnée.

3.2.3.2 Nombre de fibres détectées

En deuxième évaluation, le nombre de fibres a été compté et comparé au nombre de fibres détectées automatiquement sur 6 échantillons en BFUP et 4 en BRF pour les deux programmes. Pour pallier l'éventualité où des fibres auraient été comptabilisées, alors qu'elles n'en étaient pas, une vérification visuelle fibre par fibre a été réalisée. Les résultats sont comparés dans le Tableau 3-2 aux résultats obtenus avec le programme de Lee (2009) utilisant une binarisation par ouverture reconstruction puis une évaluation des ellipses par calcul du second moment d'aire.

Tableau 3-2 : Pourcentage d'erreur sur le nombre de fibres comptabilisées

Échantillons	Erreur relative	
	Algorithme Lee (2009)	Algorithme proposé
BFUP 0.0% ISO 1-2a	18,41%	1,77%
BFUP 0.0% ISO 3-4a	18,92%	0,30%
BFUP 0.0% TRACTION	29,25%	1,19%
BFUP 1.5% ISO 1-2a	17,50%	0,25%
BFUP 1.5% ISO 1-2b	15,29%	1,50%
BFUP 2.8% TRACTION	25,86%	2,66%
BRF 0.0% ISO1-2a	20,56 %	8,3 %
BRF 1.5% HYP3-4a	19,67%	13,50%
BRF 1.5% ISO1-2a	34,29%	7,24%
BRF 1.5% ISO 1-2b	27,87%	8,70%
Moyenne	22,76%	4,54%

L'algorithme proposé, comparativement au programme de Lee (2009), permet de réduire de façon significative l'erreur sur le nombre de fibres détectées dans les spécimens. Le premier objectif du projet est donc atteint. Ainsi, les données obtenues avec le programme pourront être comparées aux modèles analytiques de Soroushian et al.(1990)et de Dupont et al.(2005) présentés à la section 1.3.

Les erreurs relevées dans la détermination du nombre d'ellipses sont pour la majorité similaire avec celles présentées par Wuest et al. (2009). D'une part, certaines fibres ne sont pas comptabilisées dans certains coins de l'échantillon. Cela est imputable à une mauvaise planéité de la surface à traiter (Figure 3-18 a). D'autre part, parfois plusieurs fibres sont considérées comme une seule. Dans la Figure 3-18b la croix indique la détection d'une fibre. Ensuite, certaines portions d'armatures sont parfois considérées comme des fibres (Figure 3-18c). Enfin, dans le cas des BRF, certains défauts de contraste provenant des granulats sont considérés comme des fibres à part entière (Figure 3-18 d).

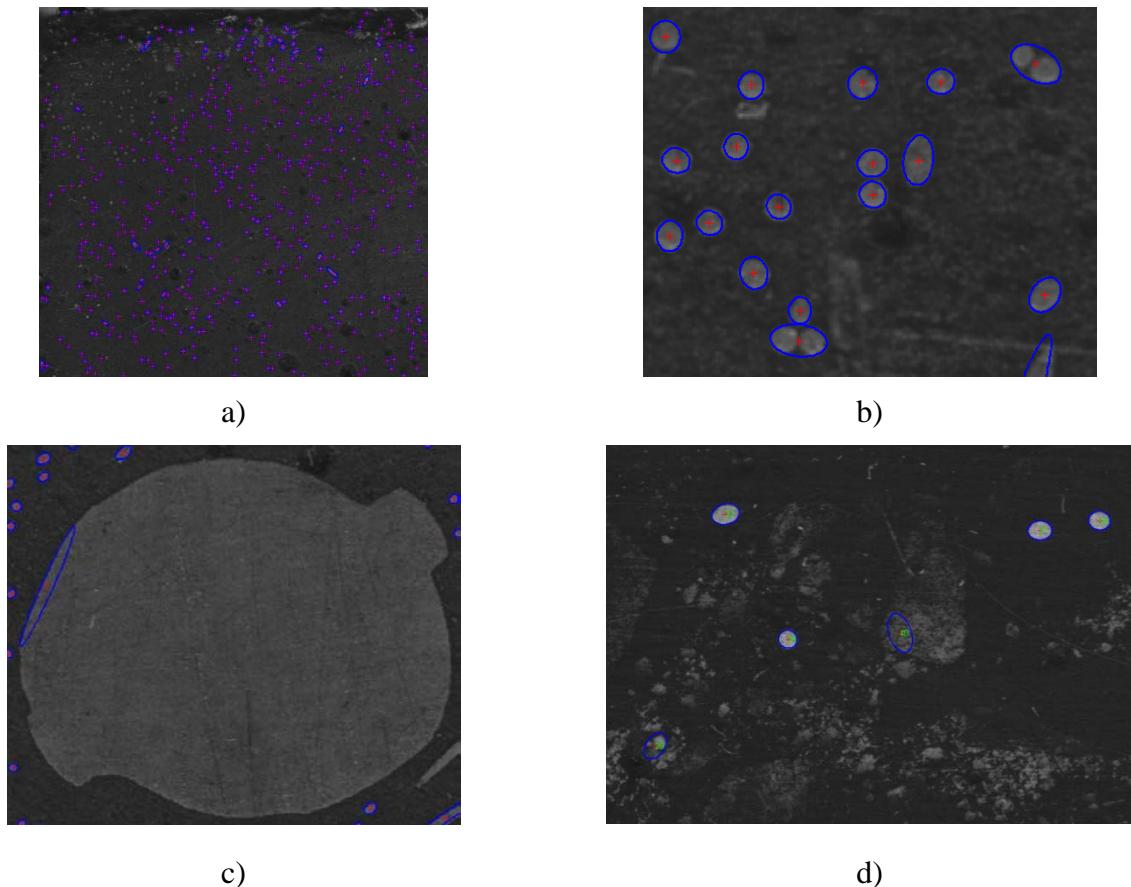


Figure 3-18 : Types d'erreurs constatées lors de la détection du nombre de fibres

L'inconvénient du programme proposé reste tout de même le temps de calcul nécessaire à l'analyse numérique. Il faut considérer des durées moyennes de 0,20 à 0,77 seconde pour analyser une fibre (binarisation comprise). Ainsi, pour un échantillon de BFUP de 5500 mm^2 , une vingtaine de minutes sera nécessaire. La répartition du temps de calcul est présentée au Tableau 3-3. Une optimisation supplémentaire de l'algorithme de mesure de l'orientation des fibres devrait permettre de réduire le temps de calcul.

Tableau 3-3 : Répartition du temps de calcul

Étapes	Une fibre	Échantillon de 4700 fibres
Binarisation	38 %	6 %
Mesure de l'orientation	62 %	94 %

3.3 Processus de préparation des échantillons en vue de l'analyse d'images

Le processus de préparation des échantillons se déroule en deux grandes étapes : le prélèvement des échantillons après la réalisation d'essais divers, qui comprend la réalisation de carottage et de découpes à la scie à diamant, et la préparation à la numérisation qui regroupe le polissage des échantillons et l'augmentation du contraste matrice-fibres.

3.3.1 Prélèvement des échantillons

Les échantillons ont été prélevés par carottage et par sciage, sur des poutres et des os de traction en BRF et en BFUP qui ont été préalables testés. Pour les poutres, des carottes de 100 mm de diamètre ont été prélevées. Afin d'obtenir l'évaluation du coefficient d'orientation la plus proche de la réalité, les carottages sur les poutres testées en flexion ont été effectués près de la fissure critique. De plus, la grande taille des carottes (entre 200 et 250 mm) ne permettant pas d'effectuer un polissage manuel rapide, un découpage de la carotte en 4 éléments a été adopté (Figure 3-19).

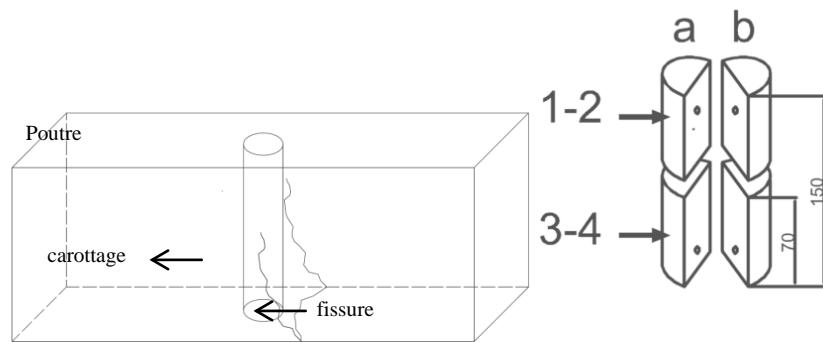


Figure 3-19 : Schéma et nomenclature des échantillons prélevés sur les poutres

Les zones 1-2 représentent la partie haute de la poutre, alors que la partie basse, en contact avec le coffrage lors de la coulée, est numérotée 3-4. La taille de ces zones, 70x100 mm, permet d'avoir une bonne estimation de la densité et de l'orientation des fibres à une hauteur donnée, car les variations locales peuvent être prises en considération.

3.3.2 Préparation des surfaces

Le processus de préparation des surfaces comporte deux volets : le polissage et l'amélioration du contraste. La procédure étapes par étapes est donnée en Annexe 3.

3.3.2.1 Polissage des surfaces

Avant sa numérisation, chaque surface doit être polie avec de la grenaille afin de réduire les défauts de planéité de la surface et les bavures qui apparaissent autour des fibres lors du sciage (Figure 3-20). Ces défauts de sciage sont causés par une mauvaise planéité du plateau de la scie et par un défaut de rectitude du disque de la scie. De plus, les mouvements parfois saccadés de l'utilisateur peuvent engendrer des sauts de lame qui sont apparents dans la section. Les bavures autour des fibres proviennent d'une forte augmentation locale de la température lors du passage de la scie.

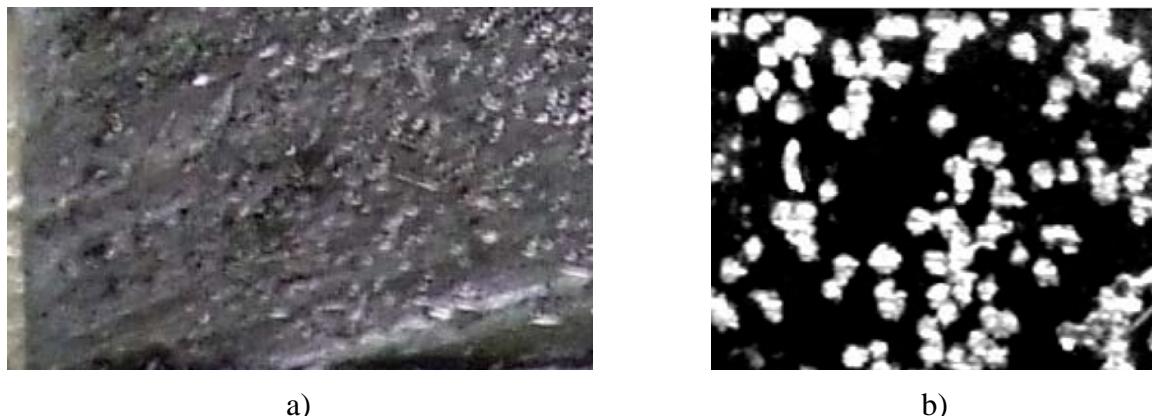


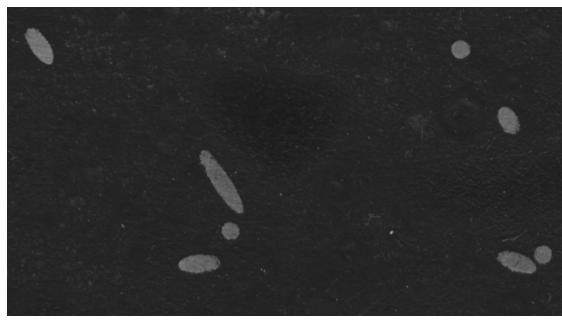
Figure 3-20 : Défauts constatés après le sciage, a) traces de la lame lors de la découpe, b) bavures autour des fibres.

Concrètement, cette étape consiste à saupoudrer un plateau rotatif de poudre abrasive, généralement du carbonate de silicium d'indice de grosseur $240\mu\text{m}$. Les phénomènes de friction entre le spécimen et le plateau permettent de retirer de fine épaisseur du spécimen et ainsi de gommer les défauts cités précédemment. Cette étape est terminée lorsque les contours des fibres sont bien définis, que la surface du spécimen à l'aspect d'un miroir et qu'au toucher la surface paraît parfaitement lisse. Cette étape est de loin la plus exigeante en terme de temps requis pour

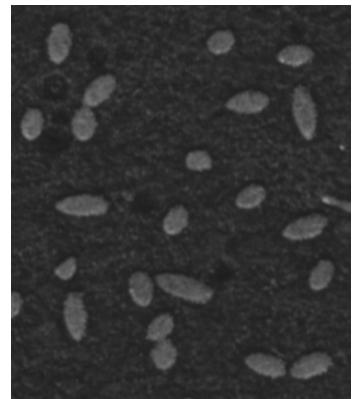
obtenir un résultat de qualité. Lors d'un polissage manuel, les surfaces doivent être de petites tailles pour faciliter la manipulation des échantillons et réduire le temps de polissage.

3.3.2.2 Augmentation du contraste

Malgré une différence de contraste naturelle entre les fibres d'acier et la matrice de béton, l'utilisation brute de cette image ne permet pas d'obtenir des résultats acceptables sur le nombre et l'orientation des fibres répertoriées. Cette étape consiste à appliquer, sur la surface à analyser, une couche de gouache noire (de préférence au rouleau) qui ne présente aucun reflet lors de son exposition à une lumière intense. Afin de favoriser l'adhérence de la gouache sur l'échantillon, un passage de papier de verre 200 microns est préalablement réalisé sur la surface. La différence d'adhérence entre le béton et l'acier permet de faire ressortir les fibres. Cependant, il faut vérifier que la couleur de la matrice de béton soit la plus homogène possible. Pour s'assurer d'un meilleur contraste entre la matrice et les fibres, un spray pour le polissage de l'acier est appliqué juste avant la numérisation de l'échantillon. La Figure 3-21 illustre le résultat que l'on peut obtenir après cette phase de préparation. On constate que comparativement à la Figure 2-28, les différentes fibres sont parfaitement identifiables. Les contours entre des fibres sont également bien délimités.



a) BRF



b) BFUP

Figure 3-21 : Surface obtenue d'un échantillon après le processus de préparation

Lors de la phase d'augmentation du contraste, les problèmes suivants ont été parfois constatés :

- Malgré un remplissage minutieux des pores par divers matériaux, leurs contours ont la même couleur que les fibres. Des essais ont été réalisés pour boucher ces pores, mais les matériaux utilisés, une fois peints, présentent une différence de contraste trop élevée avec la matrice cimentaire (Figure 3-22 b);
- La connaissance préalable de l'emplacement des fibres est nécessaire pour éviter d'en omettre certaines;
- Au cours des deux étapes précédentes, les fibres parallèles au plan de coupe sont éliminées et seule leur empreinte perdure. Cependant, ces fibres travaillant peu ou pas en traction et leur faible nombre font que leur élimination aura peu d'influence sur le coefficient d'orientation moyen mesuré (Figure 3-22 b);
- Dans le cas des BRF, la gouache a tendance à adhérer de manière inégale sur les granulats et cause de fortes variations de contraste (Figure 3-22 a).

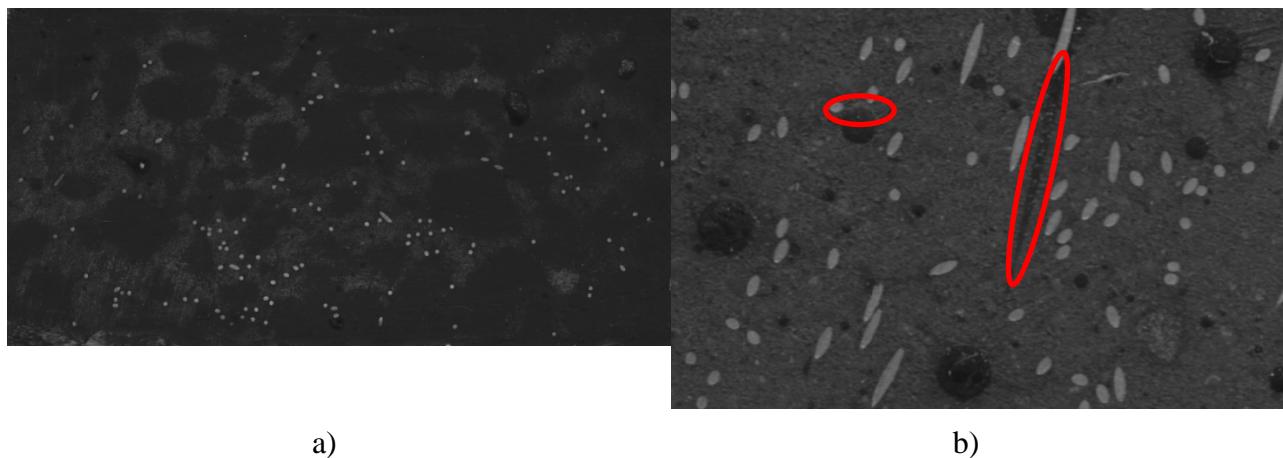


Figure 3-22 : Problèmes rencontrés lors de la phase d'augmentation de contraste, a) contraste hétérogène de la matrice pour un BRF, b) empreinte de fibres et présence de pores

3.3.3 Numérisation des surfaces

La numérisation consiste à scanner les échantillons de béton en niveaux de gris. Un scanner grand public a été utilisé pour l'acquisition des surfaces. Le LiDE 700F de marque Canon offre un accès facile à la glace de numérisation avec possibilité de retirer le capot, une résolution optique de 9600 dpi avec des images en niveau de gris codées en 8 bits en sortie. Les formats de sortie offerts sont le JPEG, le TIFF et le BMP. Malgré les fortes résolutions proposées, un compromis doit être trouvé entre la capacité de l'ordinateur et la qualité de l'image numérisée. En effet, les images à forte résolution nécessitent l'utilisation d'une quantité élevée de mémoire vive. Une résolution de 2400 dpi a été adoptée. Dans le cas d'une surface de 100 x 70 mm, la taille de l'image numérisée est d'environ 60 Mo. Avec une telle résolution, une fibre de BRF de 0,55 mm de diamètre sera représentée par 52 pixels, alors qu'une fibre en BFUP de 0,2mm de diamètre correspondra à une vingtaine de pixels. La taille réduite des fibres de BFUP peut engendrer une forte erreur de mesure. Cependant, le grand nombre de fibres par unité de surface rend l'utilisation d'une résolution plus importante difficilement envisageable.

3.4 Conclusion

L'algorithme proposé basé sur la succession d'une érosion, d'une dilatation, d'un seuillage global et d'une transformée de Hough a permis d'augmenter significativement la précision sur le nombre de fibres détectées. Il permet ainsi d'obtenir le nombre de fibres pour des spécimens en BFUP et BRF avec une précision supérieure à 97 % et à 90 % respectivement. Cette précision est adéquate pour obtenir une mesure globale du nombre de fibres. Cependant, l'apport du programme proposé sur la précision de mesure du coefficient d'orientation reste délicate à préciser. En effet, la mesure exacte du coefficient d'orientation sur une population de fibres suffisamment importante nécessite l'utilisation de système optique à fort grossissement et un temps conséquent. La précision sur l'évaluation du coefficient d'orientation des fibres vraie selon l'orientation de 75 % (erreur de 22 degrés sur une fibre orientée à 0 degré) à 99% (erreur inférieur à 1 degré sur une fibre orientée à 80 degrés).Les travaux de recherche décrits dans les 2 prochains chapitres permettront de vérifier l'apport du programme pour l'amélioration de la prédiction du comportement mécanique de poutres en BFUP.

Chapitre 4 : Influence de l'orientation des fibres sur le comportement en traction

L'orientation des fibres dans les éléments en béton fibré influence de façon significative le comportement en flexion et en traction. Cependant, aucune étude caractérisant de façon précise l'influence de l'orientation sur le comportement en traction n'a encore été réalisée sur le BFUP développé à l'École Polytechnique de Montréal(Braike, 2007). Ainsi, dans ce chapitre, les différentes méthodes de coulée permettant d'orienter les fibres du BFUP et les résultats d'essais de traction réalisés pour différents orientations des fibres seront présentés. Sur la base de ces résultats, le système d'équations empirique développé pour déterminer le comportement en traction du BFUP à partir de l'angle d'inclinaison des fibres sera décrit. Tel qu'illustré à la Figure 1-1, l'utilisation combinée du programme d'orientation de fibres présenté au chapitre 3 et du système d'équations fournissant le comportement en traction du BFUP de ce chapitre permettront d'alimenter les modélisations numériques du chapitre 6.

4.1 Présentation de l'essai de traction directe

L'essai de traction directe consiste à mesurer la déformation d'un spécimen soumis à une force de traction uniaxiale. La vitesse de chargement doit être lente afin d'atténuer au maximum les effets d'amplification dynamiques. Le protocole d'essai a été développé par Beaurivage (2009), puis mis à jour en collaboration avec Cédric Androuët, technicien au Laboratoire de Structures.

Dans le laboratoire de structures de l'École Polytechnique de Montréal cet essai est réalisé à l'aide d'une presse hydraulique de marque Instron et de capacité 2,5 MN en traction-compression. Le spécimen est placé entre les mâchoires en acier selon la procédure décrite en Annexe 4(Figure 4-1). Seule la traverse supérieure de la presse est mobile, le déplacement imposé au spécimen n'est pas symétrique. L'application de la charge est réalisée en déplacement contrôlé. La vitesse de chargement appliquée en pré-pic est de 0,1 mm/min, alors que dans la phase post-pic le chargement peut être accéléré manuellement jusqu'à 1 mm/min afin de réduire

la durée de l'essai. Dans le cadre de l'étude de matériaux très ductiles comme le BFUP, cette option a permis de réduire le temps de l'essai de moitié sans modifier le comportement du matériau.

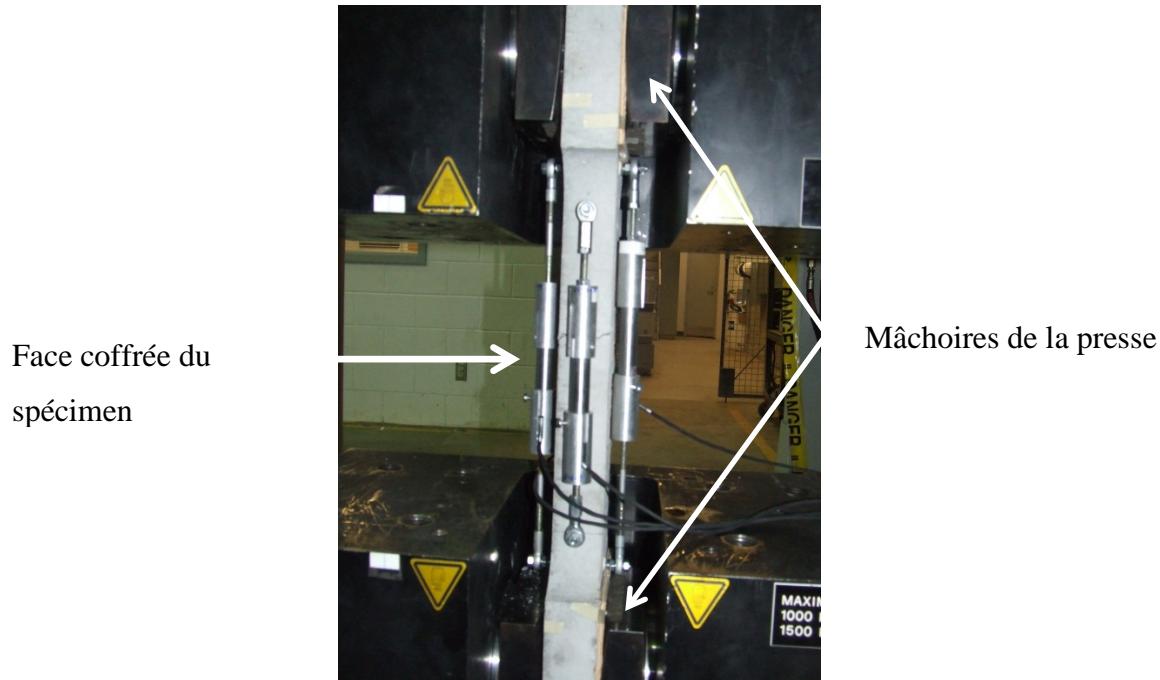


Figure 4-1 : Montage expérimental d'un essai de traction directe

Le spécimen est instrumenté avec un capteur de type LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sur chacune de ses faces (Figure 4-2). Les deux LVDT prenant en compte les déformations du spécimen dans le changement de section sont utilisés pour le contrôle en déplacement du chargement lors de l'essai pour des raisons de sécurité. Les deux LVDT situés dans la section droite du spécimen servent à déterminer la loi de comportement en traction.

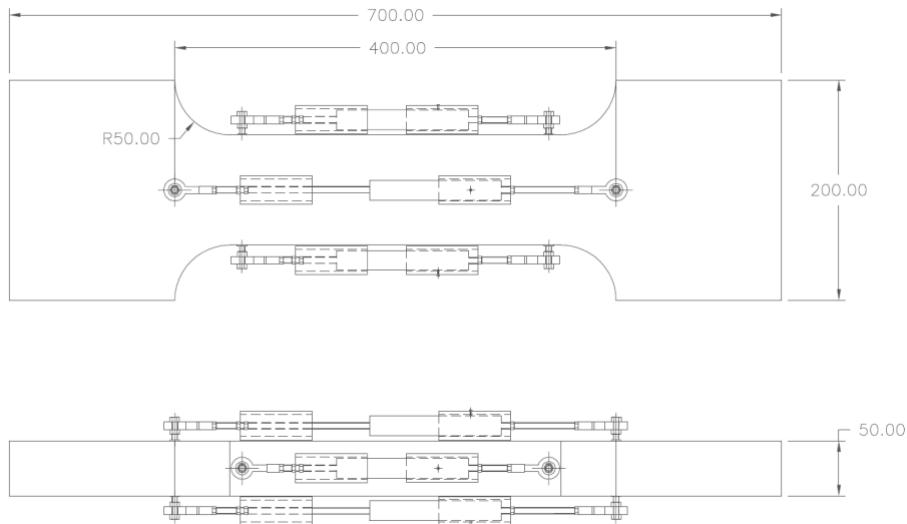


Figure 4-2 : Instrumentation d'un spécimen de traction

4.2 Fabrication des spécimens

4.2.1 Choix de la géométrie et de la méthode de coulée

Ce projet nécessitant la fabrication de spécimens en BFUP avec différents coefficients d'orientation des fibres, différentes méthodes de fabrication ont été étudiées dans le cadre d'une campagne d'essais préliminaires. Cinq spécimens de géométrie variable (Figure 4-3) issus de la même gâchée ont été coulés en favorisant une orientation des fibres parallèles aux sollicitations et ont été testés en traction directe.

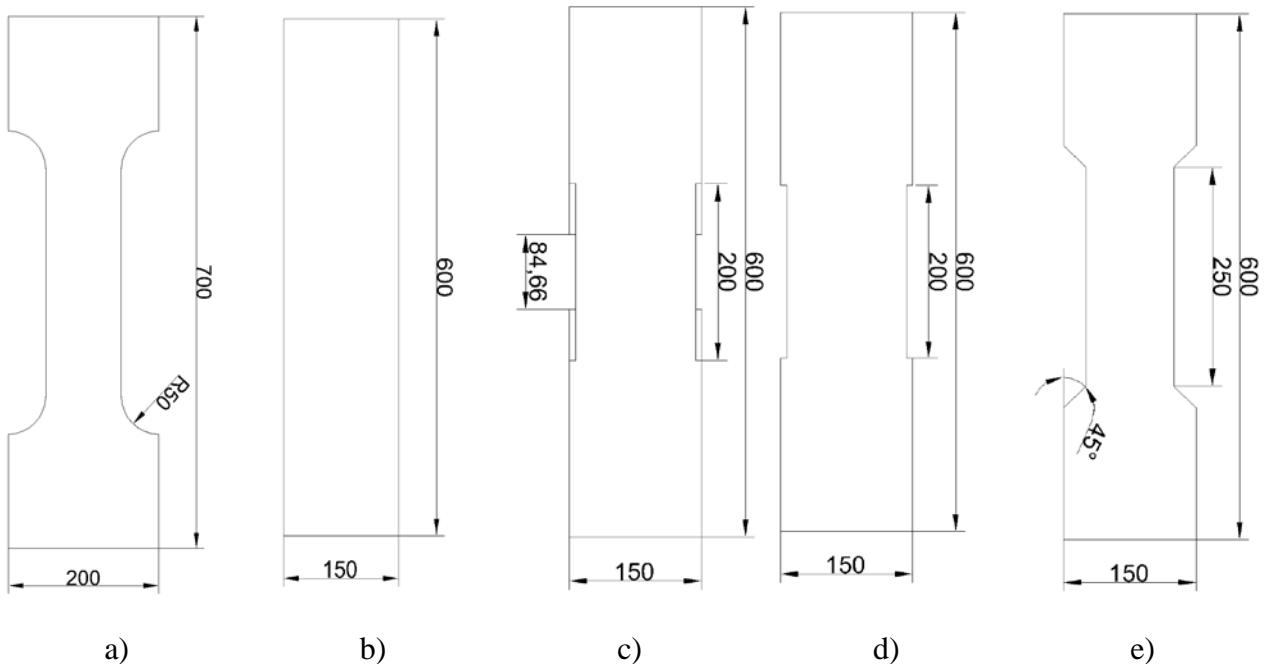


Figure 4-3 : Géométries testées a) os de traction, b) plaque, c) sciage de la section centrale, d) sciage de la section centrale avec angle droit, e) sciage de la section centrale à 45 degrés

Les spécimens résultats des spécimens b) et e) n'ont pas pu être exploités car les fissures se sont développées en dehors de la plage de lecture des capteurs. Les autres géométries étudiées c) et d) présentent des comportements en traction similaire à la géométrie a) de référence (Figure 4-4) développé par Beaurivage (2009). Cependant, le temps de préparation, les problèmes de symétrie et le développement systématique de la fissuration au niveau du changement de section dans les spécimens tel qu'illustre à la Figure 4-5 ont conduit à la sélection des spécimens en forme d'os.

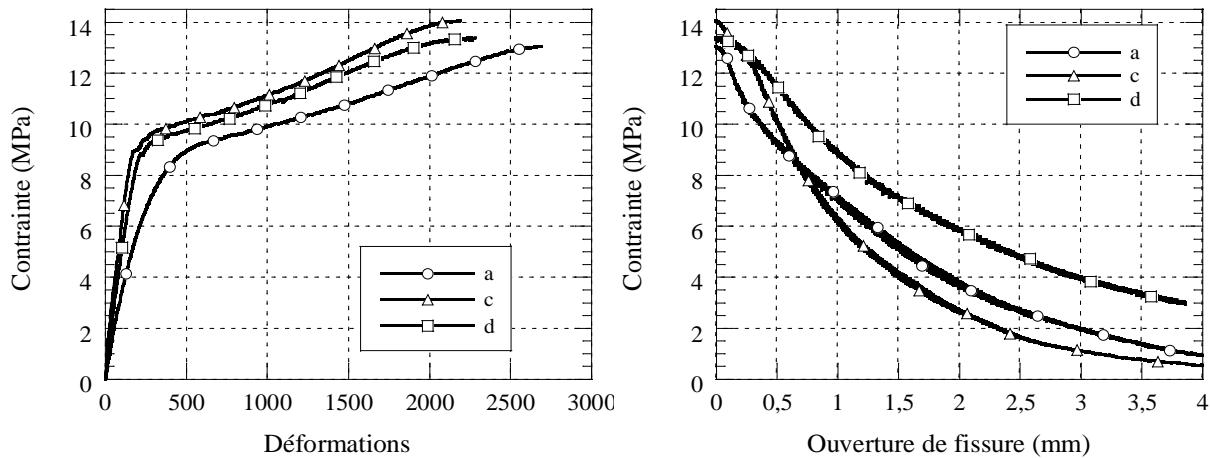


Figure 4-4 : Réponse en traction pure des différentes géométries de spécimens étudiées



Figure 4-5 : Fissuration au niveau du changement de section sur les spécimens c et d

4.2.2 Choix de la méthode de coulée

4.2.2.1 Développement

La mise en œuvre des bétons fibrés joue un rôle important sur l'orientation définitive des fibres dans des éléments structuraux. Certaines techniques de mise en œuvre sont facilement applicables pour obtenir un angle de 0 degré des fibres par rapport à l'axe longitudinal du spécimen. Les techniques suivantes ont déjà été utilisées pour favoriser l'orientation des fibres :

- Utilisation de séparateurs espacés d'une demi-longueur de fibres pour guider l'écoulement du béton (Hannant et al., 1974);
- Découpe dans une dalle de 40 mm d'épaisseur favorisant une orientation 2D (Oesterlee, 2010);
- Utilisation d'un champ magnétique de forte intensité pour orienter les fibres (Schaal & Durieux, 2009);
- Techniques couplées utilisant les 2 premières techniques (Behloul, 1996).

De par la nature des coffrages en acier des spécimens de traction disponibles au laboratoire, la solution d'une orientation par champ magnétique a été écartée. Divers essais ont alors été réalisés pour orienter les fibres. Pour obtenir une orientation préférentielle et fortement défavorable des fibres, une coulée en couches successives donne des résultats satisfaisants et permet ainsi de s'affranchir de la présence de séparateurs. Pour des angles intermédiaires, la présence de guides de coulée ou de séparateurs devient nécessaire. L'utilisation de séparateurs espacés à $l_f/2$ (Hannant et al., 1974), est difficilement applicable pour le BFUP compte tenu de la petite longueur des fibres. Dans une telle configuration, l'épaisseur totale des séparateurs représenteraient plus de 20% de la section totale du spécimen. Un espace inter-séparateurs de deux centimètres a donc été testé (Figure 4-6a). Afin d'éviter tout phénomène de goulot d'étranglement pouvant entraîner une accumulation de fibres, la distance entre plaquettes a été conservées constantes sur « tout le parcours » d'écoulement. De plus, pour augmenter la vitesse du fluide, un système de bascule utilisant une tige de $\frac{3}{4}$ po de diamètre placée sous le moule a été utilisé (Figure 4-6b). L'angle ainsi formé entre le moule et l'horizontale avoisinait 3,5 degrés. Le béton a été inséré dans la partie surélevée du coffrage. Une fois la première moitié remplie, le moule a été basculé pour remplir la seconde. Une fois l'arase effectuée, le spécimen a été remis à niveau.

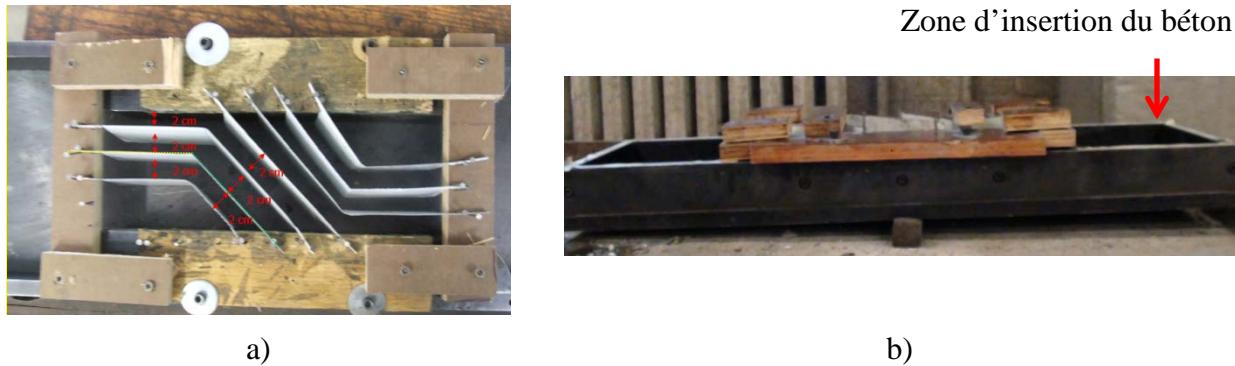


Figure 4-6: Coffrage des os pour favoriser l'orientation a) séparateurs, b) système de bascule

Il est à noter que la distance entre les séparateurs ne permettait pas d'obtenir une orientation favorablement par leur seule présence. En effet, une telle configuration a permis d'obtenir des fibres à 55 degrés au lieu de 0 degré dans le cas d'une orientation préférentielle. Néanmoins, une forte accumulation de fibres a été constatée au niveau du bord d'attaque de la plaquette lors de la coulée. Cela a entraîné une forte diminution voir parfois un arrêt total de l'écoulement sur le reste de la section. De plus, la pression latérale du béton sur les parois a provoqué le déversement des séparateurs.

Afin d'éliminer les bords d'attaque et ainsi l'arrêt de l'écoulement, les séparateurs ont été prolongés sur toute la longueur des spécimens (Figure 4-7).

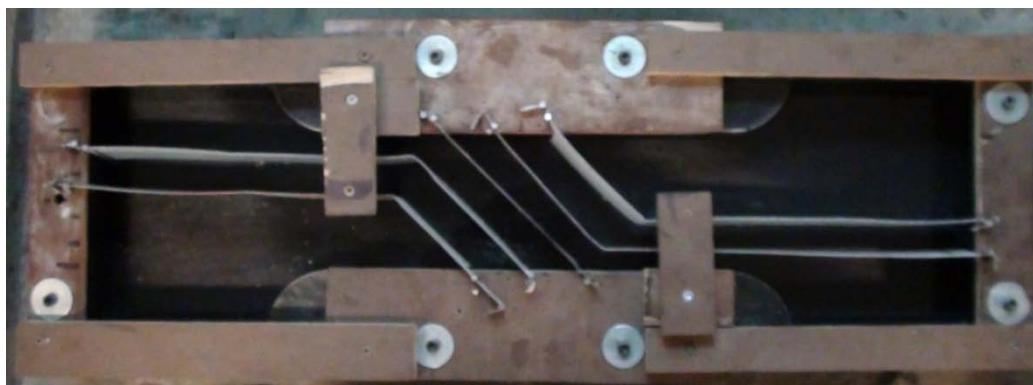


Figure 4-7 : Modification de la disposition des plaquettes

Lors de l'écoulement du béton, une réduction progressive de la vitesse d'écoulement a été constatée, et ce jusqu'à l'arrêt complet de ce dernier. Même si le béton à l'état frais est un fluide non newtonien, les principes de base de la mécanique des fluides permettent d'obtenir une explication. Au droit de l'obstacle ($x=0$ sur la Figure 4-8a), la vitesse du fluide devient nulle, et le long des parois (dans la couche limite) la vitesse de déplacement du fluide est fortement réduite. Dans le cas du béton à l'état frais, le déplacement ne peut s'amorcer que si la valeur du cisaillement entre la paroi et le matériau atteint une valeur seuil. La forte diminution de la vitesse du mélange au droit de l'obstacle entraîne l'apparition d'une zone de blocage qui ne cesse d'augmenter du fait de la viscosité du mélange. De plus, la faible pente servant à augmenter la vitesse de déplacement du béton dans le moule ne permettait pas d'atteindre une valeur de cisaillement suffisamment importante pour permettre au fluide de s'écouler dans de bonnes conditions (vitesse + homogénéité). Enfin, le faible espace entre les plaquettes engendrait une diminution importante de la zone où la vitesse du fluide est relativement proche de sa vitesse d'entrée dans le réseau de séparateurs (zone hachurée sur la Figure 4-8b).

