

Titre:	Développement d'une méthode d'analyse inverse pour déterminer le comportement en traction d'un BFUP à l'aide de son comportement en flexion
Auteur:	Antoine Beaudoin
Date:	2021
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence:	Beaudoin, A. (2021). Développement d'une méthode d'analyse inverse pour déterminer le comportement en traction d'un BFUP à l'aide de son comportement en flexion [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/9996/
Citation:	

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/9996/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Jean-Philippe Charron, & Bruno Massicotte
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Développement d'une méthode d'analyse inverse pour déterminer le
comportement en traction d'un BFUP à l'aide de son comportement en flexion**

ANTOINE BEAUDOIN

Département des génies civil, géologique et des mines

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

Génie civil

Décembre 2021

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé:

Développement d'une méthode d'analyse inverse pour déterminer le comportement en traction d'un BFUP à l'aide de son comportement en flexion

Présenté par **Antoine BEAUDOIN**

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

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

Mahdi BEN FTIMA, président

Jean-Philippe CHARRON, membre et directeur de recherche

Bruno MASSICOTTE, membre et codirecteur de recherche

David CONCIATORI, membre externe

REMERCIEMENTS

Mon premier remerciement va naturellement à mon directeur de recherche, Jean-Philippe Charron. Son expertise, ses commentaires constructifs et son soutien sont des éléments clés qui ont permis la réalisation du présent projet de recherche. Merci également à Clélia Desmettre qui a été présente du début à la fin et qui a su enrichir les différentes étapes de ce projet pour le rendre le plus complet possible. Mes réflexions et mes idées sont devenues de plus en plus claires à chaque rencontre que l'on a eue à trois, et c'est ce qui a m'a permis de pourvoir présenter le présent travail.

Je souhaite également remercier toute l'équipe du laboratoire de structures de Polytechnique Montréal pour avoir permis la réalisation de mes essais de façon impeccable. Je remercie entre autres David Ek et Patrice Bélanger de m'avoir permis de bénéficier de votre expérience pour la partie expérimentale de mon projet.

Merci également à Bruno Massicotte pour sa vision globale du projet et son aide pour mieux comprendre le contexte normatif qui encadre l'utilisation des BFUP au Canada et partout dans le monde.

J'aimerais faire un remerciement spécial à tous mes collègues et amis étudiants, particulièrement Danny, Gabriel, Kim, Simon et Martin, qui m'ont aidé de proche ou de loin durant ce projet. Nos discussions, ainsi que votre aide au laboratoire, sont une partie importante de ce projet.

Finalement, j'aimerais remercier toute ma famille et ma conjointe, Sophie, pour votre support durant les hauts et les bas de ce projet qui a été marqué par la pandémie de la COVID-19. Vos encouragements ont été très importants pour me permettre de compléter ce projet.

RÉSUMÉ

Les normes canadiennes CSA A23.01 [1] et CSA S6 [2] proposent depuis 2019 des directives sur l'utilisation des BFUP. Ces deux normes proposent de déterminer le comportement en traction directe des BFUP à partir du comportement en flexion du matériau, c'est-à-dire par analyse inverse. Les méthodes proposées par les normes canadiennes sont la méthode SIA (CSA A23.01) et la méthode Lopez 5 points (CSA S6). Le présent projet de recherche permet de conclure que la méthode d'analyse inverse SIA est plus performante que la méthode Lopez 5 points pour différentes géométries en flexion sur un BFUP avec 3% de fibres. La performance de la méthode SIA n'est malgré tout pas optimale pour les géométries d'essais considérées dans le présent projet de recherche, soit un os de section réduite de 100 mm x 50 mm en traction et une dallette de section 100 mm x 50 mm en flexion. Deux adaptations de cette méthode, nommées Adaptations 1 et 2, ont donc été développées pour améliorer la performance de celle-ci pour ces géométries.

L'Adaptation 1 permet d'augmenter la contrainte ultime f_{Utu} et de diminuer la déformation ε_{Utu} . La hauteur tendue au pic de résistance en flexion est égale à 80% de la hauteur totale ($0.80 h_m$) pour une dallette 100x50 contrairement à la hauteur tendue de 82% de h_m proposée par la SIA. Ce changement de hauteur tendue permet d'augmenter légèrement la contrainte f_{Utu} . La déformation ε_{Utu} est diminuée par l'application d'un facteur réducteur C égal à 0.67. Ces deux modifications permettent d'améliorer la performance de l'analyse inverse. La performance de l'Adaptation 1 n'est cependant pas très bonne pour des spécimens peu flexibles (élançement L/h faible) et des BFUP peu écrouissants.

L'Adaptation 2 permet de supprimer l'utilisation de deux profils de contraintes simplifiés différents pour déterminer le point de traction ultime et permet également de diminuer la déformation ε_{Utu} . La déformation ε_{Utu} est également déterminée avec l'ajout d'un facteur réducteur C de 0.67. La contrainte ultime, nommée σ_{Utu} pour l'Adaptation 2, est déterminée en utilisant un profil de contraintes simplifié bilinéaire contrairement à la méthode SIA originale qui utilise un profil de contraintes simplifié constant pour déterminer la contrainte ultime f_{Utu} . La contrainte f_{Utu} n'est d'ailleurs plus utilisée dans l'Adaptation 2. Pour déterminer la contrainte σ_{Utu} , un ratio de force de localisation de la fissuration en flexion (r_{loc}) égal à 93% est utilisé. La performance de l'Adaptation 2 est excellente pour tous les types de BFUP étudiés dans le présent projet de recherche et sa polyvalence rend cette adaptation meilleure que l'Adaptation 1.

ABSTRACT

Canadian standards CSA A23.01 [1] and CSA S6 [2] have been offering guidance on the use of UHPFRC since 2019. These two standards propose to determine the direct tensile behaviour of UHPFRC from the bending behaviour of the material, i.e. by inverse analysis. The methods proposed by the Canadian standards are the SIA method (CSA A23.01) and the Lopez 5-point method (CSA S6). The present research project leads to the conclusion that the SIA inverse analysis method is more efficient than the Lopez 5-point method for different geometries in flexion on a UHPFRC with 3% fibers. The performance of the SIA method is not optimal for the test geometries considered in this research project. These geometries are 100 mm x 50 mm reduced section dog-bone in tension and a 100 mm x 50 mm section prism in flexion. Two adaptations of this method (Adaptations 1 and 2) have therefore been developed to improve its performance for these geometries.

Adaptation 1 increases the ultimate stress f_{Utu} and decreases the strain ε_{Utu} . The height in tension at the peak of bending resistance is equal to 80% of the total specimen depth ($0.80 h_m$) for a 100x50 prism unlike the tensioned height of 82% h_m proposed by the SIA. This change in tensioned height slightly increases the f_{Utu} stress. The strain ε_{Utu} is reduced by the application of a reducing factor C equal to 0.67. Both changes improve the performance of inverse analysis. However, the performance of Adaptation 1 is not very good for stiff specimens (low L/h slenderness) and UHPFRC with little hardening.

Adaptation 2 eliminates the use of two different simplified stress profiles to determine the ultimate tensile point and also reduces ε_{Utu} strain. The ε_{Utu} strain is also determined with the addition of a reduction factor C of 0.67. The ultimate stress, named σ_{Utu} for Adaptation 2, is determined using a bilinear simplified stress profile unlike the original SIA method which uses a constant simplified stress profile to determine the ultimate stress f_{Utu} . The f_{Utu} stress is no longer used in Adaptation 2. To determine the stress σ_{Utu} , a bending crack localization force ratio (r_{loc}) equal to 93% is used. The performance of Adaptation 2 is excellent for all types of UHPFRC studied in this research project and this versatility makes this adaptation better than Adaptation 1.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	V
TABLE DES MATIÈRES	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIX
LISTE DES VARIABLES	XIX
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Objectifs	6
1.3 Structure du mémoire	6
CHAPITRE 2 REVUE DE LA DOCUMENTATION	9
2.1 Bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP)	9
2.1.1 Historique des BFUP.....	9
2.1.2 Propriétés générales des BFUP	11
2.1.3 Comportement en traction des BFUP.....	13
2.2 Méthode d'évaluation du comportement en traction des BFUP	15
2.2.1 Essai de caractérisation en traction directe	15
2.2.2 Essai de caractérisation en flexion (traction indirecte)	18
2.2.3 Définition et importance de l'orientation des fibres.....	22
2.2.4 Principaux facteurs influençant l'orientation des fibres.....	24
2.2.5 Impact de l'orientation des fibres sur le comportement en traction	30

2.2.6 Impact de l'orientation des fibres sur le comportement en flexion.....	32
2.3 Méthodes d'analyses inverses	34
2.3.1 Méthode Lopez itérative [15].....	34
2.3.2 Méthode Lopez 5 points [15]	41
2.3.3 Méthode SIA [12].....	44
2.4 Synthèse	53
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....	56
3.1 Procédures expérimentales.....	56
3.1.1 BFUP à l'étude	57
3.1.2 Fabrication des spécimens.....	58
3.1.3 Essais de traction directe	60
3.1.4 Essais de flexion.....	64
3.1.5 Détermination de la densité et de l'orientation des fibres	68
3.1.6 Système de mesure par corrélation d'images	71
3.2 Programmation des méthodes d'analyse inverse	74
3.2.1 Présentation sommaire du fichier Excel développé par El Guerouahi [35]	75
3.2.2 Optimisations apportées au fichier Excel.....	78
3.3 Modélisation par éléments finis avec le logiciel ATENA.....	80
3.3.1 Propriétés des modèles numériques	81
3.3.2 Lois de traction implémentées dans les modèles	83
3.3.3 Validation du modèle pour les différentes géométries étudiées.....	87
3.4 Synthèse	89
CHAPITRE 4 CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE PRÉLIMINAIRE - IMPACT DE LA CONFIGURATION DE L'ESSAI DE FLEXION SUR LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE ET SUR LA PERFORMANCE DE L'ANALYSE INVERSE.....	90

4.1	BFUP et spécimens à l'étude	90
4.2	Comportement en traction directe du BFUP3	93
4.3	Comportement en flexion du BFUP3	94
4.3.1	Comportement en flexion des dallettes 100 x 50 (types B et C).....	94
4.3.2	Comportement en flexion des dallettes 150 x 50 (type D).....	96
4.3.3	Comportement en flexion des prismes 100 x 100 (type P)	97
4.3.4	Comparaison des comportements en flexion des différents types de spécimens.....	98
4.3.5	Étude de la fissuration des spécimens de flexion	100
4.4	Performance des différentes méthodes d'analyse inverse	103
4.4.1	Méthode Lopez 5 points	104
4.4.2	Méthode Lopez itérative.....	106
4.4.3	Méthode SIA	108
4.4.4	Choix d'une méthode d'analyse inverse à adapter.....	110
4.5	Synthèse	113
CHAPITRE 5	CALIBRATION ET ADAPTATION DE LA MÉTHODE D'ANALYSE INVERSE SIA POUR LE CONTEXTE NORMATIF CANADIEN	115
5.1	Calibration des essais de flexion et de l'analyse inverse	115
5.1.1	Étude des champs de contraintes près des appuis de l'essai de flexion	117
5.1.2	Étude de la hauteur tendue des spécimens de flexion à la section fissurée.....	120
5.1.3	Étude de la localisation de la fissuration dans l'essai de flexion selon un critère d'ouverture de fissure.....	123
5.1.4	Étude du profil de contraintes à la section fissurée des spécimens de flexion.....	125
5.2	Adaptation de la méthode d'analyse inverse.....	128
5.2.1	Adaptation 1 : hauteur tendue et déformation à l'ultime	130
5.2.2	Adaptation 2 : Profil de contraintes et localisation de la fissuration en flexion.....	134

5.3	Synthèse	139
CHAPITRE 6	CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE FINALE - PERFORMANCE EN FLEXION DE BFUP AVEC DIFFÉRENTS DOSAGES EN FIBRES POUR VALIDER LES ADAPTIONS DE LA MÉTHODE SIA	142
6.1	BFUP et spécimens à l'étude	142
6.2	Comportement mécanique d'un BFUP avec 2% de fibres.....	144
6.2.1	Résultats des essais de traction du UP-F2.....	144
6.2.2	Résultats des essais de flexion du UP-F2.....	146
6.3	Comportement mécanique d'un BFUP avec 3% de fibres.....	149
6.3.1	Résultats des essais de traction du UP-F3	149
6.3.2	Résultats des essais de flexion du UP-F3	152
6.4	Comparaison des résultats et normalisation de résultats de flexion selon la densité et l'orientation des fibres.....	155
6.4.1	Propriétés moyennes	155
6.4.2	Orientation des fibres pour les différentes sections de spécimens	157
6.4.3	Choix des géométries des spécimens de traction et de flexion pour la calibration de la méthode d'analyse inverse	162
6.4.4	Pondération des résultats de flexion expérimentaux selon leur orientation et leur densité des fibres	165
6.5	Étude de la fissuration avec un système de corrélation d'images	170
6.5.1	Fissuration en traction	170
6.5.2	Fissuration en flexion	174
6.5.3	Comparaison des déformations mesurées et de la fissuration.....	176
6.6	Performance de l'adaptation 1 – Ajustement de la déformation au pic	180
6.7	Performance de l'adaptation 2 – Ajustement de la déformation au pic et profil de contraintes unique	186

6.8	Comparaison de la performance des deux adaptations pour plusieurs BFUP.....	192
6.9	Synthèse	196
CHAPITRE 7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS		199
7.1	Rappel du contexte et des objectifs	199
7.2	Conclusions	200
7.3	Limitations et recommandations	204

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Propriétés générales de différents types de bétons selon Charron et Desmettre [21]	11
Tableau 2.2 Dimensions des spécimens de flexion, Table U.2 de l'Annexe U de la norme CSA A23.01-02 [1]	20
Tableau 2.3 Comparaison des conditions d'essai de flexion 4 points sur des BFUP ayant des fibres de longueur maximale de 20 mm pour différentes méthodes	22
Tableau 2.4 Équations pour déterminer la courbure théorique pour chaque phase selon la méthode Lopez itérative [15]	38
Tableau 2.5 Équations pour calculer le moment théorique dans la méthode itérative [15]	39
Tableau 2.6 Équations pour déterminer les points P2 à P5 de la méthode Lopez 5 points [15]	44
Tableau 2.7 Valeurs de α_i en fonction de λ_i pour l'hypothèse H2 de l'analyse inverse SIA	49
Tableau 3.1 Caractéristiques des BFUP utilisés pour les campagnes expérimentales.....	57
Tableau 3.2 Méthodes de mise en place utilisées dans ce projet	58
Tableau 3.3 Géométries des spécimens de flexion	65
Tableau 4.1 Spécimens caractérisés lors de la campagne expérimentale préliminaire	91
Tableau 4.2 Ouvertures de fissure minimale, maximale et moyenne des fissures secondaires mesurées avec le DIC avant qu'elles ne se referment	103
Tableau 4.3 Comparaison de l'étendue des trois méthodes d'analyse inverse pour le BFUP3 ...	111
Tableau 4.4 Comparaison qualitative de la performance des méthodes Lopez 5 points, Lopez itérative et SIA et de leur applicabilité au contexte canadien	112
Tableau 5.1 Comparaison de la contrainte de traction mesurée à 45° près des appuis par rapport à la résistance maximale du matériau, pour des spécimens rectangulaires et carrés et pour les quatre BFUP étudiés.....	119
Tableau 5.2 Hauteur tendue mesurée en éléments finis pour différents BFUP et différentes géométries en flexion 4 points	122

Tableau 5.3 Comparaison de la force de localisation (selon $\omega = 50 \mu\text{m}$) avec la forme maximale en flexion pour différentes géométries en flexion et différents BFUP	124
Tableau 5.4 Valeurs de α_i et r_{loc} idéales pour retrouver la déformation ultime en traction directe obtenue expérimentalement.....	138
Tableau 6.1 Description des spécimens de la campagne expérimentale finale.....	143
Tableau 6.2 Orientations et densités des fibres pour les différentes géométries de spécimens en traction et en flexion des matériaux UP-F2 et UP-F3	158
Tableau 6.3 Orientation et densité des fibres dans la zone tendue des os 100x50 en traction et des dalles 100x50 en flexion pour le UP-F2 et le UP-F3	166
Tableau 6.4 Facteurs de pondération des spécimens 100x50 pour UP-F2 et UP-F3	167
Tableau 6.5 Étude de la macrofissuration sur les os 100x50 de traction pour le UP-F2 et le UP-F3	173
Tableau 6.6 Étude de la macrofissuration sur les dalles 100x50 de UP-F2 et UP-F3	175
Tableau 6.7 Comparaison des déformations calculées au pic sur différentes longueurs de mesure en traction et au moment de localisation de la fissure en flexion pour le UP-F2 et le UP-F3	179
Tableau 6.8 Impacts du temps de localisation obtenu avec l'étude de la fissuration sur les deux critères de localisation (α_{loc} et r_{loc}) possibles pour la méthode adaptée 2 de la SIA	187

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Comparaison de la durée de vie et de la performance d'une réparation en BFUP (Stratégie A) avec une réparation en BO (Stratégie B) [9]	2
Figure 1.2 Exemples de ponts réalisés au début des années 2000 utilisant des BFUP [10]	3
Figure 1.3 Modèle contrainte-déformation pour les BFUP de la norme CSA S6-19	4
Figure 2.1 Répartition schématique des fibres pour des éléments structuraux en BO, en BFHP et en BFUP [21]	13
Figure 2.2 Comparaison du comportement en traction d'un BFUP écrouissant avec d'autres bétons [21]	14
Figure 2.3 Essais de traction directe développés par différents groupes de recherche	16
Figure 2.4 Essais de flexion 4 points développés par différents groupes de recherche	19
Figure 2.5 Angle d'inclinaison θ d'une fibre par rapport à un plan de coupe [23]	23
Figure 2.6 Orientation des fibres dans un élément en BFUP selon l'effort de traction [24]	23
Figure 2.7 Mise en place au centre et par passes pour des essais de flexion [25].....	25
Figure 2.8 Performance en flexion de prismes pour différentes méthodes de mise en place [25].	26
Figure 2.9 Orientation des fibres avec mise en place depuis l'extrémité dans un prisme transparent [26]	27
Figure 2.10 Schématisation de l'orientation des fibres près des parois de coffrage [27]	28
Figure 2.11 Exemple d'application du facteur K proposé par l'AFGC [11]	29
Figure 2.12 Impact de l'orientation des fibres sur le comportement en traction d'un BFUP [30]..	30
Figure 2.13 Comportement pré-pic et post-pic d'un BFUP pour différentes orientations des fibres [23]	31
Figure 2.14 Obtention des spécimens de flexion 4 points lors de l'étude menée par Behloul [31]	33
Figure 2.15 Impact de l'orientation des fibres sur le comportement en flexion des BFUP [31]	33
Figure 2.16 Comportement en traction hypothétique considéré par Lopez pour l'analyse inverse [15]	35

Figure 2.17 Courbe de traction en contraintes-déformations proposée par Lopez [15].....	36
Figure 2.18 Schéma illustrant l'algorithme de calcul de la méthode Lopez itérative [15]	40
Figure 2.19 Algorithme nécessaire pour obtenir les courbes de calibration de la méthode Lopez 5 points [15]	41
Figure 2.20 Représentation graphique des droites sécantes S_0 , S_{40} et S_{75} pour la méthode Lopez 5 points [15]	43
Figure 2.21 Comportement idéalisé représentant des essais de traction directe sur des os en BFUP [32]	45
Figure 2.22 Localisation des points A et B nécessaires à l'analyse inverse SIA [12]	46
Figure 2.23 Représentation graphique de la moyenne mobile E_{mi} et de la localisation de F_A sur la courbe de flexion pour le calcul inverse SIA [32]	47
Figure 2.24 Profils de déformations et de contraintes nécessaires pour déterminer ε_{Utu} par l'analyse inverse SIA [12]	48
Figure 2.25 Profil de contraintes de traction constant pour déterminer f_{Utu} au point B [12].....	51
Figure 2.26 Représentation graphique des points d'interpolation et du fonctionnement de la méthode d'analyse inverse pour déterminer ε_{Utu} [32]	52
Figure 3.1 Images montrant les travaux de mise en place pour UP-F3	59
Figure 3.2 Vue de côté et de face montrant l'emplacement de la surface truelliée pour les os	60
Figure 3.3 Dimensions des os O100x50 et O50x50 utilisées dans les campagnes expérimentales	61
Figure 3.4 Types de fissuration généralement observés sur les os sollicités en traction directe ...	62
Figure 3.5 Illustration des spécimens de traction avec et sans le système de mesure par corrélation d'image (DIC).....	63
Figure 3.6 Schéma du positionnement du spécimen de traction dans les mâchoires de la presse .	64
Figure 3.7 Emplacement de la surface truelliée durant l'essai de flexion 4 points.....	66
Figure 3.8 Montage de flexion 4 points utilisé lors du projet	66

Figure 3.9 Illustration des spécimens de flexion avec et sans le système de mesure par corrélation d'images (DIC)	68
Figure 3.10 Tranches minces non préparées extraites des spécimens de flexion et de traction pour évaluer l'orientation et la densité des fibres	69
Figure 3.11 Comparaison de l'image numérisée avec l'image binarisée nécessaire à l'obtention de l'orientation des fibres	70
Figure 3.12 Exemple d'une surface mouchetée sur un spécimen rectangulaire de flexion	72
Figure 3.13 Schéma montrant la disposition des caméras pour le système de mesure par corrélation d'images	72
Figure 3.14 Exemples de champs de déformation obtenus à la suite de la corrélation d'images par VIC3D	73
Figure 3.15 Étapes 1 et 2 nécessaires aux calculs inverses dans le fichier Excel [35]	75
Figure 3.16 Étape 3 du fichier Excel de El Guerouahi [35]	77
Figure 3.17 Modifications aux étapes 2 et 3 du fichier Excel de calcul inverse	78
Figure 3.18 Étapes nécessaire pour l'utilisation du fichier Excel de calcul inverse contenant seulement la méthode SIA.....	79
Figure 3.19 Illustration du modèle éléments finis avec ATENA pour différentes géométries	81
Figure 3.20 Loi de comportement en traction du matériau CC33DNonlinCementitious2User [36]	82
Figure 3.21 Double fissuration lors de la modélisation des essais de flexion 4 points	84
Figure 3.22 Illustration de la maille centrale pour un spécimen de flexion	84
Figure 3.23 Exemple d'une loi de traction (BFUP3) simplifiée nécessaire à la modélisation	85
Figure 3.24 Comparaison de la performance du modèle éléments finis pour différentes lois augmentées sur le BFUP3	86
Figure 3.25 Performance du modèle ATENA développé pour différentes géométries et différents BFUP	88

Figure 4.1 Localisation des traits de scie dans les prismes de type P pour obtenir les dallettes de types B et C	92
Figure 4.2 Comportement en traction directe a) pré-pic et b) post-pic du BFUP3 mesuré sur des os O100x50	93
Figure 4.3 Comportement en flexion des dallettes 100x50 de type B et C pour le BFUP3.....	95
Figure 4.4 Comportement en flexion des dallettes 150x50 de type D pour le BFUP3	96
Figure 4.5 Comportement mécanique en flexion des prismes 100x100 de type P pour le BFUP3	98
Figure 4.6 Comparaison du comportement flexionnel des différentes géométries pour le BFUP3	99
Figure 4.7 Évolution de la fissuration à la fibre extrême tendue d'une dallette de type B et d'un prisme de type P	101
Figure 4.8 Résultats de l'analyse inverse Lopez 5 points pour les différentes géométries flexionnelles du BFUP3	105
Figure 4.9 Résultats de l'analyse inverse Lopez itérative pour les différentes géométries flexionnelles du BFUP3	107
Figure 4.10 Performance de l'analyse inverse SIA pour les différentes géométries flexionnelles du BFUP3	109
Figure 5.1 Comparaison des comportements en traction (O100x50) et en flexion (dallettes 150x50) des BFUP KING 2%, KING 3%, KING 4% et BFUP3.....	116
Figure 5.2 Répartition des contraintes principales de traction et microfissuration près des appuis au pic de résistance en flexion pour une section rectangulaire (150x50) et une section carrée (100x100)	118
Figure 5.3 Répartition des contraintes de traction sur une coupe de la section fissurée pour deux géométries de spécimens de flexion.....	121
Figure 5.4 Emplacement de la force de localisation ($F_{o=0.05}$) sur les courbes EF d'une dallette (150x50) et d'un prisme (100x100) du BFUP KING 2%	124

Figure 5.5 Profils de contraintes numériques versus SIA pour une dallette de section 150x50 de BFUP KING 3%	126
Figure 5.6 Courbes moyennes de traction issues du calcul inverse SIA original et des essais de traction directe pour les BFUP3 et KING 2, 3 et 4%	129
Figure 5.7 Impact du changement de la hauteur tendue (<i>ht</i>) et de l'utilisation d'un facteur <i>C</i> dans l'adaptation 1 proposée de la SIA, essais sur dallettes (150x50) pour différents BFUP	132
Figure 5.8 Impact du choix d'une valeur de α_i comme critère de localisation pour l'adaptation 2 de la méthode SIA.....	137
Figure 6.1 Emplacement du treillis pour les os renforcés en UP-F3.....	143
Figure 6.2 Comportement en traction directe des spécimens O50x50 de UP-F2	144
Figure 6.3 Comportement en traction directe des spécimens O100x50 de UP-F2	146
Figure 6.4 Comportement en flexion 4 points des spécimens 100x50 de UP-F2	147
Figure 6.5 Comportement en flexion 4 points des spécimens 100x100 de UP-F2	148
Figure 6.6 Comportement en traction directe des spécimens O50x50 de UP-F3	150
Figure 6.7 Comportement en traction directe des spécimens O100x50 de UP-F3	151
Figure 6.8 Comportement en flexion 4 points des dallettes 100x50 en UP-F3	153
Figure 6.9 Comportement en flexion 4 points des prismes 100x100 en UP-F3	154
Figure 6.10 Comparaison des courbes moyennes de traction et de flexion de la campagne expérimentale finale	156
Figure 6.11 Localisation et orientation des fibres dans des spécimens 100x50 et 100x100 en flexion	161
Figure 6.12 Impact de la pondération des contraintes par rapport à la traction sur les courbes de flexion 100x50 pour le UP-F2 et le UP-F3	169
Figure 6.13 Localisation des capteurs de déplacements virtuels pour étudier la fissuration en traction sur les os 100x50 de UP-F2 et de UP-F3	172

Figure 6.14 Localisation des capteurs virtuels dans VIC3D pour obtenir l'évolution de la fissuration en flexion pour le UP-F2 et le UP-F3	174
Figure 6.15 Évolution de l'ouverture des fissures pour un os et une dallette en UP-F2 et UP-F3	176
Figure 6.16 Performance de l'adaptation 1 de la méthode SIA appliquée sur les courbes de flexion pondérées et non-pondérées des dallettes 100x50 de UP-F2	182
Figure 6.17 Performance de l'adaptation 1 de la méthode SIA appliquée sur les courbes de flexion pondérées et non-pondérées des dallettes 100x50 de UP-F3	184
Figure 6.18 Exemple illustrant l'emplacement du point de localisation déterminé avec r_{loc} sur une courbe de flexion de UP-F2	188
Figure 6.19 Performance de l'adaptation 2 de la méthode SIA appliquée sur les courbes de flexion pondérées et non-pondérées des dallettes 100x50 de UP-F2	189
Figure 6.20 Performance de l'adaptation 2 de la méthode SIA appliquée sur les courbes de flexion pondérées et non-pondérées des dallettes 100x50 de UP-F3	191
Figure 6.21 Performance de l'analyse inverse avec les adaptations 1 et 2 sur six BFUP	194

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AFGC	Association Française de Génie Civil
BFUP	Béton fibré à ultra haute performance
BFHP	Béton fibré à haute performance
BHP	Béton à haute performance
BO	Béton ordinaire
BPR	Bétons de Poudres Réactives
BRF	Béton renforcé de fibres
BUP	Béton à ultra haute performance
CSA	Canadien Standards Association
DIC	Digital image correlation
DSP	Densified with Small Particles
FHWA	Federal Highway Administration
SIA	Société suisse des Ingénieurs et des Architectes

LISTE DES VARIABLES

Variables générales

l_f	Longueur des fibres
d_f	Diamètre des fibres
L	Portée d'un spécimen lors d'un essai de flexion
L/h	Élancement d'un spécimen lors d'un essai de flexion (Portée divisé par la hauteur)
γ_F	Coefficient d'efficacité des fibres utilisé par la norme CSA S6-19
K	Facteur d'orientation des fibres utilisé par la norme AFGC
E	Module élastique d'un BFUP

E^*	Module de déchargement d'un BFUP
f_{te}	Contrainte marquant la fin du comportement élastique d'un BFUP en traction directe
f_{tu}	Contrainte ultime d'un BFUP en traction directe (contrainte maximale)
Θ_i	Orientation d'une fibre par rapport à un plan de coupe précis d'un spécimen
ρ_i	Densité de fibres présente dans une section précise d'un spécimen
γ_i	Coefficient de pondération du comportement d'un BFUP selon son orientation et sa densité des fibres

Variables associées aux méthodes d'analyse inverse de Lopez

s	Longueur de la rotule plastique
f_t	Contrainte marquant la fin du comportement élastique en traction
$f_{t,u}$	Contrainte ultime (maximale) de traction
w_d	Ouverture de fissure correspondant au point P4 de la méthode Lopez 5 points en traction
w_c	Ouverture de fissure correspondant au point P5 de la méthode Lopez 5 points en traction
$\varepsilon_{t,el}$	Déformation marquant la fin du comportement élastique en traction
$\varepsilon_{t,u}$	Déformation au point de traction ultime
$\varepsilon_{t,d}$	Déformation correspondant au point P4 de la méthode Lopez 5 points en traction
$\varepsilon_{t,c}$	Déformation correspondant au point P5 de la méthode Lopez 5 points en traction
$\phi(x)$	Courbure d'un spécimen de flexion
α, β, μ et γ	Paramètres importants au fonctionnement des deux méthodes d'analyse inverse de Lopez

Variables associées à la méthode d'analyse inverse de la SIA

E_{mi}	Moyenne mobile du module élastique à un moment i sur la courbe de flexion
h_m	Hauteur totale du spécimen de flexion

χ_i	Courbure à un moment i sur la courbe de flexion
a_i	Portion de la hauteur tendue qui est plastifiée à un moment i sur la courbe de flexion
λ_i	Paramètre nécessaire pour déterminer la portion de la hauteur tendue plastifiée
ε_{Ute}	Déformation marquant la fin du comportement élastique en traction
f_{Ute}	Contrainte marquant la fin du comportement élastique en traction
ε_{Utu}	Déformation au point de traction ultime déterminée avec un profil de contraintes simplifié bilinéaire
f_{Utu}	Contrainte ultime (maximale) de traction déterminée avec un profil de contraintes simplifié constant

Variables nécessaires au développement des deux Adaptations de la SIA

$\sigma_{t,45^\circ}$	Contrainte de traction maximale sur une ligne tracée à 45 degrés allant d'un charge supérieure d'un spécimen de flexion vers l'appui inférieur de ce spécimen
h_{tendue}	Hauteur en traction dans un spécimen de flexion
$T_{\omega=0.05}$	Temps d'un essai de flexion correspondant au moment où la fissure principale atteint une ouverture de 0.05 mm
$T_{\omega=0.08}$	Temps d'un essai de flexion correspondant au moment où la fissure principale atteint une ouverture de 0.08 mm
T_{pic}	Temps d'un essai de flexion correspondant au pic de résistance
$F_{\omega=0.05}$	Force obtenue lors d'un essai de flexion associée au temps $T_{\omega=0.05}$
$F_{\omega=0.08}$	Force obtenue lors d'un essai de flexion associée au temps $T_{\omega=0.08}$
F_{max}	Force maximale obtenue au pic de résistance d'un essai de flexion
$a_{etu\ exacte}$	Hauteur tendue plastifiée nécessaire pour obtenir la déformation ultime moyenne en traction directe avec l'Adaptation 2 du calcul inverse SIA sur un spécimen de flexion
T_{loc}	Temps d'un essai de flexion correspondant au moment de localisation de la fissuration
F_{loc}	Force obtenue lors d'un essai de flexion associée au temps T_{loc}

α_{loc}	Hauteur tendue plastifiée obtenue avec l'Adaptation 2 du calcul inverse SIA et associée au temps T_{loc}
r_{loc}	Ratio de force de localisation de la fissuration en flexion (F_{loc} / F_{max}) nécessaire à l'Adaptation 2 du calcul inverse SIA
C	Facteur réducteur des déformations nécessaire aux Adaptations 1 et 2 du calcul inverse SIA

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Les bétons à ultra hautes performances, généralement appelés par leur acronyme « BFUP », sont des matériaux cimentaires ayant une matrice beaucoup plus compacte que celle obtenue avec des bétons ordinaires (BO). Cette matrice cimentaire compacte permet entre autres d'augmenter de façon importante la résistance à la compression des BFUP par rapport à celle des BO. Des fibres métalliques en acier de différentes géométries sont également ajoutées au mélange pour augmenter la résistance en traction et mieux contrôler la propagation des fissures dans les éléments en BFUP. La résistance en traction n'est donc plus négligeable lors de la conception d'élément structuraux en BFUP contrairement aux éléments en BO. Cette résistance en traction importante permet également de réduire la quantité d'armature utilisée dans les éléments en BFUP et de concevoir des éléments plus minces que ceux en BO. Il est cependant important de bien connaître et comprendre le comportement en traction des BFUP pour faire une conception adéquate d'éléments structuraux avec ce matériau.