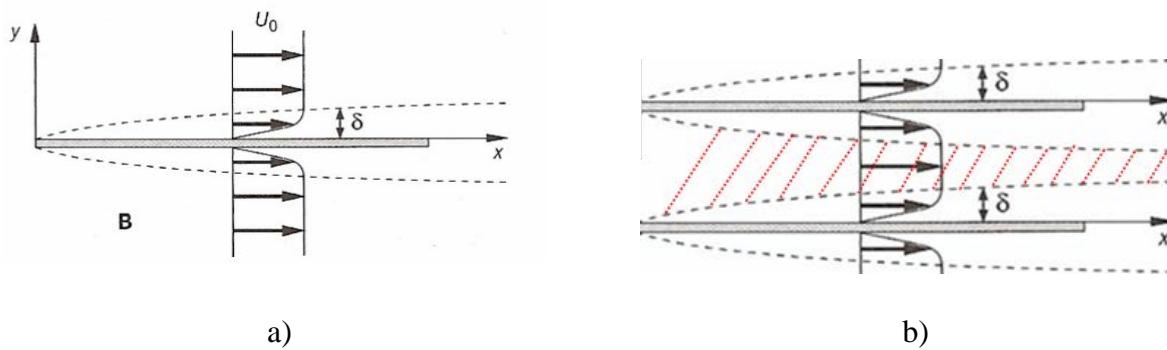


Figure 4-8: Écoulement d'un fluide visqueux a) le long d'une paroi b) entre deux parois

Les bords d'attaque ne sont donc pas les seuls obstacles qui réduisent la vitesse de l'écoulement, l'espace inter-séparateur influence grandement ce paramètre. L'espace était donc trop réduit pour permettre au mélange de circuler de la façon souhaitée. La faible influence de séparateurs sur l'orientation des fibres a conduit à une augmentation de l'espace entre les séparateurs. Le choix s'est donc porté sur un espace de 50 mm et des séparateurs courts pour

réduire la quantité de tôle nécessaire (Figure 4-9) . De plus, des raidisseurs en bois ont été rajoutés pour éviter tout déversement.

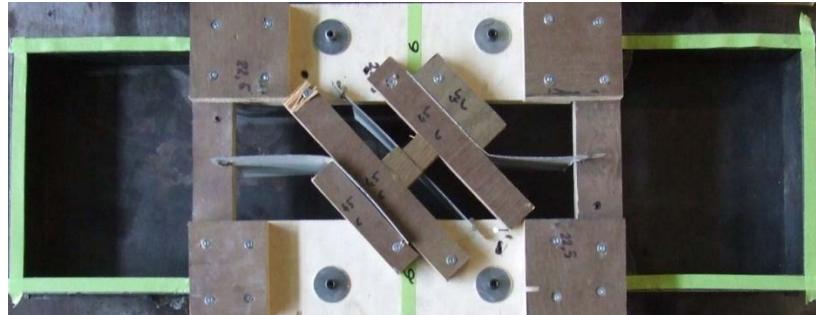


Figure 4-9 : Montage final du système de coulée

Des variantes aux méthodes proposées ont été testées, mais n'ont pas eu les résultats escomptés. Seul le dernier montage illustré à la Figure 4-9a permis de garantir un écoulement convenable du béton.

4.2.2.2 Validation du choix

Il est légitime de penser que la présence des séparateurs, qui s'enfoncent jusqu'au fond du coffrage, créent un plan de faiblesse dans l'échantillon. Mais qu'en est-il réellement? Des essais de traction ont été réalisés sur des spécimens coulés selon les systèmes de séparateurs présentés à la Figure 4-7 et à la Figure 4-9. La réduction de l'espacement inter-séparateurs et la diminution de la taille de ces derniers ne semblent pas perturber le comportement en traction. En effet, que ce soit en termes de déformation à pic, de résistance à pic ou de comportement post-pic, les résultats d'essais obtenus sont similaires (Figure 4-10).

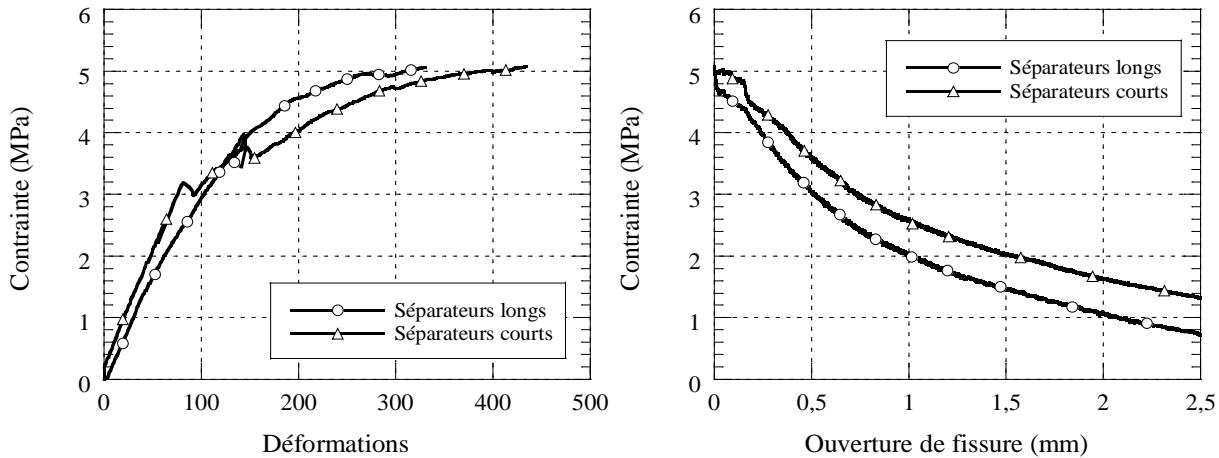


Figure 4-10 : Comparaison du comportement en traction pure entre l'utilisation de séparateurs longs et de séparateurs courts

Néanmoins, la découpe des spécimens a mis en évidence la présence d'un plan de faiblesse potentiel marqué par l'absence de fibres sur une bande de largeur proche de l'épaisseur d'un séparateur (Figure 4-11). En effet, l'absence de fibres peut nuire au contrôle de la fissuration dans cette zone et entraîner une rupture du spécimen le long du séparateur.



Figure 4-11 : Plan de faiblesse potentiel

Cependant, lorsque l'on observe les patrons de fissuration de ces spécimens, l'influence de ce plan de faiblesse n'est pas flagrante car les fissures ne suivent pas la direction des séparateurs (Figure 4-12). La Figure 4-12a et la Figure 4-12b indiquent que les séparateurs ne semblent pas avoir modifié le développement de la fissuration dans les spécimens. Pour la Figure 4-12c, une

zone faible suivant légèrement le tracé du séparateur est visible, mais le lien de cause à effet ne peut être établi.

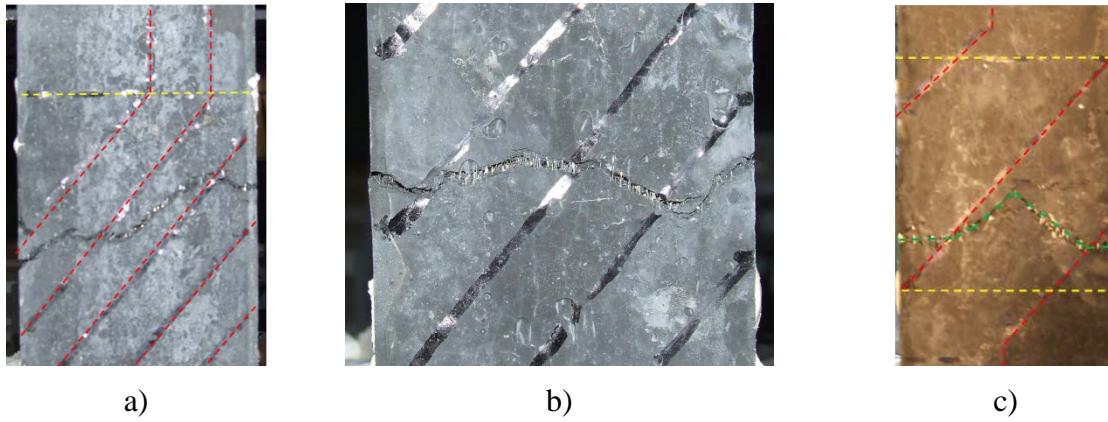


Figure 4-12: Patrons de fissuration sur trois spécimens coulés à l'aide de séparateurs.

En outre, un nombre plus important de séparateurs aurait dû, si chaque séparateur représente un plan de faiblesse, diminuer de façon significative la résistance en traction obtenue. Cet effet n'a pas été observé. En conséquence, la technique d'orientation des fibres avec séparateurs est validée.

4.3 Programme expérimental

Pour mesurer l'influence de l'orientation des fibres sur les BFUP, 6 orientations ont été étudiées : une matrice de BFUP sans fibres, des matrices de BFUP avec fibres orientées à 0, 22,5, 45, 67,5 et 90 degrés par rapport à l'axe longitudinal du spécimen. Chaque orientation des fibres a fait l'objet d'une gâchée de béton qui a permis de produire 6 spécimens. La composition des bétons utilisés est présentée dans le Tableau 4-1.

Pour chaque gâchée, une partie du matériau a été prélevée pour couler 4 cylindres de 100 mm de diamètre. Ces cylindres ont été confectionnés pour mesurer la résistance à la compression à 28 jours de chaque gâchée pour fin de comparaison.

Les 6 spécimens des essais de traction ont été coulés à l'aide de séparateurs courts. Après chaque coulée, un polythène a été placé sur chacun des spécimens pour éviter la formation d'une croute, puis les spécimens ont été conservés en cure humide pendant 7 jours après le contact eau ciment. Les spécimens ont tous été testés à 28 jours.

Tableau 4-1 : Composition du BFUP120

Constituants	Quantité (kg/m ³)
Ciment (HS)	1007
Fumée de silice	252
Superplastifiant (Polycarborylate)	46
Sable ($d_{\max}=0,6$ mm)	604
Fibres ($l_f=10$ mm; $d_f=0,2$ mm)	312
Eau/ciment (massique)	0,25
Sable/ciment (massique)	0,6
Volume de fibre	4%

4.4 Résultats expérimentaux

4.4.1 Caractérisation des gâchées

Des essais à l'état frais d'étalement, de teneur en air et d'évaluation de la masse volumique ont été réalisés sur chacune des gâchées. Les résultats sont présentés au Tableau 4-2. La faible variabilité des propriétés à l'état frais semblent indiquer que les propriétés à l'état durci seront similaires. Pour chacun des angles testés en traction des essais de résistance à la compression ont été réalisés sur la matrice cimentaire et sur le béton fibrés. Il est à noter que l'angle ne correspond pas à l'orientation des fibres dans le cylindre mais à celle dans le spécimen de traction. Les résultats de résistance à la compression obtenus sont présentés au Tableau 4-3. Ils mettent en évidence que l'ajout de fibres dans le mélange modifie peu la résistance à la compression. Les résistances atteintes pour des angles de 45 et 67,5 degrés sont bien inférieures aux résultats des autres gâchées et ont une forte variabilité. Cette différence s'explique par la présence de boules de ciment partiellement hydratées qui a été observée dans ces deux gâchées avant l'introduction

des fibres. La présence de ces dernières peut avoir eu comme conséquence une diminution des propriétés mécaniques. Cependant, l'ajout des fibres et la séquence de malaxage a possiblement permis de réduire leur nombre.

Tableau 4-2 : Résultats des essais à l'état frais

Gâchée	Étalement (mm)	Masse Volumique (Kg/m ³)	Teneur en air (%)
0 degré	850	2514	2,3
22,5 degrés	870	2511	1,7
45 degrés	790	2528	1,7
67,5 degrés	790	2540	1,7
90 degrés	815	2531	2,0
Matrice seule	980	2266	2,3

Tableau 4-3 : Résistance à la compression à 28 jours

Gâchée	f _{cBFUP} (MPa)	f _c matrice (MPa)
0 degré	100	102
22,5 degrés	107	108
45 degrés	93	92
67,5 degrés*	80	60
90 degrés	118	119

* Gâchée présentant un nombre de boules de ciment important

4.4.2 Loi de comportement en traction

4.4.2.1 Fibres orientées à 0 degré

Les résultats sont présentés à la Figure 4-13. Les spécimens 1 et 2 ne sont pas à considérer car des fissures sont apparues lors de la mise en place du spécimen dans la presse. On constate une bonne reproductibilité des résultats entre les spécimens 4, 5 et 6 qui présentent des déformations

et des résistances au pic de résistance du même ordre de grandeur. Seul le spécimen 3 a un comportement différent avec une phase écrouissante beaucoup moins marquée. Le comportement post-pic semble néanmoins similaire. Les différences observées sur le comportement du spécimen 3 vis-à-vis des autres spécimens ne peuvent pas être imputable à la présence des séparateurs, puisque ces spécimens ont été coulés seulement à la cuillère. Ainsi, seules l'orientation et ou la distribution des fibres ont pu jouer un rôle sur la réponse en traction.

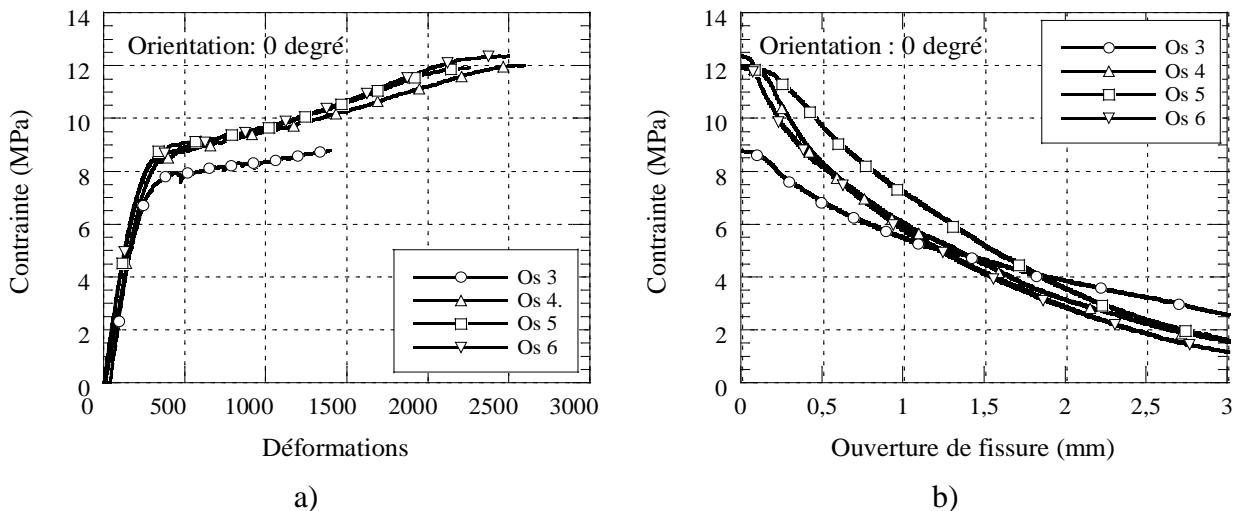


Figure 4-13 : Réponse en traction d'un BFUP avec fibres orientées à 0 degré

a) comportement pré-pic, b) comportement post-pic

4.4.2.2 Fibres orientées à 22,5 degrés

Les résultats sont présentés à la Figure 4-14. Les courbes des spécimens 1,5 et 6 ont été retirées, car la fissuration s'est développée en dehors de la zone d'orientation des fibres et en dehors de la zone où des séparateurs étaient présents. Les 3 spécimens résiduels ont montré un comportement similaire avec des patrons de fissuration bien différents. Pour les spécimens 2 et 4, plusieurs fissures se sont développées : deux macro-fissures parallèles aux séparateurs pour le spécimen 2 et 3 fissures dans le cas du spécimen 4, mais aucune d'entre elles ne suivaient l'axe des séparateurs. Ces patrons de fissurations avaient déjà été constatés par Oesterlee (2010) sur des éprouvettes prismatiques. Le spécimen 3 a présenté une seule fissure dans la zone des fibres

orientées, mais cette dernière suivait partiellement la position du séparateur central. Malgré des profils de fissuration différents, les spécimens 2, 3 et 4 ont atteint la même résistance en traction et un comportement post-pic similaire. De plus, on constate que pour un angle de 22,5 degrés, le caractère écrouissant du matériau est beaucoup moins marqué qu'à 0 degré.

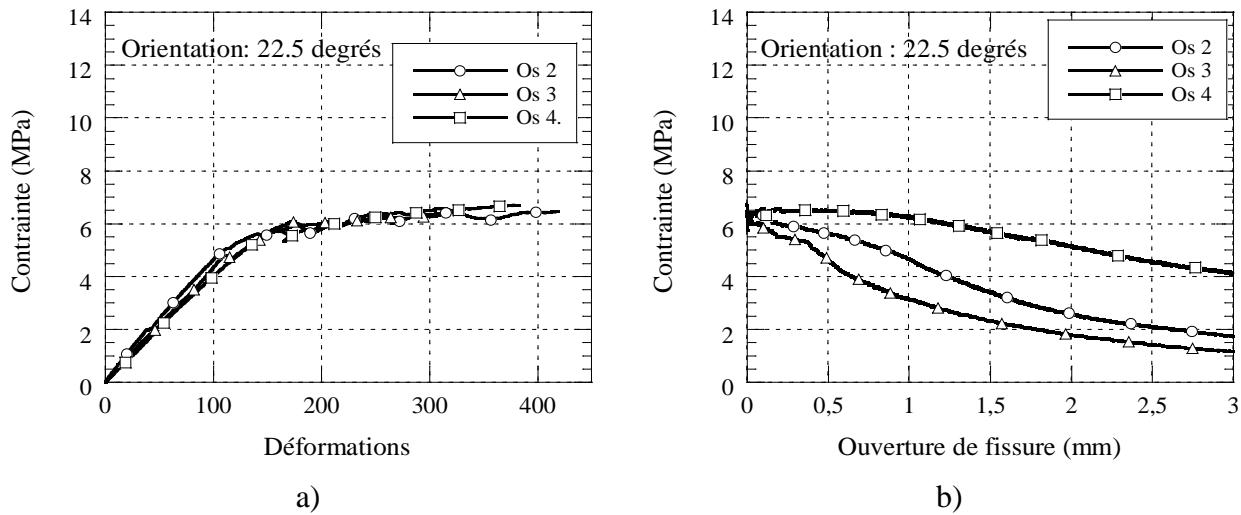


Figure 4-14 : Réponse en traction d'un BFUP avec fibres orientées à 22,5 degrés
a) comportement pré-pic, b) comportement post-pic

4.4.2.3 Fibres orientées à 45 degrés

Les résultats sont présentés à la Figure 4-15. Les résultats obtenus sur les spécimens avec fibres orientées à 45 degrés ont présenté les mêmes défauts que pour les spécimens avec orientation de fibres à 22,5 degrés. La fissuration de 3 des 4 premiers spécimens ayant été observée dans l'axe les séparateurs (Figure 4-16a), il a été convenu d'entailleur les spécimens 5 et 6 sur 20 mm (Figure 4-16b). L'utilisation d'un élément entaillé conduit généralement à une hausse de résistance observée (Markovic, 2006). Cependant, le spécimen 6 a présenté la même résistance et le comportement global était similaire à celui du spécimen 2 non entaillé (Figure 4-16c). Le spécimen 5 n'a pas été considéré car un des LVDT de contrôle n'a pas fonctionné. Le caractère écrouissant du matériau avec des fibres orientées à 45 degrés s'apparente d'avantage à un plateau plastique. Cette observation est cohérente avec les travaux de Van Mier et al. (2002).

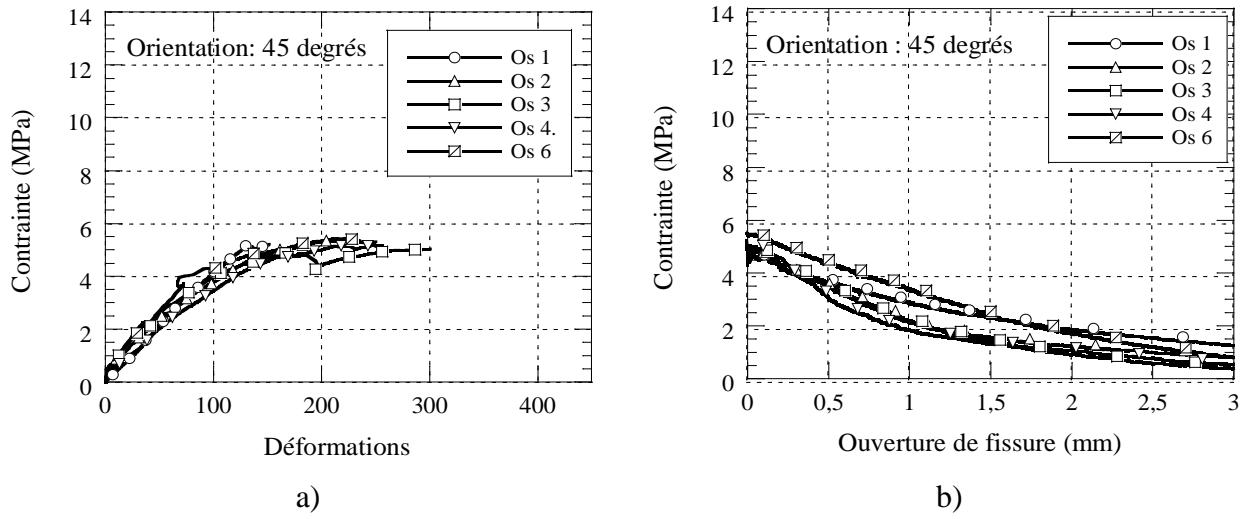


Figure 4-15 : Réponse en traction d'un BFUP avec fibres orientées à 45 degrés

a) comportement pré-pic, b) comportement post-pic

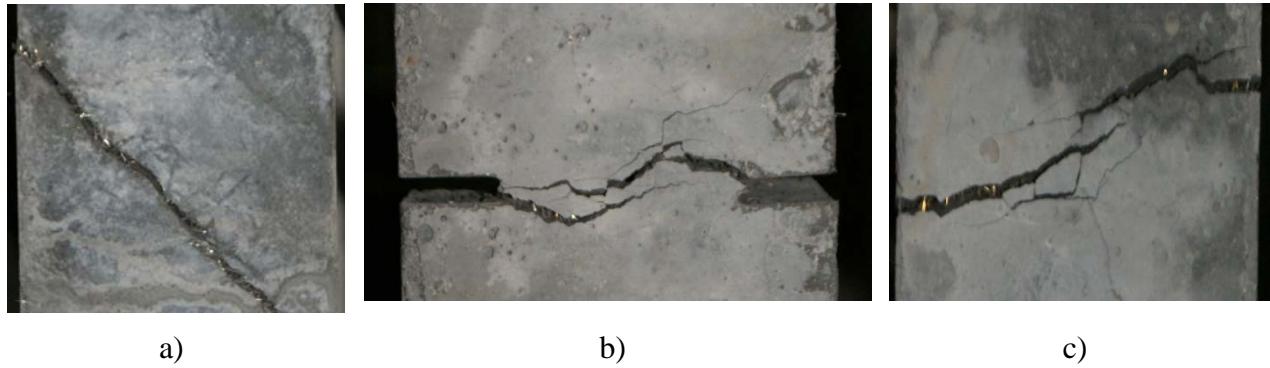


Figure 4-16 : Profils de fissuration relevés sur les spécimens avec fibres orientées à 45 degrés

a) spécimen 1, b) spécimen 6, c) spécimen 2

4.4.2.4 Fibres orientées à 67 degrés

Les résultats sont présentés à la Figure 4-17. Les courbes des spécimens 3 et 4 ont été retirées car la fissure s'est développée en dehors de la zone d'orientation des fibres et en dehors de la zone où des séparateurs étaient présents. À nouveau, afin d'assurer une fissuration dans la zone souhaitée, deux des six spécimens (os 5 et 6) ont été entaillés dans leur partie centrale. Les comportements obtenus sont relativement proches pour l'ensemble des spécimens à l'exception des spécimens 3

et 4 dont les résultats ont été retirés. La phase écrouissante du matériau a totalement disparu avec une orientation des fibres avoisinant les 67 degrés.

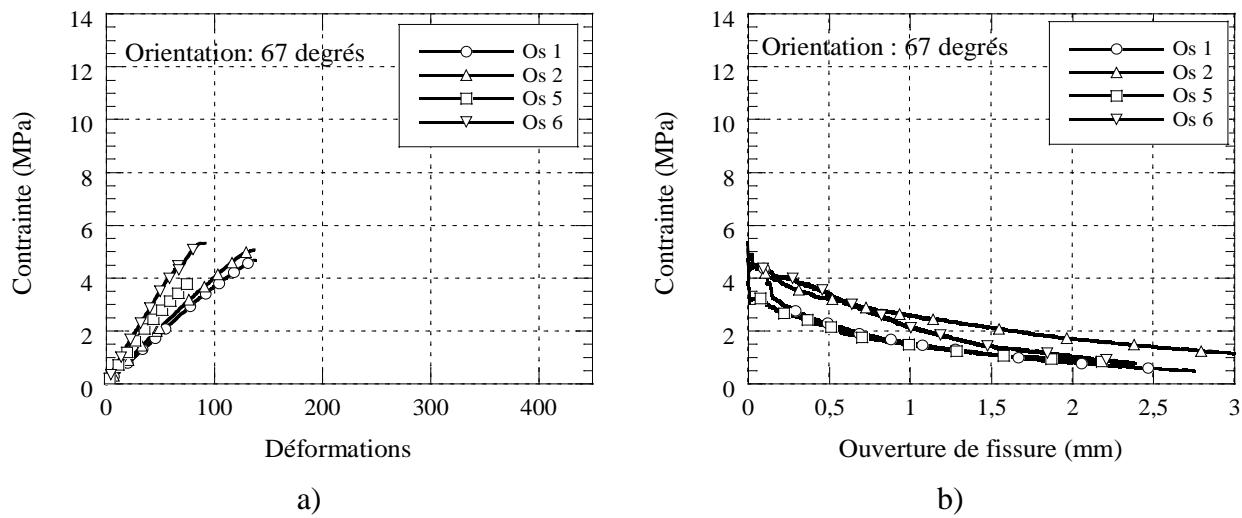


Figure 4-17 : Réponse en traction d'un BFUP avec fibres orientées à 67 degrés

a) comportement pré-pic, b) comportement post-pic

4.4.2.5 Fibres orientées à 90 degrés

Les résultats sont présentés à la Figure 4-18. Les courbes des spécimens 3, 4 et 5 ont été retirées car des difficultés expérimentales sont survenues lors des essais et la fissure s'est développée en dehors de la zone d'orientation des fibres et en dehors de la zone où des séparateurs étaient présents. Pour cette orientation théorique de 90 degrés, les résultats obtenus font ressortir à nouveau une absence d'écrouissage.

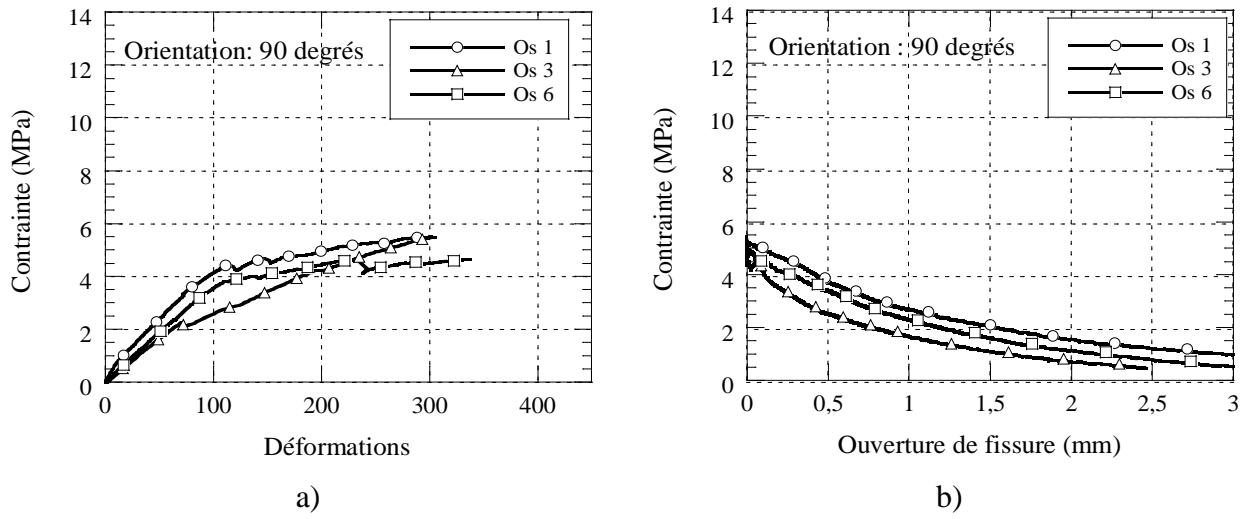


Figure 4-18 : Réponse en traction d'un BFUP avec fibres orientées à 90 degrés

a) comportement pré-pic, b) comportement post-pic

4.4.3 Influence du coefficient d'orientation

La compilation des résultats (Figure 4-19) met en évidence qu'avec l'augmentation du coefficient d'orientation des fibres, la longueur et la pente de la phase écrouissante sont significativement réduites. Une réduction de 95% de la longueur de la phase plastique et une réduction de 60% de la résistance maximale ont été observées pour les coefficients les plus défavorables. Pour les spécimens orientés à 67 degrés, il est possible que les séparateurs aient influencé le patron de fissuration, car les déformations de résistance relevées au pic sont inférieures aux déformations au pic de résistance relevées pour les spécimens orientés à 90 degrés sans séparateurs. De plus, les faibles résistances obtenues lors des essais de résistance à la compression a conduit à la non prise en compte de ces résultats.

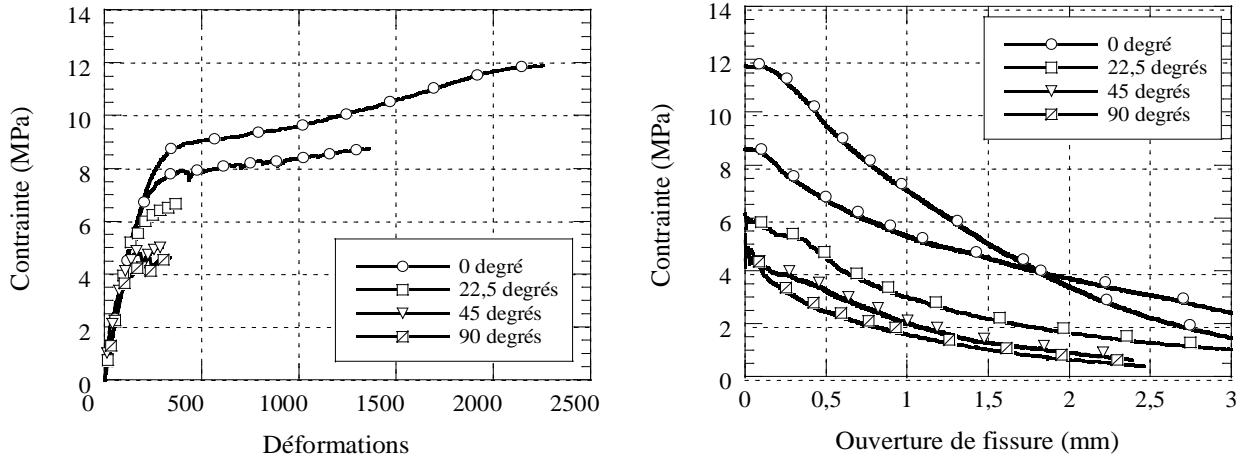


Figure 4-19 : Comportement pré-pic et post-pic du BFUP en traction directe pour différentes orientations théoriques de fibres

Les résistances à la traction maximales atteintes par les différentes orientations des fibres varient entre 4 à 12 MPa. Ces résistances peuvent être comparées à une estimation théorique développée par Naaman (2008) qui suppose que toutes les fibres se déchaussent simultanément (4-1).

$$\sigma_{pc} = \lambda \cdot \tau \cdot \frac{l_f}{d_f} \cdot V_f \quad (4-1)$$

Avec - λ : paramètre dépendant de l'orientation des fibres, de l'effet de groupe et de la résistance à l'arrachement de la fibre (Naaman, 2003);

- τ : adhérence moyenne ou équivalent entre les fibres et la matrice cimentaire, $\tau = 10$ MPa selon Orange et al.(2000);
- $\frac{l_f}{d_f}$: élancement de la fibre;
- V_f : dosage en fibres.

Dans le cas où toutes les fibres sont parfaitement parallèles à l'effort de traction, $\lambda = 1$ et la résistance à la traction théorique atteinte par ce BFUP est alors de :

$$\sigma_{pc} = 1 \times 10 \times 50 \times 0,04 = 20 \text{ MPa} \quad (4-2)$$

Dans le cas d'une orientation aléatoire (3D), $\lambda = 0,3$ et on obtient une résistance à la traction théorique de :

$$\sigma = 0,3 \times 10 \times 50 \times 0,04 = 6 \text{ MPa} \quad (4-3)$$

Les résistances inférieures à 6 MPa correspondent donc à des mélanges avec des orientations de fibres fortement défavorables et qui présentent des coefficients d'orientation inférieurs à ceux d'une orientation 3D. Les résultats obtenus sont donc conformes aux estimations théoriques.

La Figure 4-20 permet de comparer le comportement près-pic obtenu en traction directe sur des éléments en BFUP testés à l'EPFL (Oesterlee, 2010) et l'EPM. Cette fois l'orientation des fibres réelle mesurée est indiquée au lieu de l'orientation théorique. Seules les tendances peuvent être comparées car la matrice cimentaire, les fibres, la méthode de détermination du coefficient d'orientation et l'essai de traction sont différentes. D'abord, la diminution du coefficient d'orientation entraîne une diminution significative du comportement écrouissant du matériau ainsi que de sa résistance en traction. Ensuite, la contrainte de première fissuration est grandement affectée alors que la rigidité reste inchangée. Dépendamment des projets de recherche, une réduction par deux ou six de la résistance ultime et de la résistance à la première fissuration ont été constatées. Il en est de même pour la déformation au pic.

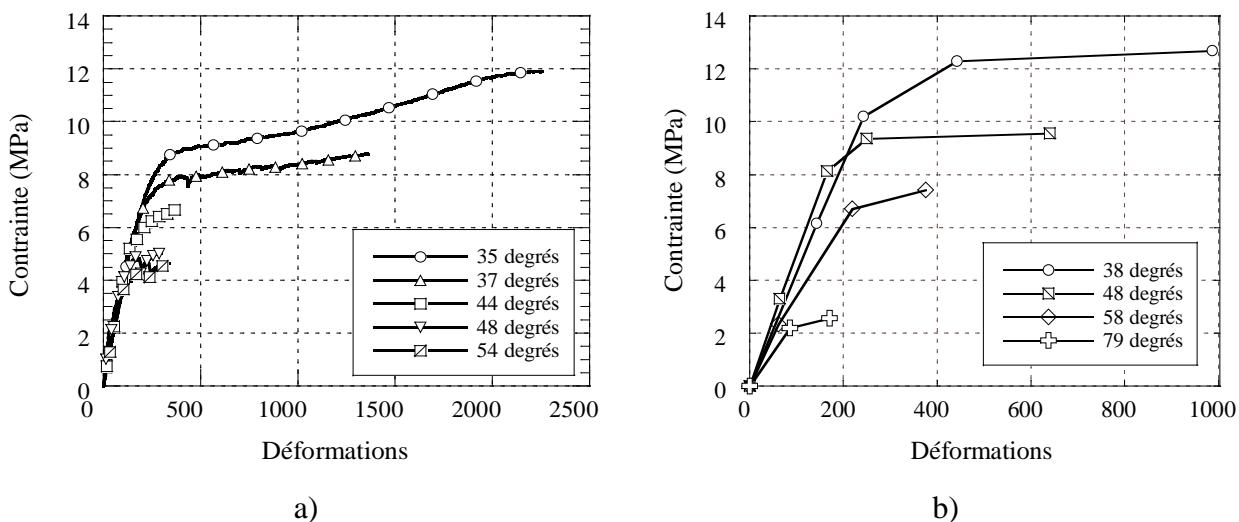


Figure 4-20 : Comparaison du comportement pré-pic en traction directe d'élément en BFUP pour différentes orientations de fibres mesurées a) selon la présente étude et b) selon Oesterlee (2010)

Comme le met en évidence la Figure 4-21, la résistance en traction maximale est directement proportionnelle au coefficient d'orientation dans l'étude d'Oesterlee. Dans la présente étude, on constate 2 phases distinctes: une résistance qui évolue très peu pour des angles d'inclinaison supérieurs à 40 degrés, puis une augmentation significative de la résistance pour des angles inférieurs s'approchant de l'orientation idéale pour la reprise d'efforts.

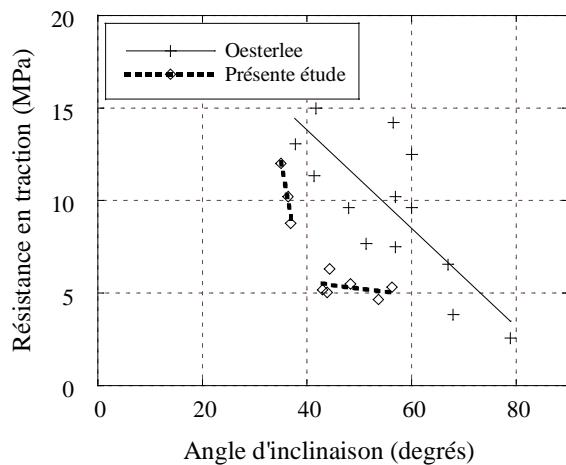


Figure 4-21: Relation entre angle d'inclinaison et résistance à la traction

Le nombre important de spécimens ayant fissuré dans la zone de changement de section, et ce malgré une orientation défavorable dans la partie centrale, suggère que la géométrie de spécimens en forme d'os utilisée n'est pas idéale. Do (1994) a conclu qu'un rapport rayon de courbure / épaisseur du spécimen supérieur à 13 était nécessaire réduire les concentrations de contrainte, pour des essais sur des éprouvettes en traction. Behloul (1996) a quant à lui utilisé un rapport rayon de courbure / variation de largeur du spécimen de 10 sur des éprouvettes prismatiques. Dans le cadre de cette étude, le rapport rayon de courbure / variation de largeur du spécimen est de 0,5 seulement. Il serait donc pertinent d'augmenter le rayon de courbure au changement de section des spécimens pour des essais futurs.

4.4.4 Angles d'inclinaison souhaités versus angles d'inclinaison obtenus

Pour chaque orientation de fibres testée, un ou plusieurs spécimens ont été découpés pour vérifier si les orientations obtenues étaient conformes aux attentes. La découpe a été réalisée parallèlement à la fissure principale du spécimen et, lorsque la situation le permettait, à moins d'une longueur de fibre de la fissure. Le Tableau 4-4 compare les angles d'inclinaison de fibres souhaités avec les valeurs mesurées à partir du programme développé et présenté au chapitre 3. Pour rappel, un angle d'inclinaison de 0 degré correspond à une fibre orientée parallèlement à l'effort de traction.

Tableau 4-4 : Comparaison des angles d'inclinaison souhaités avec les angles d'inclinaison obtenus

Spécimen	Orientation souhaitée	Programme
Os 0 degré	0	35
Os 0 degré	0	36
Os 0degré	0	37
Os 22,5 degrés	22,5	44
Os 45degrés	45	43
Os45degrés	45	44
Os 90 degrés	90	48
Os 90 degrés	90	54

La méthode d'orientation des fibres utilisée dans ce projet a permis d'obtenir dans l'ensemble une orientation fortement préférentielle. Les orientations faibles souhaitées ont été largement surestimées et les orientations élevées ont plutôt été sous-estimées. Premièrement ceci pourrait être dû en partie à l'imprécision du programme. L'étude de la distribution angulaire des fibres (Figure 4-22) permet de mettre en évidence la difficulté du programme à évaluer les propriétés des ellipses pour de faibles angles d'inclinaison. En effet, on retrouve dans le cas des spécimens orientés à 0 degré une très forte proportion de fibres entre 20 et 40 degrés et une part inexistante entre 0 et 20 degrés. Ceci est explicable par le fait que les fibres orientées entre 0 et 20 degrés sont comptabilisées dans la classe supérieure (20 à 40 degrés), ce phénomène étant dû

principalement à l'erreur de mesure du programme (Figure 3-17). Pour des spécimens avec des orientations de fibres inférieures à 45 degrés, la distribution des fibres est beaucoup plus homogène et plus représentative de ce qui est attendu.

Deuxièmement, compte tenu de la géométrie du coffrage, la technique de mise en place est moins adaptée pour l'obtention de spécimens dont les fibres sont orientées de façon défavorable. Ainsi, une orientation des fibres avec l'usage de séparateurs très espacés ne permet pas d'obtenir les orientations souhaitées précisément. Cependant, contrairement à ce qui avait été observé au cours de la validation du choix de coulée, aucun plan de faiblesse n'était apparent lors de la découpe des spécimens ou lors de l'analyse de la répartition des fibres dans la section.

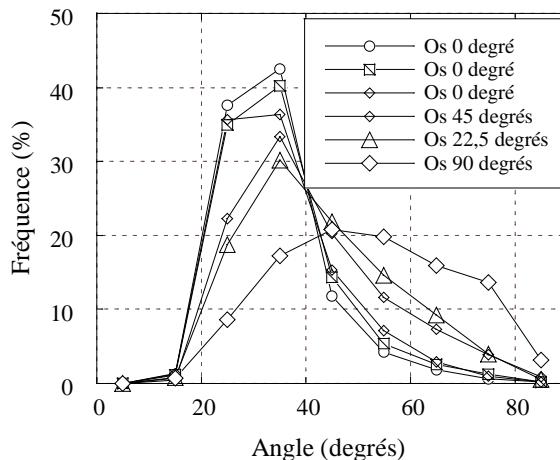


Figure 4-22: Distribution angulaire

4.4.5 Comparaison des méthodes de calcul de l'angle d'inclinaison des fibres

Le Tableau 4-5 compare les angles d'inclinaison de fibres théoriques calculées avec l'équation (2-2) proposée par Dupont et al. (2005), l'équation (2-12) de Krenchel (1975) et le programme de mesure de l'orientation des fibres présenté au chapitre 3. Dans l'équation (2-12), la densité de fibres de la section analysée a été obtenue à l'aide du programme. On constate que l'évaluation du coefficient d'orientation à partir de la densité de fibres (équation 2-12) donne des résultats similaires à ceux calculés à l'aide du programme développé. L'équation (2-2), qui ne dépend que de la géométrie des spécimens, sur-estime grandement l'angle d'inclinaison mesuré.

Tableau 4-5 : Comparaison des angles d'inclinaison obtenus avec le programme proposé et avec les méthodes de calculs de Dupont et al.(2005) et Krenchel (1975)

Spécimen	Programme (mesuré)	Équation	Densité	Équation
		(2-2)	(fibres / mm ²)	(2-12)
Os 0 degré	35	58	1,08	32
Os 0 degré	36	58	0,94	42
Os 0degré	37	58	1,01	37
Os 22,5 degrés	44	60	0,91	44
Os 45degrés	43	67	0,92	43
Os45degrés	44	67	0,91	44
Os 90 degrés	48	0	0,69	57
Os 90 degrés	54	0	0,43	70

La Figure 4-23 présente les relations obtenues à l'aide du programme développé et à l'aide de l'équation (2-12) entre la densité de fibres et l'angle d'inclinaison des fibres. On constate que l'équation (2-12) donne une évaluation sécuritaire de l'angle d'inclinaison pour des densités de fibres inférieures à 1 fibre / mm². L'utilisation de l'équation (4-4) est suggérée pour obtenir une meilleure approximation. Elle considère le diamètre des fibres mesuré par le programme et d'une fonction puissance pour des densités de fibres supérieures à 0,6 fibre / mm².

$$\theta = \begin{cases} \cos^{-1}\left(\frac{\pi d_f^2 \text{mesuré}}{4V_f} n_f\right), & n_f < 0,6 \frac{\text{fibre}}{\text{mm}^2} \\ \cos^{-1}\left(\frac{\pi d_f^2 \text{mesuré}}{4V_f} \sqrt{n_f}\right), & n_f \geq 0,6 \frac{\text{fibre}}{\text{mm}^2} \end{cases} \quad (4-4)$$

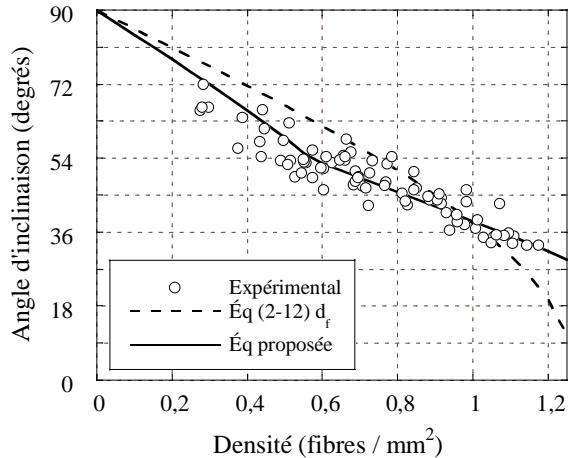


Figure 4-23: Relation entre la densité de fibres et angle d'inclinaison

Il est important de souligner que l'utilisation de telles équations pour un béton fibré à forte densité nécessite l'utilisation d'un programme de détection de fibres performant pour comptabiliser leur nombre. À moins d'arriver à développer une méthode de binarisation couplée à une méthode d'augmentation du contraste plus efficace, de tel programme nécessite l'évaluation des propriétés géométriques pour effectuer un filtrage. Au cours de cette étape une évaluation du coefficient d'orientation peut être réalisée comme dans le programme développé dans ce projet, rendant de fait l'utilisation de ces équations obsolètes.

4.5 Systèmes d'équations décrivant le comportement en traction

À partir des essais de traction présentés, un modèle prédictif de loi de traction en fonction du coefficient d'orientation et de la densité de fibre a été développé. Il s'inspire du modèle de traction complet suggéré par Naaman et al.(2006). Son modèle est basé sur 7 points caractéristiques du comportement en traction (Figure 4-24a). Pour des fins de conception, il peut être réduit aux points 1 et 3(Figure 4-24b). Cette simplification est aussi reliée aux difficultés de prédire le comportement en traction d'un BFUP. Le point 1 peut être estimé à partir de l'équation (4-5). Les coordonnées du point 3 peuvent être estimées à partir de l'équation (4-1).

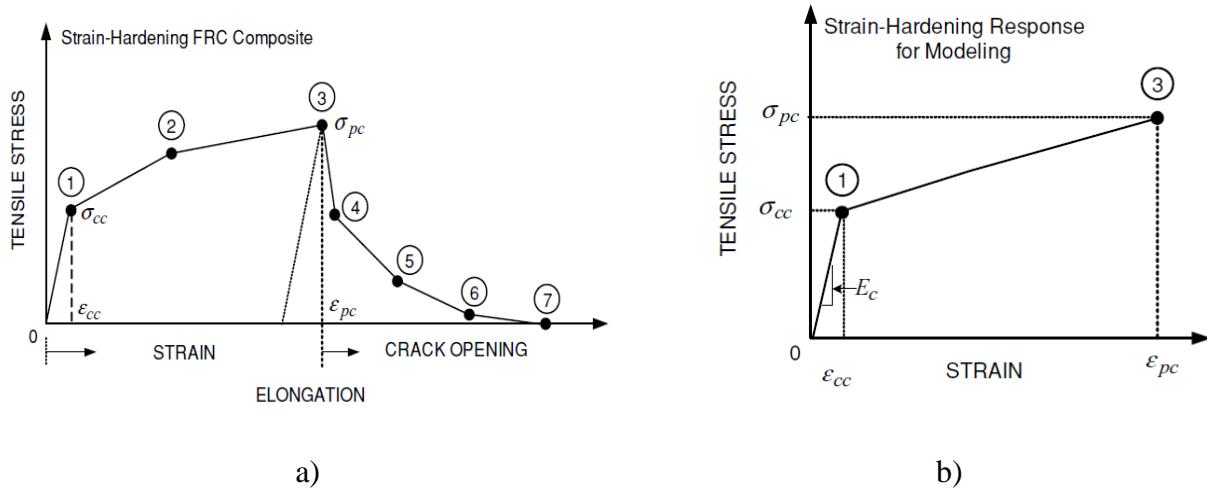


Figure 4-24 : Modèles de traction suggérés par Naaman et al. (2006) a) général b) minimal

$$\sigma_{cc} = \sigma_{mu} \cdot (1 - V_f) + \lambda \cdot \tau \cdot V_f \cdot \frac{l_f}{d_f} \quad (4-5)$$

Avec $-\sigma_{mu}$: résistance à la traction de la matrice non fibrée ;

- λ : paramètre dépendant de l'orientation des fibres, de l'effet de groupe et de la résistance à l'arrachement de la fibre;
- τ : adhérence moyenne ou équivalente entre les fibres et la matrice cimentaire;
- $\frac{l_f}{d_f}$: élancement de la fibre;
- V_f : pourcentage de fibre.

Cette équation implique que la résistance de première fissuration du BFUP, qui correspond à la contrainte de fissuration de la matrice, dépend directement des caractéristiques des fibres ainsi que de leur orientation. Or, par définition la résistance de la matrice devrait être indépendante des propriétés des fibres. De plus, les essais de caractérisation de la matrice réalisés au cours de cette étude n'ont pas permis d'obtenir les caractéristiques de la matrice en traction directe. Il a donc été choisi de déterminer empiriquement les paramètres de la courbe de traction à partir des essais de traction réalisés, des coefficients d'orientation et des densités de fibres mesurés à partir du programme développé.

4.5.1 Étude du comportement pré-pic

La modélisation du comportement pré-pic présenté dans cette section est une adaptation du modèle de Naaman et al. (2006) pour le BFUP développé à l'EPM. La détermination de la contrainte de première fissuration est difficile et est parfois subjective. Dans ces travaux, cette contrainte a été déterminée à partir du graphique représentant l'ensemble du comportement du BFUP en traction (Figure 6-8). Cependant, afin de mieux représenter le comportement du matériau étudié, le second point du modèle général de Naaman a été introduit pour des angles d'inclinaison inférieurs à 47 degrés (Figure 4-25). Ce point permet de prendre en considération le double changement de rigidité.

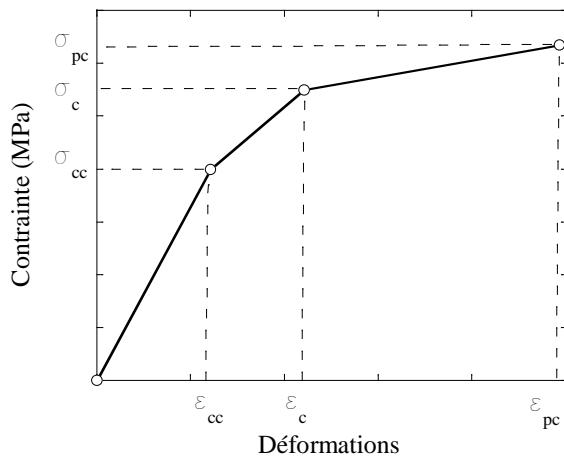


Figure 4-25 :Modèles de traction suggérés dans la présente étude

Quatre systèmes d'équations pour reproduire le comportement pré-pic ont été développés à partir de la densité ou de l'orientation des fibres. Des fonctions linéaires et bi-linéaires ont été utilisées pour obtenir les différents paramètres décrivant la courbe de traction. Le Tableau 4-7 et le Tableau 4-8 comparent les erreurs obtenues selon chacun des systèmes d'équations testées par rapport aux valeurs expérimentales présentées au Tableau 4-6.

Tableau 4-6 : Données d'entrée pour l'élaboration du modèle pré-pic en traction

Spécimen	0°	0°	0°	22,5°	90°	90°
Orientation (°)	35	36	37	44	48	54
Densité (fibres/mm ²)	1,08	0,94	1,01	0,91	0,69	0,59
$\sigma_{pc\ exp}$ (MPa)	12	10,2	8,78	6,32	5,51	4,64
$\varepsilon_{pc\ exp}$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	2442	1650	1350	311	302	312
$\sigma_{c\ exp}$ (MPa)	8,57	8,90	7,77	5,5	*	*
$\varepsilon_{c\ exp}$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	321	330	333	150	*	*
$\sigma_{cc\ exp}$ (MPa)	5,65	5,02	4,73	4,55	4,46	3,79
$\varepsilon_{cc\ exp}$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	155	157	117	110	114	112

* L'angle d'inclinaison de ces spécimens étant supérieur à 47 degrés l'utilisation de ce point n'est pas nécessaire.

Tableau 4-7 : Erreurs relatives mesurées lors de l'utilisation d'une fonction linéaire basée sur le coefficient d'orientation et la densité des fibres

Spécimen	Orientation				Densité			
	σ_{pc} calculée (MPa)	ε_{pc} calculées ($\mu\text{m}/\text{m}$)	σ_{cc} calculée (MPa)	ε_{cc} calculée ($\mu\text{m}/\text{m}$)	σ_{pc} calculée (MPa)	ε_{pc} calculée ($\mu\text{m}/\text{m}$)	σ_{cc} calculée (MPa)	ε_{cc} calculée ($\mu\text{m}/\text{m}$)
Os0degré	18,14	30,36	9,39	6,97	20,41	33,96	9,72	11,06
Os0degré	7,66	4,84	0,4	9,65	22,42	34,27	5,55	18,45
Os0degré	5,77	13,16	5,8	20,59	0,92	0,87	3,75	13,46
Os 22,5 degrés	6,28	124,68	1,66	21,33	21,15	222,12	2,75	21,62
Os 90 degrés	4,97	0,66	6,34	3,14	7,4	0,66	7,71	2,49
Os 45 degrés	39,3	238,88	8,5	0,12	47,68	293,87	10,79	1,91
Os 45 degrés	36,93	153,35	7,03	12,68	49,62	222,04	10,29	11,4
Os 90 degrés	19,67	3,85	1,64	4,55	23,6	3,85	0,58	7,43
Erreur moyenne (%)	17,34	30,36	5,10	9,88	24,15	101,46	6,39	10,98
Écart type (%)	14,02	89,98	3,41	7,85	17,11	122,47	3,82	6,99

Tableau 4-8 : Erreurs relatives mesurées lors de l'utilisation d'une fonction bi-linéaire basée sur le coefficient d'orientation et la densité des fibres

Spécimen	Orientation				Densité			
	σ_{pc} calculée (MPa)	ε_{pc} calculées ($\mu\text{m}/\text{m}$)	σ_{cc} calculée (MPa)	ε_{cc} calculée ($\mu\text{m}/\text{m}$)	σ_{pc} calculée (MPa)	ε_{pc} calculée ($\mu\text{m}/\text{m}$)	σ_{cc} calculée (MPa)	ε_{cc} calculée ($\mu\text{m}/\text{m}$)
Os0degré	0,76	0,41	0,15	1,33	0	1,61	0	1,48
Os0degré	3,82	2,82	0,69	9,35	32,51	54,39	8,84	21,29
Os0degré	3,27	7,91	0,55	9,96	0	1,06	0,01	9,36
Os 22,5 degrés	12,92	3,54	6,11	8,22	6,71	127,46	0,43	17,85
Os 90 degrés	5,03	0,66	7,13	1,88	2,94	0,66	6,58	1,29
Os 45 degrés	7,85	17,65	2,34	9,39	30,03	177,97	7,35	4,96
Os 45 degrés	9,70	0,33	1,71	2,73	32,46	129,13	7,04	8,12
Os 90 degrés	4,23	3,85	3,87	3,29	3,09	3,85	3,9	3,26
Erreur moyenne (%)	5,95	4,65	2,82	5,77	13,47	62,01	4,27	8,45
Écart type (%)	3,94	5,82	2,64	3,77	15,23	72,51	3,68	7,49

On constate que l'utilisation d'une fonction bi-linéaire dépendant uniquement de l'angle d'inclinaison des fibres fournit les meilleurs résultats avec un pourcentage d'erreur moyen de 4 %. Ainsi le modèle pré-pic préconisé pour reproduire le comportement en traction est le suivant :

$$\sigma_{cc} = \begin{cases} 50,18 \cdot \cos \theta - 35,38, & \theta < 37^\circ \\ 2,79 \cdot \cos \theta + 2,28, & \theta \geq 37^\circ \end{cases} \quad (4-6)$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{\sigma_{cc}}{E_c} = \frac{\sigma_{cc}}{36000} \quad (4-7)$$

$$\sigma_c = \begin{cases} 55,79 \cdot \cos \theta - 37,27, & \theta < 38^\circ \\ 19 \cdot \cos \theta - 8,4, & 47^\circ \geq \theta \geq 38^\circ \end{cases} \quad (4-8)$$

$$\varepsilon_c = \begin{cases} 62 \cdot (\sigma_c - 3,128), & \theta < 38^\circ \\ 929 \cdot \cos \theta - 511, & 47^\circ \geq \theta \geq 38^\circ \end{cases} \quad (4-9)$$

$$\sigma_{pc} = \begin{cases} 172 \cdot \cos \theta + 128,69, & \theta < 37^\circ \\ 20 \cdot \cos \theta - 7,23, & 54,5^\circ \geq \theta \geq 37^\circ \end{cases} \quad (4-10)$$

$$\varepsilon_{pc} = \begin{cases} \frac{\sigma_{pc} - 4,551}{0,0031}, & \theta < 37^\circ \\ 6698 \cdot \cos \theta - 4120, & 47^\circ \geq \theta \geq 37^\circ \\ 300, & 54,5^\circ \geq \theta \geq 47^\circ \end{cases} \quad (4-11)$$

Un angle d'inclinaison des fibres de 38 degrés a été choisi pour dissocier les comportements de la première phase d'écrouissage, pour les autres phases un angle de 37 degrés a été utilisé. La Figure 4-26 permet de comparer les courbes pré-pic expérimentales obtenues et les courbes pré-pic obtenues à l'aide des équations (4-6) à (4-11).

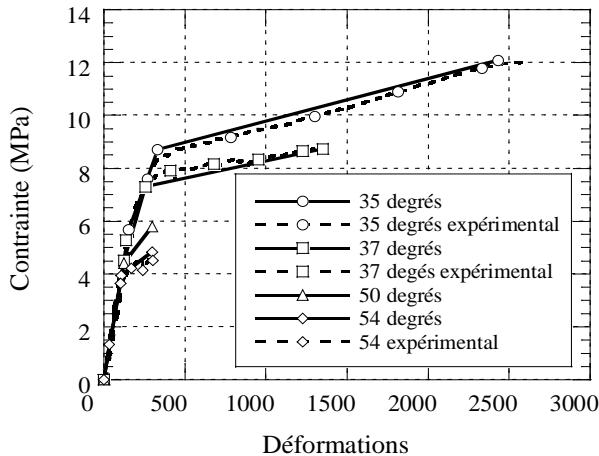


Figure 4-26 : Comparaison modèle proposé et données expérimentales

4.5.2 Étude du comportement post-pic

Lors de la phase de conception le comportement post-pic du BFUP n'est généralement pas pris en considération. Cependant, dans le cadre d'un modèle par éléments finis, il est impératif de connaître ce comportement pour prédire le comportement d'éléments structuraux amenés à la rupture. Behloul (1996), Li (1996), Spasojevic (2008) puis Redaelli (2009) ont proposé des modèles analytiques basés sur une approche micromécanique pour caractériser la phase adoucissante. Ce type d'approche est basé sur la réponse d'une fibre unique à un essai d'arrachement ainsi que sur des hypothèses portant sur la distribution et la répartition des fibres dans la section fissurée (Redaelli, 2009). Les paramètres tels que la géométrie des fibres, l'adhérence fibre-matrice et la résistance de la matrice sont alors considérés pour reproduire la courbe adoucissante du BFUP.

Behloul (1996) et Li (1996) proposent d'utiliser une loi contrainte-ouverture de fissure exponentielle(4-12) et prennent en considération la distribution et de l'orientation des fibres grâce à un paramètre β . Selon Behloul (1996),le facteur β vaut 4 pour une distribution isotrope 3D et vaut 2 pour une orientation unidirectionnelle des fibres dans le BFUP. Redaelli (2009) indique que dans le cadre des travaux de Jungwirth et al. (2004) sur le BFUP de EIFFAGE, cette équation surestimaît l'énergie de rupture.

Spasojevic (2008) a proposé une autre équation (4-13) qui a été améliorée par la suite par Redaelli (2009) et pour s'appliquer au BFUP développé à l'EPFL (4-14). On constate que comparativement à l'équation (4-12), l'équation (4-14) ne fait pas intervenir directement la répartition et l'orientation des fibres dans la zone fissurée. Seules la longueur des fibres et la contrainte maximale atteinte en traction (σ_{pc}) sont nécessaires pour prédire la loi d'adoucissement. L'équation (4-14)a ensuite été modifiée pour prendre en compte le coefficient d'orientation moyen dans le spécimen (équation 4-15).

$$\sigma(w) = \sigma_{pc} \cdot \left(1 - \frac{w}{l_f/2}\right)^{\beta} \quad (4-12)$$

$$\sigma(w) = \frac{\sigma_{pc}}{\left(1 + \frac{w}{1,5}\right)} \quad (4-13)$$

$$\sigma(w) = \frac{\sigma_{pc}}{\left(1 + \frac{w}{1,5}\right)} \frac{l_f/2 - w}{l_f/2} \quad (4-14)$$

$$\sigma(w) = \frac{\sigma_{pc}}{\left(1 + \frac{w}{1+\cos\theta}\right)} \frac{l_f/2 - w}{l_f/2} \quad (4-15)$$

Le Tableau 4-9 a permis de faire une première sélection dans le choix du modèle en comparant les énergies de rupture expérimentales et prédictes par les équations précédentes pour différentes orientations de fibres.

Tableau 4-9 :Comparaison des modèles en terme d'énergie de rupture pour une ouverture de fissure de 3mm

Spécimen	Exp	Énergie de rupture (kJ/m ²)					Éq. (4-14)	Éq. (4-15)
		$\beta = 4$	$\beta = 3$	$\beta = 2,7$	$\beta = 2$			
Os 0°	15,70	11,88	14,56	15,67	18,71	14,90	15,80	
Os 0°	14,87	10,10	12,42	13,30	15,91	12,67	14,27	
Os 0°	14,78	8,68	10,69	11,47	13,68	10,89	11,60	
Os 22,5°	8,24	6,25	7,70	8,25	9,86	7,85	8,20	
Os 90°	5,50	4,50	4,53	5,92	7,00	5,60	5,60	
Erreur (%)	-	28,00	15,11	8,18	16,10	10,55	5,69	

La Figure 4-27 compare les courbes d'adoucissement expérimentales obtenues pour différents angles d'inclinaison de fibres avec les courbes tirées des équations (4-15) et (4-12) pour $\beta = 2,7$. Le facteur $\beta = 2,7$ correspond au facteur minimisant l'erreur dans le Tableau 4-9. On constate que les deux modèles retenus donnent des résultats similaires. Cependant, le modèle de Behloul (1996) donne des valeurs acceptables et ce pour un paramètre β constant quel que soit l'orientation étudiée. La prise en compte du coefficient d'orientation dans l'équation de Redealli (2009) permet d'obtenir une meilleure approximation de l'énergie de rupture à 3 mm. L'une ou l'autre des équations sont donc applicables pour estimer la phase adoucissante. De plus, les deux modèles étudiés donnent des courbes d'adoucissement conservatrices, ce qui est un avantage pour des fins de modélisations. L'équation (4-15) donne les meilleurs résultats pour la prédiction de la phase adoucissante. Cette dernière sera donc utilisée dans la suite de cette étude.

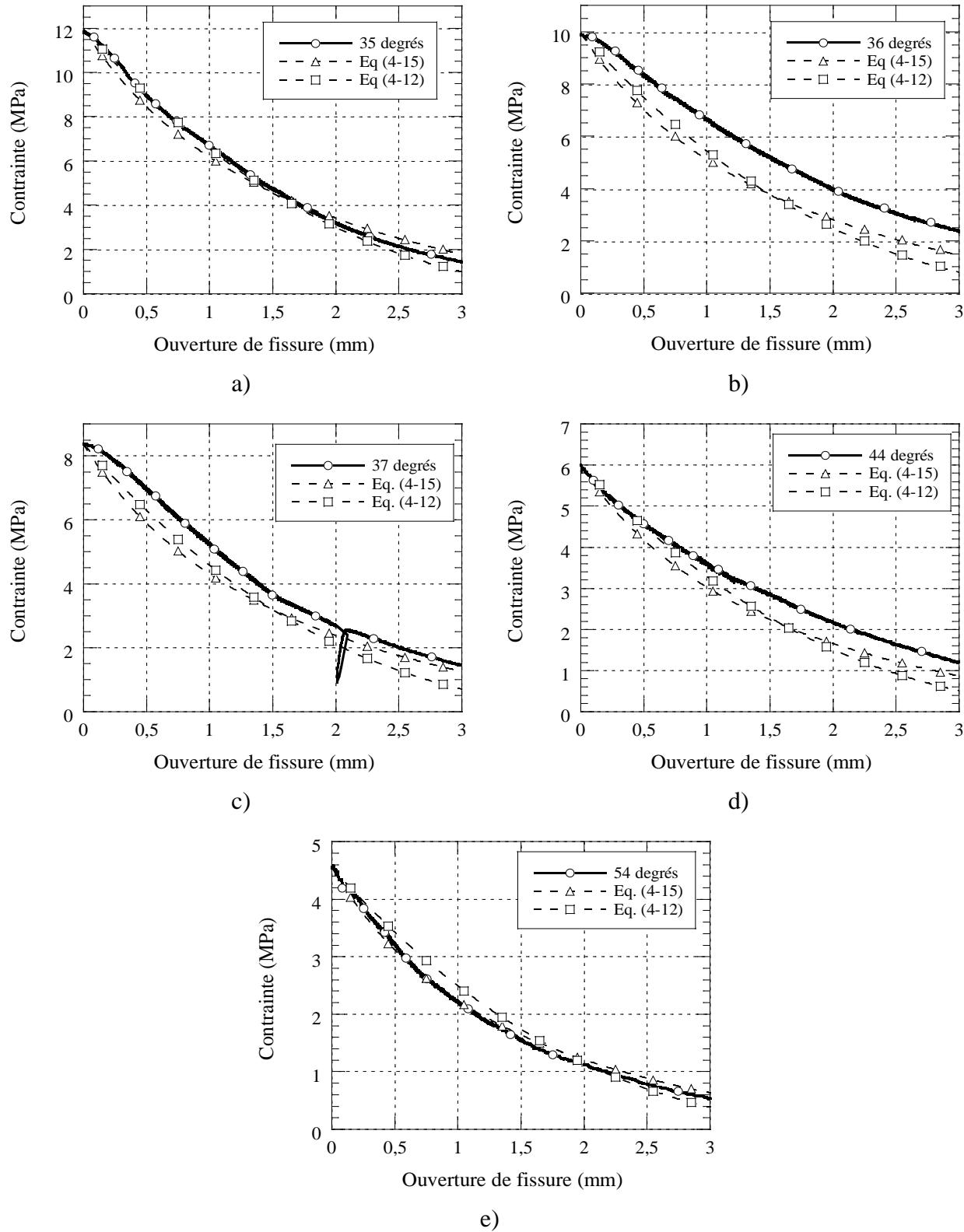


Figure 4-27 : Comparaison des phases adoucissantes expérimentales et des modèles retenus pour des fibres orientées à a) 35 degrés, b) 36 degrés, c) 37 degrés, d) 44 degrés, e) 54 degrés

4.6 Conclusions

La méthode de coulée utilisée au cours de cette campagne expérimentale a permis d'obtenir une gamme de coefficient d'orientation allant de 35 à 57 degrés. Une plage d'orientation plus large était initialement souhaitée. Cependant, l'utilisation de séparateurs relativement espacés a limité l'orientation des fibres. Étant donnée l'imprécision du programme de détection pour des fibres à faible orientation ($0^\circ < \theta < 20^\circ$), il est possible que la plage d'orientation des fibres mesurée soit en réalité plus grande.

L'angle d'inclinaison des fibres dans la matrice cimentaire joue un rôle important sur la longueur du comportement écrouissant du matériau ainsi que sur sa résistance maximale atteinte. Une réduction de 95 % de la longueur de la phase d'écrouissage et une réduction de 60 % de la résistance maximale ont été observées pour les coefficients les plus défavorables. Contrairement aux résultats d'Oesterlee (2010) qui mettaient en évidence une relation linéaire entre le coefficient d'orientation et la résistance à la traction, le comportement du matériau étudié semble bilinéaire. Une première plage d'orientation moyenne des fibres de 57 à 38 degrés est caractérisée par une augmentation lente de la résistance à la traction. La seconde plage pour des orientations de fibres inférieures à 38 degrés présente une forte augmentation de la résistance à la traction. Dans les deux plages, l'augmentation de la résistance à la traction est inversement proportionnelle à l'angle d'inclinaison, puisqu'un coefficient d'orientation faible représente des fibres alignées avec les efforts de traction.

Un système d'équations empirique permettant de déterminer le comportement en traction à partir de l'angle d'inclinaison des fibres a été développé. Il reproduit les différentes coordonnées de la loi de comportement d'un BFUP avec une précision de 96 % pour la phase pré-pic et 94 % en post-pic. Ce système sera utilisé au chapitre 6 pour déterminer les lois de comportement en traction du BFUP pour la modélisation des poutres en flexion.

Le développement d'un essai de traction normalisé permettant de fabriquer des spécimens avec des orientations de fibres variées est indispensable pour arriver à caractériser et à prédire la réponse d'un béton fibré dans diverses situations. La géométrie des spécimens utilisés dans ce mémoire pourrait être améliorée, en termes de répartition des efforts, pour obtenir plus facilement le comportement en traction avec diverses orientations de fibres.

Chapitre 5 :Influence de l'orientation des fibres sur le comportement en flexion

La présence d'armatures, des coffrages ou d'autres éléments peuvent modifier l'écoulement du béton et donc engendrer une modification de l'orientation des fibres dans les poutres. Ainsi, l'influence des bords du coffrage, des armatures longitudinales et des chaises sur l'orientation des fibres sera abordée dans ce chapitre. Pour ce faire, des essais de flexion sur des poutres en BFUP non armées ont été réalisés pour compléter les essais de flexion en conditions isostatiques et hyperstatiques réalisés par Beaurivage (2009) sur des poutres de faibles dimensions et faiblement armées. Les résultats obtenus permettront de déterminer si l'utilisation d'un angle d'inclinaison moyen des fibres pour toute la section d'une poutre est envisageable pour reproduire numériquement le comportement d'éléments structuraux en BFUP (chapitre 6).

5.1 Programme expérimental

Lors d'un essai en flexion, le comportement global d'une poutre sans armature est gouverné par le comportement de la fibre inférieure, or celui-ci est tributaire de l'inclinaison des fibres dans cette région.

Le but de ce programme expérimental est de caractériser l'influence de la largeur de la poutre sur les effets de bords. Pour ce faire, 3 poutres de 1100 mm de longueur et de largeurs différentes (75, 125 et 150 mm) ont été fabriquées. Ainsi, les poutres présentaient un ratio largeur / longueur de fibre variant de 7,5 à 15 (Figure 5-1a). Pour déterminer l'influence des armatures sur l'angle d'inclinaison des fibres, les poutres de Beaurivage (2009) ont été utilisées (Figure 5-1b). Celles-ci comprenaient soit des armatures en zone tendue ou des armatures en zones tendue et comprimée.

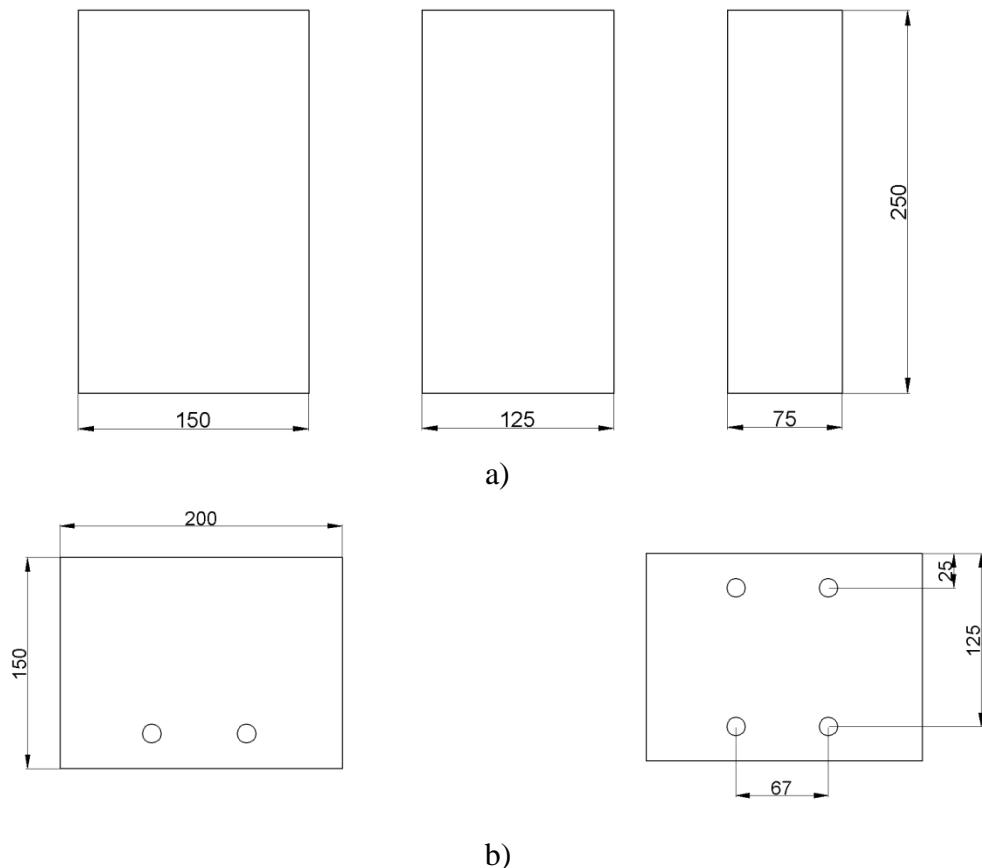


Figure 5-1 : Dimensions des poutres pour l'étude des effets de bords
 a) des coffrages (présente étude), b) des armatures (Beaurivage, 2009)

5.2 Spécifications et fabrication des spécimens testés

Les essais de flexion ont été réalisés sur des poutres en BFUP en condition isostatique. Afin de pouvoir manipuler les spécimens sans l'utilisation du pont roulant et faciliter leur installation, des poutres de faibles dimensions ont été fabriquées. Les coffrages ont été réalisés dans le but d'être facilement démontables et réutilisables. Ainsi, les éléments du coffrage ne sont pas visés entre eux mais maintenus par contention appliquée à l'aide de tiges filetées. La faible pression du béton exercée sur les coffrages, dû aux faibles dimensions des spécimens, a limité les risques d'ouverture du coffrage.

Les poutres réalisées dans le cadre de cette étude ont été mise en place à la chaudière selon la méthode de Markovic (2006) pour favoriser une orientation préférentielle des fibres dans le sens

longitudinal des poutres. Les poutres de Beaurivage (2009) ont été coulées en usine de préfabrication avec la même technique. Dans le cas des poutres hyperstatiques, le lit d'armature supérieur n'a été introduit qu'une fois la moitié de la poutre coulée.

Toutes les poutres ont fait l'objet d'une cure humide de 7 jours après le contact eau/ciment. Dans les premières 24 heures, un polythène recouvrant l'intégralité des spécimens a permis d'éviter l'évaporation de l'eau. Après le décoffrage, ce dernier a été remplacé par des jutes humides. Par la suite, les spécimens ont été conservés à l'air libre dans le laboratoire.

5.3 Caractérisation mécanique

Le mélange utilisé pour la fabrication des poutres est identique à celui présenté dans le chapitre 3 pour les spécimens de traction. La capacité du malaxeur Erich R09T, limitée à 140 litres par gâchée, n'a pas permis de fabriquer l'ensemble des poutres et des spécimens de caractérisation en une seule gâchée. Ainsi, chacune des poutres a fait l'objet d'une gâchée dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau 5-1. Les données à 72 jours, correspondantes au jour de l'essai, viennent compléter la caractérisation des bétons confectionnés.

Tableau 5-1 : Propriétés des bétons entrant dans la composition des spécimens testés en flexion

Gâchée	# 1	# 2	#3
	(Poutre 150 mm)	(Poutre 125 mm)	(Poutre 75 mm)
f'_c 28 jours (MPa)	118	111	94
f_t 28 jours (MPa)	12,6	12,4	12,5
E_{28} jours (MPa)	37 500	35 700	40 000
ν_{28} jours	0,216	0,192	0,181
f_c 72 jours	118	128	114
E_{72} jours (MPa)	35 800	35 400	37 700
ν 72 jours	0,201	0,199	0,221
Masse volumique (kg/m^3)	2497	2486	2507
Teneur en air (%)	3,3	3,2	2,9
Étalement (mm)	720	760	720

5.4 Montage expérimental

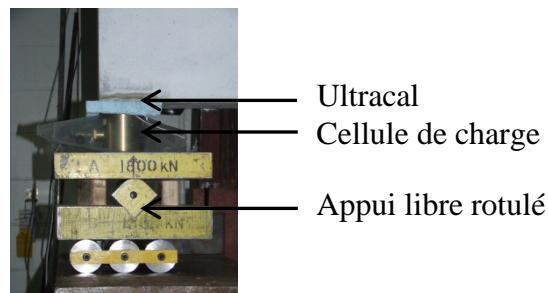
5.4.1 Montage mécanique

La Figure 5-2 présente le dispositif expérimental. Les essais de flexion en 3 points ont été réalisés à l'aide d'un vérin pouvant développer une force de 240 kN. Le vérin a appliqué la force par l'entremise d'un profilé HSS en acier de 51 mm d'épaisseur. La charge a été appliquée à mi-portée (550 mm). Deux plaques de transfert en acier de 25mm d'épaisseur et de 100 mm de largeur ont été placées sous la poutre au niveau des appuis. Afin d'éviter tout glissement du spécimen et assurer un contact parfait entre le spécimen et les plaques de transfert, une fine couche d'Ultracal ayant une résistance à la compression de 30 MPa a été appliquée.