L'amélioration des performances (traction, compression, durabilité, etc.) due à l'augmentation de la compacité de la matrice (Brunauer et al. [3], Odler et al. [4], Yundenfreund et al. [5], Roy et al. [6], Birchall et al. [7]) et l'ajout de fibres métalliques dans le mélange (Kasperkiewicz [8]) sont connues depuis longtemps par le milieu de la recherche dans le monde entier. Ces propriétés améliorées permettent également aux BFUP de mieux contrôler la fissuration que les BO. Ce meilleur contrôle de la fissuration permet donc aux structures en BFUP d'être généralement plus durables que les structures en BO. Cette grande durabilité des BFUP permet également d'en faire un matériau intéressant pour effectuer des réparations sur les structures existantes et ainsi augmenter leur durée de vie. Un article présenté par Brühwiler en 2017 [9] permet d'illustrer l'impact d'une réparation en BFUP sur la durée de vie d'un ouvrage et la compare à une réparation traditionnelle en BO. La Figure 1.1 compare deux stratégies de réparation qui peuvent être envisagées par un propriétaire d'ouvrage. La Stratégie A (courbe verte), qui représente la réparation avec un BFUP, adopte une approche qui permet d'augmenter considérablement la performance de l'ouvrage en une seule réparation et qui permet de maintenir cette performance dans le temps. La Stratégie B (courbe orange), qui représente une réparation avec un BO, augmente la performance

de la structure endommagée mais elle ne permet pas à l'ouvrage de garder cette performance très longtemps. Une deuxième et même une troisième réparation peuvent donc être nécessaire pour étendre la durée de vie de l'ouvrage à celle procurée par la Stratégie A.



Figure 1.1 Comparaison de la durée de vie et de la performance d'une réparation en BFUP (Stratégie A) avec une réparation en BO (Stratégie B) [9]

Lors de la première réparation, la Stratégie A (BFUP) est généralement plus coûteuse que la Stratégie B (BO). Le coût initial d'une réparation en BFUP est généralement plus grand qu'une réparation en BO, mais ce coût devient plus faible avec le temps puisque plusieurs réparations en BO sont nécessaires pour prolonger la durée de vie d'un ouvrage de la même façon qu'une seule réparation en BFUP. Cet avantage du BFUP par rapport au BO est encore plus pertinent dans le contexte des ouvrages d'art puisque la durée de vie utile de plusieurs d'entre eux approche la fin, et l'utilisation des BFUP pourrait permettre d'augmenter cette durée.

De nombreux projets pilotes ont d'ailleurs été réalisés dans les 15 dernières années avec des BFUP à travers le monde pour exploiter les propriétés caractéristiques de ces matériaux. Le premier pont à utiliser du BFUP a été construit à Sherbrooke au Québec (Canada) en 1997 [10]. Plusieurs autres ponts ont par la suite été réalisés dans le début des années 2000 à travers le monde pour mettre à profit les caractéristiques très intéressantes des BFUP dans le domaine des ouvrages d'art (Japon, USA, Canada, Nouvelle-Zélande, etc.) [10]. La conception de ces ponts n'était cependant pas encadrée par des normes puisqu'aucune des normes de conception des structures ne proposaient encore des recommandations pour l'utilisation des BFUP. La Figure 1.2 présente quelques exemples de ces structures.



Figure 1.2 Exemples de ponts réalisés au début des années 2000 utilisant des BFUP [10]

Le succès des premiers projets pilotes utilisant du BFUP a permis d'attirer l'attention de plusieurs propriétaires d'ouvrages à travers le monde qui ont commencé à s'intéresser davantage au BFUP. Cet intérêt grandissant a forcé les différentes normes de conception à travers le monde à proposer des recommandations pour l'utilisation des BFUP. Par exemple, l'AFGC (norme française) donne ses premières lignes directrices sur l'utilisation des BFUP en 2013 [11], suivi par la SIA en 2015 (norme suisse) [12] et récemment par les normes canadiennes CSA A23.01 [1] et CSA S6 [2] en 2019. La norme CSA A23.01-02 [1] donne les directives pour les essais de caractérisation du comportement mécanique des BFUP tandis que l'annexe 8.1 de la norme CSA S6-19 [2] donne les recommandations pour la conception d'éléments structuraux en BFUP. Les recommandations des normes canadiennes (CSA A23.01 et CSA S6) définissent l'allure théorique du comportement en

traction des BFUP et l'impact de cet apport en traction du même matériau sur le comportement structural des éléments. La Figure 1.3 présente le modèle de comportement en traction contrainte-déformation pour les bétons renforcés de fibres écrouissants (BRFE). Les BRFE sont une catégorie plus large de bétons renforcés de fibres (BRF) qui englobe les BFUP, tel qu'il sera décrit plus tard au Chapitre 2 du présent document, puisque le comportement écrouissant en traction des BRF est un aspect important du comportement des BFUP.

Modèle contrainte-déformation pour le BRFE
 (Voir l'article [A8.1.8.3.2.](#))

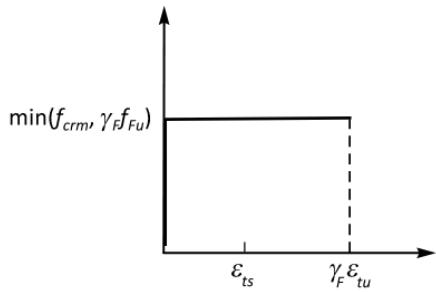


Figure 1.3 Modèle contrainte-déformation pour les BFUP de la norme CSA S6-19

Pour bien utiliser les recommandations introduites dans les normes canadiennes (CSA A23.01 et CSA S6), il est nécessaire de déterminer le comportement en traction du BFUP utilisé. Les essais de caractérisation en traction directe sur des matériaux cimentaires ne sont pas fréquents puisqu'ils ne sont pas nécessaires lors de l'utilisation des bétons ordinaires (le comportement en traction étant négligé lors de la conception pour les BO). Les laboratoires de contrôle de la qualité des bétons au Canada comme ailleurs dans le monde ne sont d'ailleurs pas équipés pour faire ces essais de caractérisation. Cela rend difficile, et parfois coûteux, de caractériser la traction des BFUP lors des projets qui utilisent ces matériaux. En fait, seuls certains milieux de recherche dans le domaine des bétons ont développé des essais de traction directe sur des BFUP (FHWA [13], AFGC [11], SIA [12] et Polytechnique Montréal [14]). Une alternative possible pour obtenir le comportement en traction des BFUP est d'effectuer une analyse inverse pour obtenir la traction à partir du comportement en flexion de ces matériaux.

La détermination du comportement en traction des BFUP avec une analyse inverse est la solution adoptée par les deux normes canadiennes (CSA A23.01 et CSA S6) pour simplifier la détermination du comportement en traction des BFUP. La norme CSA A23.01 propose la méthode de calcul inverse de la norme SIA [12] tandis que la norme CSA S6 propose la méthode Lopez 5 points [15]. Ces deux méthodes seront décrites de façon approfondie à la Section 2.3 du présent mémoire. En plus de proposer deux méthodes différentes, ces deux méthodes n'ont pas été développées pour des conditions d'essais de flexion et pour des BFUP similaires. Cela veut donc dire que pour un même matériau, les deux méthodes de calcul inverse adoptées dans les normes canadiennes conduiront à un comportement en traction très différent pour une même BFUP pour des conditions d'essai de flexion données. De plus, la dispersion des résultats du calcul inverse avec ces deux méthodes est élevée pour les conditions d'essais proposées par les normes canadiennes et les types de BFUP utilisés dans l'industrie. C'est donc dire que la performance de ces méthodes de calcul inverse n'est pas très bonne pour un contexte normatif puisque des coefficients pénalisants seront utilisés pour tenir compte de la grande dispersion des résultats. La grande dispersion, et donc la faible performance dans un contexte normatif des méthodes de calcul inverse Lopez 5 points [15] et SIA [12] pour les conditions d'essais proposées par les normes canadiennes et les types de BFUP utilisés dans l'industrie sera démontrée au Chapitre 4 du présent mémoire. Il est également important de noter que les recommandations sur les BFUP introduites par les normes canadiennes sont en annexe de celles-ci (Annexe U pour la norme CSA A23.01 [1] et Annexe à la section 8 pour la norme CSA S6 [2]). Ces annexes ne sont donc pas normatives, elles permettent principalement d'introduire des recommandations sur l'utilisation des BFUP. Ces recommandations doivent être validées, et un des objectifs du présent mémoire est de valider les recommandations pour déterminer le comportement en traction des BFUP des normes CSA A23.01 [1] et CSA S6 [2].

Les normes considèrent que l'essai de traction directe est préférable, mais vu le peu de laboratoires en mesure de le réaliser, elles proposent comme alternative l'essai de flexion avec un calcul inverse. Le choix de l'essai de traction directe est cependant laissé à la discrétion du concepteur, et ces essais sont difficiles à réaliser tel que mentionné précédemment. La complexité de la détermination du comportement en traction des BFUP est donc un enjeu majeur pour les ingénieurs concepteurs au Canada. Le développement d'une méthode d'analyse inverse fiable avec une faible dispersion

des résultats selon les conditions d'essais de caractérisation utilisées au Canada permettrait de simplifier l'utilisation des BFUP dans des projets en génie civil.

1.2 Objectifs

L'objectif principal du présent projet de recherche est de développer une méthode d'analyse inverse performante pour déterminer le comportement en traction des bétons renforcés de fibres à ultra hautes performances (BFUP) utilisés dans l'industrie à l'aide de leur comportement en flexion. La portée du sujet de recherche a été limitée aux BFUP due à la complexité des différentes méthodes d'analyse inverse étudiées ainsi que l'adaptation nécessaire de ces méthodes. Pour pouvoir développer une nouvelle méthode d'analyse inverse, les objectifs spécifiques suivants ont été définis :

1. Comparer la performance de différentes géométries de spécimens sur les résultats des essais de caractérisation en flexion et en traction;
2. Évaluer l'impact de l'orientation des fibres sur le comportement en flexion et en traction des BFUP selon différentes géométries et différentes méthodes de mise en place;
3. Étudier l'évolution de la fissuration dans les essais de caractérisation (traction et flexion) pour déterminer l'endroit de localisation d'une fissure dominante (macrofissure) en traction et en flexion;
4. Évaluer la performance de trois méthodes d'analyse inverse existantes (Lopez itérative, Lopez 5 points et SIA) sur un BFUP typique de ceux utilisés par l'industrie;
5. Sélectionner une géométrie de spécimens adaptée aux BFUP commercialisés pour la caractérisation en traction et en flexion;
6. Sélectionner et adapter une méthode d'analyse inverse au contexte normatif canadien;
7. Calibrer et valider la performance de la nouvelle méthode d'analyse inverse développée pour des BFUP ayant différents dosages en fibres.

1.3 Structure du mémoire

Le présent mémoire se divise en sept chapitres incluant l'introduction (Chapitre 1) et la conclusion (Chapitre 7). L'information nécessaire au développement d'une méthode d'analyse inverse adaptée

au contexte des BFUP utilisés dans les projets canadiens actuels est donc divisée en cinq chapitres, soit les Chapitres 2 à 6.

Le Chapitre 2 est une revue de la documentation sur les thèmes importants du mémoire. Ces thèmes sont les bétons fibrés à ultra haute performance (BFUP), les différentes méthodes d'évaluation du comportement en traction des BFUP ainsi que les différentes méthodes d'analyse inverse (Lopez itérative, Lopez 5 points et SIA) qui sont étudiées dans le présent projet de recherche.

Le Chapitre 3 porte sur la méthodologie utilisée pour obtenir les résultats nécessaires au projet. Les procédures expérimentales, la programmation dans un fichier Excel réalisée pour utiliser adéquatement les trois méthodes d'analyse inverse ainsi que le développement d'une modélisation par éléments finis des essais de flexion 4 points avec le logiciel d'éléments finis non linéaire ATENA sont les trois sujets qui sont détaillés dans ce chapitre.

Le Chapitre 4 présente les résultats d'une étude expérimentale préliminaire réalisée sur un BFUP ayant un dosage en fibres de 3%. Cette étude expérimentale permet de caractériser le comportement en traction directe et en flexion de ce matériau. Plusieurs géométries de spécimens sont utilisées pour évaluer l'impact de ces géométries sur la performance d'un BFUP en flexion. La performance des trois méthodes d'analyses inverse est évaluée sur les différentes géométries des spécimens en flexion pour déterminer la méthode d'analyse inverse qui performe le mieux sur le BFUP 3% utilisé dans cette campagne expérimentale. Le Chapitre 4 démontrera que la méthode d'analyse inverse de la norme SIA est la plus performante et elle sera adaptée au contexte des BFUP courants.

Le Chapitre 5 présente le cheminement nécessaire à l'adaptation de la méthode SIA au contexte normatif canadien. Plusieurs paramètres clés de la méthode sont étudiés à l'aide de modèles éléments finis des essais de flexion. Les apprentissages réalisés sur ces paramètres avec les modèles éléments finis permettent le développement de deux adaptations possibles de la SIA au contexte des BFUP courants. Ces deux adaptations sont présentées au Chapitre 5.

Le Chapitre 6 porte sur la validation des deux adaptations proposées de la méthode d'analyse inverse SIA à l'aide d'une campagne expérimentale finale. Dans cette campagne expérimentale, des spécimens de flexion et de traction ayant différentes géométries sont testés pour deux BFUP ayant un dosage en fibres différents. Une seule géométrie en traction et une en flexion sont ensuite sélectionnées pour calibrer et valider les deux adaptations de la SIA proposées au Chapitre 5. La performance des deux nouvelles méthodes d'analyse inverse calibrées au contexte des BFUP

utilisés dans l'industrie est évaluée pour les deux BFUP de la campagne expérimentale finale. Les forces et les faiblesses des deux adaptations sont également évaluées sur un total de six BFUP dans le Chapitre 6.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA DOCUMENTATION

Avant d'entamer un projet de recherche sur un sujet précis, il est important de bien connaître les thèmes généraux reliés à ce sujet. Le présent chapitre présente une brève revue de la documentation sur les thèmes importants pour le présent mémoire, soit les bétons fibrés à ultra hautes performances, les méthodes de caractérisation de leur comportement en traction et les méthodes d'analyse inverse existantes pour déterminer le comportement en traction directe à partir d'essais de flexion.

2.1 Bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP)

La présente section dresse un bref historique des BFUP, présente ses propriétés générales puis met ensuite l'accent sur son comportement en traction qui est primordial pour les BFUP.

2.1.1 Historique des BFUP

Tel que cela sera décrit plus en détail à la Section 2.1.2, les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP) se caractérisent, d'une part, par une compacité élevée qui permet d'obtenir des résistances à la compression très élevées et, d'autre part, par la présence d'une grande quantité de fibres métalliques qui améliorent significativement son comportement en traction.

Le développement de matériaux cimentaires ayant des résistances à la compression très élevées n'est pas nouveau. Dès 1892, des essais empiriques pour optimiser la compacité de ces matériaux sont réalisés par Féret [16]. Au début des années 1970, plusieurs autres travaux d'optimisation de la compacité des matériaux cimentaires voient le jour. Par exemple, des travaux pour rendre la mouture de la pâte plus fine (Brunauer et al. [3], Odler et al. [4], Yundenfreund et al. [5]) et pour réduire la porosité via différentes techniques (Roy et al. [6], Birchall et al. [7]) ont permis d'obtenir des matériaux très compacts ayant des résistances à la compression allant de 100 à 650 MPa. Malgré les performances nettement améliorées de ces matériaux, leur utilisation à cette époque se limite à un contexte de recherche puisqu'il est pratiquement impossible de reproduire ces compacités optimisées dans un contexte de chantier. L'arrivée des adjuvants réducteurs d'eau et des ajouts pouzzolaniques dans les années 1980 permettent de régler ce problème et d'obtenir des matrices cimentaires très compactes réalisables sur chantier et des formulations théoriques commencent à apparaître dès 1986 par Stovall et al. [17] pour les BFUP. Plusieurs matériaux sont

donc développés, comme les DSP (Densified with Small Particles) par Bache [18] ou les BPR (Bétons de Poudres Réactives) par Richard et al. [19]. Cependant, dû à leurs très grandes résistances à la compression, ils sont plus fragiles que les bétons conventionnels. Un tel comportement fragile n'est pas souhaitable dans une structure en génie civil et c'est d'ailleurs pourquoi une grande quantité d'armature est incorporée dans les ouvrages en béton armé.

Afin de compenser la fragilité des nouveaux matériaux développés, des fibres métalliques y ont été incorporées. Très tôt, l'apport bénéfique des fibres sur le comportement en traction des BFUP (résistance et fissuration) a fait consensus et la présence des fibres est devenue un élément primordial des BFUP. En 1978, Kasperkiewicz est le premier à soulever la possibilité d'un comportement écrouissant des bétons renforcés de fibres (BRF) en traction directe [8]. Les BRF sont une catégorie de matériau qui englobe les BFUP, alors que le comportement écrouissant en traction directe est un aspect caractéristique généralement recherché pour les BFUP par rapport à d'autres types de BRF qui présentent le plus souvent un comportement adoucissant après la fissuration de la matrice cimentaire. Ce comportement écrouissant se caractérise par une augmentation de la résistance du béton après la fin du comportement linéaire élastique du matériau, un peu comme ce qui est observé pour l'acier en traction. Un élément clé des résultats obtenus par Kasperkiewicz est l'alignement préférentiel des fibres parallèlement à l'effort dans les spécimens testés. En effet, un champ électromagnétique a été utilisé par Kasperkiewicz pour améliorer l'alignement des fibres par rapport à l'effort de traction et c'est cet alignement qui explique le comportement ductile et le « semblant d'écrouissage » selon Kasperkiewicz. C'est donc dire, qu'en plus de la présence des fibres, leur orientation est depuis longtemps considérée comme cruciale pour le comportement en traction des BFUP. Plus les fibres sont perpendiculaires aux fissures formées, plus elles en contrôlent l'ouverture, ce qui permet une augmentation des déformations et de la résistance en traction du matériau. En 1987, Antoine E. Naaman établit des équations permettant de déterminer le dosage critique en fibres pour obtenir un comportement écrouissant [20]. Dans ces équations, deux facteurs permettent de tenir compte de la distribution et de l'orientation des fibres. Ces facteurs ont beaucoup évolué avec le temps en fonction du type de matrice utilisée et des nouveaux apprentissages sur les BFUP, ce qui explique la difficulté à prédire et évaluer de manière précise l'orientation des fibres dans les éléments en BFUP.

Bien que connus et étudiés depuis les années 1970 par plusieurs chercheurs du monde entier, les BFUP sont très peu connus par les ingénieurs en structures, au Canada et ailleurs dans le monde,

dû à leur faible utilisation dans les projets en génie civil en comparaison au béton armé ou précontraint conventionnels. Cette situation est principalement due au fait que les normes internationales encadrant l'utilisation des BFUP ne sont apparues que récemment (AFGC [11] et SIA [12]) et qu'aucune norme canadienne n'encadrait l'utilisation de cette gamme de béton jusqu'à encore très récemment. Ce n'est que dans les versions 2019 des normes CSA-A23.1 [1] et CSA-S6 [2] que sont apparues les premières recommandations sous forme d'Annexes. La principale difficulté dans le dimensionnement d'éléments en BFUP est d'évaluer adéquatement sa contribution en traction qui est non négligeable.

2.1.2 Propriétés générales des BFUP

Cette section présente les propriétés générales des BFUP disponibles dans l'industrie au Canada. Ces propriétés sont comparées, au Tableau 2.1, à celles d'autres catégories de bétons présents sur le marché canadien, soient les bétons ordinaires (BO), les bétons à hautes performances (BHP) et les bétons fibrés à hautes performances (BFHP).

Tableau 2.1 Propriétés générales de différents types de bétons selon Charron et Desmettre [21]

Composition	BO	BHP	BFHP *	BFUP
Rapport eau/liant	≥ 0.40	0.30 à 0.40	0.30 à 0.40	0.15 à 0.25
Liant	300-400 kg/m ³	350 à 450 kg/m ³	350 à 550 kg/m ³	800 à 1000 kg/m ³
Ajouts minéraux	Parfois	Oui	Oui	Oui
Sable	Oui	Oui	Oui	Oui
Pierre	Oui	Oui	Oui	Non
Fibres	Non	Non	40 à 120 kg/m ³ (0.5 à 1.5 %-vol.)	160 à 480 kg/m ³ (2 à 6 %-vol.)
Propriétés	BO	BHP	BFHP *	BFUP
Compression - f'_c	20 à 40 MPa	50 à 90 MPa	50 à 90 MPa	120 à 180 MPa
Traction - f'_t	1.5 à 2.5 MPa	3.0 à 4.5 MPa	3.0 à 4.5 MPa	7 à 15 MPa
Module - E_c	20 à 25 GPa	25 à 35 GPa	25 à 35 GPa	30 à 45 GPa

Un premier aspect qui distingue les BFUP des autres matériaux est le rapport eau/liant beaucoup plus faible (environ 2 fois plus faible). L'absence de gros granulats (pierre) est également caractéristique des BFUP. Ces aspects, combinés à l'utilisation d'ajouts minéraux et d'une grande

quantité de ciment, confèrent au BFUP une compacité exceptionnelle qui induit des résistances très élevées, particulièrement en compression. La grande compacité de la matrice du BFUP lui confère également une durabilité exceptionnelle en condition non fissurée [21].

Une autre particularité des BFUP est la présence d'un volume important de fibres (majoritairement de 2 à 6 % vol.), généralement des fibres très courtes et fines (microfibres). Ces fibres permettent de reprendre les efforts de traction dès la formation des microfissures et permettent ainsi un excellent contrôle de la fissuration en comparaison aux autres bétons présentés au Tableau 2.1. À titre d'illustration, la Figure 2.1 présente de façon schématique la différence de fissuration qui pourrait être obtenue dans un élément en béton armé si le béton utilisé est du BO ou BHP, du BFHP (qui contient des fibres plus longues), ou encore du BFUP (qui contient un grand volume de fibres plus courtes). Pour une même ouverture totale de fissures de 0.3 mm, le nombre de fissure augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibres alors que l'ouverture de ces fissures diminue. Par exemple, alors qu'une seule fissure de 0.3 mm serait attendue avec du BO ou du BHP, 2 fissures de 0.15 mm auraient lieu avec du BFHP qui permet déjà un certain contrôle des fissures et plus de fissures mais d'ouverture bien plus faible (inférieures à 50 µm) auraient lieu avec du BFUP. En plus de conférer au BFUP une durabilité exceptionnelle en condition fissurée en comparaison aux autres bétons [21], les fissures beaucoup plus fines et moins profondes dans le BFUP permettent une augmentation significative de la résistance à la traction et de la ductilité en comparaison aux autres bétons présentés au Tableau 2.1. Cet aspect sera traité plus en détail dans la Section 2.1.3 suivante.

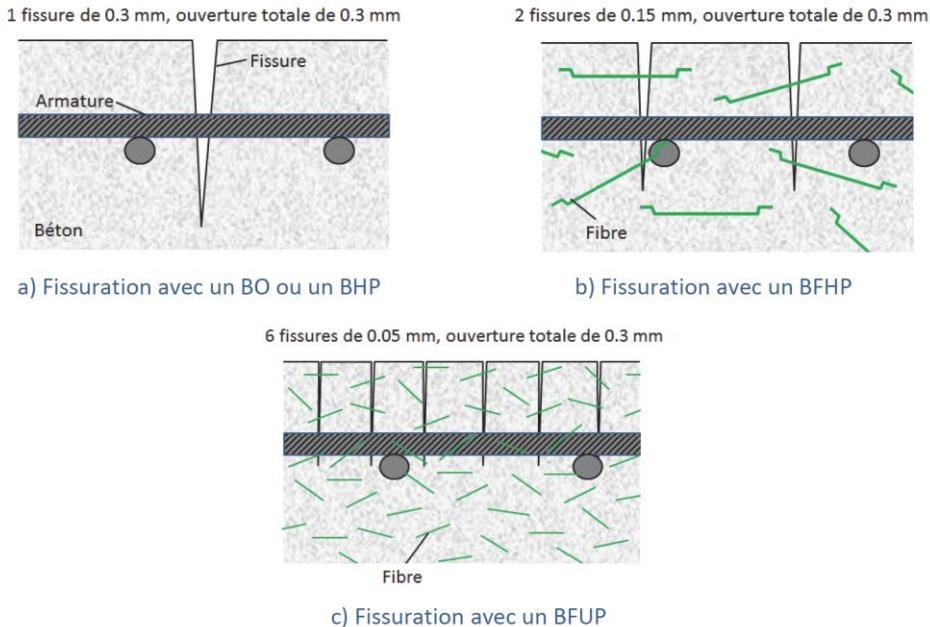


Figure 2.1 Répartition schématique des fibres pour des éléments structuraux en BO, en BFHP et en BFUP [21]

2.1.3 Comportement en traction des BFUP

Un aspect distinctif important des BFUP est leur comportement en traction. Celui-ci se caractérise par une résistance et une ductilité accrue en comparaison aux autres bétons sur le marché qui, lorsque le volume de fibres est suffisant, présente un comportement écrouissant en traction après la fissuration de la matrice. La Figure 2.2 illustre le comportement en traction typique d'un BFUP écrouissant en comparaison aux comportements des BO, BHP et BFHP. Cette figure est subdivisée en deux graphiques pour une meilleure compréhension, le comportement pré-pic (avant la formation d'une macrofissure localisée) en déformation à la Figure 2.2a et le comportement post-pic en ouverture de fissure à la Figure 2.2b.

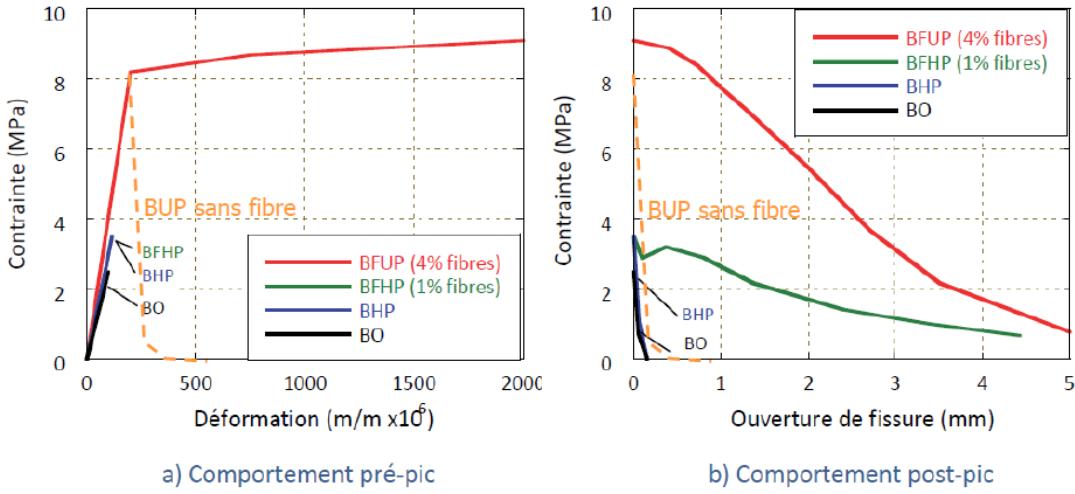


Figure 2.2 Comparaison du comportement en traction d'un BFUP écrouissant avec d'autres bétons [21]

En l'absence de fibres (BO et BHP), le comportement en traction des bétons est fragile et la résistance en traction diminue rapidement lorsque qu'une fissure apparaît. Lorsqu'une certaine quantité de fibres longues est ajoutée dans le BHP (exemple avec la courbe verte du BFHP contenant 1% vol. de fibres d'acier à la Figure 2.2), le comportement pré-pic est semblable aux bétons conventionnels. Cependant, une fois une macrofissure créée (à la résistance maximale), les fibres permettent de contrôler la propagation de la fissure et d'avoir un comportement ductile en post-pic avec une perte de capacité nettement plus lente que pour les bétons non fibrés. En ce qui concerne le BFUP, il présente une résistance élastique (fin de la partie linéaire en pré-pic) plus élevée que les autres bétons dû à son faible rapport eau/liant. Cette résistance élastique est similaire à celle qui aurait été obtenue pour le même béton sans fibres (BUP sur la Figure 2.2). Cependant, alors que le BUP présenterait un comportement fragile ensuite, la présence d'une grande quantité de fibres courtes dans le BFUP (exemple avec 4% vol. de microfibres d'acier à la Figure 2.2), permet l'apparition d'une grande quantité de microfissures avant d'atteindre la résistance maximale (Figure 2.2a). Ce comportement, appelé comportement écrouissant, procure au BFUP une capacité de déformation exceptionnelle avant la formation d'une macrofissure localisée au pic de résistance. Cette capacité de déformation est du même ordre de grandeur que la déformation de plastification d'une barre d'armature conventionnelle. En post-pic, tout comme dans le cas du BFHP, les fibres

dans le BFUP permettent de contrôler le développement de la macrofissure formée et la perte de la capacité se produit graduellement.

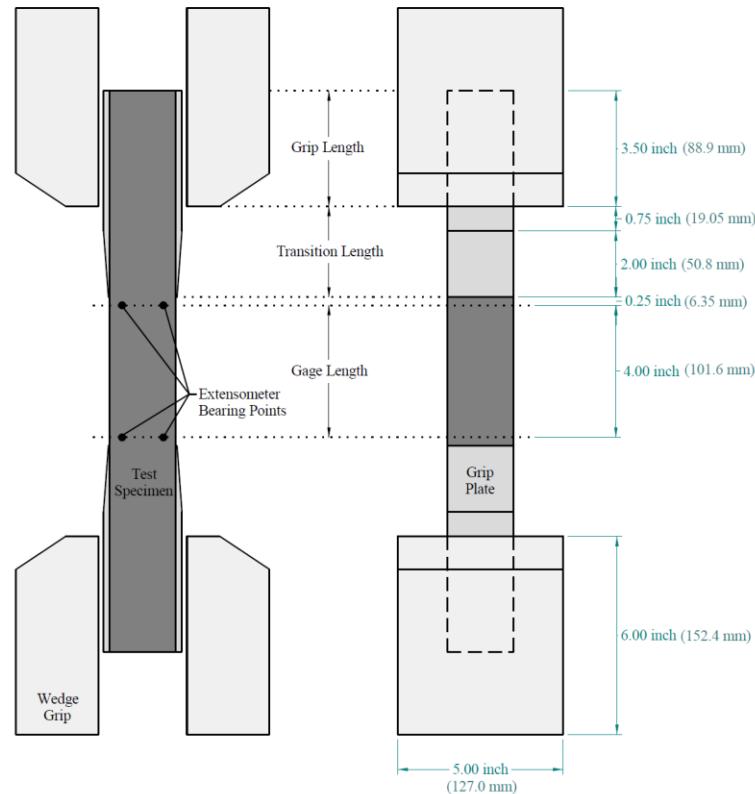
2.2 Méthode d'évaluation du comportement en traction des BFUP

Le comportement en traction est primordial pour bien caractériser la performance des BFUP et pouvoir en tenir compte lors du dimensionnement de structures utilisant ces matériaux. Pour avoir un portrait complet de la performance en traction du BFUP à l'échelle de la structure, il est important de connaître les méthodes de caractérisation à l'échelle du matériau (traction directe, ou indirecte via des essais de flexion) et de comprendre l'impact de l'orientation des fibres sur ce comportement pour comprendre l'impact de la méthode de mise en place du BFUP sur ses performances à l'échelle du matériau et de la structure.

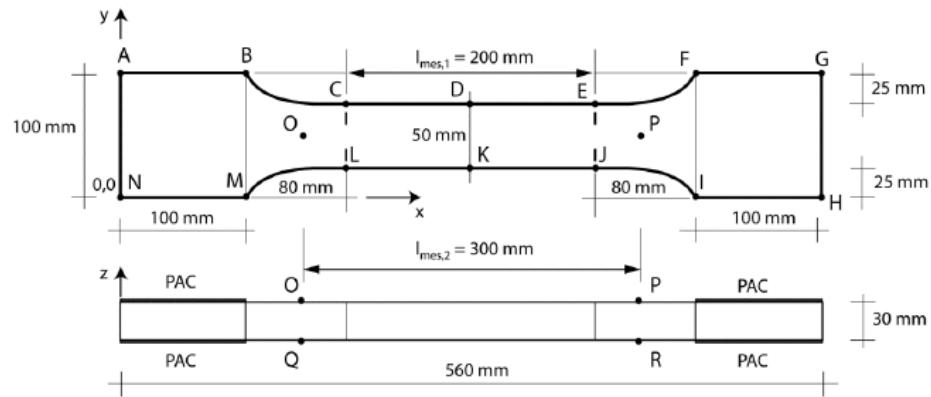
2.2.1 Essai de caractérisation en traction directe

La façon la plus directe d'obtenir le comportement en traction d'un matériau est de faire des essais de traction uniaxiale. De tels essais sont plus difficiles à réaliser que des essais de flexion et les laboratoires privés ne sont généralement pas équipés pour les faire.

Malgré ces difficultés, plusieurs essais de traction directe ont été développés pour le BFUP. Cette section se focalise sur les principaux, soit les essais développés par le FHWA (U.S. Department of Transportation [13]), à l'EPFL et adoptés par la norme Suisse SIA [12] et à Polytechnique Montréal [14]. Ces trois essais impliquent des spécimens minces dont les extrémités sont retenues par les mâchoires d'une presse hydraulique qui sollicite ensuite le spécimen en traction uni axiale dans son sens longitudinal. Les différences entre les trois essais résident principalement dans la géométrie du spécimen utilisé et la longueur de mesure de référence de l'allongement du spécimen. La Figure illustre les spécimens et/ou configuration d'essais utilisés par le FHWA [13], la norme SIA [12] et à Polytechnique Montréal [14], aux Figure a, b et c respectivement.

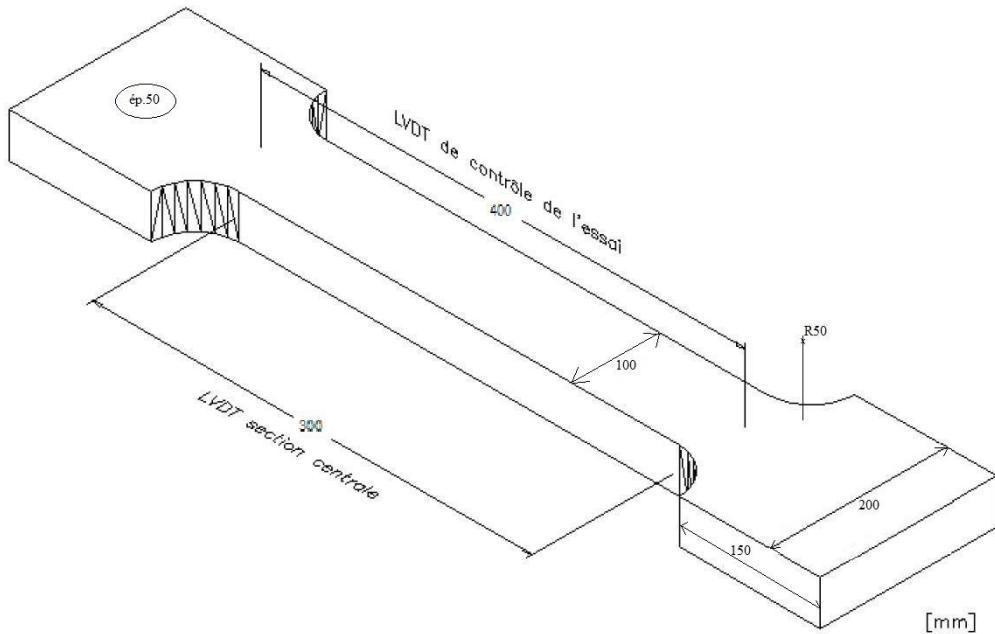


a) FHWA [13]



b) Norme SIA [12]

Figure 2.3 Essais de traction directe développés par différents groupes de recherche



c) Polytechnique Montréal [14]

Figure 2.3 Essais de traction directe développés par différents groupes de recherche (suite)

En ce qui concerne l'essai développé par le FHWA (Figure a), le spécimen est un prisme de section carrée de 50.8 mm x 50.8 mm. Cette géométrie de spécimen, en comparaison aux géométries en forme d'os utilisées par la SIA et Polytechnique Montréal (Figure b et c), a été choisie afin de pouvoir obtenir les spécimens par sciage ou avec un moule. L'obtention de spécimen en forme d'os est plus ardue par sciage. Deux longueurs de spécimens ont été étudiées, soit 304.8 mm et 431.8 mm, ce qui a permis de montrer qu'il était préférable d'utiliser les prismes les plus longs, soit avec une longueur de 431.8 mm (configuration illustrée à la Figure a). La longueur de mesure de l'allongement retenue est de 101.6 mm.

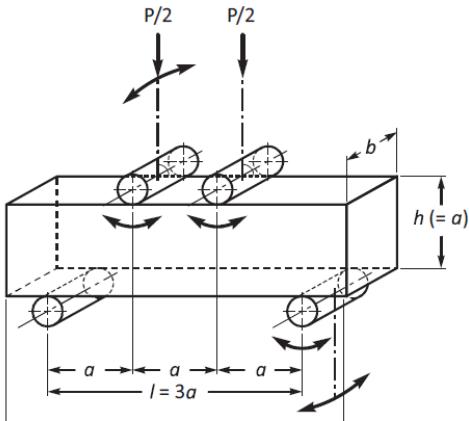
Pour la norme Suisse SIA, une géométrie de spécimen en forme d'os a été sélectionnée. Cette géométrie a pour objectif de forcer la fissuration dans la zone centrale rectangulaire de section 50 mm x 30 mm et de 200 mm de longueur (Figure b), tout en permettant d'avoir une zone élargie à l'endroit des mâchoires de la presse pour assurer un ancrage adéquat tout au long de l'essai. La zone de transition arrondie entre la partie centrale et la partie élargie a été conçue de manière à minimiser les concentrations de contraintes dans ces zones. Il est important que la courbure de cette

zone soit bien lisse (le plus arrondi possible) et c'est pourquoi il est plus facile de couler ces spécimens dans des moules individuels. La longueur de mesure de l'allongement dans la zone centrale est de 200 mm, soit un peu supérieure à celle utilisé dans l'essai du FHWA.

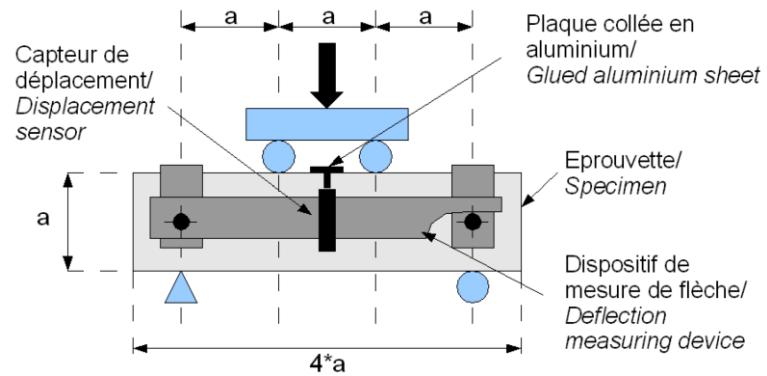
Finalement, l'essai développé à Polytechnique Montréal, avec un spécimen en forme d'os coulé dans un moule, ressemble à celui proposé par la SIA. Les dimensions du spécimen sont cependant un peu différentes (Figure c). Sa partie centrale est plus importante que pour la SIA avec une section de 100 mm x 50 mm et une longueur de 300 mm. Cette longueur correspond également à la longueur de mesure des déformations. Les parties élargies sont également plus grandes que pour le spécimen de la SIA, avec une section de 150 mm x 200 mm, et les dimensions de la zone de transition entre la zone centrale et les zones élargies diffèrent également. La zone de transition utilisée à Polytechnique Montréal est formée d'un quart de cercle parfait de rayon 50 mm.

2.2.2 Essai de caractérisation en flexion (traction indirecte)

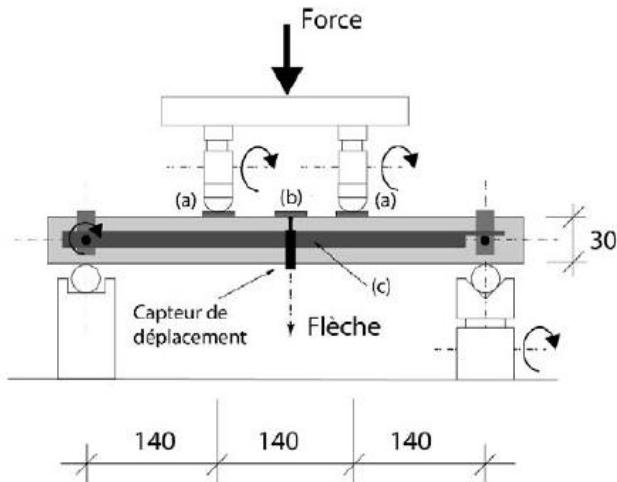
S'il n'est pas possible de réaliser des essais de traction directe, que ce soit pour des questions pratiques ou prescriptives, il est possible de déterminer le comportement en traction des BFUP de manière indirecte, via la réalisation d'un essai de flexion. Les résultats d'essais doivent alors être traités ensuite par une méthode dite d'analyse inverse afin d'en déterminer le comportement en traction directe. Les méthodes d'analyses inverses existantes seront décrites à la Section 2.3 alors que cette section se focalise sur les essais de flexion sur BFUP retrouvés dans différentes normes (en particulier les normes canadienne, française et suisse) ainsi que sur l'essai de flexion utilisé ces dernières années à Polytechnique Montréal. Les configurations d'essai indiquées dans les normes canadiennes (Annexe U de la CSA A23.1 [1] et Annexe de la Section 8 de la CSA-S6 [2]), française (AFGC [11]) et suisse (SIA [12]), ainsi que celle utilisée à Polytechnique Montréal [22], sont illustrées aux Figure a, b, c et d respectivement.



a) Normes canadiennes CSA A23.01-02 [1] et CSA S6 [2]

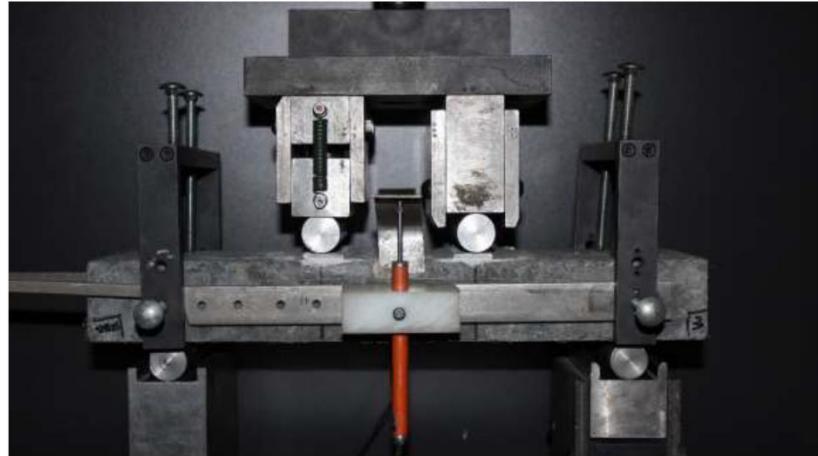


b) Norme française AFGC [11]



c) Norme suisse SIA [12]

Figure 2.4 Essais de flexion 4 points développés par différents groupes de recherche



d) Polytechnique Montréal [22]

Figure 2.4 Essais de flexion 4 points développés par différents groupes de recherche (suite)

En ce qui concerne les normes canadiennes actuelles, la CSA A23.1-02 [1] et la CSA-S6 [2] donnent les mêmes informations en ce qui concerne l'essai de flexion à réaliser sur le BFUP. Il s'agit d'un essai de flexion 4 points sur prismes carrés (Figure a). La dimension des prismes est fonction de la longueur des fibres tel qu'indiqué au Tableau 2.2. Plus les fibres sont longues, plus les dimensions du spécimen sont grandes. Étant donné que la portée durant les essais est égale à trois fois la hauteur du spécimen et que la distance entre les points d'application de la charge est égale à la hauteur du spécimen (Figure a), la configuration d'essai change également en fonction de la longueur fibres utilisées.

Tableau 2.2 Dimensions des spécimens de flexion, Table U.2 de l'Annexe U de la norme CSA
A23.01-02 [1]

Fibre length (l_f)	Nominal prism size
≤ 15 mm	75 mm \times 75 mm \times 280 mm
> 15 mm to 20 mm	100 mm \times 100 mm \times 370 mm
> 20 mm to 25 mm	150 mm \times 150 mm \times 550 mm
> 25 mm to 60 mm	200 mm \times 200 mm \times 720 mm

Dans le cas des BFUP dans l'industrie au Canada, il est moins fréquent que la longueur des fibres (l_f) dépasse 20 mm. Ainsi, seuls les prismes de 75 mm x 75 mm x 280 mm avec une portée de 225 mm et les prismes 100 mm x 100 mm x 370 mm avec une portée de 300 mm sont le plus souvent amenés à être utilisés pour le moment. Il n'est cependant pas improbable que les autres dimensions de spécimens présentées au Tableau 2.2 soient utilisées. Il est intéressant de noter que les normes canadiennes autorisent également la réalisation d'essai de traction directe pour le BFUP. Néanmoins, aucune directive n'est donnée sur l'essai à réaliser.

L'AFGC [11] et la SIA proposent également des essais de flexion 4 points. Dans l'AFGC, les dimensions des prismes et la configuration d'essai sont similaires à celles dans la norme canadienne, avec une section carrée qui varie en fonction de la longueur des fibres. Si la longueur des fibres est plus petite que 15 mm, la hauteur des prismes (« a » sur la Figure b) est de 70 mm et elle est de 100 mm si les fibres ont une longueur comprise entre 15 et 20 mm.

La norme SIA, quant à elle, préconise une géométrie différente des spécimens. Il s'agit cette fois de spécimens de section rectangulaire fixe de 100 mm x 30 mm et ayant une longueur de 500 mm. Durant l'essai, la portée est de 420 mm et la distance entre les points d'application de la charge est de 140 mm (Figure c). L'élancement, soit le ratio de la portée (L) sur la hauteur (h ou a), est donc beaucoup plus grand pour la SIA ($L/h = 14$) que pour les géométries adoptées pour l'AFGC ou les normes canadiennes ($L/h = 3$) (Figure). Un élancement plus élevé implique une plus grande flexibilité du spécimen et donc une plus grande flèche au centre avant l'atteinte de la charge maximale.

Les spécimens et la configuration d'essai utilisée depuis plusieurs années à Polytechnique Montréal (Figure d) s'inspire de l'essai de la SIA (section rectangulaire fixe et élancement plus grand que dans la norme canadienne et l'AFGC) mais avec des dimensions un peu différentes. Les dimensions du spécimen sont de 150 mm x 50 mm x 400 mm. La portée est de 300 mm et la distance « a » entre les points d'application de la charge est de 100 mm. L'élancement de ce type de spécimen est donc égal à 6, ce qui se situe entre l'élancement recommandé par la SIA et celui donné par la norme CSA A23.01-02 et par l'AFGC. À noter que les essais de flexion à Polytechnique Montréal sont aussi réalisés sur des spécimens de section 100 mm x 50 mm.

Les différentes géométries utilisées pour les essais de flexion décrits dans cette section sont résumées au Tableau 2.3. Il est important de prêter une attention particulière aux variations de dimensions et configurations d'essai (portée et élancement) puisqu'elles impactent la performance de la méthode d'analyse inverse qui sert ensuite à déterminer le comportement en traction directe.

Tableau 2.3 Comparaison des conditions d'essai de flexion 4 points sur des BFUP ayant des fibres de longueur maximale de 20 mm pour différentes méthodes

Essai de flexion 4 points	Largeur (mm)	Hauteur (mm)	Longueur (mm)	Portée (mm)	Élancement (L/h)
CSA A23.01-02	75 ou 100	75 ou 100	280 ou 370	225 ou 300	3
AFGC	70 ou 100	70 ou 100	280 ou 400	210 ou 300	3
SIA	100	30	500	420	14
Polytechnique	150	50	400	300	6

2.2.3 Définition et importance de l'orientation des fibres

En plus des conditions d'essais (géométrie des spécimens, configurations d'essais), l'orientation des fibres dans le spécimen influence le comportement obtenu, que ce soit en traction ou en flexion. L'action d'une fibre à contrôler une fissure sera maximisée si l'axe longitudinal de la fibre est situé perpendiculairement à la fissure. L'orientation d'une fibre est définie selon l'angle θ formé entre de l'axe longitudinal de la fibre et la normale au plan de coupe tel qu'illustré à la Figure 2.5. Afin d'évaluer l'efficacité des fibres, ce plan de coupe est généralement fait proche d'une fissure et parallèlement à celle-ci.

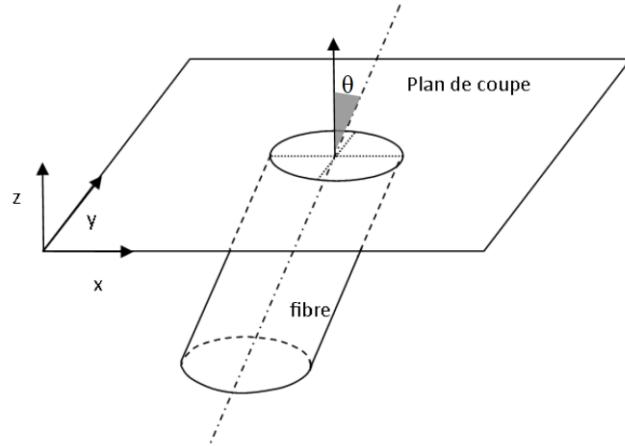


Figure 2.5 Angle d'inclinaison θ d'une fibre par rapport à un plan de coupe [23]

L'objectif des fibres dans les BFUP est de reprendre les efforts de traction. Étant donné que ces efforts génèrent des fissures perpendiculaires à la direction de l'effort, plus les fibres sont orientées parallèlement à l'effort et plus elles sont efficaces. Afin d'évaluer l'efficacité des fibres dans un BFUP sollicité en traction, le plan de coupe est donc effectué proche des fissures et parallèlement à celles-ci, tel qu'illustré à la Figure 2.6, afin que l'angle θ de chaque fibre avec le plan de coupe soit mesuré. Plus cet angle est faible (jusqu'à un angle théorique de 0°), meilleure est l'efficacité de la fibre évaluée. À l'inverse, une fibre orientée à 90° est défavorablement orientée et ne sera pas efficace. L'efficacité totale des fibres dans le BFUP est alors dépendante du nombre de fibres (densité) ainsi que de l'orientation moyenne de l'ensemble des fibres (moyenne de l'orientation de chaque fibre).

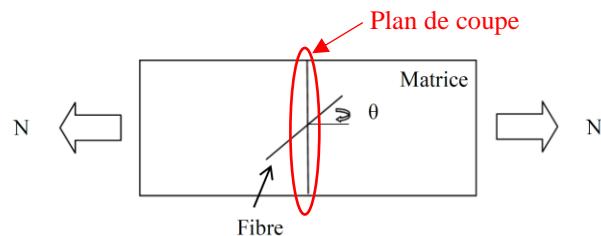


Figure 2.6 Orientation des fibres dans un élément en BFUP selon l'effort de traction [24]

Afin d'avoir un coefficient d'efficacité des fibres plus intuitif à utiliser, il est également possible de déterminer, à partir d'un certain angle θ , un coefficient d'orientation des fibres (α) correspondant au cosinus directeur donné via l'Équation (2.1) tel que proposé par Lee [24]. Ceci permet d'avoir un coefficient qui varie entre 0 et 1, une valeur « 0 » signifiant un impact nul des fibres sur la propagation des fissures alors qu'une valeur de « 1 » signifie un impact positif maximal.

$$\alpha = \cos \theta \quad (2.1)$$

2.2.4 Principaux facteurs influençant l'orientation des fibres

Plusieurs paramètres influencent l'orientation des fibres dans un élément en BFUP. Parmi ces derniers, il y a la méthode de mise en place, la géométrie des spécimens et le positionnement des parois de coffrage, la présence d'armature, de chaises ou de tout autre obstacle à l'écoulement du BFUP, le type de fibres et la consistance (maniabilité et viscosité) du BFUP. Étant donné qu'il n'y aura pas d'armature ou autre obstacle dans les spécimens étudiés dans ce projet et que les fibres sont généralement semblables dans tous les BFUP, ces aspects ne seront pas abordés ici. Cette section se focalisera donc sur l'effet de la méthode de mise en place, de la géométrie des spécimens et de l'effet des parois de coffrage. Ces points seront abordés tour à tour dans les sous-sections suivantes.

2.2.4.1 Influence de la méthode de mise en place du BFUP

Comme les BFUP sont généralement des bétons autoplaçants avec une bonne maniabilité tout en conservant une certaine viscosité, les fibres ont tendance à s'aligner parallèlement au sens de l'écoulement du BFUP. Le choix de la méthode de mise en place, qui influence directement le sens d'écoulement du BFUP, a donc une très grande influence sur l'orientation des fibres et donc sur la performance en traction de l'élément coulé.

En ce qui concerne les spécimens de caractérisation utilisés pour les essais de traction et de flexion (Sections 2.2.1 et 2.2.2), l'objectif est d'avoir des fibres orientées préférentiellement, soit majoritairement dans le sens longitudinal du spécimen, parallèles à l'effort de traction. Il existe plusieurs méthodes de mise en place qui visent à favoriser cette orientation. La Figure 2.7 présente deux des méthodes de mise en place possibles.

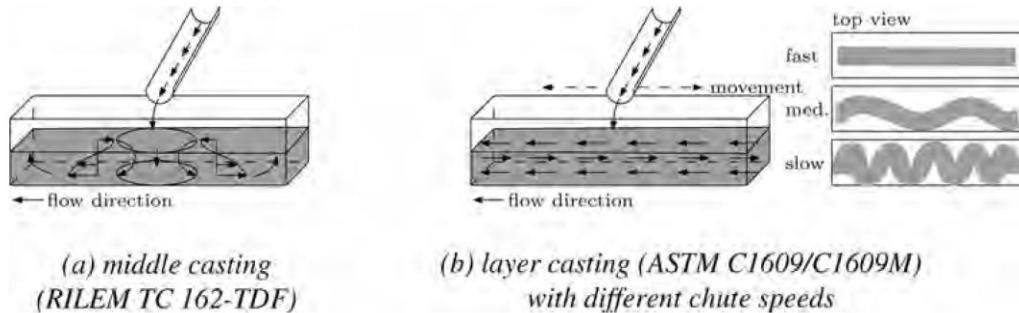


Figure 2.7 Mise en place au centre et par passes pour des essais de flexion [25]

La première méthode (Figure 2.7a) consiste à couler le spécimen depuis son centre. Le béton frais déposé au centre aura alors tendance à s’écouler vers les extrémités du spécimen et suivre le sens longitudinal de celui-ci. L’orientation des fibres dans la zone centrale n’est cependant pas optimale avec cette méthode de mise en place puisque les fibres sont plus orientées dans le sens transversal du spécimen que dans son sens longitudinal. Cette zone étant généralement l’endroit où la rupture est attendue en flexion, cette méthode n’est pas optimale.

La deuxième méthode de mise en place est réalisée par mouvements longitudinaux (ou « par passes ») (Figure 2.7b). L’objectif de cette méthode est de forcer l’écoulement selon un sens précis en déposant le matériau dans le coffrage via des mouvements de va et vient. Cette méthode permet d’orienter les fibres de manière plus optimale et plus uniforme dans le spécimen. Cette méthode est particulièrement simple et efficace pour des petits spécimens et est donc bien adaptée à des spécimens de caractérisation. Wille et al. [25] ont comparé la performance des méthodes de coulée depuis le centre et par mouvements longitudinaux pour des essais de caractérisation en flexion sur prismes (Figure 2.8). Dans cette étude, la vitesse des mouvements longitudinaux était également variable et différents BFUP (type, longueur et dosage en fibres) ont été étudiés. Pour bien évaluer la performance des deux méthodes de mise en place, la géométrie des spécimens testés était constante (102 mm x 102 mm x 406 mm) avec une portée de 305 mm. Cette configuration est similaire à celle spécifiée par la norme CSA A23.01-02.

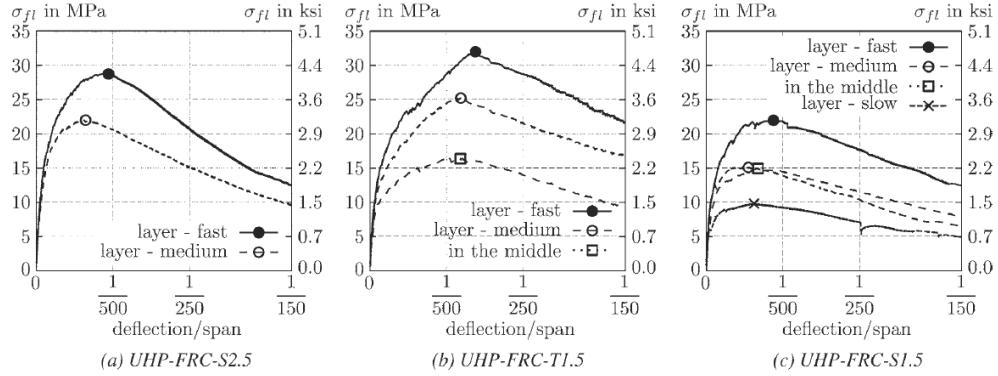


Figure 2.8 Performance en flexion de prismes pour différentes méthodes de mise en place [25]

Pour chaque BFUP testé (Figure 2.8a, b ou c), la mise en place par mouvements de va et vient longitudinaux (appelée « layer ») a permis d'obtenir un comportement accru en flexion, signe d'une meilleure orientation des fibres dans les spécimens. Il est également intéressant de noter que la vitesse des mouvements a aussi une influence. Plus les mouvements sont rapides, plus le BFUP se dépose selon le sens longitudinal du spécimen et donc oriente bien les fibres.

Une troisième méthode de mise en place, notamment retrouvée dans les normes canadiennes actuelles ([1], [2]), consiste à couler le spécimen depuis une extrémité pour assurer un écoulement selon l'axe longitudinal du spécimen. Cette méthode donne généralement de bons résultats pour des spécimens élancés (type plaque ou dalle). Cependant, pour des spécimens plus trapus (type poutre), l'écoulement tend à s'aligner davantage verticalement si plusieurs couches sont utilisées ce qui donne de moins bons résultats. Zhou et Uchida [26] ont étudié ce phénomène en coulant depuis l'extrémité un prisme d'acrylique contenant des fibres synthétiques. Trois couches d'acrylique de différentes couleurs ont été coulées successivement dans un moule transparent. La Figure 2.9 illustre les résultats de l'expérience réalisée.

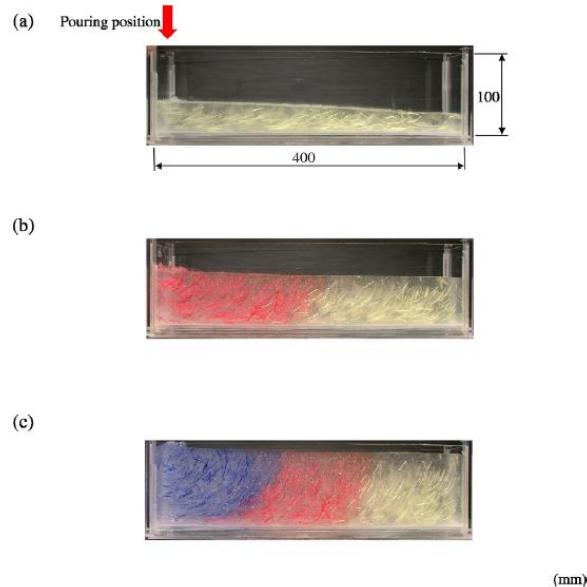


Figure 2.9 Orientation des fibres avec mise en place depuis l’extrémité dans un prisme transparent [26]

Il est possible de remarquer que les fibres de la première couche sont relativement bien orientées selon le sens longitudinal du prisme avant la coulée des autres couches (Figure 2.9a). Par la suite, lorsqu’une nouvelle couche est ajoutée depuis l’extrémité (Figure 2.9b et c), elle semble pousser sur la couche précédente et entraîne un écoulement qui est davantage vertical qu’horizontal. Ainsi, à mesure que la quantité de matériau augmente dans le moule, l’orientation des fibres devient de moins en moins préférentielle puisque ces dernières adoptent progressivement une orientation oblique plutôt qu’horizontale

Étant donné l’influence de la méthode de coulée sur l’orientation des fibres et, par suite, sur la performance en traction et/ou flexion des spécimens de caractérisation, il apparaît important d’utiliser une méthode de mise en place similaire dans des spécimens de traction et de flexion destinés à valider une méthode d’analyse inverse. À Polytechnique Montréal, les spécimens en forme d’os utilisés ces dernières années pour les essais de caractérisation en traction directe (Figure c) sont coulés avec des mouvements de va et vient longitudinaux. Cette technique de mise en place permet de remplir facilement le moule et d’avoir un écoulement longitudinal dans la zone centrale de l’os. Dans le but d’avoir la même méthode de mise en place en traction et en flexion, les moules des spécimens de flexion sont également remplis avec des mouvements longitudinaux de va et

vient malgré la recommandation d'une méthode de mise en place en une seule couche depuis l'extrême dans la norme CSA A23.01-02 pour les spécimens de flexion.

2.2.4.2 Influence des parois de coffrage

Un autre aspect important à considérer pour l'orientation des fibres dans un spécimen est l'effet de paroi. Ce phénomène est issu de l'effort de cisaillement engendré par l'écoulement du matériau près d'une paroi coffrée. En effet, tel qu'illustré à la Figure 2.10, Les fibres ont tendance à fortement s'aligner dans le sens de l'écoulement près des parois de coffrages, en plus de s'aligner avec l'axe de la paroi coffrée lorsque les fibres entrent en contact avec celle-ci.

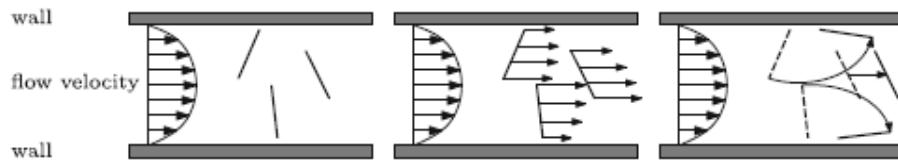


Figure 2.10 Schématisation de l'orientation des fibres près des parois de coffrage [27]

L'écoulement du BFUP se fait plus lentement près d'une paroi coffrée tel qu'illustré sur la Figure 2.10. L'extrême d'une fibre qui est près de la paroi bouge moins rapidement que l'autre extrémité qui est dans une zone où l'écoulement est plus rapide. Cette différence d'écoulement crée un effet de cisaillement dans le BFUP et qui tend à aligner les fibres parallèlement au sens d'écoulement près des parois coffrées (partie droite de la Figure 2.10). C'est d'ailleurs pourquoi on retrouve les meilleures orientations de fibres près des coffrages. L'effet de paroi dépend de la géométrie du spécimen et de la longueur des fibres [28]. En effet, un élément mince avec de longues fibres aura une meilleure orientation de fibres qu'un élément trapu avec des fibres courtes, étant donné la plus grande proximité du flux de BFUP aux parois de l'élément mince.

Une bonne compréhension de l'impact de la mise en place et des parois de coffrage sur l'orientation des fibres dans un spécimen permet de comprendre les différences d'orientation des fibres attendues à l'échelle du matériau (spécimen de caractérisation) et à l'échelle de la structure. Pour tenir compte de ces différences et de l'impact de l'orientation des fibres sur le comportement structural, des facteurs pénalisants sont utilisés par plusieurs normes pour concevoir des éléments en BFUP. Par exemple, l'AFGC publie en 2013 des recommandations pour la conception

d'éléments structuraux en BFUP [11]. Dans ces recommandations, un facteur K est utilisé pour réduire la résistance dans le but de tenir compte de l'orientation des fibres. Lorsque K est égal ou supérieur à un ($K \geq 1$), cela indique que l'orientation des fibres n'est pas optimale et qu'elle diminue la résistance en traction du matériau et vis-versa. Le facteur K est donc un peu inverse au coefficient d'orientation α présenté précédemment. L'AFGC recommande d'utiliser des valeurs supérieures à 1 dans toutes situations de conception. C'est donc dire que l'orientation et la dispersion des fibres en 3D dans un ouvrage font en sorte que celles-ci ont une efficacité moindre que ce qui est mesuré sur les spécimens de caractérisation. L'AFGC propose également une méthode expérimentale visant à déterminer les coefficients d'orientation des fibres de façon plus précise. La Figure 2.11 présente un exemple d'application du facteur K proposé par l'AFGC [11].

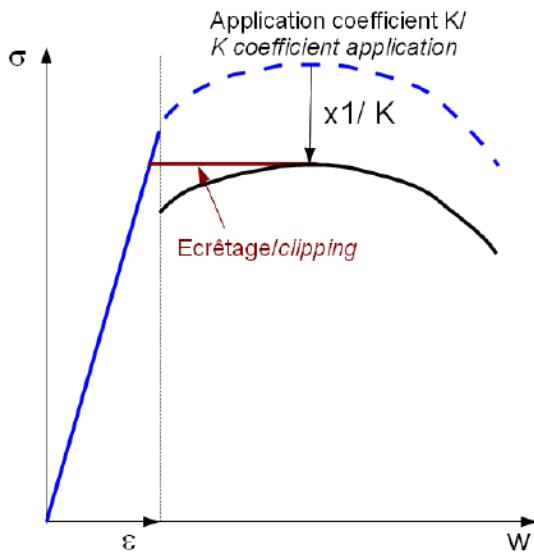


Figure 2.11 Exemple d'application du facteur K proposé par l'AFGC [11]

L'Annexe A8.1 de la norme CSA S6-19 [2] propose un coefficient d'efficacité des fibres (γ_F) pour tenir compte de l'orientation et de la répartition des fibres. Ce coefficient est très similaire, mais inverse à celui proposé par l'AFGC. Ce coefficient est donc toujours inférieur à 1 (< 1) et il multiplie le comportement en traction du matériau pour tenir compte de l'orientation et de la répartition plus ou moins favorable des fibres. Ce coefficient varie de 0.3 à 0.8 dépendamment de l'élément structural analysé. Le coefficient γ_F peut également être déterminé expérimentalement.

Tel qu'illustré par Resplendino et Toutlemonde lors d'un symposium international sur le BFUP en 2013 à Marseille [29], un des atouts importants des BFUP par rapport au béton conventionnel est la possibilité de faire des éléments très minces, et donc de diminuer le poids de ceux-ci. Tel qu'il sera illustré à la Section 2.2.4, des éléments minces favorisent une bonne orientation des fibres dans leur matrice.

2.2.5 Impact de l'orientation des fibres sur le comportement en traction

Duque et Graybeal [30] ont étudié le comportement en traction directe de plusieurs spécimens de BFUP (2% de fibres courtes avec $l_f = 12.7$ mm et $d_f = 0.2$ mm) avec différentes orientations de fibres. Pour obtenir différentes orientations des fibres, une grande dalle a été coulée depuis son extrémité tel qu'illustrée à la Figure 2.12 pour favoriser un écoulement selon sa direction longitudinale et ainsi favoriser une orientation des fibres selon la même direction. Des spécimens ont ensuite été sciés selon différentes directions, soit selon le sens d'écoulement (spécimens bleus d'orientation théorique préférentielle de 0°), perpendiculairement au sens d'écoulement (spécimens verts d'orientation théorique défavorable de 90°) et à 45° par rapport au sens d'écoulement (spécimens rouges d'orientation théorique intermédiaire de 45°). Le comportement en traction de ces spécimens a ensuite été évalué et comparé aux résultats obtenus sur des spécimens de même dimension mais coulés dans des moules individuels (courbes noires à la Figure 2.12).

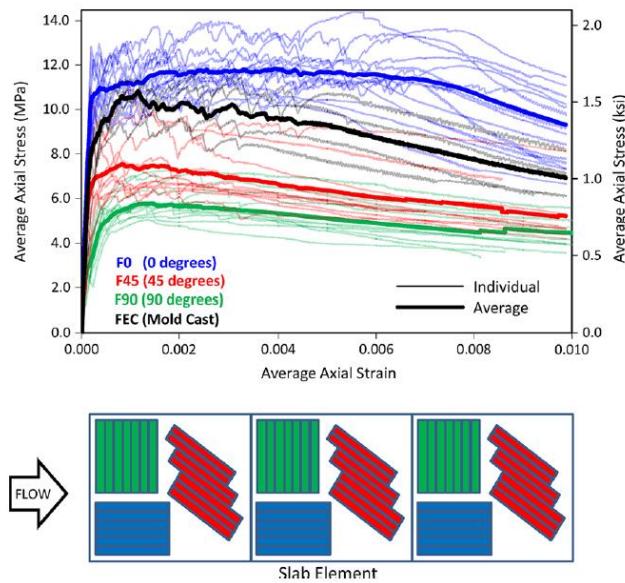


Figure 2.12 Impact de l'orientation des fibres sur le comportement en traction d'un BFUP [30]

Pour les spécimens extraits de la dalle, meilleure est l'orientation des fibres (soit de 90 à 0°), meilleures sont la contrainte et la déformation maximales au pic. La performance des spécimens coulés dans des moules individuels (courbes noires) est légèrement inférieure à celle observée sur les spécimens sciés selon le sens d'écoulement des fibres dans la dalle (courbes bleues). Ceci s'explique par le fait qu'il est plus difficile d'assurer un écoulement longitudinal sur de plus petits spécimens et donc plus difficile d'orienter favorablement les fibres sur les spécimens des courbes noires.