Les deux appuis étaient constitués de rouleaux couplés à un système de plaques permettant la rotation dans le plan transversal du spécimen (Figure 5-2b). Entre chacune des plaques de transfert et les systèmes d'appui, une cellule de charge de 500 kN de capacité a été placée et permettait d'enregistrer la réaction aux appuis.



a)



b)

Figure 5-2 : Dispositif expérimental, a) vue d'ensemble, b) système d'appui

5.4.2 Instrumentation

Lors de ces essais de flexion, la flèche au centre et aux appuis, la charge appliquée, l'ouverture de fissure à la fibre inférieure et les réactions aux appuis ont été enregistrées. La flèche a été mesurée au centre la poutre à l'aide de deux LVDT ayant une course de 30 mm chacun (Figure 5-3). Ces LVDT étaient appuyés sur des cornières en aluminium collées directement sur le spécimen à l'aide de la colle X60. Le support des LVDT était indépendant du bâti et est fixé à un profilé de type HSS. Deux LDVT ont été utilisés pour détecter la présence de torsion et pour palier à un défaut de fixation ou à un bris d'un des capteurs.



Figure 5-3 : LVDT de mesure de la flèche sud

L'écrasement aux appuis, servant à la correction de la flèche mesurée à mi-portée, était capté par deux LVDT de 10 mm de course à chacune des extrémités de la poutre.

Au cours des essais de flexion réalisés par Beaurivage (2009), le capteur mesurant l'ouverture de fissure n'a pas permis d'obtenir des données exploitables, car la fissuration se développait hors de la plage de lecture. Pour le présent programme d'essai, un système de 3 LVDT en série a été adopté (Figure 5-4). Le support des LVDT était constitué d'un bloc de téflon, collé sur le spécimen avec de la colle X60, sur lequel s'appuyait la tige du LVDT précédent. Ainsi, la plage couverte par le système de mesure était triplée à 300 mm, et réduisait fortement la probabilité d'une fissuration hors champ. Cependant, le risque que cette fissuration apparaisse au niveau d'un bloc de téflon demeurait.

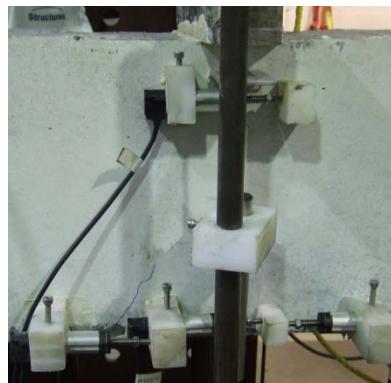


Figure 5-4 : Système de mesure de l'ouverture de fissure

5.4.3 Protocole

Préalablement à la mise en place du spécimen sur les appuis, les poutres ont été peintes en blanc à l'aide d'une peinture, composée à part égale d'eau et de peinture acrylique au latex, et ce afin de favoriser la visualisation des microfissures lors de l'essai. Une fois la couche d'Ultracal coulée sur les plaques de transfert des appuis, le spécimen a été installé de façon progressive à l'aide d'un appareil de levage jusqu'à reposer complètement sur les plaques. La planéité de la partie supérieure était alors vérifiée à l'aide d'un niveau à bulle. Une fois l'Ultracal solidifié, la même opération était réalisée pour la mise en place de la plaque de transfert supérieure accueillant le vérin. La vérification de la planéité, du centrage et de la position de la poutre était alors primordiale pour éviter l'apparition de phénomène de torsion lors de l'essai. Le spécimen pouvait alors être instrumenté et le contact vérin / plaque de transfert établi. Enfin, l'essai a été alors réalisé en contrôlant le déplacement du vérin. La vitesse imposée en pré-pic était de 0,2 mm/min augmentée manuellement jusqu'à 1 mm/min en post-pic. La procédure d'utilisation du système d'acquisition et du système de contrôle est présentée à l'Annexe 5.

5.5 Comportement en flexion

Globalement les essais de flexion se sont bien déroulés. Les courbes force-flèches obtenues au cours des essais de flexion en condition isostatique sont présentées à la Figure 5-5. On constate qu'une torsion importante est survenue dans le spécimen pour la poutre 150 mm. La Figure

5-6 permet de confirmer que la charge appliquée à cette poutre était égale aux 2 appuis, car les deux réactions aux appuis sont équivalentes. Ainsi, la torsion relevée est principalement due à une excentricité transversale de la charge appliquée. Le phénomène de torsion est considéré négligeable pour les deux autres poutres.

L'analyse des courbes de la Figure 5-5d démontre que la force maximale augmente avec la largeur, la poutre de 150 mm présentant logiquement une capacité près du double de celle de 75 mm de largeur. Le comportement global des 3 poutres est très similaire. On note cependant une flèche au pic plus grande pour la poutre de 125 mm.

On constate que, jusqu'à environ 55% de la charge maximale, la rigidité du spécimen demeure inchangée, la phase d'écrouissage du BFUP n'est donc pas encore atteinte à la fibre inférieure. Ensuite la rigidité des spécimens diminue progressivement et des microfissures ont été observées à leur fibre tendue. Lorsque la charge maximale est atteinte, seule une macrofissure apparaît et ne cesse de se développer par la suite. Enfin, la charge décroît progressivement jusqu'à la rupture complète des spécimens. Au cours de ces essais, seul un déchaussage des fibres avec détérioration et effritement progressif de la matrice a été observé.

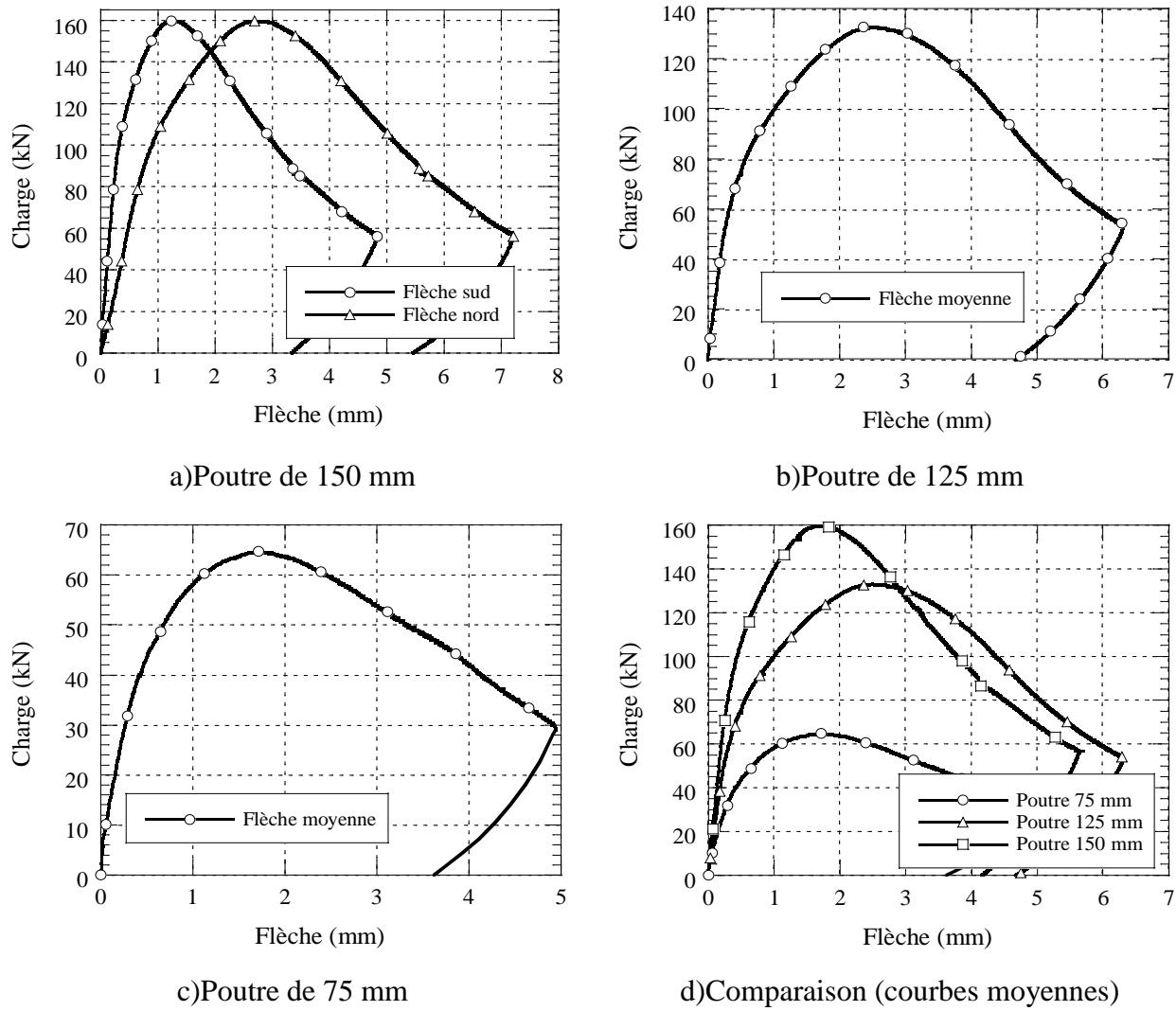


Figure 5-5 : Comportement en flexion 3 points des poutres étudiées

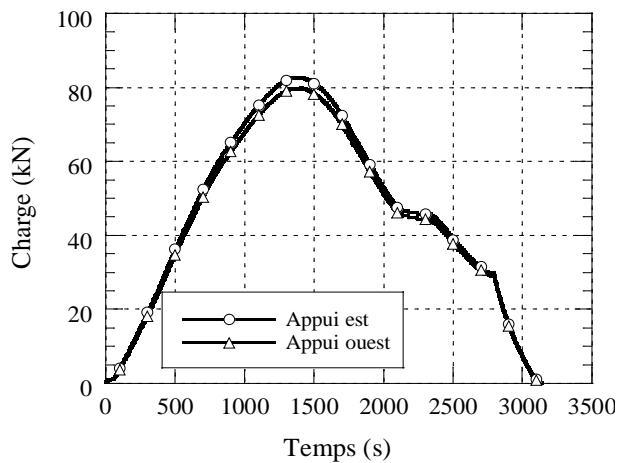


Figure 5-6 : Réactions aux appuis relevées pour la poutre 150 mm

Certaines remarques importantes doivent être faites. Dans le cas de la poutre de 75 mm de largeur, l'ouverture de fissure n'a pu être mesurée car cette dernière s'est développée en dehors de la plage de lecture. De plus, pour les poutres de 125 mm et 75 mm de largeur, un écrasement de sens contraire aux appuis après l'atteinte de la charge maximale a été relevé (Figure 5-7). Ceci indique un comportement dissymétrique de ces poutres.

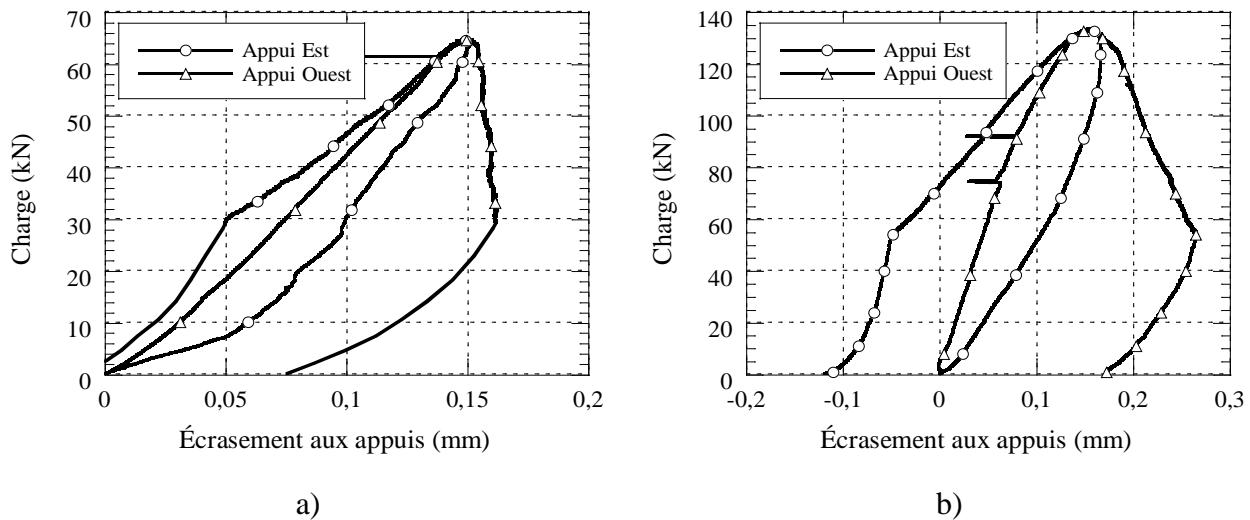


Figure 5-7 : Écrasement aux appuis a) poutre de 75 mm, b) poutre de 125 mm

La Figure 5-8 met en évidence les nombreuses microfissures qui sont apparues à proximité ou en contact direct avec la macrofissure, cette dernière n'était pas continue et se subdivisait parfois (Figure 5-8a et b). Peu de microfissures étaient observables ailleurs sur les poutres. Sur la Figure 5-8b une seule macro fissure née de la fusion de deux macro fissures est observable. Ce phénomène s'explique par une redistribution des efforts dans le spécimen due à la présence de fibres. Ainsi, les zones de plus faible résistance dans le BFUP, synonyme de plus faible densité de fibre ou d'une orientation moins favorable, vont fissurer avant certaines parties sous-jacentes.

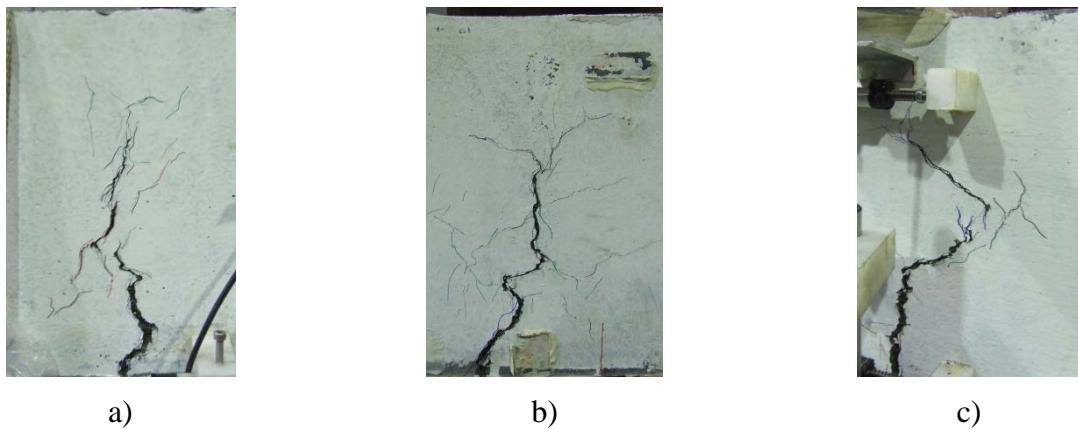


Figure 5-8 : Profil de fissuration observé pour les poutres a) 75 mm b) 125 mm c) 150 mm

La Figure 5-9 met en évidence les faibles ouvertures de fissures relevées (inférieures au millimètre) lorsque la charge maximale supportée par la poutre est atteinte. Les résultats pour la poutre 75 mm n'étant pas exploitables, ils n'ont pas été représentés.

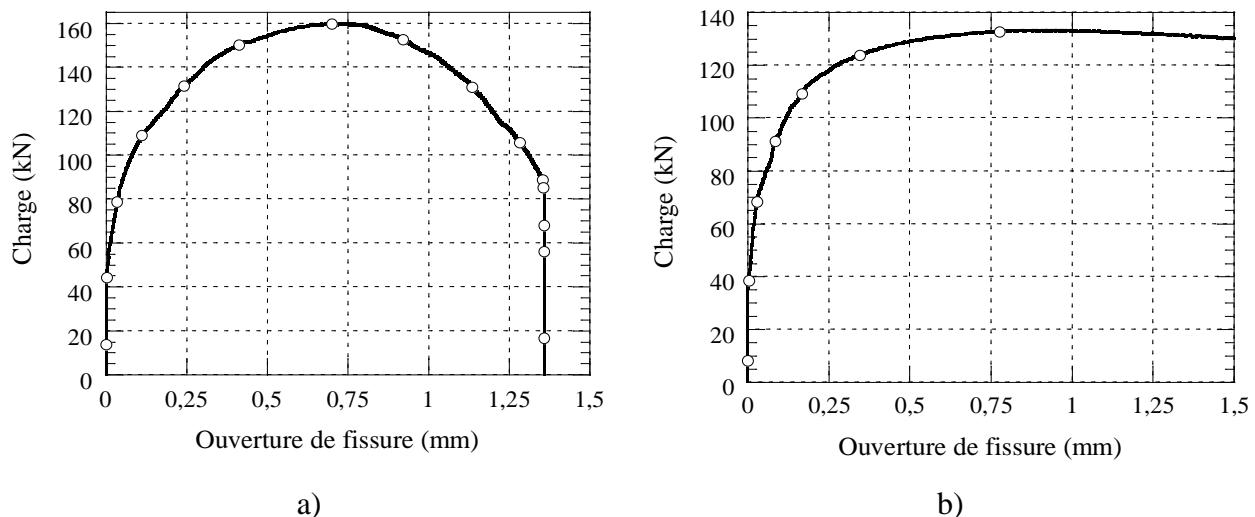


Figure 5-9 : Charge appliquée versus ouverture de fissure

a)Poutre de 150 mm, b)Poutre de 125 mm

Ces résultats illustrent bien les propriétés du BFUP lorsqu'il est coulé de façon à orienter préférentiellement les fibres. Le matériau confère aux poutres un comportement écrouissant en flexion très important et une très grande ductilité.

5.6 Angles d'inclinaison des fibres dans les poutres en flexion

Afin de pouvoir évaluer l'angle d'inclinaison des fibres dans les poutres étudiées, des échantillons ont été extraits des poutres puis soumis à l'analyse du programme décrit au chapitre 3. Dans les poutres de cette étude, une tranche d'un pouce d'épaisseur a été prélevée à une longueur de fibres de la zone de fissuration principale (Figure 5-10a). Les poutres de Beaurivage (2009) ont été carottées selon la procédure présentée à la section 3.3.1 (Figure 5-10b). Tous les échantillons prélevés ont par la suite été préparés selon la procédure détaillée à la section 3.3.2.

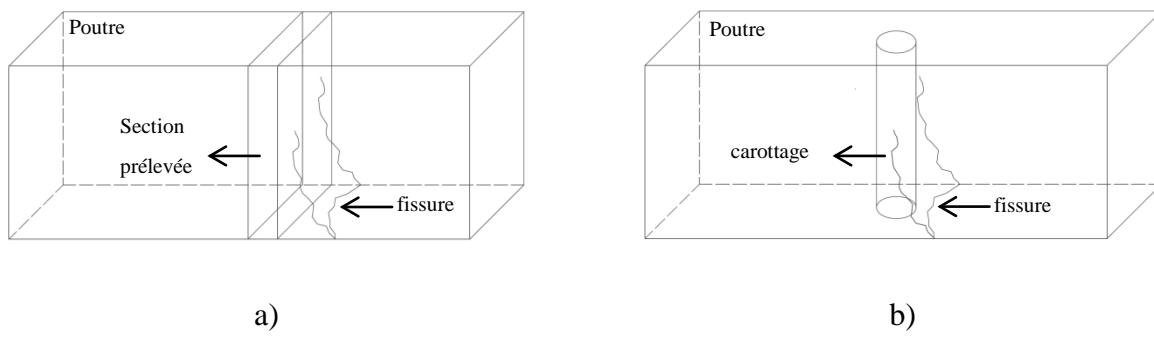


Figure 5-10 : Zones de prélèvement des échantillons dans les poutres
a) de la présente étude b) de Beaurivage (2009)

5.6.1 Validation de la zone découpe

La découpe des échantillons s'est effectuée à une longueur de fibres environ du plan de fissuration principal des poutres. Afin de vérifier s'il était acceptable de considérer que la distribution de l'angle d'inclinaison des fibres était homogène sur une à deux longueurs de fibres du plan de fissuration des poutres, les mesures sur deux faces opposées d'un échantillon ont été comparées. En considérant l'épaisseur du trait de scie et le polissage, l'épaisseur entre les deux faces des échantillons était équivalente à une longueur de fibre environ. La comparaison de l'angle d'inclinaison des fibres des deux faces va donner une indication de la validité de la démarche d'analyse envisagée dans les sections suivantes. La Figure 5-11 montre la similarité de l'angle d'inclinaison des fibres mesuré sur les deux faces d'un échantillon dans le sens de la

largeur et dans le sens de la hauteur. La variabilité des résultats est inférieure à 0,4 %. Ainsi, le fait de prélever des échantillons à une distance correspondante à une ou deux longueurs de fibres (10 à 20 mm pour le BFUP) du plan de rupture principal de la poutre permet d'obtenir une estimation acceptable de l'orientation des fibres dans le plan où s'est développée la fissure.

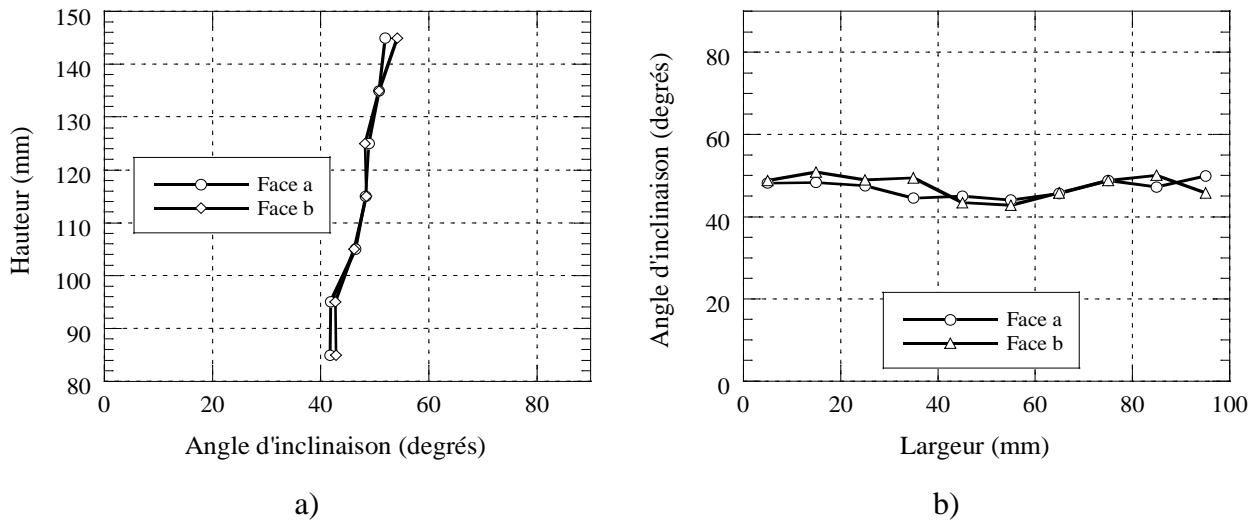


Figure 5-11 : Comparaison des angles d'inclinaison mesurés sur les deux faces d'un échantillon espacé d'une longueur de fibre (10 mm) a) analyse sur la hauteur b) analyse sur la largeur

5.6.2 Effets de bords créés par les coffrages

La Figure 5-12 représente les angles d'inclinaison mesurés à des pas de 5 mm (demi-longueur de fibre) sur la largeur et la hauteur des poutres de cette étude. Les poutres ayant des dimensions différentes, la largeur et la hauteur des poutres ont été normalisées pour mieux illustrer les résultats dans une même figure. Les courbes grises donnent l'angle d'inclinaison des fibres dans le sens de la largeur, les courbes noires dans le sens de la hauteur. D'après les équations développées pour la prédiction des angles d'inclinaison (section 4.5), les effets de bords favorisent l'orientation des fibres dans l'axe de la poutre (angle plus faible). On constate que sur la largeur ou sur la hauteur des poutres, les angles d'inclinaison mesurés ne diminuent pas au niveau des bords du coffrage, au contraire ils semblent augmenter légèrement depuis le centre du coffrage vers le bord dans le sens de la hauteur de la poutre. Les fibres s'orientent progressivement de façon préférentielle jusqu'à atteindre un angle stable pour une hauteur

équivalente à 5 longueurs de fibres (50 mm). Les tendances observées seront comparées aux équations prédictives dans la prochaine section.

L'étude de l'angle d'inclinaison en fonction de la hauteur et de la largeur d'une poutre montre que l'angle d'inclinaison varie peu avec un écart type moyen inférieur à 3%. Ceci signifie qu'un angle d'inclinaison moyen sur l'ensemble de la section d'une poutre pourrait être considéré en première approximation dans les modélisations pour reproduire le comportement mécanique.

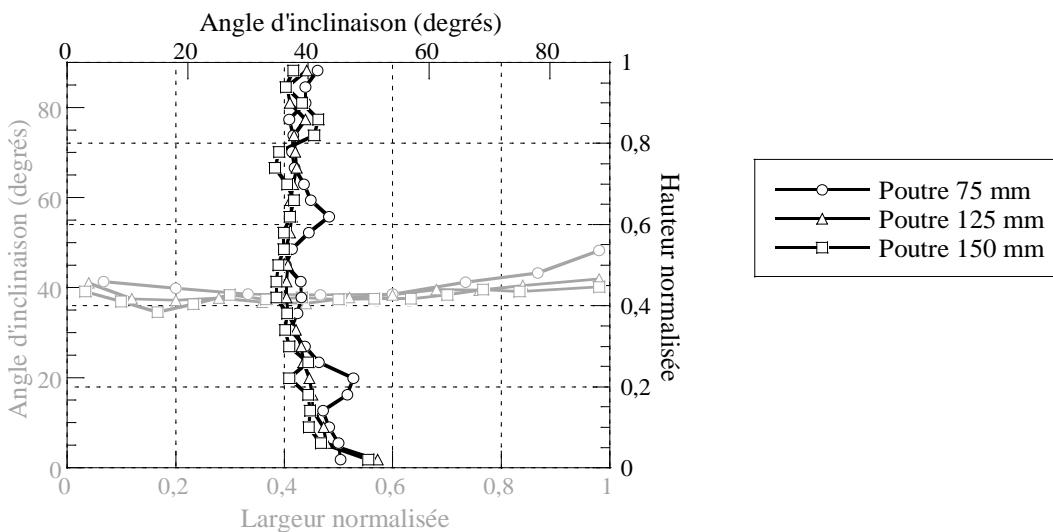


Figure 5-12 : Angle d'inclinaison des fibres sur la hauteur et la largeur des poutres

La Figure 5-13a présente cette fois en noir l'évolution de la densité de fibres en fonction de la largeur et en gris en fonction de la hauteur. Pour faciliter la comparaison de la densité des fibres pour les différents spécimens, la largeur a été normalisée et les densités de fibres ont été divisées par la largeur respective de chacune des poutres. L'étude de la densité de fibres dans les sections découpées met en évidence une ségrégation dans la partie basse du coffrage. Pour les poutres de 75 et 125 mm, on constate une augmentation progressive de la densité des fibres jusqu'à mi-hauteur, puis une légère diminution jusqu'à la surface supérieure. Dans le cas de la poutre de 150 mm, il est difficile de conclure car une partie de la poutre à mi-hauteur a été détruite au cours de la découpe. Le même type d'analyses effectuées sur la hauteur pour les spécimens de traction en forme d'os, a montré une tendance inverse avec une augmentation linéaire de la densité de fibre avec la profondeur (Figure 5-13b). Cependant, l'effet du truillage sur l'orientation des fibres et

sur leur distribution est très important sur les spécimens de traction et peut favoriser l'apparition de ségrégation.

Les résultats sur les spécimens de traction sont en adéquation avec les tendances observées par Ozyurt et al.(2007) et Robins et al.(2003) sur des BRF vibrés et par Wuest (2007) sur des BFUP non vibrés. Cependant, il est à noter que cette tendance a été observée sur des spécimens de 50 mm de hauteur et que les méthodes de coulée diffèrent de celle utilisée dans cette étude. Ceci peut expliquer la contradiction avec les tendances observées sur les poutres. De plus, les volumes de matériau nécessaire à la fabrication des poutres ont nécessité le transfert du béton dans une chaudière avant le coulage. Au cours de cette étape, une première ségrégation due à la gravité a pu s'initier. Ainsi, lorsque le béton a été introduit dans les coffrages, le béton dans la partie supérieure de la chaudière présentait une densité moins élevée que dans le fond et a servi à remplir initialement le bas des poutres. Ceci pourrait aussi expliquer en partie la plus faible densité de fibres observée dans le bas des poutres.

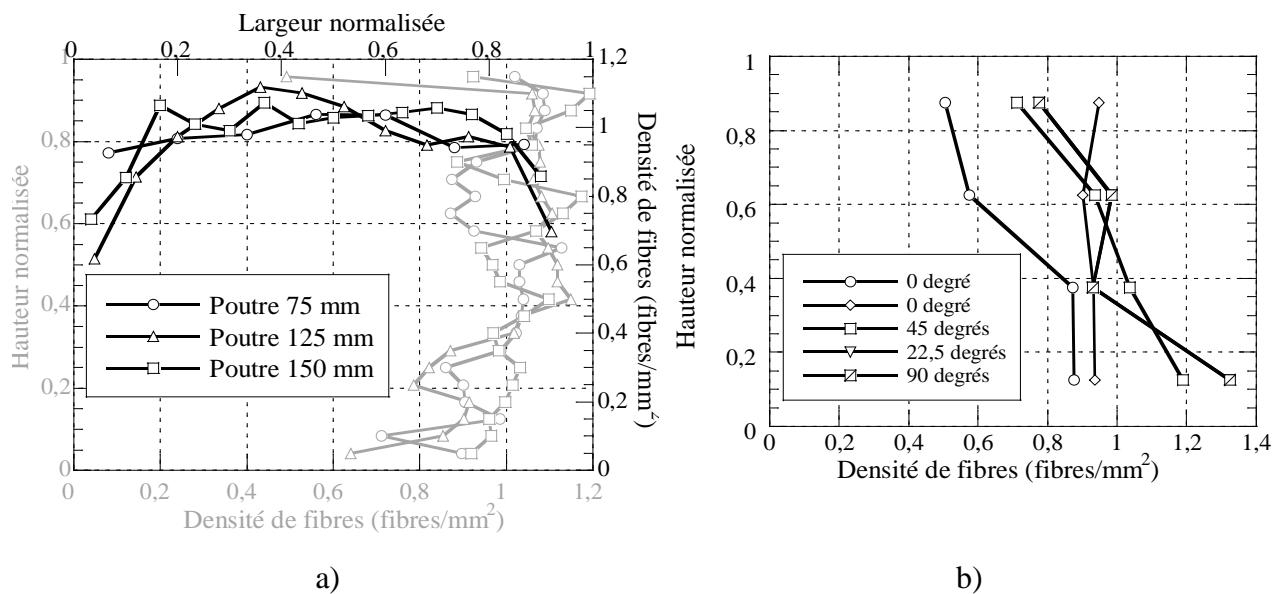


Figure 5-13 Distribution des fibres sur la hauteur et la largeur

a) des poutres, b) des spécimens de traction

Il est intéressant de noter que la distribution de la densité des fibres correspond à l'écoulement du béton constaté au cours du coulage (Figure 5-14). Lors de la mise en place du contenu de la première chaudière le béton s'écoule en partie sur les parois du coffrage et remplit progressivement la zone centrale du moule. L'étude de la densité des fibres sur la largeur (Figure 5-12a) vient confirmer cette tendance, avec une densité moindre près des surfaces latérales. Ce phénomène ne serait probablement pas observé dans des poutres de plus grandes dimensions dont le volume d'une chaudière est moins significatif.

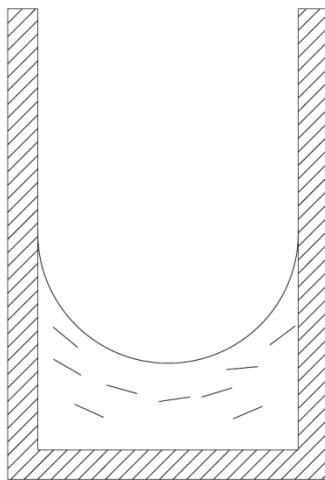


Figure 5-14 : Écoulement du BFUP constaté lors du remplissage et orientation des fibres probable

La répartition des fibres au sein de la section de la poutre semble globalement peu influencée par la gravité. En effet dans le cas des poutres de 250 mm de hauteur aucun phénomène d'accumulation des fibres n'est à déplorer dans la partie inférieure. Ceci peut s'expliquer par le fait que la matrice de BFUP soit suffisamment stable et visqueuse pour retenir les fibres. Aussi, il est possible qu'il existe une hauteur de poutres à partir de laquelle les effets de la gravité deviennent négligeables par rapport à la méthode de coulée.

5.6.3 Effets de bord créés par les armatures

La Figure 5-15 compare les angles d'inclinaison relevés sur la hauteur et sur la demi-largeur pour une poutre armée de deux barres américaines #3 de 9,5 mm de diamètre nominal, et pour une poutre de mêmes dimensions non armée étudiées par Beaurivage (2009). L'enrobage des barres est d'environ 15 mm. La fabrication s'est déroulée conformément à la méthode présentée à la section 5.2. Pour les deux poutres, l'angle d'inclinaison varie peu. On remarque tout de même une légère diminution dans le tiers inférieur de la poutre. Cette diminution est plus marquée pour la poutre armée, l'angle d'inclinaison minimal étant obtenu au niveau des armatures. Ce résultat indique que l'armature oriente un peu les fibres longitudinalement à leur surface. Cet effet semble disparaître sous la poutre où les fibres se réorientent.

Les résultats entre les poutres armées et non armées illustrent que la présence d'armature dans la partie basse modifie très peu le profil de l'angle d'inclinaison des fibres et ainsi ne devrait pas modifier significativement les propriétés du BFUP dans cette zone. Ceci indique à nouveau que l'utilisation d'un angle d'inclinaison moyen des fibres pour toute la section des poutres serait applicable à des fins de modélisation.

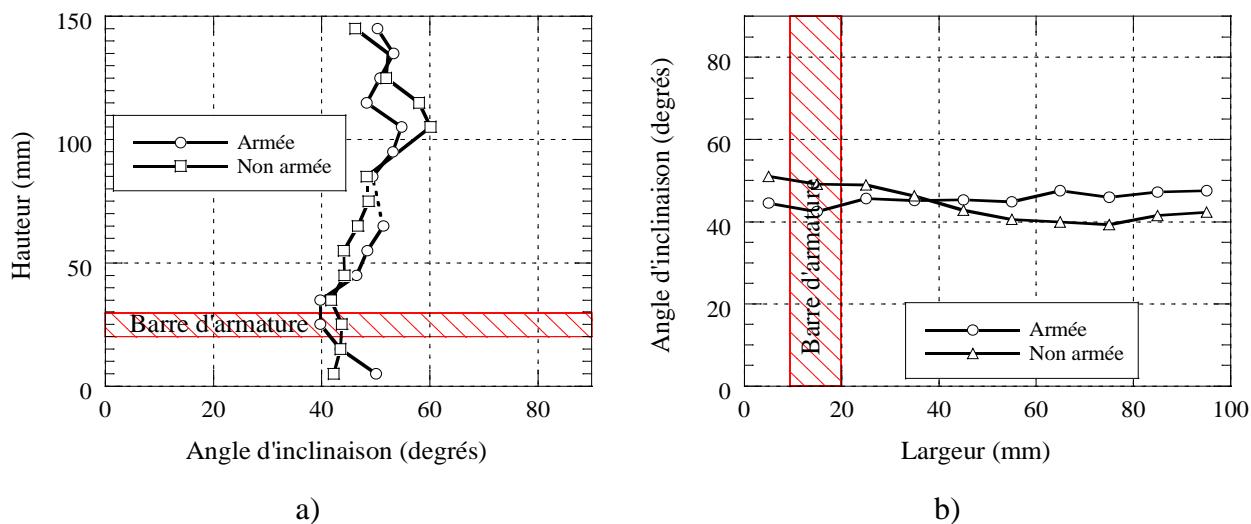


Figure 5-15 : Influence d'une barre d'armature sur l'angle d'inclinaison pour des poutres isostatiques a) sur la demi-largeur, b) sur la hauteur

Pour les poutres hyperstatiques (Figure 5-16), on constate que l'angle d'inclinaison ne varie pas dans la moitié supérieure de la poutre et ce malgré la présence du lit d'armature supérieur.

L'augmentation importante de l'angle d'inclinaison au-dessus du lit d'armature supérieur notée à la surface supérieure provient probablement de la finition de la surface avec une truelle qui réduit l'orientation longitudinale des fibres.

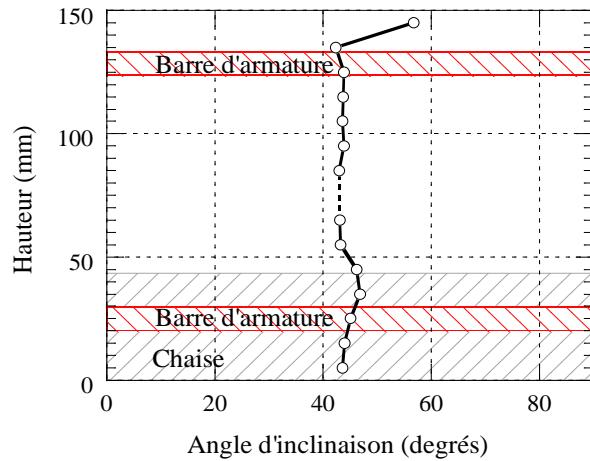


Figure 5-16 : Influence d'une barre d'armature sur l'angle d'inclinaison pour des poutres hyperstatiques

5.6.4 Effets locaux des chaises

Pour garantir un enrobage minimal des armatures, il est d'usage courant d'utiliser des chaises en plastique (Figure 5-17) ou en béton. Ces chaises qui assurent une grande rapidité de mise en œuvre sur chantier offrent néanmoins une surface d'opposition à l'écoulement du béton. Pour les poutres du projet de Beaurivage (2009), des chaises en plastique d'une surface de 1256 mm^2 ont été utilisées. Leur surface était relativement importante considérant la section complète de la poutre ($30\,000 \text{ mm}^2$).

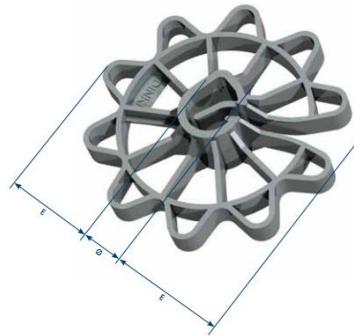


Figure 5-17 : Chaises utilisées

La Figure 5-18 représente le profil de l'angle d'inclinaison sur la hauteur et la demi-largeur d'une poutre présentant des armatures dans les sections inférieure et supérieure de la poutre. La présence de la chaise est illustrée par la trame hachurée. Le profil sur la hauteur ne permet pas illustrer l'influence de la chaise puisque l'angle d'inclinaison varie peu (Figure 5-18a). On constate seulement une légère augmentation de ce dernier dans la zone de la chaise. Cependant, lors de l'étude de l'angle d'inclinaison sur la demi-largeur de la poutre (Figure 5-18b), on observe une nette augmentation de 20% dans la partie basse où se situe la chaise. Pour avoir une idée plus précise de l'influence de la chaise sur l'angle d'inclinaison des fibres, une cartographie de la moitié inférieure de la poutre a été réalisée et est présentée à la Figure 5-19. Les disques représentent la position des armatures et le cercle dans la partie inférieure gauche illustre la position de la chaise.

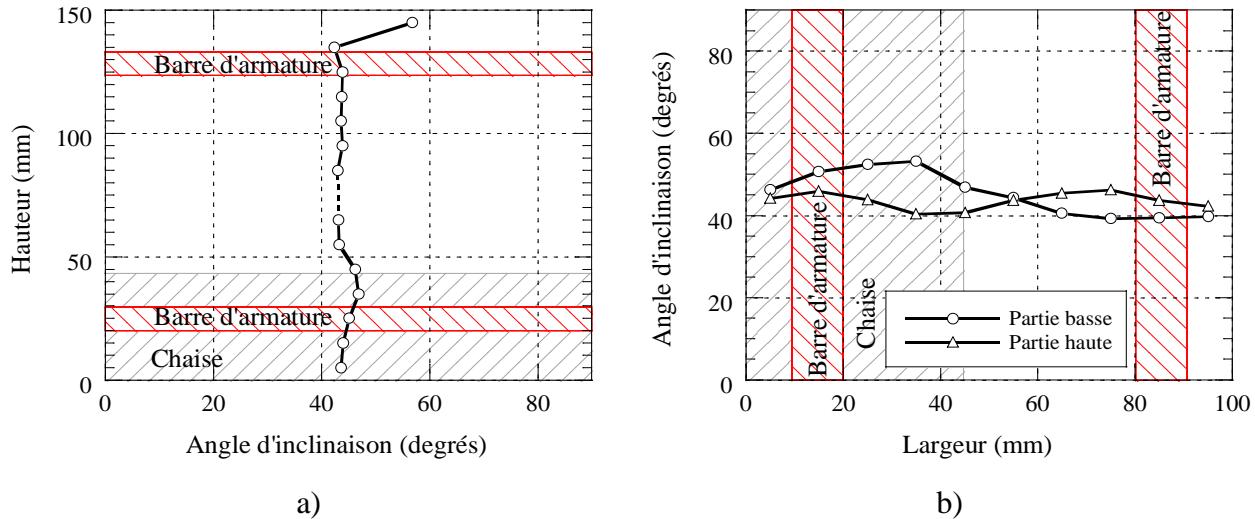


Figure 5-18 : Influence d'une chaise sur l'angle d'inclinaison pour des poutres hyperstatiques

a) sur la demi-largeur, b) sur la hauteur

Dans la zone d'influence de la chaise, l'angle d'inclinaison est augmenté de 25% par rapport à la même zone sans chaise à droite (Figure 5-19a). Ceci signifie que les fibres sont moins orientées dans le sens longitudinal de la poutre. Il importe de noter la forte valeur de cet angle sur une plage d'une demi-longueur de fibres sous la chaise. Selon les résultats des essais de traction pour différents angles d'inclinaison présentés au chapitre 4, on peut évaluer que la résistance à la traction dans cette zone, avec un angle d'inclinaison de 53 degrés sera d'environ 4,7 MPa; alors qu'ailleurs l'angle d'inclinaison moyen devrait donner une résistance en traction d'environ 7,9 MPa. De plus, la géométrie de la cale limite de façon drastique la densité de fibres dans la zone, ce qui limite d'autant plus les propriétés du matériau (Figure 5-19b).

En conséquence, les positions de ces chaises dans des éléments en béton fibré doivent faire l'objet d'un choix minutieux de manière à ce qu'ils ne soient pas situés dans les zones d'efforts maximaux, car localement la résistance du matériau peut être significativement réduite. De plus, une réflexion sur la géométrie des chaises devra être entreprise. L'utilisation de réglettes continues pleines (Figure 5-20) ou des chaises à forte surface devrait être réduite voire supprimée dans les zones de fortes sollicitations d'éléments en béton renforcé de fibre pour être remplacées par des chaises de plus petites dimensions.

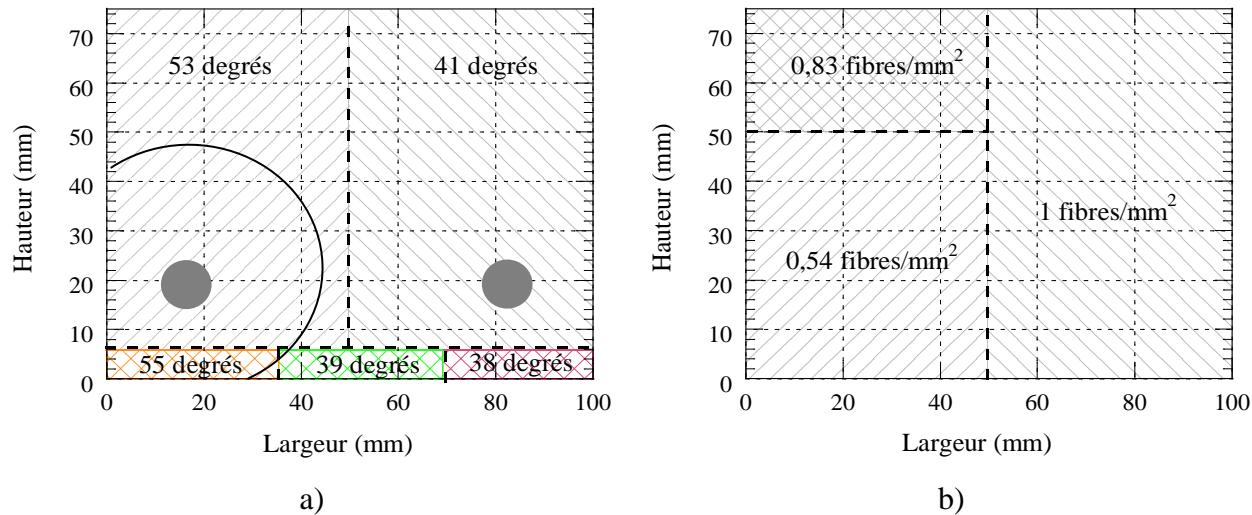


Figure 5-19 : Cartographie pour la demi-section inférieure d'une poutre à proximité d'une chaise
de a) l'angle d'inclinaison des fibres, b) densité de fibres



Figure 5-20 : Réglettes continues pleines

5.6.5 Estimation de l'angle d'inclinaison par méthode analytique et méthode d'analyse d'images

Seule l'orientation des fibres dans les poutres non armée de ce projet peut être comparée aux prédictions des modèles analytiques proposés par Soroushian et al.(1990) et Dupont et al.(2005). Le Tableau 5-2 compare les résultats entre ces deux méthodes et les angles d'inclinaison mesurés avec la méthode d'analyse d'images de ce projet. La comparaison est faite avec l'angle d'inclinaison moyen sur toute la section de la poutre.

Tableau 5-2 : Comparaison méthode analytique et méthode d'analyse d'image

Poutres	Sorourshian et al.	Dupont et al.	Programme
75 x 250 mm	66,1°	58,8°	40,1°
125 x 250 mm	66,1°	59,2°	38,5°
150 x 250 mm	66,1°	59,3°	37,7°

Comme évoqué au chapitre 4, les équations proposées par Sorourshian et al.(1990) et Dupont et al.(2005) sous-estiment grandement l'angle d'inclinaison des fibres dans les poutres. La méthode de coulée utilisée dans ce projet a mené à des angles d'inclinaison moyens similaires pour les 3 poutres. De plus, les coefficients d'orientation obtenus sont relativement proches des meilleures orientations constatées sur les spécimens de traction. Ceci permet d'affirmer que les équations ne sont pas adéquates pour des spécimens de traction et des poutres avec la méthode de mise en place utilisée dans la présente étude. Ceci permet également de démontrer la pertinence du programme d'analyse d'image développé dans ce projet.

5.7 Conclusions

L'étude de l'angle d'inclinaison des fibres en fonction de la hauteur et de la largeur des poutres a montré que l'angle d'inclinaison varie peu sur la section. Des variations maximales de 10° ont été observées avec une méthode de coulée à la chaudière. Cependant, les coffrages ont tendance à repousser les fibres, car une densité de fibres moindre a été notée à leur proximité.

Le prélèvement d'échantillons a illustré que la présence d'armatures longitudinales conventionnelles perturbait peu l'orientation des fibres sous ou dans l'axe du renforcement. Cependant, la présence des chaises, servant à assurer un espacement inter armatures ou à garantir une distance d'enrobage suffisamment importante, perturbe de façon importante l'écoulement et donc l'orientation des fibres. Une variation maximale de 20° a été observée à proximité des chaises. En conséquence ces éléments devront faire l'objet d'une attention particulière quant à leur géométrie et leur emplacement dans l'élément structural en béton renforcé de fibres lors de la construction.

Les observations précédentes sur les effets de bord des coffrages et des armatures confirment que l'utilisation d'un angle d'inclinaison moyen de fibres pour toute la section d'une poutre devrait permettre de bien reproduire numériquement le comportement mécanique des poutres étudiées dans ce projet de recherche.

Les essais de flexion ont aussi démontré que les équations analytiques développées dans la documentation pour estimer l'angle d'inclinaison des fibres dans une poutre sous-estiment fortement l'angle d'inclinaison dans les éléments en BFUP. Il est probable que les équations ne soient applicables que pour des méthodes de mise en place n'induisant pas d'orientation préférentielle des fibres, à l'opposé de la technique utilisée dans ce projet.

Compte tenu du faible nombre de prélèvements étudiés (rélié au temps de préparation important), les conclusions de ce chapitre représentent des tendances observées à proximité des plans de rupture sur des échantillons sélectionnés dans des éléments structuraux en BFUP. Des analyses complémentaires, sur un béton renforcé de fibres classique et avec une méthode de coulée éventuellement plus représentative de celle qui serait utilisée dans le cadre d'une production industrielle, seraient donc pertinentes pour confirmer ces tendances.

Chapitre 6 :Modélisation du comportement en traction et en flexion du BFUP

À partir des essais de caractérisation mécanique en traction et en compression sur le béton ordinaire, il est possible à partir de modèles par éléments finis de prédire assez précisément le comportement en flexion des structures en béton armé. La situation est différente pour les bétons renforcés de fibres et en particulier pour les BFUP. Les fortes variabilités des propriétés des BFUP en fonction de l'angle d'inclinaison des fibres, qui peut être différente entre les spécimens de caractérisation mécanique et l'élément structural, ne permettent pas de prédire de façon certaine le comportement en flexion de la structure. Afin de palier à la situation où le comportement mécanique du matériau présente une certaine incertitude, une des solutions envisagées est de couler un spécimen de l'élément structural ou un spécimen de plus petite taille permettant de recréer l'orientation des fibres attendue, puis de mesurer l'orientation des fibres dans le spécimen. Ensuite, l'introduction du coefficient d'orientation des fibres dans les lois de comportement permettrait d'obtenir une modélisation plus précise du comportement global de la structure. Le présent chapitre a pour but de reproduire numériquement le comportement mécanique des poutres en BFUP testées en flexion sur la base d'une mesure du coefficient d'orientation moyen dans la section avec le programme développé au chapitre 3 et le système d'équations proposé au chapitre 4. Ce chapitre permettra donc de valider la méthodologie de travail proposée dans ce mémoire et décrite au chapitre 1 (Figure 1-1). La première partie du chapitre est consacrée à la modélisation du comportement en traction du BFUP tandis que la deuxième partie est dédiée à la reproduction du comportement en flexion.

6.1 Modélisation du comportement en traction du BFUP

La modélisation des essais de traction a été réalisée à l'aide du logiciel d'éléments finis ATENA (Advanced Tool for Engineering Nonlinear Analysis). Ce logiciel, développé par Cervenka Consulting, est spécialisé dans le calcul non linéaire d'éléments en béton armé. De plus, il met à la disposition de l'utilisateur un modèle « CC3DNonLinCementitious2User » permettant de prendre en considération le comportement écrouissant et adoucissant des bétons fibrés.

6.1.1 Présentation du modèle CC3DNonLinCementitious2User

Beaucoup de logiciels d'éléments finis s'appuient sur l'énergie de fissuration G_f pour définir le comportement en traction des bétons. Le modèle CC3DNonLinCementitious2User disponible dans ATENA, permet d'introduire les lois de comportement en traction et en compression obtenues à partir des essais de caractérisation. Ce modèle de matériau est la combinaison d'un modèle de fissuration pour la traction et d'un modèle plastique pour la compression. Il détermine séparément les déformations du modèle plastique et du modèle de fissuration, puis applique l'équivalence des contraintes entre les deux modèles. Lorsque le matériau présente un caractère écrouissant et/ou adoucissant en traction, le modèle de fissuration est basé sur les surfaces de rupture de Menétrey-Willam. Dans le cas du modèle plastique pour le comportement en compression, le critère de rupture de Rankine est employé. Ces modèles peuvent reproduire la multi fissuration observée dans les bétons renforcés de fibres, c'est-à-dire qu'une fissure peut s'ouvrir et se refermer par la suite.

Comme le met en évidence la Figure 6-1, les lois de comportement sont introduites en considérant les ratios contraintes/contrainte de première fissuration. Comme les essais de flexion à modéliser génèrent un niveau faible en compression par rapport à celui en traction, les modélisations réalisées ont considéré une loi de comportement en compression typique suggérée dans le logiciel d'éléments finis. Cependant la loi de comportement en traction exacte mesurée dans le cadre du programme expérimental et du système d'équations a été introduite.

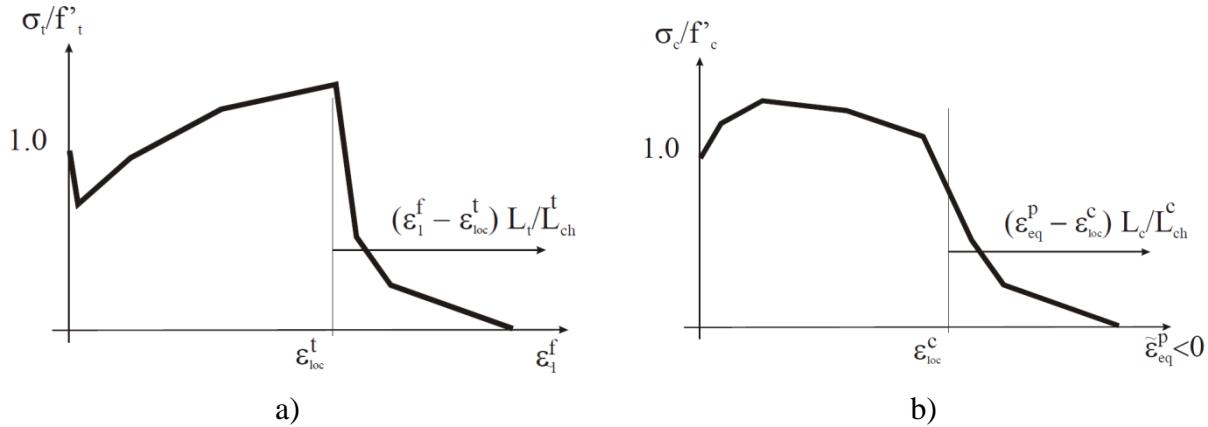


Figure 6-1 : Définition d'une loi de comportement a) en traction b) en compression (Cervenka et al., 2011)

Pour différencier les deux phases du comportement en traction (écrouissage et adoucissement) une déformation de localisation, ε_{loc}^t , est introduite dans le modèle. La déformation est alors évaluée de la façon suivante :

$$\bar{\varepsilon}_1^f = \begin{cases} \varepsilon_1^f, & \varepsilon_1^f < \varepsilon_{loc}^t \\ \varepsilon_{loc}^t + (\varepsilon_1^f - \varepsilon_{loc}^t) \frac{L_t}{L_{ch}^t}, & \varepsilon_1^f \geq \varepsilon_{loc}^t \end{cases} \quad (6-1)$$

Dans cette équation, L_t est la largeur de la bande de fissuration (Figure 6-2) et L_{ch}^t est la longueur caractéristique. Ce dernier est un paramètre dépendant du maillage qui doit être déterminé par l'utilisateur. Une ébauche de critères est présenté dans Cervenka et al.(2005), il est préconisé d'utiliser une longueur caractéristique L_{ch}^t égale à 1,5 fois le diamètre du plus gros granulat en traction et 3,5 fois le diamètre du plus gros granulat en compression. L'application des critères proposés par Cervenka et al.(2005) pour le BFUP n'est pas évidente : le plus gros granulat à considérer est-il le plus gros grain de sable ou la fibre? S'il l'on considère le sable, la L_{ch}^t en traction est de 0,9 mm, alors que dans le cas de la fibre la L_{ch}^t devient 15 mm. Cependant, dans le cadre de l'utilisation d'un maillage de plus petite taille que ces longueurs caractéristiques, les critères ne s'appliquent pas. Beaurivage (2009) et Duchesneau (2010) ont utilisé dans leurs travaux une L_{ch}^t égale à la dimension du plus petit élément du maillage et obtenu d'excellents

résultats de modélisation. La procédure de Duchesneau et Beaurivage a été retenue pour ce projet. Une étude de l'influence de la L_{ch}^t sera complétée pour valider ce choix.

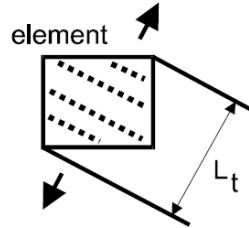


Figure 6-2 : largeur de bande de fissuration (Cervenka et al. , 2011)

6.1.2 Calibration des lois de traction en vue de leur utilisation dans ATENA

Pour introduire les lois de comportement en traction présentées au chapitre 4 dans ATENA, les données enregistrées avec les LVDT ne peuvent être utilisées de façon brute. Dans un premier temps, ces données sont transformées en courbe contraintes-déformations en les divisant par la longueur de la plage de lecture des LVDT (400 mm). Ainsi, on s'affranchit de la géométrie du spécimen. De plus, les contraintes obtenues doivent être divisées par la contrainte de première fissuration. Le Tableau 6-1 et la Figure 6-3 présentent un exemple de calibration d'une loi de traction. Lorsque la déformation est inférieure à la déformation au pic de résistance, la déformation de première fissuration mesurée doit être retranchée puisque seule la courbe après la première fissuration est introduite dans le logiciel (équation 6-2). L'équation (6-3) s'applique pour une déformation supérieure à celle du pic de résistance. Contrairement à Beaurivage (2009), aucune fragilisation du matériau après localisation de la macro fissuration n'est employée.

$$\varepsilon_{ATENA} = \varepsilon_{expérimentale} - \varepsilon_{première\ fissuration} \quad (6-2)$$

$$\varepsilon_{ATENA} = \varepsilon_{loc} + \frac{w}{l_{ch}} \quad (6-3)$$

Tableau 6-1 : Exemple de loi de traction calibrée pour ATENA ($l_{ch} = 25 \text{ mm}$)

Points expérimentaux			Points ATENA	Équation
Contraintes (MPa)	Déplacement (mm)	σ / f_t (-)	Déformations équivalentes ($\mu\text{m}/\text{m}$)	
8.01	0.10	1.00	0	$\varepsilon < \varepsilon_{loc}$ (6-2)
11.00	0.66	1.37	1.39E-03	
12.37	1.00	1.54	2.24E-03	
12.00	1.07	1.50	4.96E-03	$\varepsilon \geq \varepsilon_{loc}$ (6-3)
10.00	1.22	1.25	1.09E-02	
4.99	2.21	0.62	5.06E-02	
1.06	4.10	0.13	1.26E-01	

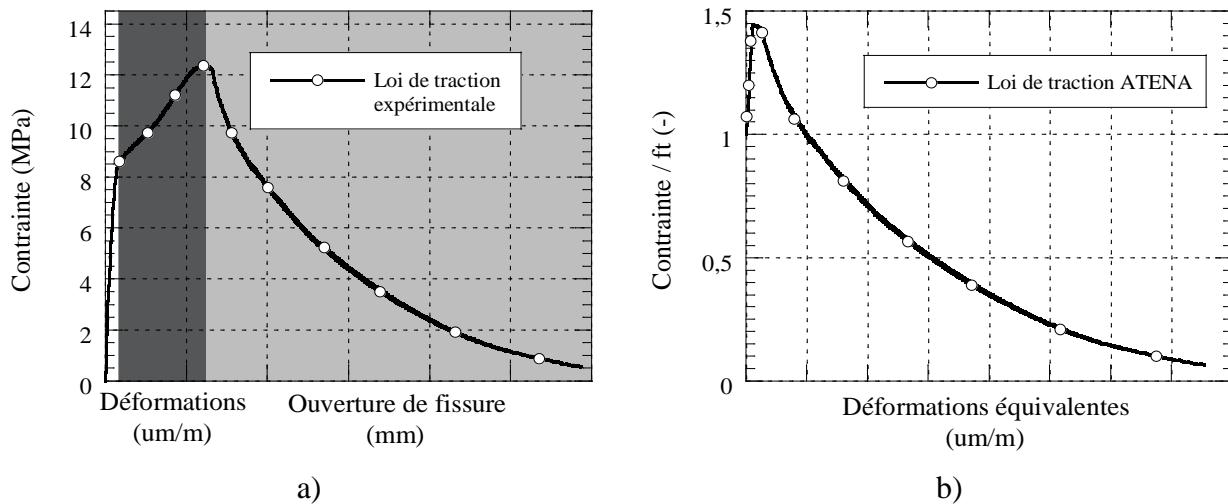


Figure 6-3 : Loi de comportement en traction a) loi expérimentale b) loi calibrée pour ATENA

6.1.3 Modèle utilisé

Deux modèles numériques différents d'essais de traction ont été utilisés par Beaurivage (2009) et Duchesneau (2010) pour calibrer leur lois de traction. Beaurivage (2009) a inséré dans son maillage deux éléments de plus grandes dimensions que le reste du maillage afin d'assurer la localisation de la fissuration (Figure 6-4). Duchesneau (2010) a considéré une fine section de la

partie centrale du spécimen en béton et le reste est considéré comme un matériau élastique. Ces deux modèles ne reflètent pas la réalité. Dans le premier modèle la localisation de la fissuration est forcée par l'ajout de deux éléments de plus grande taille, dans le second aucune multi fissuration n'est possible dans l'échantillon.

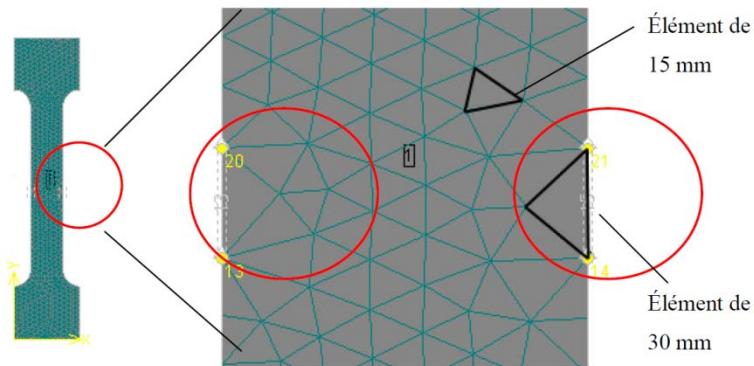


Figure 6-4 : Maillage d'un spécimen de traction (Beaurivage,2009)

Afin de reproduire plus fidèlement le comportement observé lors des essais effectués au laboratoire, il a été choisi de repenser le modèle utilisé. Contrairement à Beaurivage (2009) qui bloquait les déplacements transversaux et longitudinaux seulement aux quatre coins du changement de section du spécimen en traction (Figure 6-5a), il a été choisi de bloquer tous les déplacements transversaux et longitudinaux d'une extrémité du spécimen et de bloquer tout déplacement transversal pour l'autre extrémité (Figure 6-5b). Ces conditions permettent de mieux reproduire l'action des mâchoires de la presse sur le spécimen. De plus, pour éviter toute concentration de contrainte lors de l'application du déplacement, une plaque de transfert en acier a été placée à l'extrémité libre de se déplacer.

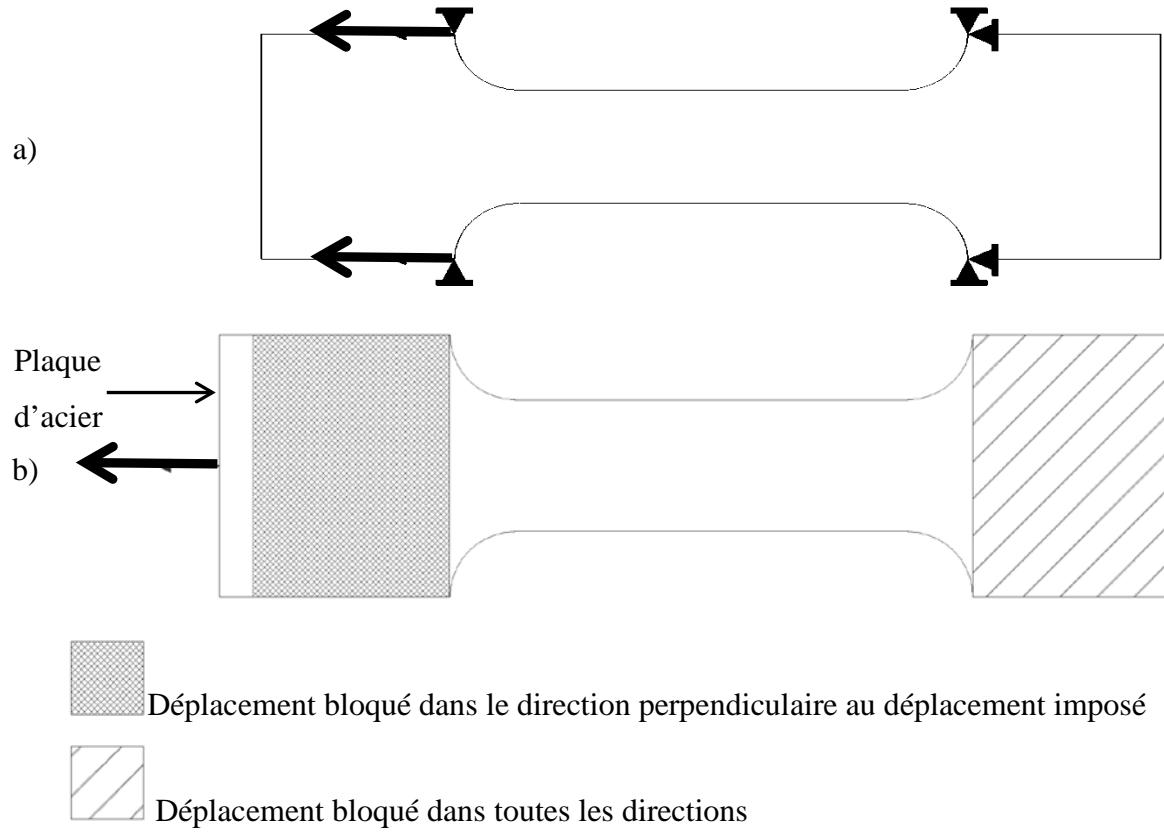


Figure 6-5 : Comparaison des conditions aux frontières des modèles de traction ATENA a) modèle de Beaurivage (2009), b) modèle proposé

Un maillage avec sur des éléments brick à interpolation linéaire de 25 mm a été utilisé. Ces éléments sont constitués de 8 nœuds à 8 points d'intégration. Des éléments à interpolation quadratique auraient pu être utilisés, mais le rapport gain/temps de calcul n'était pas suffisamment intéressant. Les zones de changement de section ont été maillées avec des éléments tétraédriques de mêmes dimensions.

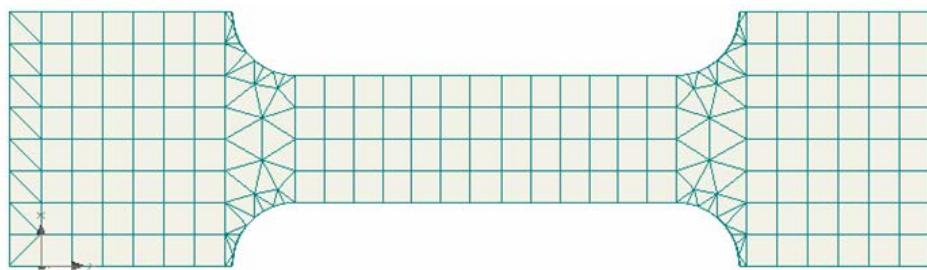


Figure 6-6 : Maillage utilisé pour la modélisation des essais de traction

6.1.4 Influence de la longueur caractéristique Lch sur le comportement en traction

Comme stipulé à la section 6.1.1, il est nécessaire de définir une longueur caractéristique lors de la calibration d'une loi de traction. Une étude paramétrique a été réalisée à partir du modèle de traction directe pour déterminer l'influence du choix de la longueur caractéristique avec la procédure de travail décrite aux sections précédentes. Des maillages avec des éléments de 25 ou 50 mm ont été étudiés avec une longueur caractéristique variant de 10 à 500 mm. La longueur caractéristique et la loi de traction calculée selon l'équation (6-3) ont été modifiées dans ATENA. On constate sur la Figure 6-7 que la courbe en traction obtenue est identique pour les 2 types de maillage et quelle que soit la longueur caractéristique choisie. La méthode d'analyse adoptée pour traiter les résultats des essais de traction et leur introduction dans ATENA permet donc de s'affranchir de l'influence de la longueur caractéristique.

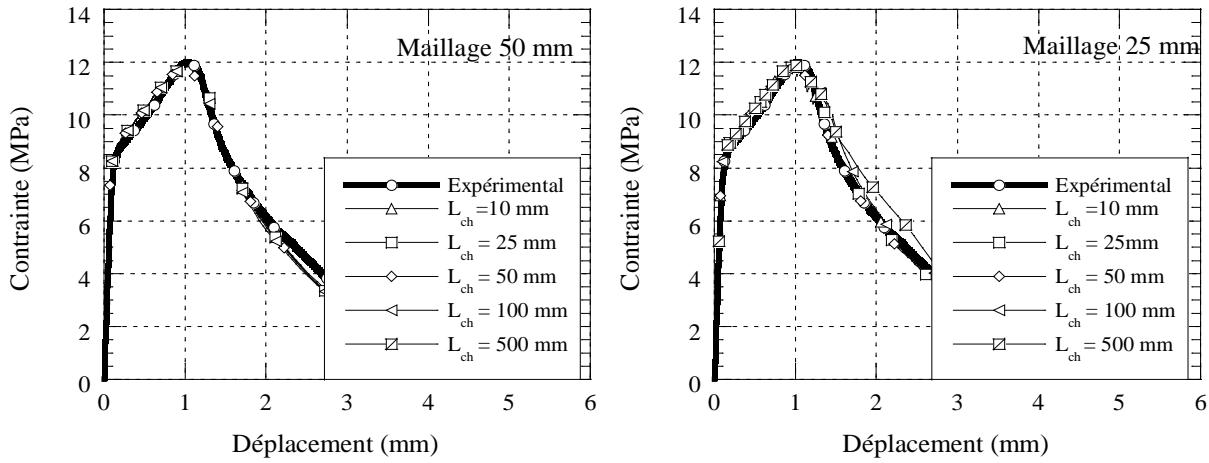


Figure 6-7 : Influence de la longueur caractéristique sur la loi de traction obtenue

a) maillage avec éléments de 50 mm, b) maillage de 25 mm.

6.1.5 Influence de la contrainte de première fissuration

Dans le cadre de l'étude d'un matériau écrouissant tel que le BFUP, il peut être parfois difficile de bien évaluer la contrainte de première fissuration. Comme le montre la Figure 6-8, la contrainte de première fissuration peut osciller entre 2,5 MPa et 9 MPa dépendamment de l'échelle considérée pour l'analyse des résultats de l'essai. Une partie du changement de rigidité observée pour une contrainte de 2,5 MPa est en partie due à un jeu mécanique dans la presse qui a faussement réduit la rigidité mesurée. Le jeu mécanique a maintenant été corrigé sur la presse.

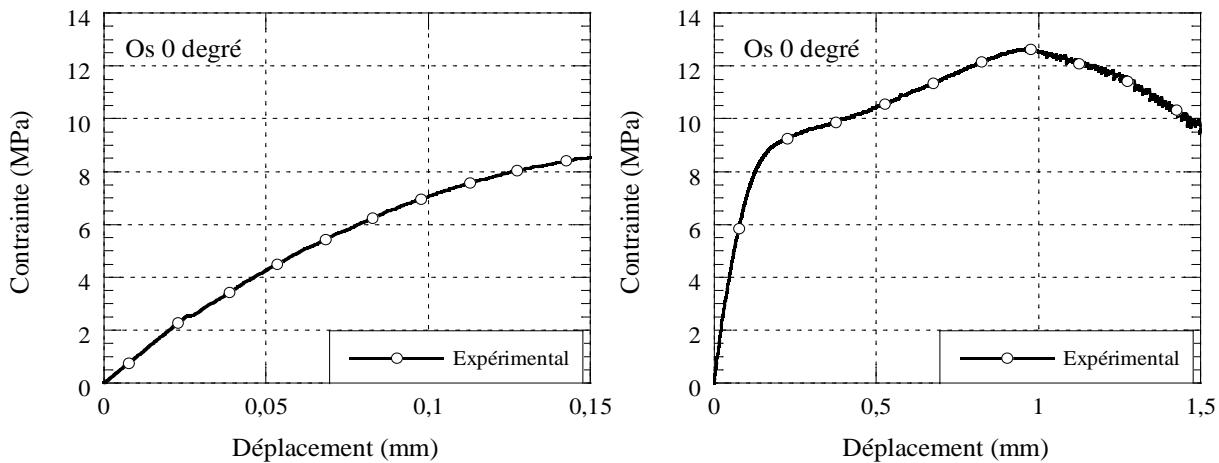


Figure 6-8 : Analyse d'une courbe de traction avec jeu mécanique dans la presse

a) courbe agrandie b) courbe complète

Il est important de noter que le modèle par éléments finis ne permet pas de reproduire le comportement en traction d'un matériau qui aurait une résistance maximale supérieure à 2 fois la f_t /contrainte de première fissuration. Dès que la contrainte calculée dépasse deux fois la contrainte de première fissuration, la phase écrouissante est stoppée et la phase adoucissante débute et ce malgré une déformation de localisation introduite bien supérieure à celle évaluée (Figure 6-9). De plus, le modèle diverge alors très rapidement.

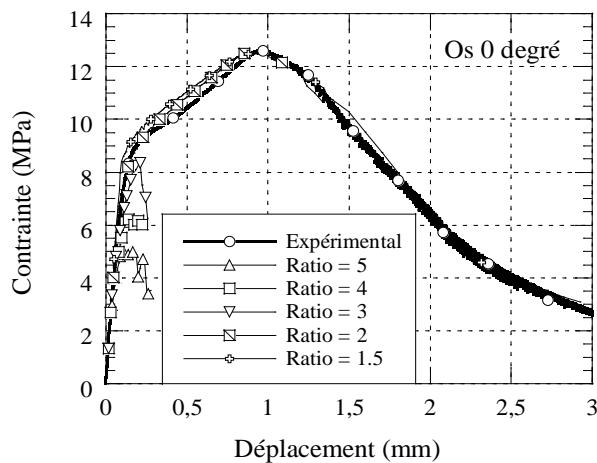


Figure 6-9 : Loi de comportement obtenue par éléments finis pour différents ratios f_t/f'_t

Ainsi, le choix de la contrainte de première fissuration en traction doit être inférieur à 50% de la résistance maximale. Ce critère est donc à rajouter au critère déjà proposé par Cervenka et al. (2011) :

$$f'_t < \frac{1}{2} |f'_{c0}| \quad (6-4)$$

Il sera proposé que dans les prochaines versions du logiciel que cette limitation soit retirée.

6.1.6 Validation des lois de comportement en traction

Pour chacun des essais de traction directe réalisés au chapitre 4, les lois de comportement obtenues ont été calibrées suivant la démarche présentée à la section 6.1.2. Une fois calibrée ces lois ont été testées sur le modèle présenté à la section 6.1.3. Si la réponse obtenue avec le modèle d'éléments finis est conforme au comportement observé expérimentalement la loi est considérée valide.

La Figure 6-11, représentant les courbes contrainte-déplacement expérimentales et numériques avec différents coefficients d'orientation des fibres, met clairement en évidence la validité des lois de traction utilisées dans ATENA, car les lois de traction expérimentales sont très bien reproduites. De plus, dans le cas d'essais avec fibres orientés favorablement à 0 degré, on retrouve le même patron de fissure sur le modèle numérique que sur le spécimen testé (Figure 6-10, filtre de 0,1 mm appliqué aux ouvertures de fissures).

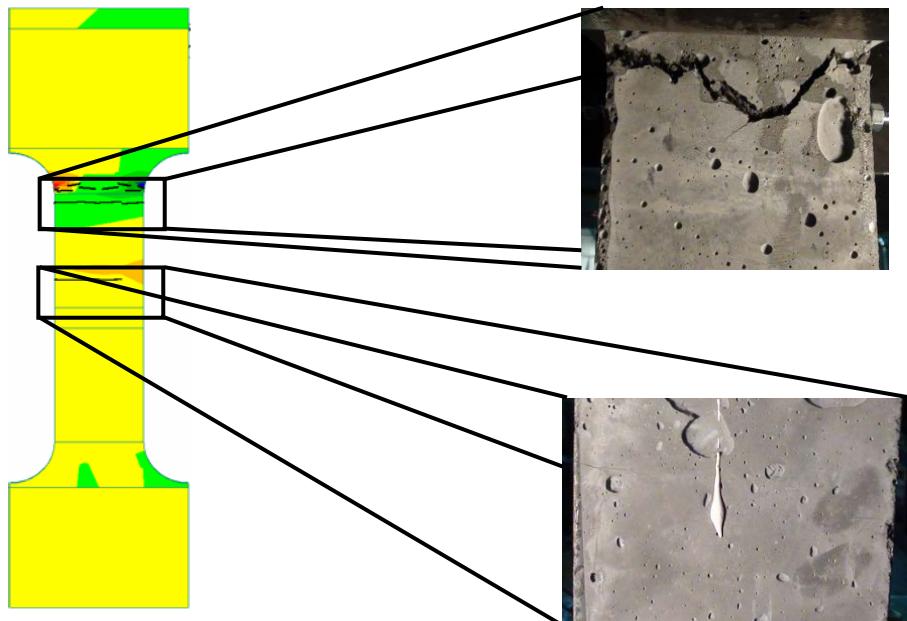


Figure 6-10 : Comparaison des profils de fissuration expérimentaux et numériques pour des spécimens de traction avec fibres orientées favorablement à 0 degré.

Dans le cas des autres orientations, les profils de fissuration ne peuvent pas être comparés. À l'échelle du spécimen de traction, l'orientation n'est pas homogène avec l'utilisation de séparateurs dans une partie de la section droite. Or, la réponse obtenue dans le modèle numérique est celle d'un spécimen possédant une orientation uniforme.

Numériquement on retrouve pour des bétons fibrés écrouissant que la fissuration se développe au niveau du changement de section. Dans le cas d'un béton sans fibre, la fissuration se développe plutôt dans la partie centrale. Le caractère écrouissant du matériau conduit donc à une redistribution des contraintes dans le spécimen. Cela vient confirmer que le changement de section relativement soudain dans le spécimen devrait être plus graduel afin d'éviter une concentration de contrainte trop importante. Ceci pourrait éventuellement améliorer la qualité de la caractérisation du matériau.