Delsol [23] a également étudié l'impact de l'orientation des fibres sur le comportement pré-pic et post-pic d'un BFUP contenant 4% de fibres ($l_f = 10 \text{ mm}$ et $d_f = 0.2 \text{ mm}$). Dans cette étude, le comportement en traction directe a été évalué sur des spécimens en forme d'os coulés dans des moules individuels. Les différentes orientations des fibres ont été obtenues en utilisant des séparateurs inclinés selon les angles théoriques souhaités (0, 22.5, 45 et 90 degrés par rapport à la direction de l'effort de traction) pour forcer les fibres à s'aligner selon ces directions. La Figure 2.13 illustre les comportements pré-pic (en contrainte-déformation, Figure 2.13a) et post-pic (en contrainte-ouverture de fissure, Figure 2.13b) obtenus sur ces spécimens.

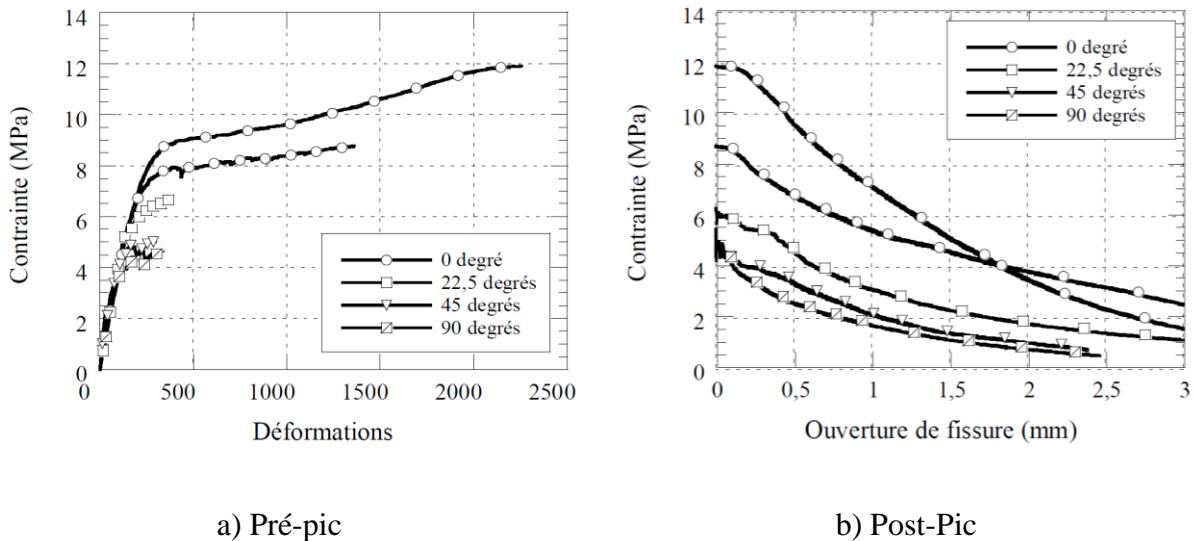


Figure 2.13 Comportement pré-pic et post-pic d'un BFUP pour différentes orientations des fibres
[23]

La contrainte maximale et la déformation maximale en pré-pic (Figure 2.13a) sont beaucoup plus élevées lorsque l'orientation des fibres est meilleure, soit lorsque les fibres sont plus alignées avec l'effort de traction. Ces résultats sont cohérents avec ceux présentés précédemment à la Figure 2.12. Une orientation plus préférentielle des fibres induit également un comportement post-pic plus ductile (Figure 2.13b) avec une énergie de rupture (aire sous la courbe) plus importante.

2.2.6 Impact de l'orientation des fibres sur le comportement en flexion

Lors d'un essai de flexion, la partie inférieure du spécimen est sollicité en traction alors que la partie supérieure est sollicitée en compression. La résistance en traction étant bien moindre que la résistance en compression, c'est le premier qui contrôle le comportement global du spécimen en flexion. L'orientation des fibres dans la partie tendue du spécimen a donc un impact majeur sur son comportement en flexion.

Behloul [31] a étudié le comportement en flexion de prismes en BFUP (ayant 2% de fibres avec $l_f = 13 \text{ mm}$ et $d_f = 0.16 \text{ mm}$) de $40 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ avec différentes orientations des fibres sur des prismes extrait d'une grande plaque mince de $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$. La Figure 2.14 présente la méthodologie utilisée pour obtenir des spécimens ayant des orientations de fibres différentes. Une plaque mince de $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ contenant des séparateurs espacés de 12 mm qui orientent l'écoulement du BFUP (et donc des fibres) a été coulée. Les spécimens de flexion ont ensuite été sciés dans cette dalle pour obtenir des orientations de 90, 67.5, 45, 22.5 et 0 degrés par rapport à l'axe longitudinal des spécimens. Il est important de remarquer à la Figure 2.14 que les angles sont inversés par rapport à la définition présentée à la Section 2.2.3. Ainsi, dans cette étude, l'orientation des fibres (θ) préférentielle, soit parallèle au sens longitudinal des spécimens, est définie comme étant égale à 90 degrés alors que la valeur de 0 degré correspond à une orientation défavorable.

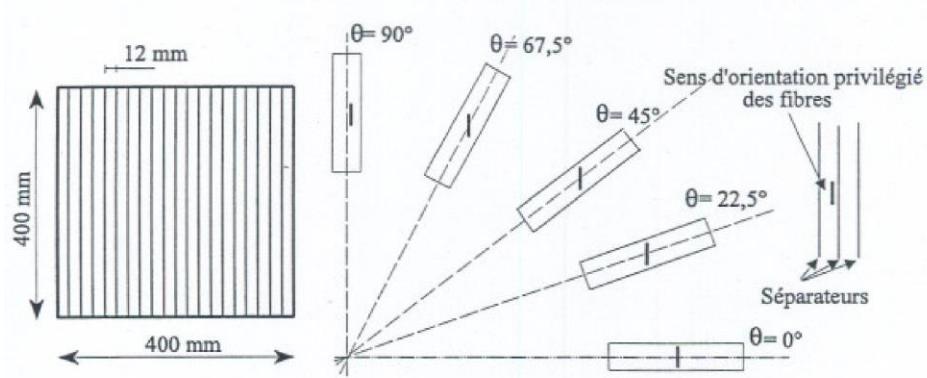


Figure 2.14 Obtention des spécimens de flexion 4 points lors de l'étude menée par Behloul [31]

Les essais de flexion ont été réalisés avec une portée de 150 mm et un espacement des points d'application de la charge de 50 mm. La Figure 2.15 présente le comportement en flexion obtenu selon l'orientation théorique des fibres dans les spécimens (0 à 90° allant d'une orientation défavorable à une orientation favorable).

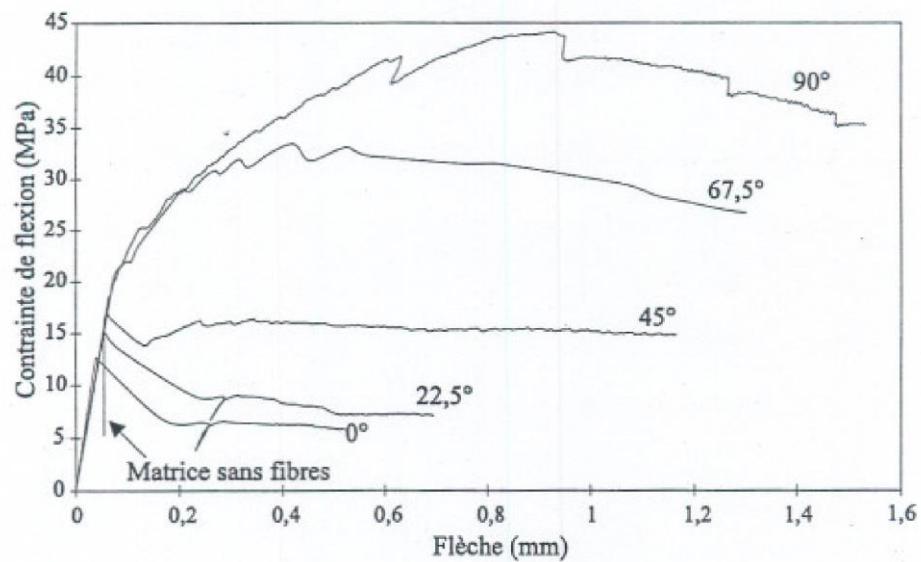


Figure 2.15 Impact de l'orientation des fibres sur le comportement en flexion des BFUP [31]

Logiquement, tel qu'observé sur le comportement en traction directe (Section 2.2.5), la contrainte maximale de flexion ainsi que la flèche au pic (et par suite la déformation à la fibre tendue) augmentent à mesure que les fibres deviennent de mieux en mieux orientées. Également, la perte de capacité après l'atteinte du pic de flexion est plus graduelle pour les spécimens ayant des fibres mieux orientées, leur conférant donc un comportement plus ductile. Tout comme pour les éléments sollicités en traction directe, il est donc primordial d'avoir une orientation des fibres adéquate dans un élément en BFUP sollicité en flexion pour maximiser la performance de celui-ci. Il est également intéressant de mentionner que les spécimens avec les fibres moins bien orientées sont plus performant que les spécimens sans fibres. C'est donc dire que peu importe l'orientation des fibres, l'ajout de fibres à la matrice d'un BFUP a toujours un impact positif sur le comportement en flexion et en traction.

2.3 Méthodes d'analyses inverses

Tel qu'indiqué à la Section 2.2.2, le comportement en traction directe des BFUP peut être déterminé de manière indirecte, via la réalisation d'un essai de flexion. Pour ce faire, les résultats de l'essai de flexion doivent être traités par une méthode d'analyse inverse.

Ce projet de recherche vise à évaluer la performance de méthodes existantes de calcul inverse pour ensuite en proposer une version mieux adaptée au contexte des normes canadiennes (pour les BFUP et les géométries de spécimens de caractérisation associés). Les méthodes de calcul inverse existantes pour les BFUP sont celles proposées dans la norme suisse SIA [12], dans la norme française de l'AFGC [11] ainsi que les deux méthodes développées par López [15], soit une méthode dite itérative et une méthode simplifiée. Cette méthode simplifiée a été intégrée dans la norme canadienne CSA-S6 [2] alors que la norme CSA-A23.01-02 [1] propose d'utiliser la méthode SIA [12]. Étant donné que la méthode de calcul inverse intégrée dans la norme AFGC est plus complexe à appliquer, elle ne sera pas utilisée pour ce projet et la présente section se focalise donc plus sur la présentation des méthodes de López et celle de la SIA.

2.3.1 Méthode Lopez itérative [15]

La méthode d'analyse inverse itérative développée par Lopez [15] a été validée sur des spécimens de section carrée sollicités en flexion 4 points selon les mêmes conditions d'essai que ce qui est

proposé par les normes canadiennes (Figure a). Différentes dimensions de sections ont été étudiées, soit des sections de 50 mm, 100 mm et 150 mm de côté.

Pour développer sa méthode d'analyse inverse, Lopez prend l'hypothèse que le BFUP à l'étude présente un comportement écrouissant en pré-pic (Figure 2.16b) puis un comportement adoucissant en post-pic (Figure 2.16c). Autant pour la partie pré-pic que la partie post-pic, le comportement décrit est de type bilinéaire et le module élastique est considéré identique en traction et en compression.

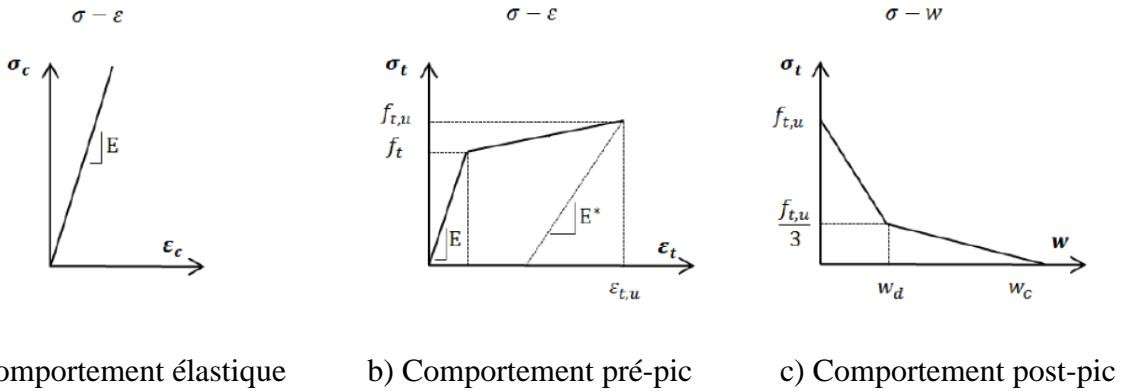


Figure 2.16 Comportement en traction hypothétique considéré par Lopez pour l'analyse inverse
[15]

Lopez pose également l'hypothèse qu'une rotule plastique se produit après la macrofissuration en zone de moment constant, soit au centre du spécimen de flexion 4 points, sur une distance égale au tiers de la portée ($L/3$). Cette hypothèse permet de convertir le comportement post-pic initialement exprimé en contrainte-ouverture de fissure (Figure 2.16c) en comportement exprimé en contrainte-déformation. Ceci permet de décrire le comportement en traction via une seule courbe exprimée en contrainte-déformation et comprenant à la fois les comportements pré-pic et post-pic. Cette courbe comprend alors quatre segments linéaires (Figure 2.17b).

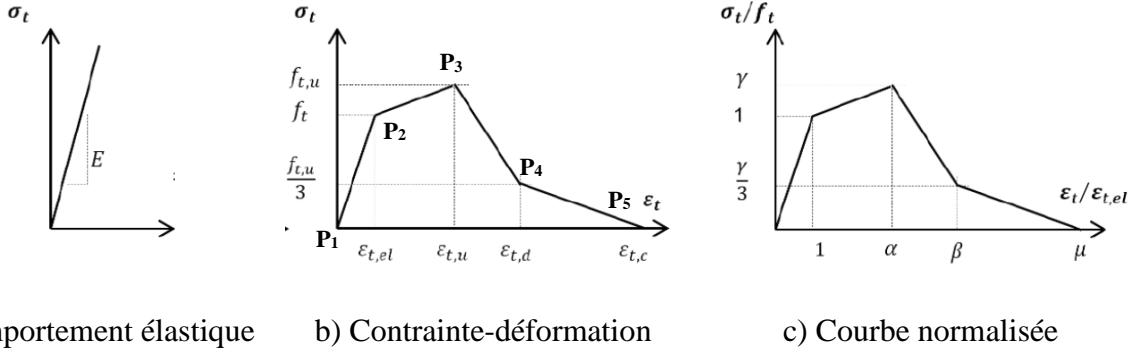


Figure 2.17 Courbe de traction en contraintes-déformations proposée par Lopez [15]

Les déformations correspondant aux deux points en post-pic de la courbe de la Figure 2.17b, soit $\varepsilon_{t,d}$ et $\varepsilon_{t,c}$, sont déterminées à partir des Équations (2.2) et (2.3) dans lesquelles w_d et w_c sont les ouvertures de fissures en post-pic (Figure 2.16c), E^* est le module de déchargement (Figure 2.16b) et $\varepsilon_{t,u}$ et $f_{t,u}$ la déformation et la contrainte ultime en traction (Figure 2.17b). Le paramètre s est égal à la longueur de la rotule plastique, soit $L/3$.

$$\varepsilon_{t,d} = \frac{w_d}{s} + \varepsilon_{t,u} - \frac{2 f_{t,u}}{3 E^*} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_{t,c} = \frac{w_c}{s} + \varepsilon_{t,u} - \frac{f_{t,u}}{E^*} \quad (2.3)$$

Finalement, pour faciliter le calcul itératif qui suivra, les contraintes et déformations en traction de la Figure 2.17b sont normalisées, en fonction de la contrainte élastique f_t et en fonction de la déformation élastique $\varepsilon_{t,el}$ respectivement (Équations (2.4) à (2.8)) pour obtenir les paramètres α , β , μ et γ illustrés à la Figure 2.17c.

$$\varepsilon_{t,el} = \frac{f_t}{E} \quad (2.4)$$

$$\alpha = \frac{\varepsilon_{t,u}}{\varepsilon_{t,el}} \quad (2.5)$$

$$\beta = \frac{\varepsilon_{t,d}}{\varepsilon_{t,el}} \quad (2.6)$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_{t,c}}{\varepsilon_{t,el}} \quad (2.7)$$

$$\gamma = \frac{f_{t,u}}{f_t} \quad (2.8)$$

Le processus itératif développé par Lopez vise ensuite à minimiser les erreurs entre la courbe de flexion expérimentale et la courbe de flexion théorique calculée à partir de la courbe de traction présentée précédemment. Les deux courbes de flexion sont comparées sous la forme moment-courbure, ce qui nécessite un traitement mathématique pour les courbes expérimentale et théorique.

Pour la courbe de flexion expérimentale, le moment s'obtient simplement en multipliant la force mesurée par $L/3$. La courbure est quant à elle déterminée par l'équation (2.9) [15].

$$\phi(x) = \max \left\{ -\frac{216}{23 L^2} \left[\delta - \frac{12 P}{25 E b} \left(\frac{L}{h} \right) \right], \frac{72}{5 L^2} \left[\delta - \frac{P}{6 E b} \left(\frac{L}{h} \right)^3 - \frac{12 P}{25 E b} \left(\frac{L}{h} \right) \right] \right\} \quad (2.9)$$

Où P : Force (kN), δ : Flèche (mm), L : Portée (mm), b : Largeur (mm), h : Hauteur (mm)

$$Et \quad E = \frac{P_i}{\delta_i b} \left[\frac{23}{108} \left(\frac{L}{h} \right)^3 + \frac{12}{25} \left(\frac{L}{h} \right) \right] \quad (2.10)$$

Où P_i et δ_i : Force et flèche associés à un point dans la zone élastique

En ce qui concerne la courbe moment-courbure théorique, elle est subdivisée en quatre phases. Les équations utilisées pour déterminer la courbure pour chacune de ces phases sont indiquées au Tableau 2.4. Dans le Tableau 2.4 et le Tableau 2.5, les paramètres α , β , γ , f_t et E sont ceux illustrés à la Figure 2.17.

Tableau 2.4 Équations pour déterminer la courbure théorique pour chaque phase selon la méthode Lopez itérative [15]

ϕ Intervals	
End of Stage I	$\phi_{el} = \frac{2f_t}{Eh}$
End of Stage II	$\phi_u = \frac{f_t h \alpha + f_t h B_u}{Eh^2}$ $B_u = \sqrt{\alpha + (\alpha - 1)\gamma}$
End of Stage III	$\phi_d = \frac{3f_t \beta + \sqrt{3}f_t B_d}{3Eh}$ $B_d = \sqrt{3\alpha - (3 + \alpha - 4\beta)\gamma}$
End of Stage IV	$\phi_c = \frac{3f_t \mu + \sqrt{3}f_t B_c}{3Eh}$ $B_c = \sqrt{\alpha(3 - \gamma) + \gamma(3\beta + \mu - 3)}$

Une fois la courbure théorique ϕ déterminée, le moment de flexion théorique associé est calculé via les équations présentées dans le Tableau 2.5.

Tableau 2.5 Équations pour calculer le moment théorique dans la méthode itérative [15]

<p>Stage I $\phi \leq \phi_{el}$</p> $M_I(\phi) = \frac{bh^3}{12} E\phi$
<p>Stage II $\phi_{el} \leq \phi \leq \phi_u$</p> $M_{II}(\phi) = \frac{bh}{6E(\alpha - \gamma)^2 \phi} [A_{M1h}\phi^2 + A_{M2h}C_{M1h} + Eh\phi(A_{M3h} + A_{M4h}C_{M1h})]$ $A_{M1h} = 2E^2h^2(\gamma - 1)(\alpha + \gamma - 2)$ $A_{M2h} = 2f_t(\alpha - 1)(\gamma - \alpha)$ $A_{M3h} = 3f_t(\alpha - \gamma)(\alpha + \gamma - 2)$ $A_{M4h} = 4(\alpha + \gamma - \alpha\gamma - 1)$ $C_{M1h} = \sqrt{\frac{Eh\phi[2f_t(\alpha - \gamma) + Eh(\gamma - 1)\phi]}{\alpha - 1}}$
<p>Stage III $\phi_u \leq \phi \leq \phi_d$</p> $M_{III}(\phi) = \frac{b}{6E^2(3\beta - 3\alpha + 2\gamma)^2 \phi^2} [f_t^3 A_{M1s1} A_{M2s1} + f_t^2 A_{M3s1} C_{M1s1} + f_t C_{M2s1} + C_{M3s1}]$ $A_{M1s1} = (\alpha - \gamma)(\alpha(3 - \gamma) - 3\beta + \gamma(3\beta - 2))$ $A_{M2s1} = 3(\alpha + 1)(\alpha - \beta) - 2\gamma(2\alpha - 3\beta + 1)$ $A_{M3s1} = 2(\alpha - \beta)(\alpha - \gamma)(\alpha(3 - \gamma) - 3\beta + \gamma(3\beta - 2))$ $C_{M1s1} = \sqrt{\frac{3f_t^2(\alpha - \gamma)(\alpha(3 - \gamma) - 3\beta + \gamma(3\beta - 2)) - 6Ef_t h(3\beta - \alpha)\gamma\phi + 6E^2h^2\gamma\phi^2}{\alpha - \beta}}$ $C_{M2s1} = Eh(3\beta - \alpha)\gamma\phi(2(\alpha - \beta)C_{1s1} - 3Eh\phi(3\alpha - 3\beta + 2\gamma))$ $C_{M3s1} = 4E^2h^2\gamma\phi^2(Eh\phi(3\alpha - 3\beta + 2\gamma) - 2(\alpha - \beta)C_{1s1})$
<p>Stage IV $\phi_d \leq \phi \leq \phi_c$</p> $M_{IV}(\phi) = \frac{b}{18E^2(-3\beta + 3\mu + \gamma)^2 \phi^2} [f_t^3 (A_{M1s2} + \mu A_{M2s2} + \mu^2 A_{M3s2}) + f_t^2 A_{M4s2} C_{M1s2} + f_t C_{M2s2} + C_{M3s2}]$ $A_{1s2} = (\gamma - 3\beta)^2[3\alpha(1 + \alpha) - \gamma(3 + \alpha(3 + \alpha) - 2\alpha\beta - 3\beta^2)]$ $A_{2s2} = (\gamma - 3\beta)[6\alpha^2(3 - \gamma) + \gamma(15\beta^2 - 8\beta\gamma + 9\gamma - 18) + 3\alpha(6 + \gamma(4\beta + \gamma - 9))]$ $A_{3s2} = 27\alpha(1 + \alpha) - 9\gamma(3 + \alpha(6 + \alpha) - 2\alpha\beta - 2\beta^2) + 9\gamma^2(3 + \alpha - 2\beta) - 2\gamma^3$ $A_{4s2} = 2(\beta - \mu)[3\gamma(\beta - 1)(3\beta - \gamma) - \gamma\mu(6\beta + \gamma - 9) + \alpha(\gamma - 3)(3\mu - 3\beta + \gamma)]$ $C_{1s2} = \sqrt{\frac{f_t^2(3\gamma(\beta - 1)(3\beta - \gamma) - \gamma\mu(6\beta + \gamma - 9) + \alpha(\gamma - 3)(\gamma + 3\mu - 3\beta)) - 6Ef_t\gamma\mu\phi + 3E^2h^2\gamma\phi^2}{\beta - \mu}}$ $C_{2s2} = 3Eh\gamma\mu\phi(3Eh\phi(3\mu - 3\beta - \gamma) - 2(\mu - \beta)C_{1s2})$ $C_{3s2} = 6E^2h^2\gamma\phi^2(Eh\phi(3\beta + \gamma - 3\mu) + 2(\mu - \beta)C_{1s2})$
<p>Stage V $\phi_c \leq \phi$</p> $M_V(\phi) = \frac{b}{54E^2\phi^2} [f_t^3 A_{M1u} + A_{M2u}]$ $A_{M1u} = -3[\alpha^2(\gamma - 3) + \alpha(3\gamma - 2\beta\gamma - 3) - \gamma(\mu^2 + \beta\mu + 3\beta^2 - 3)]$ $A_{M2u} = 2\sqrt{3}[f_t^2(\alpha(3 - \gamma) + \gamma(\mu + 3\beta - 3))]^{3/2}$

La courbe moment-courbure théorique est donc déterminée à partir des paramètres clés de la courbe quadri-linéaire de traction normalisée de la Figure 2.17c (soit α , β , μ , γ et E) qui découlent directement des paramètres de la courbe quadri-linéaire de traction de la Figure 2.17b (soit f_t , $f_{t,u}$, $\varepsilon_{t,u}$, $\varepsilon_{t,d}$, $\varepsilon_{t,c}$ et E). Le processus itératif, tel qu'indiqué à la Figure 2.18, consiste alors à faire varier ces paramètres clés de telle sorte à ce que la courbe moment-courbure théorique s'approche de celle expérimentale et donc que l'erreur entre ces deux courbes ($\sum(M_{exp} - M)^2$ à la Figure 2.18) s'approche de « 0 ».

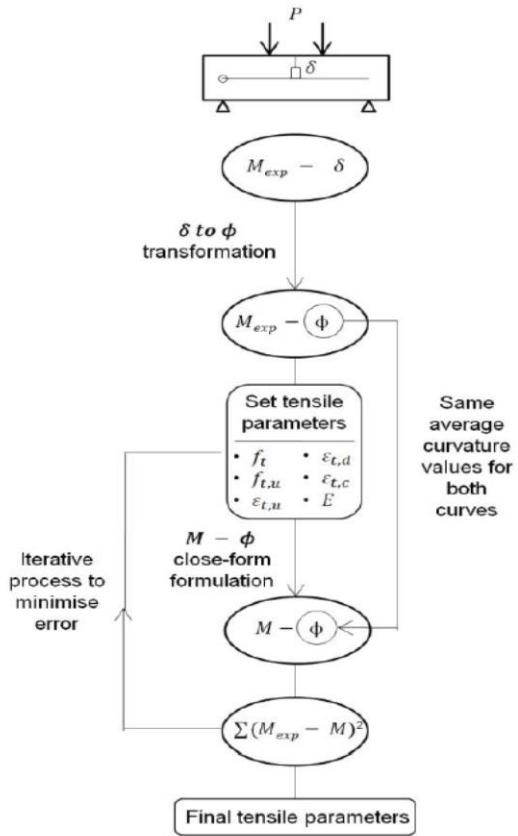


Figure 2.18 Schéma illustrant l'algorithme de calcul de la méthode Lopez itérative [15]

Ce processus itératif requiert cependant de choisir des paramètres clés initiaux de la courbe de traction pour effectuer la première itération. Pour ce faire, Lopez propose d'utiliser les paramètres obtenus de sa méthode d'analyse inverse simplifiée nommée Lopez 5 points, qui sera présentée à la Section 2.3.2 suivante. L'utilisateur de la méthode itérative peut également spécifier lui-même

les paramètres initiaux s'il a une bonne connaissance du comportement en traction attendu du BFUP testé.

2.3.2 Méthode Lopez 5 points [15]

La méthode d'analyse inverse Lopez 5 points est une simplification de la méthode Lopez itérative dont les calculs peuvent être fastidieux. Les cinq points auxquels le nom de la méthode fait référence sont les points clés de la courbe de traction présentée à la Figure 2.17b, soit les points P₁ à P₅ (abscisse, ordonnée) suivants.

$$P_1 \rightarrow (0,0) \quad P_2 \rightarrow (\varepsilon_{t,\text{el}}, f_t) \quad P_3 \rightarrow (\varepsilon_{t,u}, f_{t,u}) \quad P_4 \rightarrow (\varepsilon_{t,d}, f_{t,u}/3) \quad P_5 \rightarrow (\varepsilon_{t,c}, 0)$$

Pour développer les équations servant à déterminer les paramètres des cinq points, Lopez a utilisé un algorithme qui s'apparente à celui présenté à la Figure 2.18. Cet algorithme est présenté à la Figure 2.19.

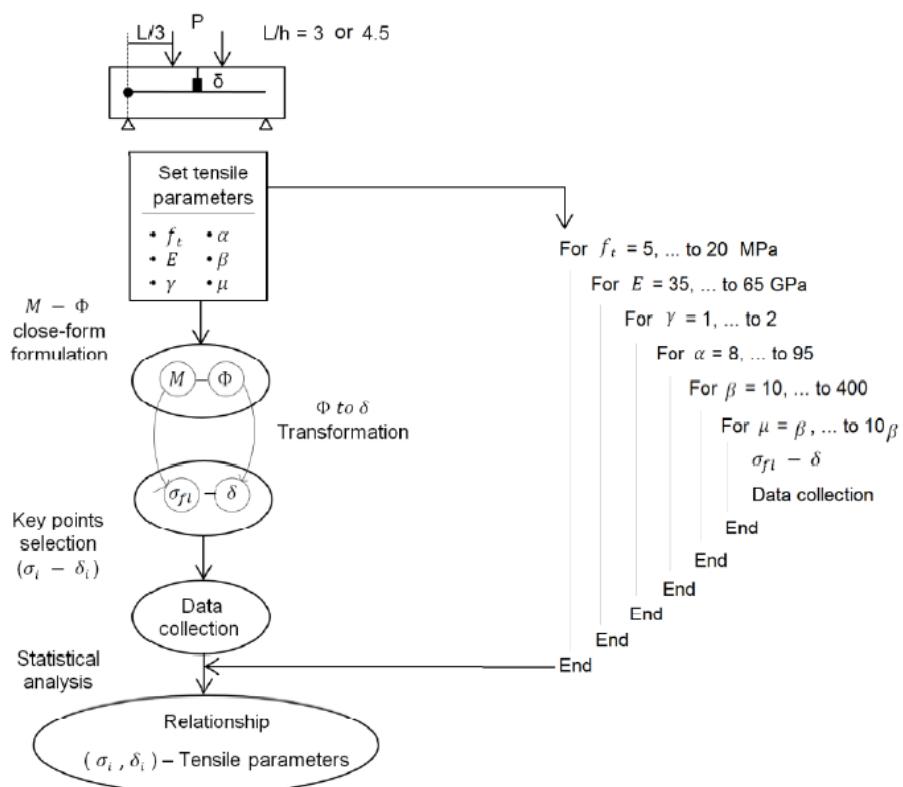


Figure 2.19 Algorithme nécessaire pour obtenir les courbes de calibration de la méthode Lopez 5 points [15]

Lopez a fait varier les paramètres f_t , E , γ , α , β et μ de manière à obtenir environ 12 millions de courbes de flexion différentes. Dans le but de restreindre les courbes de flexion obtenues aux courbes pouvant représenter le comportement en traction des BFUP, les valeurs de $\varepsilon_{t,u}$, $\varepsilon_{t,d}$ et $\varepsilon_{t,c}$ ont été limitées à des intervalles réalistes tel qu'indiqués par les équations (2.11) à (2.13). Les courbes de flexion obtenues, initialement exprimées en moment-courbure, ont ensuite été transformées en contrainte-flèche (σ - δ) normalisées (telles qu'illustrées à la Figure 2.20) en considérant des spécimens de section carrée et de ratio L/h égal à 3 et 4.5. Cette méthode se restreint donc aux spécimens carrés sollicités en flexion 4 points et qui respectent ces critères dimensionnels.

$$\varepsilon_{t,u} \in [0.001, 0.015] \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_{t,d} \in [\varepsilon_{t,u}, 0.05] \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_{t,c} \in [(1.5\varepsilon_{t,d} - 0.5\varepsilon_{t,c}), 0.4] \quad (2.13)$$

Une fois les courbes de flexion contrainte-flèche (σ - δ) normalisées obtenues, Lopez y a tracé trois droites (Figure 2.20) nommées S_0 , S_{40} et S_{75} . La droite S_0 suit le comportement linéaire élastique observée au début de la courbe de flexion et est déterminée par l'utilisateur de la méthode. Les droites S_{40} et S_{75} représentent des droites dont les pentes sont respectivement égales à 40 et 75% de la pente de la droite S_0 .

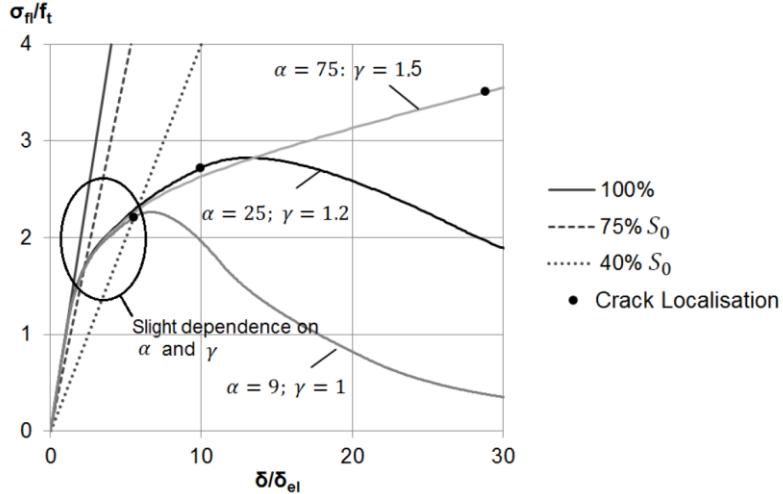


Figure 2.20 Représentation graphique des droites sécantes S_0 , S_{40} et S_{75} pour la méthode Lopez 5 points [15]

Les points d'intersection des droites S_{40} et S_{75} avec la courbe de flexion normalisée sont chacun caractérisé par un couple (σ - δ). Les valeurs correspondantes de σ_{40} , σ_{75} et δ_{75} peuvent ensuite être intégrées dans les équations développées par Lopez (Tableau 2.6) pour déterminer les ordonnées (contraintes) et les abscisses (déformations) des points P_1 à P_5 présentés précédemment. Les équations présentées au Tableau 2.6 diffèrent selon l'élancement des spécimens (3 ou 4.5) et ont été développées en effectuant une analyse statistique des paramètres σ_{40} , σ_{75} et δ_{75} sur une grande quantité de courbes de flexion obtenues par Lopez avec l'algorithme de la Figure 2.19. Une hypothèse importante prise par Lopez est que la localisation de la macrofissure en flexion se produit lorsque la contrainte de flexion atteint 97% de la contrainte maximale ($\sigma_{loc} = 0,97 \sigma_{max}$). Cette hypothèse a un impact direct sur les valeurs de σ_{loc} et δ_{loc} utilisées pour la détermination des coordonnées du point P_3 ainsi que sur les valeurs de δ_{80u} et δ_{30u} utilisés pour déterminer les déformations aux points P_4 et P_5 . δ_{80u} et δ_{30u} représentent la flèche mesurée respectivement à 80% et 30% de σ_{loc} dans la partie adoucissante de la courbe de flexion.

Tableau 2.6 Équations pour déterminer les points P2 à P5 de la méthode Lopez 5 points [15]

	Élancement	Équations
P2	$L/h = 3$	$f_t = \frac{\sigma_{75}}{1.63} \left(\frac{\sigma_{75}}{\sigma_{40}} \right)^{0.19}$
	$L/h = 4.5$	$f_t = \frac{\sigma_{75}}{1.59} \left(\frac{\sigma_{75}}{\sigma_{40}} \right)^{0.21}$
P3	$L/h = 3$	$\varepsilon_{t,u} = \left(7.65 \frac{\delta_{loc}}{\delta_{75}} - 10.53 \right) \frac{f_t}{E}$
		$f_{t,u} = \alpha^{-0.18} \left(2.46 \frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{75}} - 1.76 \right) f_t$
P4 et P5	$L/h = 4.5$	$\varepsilon_{t,u} = \left(6.65 \frac{\delta_{loc}}{\delta_{75}} - 9.40 \right) \frac{f_t}{E}$
		$f_{t,u} = \alpha^{-0.17} \left(2.24 \frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{75}} - 1.55 \right) f_t$
	Élancement	Équations
	$L/h = 3$	$\varepsilon_{t,d} = \gamma^{-0.37} \alpha^{0.88} \left(3.00 \frac{\delta_{80u}}{\delta_{loc}} - 1.80 \right) \frac{f_t}{E}$
		$\varepsilon_{t,c} = 2.81 \beta^{-0.76} \gamma^{-0.19} \alpha^{1.42} \left(\frac{\delta_{30u}}{\delta_{loc}} \right)^{1.85} \frac{f_t}{E}$
	$L/h = 4.5$	$\varepsilon_{t,d} = \gamma^{-0.38} \alpha^{0.89} \left(2.82 \frac{\delta_{80u}}{\delta_{loc}} - 1.68 \right) \frac{f_t}{E}$
		$\varepsilon_{t,c} = 2.17 \beta^{-0.76} \gamma^{-0.26} \alpha^{1.48} \left(\frac{\delta_{30u}}{\delta_{loc}} \right)^{1.86} \frac{f_t}{E}$

La méthode Lopez 5 points, validée sur des spécimens de section carrée, permet d'obtenir une courbe de traction qui permet théoriquement, via l'hypothèse de rotule plastique décrit à la Section 2.3.1, de bien représenter le comportement en flexion. Il est cependant important de mentionner que Lopez n'a pas validé de façon élaborée les deux méthodes d'analyse inverse proposées avec des essais de traction directe.

2.3.3 Méthode SIA [12]

La méthode d'analyse inverse disponible dans la norme suisse SIA est issue des travaux de recherche de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) [12]. Cette méthode est plus simple que les méthodes développées par Lopez (Sections 2.3.1 et 2.3.2). La SIA cherche

seulement à déterminer le comportement pré-pic écrouissant du BFUP. En observant les courbes de traction obtenues via des essais de traction directe sur os, il a été décidé d'idéaliser ce comportement pré-pic par un comportement bilinéaire tel qu'illustré à la Figure 2.21. La méthode d'analyse inverse SIA consiste donc à déterminer, à partir du comportement en flexion, les contraintes de traction à la fin de la limite élastique (f_{Ute}) et à la résistance maximale (f_{Ult}) (Figure 2.21) ainsi que les déformations associées (ε_{Ute} et ε_{Ult} respectivement).

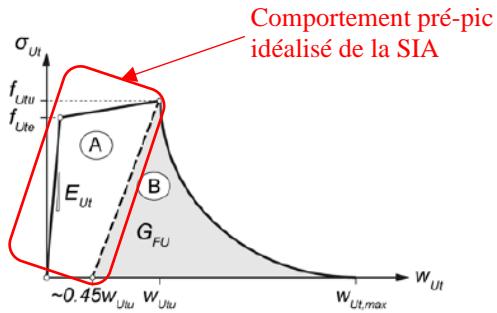


Figure 2.21 Comportement idéalisé représentant des essais de traction directe sur des os en BFUP
[32]

La SIA recommande de tester 6 spécimens en flexion pour obtenir un comportement en traction adéquat. Les spécimens de flexion sont des dallettes minces (30 mm) et relativement étroites (100 mm) tel que présenté à la Figure c de la Section 2.2.2. Sur les 6 spécimens recommandés, 3 d'entre eux doivent être soumis à des cycles de chargement-déchargement allant de 0.5 MPa à 3 MPa pour estimer correctement la fin de la phase élastique linéaire du BFUP sur la courbe de flexion (point A sur la courbe de la Figure 2.22). Les 3 autres spécimens doivent, quant à eux, être testés sans cycle de chargement-déchargement pour évaluer la capacité maximale en flexion du matériau (point B sur la courbe de la Figure 2.22).

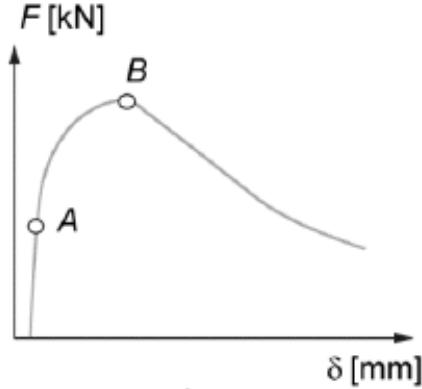


Figure 2.22 Localisation des points A et B nécessaires à l'analyse inverse SIA [12]

L'analyse inverse de la SIA se base sur le comportement en flexion entre les points A et B (Figure 2.22) afin d'en déduire le comportement pré-pic en traction du BFUP étudié. Pour ce faire, la SIA adopte trois hypothèses importantes.

H1. La force associée au point A (F_A) correspond à une perte irréversible de 1% de la moyenne mobile du module d'élasticité. Cette moyenne mobile (E_{mi}) est une moyenne des 10 dernières valeurs du module sécant E_i déterminé pour chaque valeur de flèche (δ_i) dans la partie linéaire de la courbe de flexion à l'aide de l'équation (2.14).

$$E_i = 0.212 \frac{F_i}{\delta_i} \frac{l_m^3}{b_m h_m^3} \quad (2.14)$$

Où F_i = Force d'un point (kN), δ_i = flèche d'un point (mm), l_m = portée (mm),

b_m = largeur (mm), h_m = hauteur (mm)

Le calcul de la moyenne mobile E_{mi} , effectué via l'équation (2.15), peut commencer dès que dix valeurs de E_i ont été calculées.

$$E_{mi} = \sum_n^{11} (E_{i-10}, E_{i-9}, \dots, E_i) \quad (2.15)$$

La Figure 2.23a présente l'évolution du module sécant E_i ainsi que de la moyenne mobile E_{mi} associée en fonction de la flèche. La flèche correspondant à une perte irréversible de

1% de E_{mi} est alors reportée sur la courbe de flexion de la Figure 2.23b afin d'en déterminer la force F_A correspondante. La perte de 1% proposée a été déterminée par des essais de mesures de bruit intrinsèque sur des spécimens en aluminium testés en flexion selon la configuration présentée à la Figure c (Section 2.2.2).

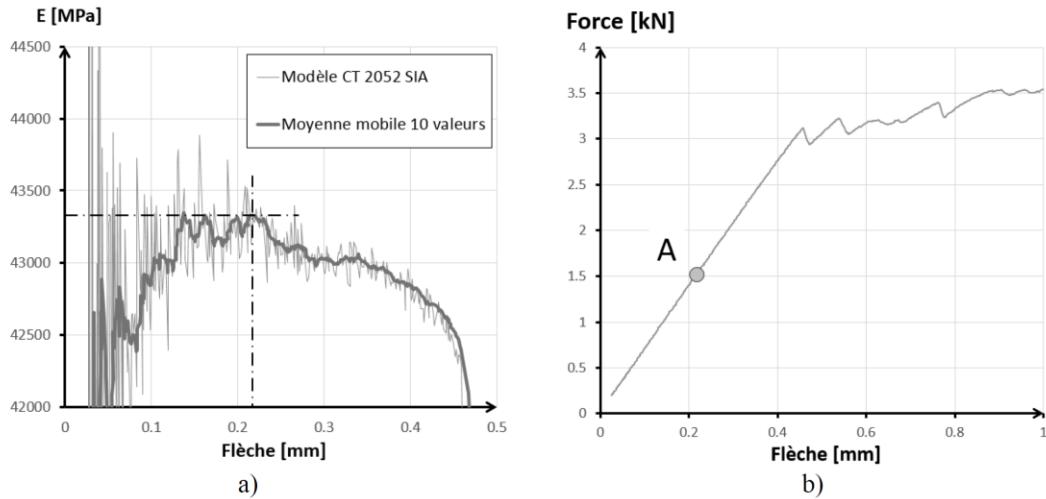


Figure 2.23 Représentation graphique de la moyenne mobile E_{mi} et de la localisation de F_A sur la courbe de flexion pour le calcul inverse SIA [32]

Une fois la force F_A déterminée, il est possible d'en déduire la contrainte de traction élastique associée (f_{Ute}) via l'équation (2.16).

$$f_{Ute} = \frac{F_A l_m}{b_m h_m^2} \quad (2.16)$$

La valeur de déformation en traction associée à la contrainte f_{Ute} (ε_{Ute}) est ensuite obtenue en divisant f_{Ute} par le module d'élasticité E_u du BFUP testé. Ce module est obtenu en intégrant la valeur de F_A et de la flèche correspondante en flexion dans l'équation (2.14).

- H2. Entre les points A et B, il est considéré que la courbure dans la zone de moment constant est constante et égale à la valeur de la courbure élastique. Cette hypothèse permet de

calculer la courbure en tout point entre A et B avec l'équation (2.17) et implique un profil de déformations linéaire entre les points A et B tel qu'illustré à la Figure 2.24.

$$\chi_i = \frac{216}{23} \frac{\delta_i}{l_m^2} \quad (2.17)$$

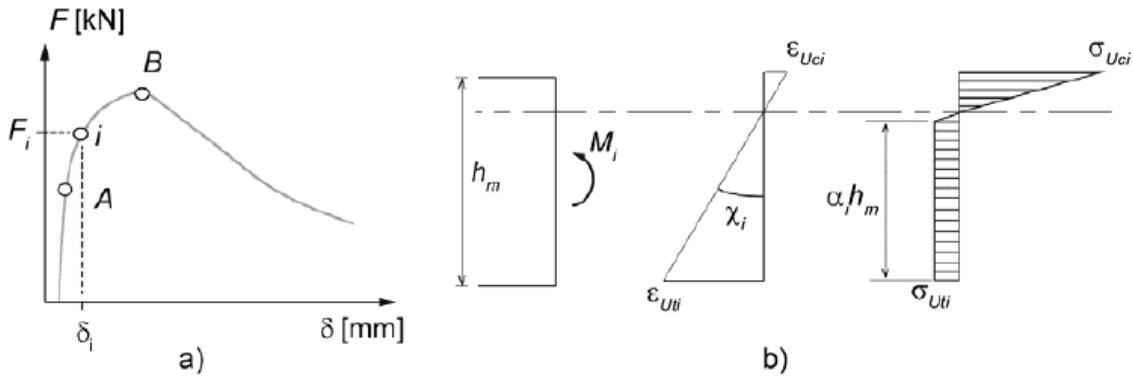


Figure 2.24 Profils de déformations et de contraintes nécessaires pour déterminer ε_{Utu} par l'analyse inverse SIA [12]

Pour chaque couple force-flèche (F_i, δ_i) compris entre les points A et B (Figure 2.24a), le profil des déformations est donc linéaire, tel que mentionné précédemment, et celui des contraintes est bilinéaire (Figure 2.24b). L'objectif de la méthode de calcul inverse est de déterminer le couple contrainte-déformation en traction ($\sigma_{Uti}-\varepsilon_{Uti}$) qui se produit à la fibre inférieure du spécimen de flexion. Pour ce faire, et pour chaque couple force-flèche (F_i, δ_i) étudié, il est nécessaire de déterminer différents paramètres résultant des équations d'équilibre et de compatibilité des efforts normaux et des moments de la section de la dallette de flexion. Ainsi, il est nécessaire de déterminer en premier lieu le moment (M_i , Équation (2.18)). Cette valeur ainsi que la courbure χ_i (Équation (2.17)) permettent ensuite de calculer un paramètre nommé λ_i (Équation (2.19)), qui sert ensuite à déterminer la portion de hauteur plastifiée (α_i). La valeur de α_i peut être déterminée par résolution de l'équation (2.20) ou en utilisant le Tableau 2.7 qui donne directement les valeurs de α_i associées à différentes valeurs de λ_i .

$$M_i = \frac{F_i l_m}{6} \quad (2.18)$$

$$\lambda_i = \frac{12 M_i}{b_m h_m^3 \chi_i E_u} \quad (2.19)$$

$$2 \alpha_i^3 - 3 \alpha_i^2 + 1 - \lambda_i = 0 \quad (2.20)$$

Tableau 2.7 Valeurs de α_i en fonction de λ_i pour l'hypothèse H2 de l'analyse inverse SIA

λ_i	α_i	λ_i	α_i	λ_i	α_i	λ_i	α_i
0,00	0,988	0,25	0,674	0,50	0,500	0,75	0,326
0,01	0,941	0,26	0,666	0,51	0,493	0,76	0,319
0,02	0,915	0,27	0,658	0,52	0,487	0,77	0,311
0,03	0,896	0,28	0,651	0,53	0,480	0,78	0,303
0,04	0,879	0,29	0,644	0,54	0,473	0,79	0,295
0,05	0,863	0,30	0,636	0,55	0,467	0,80	0,287
0,06	0,850	0,31	0,629	0,56	0,460	0,81	0,279
0,07	0,838	0,32	0,622	0,57	0,453	0,82	0,270
0,08	0,826	0,33	0,615	0,58	0,446	0,83	0,261
0,09	0,815	0,34	0,608	0,59	0,440	0,84	0,253
0,10	0,804	0,35	0,601	0,60	0,433	0,85	0,244
0,11	0,794	0,36	0,594	0,61	0,426	0,86	0,235
0,12	0,784	0,37	0,587	0,62	0,419	0,87	0,226
0,13	0,774	0,38	0,580	0,63	0,412	0,88	0,216
0,14	0,764	0,39	0,574	0,64	0,406	0,89	0,206
0,15	0,755	0,40	0,567	0,65	0,399	0,90	0,196
0,16	0,746	0,41	0,560	0,66	0,392	0,91	0,185
0,17	0,738	0,42	0,553	0,67	0,385	0,92	0,174
0,18	0,729	0,43	0,547	0,68	0,378	0,93	0,161
0,19	0,721	0,44	0,540	0,69	0,370	0,94	0,149
0,20	0,712	0,45	0,533	0,70	0,363	0,95	0,135
0,21	0,705	0,46	0,527	0,71	0,355	0,96	0,120
0,22	0,697	0,47	0,520	0,72	0,348	0,97	0,104
0,23	0,689	0,48	0,513	0,73	0,341	0,98	0,082
0,24	0,681	0,49	0,507	0,74	0,334	0,99	0,060
						1,00	0,000

Une fois la valeur de α_i déterminée, elle peut être utilisée dans les équations (2.21) et (2.22) pour calculer les valeurs de ε_{Uti} et σ_{Uti} correspondante au couple (F_i, δ_i) .

$$\sigma_{Uti} = 0.5 (1 - \alpha_i)^2 h_m \chi_i E_u \quad (2.21)$$

$$\varepsilon_{Uti} = \frac{\sigma_{Uti}}{E_u} + \chi_i \alpha_i h_m \quad (2.22)$$

Dans le but d'alléger les calculs et de ne pas calculer la valeur de ε_{Uti} et σ_{Uti} pour tous les points de la courbe de flexion entre les points A et B, la norme SIA permet de sélectionner dix points d'interpolations sur ce domaine pour effectuer le calcul de ces valeurs. Il est également mentionné que la valeur de α_i ne peut pas être inférieure à 0.50. Cela signifie que le premier des dix points d'interpolations doit correspondre au couple (F_i, δ_i) où α_i est supérieur à 0.50. Les neuf autres points sont répartis équitablement entre le premier point d'interpolation et le couple (F_B, δ_B) correspondant au point B.

L'hypothèse ici faite d'un profil de déformations linéaire et d'un profil de contraintes bilinéaire permet de simplifier les calculs de la déformation et de la contrainte de traction à la fibre inférieure du spécimen de flexion. Cependant, cette méthode ne considère pas le fait que la résistance maximale en traction à la fibre extrême tendue est atteinte avant l'atteinte du pic de flexion et donc que le comportement adoucissant en traction du BFUP débute au niveau de la fibre extrême tendue avant d'atteindre le pic de flexion. Ceci fait en sorte que les équations présentées précédemment ne sont pas valables dans la dernière portion avant l'atteint du pic de force en flexion (point B). Une autre méthodologie est donc nécessaire pour déterminer la résistance maximale en traction (point de localisation) pour ensuite pouvoir en déterminer la déformation correspondante au niveau de la fibre extrême tendue. Ce sera alors le rôle de l'hypothèse H3 suivante.

- H3. Pour répondre à la problématique soulevée à la fin de l'hypothèse H2, plusieurs analyses par éléments finis ont été réalisées par Denarié [32] avec la configuration d'essai de la norme SIA. Ces analyses ont permis de déterminer qu'au pic de force en flexion (point B), le profil de contraintes en traction est différent du profil bilinéaire de la Figure 2.24b et peut plutôt être idéalisé par le profil constant illustré à la Figure 2.25b.

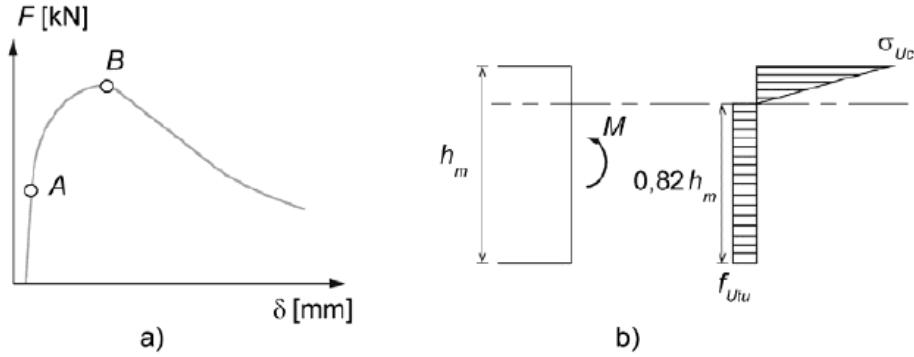
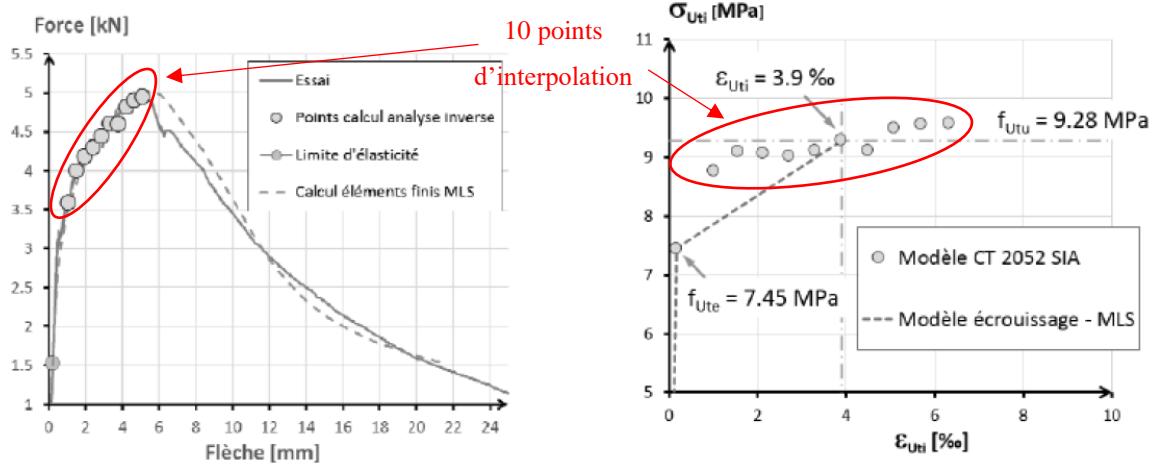


Figure 2.25 Profil de contraintes de traction constant pour déterminer f_{Utu} au point B [12]

Les différences entre ce nouveau profil des contraintes et celui de l'hypothèse H2 sont que la hauteur tendue est cette fois fixée à 82% de la hauteur totale ($0.82 h_m$) et que la contrainte de traction est considérée constante sur toute la hauteur tendue. L'utilisation de ce profil de contraintes au pic permet de déterminer la contrainte de traction ultime f_{Utu} du BFUP à l'étude à partir de l'équation (2.23).

$$f_{Utu} = 0.383 \frac{F_B l_m}{b_m h_m^2} \quad (2.23)$$

Une fois la valeur de f_{Utu} connue, il est possible de déterminer quand cette valeur est atteinte pour la première fois par les points d'interpolation déterminés avec l'hypothèse H2. La déformation correspondante, déterminée avec l'hypothèse H2 également, correspond alors à la déformation de traction ultime (ε_{Utu}) du BFUP. La Figure 2.26 illustre cette méthodologie via un exemple. La Figure 2.26a représente la courbe de flexion et les dix points d'interpolations sélectionnés selon la méthodologie décrite à l'hypothèse H2 alors que la Figure 2.26b représente les valeurs de ε_{Uti} et σ_{Uti} correspondantes calculées avec les équations (2.21)et (2.22). Une fois la valeur de f_{Utu} déterminée par l'équation (2.23) (valeur ici égale à 9.28 MPa), il est possible de déterminer quand les points d'interpolations (rond gris) de la Figure 2.26b atteignent cette valeur pour la première fois. Dans cet exemple, cette valeur est atteinte pour une déformation de 3.9%. Cette déformation représente alors la déformation de traction à l'ultime (ε_{Utu}) de ce BFUP.



a) Courbe de flexion et points d'interpolation

b) Analyse inverse avec points d'interpolation

Figure 2.26 Représentation graphique des points d'interpolation et du fonctionnement de la méthode d'analyse inverse pour déterminer ε_{Utu} [32]

En résumé, le comportement en traction calculé avec l'analyse inverse de la norme SIA est caractérisé par deux points. Le premier représente la fin du comportement linéaire élastique du matériau et correspond au couple contrainte-déformation $f_{Ute}-\varepsilon_{Ute}$. Ces valeurs de contrainte et de déformation sont calculées selon la méthodologie décrite à l'hypothèse H1 et sont fonction de la position du point A sur la courbe de flexion.

Le deuxième point correspond au point ultime de la courbe de traction soit le couple contrainte-déformation $f_{Utu}-\varepsilon_{Utu}$. La contrainte f_{Utu} est calculée selon l'équation (2.23) de l'hypothèse H3 et la déformation ε_{Utu} est ensuite déterminée en combinant les hypothèses H2 et H3. La combinaison de ces deux hypothèses fait ressortir une certaine incohérence dans la méthodologie adoptée pour déterminer le point de traction ultime avec le calcul inverse de la norme SIA. En effet, la contrainte ultime f_{Utu} est obtenue en admettant une répartition des contraintes de traction uniforme sur la hauteur tendue tel que présenté à la Figure 2.25b, tandis que la déformation ultime ε_{Utu} est calculée selon une répartition des contraintes de traction différente, présentée à la Figure 2.24b. L'utilisation de deux profils de contraintes différents pour déterminer le même point caractéristique en traction du BFUP est contradictoire puisque la déformation et la contrainte en un même point devraient être issues du même profil de contrainte. Malgré cette incohérence, la méthode actuelle de la SIA,

calibrée et validée par des essais de traction directe sur os minces (section de 30 mm x 50 mm, Figure b de la Section 2.2.1), donne des résultats adéquats pour les BFUP et les conditions d'essais adoptées par la norme SIA (dalles minces en flexion favorisant une orientation des fibres assez similaire aux os en traction). Il est cependant intéressant de garder en tête cette incohérence puisque la combinaison des hypothèses H2 et H3 pourrait être moins bien adaptée dans un autre contexte (autres types de BFUP, géométries de spécimens et configurations d'essai).

2.4 Synthèse

Le Chapitre 2 présente une revue de la documentation des sujets clés au développement de la nouvelle méthode de calcul inverse. Ces sujets sont les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP), les méthodes d'évaluation du comportement en traction des BFUP et les méthodes d'analyse inverse qui sont étudiés dans le présent projet de recherche. Les éléments importants à retenir du Chapitre 2 sont les suivants :

- Les BFUP sont des matériaux qui sont connus depuis plus de 40 ans, mais l'absence de normes canadiennes encadrant leur utilisation avant 2019 en fait un matériau peu connu des ingénieurs concepteurs au Canada.
- Les BFUP utilisés dans les infrastructures en génie civil sont des matériaux cimentaires avec un rapport eau/liant très faible. Ce faible rapport eau/liant permet de donner aux BFUP une résistance à la compression très élevée (120 à 180 MPa) et augmente la durabilité du matériau en conditions non fissurées. Une grande quantité de fibres courtes en acier sont également incorporées au mélange. Ces fibres permettent d'augmenter de beaucoup la résistance des BFUP à la traction (7 à 15 MPa) et la durabilité du matériau en condition fissurée.
- Le comportement en traction des BFUP est caractérisé par une partie écrouissante en pré-pic et une partie adoucissante en post-pic. La portion écrouissante du comportement en traction des BFUP est caractérisée par la propagation de plusieurs microfissures. Lorsque le pic de résistance en traction est atteint (contrainte maximale), une de ces microfissures devient dominante (macrofissure) et prend le dessus sur les autres. C'est à cet endroit de localisation de la macrofissure que le comportement adoucissant en post-pic débute et que l'ouverture de la macrofissure augmente.

- Le comportement en traction des BFUP peut être caractérisé de façon directe (essais de traction) ou indirecte (essais de flexion). Ces essais peuvent être réalisés avec des géométries de spécimens différentes. Les essais de traction peuvent être réalisés sur des sections prismatiques ou en forme d'os, tandis que les essais de flexion sont réalisés sur des spécimens avec des sections carrée ou rectangulaire.
- L'orientation des fibres à l'intérieur des spécimens en BFUP peut être influencée par plusieurs facteurs, entre autres par la géométrie des spécimens et la méthode de mise en place dans les coffrages. L'orientation des fibres est primordiale, puisqu'elle influence grandement le comportement en traction et en flexion du matériau. Un spécimen ayant une orientation des fibres favorable pour reprendre les efforts de traction aura un comportement en traction et en flexion beaucoup plus résistant et ductile.
- La méthode d'analyse inverse Lopez itérative est applicable pour tous types de géométrie de spécimens en flexion. Cette méthode considère un comportement en traction quadrilinéaire, soit bilinéaire en pré-pic et bilinéaire en post-pic. Les paramètres nécessaires pour exprimer le comportement en traction simplifié sont ensuite utilisés pour exprimer le comportement théorique en flexion du BFUP analysé. Ce comportement théorique en flexion est comparé au comportement expérimental réel du BFUP et la somme des erreurs entre ces deux courbes est calculée. La méthode Lopez itérative consiste à faire varier les paramètres de la courbe de traction simplifiée (quadrilinéaire) pour minimiser les erreurs entre la courbe de flexion théorique et celle expérimentale. La courbe de traction simplifiée qui minimise les erreurs représente le comportement en traction du BFUP.
- La méthode d'analyse inverse Lopez 5 points est basé sur le même comportement en traction simplifiée quadrilinéaire de la méthode Lopez itérative. Les 5 points qui caractérisent cette courbe (extrémités des segments linéaires du comportement en traction simplifiée) sont déterminés selon des équations validées sur des prismes carrés en flexion 4 points avec un élancement (L/h) égal à 3 ou 4.5. La méthode n'est donc pas valide pour tous spécimens avec un élancement différent (par exemple, des dallettes rectangulaires 300x100x50 mm). Les résultats de la méthode Lopez 5 points peuvent également être utilisés pour l'itération initiale de la méthode Lopez itérative.

- La méthode d'analyse inverse SIA permet de caractériser seulement le comportement pré-pic écrouissant des BFUP. Ce comportement simplifié est également bilinéaire et la méthode est applicable seulement pour des matériaux écrouissants. Le point de résistance élastique en traction simplifiée de la SIA est déterminé lors qu'une perte de rigidité de 1% est détectée dans la zone linéaire au début de la courbe de flexion. Le point de résistance ultime en traction est quant à lui obtenu en utilisant deux profils de contraintes simplifiés, soit un profil bilinéaire pour déterminer la déformation ultime (ε_{Utu}) et un profil constant pour la contrainte ultime (f_{Utu}). La méthode d'analyse inverse SIA est validée sur des spécimens minces en flexion (420x100x30 mm) et comparée aux résultats en traction directe obtenus sur des os minces (section réduite de 50x30 mm).

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente le détail des procédures expérimentales, analytiques et numériques adoptées pour obtenir les différents résultats nécessaires au développement de la méthode d'analyse inverse. Les procédures expérimentales, présentées à la Section 3.1, comprennent les BFUP testés, les méthodes de fabrication des spécimens, les essais de caractérisation réalisés ainsi que les analyses complémentaires faites sur les spécimens testés, soit des analyses de la fissuration par corrélation d'image (DIC) et des analyses de l'orientation des fibres proche des fissures. Les procédures analytiques, présentées à la Section 3.2, concernent essentiellement l'implémentation, dans un fichier Excel, des étapes calculatoires nécessaires à l'analyse inverse des méthodes SIA, Lopez itérative et Lopez 5 points. Finalement, les procédures numériques concernent les modèles par éléments finis effectués dans le cadre de ce projet afin d'étudier certains paramètres utilisés dans la méthode d'analyse inverse de la SIA sont présentées à la Section 3.3.

3.1 Procédures expérimentales

Deux campagnes expérimentales ont été réalisées dans ce projet afin d'avoir une base de données des comportements en flexion et en traction directe de BFUP représentatifs de ceux utilisés dans l'industrie. Ces bases de données ont permis d'étudier la performance des méthodes d'analyse inverse existantes (celles de Lopez et de la SIA), pour différentes configurations d'essais et différents BFUP, et ont également permis de proposer une méthode optimisée mieux adaptée au contexte canadien.

La première campagne expérimentale, appelée campagne préliminaire, a pour objectif d'étudier l'impact de différentes configurations d'essais sur le comportement mécanique des BFUP ainsi que l'impact de ces différents comportements sur la performance des méthodes d'analyse inverse existantes (celles de Lopez et de la SIA). Cette première campagne a permis de retenir une des méthodes existantes et de cibler les paramètres de cette méthode qui pourraient être ajustés pour mieux l'adapter au contexte canadien. La deuxième campagne expérimentale, appelée campagne finale, consiste à calibrer, pour différentes gammes de BFUP, les optimisations proposées à l'issu de la campagne préliminaire. Cette section décrit les procédures expérimentales utilisées pour ces deux campagnes.

3.1.1 BFUP à l'étude

Le Tableau 3.1 résume les différents BFUP étudiés dans les deux campagnes expérimentales avec leurs résistances à la compression et le dosage et type de fibres utilisées.

Tableau 3.1 Caractéristiques des BFUP utilisés pour les campagnes expérimentales

Campagne expérimentale	Matériau	% fibres (% vol.)	l_f (mm)	d_f (mm)	Étalement (mm)	$f'c$ à 28 jours (MPa)
Préliminaire	BFUP3	3% - Chinoise	14	0.22	230	≈ 130 à 135
Finale	UP-F2	2% - Bekaert	13	0.2	223	150
	UP-F3	3% - Bekaert			215	151

Un seul BFUP, nommé BFUP3 dans cette étude, a été étudié lors de la campagne expérimentale préliminaire. Il s'agit d'un BFUP contenant 3% en volume de microfibres d'acier provenant d'une entreprise chinoise. Ces fibres ont une longueur (l_f) de 14 mm, un diamètre (d_f) de 0.22 mm et une résistance à la traction nominale de 2 500 MPa. Ce BFUP a été utilisé lors de la campagne préliminaire puisque les spécimens de caractérisation avaient déjà été coulés lors d'un projet préalable au présent projet de recherche. L'utilisation du BFUP3 permet donc d'obtenir les résultats de la campagne préliminaire très tôt dans le projet et c'est pourquoi ce matériau a été choisi. Deux autres BFUP ont ensuite été étudiés dans la campagne expérimentale finale. Le premier, nommé UP-F2, contient 2% en volume de microfibres d'acier de la compagnie Bekaert, tandis que le second, nommé UP-F3, contient cette fois 3% en volume des mêmes fibres. Ces fibres ont une longueur (l_f) de 13 mm, un diamètre (d_f) de 0.2 mm et une résistance à la traction nominale de 2 750 MPa. L'utilisation de deux dosages en fibres différents permet de s'assurer que les adaptations proposées sur le calcul inverse peuvent s'appliquer à différents types de BFUP.

Une autre différence entre les trois matériaux est la résistance à la compression après 28 jours. En effet, la matrice cimentaire du BFUP3 est quelque peu différente de celle des BFUP UP-F2 et UP-F3 tel que présenté au Tableau 3.1. Cela fait en sorte que la valeur de $f'c$ obtenue après 28 jours

est inférieure pour le BFUP3 (130 MPa) que celle obtenue pour les BFUP de la campagne expérimentale finale (150 MPa).