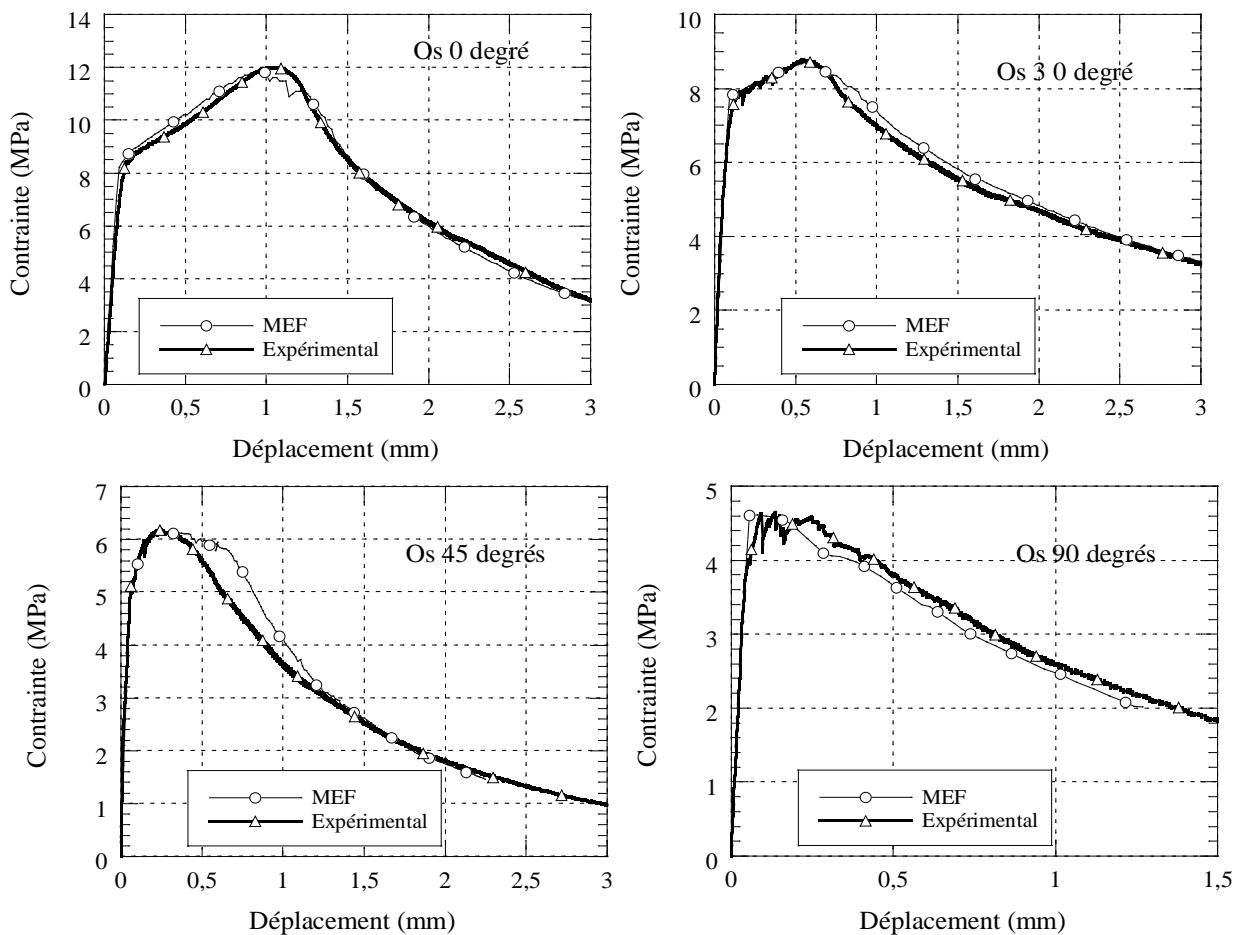


Figure 6-11 : Comparaison des lois de comportement en traction expérimentales et numériques

6.2 Modélisation du comportement en flexion

6.2.1 Modèle utilisé

6.2.1.1 Géométrie

Le modèle numérique utilise les dimensions des poutres présentées à la Figure 5-1a avec des largeurs de 75 mm à 200 mm et une portée de 1,1 m. Les plaques d'appui en acier qui utilisées en laboratoire ont été modélisées pour éviter toute concentration de contrainte au niveau des appuis et de la plaque de transfert. La Figure 6-12 présente la géométrie du modèle numérique.

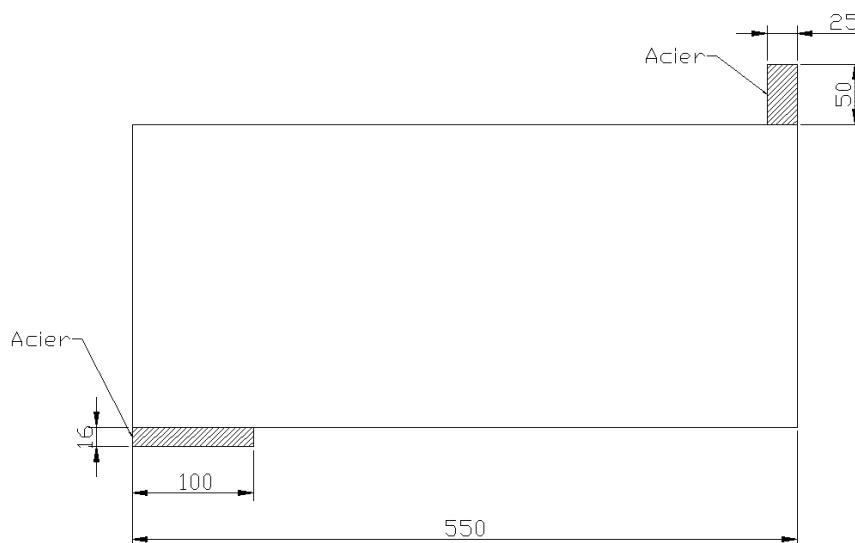


Figure 6-12 : Géométrie du modèle numérique

6.2.1.2 Maillage

La Figure 6-13 présente le maillage des modèles numériques. Les éléments du maillage sont identiques à ceux utilisés pour la modélisation des essais de traction, éléments briques à interpolation linéaire de 25 mm. La plaque de transfert a été maillée avec des éléments tétraédrique de 12,5mm. Un raffinement supplémentaire au niveau du point d'application de la charge et au niveau de la surface de contact avec la poutre a été effectué.

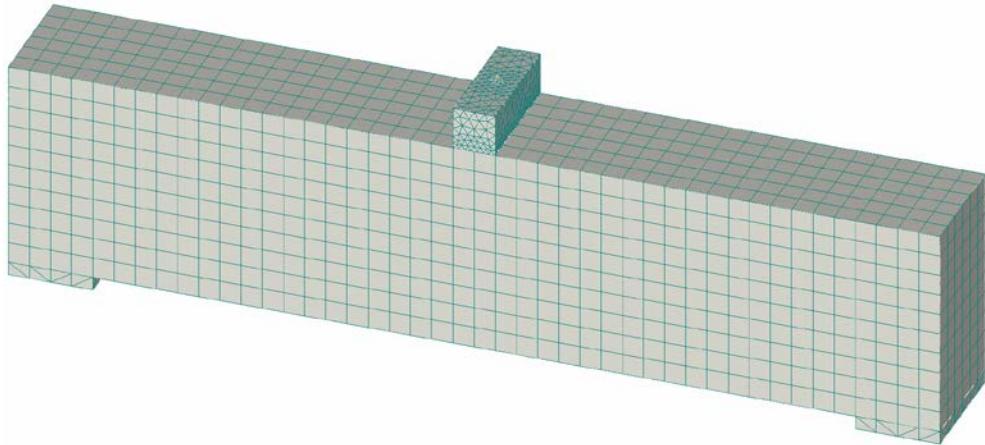


Figure 6-13 : Maillage utilisé pour la modélisation des essais de flexion

6.2.1.3 Conditions aux frontières et chargement

Les déplacements suivant l'axe Z ont été bloqués tout au long de l'axe central de des plaques d'appuis (Figure 6-14). Toutes les rotations et tous les autres déplacements ont été libres. Le chargement est imposé au centre de la plaque de transfert sous la forme d'un déplacement contrôlé.

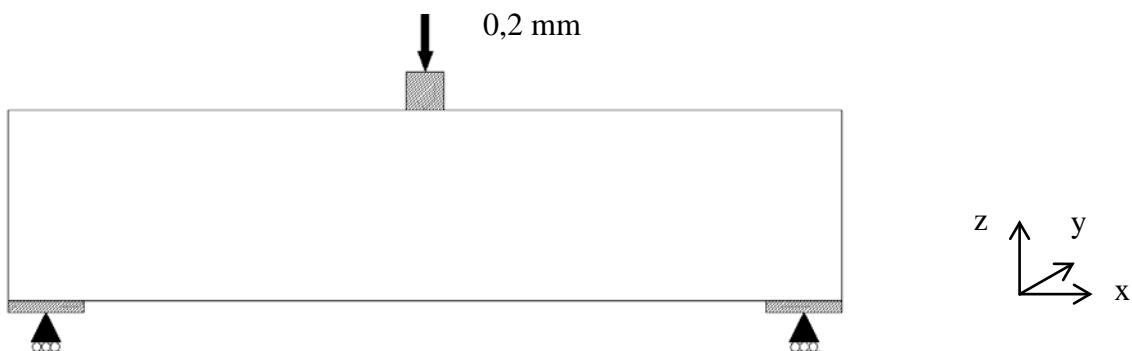


Figure 6-14 : Conditions aux frontières du modèle ATENA

6.2.2 Matériaux utilisés

Les propriétés mécaniques des bétons utilisés (Tableau 6-2) ont été calculées à partir des relevés du coefficient d'orientation effectués au chapitre 5 et du modèle de prédiction du comportement en traction pour les BFUP présenté au chapitre 4. Une longueur caractéristique égale à la taille du plus petit élément du maillage de la poutre (25 mm) a été utilisée pour l'implémentation des lois de traction dans ATENA.

Tableau 6-2 : Propriétés mécaniques des bétons pour les poutres modélisées

	Poutre 75 mm	Poutre 125 mm	Poutre 150 mm
E_c (MPa)	36 000	36 000	36 000
ν (-)	0,2	0,2	0,2
Angle mesuré	37,9°	38,48°	40,3°
σ_{pc} (MPa)	8,02	8,42	8,55

6.2.3 Résultats obtenus

La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques est présentée à la Figure 6-15. La courbe numérique obtenue avec le même coefficient d'orientation des fibres que l'expérimental est tracée. Enfin pour fin de démonstration, la courbe numérique obtenue avec un spécimen de caractérisation dans lequel le coefficient d'orientation est largement surestimé est présentée. Cette dernière courbe démontre l'intérêt de bien tenir compte du coefficient d'orientation des fibres dans les spécimens, car l'utilisation sans correctif de ces lois de comportement en traction entraîne une surestimation de la capacité portante de 38,5 %. L'utilisation de l'angle d'inclinaison des fibres mesuré et de la loi associée sous-estime de 8 % en moyenne la résistance en flexion maximale atteinte. Il a donc été nécessaire d'ajuster l'angle d'inclinaison pour atteindre une résistance maximale similaire à l'expérimental. Cet ajustement est imputable en partie au programme de mesure développé qui permet d'obtenir à 2 degrés près, l'angle d'inclinaison des fibres pour des angles compris entre 15 et 60 degrés (Figure 3-17) et à 15 degrés près pour des angles compris entre 0 et 15 degrés. Une augmentation de 1,4 degré en moyenne a permis d'atteindre les mêmes charges maximales expérimentales. Cette modification reste dans la plage d'erreur de mesure du programme.

Pour la poutre de 150 mm (Figure 6-15a), on constate que le comportement de la poutre est très bien reproduit. Pour les deux autres poutres, les modèles par éléments finis ont tendances à sous-estimer les flèches relevées de 33 % en moyenne. Un raffinage du maillage et ainsi que réduction de la longueur caractéristique n'ont pas permis de mieux reproduire le comportement en flexion des poutres de 75 mm et de 125 mm de largeur. Il est important de rappeler que ces deux poutres présentaient des écrasements aux appuis atypiques qui ont probablement conduit à un décalage non désiré du déplacement des poutres (Figure 5-7).

Ce problème d'estimation de la flèche est peut être aussi relié au système d'équations proposé au chapitre 4. Pour les angles d'inclinaison des fibres relevés dans les poutres, on se retrouve entre 2 séries d'essais ayant permis de valider le système d'équations. Or entre ces 2 séries d'essais de fort changement de résistance et de déformation s'opèrent (Figure 4-21). Il est donc possible que le système d'équations soit moins exact dans cette plage. Il serait donc pertinent d'ajouter des séries d'essais de traction dans cette plage d'orientation.

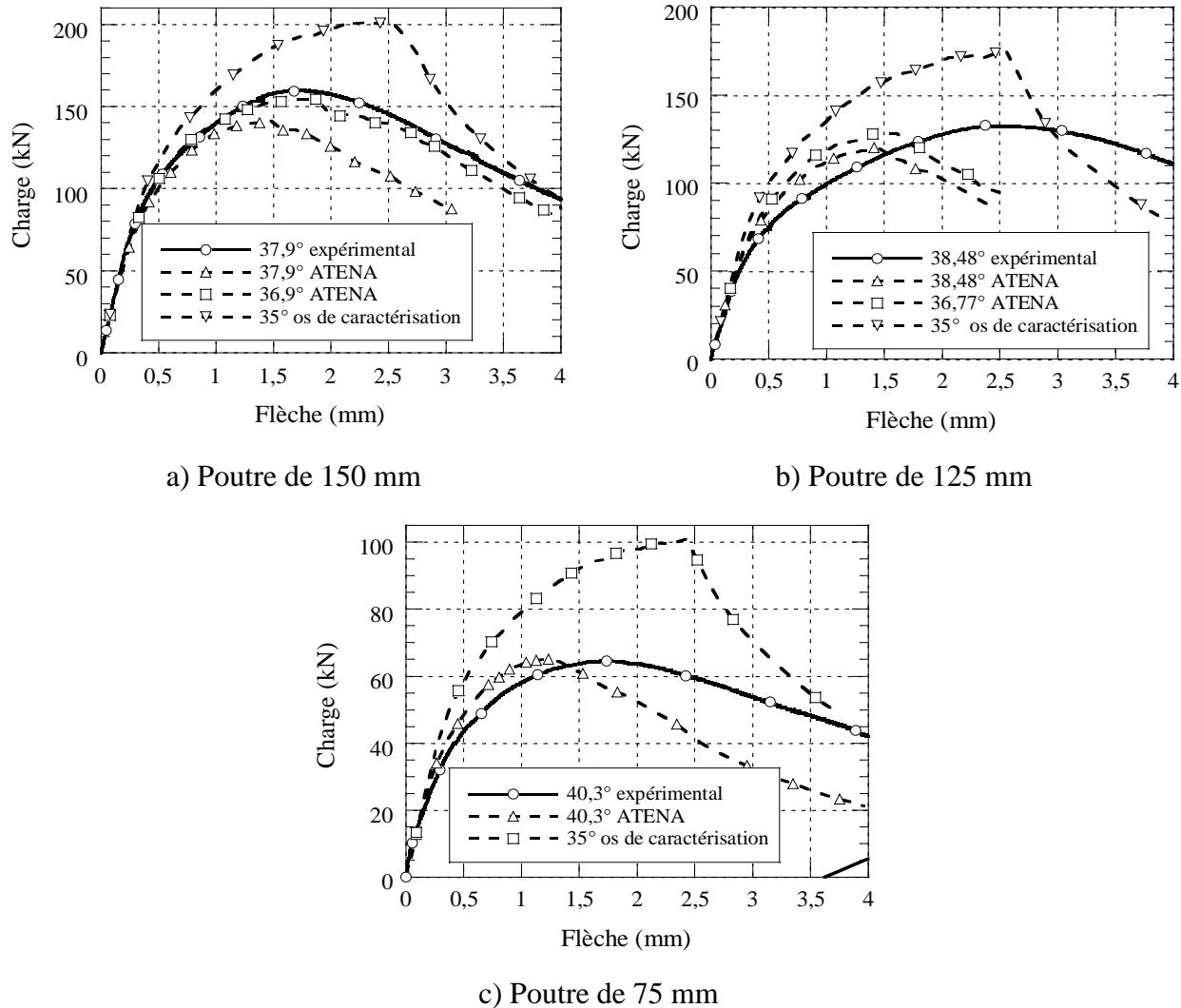
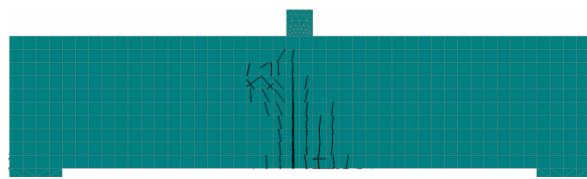
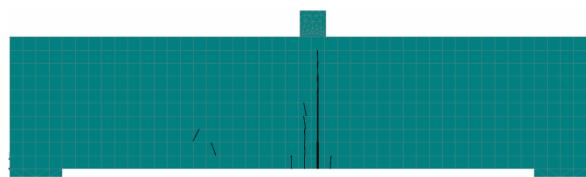


Figure 6-15 : Prédiction par éléments finis du comportement en flexion de poutres en BFUP à partir de la mesure de l'angle d'inclinaison des fibres mesuré.

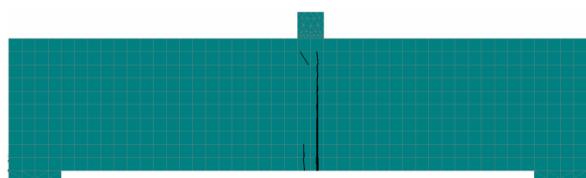
Le profil de fissuration a été vérifié pour des ouvertures de fissures supérieures à 0,1 mm dans la partie post-pic des courbes (Figure 6-16), car dans la partie pré-pic aucune fissuration n'était visible l'œil nu. On constate les résultats sont conformes aux observations expérimentales avec une seule zone de fissuration dans la partie centrale de la poutre et une seule macro fissure localisée.



a) Poutre 150 mm



b) Poutre 125mm



c) Poutre 75mm

Figure 6-16 : Comparaison des profils de fissuration modèle numérique-expérimental pour des ouvertures de fissures supérieures à 0,1mm.

L'erreur de mesure de l'angle d'inclinaison des fibres par le programme de détection a conduit à évaluer le comportement en flexion des poutres testées pour l'angle mesuré plus ou moins 2° (Figure 6-17). Cet angle de plus ou moins 2° correspond à la moyenne des erreurs pour chacune des fibres mesurées sur la base des résultats obtenus à la Figure 3-17b. On constate que la courbe expérimentale en flexion se retrouve dans ou à proximité du fuseau des résultats numériques. La partie post-pic des courbes est plus difficile à reproduire car elle dépend de la position de la macro fissure localisée dans la poutre.

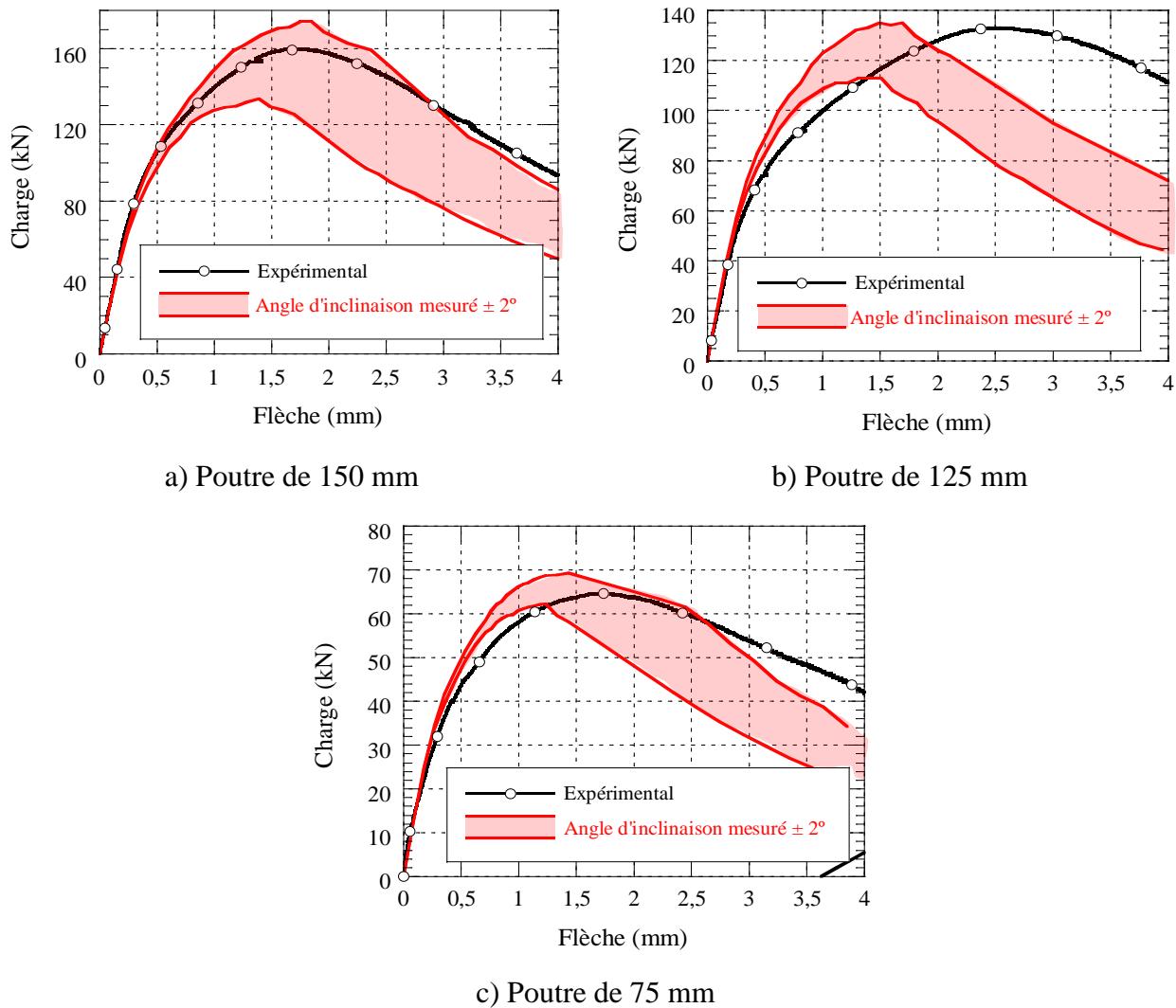


Figure 6-17 : Plage de comportement en flexion d'une poutre en BFUP pour une plage d'erreur du coefficient d'orientation de $\pm 2^\circ$.

Afin de valider la méthode de prédiction du comportement de flexion proposé dans ce projet, cette dernière a aussi été appliquée pour reproduire le comportement des poutres de Beaurivage (2009) présentant des taux de renforcement variant de 0% à 1%. La Figure 6-18 présente les résultats obtenus. Dans le cadre de la poutre non armée, on retrouve les même constatations que pour les poutres 75 mm et 125 mm, à savoir une rigidité accrue qui conduit à une sous-estimation de la flèche des poutres. Une forte variabilité de l'angle d'inclinaison des fibres a été constatée sur la section des poutres de Beaurivage (2009). L'utilisation de l'angle d'inclinaison relevé dans la partie basse du spécimen surestimait fortement la capacité portante de la poutre, alors que le comportement inverse a été constaté lors de l'utilisation de l'angle d'inclinaison de la partie haute de la poutre. Pour rester en adéquation avec la démarche utilisée sur les poutres présentées au paragraphe précédent, un angle moyen sur toute la section a été utilisé. Pour les poutres armées (Figure 6-18b et Figure 6-18c) l'utilisation de l'angle d'inclinaison moyen a permis de prédire de façon précise la capacité portante. L'erreur de prédiction sur la capacité portante est en moyenne de 1,3 %. Néanmoins on constate toujours une sous-estimation de 13 % de la flèche.

De manière générale, la présente méthodologie, soit la combinaison de la mesure du coefficient d'orientation des fibres avec l'utilisation du système d'équations pour obtenir le comportement en traction directe du BFUP, reproduit bien la résistance des poutres mais sous-estime la flèche des poutres. Le grand avantage de cette méthodologie est qu'elle est basée sur des mesures directes sans l'utilisation de facteur correctif. N'ayant pas accès à une mesure du coefficient d'orientation des fibres, Beaurivage (2009) a dû corriger les lois de comportement en traction provenant des essais de caractérisation du BFUP pour tenir compte d'une orientation de fibres différente dans les poutres et ainsi obtenir des résultats numériques adéquats. Cependant, ce coefficient était choisi de façon itérative jusqu'à obtention du comportement voulu. En effet, si aucun facteur correctif n'est utilisé, Beaurivage obtenait une surestimation importante de la capacité portante. De plus, celui-ci a aussi dû intégrer une interface entre la plaque de chargement et la poutre pour réduire artificiellement la rigidité numérique des poutres.

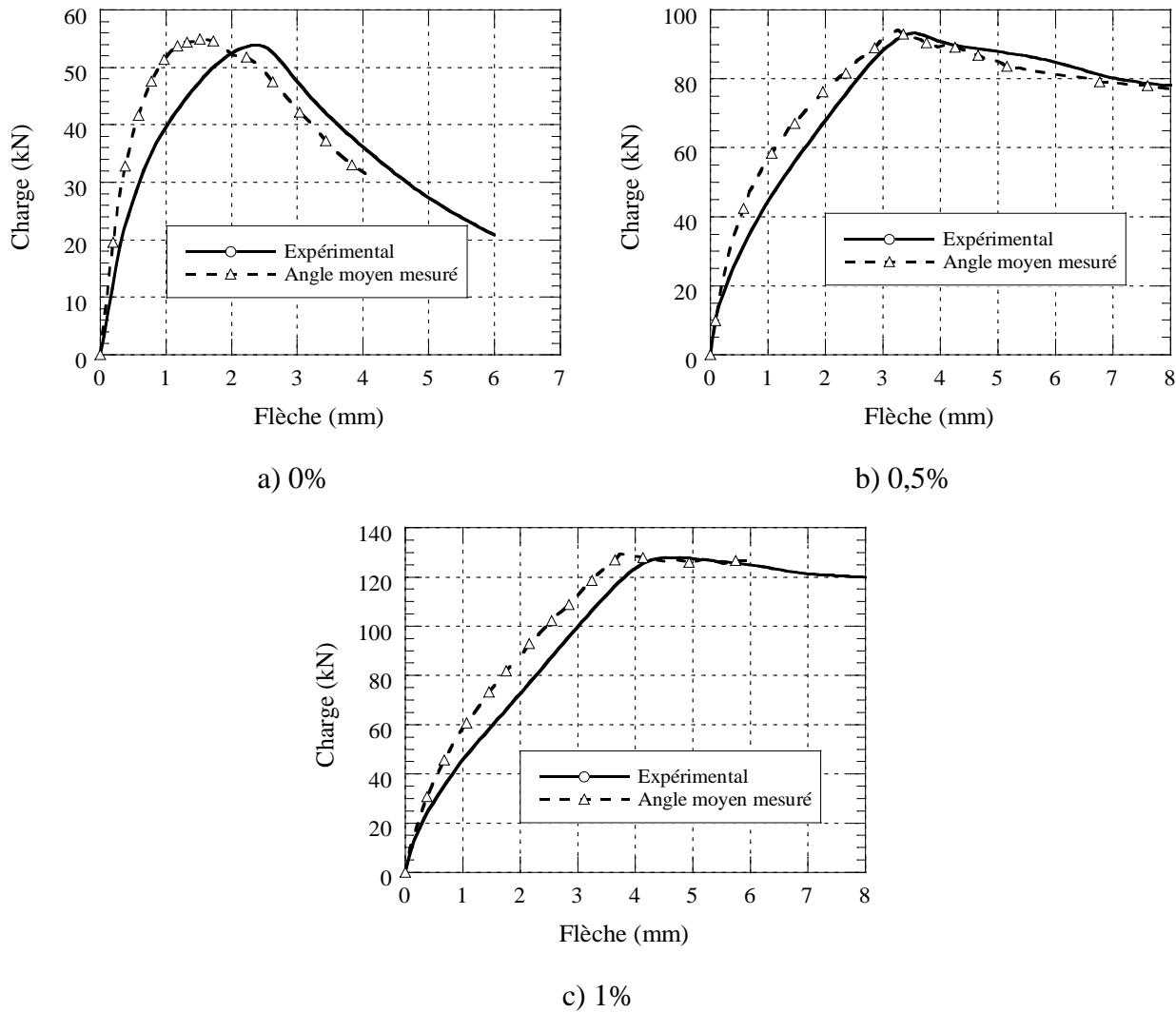


Figure 6-18 : Comportement en flexion isostatique des poutres de Beaurivage (2010) pour des taux de renforcement variant de 0% à 1%

6.3 Conclusion

L'utilisation d'un angle d'inclinaison des fibres moyen et des lois de traction déduites du modèle présentées au chapitre 4 ont donné de bons résultats pour la prédiction des capacités portantes des poutres testées dans ce programme de recherche et pour celles testées par Beaurivage (2009) avec une précision moyenne de 95,5 %. Ainsi, l'impact négligeable des effets de bord des coffrages et des armatures sur le BFUP présenté au chapitre 5 semblent valides. Si la loi de comportement en traction avait été directement extraite des spécimens de caractérisation en traction directe sans

considération de l'orientation des fibres, alors on aurait alors constaté une surestimation de 39 % de la capacité portante. L'évaluation de la flèche est moins précise. En effet, l'estimation de la flèche est sous-estimée de 33 % en moyenne pour les poutres non armées et de 13 % pour les poutres armées. Pour améliorer l'estimation de la flèche, le système d'équations développé pour prédire le comportement en traction du BFUP selon l'orientation des fibres devra être bonifié. Pour ce faire, des essais complémentaires devront être entrepris pour définir le comportement en traction du BFUP pour des angles d'inclinaison variant entre 37° et 40°, une plage d'orientation pour laquelle le comportement du BFUP change significativement.

La méthodologie d'analyse développée dans ce projet a donc permis de prédire la capacité portante de poutres en BFUP armées et non armées en se basant uniquement sur l'angle d'inclinaison mesuré et ce sans aucune modification, minoration ou majoration des lois de traction implémentées dans ATENA. De plus, cette méthode permet de s'affranchir de l'utilisation de loi d'interface dans les modèles pour lesquelles les propriétés sont difficilement mesurables.

Chapitre 7 : Conclusions et recommandations

Le but de ce travail de recherche était de développer une méthode de prédiction du comportement mécanique de poutres en BFUP sur la base du coefficient d'orientation des fibres. La méthodologie proposée comprenait la mesure de l'orientation des fibres, l'utilisation d'un système d'équations permettant de déterminer le comportement en traction des BFUP en fonction de l'angle d'inclinaison des fibres et la modélisation par éléments finis du comportement en traction et en flexion de poutres en BFUP.

Un programme de détection de fibres basé sur la succession d'une érosion, d'une dilatation, d'un seuillage global et d'une transformée de Hough a été développé. Il permet ainsi d'obtenir le nombre de fibres présentes dans des spécimens en BFUP avec une précision supérieure à 97 %. La précision sur l'évaluation du coefficient d'orientation des fibres et leur distribution varie selon l'orientation des fibres de 75% à 99%. Une amélioration de la précision pourrait être obtenue en numérisant les échantillons à une résolution plus importante puis en réalisant un échantillonnage de l'image obtenue. De plus, le polissage des surfaces à numériser pourrait être accéléré et automatisé en adaptant la surfaceuse utilisée pour la préparation des surfaces.

Une méthode de coulée du béton à l'aide de séparateurs dans les coffrages a permis de confectionner des éprouvettes de caractérisation avec diverses orientations des fibres. La méthode de coulée a permis d'obtenir une plage d'orientation moyenne des fibres raisonnable variant entre 35° et 55°. Une optimisation de la méthode serait avantageuse pour obtenir les orientations des fibres mécaniquement plus favorables entre 0 et 20°.

Les essais de traction directe sur BFUP ont montré que l'angle d'inclinaison des fibres dans la matrice cimentaire jouait un rôle important sur le comportement écrouissant du matériau ainsi que sur sa résistance ultime. Une réduction de 95% de la longueur de la phase écrouissante et une réduction de 60% de la résistance maximale ont été observées pour les coefficients les plus défavorables. Il importe donc de favoriser au maximum une orientation favorable des fibres dans les éléments structuraux. À partir des essais de traction et des mesures du coefficient

d'orientation des fibres, un système d'équations a été développé pour prédire la loi de comportement en traction directe du BFUP. Ce système d'équations reproduit les différentes coordonnées de la loi de comportement avec une précision moyenne de 96%. Ceci est très satisfaisant. Étant donné que les essais ayant servi au développement du système d'équations sont limités et ne couvrent pas toutes les orientations de fibres, des essais complémentaires devront être entrepris pour compléter la validation du modèle. Le développement d'un essai de traction normalisé permettant de couler des spécimens avec des orientations variées semble indispensable pour arriver à caractériser et à prédire la réponse d'un béton fibré. Pour ce faire, l'augmentation du rayon de courbure au changement de section des spécimens de traction de l'essai développé à l'EPM permettrait de réduire les concentrations de contraintes et de favoriser une rupture dans la section centrale.

L'étude de l'angle d'inclinaison des fibres en fonction de la hauteur et de la largeur d'une poutre en BFUP a montré que l'angle d'inclinaison variait peu. Des variations maximales de 10° ont été observées avec une méthode de coulée à la chaudière. Les résultats pourraient être différents avec une autre méthode de coulée. Le prélèvement d'échantillons dans des poutres armées a mis en évidence que la présence d'armatures longitudinales conventionnelles perturbait peu l'orientation des fibres sous ou dans l'axe du renforcement. Cependant, la présence des chaises, servant à assurer un espacement inter armatures ou à garantir une distance de recouvrement suffisamment importante, perturbait de façon importante l'écoulement et donc l'orientation des fibres. Une variation maximale du coefficient d'orientation des fibres de 20° a été observée. La géométrie et l'emplacement des chaises dans les éléments structuraux en béton renforcé de fibres devraient donc faire l'objet d'une attention particulière lors de la construction. Dans l'éventualité où les éléments en BRF comprendrait des étriers (il est probable que cela ne soit pas requis), une étude sur l'influence des étriers sur l'angle d'inclinaison des fibres devra être réalisée pour compléter les observations.

Les mesures du coefficient d'orientation sur les poutres en BFUP ont permis de mettre en évidence que les équations analytiques proposées dans la documentation pour estimer l'angle d'inclinaison des fibres sous-estiment fortement l'angle d'inclinaison des fibres dans des

éléments en BFUP, du moins pour la méthode de coulée utilisée dans ce projet. Ces équations ne sont probablement applicables que pour des méthodes de coulée n’induisant pas d’orientation préférentielle. Ceci démontre l’intérêt d’utiliser un programme automatisé fournissant l’angle et la densité des fibres tel que celui développé dans ce projet.

Les modélisations des essais de traction ont permis de très bien reproduire le comportement en traction du BFUP et ce sans l’utilisation d’artifice numérique permettant de favoriser la localisation de la fissuration. Les comportements pré-pic et post-pic du BFUP avec différentes orientations des fibres ont été bien décrits par les modèles. Les modélisations des essais de flexion ont été réalisées sans aucun correctif de la loi de comportement du BFUP et sans interface plaque de chargement-poutre. L’utilisation d’un angle moyen d’inclinaison des fibres et des lois de traction introduites dans les modèles ont donné de bons résultats pour la prédition des capacités portantes des poutres testées dans ce programme de recherche et par Beaurivage (2009). Un pourcentage d’erreur moyen de 5 % sur la capacité portante maximale a été observé. Si la loi de comportement en traction avait été directement extraite des spécimens de caractérisation en traction directe sans considération de l’orientation des fibres, alors on aurait alors constaté une surestimation de 39 % de la capacité portante. La méthode proposée permet donc de réduire significativement l’erreur dans l’évaluation de la capacité portante d’une poutre en BFUP avec ou sans armature. D’un autre côté, l’estimation de la flèche est sous-estimée en moyenne de 33 % pour les poutres non armées et de 13 % pour les poutres armées. Cette imprécision est probablement due au fait que les orientations de fibres mesurées dans les poutres se situent entre 2 orientations de fibres ayant permis de valider le système d’équations du comportement en traction. Or entre ces 2 orientations de fibres, de fort changement de résistance et de déformation s’opèrent dans le BFUP. Enfin, les résultats des modélisations ont montré que l’impact des effets de bord des coffrages et des armatures sur l’orientation des fibres dans des poutres en BFUP pouvait être considéré négligeable avec la méthode de coulée utilisée dans les modèles.

Globalement l’ensemble des résultats obtenus au cours de ce travail de recherche valide la méthodologie proposée qui est basée sur la mesure du coefficient d’orientation moyen des fibres

dans une section et l'utilisation d'un système d'équations empiriques décrivant l'influence de ce coefficient sur le comportement en traction directe du BFUP. Il serait maintenant pertinent de valider la méthodologie sur des éléments structuraux plus complexes. Par la suite, une réflexion sur son utilisation en conception ou en contrôle qualité sur une production industrielle pourrait être engagée (détermination des zones d'étude pertinente dans les spécimens et nombre de surface à analyser).

Bibliographie

- ACI Committee 544.1 R. (1996). *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*. Michigan, USA: American concrete institute.
- AFGC. (2002). *Recommendations provisoires sur les Bétons fibrés à ultra-hautes performances*.
- Aguado, A. S., Montiel, M. E., & Nixon, M. S. (1995 4-6 Jul 1995). Ellipse detection via gradient direction in the Hough transform. *Image Processing and its Applications, 1995., Fifth International Conference on* (pp. 375-378).
- Axelsson, M., & Ieee. (2008). Estimating 3D Fibre Orientation in Volume Images. In *19th International Conference on Pattern Recognition, Vols 1-6* (pp. 1762-1765). New York: Ieee. <Go to ISI>://WOS:000264729000434
- Bartos, P. J. M., & Duris, M. (1994). Inclined tensile strength of steel fibres in a cement-based composite. *Composites*, 25(10), 945-952.
- Beaurivage, F. (2009). *Étude de l'influence des paramètres structuraux sur les lois de comportement des bétons fibrés pour la conception de structures* (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, p 294).
- Behloul, M. (1996). *Analyse et modélisation du comportement d'un matériau à matrice cimentaire fibrée à ultra hautes performances (bétons de poudres réactives. Du matériau à la structure)* (Thèse de doctorat, , École normale supérieure de Cachan, no 96 DENS 0026, p 164).
- Boulay, C., Rossi, P., & Tailhan, J.-L. (2004). Uniaxial tensile test on a new cement composite having a hardening behaviour. *6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes* (pp. 61 - 68)RILEM Publications SARL.
- Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., & Amziane, S. (2009). Influence de la rhéologie des bétons renforcés de fibres métalliques sur leurs propriétés mécaniques. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13(4), 473-488.
- Braike, S. (2007). *Conception d'elements prefabriques de ponts avec des betons fibres a haute et ultra haute performance* (M.Sc.A., Ecole Polytechnique, Montreal (Canada), Canada). Dissertations & Theses @ Ecole Polytechnique de Montreal; ProQuest Dissertations & Theses (PQDT). (UMI No. MR29216)
- Casanova, P. (1995). *Bétons renforcés de fibres métalliques: du matériau à la structure. Etude expérimentale et analyse du comportement de poutres soumises à la flexion et à l'effort tranchant* (PhD, École Nationale des Ponts et Chaussées).
- Cervenka, J., Bazant, Z. P., & Wierer, M. (2005). Equivalent localization element for crack band approach to mesh-sensitivity in microplane model. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 62(5), 700-726.