3.1.2 Fabrication des spécimens

Les trois BFUP étudiés lors des campagnes expérimentales de ce projet sont autoplaçants avec des valeurs d'étalement au mini-cône [33] similaires, comprises entre 215 et 230 mm (Tableau 3.1). La méthode de mise en place de ces BFUP dans les coffrages a un impact important sur l'orientation des fibres (Section 2.2.4.1) et influence donc leurs comportements mécaniques. La méthode de fabrication des spécimens doit donc être un paramètre considéré dans l'analyse de résultats issus du calcul inverse. Les méthodes de mise en place utilisées pour les spécimens des campagnes préliminaire et finale sont indiquées au Tableau 3.2.

Tableau 3.2 Méthodes de mise en place utilisées dans ce projet

Campagne expérimentale	Matériaux	Spécimens et dimensions	Méthode de mise en place
Préliminaire	BFUP3	Traction	Mouvements longitudinaux
		Flexion	Écoulement par extrémité
Final	UP-F2	Traction	Mouvements longitudinaux
		Flexion	
	UP-F3	Traction	Mouvements longitudinaux
		Flexion	

Tel qu'indiqué à la Section 3.1.1, les spécimens en BFUP3 du programme expérimental préliminaire ont été fabriqués dans le cadre d'un projet préalable et aucune personne de l'équipe du présent projet n'était présente lors de la coulée de ces spécimens. D'après les informations recueillies auprès des personnes concernées du précédent projet, les spécimens de traction du BFUP3 ont été coulés en effectuant des mouvements longitudinaux de va et vient tandis que les spécimens de flexion ont été coulés en laissant le BFUP s'écouler depuis une extrémité tel que stipulé par la norme CSA A23.01-02 [1]. Pour ce qui est des BFUP UP-F2 et UP-F3 du programme expérimental final, dont les spécimens ont été fabriqués dans le cadre du présent projet de

recherche, une seule méthode de mise en place a été utilisée, soit celle par mouvements longitudinaux de va et vient. Ce choix d'utiliser une seule méthode de mise en place a été fait de manière à favoriser une orientation des fibres plus similaire entre les spécimens de flexion et de traction et d'ainsi valider la méthode de calcul inverse sur des résultats de traction et de flexion cohérents.

Outre les méthodes de mise en place des spécimens, la Section 2.2.4.2 a mis de l'avant l'impact des parois de coffrage sur l'orientation des fibres (effet de bord). Le positionnement de la surface ouverte des coffrages (surface truellée) versus la direction d'application de la charge, en particulier dans les essais de flexion, peut donc également avoir un impact sur le comportement mécanique des spécimens. Le positionnement de la surface truellée des spécimens durant les essais mécaniques sera indiqué aux Sections 3.1.3 et 3.1.4.

Une fois les spécimens coulés, la face non-coffrée (surface truellée) est recouverte d'un polythène pour une durée de 24h. Tous les spécimens sont ensuite démoulés et mis en cure humide pour une durée de 7 jours avant d'être entreposés à l'air libre jusqu'au jour de l'essai. La Figure 3.1 illustre les spécimens (os, dallettes et prismes) lors des travaux de mise en place du UP-F3. Les dimensions des différents spécimens seront présentées aux Sections 3.1.3 et 3.1.4.

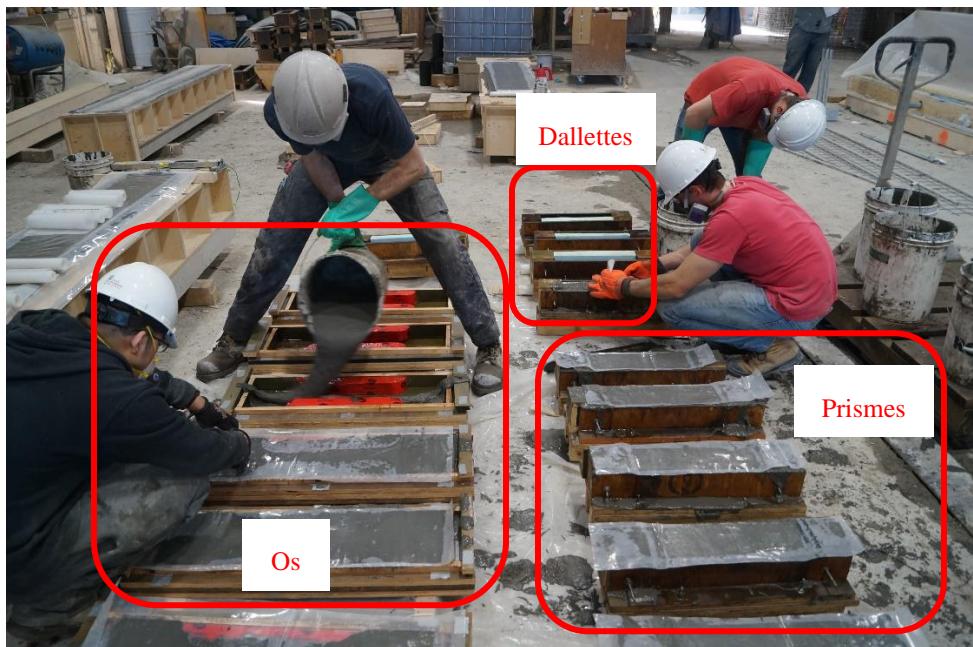


Figure 3.1 Images montrant les travaux de mise en place pour UP-F3

3.1.3 Essais de traction directe

3.1.3.1 Spécimens

Le comportement en traction directe des BFUP est déterminé sur un spécimen en forme d'os. Comme la norme CSA A23.01-02 ne spécifie pas de directives spécifiques pour les essais de traction directe sur les BFUP (Section 2.2.2), la procédure utilisée est une procédure interne développée à Polytechnique Montréal (Beaurivage 2009). Dans le cadre du présent projet, des os de section centrale de 50 mm x 100 mm ont été utilisés pour la campagne préliminaire alors que deux géométries d'os différentes ont été utilisées pour le programme final, soit les mêmes os que dans la campagne préliminaire (section centrale de 50 mm x 100 mm) ainsi que des os de section centrale de 50 mm x 50 mm. L'emplacement de la surface truellée pour les deux types d'os est indiqué à la Figure 3.2.

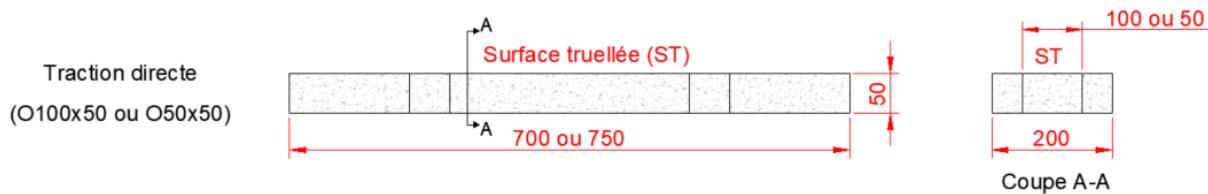
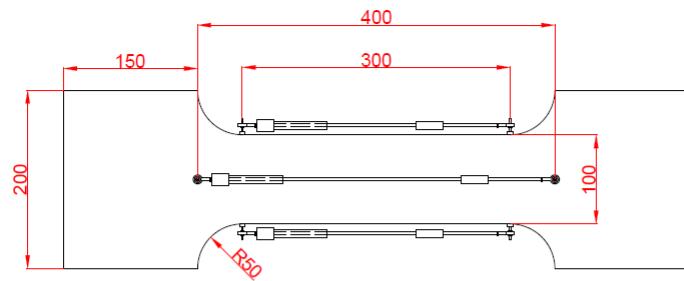
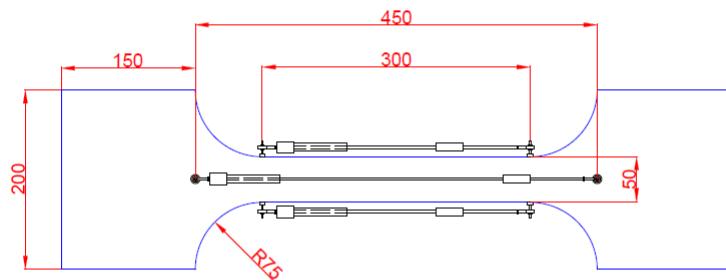


Figure 3.2 Vue de côté et de face montrant l'emplacement de la surface truellée pour les os

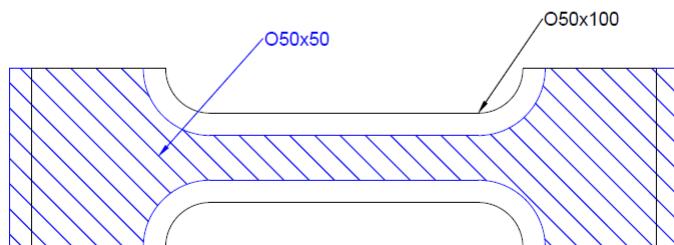
La surface truellée pour les os est la plus grande face du spécimen, soit celle en forme d'os. Cette face se retrouve au-dessus du spécimen lors de la mise en place tel que montré à la Figure 3.1 et à la Figure 3.2. La Figure 3.3 détaille les dimensions des deux types d'os avec une vue du dessus, soit une vue de la surface truellée en forme d'os.



a) Os de section centrale de 50mm x 100 mm (O50x100)



b) Os de section centrale de 50mm x 50 mm (O50x50)



c) Superposition des O50x100 et O50x50

Figure 3.3 Dimensions des os O100x50 et O50x50 utilisées dans les campagnes expérimentales

Ces os comprennent trois zones. Les sections élargies, situées aux deux extrémités du spécimen, permettent aux mâchoires de la presse de serrer adéquatement l'os durant l'essai pour éviter tout glissement de ce dernier pendant l'application du chargement. La section réduite, qui se situe au centre du spécimen, est l'endroit où est attendue la fissure principale (macrofissure). Les zones intermédiaires, situées entre la zone centrale réduite et les zones élargies, servent à modifier

progressivement la largeur du spécimen. Même si la fissuration principale est souhaitée dans la section centrale, il arrive assez fréquemment qu'elle se produise au début du changement de section, la variation de section étant assez abrupte. La Figure 3.4 illustre le cas d'une macrofissure formée dans la zone centrale (Figure 3.4a) ainsi que le cas d'une macrofissure formée au début du changement de section (Figure 3.4b).



a) Fissuration dans la section réduite

b) Fissuration dans le changement de section

Figure 3.4 Types de fissuration généralement observés sur les os sollicités en traction directe

3.1.3.2 Acquisition des données durant l'essai

La force de traction appliquée sur le spécimen ainsi que le déplacement associé sont enregistrés en continu durant l'essai. La force est mesurée directement par la cellule de charge de la presse, tandis que les déplacements du spécimen sont obtenus via des capteurs de déplacements nommés « LVDT » fixés sur des plots collés directement sur le spécimen. Comme la fissuration est attendue dans la section centrale réduite de l'os qui mesure 300 mm de longueur, deux LVDT, positionnés sur deux faces opposées, couvrent cette zone (Figure 3.3). Deux autres LVDT sont positionnés sur les deux autres faces opposées de manière à couvrir également la zone de changement de section, soit sur une longueur de 400 mm pour les os O100x50 et de 450 mm pour les os O50x50 (Figure 3.3). Ces capteurs permettent de capter la fissuration principale dans l'éventualité où celle-ci aurait lieu dans la zone de changement de section. Lorsque c'est le cas, la section utilisée pour déterminer la contrainte de traction est restée celle de la section réduite puisqu'un tel emplacement de la fissure indique que la section centrale réduite résiste minimalement à cette contrainte.

Selon le positionnement de la macrofissure, dans la zone centrale ou au changement de section, le déplacement considéré est celui donné par la moyenne des deux LVDT les plus courts ou les plus longs respectivement. Pour certains essais, un système de mesure par corrélation d'images (DIC)

a été utilisé sur une des tranches (face de 50 mm de largeur) du spécimen. Lorsque c'est le cas, le LVDT de 300 mm couvrant habituellement cette face doit être retiré. Pour ces essais spécifiquement, seul le déplacement du capteur restant a été utilisé. La Figure 3.5 illustre les configurations d'essai sans et avec le DIC.

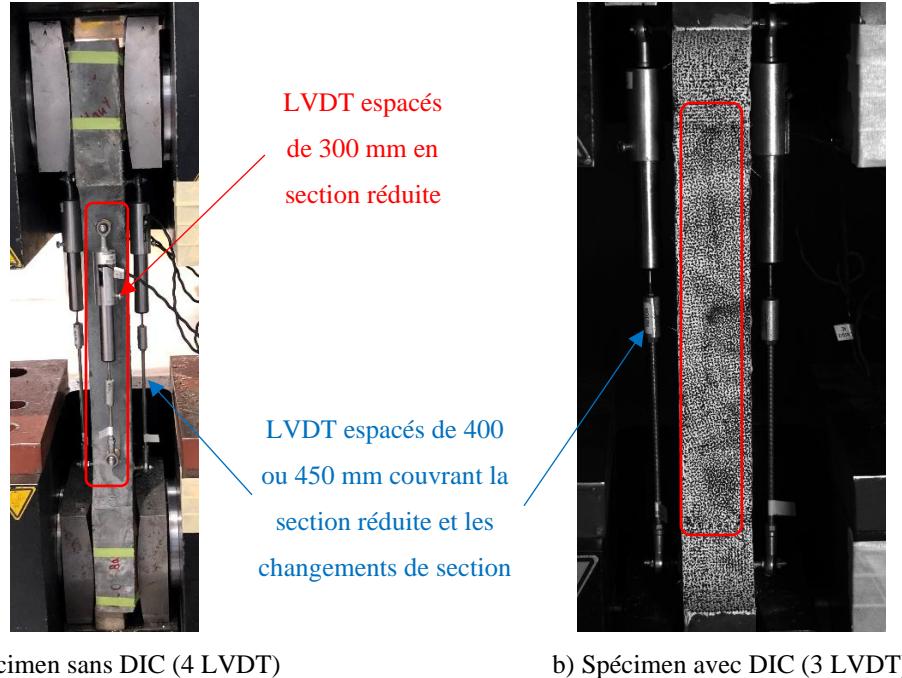


Figure 3.5 Illustration des spécimens de traction avec et sans le système de mesure par corrélation d'image (DIC)

Alors que quatre LVDT sont habituellement présents sur le spécimen (Figure 3.5a avec un des capteurs cachés par le spécimen), seuls trois LVDT sont présents sur l'os lors de l'utilisation du DIC (Figure 3.5b). La face sans capteur est dans ce cas peinturée en blanc et recouverte d'un mouchetis noir nécessaire à l'analyse par corrélation d'images. Le principe du DIC sera expliqué en détail à la Section 3.1.6.

3.1.3.3 Déroulement des essais

Une fois l'installation des capteurs de déplacements terminée, le spécimen est placé dans les mâchoires de la presse. Un morceau de *masonite* est appliqué sur la face coffrée du spécimen et un

morceau de contreplaqué mince est fixé sur la face arasée qui se situe de l'autre côté pour assurer une bonne adhérence des mâchoires avec les parties élargies des os. Cette étape est faite pour les deux extrémités du spécimen. Ensuite, un alignement des mâchoires est effectué avec le spécimen pour minimiser les efforts de flexion lors de la réalisation de l'essai de traction. La Figure 3.6 présente un schéma du spécimen positionné dans la presse.

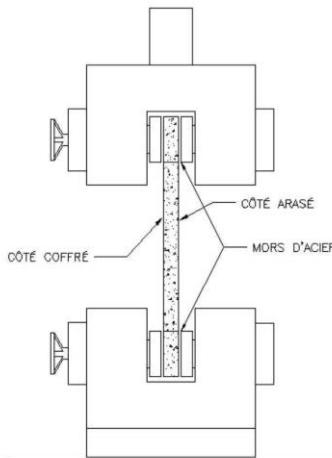


Figure 3.6 Schéma du positionnement du spécimen de traction dans les mâchoires de la presse

Un pré serrage des mâchoires est effectué sur les parties élargies du spécimen avant le serrage final pour permettre au *masonite* et au contreplaqué de bien épouser la forme de la zone élargie de l'os. Lorsque le serrage final est fait, l'essai peut débuter. Le chargement est contrôlé en déplacement, du vérin de la presse à un taux de 0.1 mm/min jusqu'à atteindre la force maximale. Lorsque la force atteint 70% de la force maximale en post-pic, la vitesse de chargement est augmentée progressivement par un taux d'accélération de 0.05 mm/min². L'essai est arrêté lorsque la force en post-pic atteint 3 kN. La fréquence d'acquisition des données est de 5 Hz.

3.1.4 Essais de flexion

3.1.4.1 Spécimens

Trois géométries différentes de spécimens ont été utilisées tel que résumé au Tableau 3.3. Tous les spécimens d'essai ont une longueur constante de 400 mm mais diffèrent par leur section transversale. Celle-ci est soit rectangulaire (100 mm x 50 mm ou 150 mm x 50 mm) et on parle

alors de dallette (B, C ou D), soit prismatique (100 mm x 100 mm) et on parle alors de prisme (P). Tel que présenté à la Section 2.2.2, la norme CSA A23.01-02 spécifie des spécimens prismatiques.

Tableau 3.3 Géométries des spécimens de flexion

Type de section	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Hauteur (mm)
Rectangulaire (type B et C)	400	100	50
Rectangulaire (type D)	400	150	50
Carrée (type P)	400	100	100

3.1.4.2 Configuration d'essai

Les spécimens précédemment décrits sont sollicités en flexion 4 points tel que stipulé dans l'Annexe U de la norme CSA A23.01-02 (Section 2.2.2). Pour ces essais, la surface truellée (non-coffrée) des spécimens est positionnée sur le côté (Figure 3.7) de manière à assurer une surface plane avec une bonne répartition des efforts au niveau des points de supports et des points d'application de la charge. C'est donc dire qu'une rotation de 90 degrés est effectuées pour ces spécimens par rapport à leur sens de coulée. Le fait d'avoir une surface coffrée au niveau de la fibre extrême tendue fait également en sorte d'avoir une orientation des fibres préférentielle à cet endroit, où les efforts de traction sont maximaux, dû à l'effet de bord présenté à la Section 2.2.4.2 et rappelé à la Section 3.1.2.

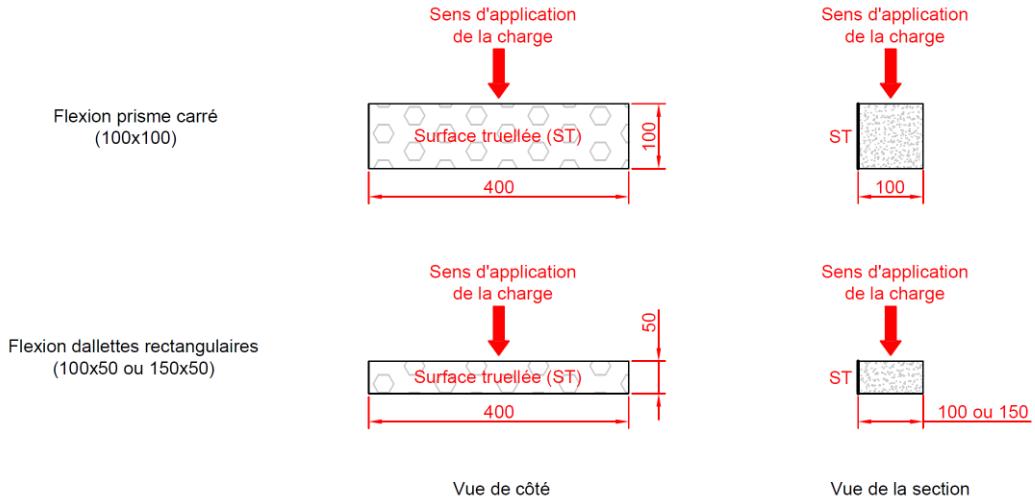


Figure 3.7 Emplacement de la surface truelliée durant l'essai de flexion 4 points

La Figure 3.8 montre un schéma du montage de flexion utilisé.

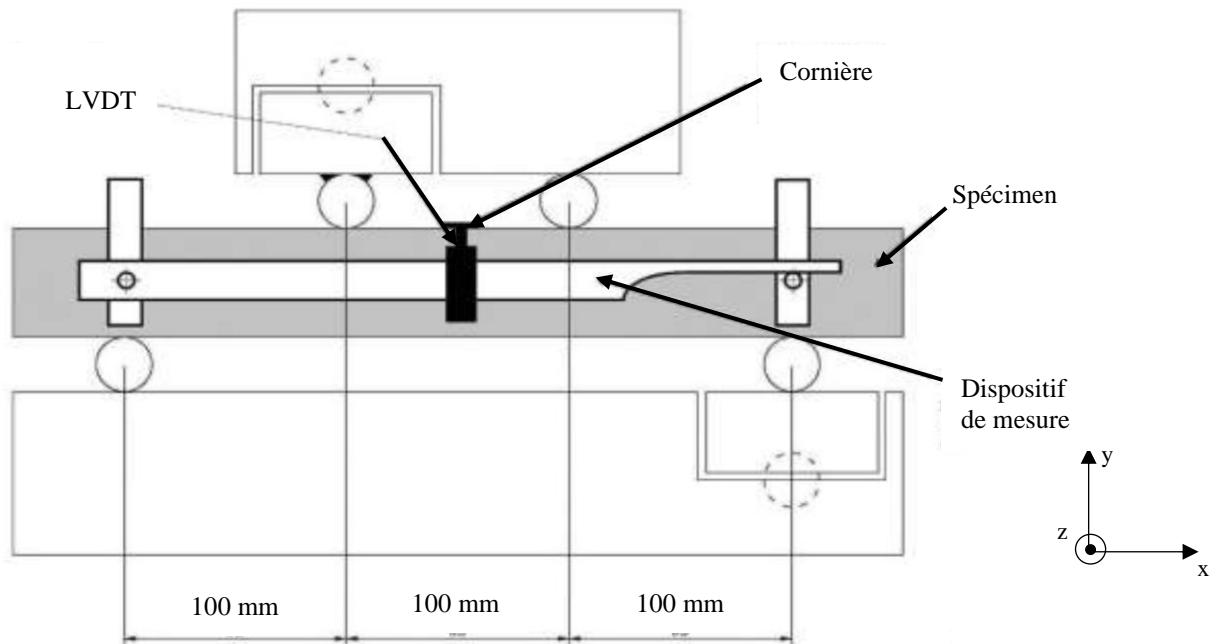


Figure 3.8 Montage de flexion 4 points utilisé lors du projet

Pour les prismes de section 100 mm x 100 mm, la norme CSA A23.01-02 spécifie une portée de 300 mm (Section 2.2.2). La même portée a été utilisée pour les dallettes qui ne sont pas des spécimens normés. Dans tous les essais, les points d'application de la charge sont espacés du tiers de la portée, soit de 100 mm (Figure 3.8).

Les conditions d'appuis consistent en quatre rouleaux. Les deux rouleaux inférieurs sont libres de se déplacer selon l'axe x de la Figure 3.8, tandis qu'un seul rouleau supérieur peut le faire. L'autre rouleau supérieur est fixé à la plaque de chargement mais sa rotation autour de l'axe x est permise. Cette rotation est également permise au niveau de l'appui inférieur du côté opposé. Afin d'assurer une bonne répartition des charges sur ces appuis et minimiser les effets de frottement entre les appuis et le spécimen, des plaques minces d'acier ont été positionnées sur le spécimen, à l'endroit prévu de contact avec les appuis, à l'aide d'un mortier de résistance élevée à durcissement rapide (Dry-Stone).

3.1.4.3 Acquisition des données durant l'essai

La force totale appliquée sur le spécimen ainsi que la flèche à mi-portée correspondante sont mesurées en continu durant l'essai. La force est mesurée directement par la cellule de charge du vérin de 240 kN de capacité. La flèche à mi-portée considérée est la moyenne des flèches mesurées par des LVDT positionnés de chaque côté du spécimen (Figure 3.9a). Ces LVDT sont supportés par un cadre métallique fixé sur le spécimen au niveau des points de support, où la flèche est nulle, et sont appuyés sur des cornières métalliques collées sur la partie supérieure centrale du spécimen. Lorsque le spécimen se déforme, les LVDT, positionnés verticalement, se compriment pour mesurer la flèche à mi-portée.

Tout comme pour les essais de traction directe, un système de mesure par corrélation d'images (DIC) a été utilisé sur une face de certains spécimens tel qu'illustré à la Figure 3.9b. Dans ce cas, le LVDT qui mesure habituellement la flèche sur cette face est retiré et la flèche considérée est celle du seul LVDT restant sur la face opposée.

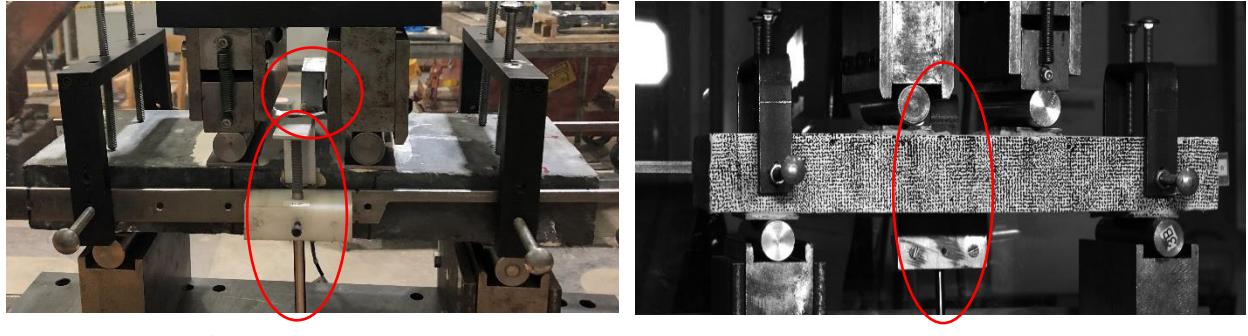


Figure 3.9 Illustration des spécimens de flexion avec et sans le système de mesure par corrélation d'images (DIC)

3.1.4.4 Déroulement des essais

Quelle que soit la géométrie des spécimens, l'essai est contrôlé en déplacement du vérin à une vitesse de chargement de 0.2 mm/min. Cette vitesse est augmentée par un taux d'accélération de 0.05 mm/min² lorsque la force atteint 70% de la force maximale en post-pic jusqu'à une vitesse maximale de 1 mm/min. L'essai est arrêté lorsque la force atteint 3 kN en post-pic. La fréquence d'acquisition de données est de 5 Hz.

3.1.5 Détermination de la densité et de l'orientation des fibres

Pour mieux comprendre et analyser les résultats des essais de traction et de flexion, il est pertinent de connaître l'orientation et la densité des fibres puisque ces deux paramètres ont un impact important (Sections 2.2.5 et 2.2.6). La technique d'évaluation de la densité et de l'orientation des fibres utilisée dans ce projet de recherche est une méthode par analyse d'images développée par Lee [24] en 2009 et améliorée par Delsol [23] en 2012. Un algorithme permet, à partir d'une image scannée à haute résolution, de détecter les fibres, d'associer une ellipse à chaque fibre trouvée et d'en déduire un angle d'orientation par rapport à l'axe perpendiculaire à l'image analysée.

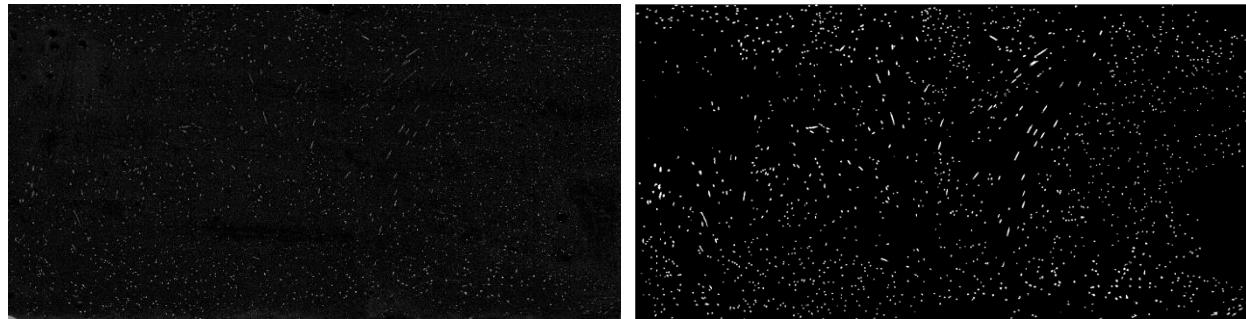
Afin d'associer les résultats (densité et orientation des fibres) au comportement mécanique obtenu lors des essais, il est important que la section analysée soit représentative du plan de rupture qui contrôle le comportement mécanique global. Pour ce faire, il est nécessaire de faire une coupe dans les spécimens d'essais près de la zone de rupture et parallèlement au plan de fissuration dans le

spécimen. Une autre coupe est généralement nécessaire près de la coupe initiale, et parallèlement à celle-ci, pour extraire une mince tranche du spécimen qui puisse être numérisée. La Figure 3.10 présente quelques exemples de tranches utilisées pour évaluer l'orientation et la densité des fibres dans les différents spécimens de traction et de flexion.



Figure 3.10 Tranches minces non préparées extraites des spécimens de flexion et de traction pour évaluer l'orientation et la densité des fibres

Avant de numériser les surfaces voulues, une étape cruciale consiste à préparer ces surfaces. La surface obtenue doit être polie à l'aide d'un sable abrasif appliqué sur une table tournante. La surface est ensuite peinte avec une gouache noire mat. En frottant ensuite la surface peinte avec un papier abrasif très fin, la peinture recouvrant les fibres s'enlève et les fibres apparaissent alors que la matrice reste noire. L'objectif de cette étape est de créer un contraste adéquat entre les fibres et la matrice du BFUP pour permettre au programme d'analyse d'image de bien identifier les fibres. Lorsque le contraste est jugé adéquat, la tranche extraite du spécimen peut être numérisée avec une résolution élevée (2400 ppp). L'image résultante de cette étape est par la suite binarisée et différents filtres sont appliqués par l'algorithme pour permettre d'identifier adéquatement les fibres et calculer de l'orientation des fibres. La Figure 3.11 montre la différence entre l'image numérisée (Figure 3.11a) et l'image binarisée finale (Figure 3.11b).



a) Image numérisée de la surface préparée d'une tranche

b) Image binarisée et filtres résultant du traitement de l'algorithme sur l'image numérisée

Figure 3.11 Comparaison de l'image numérisée avec l'image binarisée nécessaire à l'obtention de l'orientation des fibres

À la fin du traitement, l'algorithme génère et analyse chacune des ellipses représentant les fibres sur l'image binarisée finale. Chaque ellipse permet de déterminer l'orientation de la fibre associée et les résultats sont compilés automatiquement dans un fichier Excel pour chacune des fibres détectées. Une fibre formant un angle de 90 degrés par rapport à la direction de l'effort de traction est orientée défavorablement pour reprendre les efforts de traction et contrôler la fissuration. Cette fibre se retrouve parallèle au plan de coupe de la tranche nécessaire à l'analyse d'image et présente donc une ellipse très allongée. À l'inverse, une fibre ayant une orientation de 0 degré par rapport à la direction de l'effort de traction est orientée favorablement. Cette fibre est donc perpendiculaire à la coupe de la tranche et forme une ellipse parfaitement ronde. Le programme exprime les angles en fonction de la direction de l'effort de traction. Ainsi, une orientation d'une fibre de 0 degré est l'orientation la plus favorable mécaniquement tandis qu'une orientation de 90 degrés est la plus défavorable.

Comme l'algorithme de calcul détecte chacune des fibres, il est également possible de calculer la densité de fibres de la section analysée en divisant le nombre total de fibres par l'aire totale de l'image. La densité de fibres est donc exprimée en fibres/mm².

La connaissance de l'orientation et de la densité des fibres dans un spécimen permet de comprendre les différences de comportement obtenues en traction ou en flexion entre différents spécimens ayant des conditions d'essais identiques. Dans certains cas, il est souhaitable de comparer le comportement de certains spécimens sur la base d'une orientation et densité des fibres similaires.

Les courbes de comportement mécanique peuvent alors être pondérées par rapport à une orientation et densité des fibres fixées. Ce type de pondération est requis dans ce projet puisque, afin de valider une méthode d'analyse inverse, il est primordial de travailler avec des données de flexion et de traction cohérentes obtenues sur des spécimens ayant des orientations et densités des fibres similaires. La méthode de pondération utilisée dans ce projet est celle proposée par Olivier Deaux [34]. Elle consiste à multiplier la contrainte de la courbe brute par un facteur γ_i déterminé avec l'Équation (3.1).

$$\gamma_i = \sqrt{\frac{\theta_i}{\theta_{ref}} \times \frac{\rho_{ref}}{\rho_i}} \quad (3.1)$$

Dans cette équation, le paramètre thêta (θ) représente l'orientation des fibres et le paramètre rhô (ρ) représente la densité de fibres. L'indice « i » réfère à la valeur associée à la courbe à pondérer alors que l'indice « ref » réfère à l'orientation et la densité de référence visées et auxquelles la courbe pondérée sera associée. L'objectif dans ce projet étant d'avoir une orientation et une densité similaire pour les spécimens de traction et de flexion, l'orientation et densité de référence (θ_{ref} et ρ_{ref}) sont fixées comme étant l'orientation et la densité de fibres moyennes obtenues sur les spécimens de traction.

3.1.6 Système de mesure par corrélation d'images

3.1.6.1 Principe général

Un système de mesure par corrélation d'images (DIC) et le logiciel VIC3D a été utilisé sur plusieurs spécimens de traction et de flexion (Sections 3.1.3 et 3.1.4). Ce système permet de mesurer des déplacements et des déformations d'une surface préalablement peinte en blanc, puis recouverte d'une multitude de petits points noirs (mouchetis) tel qu'illustré à la Figure 3.12.

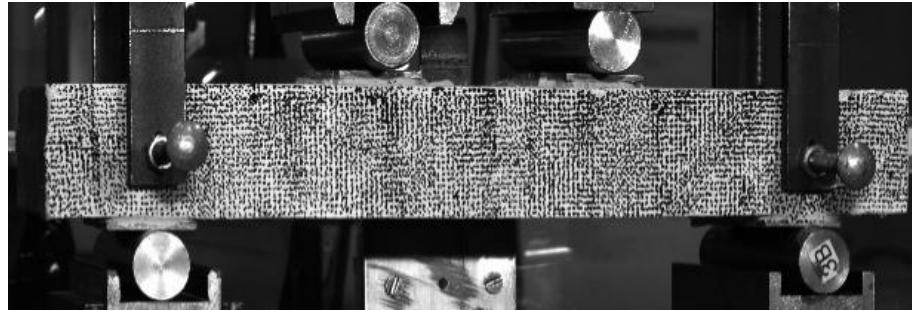


Figure 3.12 Exemple d'une surface mouchetée sur un spécimen rectangulaire de flexion

La grosseur de ces points dépend de la plus grande dimension de la surface mouchetée et ils doivent être disposés le plus aléatoirement possible sur celle-ci. Au total, la surface mouchetée doit avoir autant de noir que de blanc, ce qui fait qu'un grand nombre de points doivent être créés.

Lorsque la surface mouchetée est prête, deux caméras de 5 mégapixels sont positionnées avec un angle approximatif de 30 degrés entre elles et de manière à pointer vers un endroit commun de la surface mouchetée (Figure 3.13). Il est également important d'avoir un éclairage adéquat sur la surface mouchetée pour éviter toute zone d'ombre qui pourrait fausser les résultats lors du traitement des images. Les deux caméras sont connectées à un ordinateur qui contrôle la prise des images. Durant l'essai, ce système permet de capter les mouvements de chaque point de la surface mouchetée pour en déduire les déformations associées.

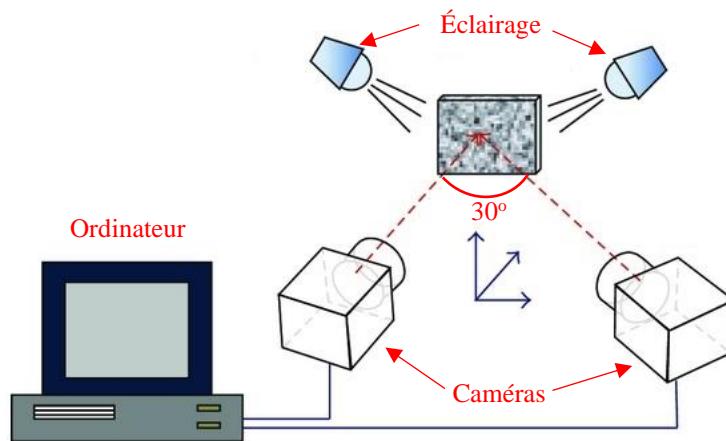


Figure 3.13 Schéma montrant la disposition des caméras pour le système de mesure par corrélation d'images

3.1.6.2 Acquisition des images

À l'aide de l'ordinateur de contrôle et du logiciel « VIC Snap », les deux caméras ont été programmées pour prendre une image par seconde tout au long de l'essai. Les essais de traction et de flexion durant approximativement 30 min, environ 3 600 images sont captées par les caméras durant ces essais. Il est important de synchroniser le commencement de la prise d'images par le système DIC avec le début de l'essai et de l'acquisition des données des capteurs LVDT, puisque ce n'est pas le même ordinateur de contrôle qui donne le départ aux deux systèmes.

3.1.6.3 Traitement avec le logiciel VIC3D

L'utilisation des deux caméras permet d'avoir deux angles de vue différents de la surface étudiée et d'en déduire, via un processus de corrélation précis implémenté dans le logiciel d'analyse VIC3D, l'évolution des déplacements et des déformations d'une image par rapport à l'image initiale qui sert de référence. La Figure 3.14 montre un exemple de champ de déformations obtenu avec VIC3D pour des spécimens de flexion et de traction.

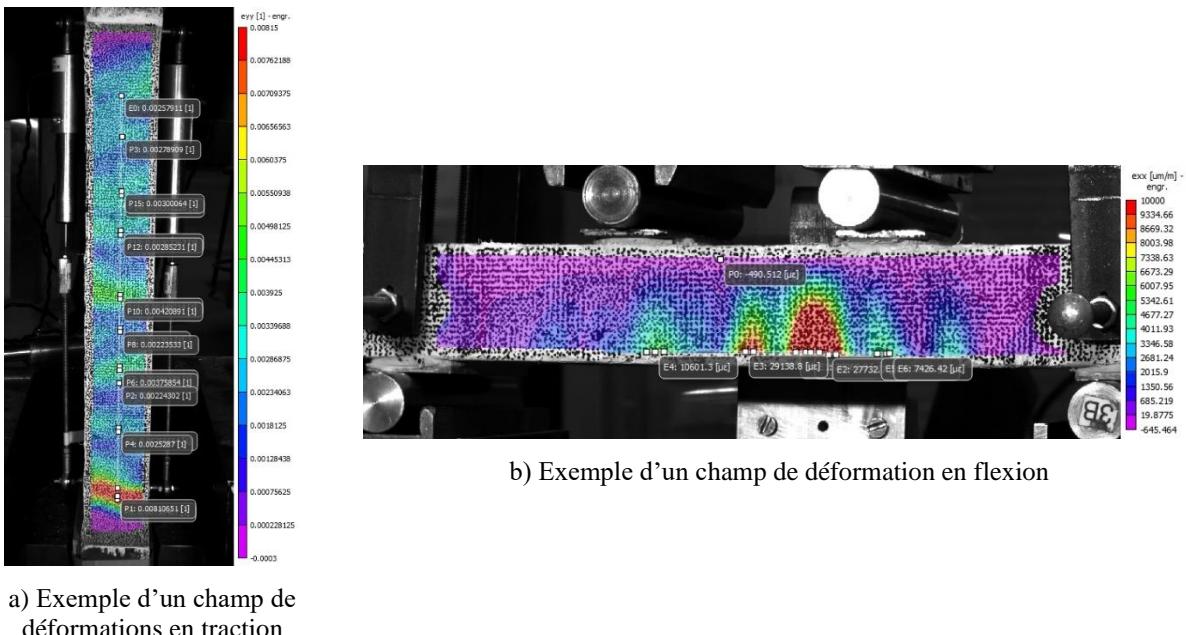


Figure 3.14 Exemples de champs de déformation obtenus à la suite de la corrélation d'images par VIC3D

Ces champs de déformation permettent d'observer le patron de fissuration qui se forme dans un spécimen puisque les fissures représentent des zones de plus grande déformation. Sur le spécimen de traction par exemple (Figure 3.14a), la fissuration (zones rouges et vertes) est traversante et se développe perpendiculairement à l'effort de traction, et donc à l'horizontal sur la Figure 3.14a. Pour ce qui est du spécimen de flexion (Figure 3.14b), les fissures se développent perpendiculairement à cet effort, donc à la verticale sur la Figure 3.14b. Elles commencent dans le bas du spécimen où l'effort de traction est maximal puis progressent ensuite vers le haut. Les déformations à l'endroit des fissures sont donc plus importantes dans le bas du spécimen. L'étude des champs de déformation permet de visualiser des fissures qui ne peuvent pas être détectées à l'œil nu, tel que les microfissures par exemple.

Une fois les fissures repérées, il est également possible de mesurer l'évolution de leurs ouvertures durant l'essai. Pour ce faire, des capteurs de déplacement virtuels doivent être adéquatement positionnés dans le logiciel VIC3D. Ces derniers, représentés par deux points blancs reliés par une ligne blanche sur la Figure 3.14, mesurent le déplacement relatif entre ces deux points et la déformation associée. Les résultats sont automatiquement compilés dans un fichier Excel par le logiciel VIC3D. Pour les essais de traction directe, les fissures étant traversantes et donc d'ouverture assez uniforme sur l'ensemble de l'épaisseur du spécimen, l'ouverture des fissures a été mesurée au centre du spécimen. Pour les essais de flexion, l'ouverture des fissures a été mesurée à la fibre inférieure du spécimen étant donné que les calculs d'analyse inverse donnent le comportement en traction de la fibre inférieure du spécimen de flexion.

Le fait de pouvoir analyser en détail les champs de déformation et les patrons de fissuration des spécimens de traction et de flexion dans ce projet a été un atout considérable pour la compréhension du comportement mécanique des BFUP et de la performance des méthodes d'analyse inverse.

3.2 Programmation des méthodes d'analyse inverse

Les méthodes de calcul inverse ont pour objectif d'obtenir le comportement en traction directe d'un béton à partir des résultats de flexion sur ce même béton. Les principales méthodes de calcul inverse présentées à la Section 2.3 (SIA, Lopez itérative et Lopez 5 points) ont été programmées dans un fichier Excel de manière à automatiser l'analyse et ainsi gagner du temps lorsque cette analyse est

faite pour un grand nombre de spécimens. La programmation a majoritairement été faite dans le cadre de la maîtrise de El Guerouahi à Polytechnique Montréal [35]. Cependant, certaines optimisations ont été apportées au cours de ce projet pour en améliorer le fonctionnement. Cette section présente sommairement le fichier développé par El Guerouahi ainsi que les modifications effectuées.

3.2.1 Présentation sommaire du fichier Excel développé par El Guerouahi [35]

Le fichier Excel développé par El Guerouahi est divisé en trois étapes nécessaires pour effectuer les calculs inverses de la méthode SIA, Lopez 5 points et Lopez itérative. La Figure 3.15 illustre la partie du fichier Excel qui regroupe les deux premières étapes.

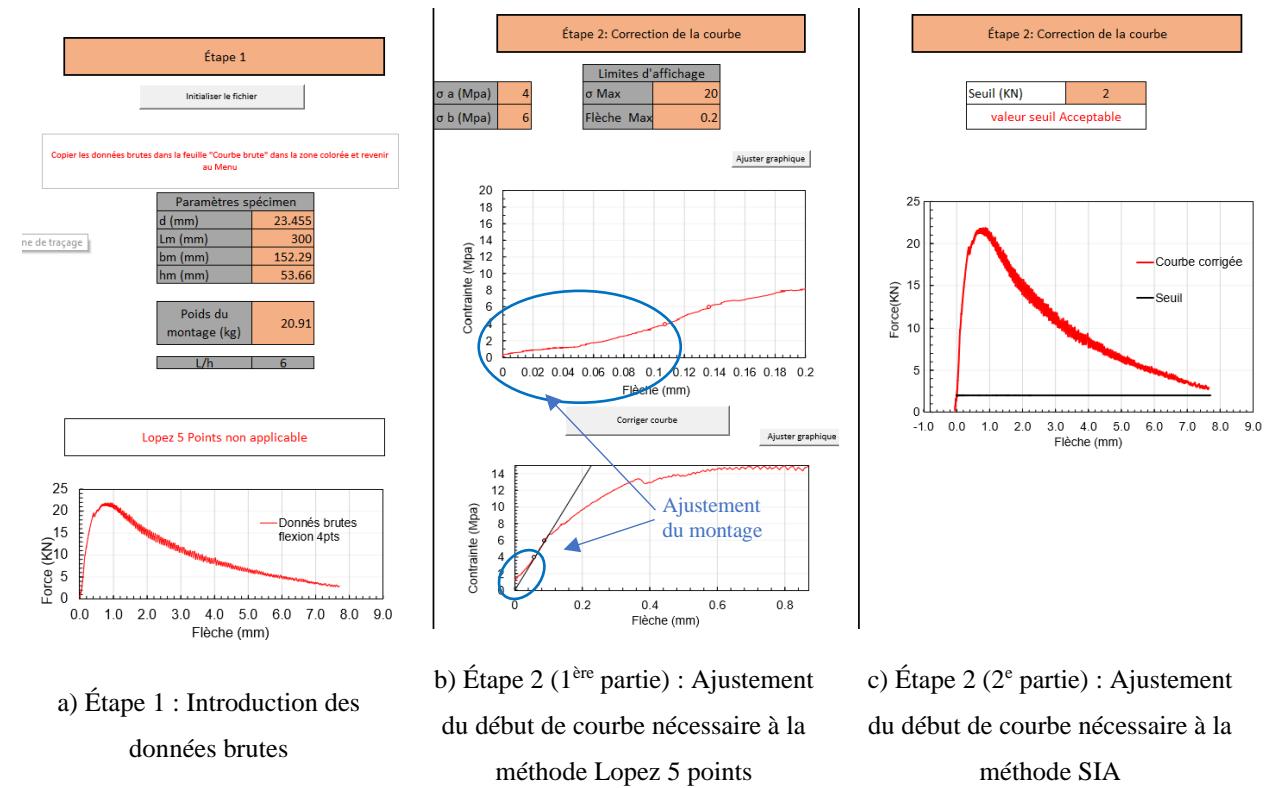


Figure 3.15 Étapes 1 et 2 nécessaires aux calculs inverses dans le fichier Excel [35]

La première étape (Figure 3.15a) consiste à introduire la courbe brute de flexion ainsi que les dimensions du spécimen qui lui sont associées. Le début de cette courbe brute est souvent perturbé

par l'ajustement du montage de flexion ou la mise en charge initiale du spécimen, ce qui fait en sorte de généralement observer un comportement qui n'est pas parfaitement linéaire au début tel qu'illustré dans l'encadré bleu de la Figure 3.15b, alors qu'il serait attendu d'observer un comportement élastique parfaitement linéaire sans ces effets de montage. La deuxième étape, qui est ici subdivisée en deux parties (Figure 3.15b et Figure 3.15c), consiste alors à faire des traitements sur le début de la courbe brute de manière que la zone perturbée mentionnée n'ait pas d'incidence négative sur les résultats de l'analyse inverse. La première partie de l'étape 2 (Figure 3.15b) concerne une modification requise pour le bon fonctionnement de la méthode Lopez 5 points pour laquelle il est nécessaire de déterminer la pente élastique S_0 de la courbe de flexion normalisée (Section 2.3.2). Cette modification consiste à linéariser la partie initiale perturbée de la courbe brute de flexion. Pour ce faire, deux points sont sélectionnés dans la zone de comportement élastique, en dehors de la zone perturbée (curseurs ronds sur la courbe de la Figure 3.15b). L'intersection de la droite passant par ces deux points avec l'axe des abscisses devient le point d'origine de la courbe. L'ensemble de la courbe est ensuite décalé selon l'axe des abscisses pour que ce point d'origine devienne le point de coordonnées (0 ; 0). La valeur de S_0 est alors déduite à partir de la droite passant par les deux points sélectionnés.

Étant donné que le paramètre recherché dans le début de la courbe de flexion dans la norme SIA pour l'application de la méthode inverse est le point de fin de linéarité (perte définitive de 1% de la moyenne mobile du module sécant, Section 2.3.3), El Guerouahi a décidé d'appliquer un autre traitement que celui fait pour l'application de la méthode Lopez 5 points. Ce traitement, retrouvé dans la partie 2 de l'étape 2 (Figure 3.15c), consiste à ignorer le début de courbe perturbé. Pour ce faire, l'utilisateur fixe une valeur seuil de contrainte (représentée par la droite noire sur la courbe de la Figure 3.15c). Les données en dessous de cette valeur seuil sont alors ignorées et le calcul de la moyenne mobile du module débute à partir de cette valeur seuil.

Tout comme pour les méthodes d'analyse inverse de Lopez 5 points et de la SIA, des traitements de la courbe brutes sont nécessaires dans la méthode Lopez itérative afin de garantir la qualité des résultats résultant de l'analyse inverse. C'est le rôle de l'étape 3 du fichier Excel programmé par El Guerouahi. Cette étape est illustrée à la Figure 3.16.

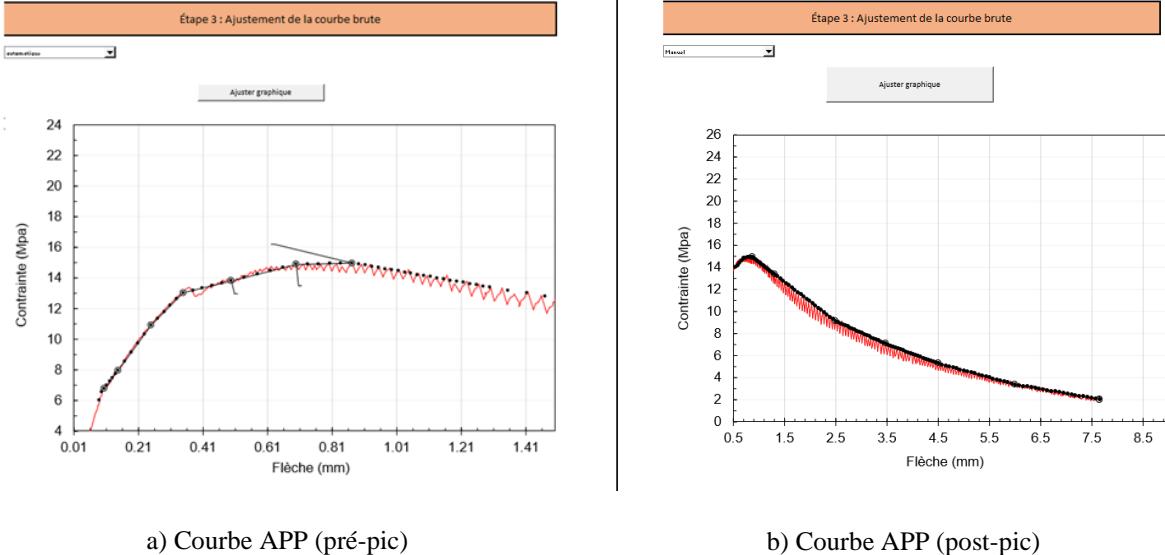


Figure 3.16 Étape 3 du fichier Excel de El Guerouahi [35]

Pour rappel, la méthode Lopez itérative consiste à appliquer un processus itératif visant à minimiser les erreurs entre la courbe de flexion expérimentale et la courbe de flexion théorique (Section 2.3.1). Les petits sauts observés dans la courbe brute expérimentale (courbe rouge à la Figure 3.16), causés par la création de fissures ou le glissement des fibres, peuvent rendre le processus de minimisation des erreurs plus hasardeux pour le solveur. L'étape 3 a alors pour objectif de remplacer la courbe brute de flexion par une courbe simplifiée (courbe noire sur la Figure 3.16). Cette courbe simplifiée a été nommée courbe APP (approximée par point) par El Guerouahi. Elle est construite par l'utilisateur qui joue sur la position des points principaux (points noirs de plus grand diamètre sur les courbes de la Figure 3.16) jusqu'à obtenir une bonne reproduction de l'enveloppe supérieure de la courbe brute. Une fois ces points principaux sélectionnés, d'autres points intermédiaires sont déduits par interpolation linéaire tel que visible sur la Figure 3.16a qui représente un zoom sur la partie pré-pic de la courbe de flexion. La présence d'un nombre suffisant de point est nécessaire au bon fonctionnement du calcul inverse.

3.2.2 Optimisations apportées au fichier Excel

Les étapes 2 et 3 du fichier Excel développé par El Guerouahi, présentées à la Section 3.2.1, ont été optimisées dans le cadre de ce projet. La Figure 3.17 présente les nouvelles étapes du fichier optimisé.

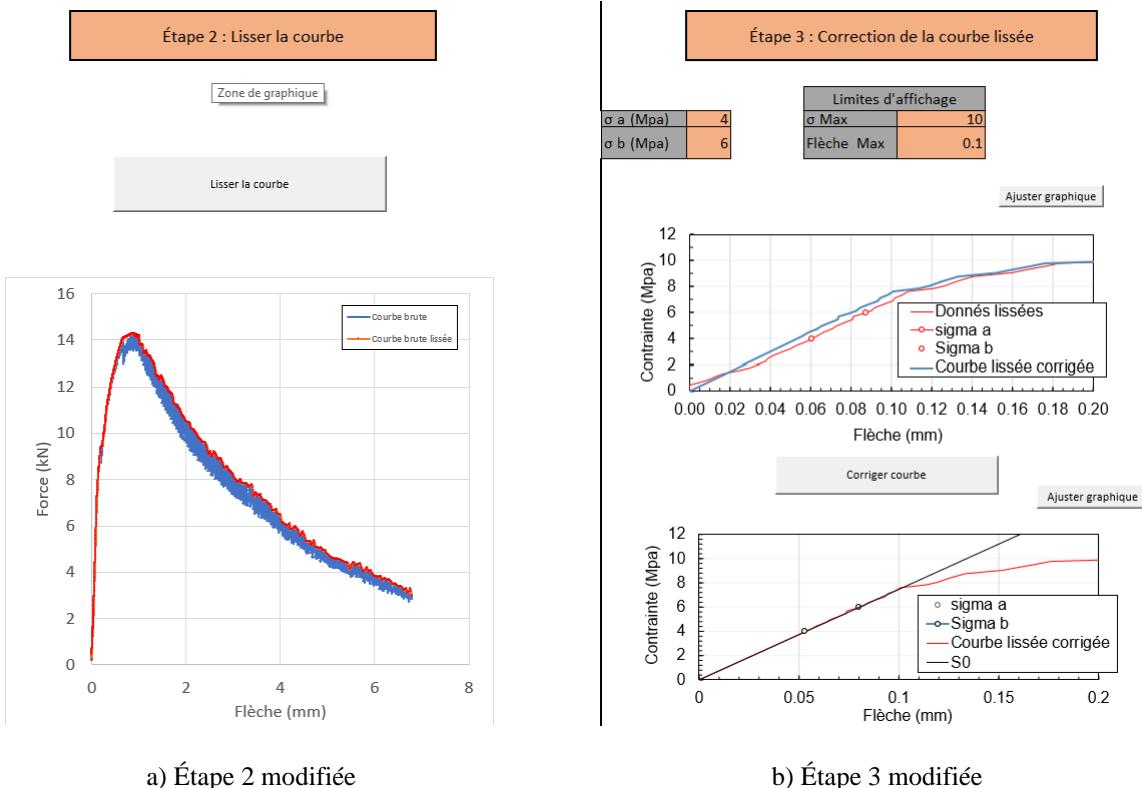


Figure 3.17 Modifications aux étapes 2 et 3 du fichier Excel de calcul inverse

La première optimisation (Étape 2 à la Figure 3.17a) consiste à lisser l'enveloppe supérieure de la courbe brute expérimentale (courbe rouge sur la Figure 3.17a) avant de corriger le début de courbe brute perturbée. Cette opération permet de ne plus à avoir à passer par une courbe APP pour l'utilisation de la méthode Lopez itérative. Cette étape de lissage remplace donc l'étape 3 du fichier Excel de El Guerouahi.

La deuxième optimisation (Étape 3 à la Figure 3.17b) consiste à avoir une seule méthode d'ajustement du début perturbé de la courbe brute de flexion. Cette méthode d'ajustement sert à la fois pour l'utilisation de la méthode Lopez 5 points et pour celle de la SIA et remplace donc les

deux ajustements différents qui étaient utilisés par El Guerouahi pour ces méthodes (décalage de courbe et valeur seuil, respectivement pour les méthodes de Lopez 5 points et SIA, cf. section 3.2.1). La nouvelle méthode d'ajustement du début de la courbe brute (Figure 3.17b) consiste à linéariser ce début de courbe de la même manière que dans la partie 1 de l'étape 2 du fichier El Guerouahi (Figure 3.15b). La différence est que ce début perturbé (de l'origine (0,0) jusqu'au premier point sélectionné) est cette fois remplacé par une droite de même pente que la pente déterminée entre les deux points sélectionnés alors que, dans le fichier de El Guerouahi, le début de courbe brute était décalé mais conservé. Ce nouveau traitement permet d'obtenir la courbe corrigée lissée (courbe bleue) présentée au graphique supérieur de la Figure 3.17b.

Tel que cela sera expliqué plus tard dans ce mémoire, la méthode d'analyse inverse de la SIA a été sélectionnée dans ce projet pour être adaptée aux essais et BFUP utilisés pour les ouvrages en génie civil. Un nouveau fichier de calcul Excel allégé a alors été créé pour ne contenir que le calcul inverse de la méthode SIA, et dans lequel il sera possible d'intégrer les adaptations de la méthode pour le contexte des normes canadiennes. La Figure 3.18 illustre les étapes 1 à 3 de ce fichier.

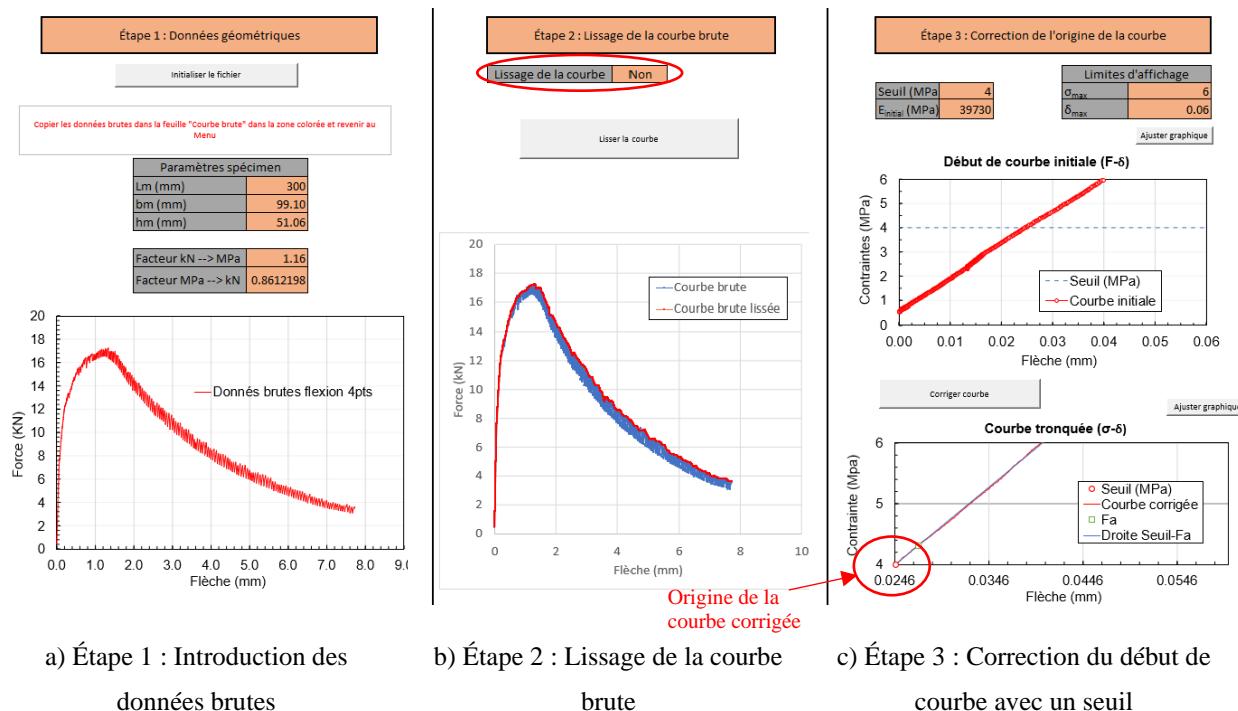


Figure 3.18 Étapes nécessaires pour l'utilisation du fichier Excel de calcul inverse contenant seulement la méthode SIA

Une première différence avec le fichier optimisé comprenant l'ensemble des méthodes d'analyse inverse (présenté à la Figure 3.17) est le fait que le lissage de la courbe brute est facultatif à l'étape 2 (Figure 3.18b). En effet, cette étape n'est pas primordiale pour la qualité des résultats du calcul inverse de la SIA qui se concentre seulement sur le comportement pré-pic de la courbe brute où il y a peu d'oscillations. La courbe peut malgré tout être lissée si l'utilisateur le juge nécessaire. L'étape 3 de la Figure 3.18c est également différente de celle présentée à la Figure 3.17b. Comme il n'est plus nécessaire de déterminer la pente S_0 (requise pour la méthode Lopez 5 points), la linéarisation du début de la courbe ne se fait plus avec l'utilisation de deux points déterminés sur la portion linéaire de la courbe brute mais avec l'utilisation d'une valeur seuil en contrainte, comme dans le fichier initial de départ de El Guerouahi (Figure 3.16c). Cet ajustement de courbe a été priorisé pour rendre la correction de la courbe plus simple et moins dépendante des deux points initialement choisis. L'origine de la courbe est alors définie comme étant le point de la courbe brute d'essai le plus près de la valeur seuil précédemment choisie. L'origine de la courbe corrigée est illustrée sur la courbe du bas de la Figure 3.18c. Dans cet exemple, l'origine de la courbe est le point d'abscisse 0.0246 mm (flèche) et d'ordonnée 4 MPa (contrainte). Le calcul du module élastique E_i en tout point « i » de la courbe, demandé dans la méthode d'analyse inverse de la SIA (Section 2.3.3), est alors déterminé en calculant la pente entre ce point et le point d'origine déterminé (ici le point (0.0246, 4)). En comparaison, le module élastique E_i était calculé par rapport au point (0, 0) dans le fichier Excel développé par El Guerouahi.

Le fichier Excel optimisé comprenant les trois méthodes d'analyse inverse (Lopez 5 points, Lopez itérative et SIA, Figure 3.17) ainsi que le fichier Excel simplifié, optimisé pour la méthode SIA spécifiquement (Figure 3.18) ont été utilisés pour les analyses inverses réalisées dans ce projet.

3.3 Modélisation par éléments finis avec le logiciel ATENA

Plusieurs hypothèses clés de la méthode d'analyse inverse de la norme SIA (Section 2.3.3) découlent de résultats de modélisations par éléments finis (ÉF) de l'essai de flexion utilisé par la norme SIA. Comme la configuration de l'essai de flexion spécifié dans la norme CSA A23.01-02 est différente de celui de la norme SIA, des modélisations ÉF ont été réalisées afin d'étudier l'impact de ces différences de configurations sur certaines hypothèses adoptées par la norme SIA.

Cette section présente les propriétés des modèles numériques réalisés (Section 3.3.1), les lois de traction implémentées (Section 3.3.2) ainsi que la validation de ces modèles par des résultats expérimentaux (Section 3.3.3).

3.3.1 Propriétés des modèles numériques

Les modélisations EF ont été réalisées avec le logiciel ATENA 3D (« Advance Tool for Engineering Nonlinear Analysis ») qui est un logiciel commercialisé par la compagnie Cervenka Consulting et qui est spécialisé dans la simulation d’éléments en béton et béton armé.

L’objectif de la modélisation par éléments finis réalisée dans ce projet est de reproduire le plus fidèlement possible le comportement en flexion de différents spécimens de flexion 4 points utilisés lors des programmes expérimentaux de ce projet et présentées à la Section 3.1. La Figure 3.19 illustre deux des configurations d’essai modélisées, soit une dallette de section 150 mm x 50 mm (Figure 3.19a) et un prisme de section 100 mm x 100 mm (Figure 3.19b), avec une portée de 300 mm et une distance de 100 mm entre les deux points d’application de la charge. Les points d’application de la charge et les points de supports sont modélisés par des plaques d’acier prismatiques de 10 mm de largeur par 10 mm de hauteur et ayant une longueur égale à la largeur du spécimen (100 mm ou 150 mm selon la section du spécimen). La largeur de 10 mm est identique à celle des plaques utilisées expérimentalement entre les spécimens et les rouleaux (supports).

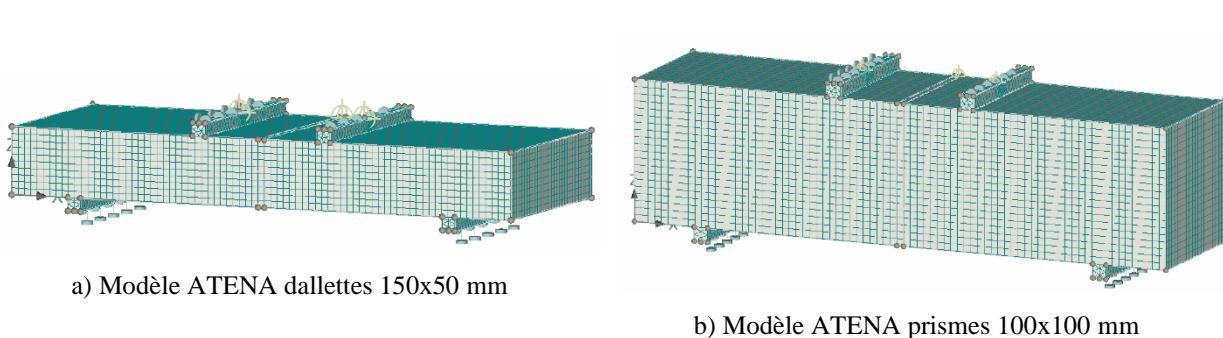


Figure 3.19 Illustration du modèle éléments finis avec ATENA pour différentes géométries

Le BFUP a été modélisé à l’aide du module « CC33DNonlinCementitious2User » disponible dans ATENA [36]. Ce module offre la possibilité d’introduire manuellement des lois de comportement

obtenues d'essais de caractérisation et de représenter adéquatement le comportement écrouissant puis adoucissant du BFUP en traction. Ce modèle considère un modèle de fissuration en traction et un modèle de plasticité en compression. La compression est caractérisée par un comportement écrouissant en pré-pic et un comportement adoucissant en post-pic selon la surface de rupture de Menétrey-Willam. La traction permet de caractériser la fissuration selon un modèle orthotrope et des bandes de fissuration selon le critère de Rankine. Le module « CC33DNonlinCementitious2User » a été priorisé aux autres modèles présents dans ATENA puisque les lois de contrainte-déformation peuvent être spécifiées manuellement par l'utilisateur. Cet avantage permet de bien implémenter le comportement distinctif des BFUP dans les modélisations. La Figure 3.20 présente un exemple d'une loi de traction qui peut être entrée manuellement selon le module « CC33DNonlinCementitious2User ».