- Cervenka, V., Jendele, L., & Cervenka, J. (2011). *Atena Program Documentation* (Vol. 1: Theory). Prague.
- Chang, C.-M. (2006). Detecting ellipses via bounding box. *Asian journal of Health and Information sciences*, Vol. 1(No1), pp. 73-84.
- Chapellier, D. (2000). *Prospexion électrique de surface* (Cours en ligne de géophysique - Résistivités électriques): Université de Lausanne - Institut Français du pétrole.
- Chouteau, M. (2003). *Tomographie électrique en génie et en environnement* (Support de cours CIV6201): École polytechnique de Montréal. Département des génies civil, géologique et des mines
- Denarié, E., & Sadouki, H. (2006). *SAMARIS D26 Modelling of UHPFRC in composite structures* (Delivrable D26): Project SAMARIS (Sustainable and Advanced Materials for Road infrastructures), Workpackage 14, p 68.
- Do, M.-T. (1994). *Fatigue des bétons à haute performance* (Ph.D., Universite de Sherbrooke, Canada). ProQuest Dissertations & Theses (PQDT). <http://search.proquest.com/docview/304134189?accountid=40695>
- Duchesneau, F. (2010). *Conception de parapets préfabriqués hybrides et monolithiques utilisant des bétons à haute et ultra-haute performance* (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal).
- Dupont, D., & Vandewalle, L. (2005). Distribution of steel fibres in rectangular sections. *Cement and Concrete Composites*, 27(3), p 391-398.
- Faifer, M., Ottoboni, R., Toscani, S., & Ferrara, L. (2010 3-6 May 2010). Steel fiber reinforced concrete characterization based on a magnetic probe. *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2010 IEEE* (pp. 157-162).
- Faifer, M., Ottoboni, R., Toscani, S., & Ferrara, L. (2011). Nondestructive Testing of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Using a Magnetic Approach. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 60(5), 1709-1717.
- Faifer, M., Ottoboni, R., Toscani, S., Ferrara, L., & Felicetti, R. (2009). A multi-electrode measurement system for steel fiber reinforced concrete materials monitoring. *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2009. I2MTC '09. IEEE* (pp. 313-318). 10.1109/IMTC.2009.5168466
- Fei, H., Yanling, G., & Lili, W. (2009). A new ellipse detector based on hough transform. *2009 2nd International Conference on Information and Computing Science, ICIC 2009, May 21, 2009 - May 22, 2009, Manchester, United kingdom* (Vol. 2, pp. 301-305)IEEE Computer Society. <http://dx.doi.org/10.1109/ICIC.2009.187>

- Grünewald, S., & Walraven, J. C. (2002). *Self-compacting fibre reinforced concrete - orientation and distribution of steel fibres in beams*: Section of Concrete Structures/ Stevinlab, TU Delft.
- Habel, K. (2004). *Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC) and reinforced concrete (EPFL)*. <http://library.epfl.ch/theses/?nr=3036>
- Hahn, K., Han, Y., & Hahn, H. (2007). *Ellipse detection using a randomized hough transform based on edge segment merging scheme*. Paper presented at the Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation, Corfu Island, Greece.
- Hannant, D. J., & Spring, N. (1974). Steel-Fibre-Reinforced mortar: a technique for producing composites with uniaxial fibre alignment. *Magazine of Concrete Research*, 26(Compindex), 47-48.
- Haralick, R. M., & Shapiro, L. G. (1992). *Computer and Robot Vision*: Reading, Mass. ;Don Mills, Ont. : Addison-Wesley Pub. Co.
- Hassani, F., & Momayez, M. (2004). *Conception d'un nouvel appareil d'auscultation des couches de béton projeté sur les parois des galeries des mines souterraines* (R-389): IRRSST, Département de génie des mines, Université McGill.
- Hegger J., Rauscher S., Lange J., & Zell M. (2008). *Fiber orientation in ultra-high performance concrete*. Paper presented at the BEFIB 2008: 7th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete, Chennai, India.
- Inverso, S. (2002). *Ellipse détection using Randomized Hough Transform*.
- Jungwirth, J., & Muttoni, A. (2004). *Versuche zum Tragverhalten von ultra hochfestem Beton – Teil 1 Material* (Bericht 00.02.R3): École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Kanakubo, T., Shimizu, K., Katagiri, M., Kanda, T., Fukuyama, H., & Rokugo, K. (2006). Tensile Characteristics Evaluation of DFRCC - Round Robin Test Results by JCI-TC. *International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications* (pp. 27-36)RILEM Publications SARL.
- Karhunen, K. (2010). Electrical Resistance Tomography imaging of concrete. *Cement and Concrete Research*, 40(1), 137-145.
- Kawamura, M., Ikeda, S., Morita, S., & Sanomura, Y. (2005). Unambiguous determination of 3D fiber orientation distribution in thermoplastic composites using SAM image of elliptical mark and interference fringe. *Journal of Composite Materials*, 39(Compindex), 287-299.
- Krause, M., Hausherr, J., Burgeth, B., Herrmann, C., & Krenkel, W. (2010). Determination of the fibre orientation in composites using the structure tensor and local X-ray transform. *Journal of Materials Science*, 45(4), 888-896.

- Krenchel, H. (1975). Fibre spacing and specific fibre surface. *SAE Preprints(Compendex)*, 69-79.
- Laranjeira, F., Aguado, A., & Molins, C. (2008). Evaluating uniaxial tensile behavior of steel fiber reinforced concrete using a meso-scale model. *BEFIB 2008: 7th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete* (pp. 1079 - 1088)RILEM Publications SARL.
- Latoste, J. F. (2007). *Caractérisation d'un béton fibré par méthode non destructive*. Paper presented at the 25ème rencontres de l'AUGC, Bordeaux.
- Latoste, J. F., Behloul, M., & Breysse, D. (2008). Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements. *NDT & E International*, 41(8), 638-647.
- Latoste, J. F. (2009). *Determination of fibres orientation in UPFRC and evaluation of their effect on mechanical properties*. Paper presented at the Non-Destructive Testing in Civil Engineering'09, Nantes, France.
- Lee, S.-k. (2009). *Résistance au cisaillement des bétons renforcés de fibres* (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, p 151).
- Lee, Y., Kang, S.-T., & Kim, J.-K. (2010). Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix. *Construction and Building Materials*, 24(10), 2030-2041.
- Li, V. C., Mihashi, H., Wu, H. C., Alwan, J., Brincker, R., Horii, H., et al. (1996). Micromechanical Models of Mechanical Response of HPFRCC. *High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites RILEM Proceedings 31* (pp. 43-100). <http://hdl.handle.net/2027.42/84686>
- Lours, P. (2009). *Cours de sciences des matériaux*: École des Mines d'Albi Carmaux.
- Maage, M. (1977). Interaction between steel fibers and cement based matrixes. *Materials and Structures*, 10(5), 297-301.
- Maître, H. (2003). La détection des contours dans les images. In c. Paris : Hermès Science Publications, (éd.), *Le traitement des images*.
- Makni, S., Nogaj, M., & Battais, J. (2003). *Segmentation d'images par ligne de partage des eaux sous contraintes*. École Nationale Supérieure des Télécommunications, DEA ATS, Module de traitement d'images. Consulté le 18 mai 2010, tiré de <http://www.tsi.enst.fr/tsi/enseignement/ressources/mti/lpe/>.
- Mansur, M. (1999). Stress-Strain Relationship of High-Strength Fiber Concrete in Compression. *J. Mater. Civ. Eng.*, 11(1), 21.
- Markovic, I. (2006). *High-performance hybrid-fibre concrete: development and utilisation* (Delft University Press). <http://resolver.tudelft.nl/uuid:44ed51cd-fc27-4353-ab81-cf8348f52443>

- McLaughlin, R. A. (1985). *Randomized Hough Transform: improved ellipse detection with comparaison.*
- Mitchell. (2004). Radioactive/Nuclear Methods. In F. C. P. Boca Raton, c2004, (éd.), *Handbook on nondestructive testing of concrete*.
- Mix, P. E. (2005). *Introduction to nondestructive testing : a training guide* (2nd^e éd.): Hoboken, N.J. : Wiley-Interscience, c2005.
- Mlekusch, B., Lehner, E. A., & Geymayer, W. (1999). *Fibre orientation in short-fibre-reinforced thermoplastics. I. Contrast enhancement for image analysis* (Vol. 59). Kidlington, ROYAUME-UNI: Elsevier.
- Naaman, A. E., & Shah, S. P. (1975). Bond Studies on Oriented and Aligned Steel Fibers. *Proceedings of the RILEM International Symposium on Fiber Reinforced Cement and Concrete, London* (pp. 171-178)RILEM Publications SARL.
- Naaman, A. E., & Shah, S. P. (1976). Pull-out Mechanism in steel-reinforced concrete. *Journal of the Structural Division, 102*, 1537-1548.
- Naaman, A. E. (2003). Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced. *PRO 30: 4th International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC 4)* (pp. 95-116)RILEM Publications.
- Naaman, A. E., & Reinhardt, H. (2006). Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response. *Materials and Structures, 39*(5), 547-555.
- Naaman, A. E. (2008). High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. In C. Shi & Y. L. Mo, (Éds.), *High-Performance Construction Materials - Science and Applications*: World Scientific.
- Oesterlee, C. (2010). *Structural Response of Reinforced UHPFRC and RC Composite Members* (EPFL). <http://library.epfl.ch/theses/?nr=4848>
- Orange, G., Dugat, J., & Acker, P. (2000). Ductal: New ultra high performance concretes. Damage resistance and micromechanical analysis. *5th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), Lyon, France* (Vol. 15, pp. 781-790)RILEM.
- Ozyurt, N., Mason, T., & Shah, S. (2006). Non-Destructive monitoring of fiber dispersion in FRCS using AC-impedance spectroscopy. In M. S. Konsta-Gdoutos, (éd.), *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties* (pp. 285-290): Springer Netherlands. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-5104-3_33 doi:10.1007/978-1-4020-5104-3_33
- Ozyurt, N., Mason, T. O., & Shah, S. P. (2007). Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of FRCs. *Cement and Concrete Composites, 29*(2), 70-79.

- Polder, R. (2000). Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. *RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion* (Vol. 33, pp. 603-611).
- Provost, M., & Devillers, J. J. (1991). Contrôle radiographique de la répartition spatiale de fibres métalliques. *Quality Control of Concrete Structures - Proceedings(Compendex)*, 407-407.
- Rasmussen, T. V. (1997). *Time Dependent Interfacial Parameters in Cementitious Composites Materials* (Technical University of Denmark).
- Redaelli, D., & Muttoni, A. (2009). *Comportement et modélisation des éléments de structure en béton fibré à ultra-hautes performances avec armatures passives* (EPFL). <http://library.epfl.ch/theses/?nr=4298>
- Redon, Chermant, & Coster. (1998). Assessment of fibre orientation in reinforced concrete using Fourier image transform. *Journal of Microscopy*, 191(3), 258-265.
- Redon, C., Chermant, L., Chermant, J.-L., & Coster, M. (1999). Automatic image analysis and morphology of fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 21(5-6), 403-412.
- Reinhardt, H. W., Grosse, C. U., & Weiler, B. (2001). Material characterization of steel fibre reinforced concrete using neutron CT, ultrasound and quantitative acoustic emission techniques. *NDT.net*, Vol. 6(No. 5).
- Rentier, C. (2002). *Méthode stochastique de délimitation des zones de protection autour des captages d'eau* (PhD, Université de Liège).
- Robb, K., Wirjadi, O., & Schladitz, K. (2007 17-19 Sept. 2007). Fiber Orientation Estimation from 3D Image Data: Practical Algorithms, Visualization, and Interpretation. *Hybrid Intelligent Systems, 2007. HIS 2007. 7th International Conference on* (pp. 320-325).
- Robins, P., Austin, S., & Jones, P. (2002). Pull-out behaviour of hooked steel fibres. *Materials and Structures*, 35(7), 434-442.
- Robins, P. J., Austin, S. A., & Jones, P. A. (2003). Spatial distribution of steel fibres in sprayed and cast concrete. *Magazine of Concrete Research*, 55(3), 225-235.
- Roduit, N. (2007). *JMicroVision : un logiciel d'analyse d'images pétrographiques polyvalent* (PhD, Faculté des sciences de l'Université de Genève). <http://archive-ouverte.unige.ch/unige:468>
- Rossi, P. (1998). *Les bétons de fibres métalliques* (Tec et Doc^e éd.).
- Schaal, L., & Durieux, A. (2009). *Renforcement des BFUP par orientation magnétique de leurs fibres*: École Polytechnique. http://www.stanford.edu/~adurieux/cgi-bin/Website/downloads/Antoine_DURIEUX_MEC569_Report.pdf

- Schachinger, I. (2007). *Massnahmen zur Herstellung von rissefreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität* (PhD thesis, Technische Universität München).
- Serra, J. (2000). *Cours de Morphologie mathématique* (Support de cours): École des Mines de Paris.
- Sezgin, M., & Sankur, B. (2004). Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic Imaging*, 13(1), 146-168.
- Solomon, C., & Breckon, T. (2010). *Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab*: Wiley.
- Soroushian, P., & Lee, C. D. (1990). Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced-concrete. *Aci Materials Journal*, 87(5), 433-439.
- Spasojevic, A. (2008). *Structural implications of ultra-high performance fibre-reinforced concrete in bridge design* (EPFL). <http://library.epfl.ch/theses/?nr=4051>
- The MathWorks, I. (2011a, 2011). *Regionprops*. R2011b Documentation, Image Processing Toolbox. Consulté le janvier 2010, tiré de <http://www.mathworks.com/help/toolbox/images/ref/regionprops.html>.
- The MathWorks, I. (2011b, 2011). *Watershed*. R2011b Documentation, Image Processing Toolbox. Consulté le janvier 2010, tiré de <http://www.mathworks.com/help/toolbox/images/ref/watershed.html>.
- Torrents, Mason, T. O., Peled, A., Shah, S. P., & Garboczi, E. J. (2001). Analysis of the impedance spectra of short conductive fiber-reinforced composites. *Journal of Materials Science*, 36(16), 4003-4012.
- Torrents. (2007). Control de calidad del hormigón con fibras. *Innovación en tecnología del hormigón*.
- Van Gysel, A. (2000). *Studie van het uittrekgedrag van staalvezels ingebed in een cementmatrix met toepassing op stalvezelbeton onderworpen aan buiging* (PhD, University of Gent).
- Van Mier, J. G. M., & Shi, C. (2002). Stability issues in uniaxial tensile tests on brittle disordered materials. *International Journal of Solids and Structures*, 39(13-14), 3359-3372.
- Weidemann, G., Stadie, R., Goebbel, J., & Hillemeier, B. (2008). Computed tomography study of fibre reinforced autoclaved aerated concrete. *Materialprüfung/Materials Testing*, 50(Compendex), 278-285.
- Woo, L. Y., Wansom, S., Ozyurt, N., Mu, B., Shah, S. P., & Mason, T. O. (2005). Characterizing fiber dispersion in cement composites using AC-Impedance Spectroscopy. *Cement and Concrete Composites*, 27(6), 627-636.

- Woo, L. Y., Kidner, N. J., Wansom, S., & Mason, T. O. (2007). Combined time domain reflectometry and AC-impedance spectroscopy of fiber-reinforced fresh-cement composites. *Cement and Concrete Research*, 37(1), 89-95.
- Wuest, J. (2007). *Comportement structural des bétons de fibres ultra performants en traction dans des éléments composés* (Thèse Ecole polytechnique fédérale de Lausanne EPFL, no 3987, p 268). <http://library.epfl.ch/theses/?nr=3987>
- Wuest, J., Denarié, E., Brühwiler, E., Tamarit, L., Kocher, M., & Gallucci, E. (2009). Tomography analysis of fiber distribution and orientation in ultra high performance fiber-reinforced composites with high-fiber dosages. *Experimental Techniques*, 33(5), 50-55.
- Yang, J., & Fischer, G. (2006). Investigation of the Fiber Bridging Stress-Crack Opening Relationship of Fiber Reinforced Cementitious Composites. *International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications* (pp. 93 - 105)RILEM Publications SARL.
- Yonghong, X., & Qiang, J. (2002). A new efficient ellipse detection method. *Pattern Recognition, 2002. Proceedings. 16th International Conference on* (Vol. 2, pp. 957-960 vol.952). 10.1109/ICPR.2002.1048464
- Zhu, Y. T., Blumenthal, W. R., & Lowe, T. C. (1997). Determination of non-symmetric 3-D fiber-orientation distribution and average fiber length in short-fiber composites. *Journal of Composite Materials*, 31(Compindex), 1287-1301.

ANNEXE 1 –Équations pour déterminer le coefficient d'orientation

	Sorouelian et al.(1990)	Dupont et al. (2005)
Zone 1	$\frac{l_f^2}{bh} (f(l_f, l_f) + \frac{l_f(b + h - 2l_f)}{bh})$ $\frac{\int_{d_f/2}^{l_f} \beta_1 dy}{l_f/2} \frac{0,405(b - l_f)(h - l_f)}{bh}$	$\frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} A_1 \cos\theta d\theta}{2\pi \left(\frac{l_f}{2}\right)^2} = 0,5$
Zone 2	$\frac{l_f}{b} f(l_f, h) + \left(1 - \frac{l_f}{b}\right) \frac{\int_{d_f/2}^{h/2} \beta_1 dy}{h/2}$	$\frac{2}{l_f} \int_0^{\frac{l_f}{2}} \left[\frac{\int_0^{\arcsin(\frac{2y}{l_f})} A_1 \cos\theta d\theta + \int_{\arcsin(\frac{2y}{l_f})}^{\frac{\pi}{2}} A_2 \cos\theta d\theta}{2\pi (\frac{l_f}{2})^2 - 2\pi \frac{l_f}{2} (\frac{l_f}{2} - y)} \right] dy$ $= 0,60$

avec

$$f(m, n) = \int_{d_f/2}^{m/2} \int_{d_f/2}^{n/2} \frac{\beta_2 dx dy}{m/2 n/2}; \quad \beta_1 = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{\arcsin(\frac{d_f}{l_f})}^{\arcsin(\frac{2y}{l_f})} l_f \cos\theta \cos\varphi d\theta d\varphi}{l_f \left(\frac{\pi}{2}\right) \arcsin \frac{2y}{l_f}}; \quad \beta_2 = \frac{\int_{\arcsin(\frac{d_f}{l_f})}^{\arcsin(\frac{2y}{l_f})} \int_{\arcsin(\frac{d_f}{l_f})}^{\arcsin(\frac{2x}{l_f})} l_f \cos\theta \cos\varphi d\theta d\varphi}{l_f \int_{\arcsin(\frac{d_f}{l_f})}^{\arcsin(\frac{2y}{l_f})} \int_{\arcsin(\frac{d_f}{l_f})}^{\arcsin(\frac{2x}{l_f})} d\theta d\varphi}$$

Zone 3	$ \begin{aligned} f(b, h) &= \int_{d_f/2}^{b/2} \int_{d_f/2}^{h/2} \frac{\beta_2}{b/2} dx dy \\ &= \frac{4}{l_f^2} \int_0^{\frac{l_f}{2}} \int_0^y \frac{\arcsin\left(\frac{2z}{l_f}\right)}{\arcsin\left(\frac{2y}{l_f}\right)} A_1 \cos\theta d\theta + \int_{\arcsin\left(\frac{2y}{l_f}\right)}^{\arcsin\left(\frac{2z}{l_f}\right)} A_4 \cos\theta d\theta + \int_{\arcsin\left(\frac{2y}{l_f}\right)}^{\frac{\pi}{2}} \max[0; A_3] \cos\theta d\theta \\ &\quad + \\ &\quad \int_y^{\frac{l_f}{2}} \frac{\arcsin\left(\frac{2y}{l_f}\right)}{\arcsin\left(\frac{2z}{l_f}\right)} A_1 \cos\theta d\theta + \int_{\arcsin\left(\frac{2y}{l_f}\right)}^{\arcsin\left(\frac{2z}{l_f}\right)} A_2 \cos\theta d\theta + \int_{\arcsin\left(\frac{2z}{l_f}\right)}^{\frac{\pi}{2}} \max[0; A_3] \cos\theta d\theta dz \end{aligned} $ <p style="text-align: center;">dy = 0,84</p>
--------	---

$$A_1 = \frac{\pi}{2} l_f^2 \sin\theta d\theta; A_2 = l_f^2 \sin\theta \cdot \arcsin\left(\frac{2y}{l_f \sin\theta}\right) d\theta; A_3 = l_f^2 \sin\theta \left[\arcsin\left(\frac{2y}{l_f \sin\theta}\right) - \arccos\left(\frac{2z}{l_f \sin\theta}\right) \right] d\theta$$

$$A_4 = l_f^2 \sin\theta \cdot \arcsin\left(\frac{2z}{l_f \sin\theta}\right) d\theta; S_1 = \int_0^{\arcsin\left(\frac{2y}{l_f}\right)} A_1 d\theta + \int_{\arcsin\left(\frac{2y}{l_f}\right)}^{\arcsin\left(\frac{2z}{l_f}\right)} A_2 d\theta + \int_{\arcsin\left(\frac{2z}{l_f}\right)}^{\frac{\pi}{2}} \max[0; A_3] d\theta$$

$$S_2 = \int_0^{\arcsin\left(\frac{2z}{l_f}\right)} A_1 d\theta + \int_{\arcsin\left(\frac{2z}{l_f}\right)}^{\arcsin\left(\frac{2y}{l_f}\right)} A_4 d\theta + \int_{\arcsin\left(\frac{2y}{l_f}\right)}^{\frac{\pi}{2}} \max[0; A_3] d\theta$$

Et où 0,405 correspond à l'orientation potentielle d'une fibre libre de tout mouvement :

$$0,405 = \frac{\int \int_0^{\frac{\pi}{2}} l_f \cos\theta \cos\varphi \, d\theta \, d\varphi}{(\frac{\pi}{2})^2 l_f} \quad (0-1)$$

ANNEXE 2 – Programme de détection des fibres

A2.1 Programme principal: detection_ellipse.m

```
=====
détection_ellipse =====

% La variable d'entrée de la fonction est le nom de l'image à analyser
function out = detection_ellipse(nom)
% Ajout des fonctions annexes stockées
addpath('C:\Projet Maitrise\programmation')
tic

% Chargement de l'image stockée dans le dossier Images Scannées
I = imread(['C:\Projet Maitrise\programmation\Images Scannées\' nom '.BMP']);
% Création d'un fichier portant le nom de l'image traitée dans le dossier
courant
mkdir (nom);
% On se place dans le fichier créé
cd(nom);
% Création de l'élément structurant
se = strel('disk',5,4);
% Érosion de l'image par l'élément structurant
Ie = imerode(I, se);
% Reconstruction de l'image
Iobr = imreconstruct(Ie, I);
clear Ie ;
% Dilatation de l'image par l'élément structurant
Iobrd = imdilate(Iobr, se);
clear se ;
% Reconstruction de l'image
Iobrcbr = imreconstruct(imcomplement(Iobrd), imcomplement(Iobr));
clear IobrdIobr ;
% Création du masque
Iobrcbr = imcomplement(Iobrcbr);
% Binarisation par seuillage
I= im2bw(Iobrcbr, graythresh(Iobrcbr));
% Nettoyage des bords
I=imclearborder(I,26);
clear Iobrcbr ;

% Récupération du nombre d'objet
[L,num]=bwlabel(I);
clear I

% Pré allocation de la mémoire
point_suivant = ones(3,2);
point_precedent = ones(3,2);
compteur_ellipse = 0;

% Calcul des propriétés de chacun des objets détectés
for alpha = 1:num
% Initialisation de l'arbre de stockage
stockage = [];
% Récupération des pixels correspondant à l'objet analysé
```

```

[row,colonne] = find( L == alpha);
coordonnees = [colonne, row];

% Diminution du nombre de points à traiter
chull=ConvHull2D(colonne,row);
vecteur_cooronnes=coordonnees(chull,:);

% Vérifier si au moins 3 points sont analysables
if size(vecteur_cooronnes,1) > 2
% Cr eation des triplets aléatoires
nombre_aleatoire = triples(size(vecteur_cooronnes,1));

% Pour chaque tripl e évaluer la meilleure ellipse
for compteur_triple = 1:size(nombre_aleatoire,1)
    % Récupération du tripl e
nb = nombre_aleatoire(compteur_triple,:);
pts=[vecteur_cooronnes(nb(1),:);vecteur_cooronnes(nb(2),:);vecteur_cooronnes(nb(3),:)];
    
    % Récupération des points suivants
for i=1:3
if nb(i)== max(size(vecteur_cooronnes))
point_suivant(i,:)= vecteur_cooronnes(1,1);
else
    point_suivant(i,:)= vecteur_cooronnes(nb(i)+1,:);
end
end

    % Récupération des points suivants
for i=1:3
if nb(i)== 1
    point_precedent(i,:)=
vecteur_cooronnes(size(vecteur_cooronnes,1),:);
else
    point_precedent(i,:)= vecteur_cooronnes(nb(i)-1,:);
end
end

%Calcul des tangentes
% quation tangente point 1
A1 = (point_suivant(1,2) - point_precedent(1,2)) /
(point_suivant(1,1) - point_precedent(1,1));
A2 = -A1 * pts(1,1) + pts(1,2);

% quation tangente point 2
A3 = (point_suivant(2,2) - point_precedent(2,2)) /
(point_suivant(2,1) - point_precedent(2,1));
A4 = -A3 * pts(2,1) + pts(2,2);

% quation tangente point 3
A5 = (point_suivant(3,2) - point_precedent(3,2)) /
(point_suivant(3,1) - point_precedent(3,1));
A6 = -A5 * pts(3,1) + pts(3,2);

%Calcul intersection tangente 1 et 2
x1 = -(A4 - A2)/( A3 - A1) ;
y1 = A1 * x1 + A2 ;

```

```
%Calcul des coordonnées du milieu [1 2]
z1 = (pts(1) + pts(2)) / 2 ;
z2 = (pts(4) + pts(5)) / 2 ;

%Calcul droite 1
A7 = (y1 - z2) / (x1 - z1) ;
A8 = z2 - A7 * z1 ;

%Calcul intersection tangente 1 et 3
x2 = -(A6 - A2) / (A5 - A1) ;
y2 = A1 * x2 + A2 ;

%Calcul des coordonnées du milieu [1 3]
z3 = (pts(1) + pts(3)) / 2 ;
z4 = (pts(4) + pts(6)) / 2 ;

%Calcul droite 2
A9 = (y2 - z4) / (x2 - z3);
A10 = z4 - A9 * z3 ;

%Calcul intersection tangente 2 et 3
x3 = -(A6 - A4) / (A5 - A3) ;
y3 = A3 * x3 + A4 ;

%Calcul des coordonnées du milieu [2 3]
z5 = (pts(2) + pts(3)) / 2 ;
z6 = (pts(5) + pts(6)) / 2 ;

%Calcul droite 3
A11 = (y3 - z6) / (x3 - z5) ;
A12 = z6 - A11 * z5 ;

% Intersection des droites calculées précédemment
%Abscisses
x4 = -(A10 - A8) / (A9 - A7) ;
x5 = -(A12 - A10) / (A11 - A9) ;
x6 = -(A12 - A8) / (A11 - A7) ;

%Ordonnées
y4 = A7 * x4 + A8 ;
y5 = A9 * x5 + A10 ;
y6 = A7 * x6 + A8 ;

% Intervalle d'acceptation des intersections: moyenne plus ou moins 1 pixel
moyenne_intersection_plus_1 = (x4 + x5 + x6) / 3 + 1 ;
moyenne_intersection_moins_1 = (x4 + x5 + x6) / 3 - 1 ;
moyenne_intersection_plus_2 = (y4 + y5 + y6) / 3 + 1 ;
moyenne_intersection_moins_2 = (y4 + y5 + y6) / 3 - 1 ;

%Si une intersection n'est pas trouvée le triplet est rejeté
if x4==NaN || x5==NaN || x6==NaN || y4==NaN || y5==NaN || y6==NaN
% Vérification que les points obtenus sont dans l'intervalle de confiance et
qu'ils appartiennent à l'objet
elseif x4<=moyenne_intersection_plus_1 && x4>=moyenne_intersection_moins_1 &&
x5<=moyenne_intersection_plus_1 && x5>=moyenne_intersection_moins_1 &&
```

```

x6<=moyenne_intersection_plus_1 && x6>=moyenne_intersection_moins_1 &&
y4<=moyenne_intersection_plus_2 && y4>=moyenne_intersection_moins_2 &&
y5<=moyenne_intersection_plus_2 && y5>=moyenne_intersection_moins_2 &&
y6<=moyenne_intersection_plus_2 && y6>=moyenne_intersection_moins_2 &&
x4<=(max(pts(:,1))-5) && x4>=(min(pts(:,1))+5) && x5<=(max(pts(:,1))-5) &&
x5>=(min(pts(:,1))+5) && x6<=(max(pts(:,1))-5) && x6>=(min(pts(:,1))+5) &&
y4<=(max(pts(:,2))-5) && y4>=(min(pts(:,2))+5) && y5<=(max(pts(:,2))-5) &&
y5>=(min(pts(:,2))+5) && y6<=(max(pts(:,2))-5) && y6>=(min(pts(:,2))+5)

% Calcul du centre
centre(1,1) = (x4 + x5 + x6) / 3 ;
centre(1,2) = (y4 + y5 + y6) / 3 ;
centre = ones(3,1) * centre ;
%On se place dans le repère de l'objet
pts = pts - centre ;
% Matrice de l'ellipse à partir de 3 points
A = [pts(1)^2 2*pts(1)*pts(4) pts(4)^2 ;
      pts(2)^2 2*pts(2)*pts(5) pts(5)^2 ;
      pts(3)^2 2*pts(3)*pts(6) pts(6)^2 ];

%Calcul des paramètres [ a b c] rappel équation d'une ellipse: ax^2+2bxy+cy^2=1
C = A^-1 * ones(3,1);
a = C(1);
b = C(2);
c = C(3);
condition_ellipse = a * c - b^2;

% Vérification que a b c existent et que les paramètres trouvés correspondent
% à ceux d'une ellipse
if a~=Inf && b~=Inf && c~=Inf && condition_ellipse>0
Q = [a b; b c];
% Calcul des valeurs propres
[vecteurs_propres,valeurs_propres] = eig(Q);
% Calcul du grand axe
demi_grand_axe = sqrt(1/valeurs_propres(1));
% Calcul du petit axe
demi_petit_axe = sqrt(1/valeurs_propres(4));
% Vérification des dimensions du petit axe
if demi_petit_axe >= 7 && demi_petit_axe <= 13
% Stockage de la 1ère ellipse trouvée
if (size(stockage,1) == 0)
    stockage = [centre(1,:), demi_grand_axe,
demi_petit_axe, vecteurs_propres(1,:), vecteurs_propres(2,:), 1];
% Vérification si l'ellipse est déjà dans la base de donnée
else
% Distance entre le centre de la nouvelle ellipse et ceux déjà stockés
variation_centre = sqrt((stockage(:,1) -
centre(1)).^2 + (stockage(:,2) - centre(4)).^2);
% Variation avec les demi-grands axes déjà stockés
variation_demi_grand_axe = abs(stockage(:,3) -
demi_grand_axe);
% Variation avec les demi-petits axes déjà stockés
variation_demi_petit_axe = abs(stockage(:,4) -
demi_petit_axe);
% Variation vecteurs propres
variation1 = abs(stockage(:,5) -
vecteurs_propres(1,1));

```

```

variation2 = abs(stockage(:,6) -
vecteurs_propres(1,2));
variation3 = abs(stockage(:,8) -
vecteurs_propres(2,2));
% Recherche l'ellipse ayant des caractéristiques similaires dans l'arbre de
stockage
ligne_correspondante_dans_la_base_de donnee = find
(variation_centre < 1 & variation_demi_grand_axe < 1 &
variation_demi_petit_axe < 1 & variation1 < 1 & variation2 < 1 & variation3 <
1 );
% Si aucune correspondance est trouvée dans la base de donnée on rajoute
l'ellipse dans l'arbre de stockage
if (isempty(ligne_correspondante_dans_la_base_de donnee))
    stockage = [stockage; centre(1,:),
demi_grand_axe, demi_petit_axe, vecteurs_propres(1,:), vecteurs_propres(2,:),
1 ];
else
for i=1:(size(ligne_correspondante_dans_la_base_de donnee,1))
% Pondération entre la nouvelle valeur trouvée et la valeur déjà stockée dans
la base de donnée
nouvelle_valeur_dans_la_base_de donnee =
(stockage(ligne_correspondante_dans_la_base_de donnee(i), 1:8).*%
stockage(ligne_correspondante_dans_la_base_de donnee(i), 9)+[ centre(1,:),
demi_grand_axe, demi_petit_axe, vecteurs_propres(1,:), vecteurs_propres(2,:)])
/ (stockage(ligne_correspondante_dans_la_base_de donnee(i), 9)+1);

% Remplacement la ligne dans l'arbre de stockage par la valeur correspondante
stockage(ligne_correspondante_dans_la_base_de donnee(i),:) =
[nouvelle_valeur_dans_la_base_de donnee
stockage(ligne_correspondante_dans_la_base_de donnee(i), 9)+1];
end
clear i
end
end
end
clear centre
end
clear centre
end
clear centre
end

```

===== Choix de l'ellipse =====

```

%Récupération des données de l'ellipse qui regroupe le plus d'occurrence:
if size(stockage,1) > 0
    compteur_ellipse = compteur_ellipse + 1;
    nombre_d_occurrence_maximum = max(stockage(:,9)) ;
    ligne_correspondante_au_nombre_d_occurrence_maximum =
find(stockage(:,9) == nombre_d_occurrence_maximum) ;

```

```
% Si plusieurs ellipses ont le même score alors le périmètre est évalué
if size(ligne_correspondante_au_nombre_d_occurrence_maximum,1) > 1
%Préallocation du périmètre
    perimetre =
ones(size(ligne_correspondante_au_nombre_d_occurrence_maximum,1),1);
% Évaluation du périmètre
for i=1: size(ligne_correspondante_au_nombre_d_occurrence_maximum,1)
    perimetre(i,1) = pi*(3*(
stockage(ligne_correspondante_au_nombre_d_occurrence_maximum(i),3) +
stockage(ligne_correspondante_au_nombre_d_occurrence_maximum(i),4)) - sqrt((3*
stockage(ligne_correspondante_au_nombre_d_occurrence_maximum(i),3)+stockage(ligne_correspondante_au_nombre_d_occurrence_maximum(i),4))*( stockage(ligne_correspondante_au_nombre_d_occurrence_maximum(i),3)+3*stockage(ligne_correspondante_au_nombre_d_occurrence_maximum(i),4))));
end
% L'ellipse retenue possède le périmètre le plus proche de l'objet mesuré
variation_du_perimetre = perimetre(:,1) - perimetre_mesure;
valeur_minimale = min(variation_du_perimetre);
ligne = find(variation_du_perimetre == valeur_minimale);
ligne_correspondante_au_nombre_d_occurrence_maximum =
ligne_correspondante_au_nombre_d_occurrence_maximum (ligne);
ellipse_final (compteur_ellipse,:) =
stockage(ligne_correspondante_au_nombre_d_occurrence_maximum,:);
else
    ellipse_final (compteur_ellipse,:) =
stockage(ligne_correspondante_au_nombre_d_occurrence_maximum,:);
end
end
clear
nombre_d_occurrence_maximumligne_correspondante_au_nombre_d_occurrence_maximum
end
```

===== Tracé des ellipses =====

```
I = imread(['C:\Projet Maitrise\programmation\Images Scannées\' nom '.BMP']);
imshow(I);
theta = 0:2*pi/100:2*pi;
prop = whos('I');
for i=1:size(ellipse_final,1)
x = ellipse_final(i,3) * cos(theta);
y = ellipse_final(i,4) * sin(theta);
pts_repere_global = [ ellipse_final(i,5) ellipse_final(i,6);
ellipse_final(i,7) ellipse_final(i,8)] * [x;y];
x = pts_repere_global(1,:) + ellipse_final(i,1);
y = pts_repere_global(2,:) + ellipse_final(i,2);
hold on
```

```

plot(x,y,'LineWidth',2)
plot(ellipse_final(i,1),ellipse_final(i,2),'r+')
text('Position',[ellipse_final(i,1)+0.1
ellipse_final(i,2)+0.1],'String',i,'Color','green')

end
hold off

===== Création du tableau de sortie=====

ellipse_final(:,10) = ellipse_final(:,4)./ellipse_final(:,3);
ellipse_final(:,11) = ellipse_final(:,10).*180/pi;
moyenne = mean(ellipse_final(:,10));
moyenne_degre = moyenne*180/pi;

% Nom du tableau de sortie
filename=[nom '.xls'];
% Nom de l'image de sortie
imfinal=[nom '_finale.fig'];

%sauvegarde de l'image finale
saveas(gcf,imfinal)

tempo_calcul = toc;

fid=fopen(filename,'wt');
fprintf(fid,filename);
fprintf(fid,'\n\nDimensions de
l\'image\n%6.0f\tx\t%6.0f',prop.size(1),prop.size(2));
fprintf(fid,'\n\ntemps de calcul = \t %6.4f\n',tempo_calcul);
fprintf(fid,'\n\nnombre de fibres = \t %6.0f\n',length(ellipse_final));
fprintf(fid,'moyenne = \t %6.4f\n',moyenne);
fprintf(fid,'moyenne degré = \t %6.4f\n',moyenne_degre);
fprintf(fid,'\n\ncentre x \t centre y \t grand axe\t petit axe\t score\t coef
orientation\t angle degr \n');

for i=1:compteur_ellipse
    fprintf(fid,'%6.4f \t %6.4f \t %6.4f \t %6.4f \t %6.4f \t %6.4f \t
%6.4f\n',ellipse_final(i,1),ellipse_final(i,2),ellipse_final(i,3),ellipse_final(i,4),ellipse_final(i,9),ellipse_final(i,10),ellipse_final(i,11));
end

fclose(fid);
cd ..
end

```

A2.2 Programmes annexes:

A2.2.1 triples.m

```

function triple = triples(N)
% d'après un programme de Matt Fig

```

```
%nombre maximun de points pouvant être considérer: environ 1250 soit 324,74
millions de triplés en 21 minutes (nécessite 5Go pour stockage)
Vecteurdebase = 1:3;
lim=3;
numerocolonne = 1; %les numéros de colonne sont inversés ie pour un vecteur de
N colonne: la colonne N correspond à numerocolonne=1; N-1=>2; N-3=>3 .... 1=>N
nombredecombinaisons = N*(N-1)*(N-2)/6; % utilisation de la forme simplifier
sinon problème de mémoire single(prod(1:N)/(prod(1:3)*prod(1:(N-3))));
triple = zeros(nombredecombinaisons,3);
triple(1,:) = Vecteurdebase;

for ligne = 2:(nombredecombinaisons - 1);
if (numerocolonne+lim)<N
    nombrecolonnamodifier = numerocolonne;
    idicateurdechangementdecolonne = 0;
else
    nombrecolonnamodifier = 1;
    idicateurdechangementdecolonne = 1;
end

for colonne = 1:nombrecolonnamodifier
    Vecteurdebase(3 + colonne -numerocolonne) = lim + colonne ;
end

triple(ligne,:)= Vecteurdebase;
numerocolonne = numerocolonne*idicateurdechangementdecolonne + 1;
lim = Vecteurdebase(3 - numerocolonne + 1 );
end

triple(nombredecombinaisons,:)=(N-2):N;
clear
limVecteurdebasenombredecombinaisonslignenumerocolonneidicateurdechangementdec
olonnecolonne
```

A2.2.2 ConvexHull2D.mdéveloppé par Luigi Giaccari

```

function chull=ConvHull2D(x,y)
%Errors check:
if nargin ~= 2
    error('MATLAB:ConvHull2D:NotEnoughInputs', 'Needs 2 inputs.');
end

if ~isequal(size(x),size(y))
    error('MATLAB:ConvHull2D:InputSizeMismatch',...
'x,y have to be the same size.');
end
if ndims(x) > 2 || ndims(y) > 2
    error('MATLAB:ConvHull2D:HigherDimArray',...
'x,y cannot be arrays of dimension greater than two.');
end

N=length(x);
%quadrilater for point exclusion
pb=zeros(4,1);
%tolerances for point exclusion
toll=[inf;-inf;-inf;-inf];

for i=1:N
if x(i)+y(i)<toll(1)%maximum of differentia
    pb(1,1)=x(i);pb(1,2)=y(i);
    toll(1)=x(i)+y(i);
end
if x(i)-y(i)>toll(2)%down left
    pb(2,1)=x(i);pb(2,2)=y(i);
    toll(2)=x(i)-y(i);
end
if x(i)+y(i)>toll(3)%maximum of sum
    pb(3,1)=x(i);pb(3,2)=y(i);
    toll(3)=x(i)+y(i);
end
if -x(i)+y(i)>toll(4)%top right
    pb(4,1)=x(i);pb(4,2)=y(i);
    toll(4)=-x(i)+y(i);
end
end

% simplified quadrilater boundaries
Mx=min(pb([2,3],1));%max x coordinate
My=min(pb([3,4],2));%max y coordinate
mx=max(pb([1,4],1));%max x coordinate
my=max(pb([1,2],2));%max y coordinate

%deleting internal points
test=(x>=Mx | x<=mx | y>=My | y<=my);
index=1:N;
index=(index(test));%these ones are survivors
x=x(test);%coordinates of survivors
y=y(test);
N=length(x);

```

```

%sorting the survivors
[y,sindex] = sort(y);
x = x(sindex);
tch=zeros(N,1);%temporay convex hull store
%this is a waste of memory points of the convex hull should
%be less than N but preallocation gives more speed

%This if statement tries to deal with colinear points
colinear=false;
if y(1)==y(2) || y(end)==y(end-1)

%count the number of ymin colinear points
i=1;
while y(i)==y(i+1)
    i=i+1;
end
if i>1
%sort colinear points
[x(1:i),xid]=sort(x(1:i), 'descend');
tempindex=sindex(xid);
sindex(1:i)=tempindex;
%this points are colinear wont be part of convex hull
sindex(2:i-1)=[];
y(2:i-1)=[];
x(2:i-1)=[];

end
i=1;
if x(1)>x(2)%check if x have been sorted
%count the number of ymax colinear points
while y(end-i+1)==y(end-i)
    i=i+1;
end
if i>1
%sort colinear points
    colinear=true;
    [x(end-i+1:end),xid]=sort(x(end-i+1:end), 'ascend');
    tempindex=sindex(end-i+1:end);
    sindex(end-i+1:end)=tempindex(xid);
%this points are colinear wont be part of convex hull
    sindex(end-i+2:end-1)=[];
    x(end-i+2:end-1)=[];
    y(end-i+2:end-1)=[];

end
else%there are only ymax colinear points
%count the number of ymax colinear points
while y(end-i+1)==y(end-i)
    i=i+1;
end
if i>1
%sort colinear points

```

```

        colinear=true;
[x(end-i+1:end),xid]=sort(x(end-i+1:end), 'descend');
tempindex=sindex(end-i+1:end);
sindex(end-i+1:end)=tempindex(xid);
%this points are colinear wont be part of convex hull
sindex(end-i+2:end-1)=[];
x(end-i+2:end-1)=[];
y(end-i+2:end-1)=[];
end
end
N=length(x);
end

%checking orientation for cross product
if x(1)>x(2) %clockwise

    orientation=1;
else
    orientation=-1;%counterclockwise
end

c=2;%convex hull vector iterator
i=2;%points vector iterator

%the first edge to start the convex hull
tch(1)=1;
tch(2)=2;
p1=tch(1);
p2=tch(2);

while i<=N-1

    p3=i+1;

    %cross product
    cp=orientation*((x(p1)-x(p2))*(y(p3)-y(p2))-(x(p3)-x(p2))*(y(p1)-y(p2)));

    if cp>0 %add point to chull
    %go forward
        tch(c+1)=i+1; %add point to temporary chull
        p1=p2;
        p2=p3;
        c=c+1;
        i=i+1;%try next point
    else%remove point from temporary chull
    %go back
        if c>2%an exclusion at first iteration may create problems
            c=c-1;
            p2=p1;
            p1=tch(c-1);
        else
            tch(2)=i+1;
            p2=i+1;
            i=i+1;%try next point
        end
    end
end

```

```

end
end

%first half done let's make the second going down
p1=c-1;
p1=tch(p1);
p2=tch(c);

%checking y colinearity
if colinear || p1==i-1;%avoid null cross product at first loop
    i=i-1;
end
while i>1
p3=i-1;
%cross product
    cp=orientation*((x(p1)-x(p2))*(y(p3)-y(p2))-(x(p3)-x(p2))*(y(p1)-y(p2)));
if cp>0
%go forward

    tch(c+1)=i-1; %add point to temporary chull
    p1=p2;
    p2=p3;
    c=c+1;
    i=i-1;%try next point
else%remove point from temporary chull

    if c>2%an exclusion at first iteration may create problems go back
        c=c-1;
        p2=p1;
        p1=tch(c-1);
    else
        %can not go back use brute force
        tch(2)=i-1;
        p2=i-1;
        i=i-1;%try next point
    end
end
end

% Re-index to undo the sorting and deleting
chull=index(sindex(tch((1:c))))';%convexhull

end

```

ANNEXE 3 – Préparation des échantillons en vue de l’analyse par traitement d’images**A3.1 Polissage de la surface d’étude**

- 1- Humidifier le plateau de la polisseuse et le plan de coupe;
- 2- Régler la vitesse du plateau sur la position 4;
- 3- Répartir également la poutre abrasive sur le plateau;
- 4- Mettre en contact la surface d’étude avec le plateau jusqu’à sentir une opposition;
- 5- Rincer le plateau lorsque qu’il est saturé de particules de béton;
- 6- Répéter les étapes 3 à 5 jusqu’à l’obtention d’une surface parfaitement lisse au touché.
Si possible vérifier à la loupe binoculaire que les contours des fibres soient lisses et bien délimités.

A3.2 Amélioration du contraste

- 1- S’assurer que le spécimen soit sec afin que la gouache puisse adhérer de manière optimale à la surface d’étude;
- 2- Passer un papier de verre de 200 microns afin de faire ressortir les fibres;
- 3- Repérer visuellement la position des fibres;
- 4- Appliquer de préférence au rouleau une couche de gouache noir mat;
- 5- Laisser sécher 5 min environ l’échantillon
- 6- Passer délicatement un chiffon sur la surface pour retirer une partie de l’excédent
- 7- Sablé délicatement la surface pour retirer la peinture encore présente sur les fibres
- 8- Appliquer un spray pour le polissage de l’acier avant la numérisation

ANNEXE 4 – Procédure expérimentale pour les essais de traction directe¹

A4.1 Instrumentation et préparation des spécimens

- 1- Localiser le centre du spécimen sur le sens de la longueur et le marquer d'un trait au crayon de mine ;
- 2- À partir de cette marque, mesurer et marquer au crayon de mine les points présentés à la Figure A4-1 et ce, sur chacune des quatre faces du spécimen ;

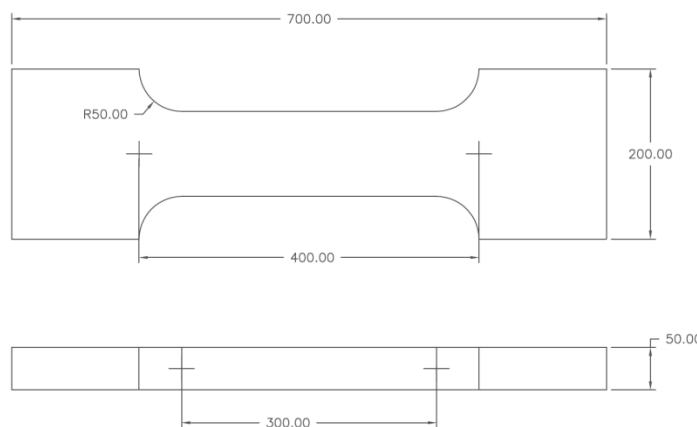


Figure A4-1 : Localisation des marques à effectuer

- 3- À l'aide d'une meuleuse d'angle, meuler légèrement les huit endroits marqués au crayon afin d'enlever la couche de laitance du béton ;
- 4- Coller, à l'aide de la colle X60 ou de la colle Loctite 365, une vis $\frac{1}{4}$ de pouce de diamètre à tête plate à chaque endroit meulé ;
- 5- Mesurer, à l'aide d'un pied à coulisse, la largeur et l'épaisseur de la section étroite du spécimen, et ce, en trois endroits différents;
- 6- Coller sur la face large du spécimen, à l'aide de ruban à masquer, deux morceaux de contreplaqué 6,4 mm (1/4") (face arasée) et deux morceaux de masonite 3,2 mm (1/8")

¹Procédure de Beaurivage (2009) mise à jour le 28 novembre 2011

(face coffrée). Les morceaux utilisés ont des dimensions de 160 mm x 160 mm. La Figure A4-2 illustre l'installation des interfaces ;

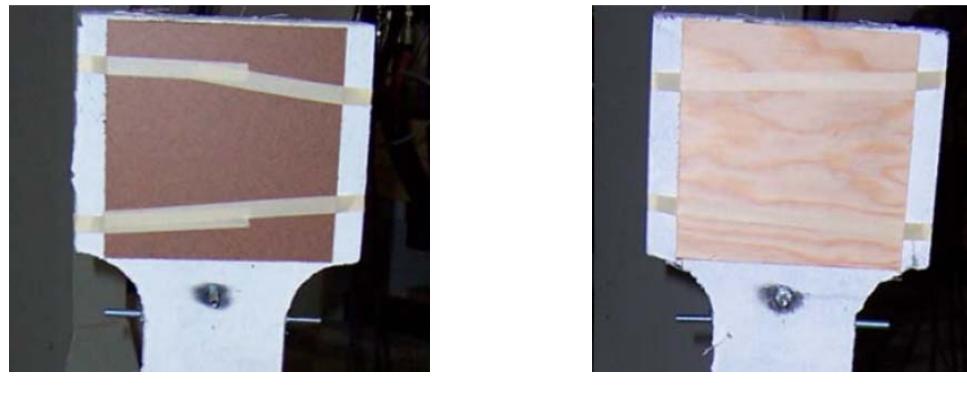


Figure A4-2 : Matériaux d'interface a) Masonite sur surface coffrée; b) contreplaqué

A4.2 Installation des spécimens

- 1- Installer les mâchoires à surfaces plates dans la presse Inströn ;
- 2- Vérifier l'alignement du haut de la presse Inströn avec sa base ;
- 3- Mettre les mâchoires hydrauliques en position « ouverte » si celles-ci ne le sont pas déjà ;
- 4- Vérifier que les extensions devant relier les LVDT's au système de contrôle sont bien branchés à ce dernier ;
- 5- Installer les LVDT's. Les vis espacées de 400 mm accueillent les LVDT's LAr15/1 et LAr15/2, qui contrôlent l'essai en déplacement (par calcul de la moyenne des 2 LVDT's). Les vis espacées de 300 mm accueillent quant à elles les LVDT's LAr15/3 et LAr15/4 servant à l'acquisition du déplacement ;
- 6- Placer, entre les mâchoires à la base de la presse, une petite tige sur le bloc de contreplaqué prévu à cet effet. La tige devra être parallèle aux mâchoires et servira de rotule unidirectionnelle. La Figure A4-3 montre le positionnement de la rotule;



Figure A4-3 : Positionnement de la rotule une fois le spécimen mis en place

- 7- Monter la traverse mobile de la presse afin d'avoir un dégagement d'environ 780 mm entre la partie supérieure et inférieure permettant ainsi d'insérer aisément le spécimen à tester. ;
- 8- Ouvrir la pression hydraulique des mâchoires, et s'assurer que les mâchoires inférieures et supérieures sont en position « ouverte » ;
- 9- Vérifier, et le cas échéant effectuer, le zéro de la force de la cellule de charge de la presse ;
- 10- Insérer le spécimen (côté coffrage vers la mâchoire manuelle) entre les mâchoires ;
- 11- Brancher les LVDT's aux extensions correspondantes ;
- 12- Avancer la mâchoire manuelle du bas à l'aide d'une cale équivalente à l'épaisseur d'un écrou de type 7/16" ;
- 13- S'assurer que la mâchoire manuelle supérieure est complètement ouverte ;
- 14- Mettre la mâchoire hydraulique du bas en position « neutre ». Celle-ci devrait alors s'avancer vers le spécimen. Pendant que la mâchoire s'avance, l'utilisateur doit s'assurer que le spécimen demeure parfaitement vertical ;
- 15- Une fois le spécimen coincé entre les mâchoires du bas, fermer la pression hydraulique et mettre la mâchoire du bas en position « fermée ». Ouvrir tranquillement la pression hydraulique jusqu'à ce que celle-ci atteigne 6,89 MPa (1000 psi) sur le cadran des mâchoires inférieures ;

- 16- Mettre la mâchoire du bas en position « ouverte ». Ouvrir complètement la pression hydraulique après s'être assuré que les mâchoires (inférieures et supérieures) sont bien en position « ouverte » ;
- 17- Ouvrir complètement la mâchoire manuelle du bas ;
- 18- Avancer la mâchoire manuelle du haut à l'aide d'une cale équivalente à l'épaisseur d'un écrou de type 7/16" ;
- 19- Mettre la mâchoire hydraulique du haut en position « neutre ». Celle-ci devrait alors s'avancer vers le spécimen. Pendant que la mâchoire s'avance, l'utilisateur doit s'assurer que le spécimen demeure parfaitement vertical ;
- 20- Une fois le spécimen coincé entre les mâchoires du haut, fermer la pression hydraulique et mettre la mâchoire du haut en position « fermée ». Ouvrir tranquillement la pression hydraulique jusqu'à ce que celle-ci atteigne 6,89 MPa (1000 psi) sur le cadran des mâchoires supérieures ;
- 21- Mettre la mâchoire du haut en position « ouverte ». Ouvrir complètement la pression hydraulique après s'être assuré que les mâchoires (inférieures et supérieures) sont bien en position « ouverte » ;
- 22- Ouvrir complètement la mâchoire manuelle du haut ;
- 23- Avancer la mâchoire manuelle du bas à l'aide d'une cale équivalente à l'épaisseur d'un écrou de type 7/16" ;
- 24- Mettre la mâchoire hydraulique du bas en position « neutre ». Celle-ci devrait alors s'avancer vers le spécimen. Pendant que la mâchoire s'avance, l'utilisateur doit s'assurer que le spécimen demeure parfaitement vertical ;
- 25- Une fois le spécimen coincé entre les mâchoires du bas, fermer la pression hydraulique et mettre la mâchoire du bas en position « fermée ». Ouvrir tranquillement la pression hydraulique jusqu'à ce que celle-ci atteigne 6,89 MPa (1000 psi) sur le cadran des mâchoires inférieures ;
- 26- Vérifier le positionnement initial des LVDT's, de façon à avoir le maximum de course disponible pour l'essai ;

27-Faire le "0" du déplacement de la presse et des LVDT's, et faire le zéro des «Meters 1», tel que présenté aux figures A4-4 et A4-5, de façon à pouvoir contrôler les efforts parasites éventuels ;

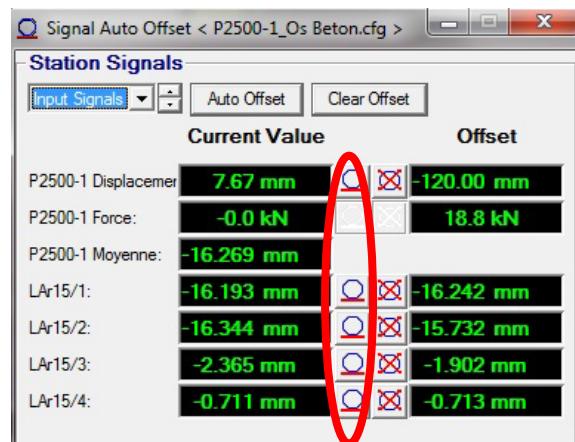


Figure A4-4 : Mise à zéro des valeurs de déplacement

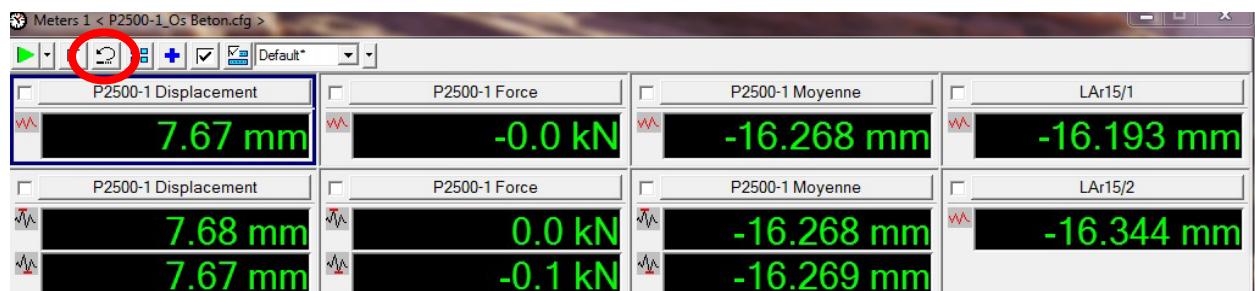


Figure A4-5 : Mise à zéro des valeurs min-max des « Meters1 »

28-Passer en mode de contrôle CLC. Ce mode ajuste automatiquement la presse de manière à ce que la force appliquée ne dépasse jamais, en valeur absolue, 0,5 kN. On évite ainsi d'imposer des efforts qui mèneraient à la fissuration prématuée du spécimen ;

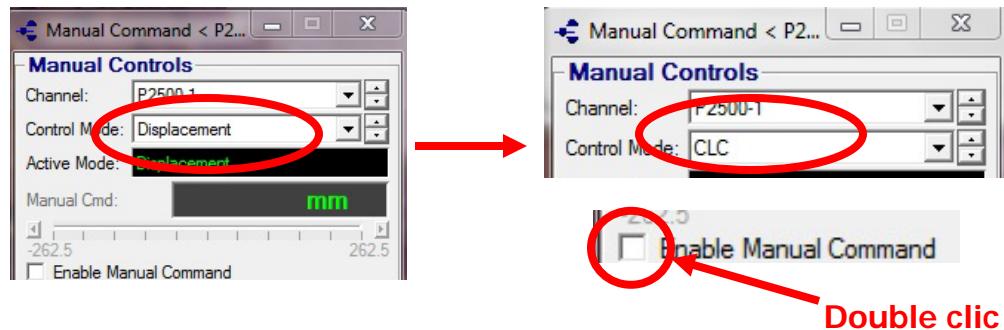


Figure A4-6 : Passage en mode de contrôle CLC

- 29- À l'aide d'une feuille de papier placée entre la mâchoire supérieure manuelle et le spécimen, avancer la mâchoire jusqu'à ce que la feuille soit complètement coincée ;
- 30- Mettre la mâchoire supérieure hydraulique en position « neutre » jusqu'à ce qu'il y ait contact avec le spécimen.
- 31- Mettre la mâchoire supérieure hydraulique en position « fermée ». La pression de cette mâchoire devrait alors monter à environ 900 psi, soit quasiment la même pression que celle appliquée par la mâchoire inférieure ;

La Figure A4-7 présente le spécimen une fois l'installation terminée.

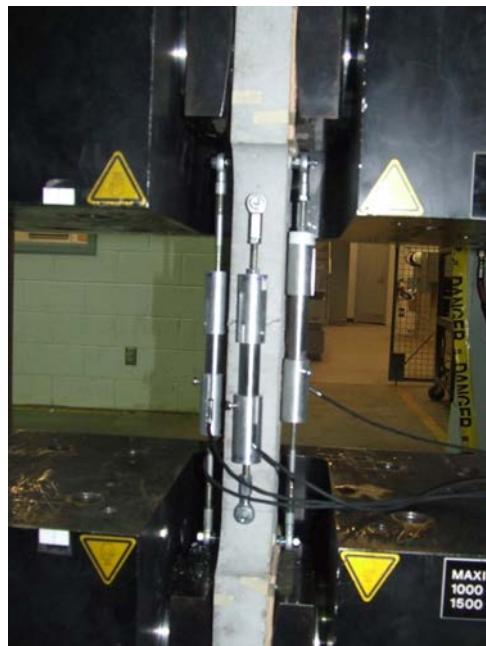


Figure A4-7 : Spécimen prêt à être testé

A4.3 Réalisation de l'essai

- 1- Vérifier le positionnement initial des LVDT's, de façon à avoir le maximum de course disponible pour l'essai ;
- 2- Vérifier le taux de chargement prévu dans la procédure d'essai (on débute par un contrôle en moyenne des LVDT's LAr15/1 et LAr15/2 à une vitesse de 0,1mm/min, et on se donne la possibilité d'augmenter la vitesse jusqu'à 1mm/min) ;
- 3- Faire le "0" du déplacement de la presse et des LVDT's, et faire le zéro des «Meters 1»

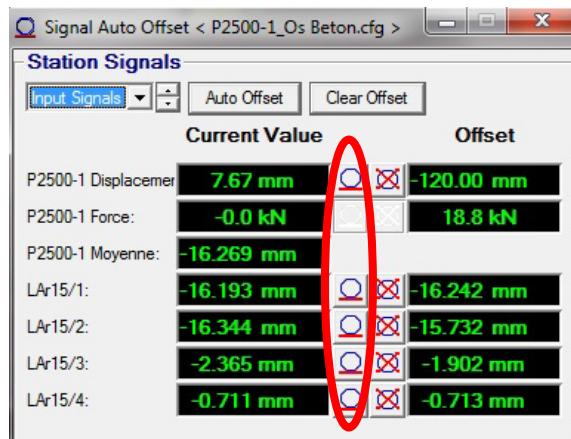


Figure A4-8 : Mise à zéro des valeurs de déplacement

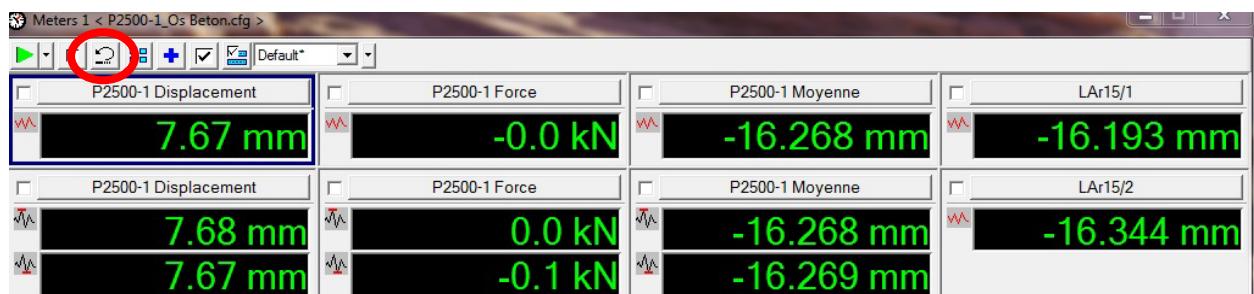


Figure A4-9 : Mise à zéro des valeurs min-max des «Meters 1»

- 4- Créer un nouveau dossier pour l'essai à réaliser, en cliquant sur "new specimen", et donner le nom approprié à l'essai à réaliser ;

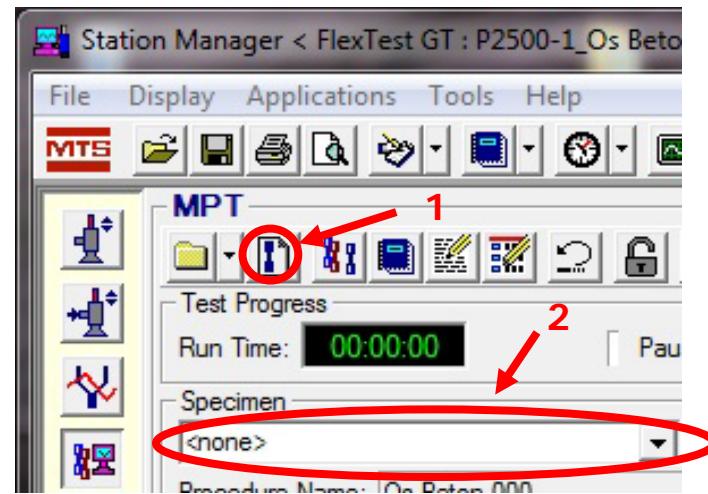


Figure A4-10 : Identification de l'essai à réaliser

- 5- Faire un reset de la procédure d'essai ;

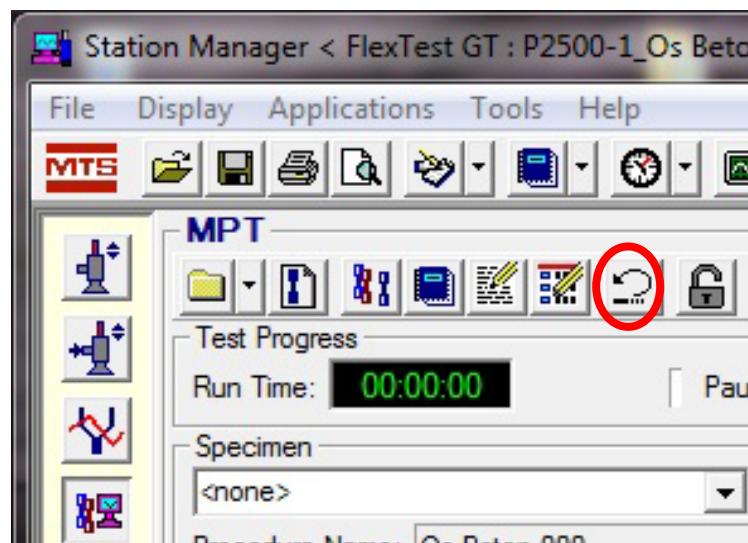


Figure A4-11 : Réinitialisation de la procédure d'essai

- 6- Cliquer sur le bouton « Lecture », puis sur le bouton « go » ;

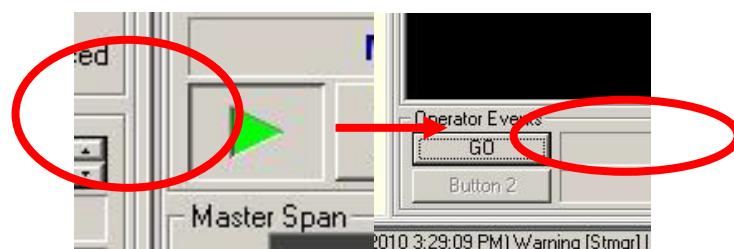


Figure A4-12 : Démarrage de l'essai

- 7- Lorsque $F=70\%$ F_{max} en post-pic, augmenter la vitesse de chargement à 0.2mm/min (en contrôle de la moyenne des LVDT's LAr15/1 et LAr15/2) ;
- 8- Lorsque $F=50\%$ F_{max} en post-pic, augmenter la vitesse de chargement à 0.5mm/min (en contrôle de la moyenne des LVDT's LAr15/1 et LAr15/2) ;
- 9- Lorsque $F=30\%$ F_{max} en post-pic, augmenter la vitesse de chargement à 1mm/min (en contrôle de la moyenne des LVDT's LAr15/1 et LAr15/2) ;
- 10- Arrêter l'essai en cliquant sur « stop » lorsque la force en phase post-pic est inférieure à 3kN, ou lorsque le déplacement obtenu arrive à la limite de la course des LVDT's ;

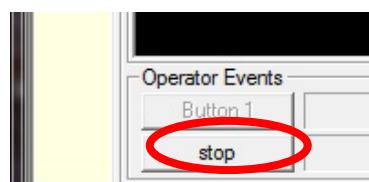


Figure A4-13 : Arrêt de l'essai

- 11- Désactiver le cadenas en cliquant dessus, de manière à désactiver la procédure d'essai et ainsi pouvoir utiliser le contrôleur manuel (commande à distance du vérin).

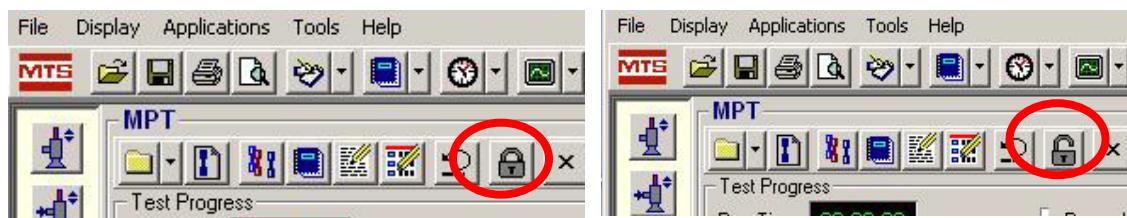


Figure A4-14 : Désactivation de la procédure

- 12- Vérifier que le mode de contrôle du vérin est en « déplacement » ; le définir dans ce mode le cas échéant ;

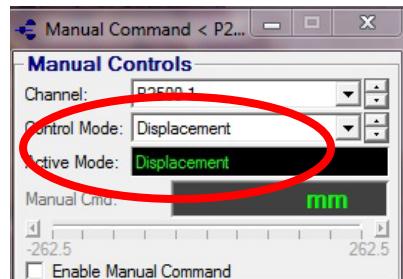


Figure A4-15 : Vérin en mode de contrôle Déplacement

A4.4 Démontage du spécimen

- 1- Mettre les mâchoires inférieure et supérieure en position « ouverte ». Ouvrir complètement la pression hydraulique ;
- 2- Ouvrir complètement les mâchoires manuelles inférieure et supérieure ;
- 3- Débrancher les LVDT's des extensions correspondantes ;
- 4- Enlever le spécimen de la presse, démonter et ranger les LVDT's ;
- 5- Récupérer les boulons du spécimen testé, les nettoyer et les ranger ainsi que le bloc de contreplaqué et la tige utilisée pour la rotule à la base du spécimen.

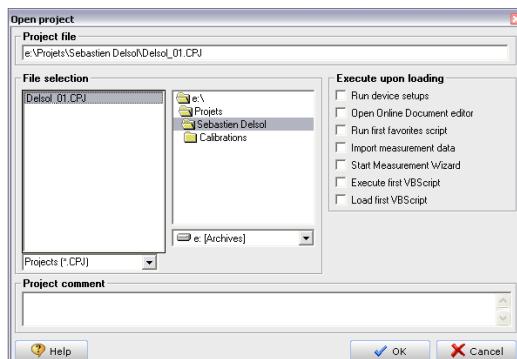
ANNEXE5 – Procédure des essais de flexion

A5.1 Procédure d'utilisation du système d'acquisition :

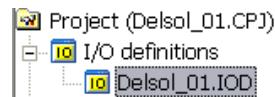
1. Démarrer l'ordinateur du système d'acquisition.
2. Ouvrir le système d'acquisition « HBM » (boîte blanche à droite de l'ordinateur).
3. Ouvrir le programme « Catman »



4. Cliquer sur « File » et sélectionner « Open project... ».
5. La fenêtre de fichier des projets suivante s'ouvre :



6. Sélectionner le bon fichier selon la figure ci-dessus et faire « OK ».
7. Double-cliquer sur l'icône « Delsol_01.IOD » (pour voir capteurs).



8. Double-cliquer sur l'icône « Delsol_01.OPG » (pour ouvrir graphs)



9. Fermer la fenêtre qui vient d'être ouverte.
10. Retourner à la fenêtre avec les capteurs (IOD) et cliquer sur l'icône suivant : 
11. La fenêtre de lecture des capteurs s'ouvre :

Channel	Signal
1 Time MGplus_1 (Sample rate 1)	2.484 s
2 1-1. Charge appliquée, kN	-0.03536 kN
3 1-2. Déplacement vérin, mm	-0.01120 mm
4 1-3. Flèche sud, mm	20.29 mm
5 1-4. Flèche nord, mm	16.17 mm
6 1-5. Écrasement appui est, mm	-2.978 mm
7 1-6. Écrasement appui ouest, mm	-3.323 mm
8 1-7. Courbure sud-est, mm	21.23 mm
9 1-8. Courbure sud-ouest, mm	16.71 mm
10 2-1. Courbure nord-est, mm	20.69 mm
11 2-2. Courbure nord-ouest, mm	22.80 mm
12 MGplus_1 CH 2-3	mm
13 MGplus_1 CH 2-4	mm
14 MGplus_1 CH 2-5	mm
15 MGplus_1 CH 2-6	mm

12. Ajuster les LVDTs à la position voulue (*attention à ne pas sortir de la plage de calibration*).

13. Quand le positionnement des capteurs est fait, fermer la fenêtre de lecture.

14. Ouvrir l'acquisition, icône « Delsol_01.WIZ ».

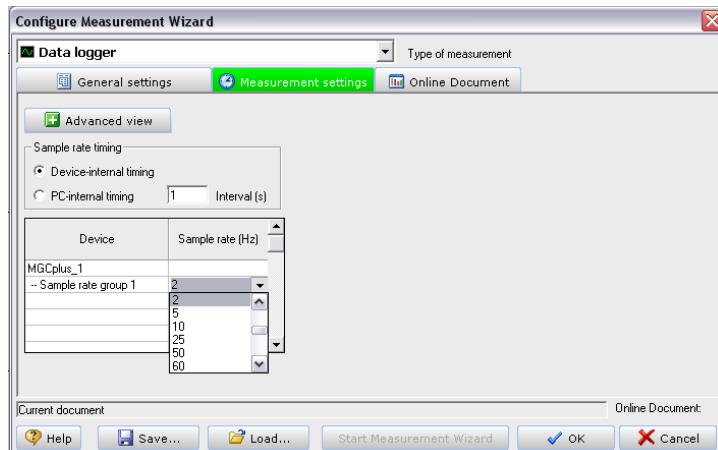


15.

16. Réinitialiser la mémoire en cliquant sur l'icône .

17. Faire un zéro des capteurs en cliquant sur l'icône .

18. La fenêtre suivante s'ouvre :



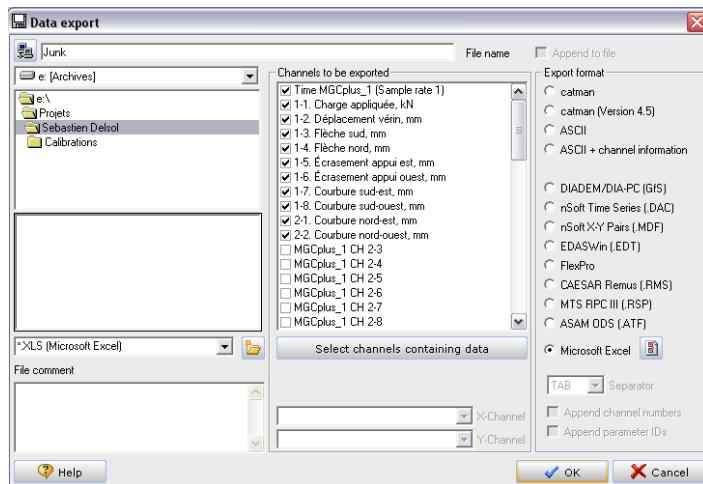
19. Choisir la fréquence d'acquisition.

20. Débuter l'acquisition d'abord en cliquant sur l'icône .

21. À la fin de l'essai, faire un stop en cliquant sur l'icône .

22. Sauvegarder les données, cliquer « YES ».

23. La fenêtre suivante s'ouvre :



24. Vérifier que tous les capteurs sont cochés dans la rubrique « Channels to be exported ».

25. Sélectionner le format « Microsoft Excel » et faire « OK ».

26. Ne pas oublier de fermer le système d'acquisition « HBM ».

A5.2 Procédure d'utilisation du système de contrôle :

1. Ouvrir l'ordinateur du système de contrôle.

2. Ouvrir le système de contrôle « FlexTest GT » (grosse boîte noire sous l'ordinateur).

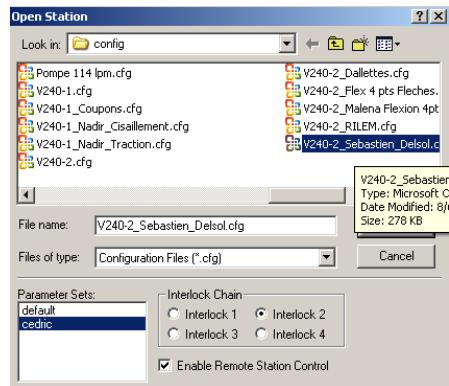
3. Ouvrir le programme « Station Manager ».



4. Possibilité d'attente entre l'ordinateur et « FlexTest GT », attendre



5. La fenêtre de fichier des projets suivante s'ouvre :



6. Toutes les fenêtres de contrôle apparaissent.

7. Faire un reset d'« Interlock 2» en cliquant sur « Reset »



8. Faire partir les pompes en basse pression en cliquant sur



9. Mettre le « HPU » en haute pression



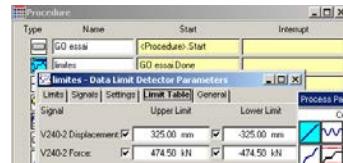
10. Faire partir le « manifold » en basse pression en cliquant sur



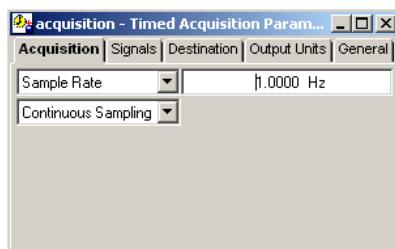
11. Mettre le « HSM » en haute pression



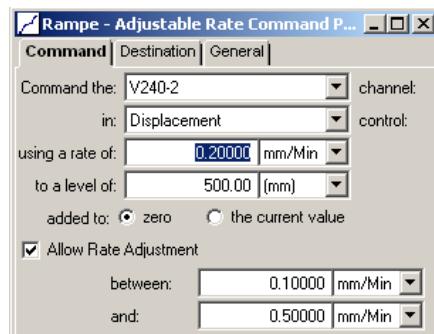
12. Dans la fenêtre « MPT Procedure Editor », régler les limites voulues :



13. Choisir le taux d'acquisition pour le système de contrôle :



14. Déterminer les paramètres de l'essai dans « Rampe » :

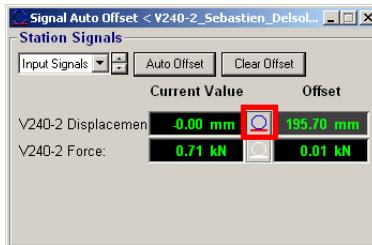


15. Créer un nouveau test en cliquant sur l'icône .

16. Donner un nom à l'essai dans la rubrique suivante :



17. Faire un « offset » au déplacement du vérin.



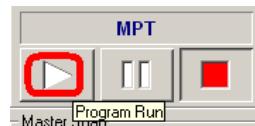
18. Faire un « reset » sur les afficheurs « Meters 1 » et « Meters 2 ».



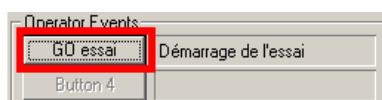
19. Faire un « reset » de la procédure.



20. Commencer la procédure.



21. Débuter l'essai.



22. Tout de suite mettre le curseur sur « pause » ou « stop » pour être prêt à arrêter l'essai s'il y a lieu.

23. Lorsque l'essai est terminé, faire le « stop ».

24. Ne pas oublier de fermer le système de contrôle « FlexTest GT ».