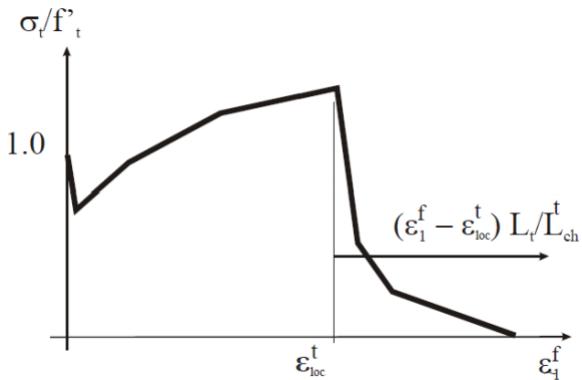


Figure 3.20 Loi de comportement en traction du matériau CC33DNonlinCementitious2User [36]

Les plaques de support et de chargement ont été modélisées par de l'acier élastique de 200 GPa de module. Une interface acier-béton a également été définie entre ces plaques et le spécimen de BFUP. Les propriétés de cette interface ont été définies dans des projets précédents menés à Polytechnique Montréal. La résistance en traction ($f_t = 0.5$ MPa), la cohésion ($C = 1$ MPa), la résistance tangentielle ($K_{tt} = 1 \times 10^7$ MN/m³) et la résistance normale ($K_{nn} = 1 \times 10^7$ MN/m³) sont les paramètres du matériau « CC3DInterface » utilisé dans ATENA qui permettent de représenter le plus adéquatement l'interaction entre les plaques d'acier et le spécimen en BFUP lors des essais expérimentaux de flexion 4 points réalisés à Polytechnique.

Le maillage utilisé dans les modèles ATENA est constitué d'éléments solides 3D cubiques (éléments « brick ») de 5 mm de manière à avoir au moins 10 éléments dans chacune des dimensions du spécimen (la plus petite dimension possible étant 50 mm). Ces éléments solides possèdent 8 points d'intégration. Un raffinement du maillage a été imposé près du centre de la surface supérieure des plaques supérieures, soit à l'endroit de l'application de la charge, afin d'avoir une bonne fiabilité sur l'acquisition de la force appliquée lors du chargement qui est contrôlé en déplacement dans la simulation. Un autre raffinement de maillage a été appliqué sur la ligne transversale au centre inférieur des plaques d'appui. Ces raffinements forcent l'utilisation d'éléments finis tétraédriques à un point d'intégration pour ces plaques.

Les conditions limites spécifiées au niveau des appuis sont les mêmes que celles décrites à la Section 3.1.4, soit une translation selon l'axe longitudinal permise pour tous les appuis à l'exception de la charge supérieure droite. La translation des plaques de chargement selon l'axe transversal (largeur du spécimen) n'est pas permise, mais la rotation est possible selon ce même axe. L'application du chargement est contrôlée en déplacement tout comme dans les essais expérimentaux (Section 3.1.4). Pour chaque pas de calcul, un déplacement vertical de 0.05 mm est imposé au centre des deux plaques d'application de la charge. Dans le but d'accélérer le temps de calcul du modèle, le taux de chargement est augmenté à 0.15 mm au 15^e pas de calcul et à 0.25 mm au 25^e pas de calcul.

Les modèles éléments finis utilisés considèrent les non-linéarités des matériaux et de géométrie, et sont résolus par analyses incrémentales. Les équations d'équilibre sont résolues à chaque incrément en utilisant les résultats de l'incrément précédent comme conditions initiales. La résolution des systèmes d'équations non linéaires ainsi générés est effectuée par la méthode itérative de Newton-Raphson combinée avec la méthode d'intégration de Gauss avec des fonctions d'intégrations linéaires.

3.3.2 Lois de traction implémentées dans les modèles

Les premiers modèles ont été réalisés en considérant une loi de comportement en traction directe du BFUP similaire sur l'ensemble du spécimen. Cette loi était une loi simplifiée du comportement moyen obtenu lors des essais de caractérisation sur os de section 100 mm x 50 mm. Étant donné la zone de moment constant entre les deux points d'application de la charge en flexion 4 points, la

considération d'une seule loi de traction pour l'ensemble du spécimen conduisait à la formation de deux macrofissures tel qu'illustré sur la Figure 3.21.

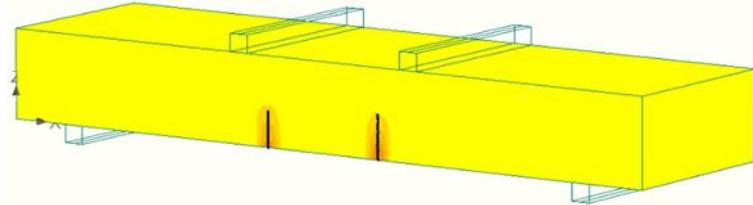


Figure 3.21 Double fissuration lors de la modélisation des essais de flexion 4 points

Dans les essais expérimentaux, une seule macrofissure se forme à l'endroit de résistance à la traction la plus faible du BFUP étant donné la variabilité inhérente au matériau. La double fissuration n'est donc pas souhaitée puisque cela va induire une distribution de l'énergie de rupture en deux endroits plutôt qu'en un seul, ce qui va induire un comportement en flexion différent du comportement observé expérimentalement. Pour régler cette problématique, la résistance en traction doit être légèrement plus faible à un endroit dans la zone de moment constant de manière à simuler la variabilité des propriétés du BFUP. Il a alors été décidé d'introduire une maille centrale (dans le centre longitudinal du spécimen, sur toute la hauteur) aux propriétés en traction légèrement réduites par rapport au reste du spécimen. Ceci a permis de forcer la localisation d'une seule fissure à cet endroit (Figure 3.22).

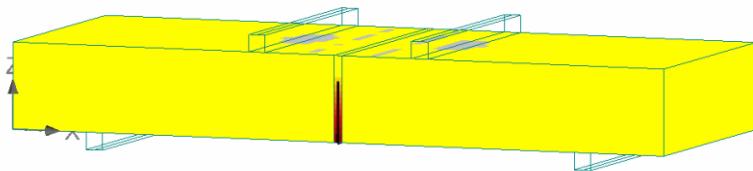


Figure 3.22 Illustration de la maille centrale pour un spécimen de flexion

Étant donné que cette fissure centrale gouverne le comportement en flexion du spécimen, la loi de traction réelle du matériau a été introduite dans la maille centrale alors que la loi de traction du

BFUP à l'extérieur de cette maille a été légèrement augmentée. Cette deuxième loi est nommée loi augmentée. La Figure 3.23 présente la loi de traction expérimentale réelle du BFUP3, la loi simplifiée associée dans ATENA (« loi réelle_ATENA »), utilisée pour la maille centrale, et la loi augmentée utilisée à l'extérieur de la maille centrale. Sur la Figure 3.23, le comportement pré-pic est illustré en contrainte-déformation (Figure 3.23a) alors que le comportement post-pic est exprimé en contrainte-ouverture de fissure (Figure 3.23b).

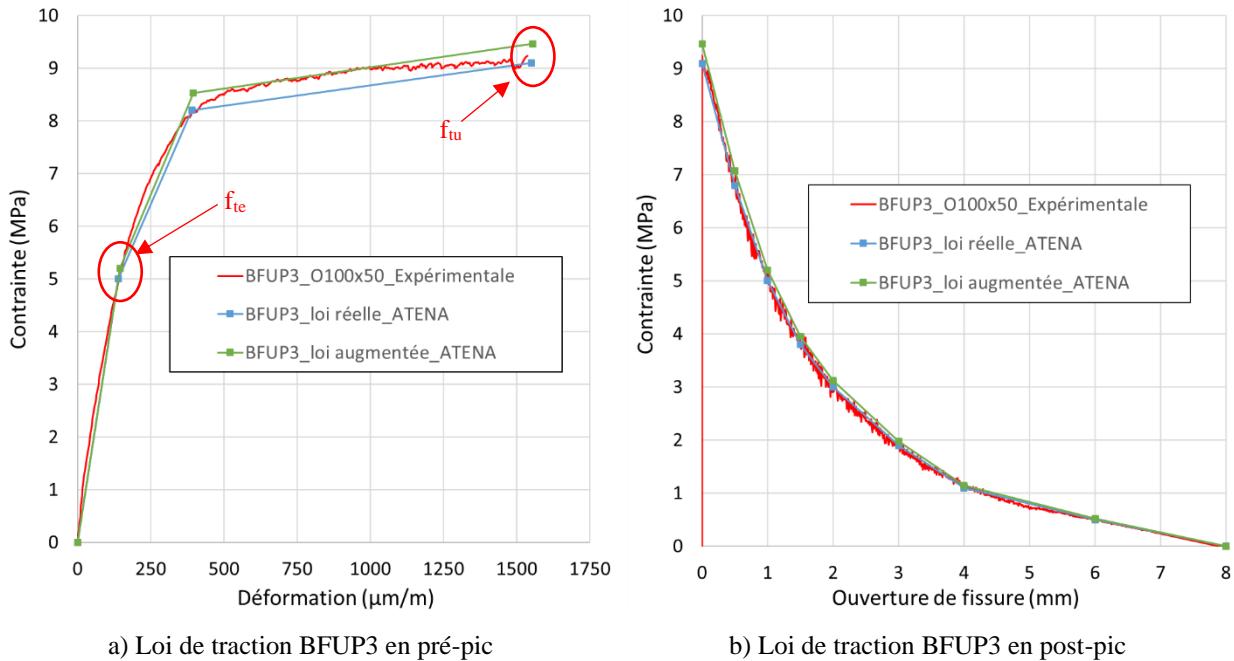


Figure 3.23 Exemple d'une loi de traction (BFUP3) simplifiée nécessaire à la modélisation

Dans ATENA, la contrainte correspondant aux différents points représentés à la Figure 3.23 est définie comme un ratio de la contrainte élastique (f_{te}). Dans l'exemple de la Figure 3.23, f_{te} et f_{tu} (contrainte à l'ultime) étant respectivement égales à 5 et 9.1 MPa, la contrainte f_{tu} est définie dans Atena par la valeur 1.82 (soit 9.1/5). Pour ce qui est de la loi augmentée, celle-ci doit également être caractérisée selon une valeur de contrainte élastique. De manière à garder l'allure de la courbe similaire dans la loi augmentée, il a été décidé d'augmenter la valeur de f_{te} d'un certain pourcentage sans modifier les ratios de contraintes implémentés dans la loi de traction. Une analyse paramétrique a été réalisée pour déterminer l'impact de pourcentage d'augmentation de f_{te} (+2, +4

ou +8%) utilisé pour la loi de traction augmentée à l'extérieur de la maille centrale. La Figure 3.24 présente cette étude paramétrique menée sur des dallettes de BFUP3, de section 150 mm x 50 mm. Sur cette figure, les courbes continues grises représentent le comportement expérimental individuel de chaque spécimen testé, la courbe rouge représente le comportement moyen correspondant et les courbes en pointillés vert, bleu et noir représentent les résultats numériques pour les augmentations de 2, 4 et 8% respectivement.

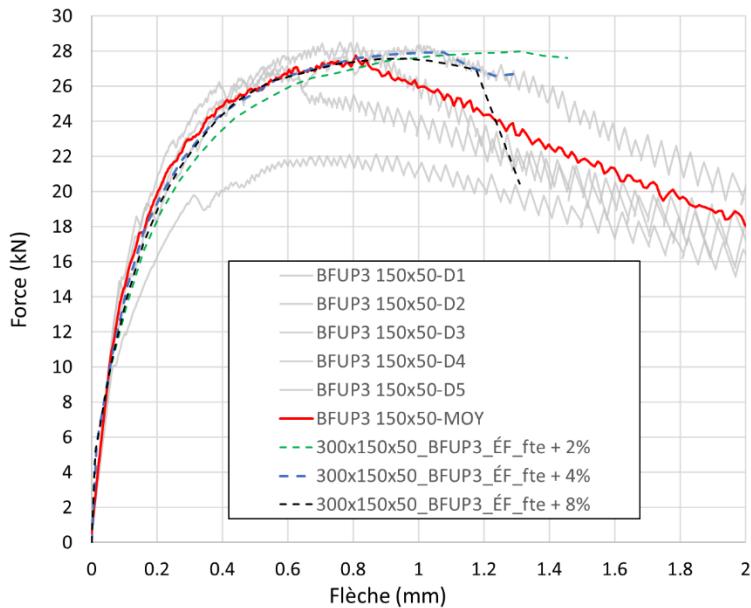


Figure 3.24 Comparaison de la performance du modèle éléments finis pour différentes lois augmentées sur le BFUP3

Plus l'augmentation de f_{te} dans la loi augmentée est grande, plus la flèche au pic diminue (flèches de 1.308, 1.076 et 0.955 mm pour les augmentations de 2, 4 et 8% respectivement, Figure 3.24).

Étant donné que la flèche au pic expérimentale est un peu mieux reproduite avec des augmentations de f_{te} dans la loi augmentée de 4 et 8%, il a été décidé de poursuivre les modélisations avec une augmentation de 4%. Ceci permet d'assurer la localisation d'une seule fissure sans implémenter des lois de traction trop différentes dans les deux parties du spécimen (maille centrale et à l'extérieur de cette maille).

3.3.3 Validation du modèle pour les différentes géométries étudiées

Une fois les paramètres du modèle déterminés, celui-ci a été validé par des données expérimentales. Pour ce faire, différents jeux de données de traction directe et de flexion obtenus sur un BFUP donné ont été utilisés. La loi de traction directe moyenne mesurée sur le BFUP étudié est alors introduite dans le modèle et le comportement en flexion résultant du calcul par éléments finis est comparé aux courbes de flexion expérimentales. La Figure 3.25 présente la performance de la modélisation ATENA pour différentes géométries de spécimens de flexion et différents BFUP. À nouveau, les courbes continues grises et rouges sont respectivement les courbes expérimentales individuelles et moyennes, et la courbe pointillée bleue représente le résultat numérique (EF).

Les jeux de données expérimentales obtenus sur le BFUP dans le cadre de ce projet ont été utilisés pour les résultats présentés aux Figure 3.25a et Figure 3.25b alors que les résultats présentés aux Figure 3.25c et Figure 3.25d proviennent de jeux de données d'autres projets. La Figure 3.25c utilise les résultats expérimentaux du projet Létourneau à Polytechnique Montréal [37] qui a testé des os (O100x50) en traction directe ainsi que des prismes carrés de section 100 mm x 100 mm en flexion. La Figure 3.25d utilise les résultats expérimentaux du BFUP KING 2% qui sera présenté plus en détail à la Section 5.1 du présent document.

Bien que la force maximale obtenue numériquement soit parfois légèrement surestimée par rapport à la force moyenne obtenue expérimentalement, celle-ci reste dans le fuseau formé par les courbes individuelles et la surestimation pourrait provenir du fait que l'orientation des fibres est généralement plus préférentielle dans les spécimens de traction directe, et donc dans la loi de traction introduite dans ATENA, que dans ceux de flexion. Concernant la flèche au pic, elle est assez bien reproduite par les modèles. Le modèle est donc jugé performant et adéquat pour bien décrire le comportement en flexion de plusieurs géométries de spécimen et plusieurs BFUP.

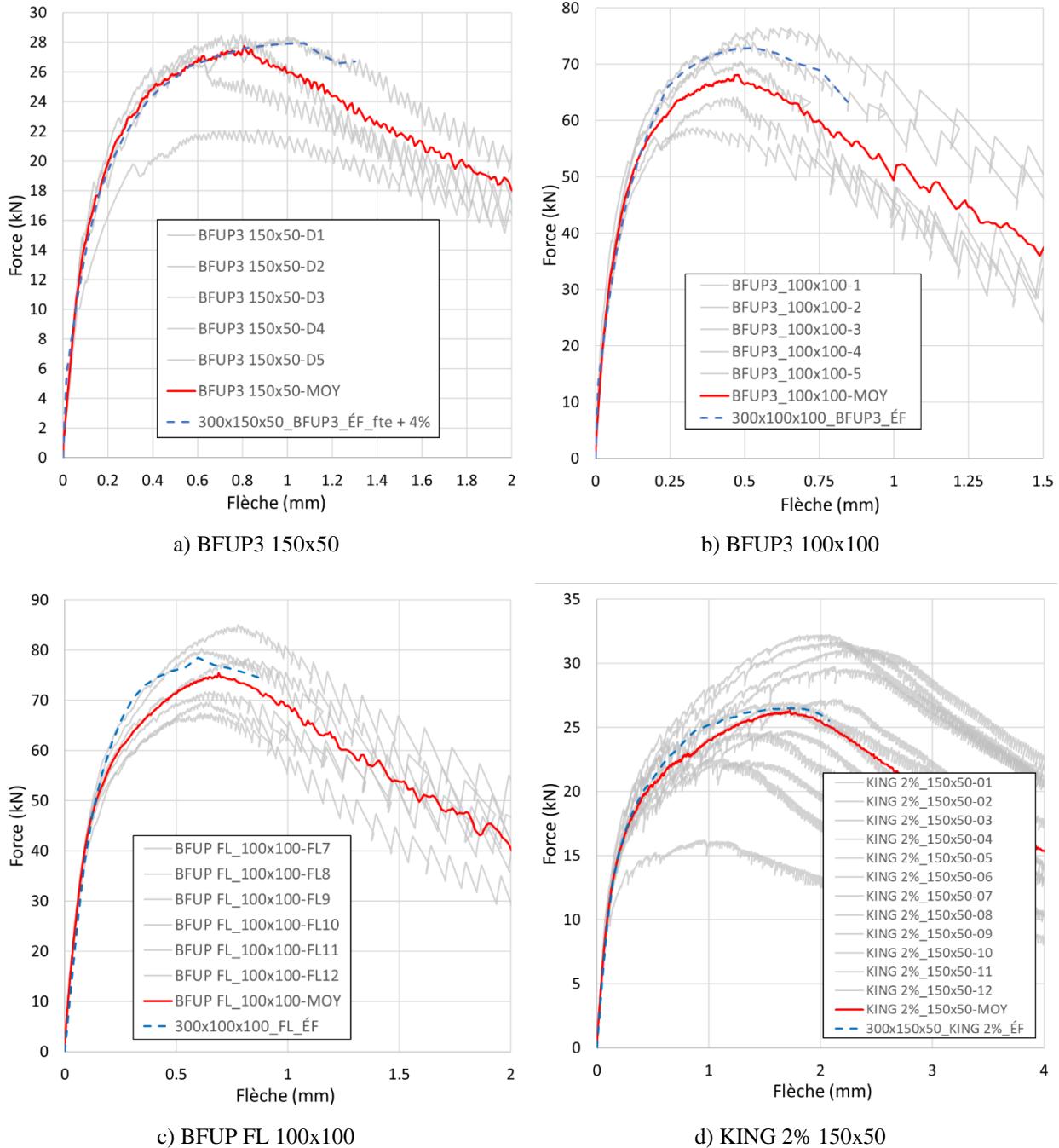


Figure 3.25 Performance du modèle ATENA développé pour différentes géométries et différents BFUP

3.4 Synthèse

Le Chapitre 3 présente la méthodologie expérimentale utilisée pour les différents essais de caractérisation (traction et flexion) et la méthodologie d'analyse utilisée pour obtenir les différents résultats nécessaires au développement de d'un méthode d'analyse inverse adaptée. Les informations importantes de ce chapitre sont les suivantes :

- Deux campagnes expérimentales ont été réalisées dans le cadre du présent projet de recherche. La première campagne préliminaire a permis la caractérisation du comportement en traction et en flexion d'un BFUP avec un dosage en fibres de 3% nommé « BFUP3 ». Les fibres utilisées dans le mélange de ce BFUP sont des fibres chinoises de mauvaise qualité, soit avec un comportement mécanique inférieur aux fibres utilisées normalement dans l'industrie. Les spécimens de traction de ce BFUP ont été mis en place avec des mouvements longitudinaux, tandis que les spécimens de flexion ont été coulés par une extrémité du coffrage. La deuxième campagne expérimentale finale a permis de caractériser le comportement en traction et en flexion d'un BFUP avec 2% de fibres (UP-F2) et avec 3% de fibres (UP-F3). Les spécimens de traction et de flexion ont été mis en place dans les coffrages avec des mouvements longitudinaux.
- Les mesures d'orientation et de densité des fibres ont été réalisées selon la méthodologie développée par Lee [24] et adaptée par Delsol [23]. L'évolution de la fissuration lors des essais de caractérisation a été caractérisée à l'aide d'un système de corrélation d'images (DIC).
- Un modèle éléments finis de l'essai de flexion 4 points utilisé dans le présent projet de recherche a été développé avec le logiciel ATENA. Ce modèle a été calibré et validé pour différentes géométries et différents mélanges de BFUP utilisés dans l'industrie.

CHAPITRE 4 CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE PRÉLIMINAIRE - IMPACT DE LA CONFIGURATION DE L'ESSAI DE FLEXION SUR LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE ET SUR LA PERFORMANCE DE L'ANALYSE INVERSE

La campagne expérimentale préliminaire a eu lieu en début de projet. Elle avait pour objectif principal d'évaluer la performance des trois méthodes d'analyse inverse présentées à la Section 2.3 (Lopez 5 points, Lopez itérative et SIA), pour un mélange de BFUP et pour des configurations potentielles d'essai de flexion sur prismes et sur dallettes utilisées au Canada. Ces méthodes d'analyse inverse ont donc été appliquées sur des résultats de flexion provenant de différentes configurations d'essais pour ensuite comparer le résultat obtenu avec des résultats d'essai de traction directe obtenu sur le même BFUP.

Ce chapitre présente en premier lieu le BFUP ainsi que les spécimens étudiés lors de cette campagne expérimentale (Section 4.1). Il présente ensuite les comportements en traction directe (Section 4.2) et en flexion 4 points (Section 4.3), pour les différentes géométries de spécimens testées. Finalement, la Section 4.4 montre l'application des trois méthodes d'analyse inverse (Lopez 5 points, Lopez itérative et SIA) sur les résultats de flexion obtenus et compare les résultats avec le comportement en traction du BFUP testé. La performance et les limitations de ces différentes méthodes, ainsi que le choix de la méthode optimale pour la suite du projet y sont discutés.

4.1 BFUP et spécimens à l'étude

Dans cette campagne expérimentale préliminaire, un seul BFUP a été étudié puisqu'il a été jugé plus important d'évaluer, dans un premier temps, l'impact des différentes configurations d'essai en flexion sur l'analyse inverse. Le BFUP sélectionné a été le BFUP3 étant donné la disponibilité de spécimens déjà coulés lors d'un précédent projet, tel qu'indiqué à la section 3.1.1. Les propriétés générales de ce BFUP sont présentées à la Section 3.1.1.

Le Tableau 4.1 présente les différents types de spécimens testés ainsi que le nombre de spécimens. Des spécimens en forme d'os (de section 100 mm x 50 mm), présentés à la section 3.1.3.1, ont été utilisés pour caractériser le BFUP3 en traction directe. Ces spécimens sont nommés O100x50. En

ce qui concerne les spécimens de flexion, des spécimens de flexion de section carrée de 100 mm x 100 mm (nommés prismes de type P) et des spécimens de section rectangulaire de 150 mm x 50 mm (nommés dallettes de type D) avaient été fabriqués lors du projet précédent. De manière à élargir la gamme de géométries étudiées, certains prismes de type P ont été sciés en deux, dans le sens longitudinal, pour obtenir des dallettes rectangulaires de section 100 mm par 50 mm (nommées dallettes de types B ou C selon leur positionnement dans le prisme tel qu'expliqué ci-dessous).

Tableau 4.1 Spécimens caractérisés lors de la campagne expérimentale préliminaire

Matériau	Type d'essai	Type de spécimens	Nombre de spécimens
BFUP3	Traction directe	O100x50	6
		100x50 type B	5
	Flexion 4 points	100x50 type C	5
		150x50 type D	5
		100x100 type P	5

La Figure 4.1 illustre un prisme de type P dans lequel ont été extraites deux dallettes de section 100 mm par 50 mm. Cette figure présente l'emplacement des traits de scie, en pointillés rouges. Le sciage a été effectué au centre du prisme, selon sa direction longitudinale et perpendiculairement à la surface truellée (Figure 4.1a), jusqu'à obtenir deux dallettes, nommées de types B et C (Figure 4.1c).

Lors des essais, les dallettes seront tournées à 90 degrés de telle sorte que la surface truellée se retrouve sur le côté tel qu'illustré à la Figure 4.1d. La surface truellée se retrouve donc au même endroit durant les essais que pour les dallettes de type D qui sont coulées dans des moules individuels depuis leur tranche de 50 mm d'épaisseur (Figure 3.7, Section 3.1.4.2). Lors des essais, la dallette de type B (B pour « bord ») est positionnée de telle sorte que la fibre extrême tendue correspond à la paroi longitudinale de coffrage du prisme, soit la même que pour les prismes de type P, alors que la dallette de type C (C pour « centre ») est positionnée de telle sorte que la fibre extrême tendue correspond à la section sciée, tel qu'illustré à la Figure 4.1d. Les différences de

comportement en flexion de ces deux types de dallettes (B et C), ainsi qu'entre les dallettes de type B et D et les prismes de type P, permettront d'étudier l'impact des géométries testées sur l'orientation des fibres, en particulier au niveau de la fibre extrême tendue. Il est par exemple attendu que l'orientation des fibres soit moins favorable au niveau de la fibre extrême tendue des dallettes de type C qui n'a pas été soumise à l'effet de paroi du coffrage (Section 2.2.4).

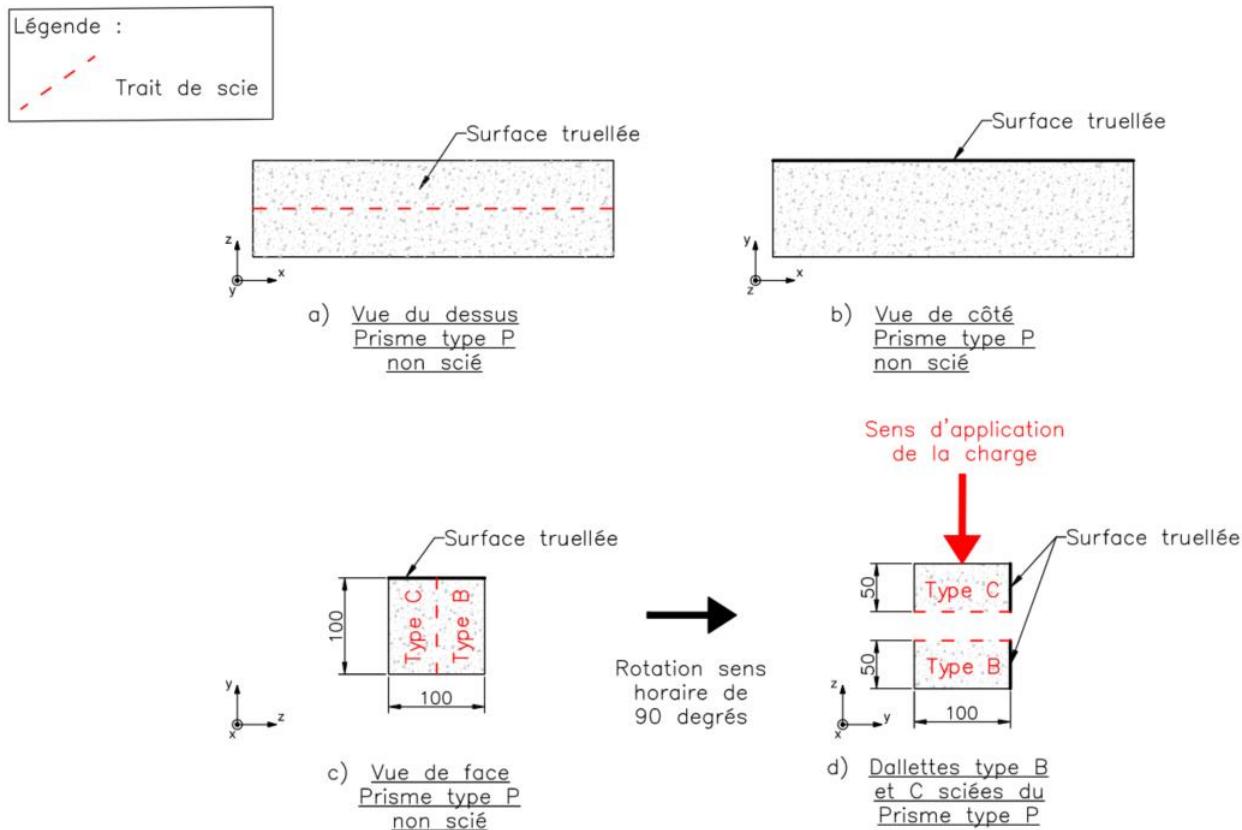


Figure 4.1 Localisation des traits de scie dans les prismes de type P pour obtenir les dallettes de types B et C

Les prismes de type P (100x100) et les dallettes de type D (150x50) ont été coulés par une extrémité tel que mentionné à la Section 3.1.2 (Tableau 3.2). Les dallettes de type B et C sont donc elles aussi coulées par une extrémité, puisqu'elles sont obtenues du sciage des prismes de type P. La méthode de mise en place pour les spécimens en traction (mouvements longitudinaux) est différente de celle utilisée pour les spécimens de flexion (écoulement par l'extrémité) du BFUP3 (Section 3.1.2). Cette

différence de mise en place, un aspect involontairement introduit dans le programme expérimental, pourrait avoir un impact lors de la comparaison des résultats d'analyse inverse des spécimens de flexion (dallettes de type B, C et D et prismes de type P) avec les résultats de traction directe des os (O100x50) du BFUP3.

4.2 Comportement en traction directe du BFUP3

Les essais de traction directe ont été menés à 358 jours sur les os O100x50. Six (6) spécimens de BFUP3 ont été testés. Leur comportement en traction sont présentés à la Figure 4.2.

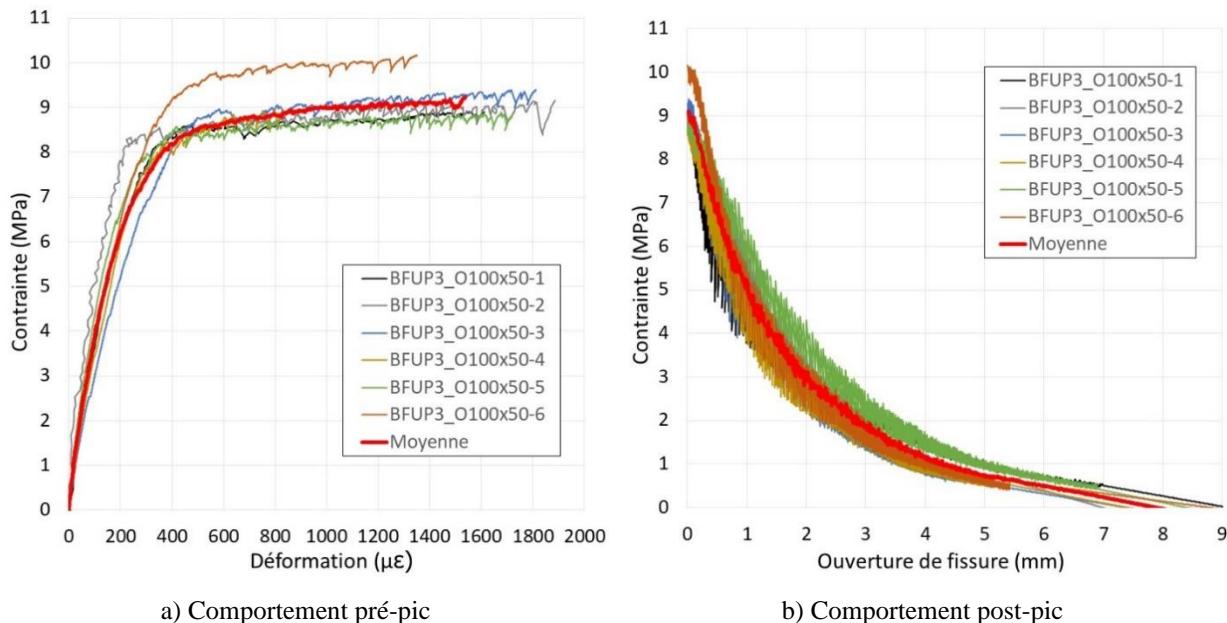


Figure 4.2 Comportement en traction directe a) pré-pic et b) post-pic du BFUP3 mesuré sur des os O100x50

Le comportement pré-pic, présenté en contrainte-déformation à la Figure 4.2a, présente une faible dispersion des résultats en termes de contrainte ultime. En effet, celle-ci est comprise entre 8.9 et 9.4 MPa pour 5 des 6 spécimens. Les déformations au pic correspondantes varient entre 1 350 et 1880 $\mu\epsilon$. Le spécimen O100x50-6 a un comportement légèrement différent avec une résistance ultime supérieure, de 10.2 MPa, et une déformation associée plus faible, de 830 $\mu\epsilon$. En moyenne, la phase d'écrouissage débute à une contrainte d'environ 8.5 MPa pour terminer à une contrainte

maximale de 9.1 MPa et la déformation moyenne au pic est de 1550 $\mu\epsilon$. Le gain moyen de contrainte dans la phase d'écrouissage (+ 0.6 MPa) et la longueur moyenne du plateau (+ 1 150 $\mu\epsilon$) du BFUP3 (Figure 4.2a) sont inférieurs au BFUP UP-F3 qui est plus généralement utilisé à Polytechnique Montréal et qui contient également 3% en volume de microfibres d'acier. Le BFUP UP-F3 sera étudié lors de la campagne expérimentale finale de ce projet (cf. Section 3.1.1). Ce faible comportement écrouissant du BFUP3 est attribuable à l'utilisation de fibres de moins bonne qualité (cf. section 3.1.1). Le comportement post-pic, présenté en contrainte-ouverture de fissure à la Figure 4.2b, est similaire pour l'ensemble des spécimens.

4.3 Comportement en flexion du BFUP3

4.3.1 Comportement en flexion des dallettes 100 x 50 (types B et C)

Les dallettes de type B et C du BFUP3 ont été testées en flexion à 350 et 351 jours respectivement. La fissuration s'est produite en zone de moment constant (entre les deux points d'application de la charge) ou à moins de 5 mm des limites de cette zone (pour 2 des 5 dallettes de type B et 1 des 5 dallettes de type C seulement). Les dallettes où la fissuration s'est développée à moins de 5 mm à l'extérieur de la zone de moment constant sont les dallettes 100x50-1_B, 100x50-5_B et 100x50-5_C. La Figure 4.3 présente le comportement contrainte-déplacement (flèche à mi-portée) de l'ensemble des dallettes B et C testées (Figure 4.3a et Figure 4.3b respectivement) ainsi que les comportements moyens associés (courbe en rouge). La contrainte calculée correspond à la contrainte flexionnelle élastique et elle est utilisée pour comparer les différentes géométries en flexion.

Les petits sauts de contrainte observés dans la phase post-pic (après le pic de flexion) sont causés par de légers glissements des fibres lors du processus de fissuration et la reprise mécanique par ces dernières. Ces sauts sont relativement bien contrôlés dans le cas des essais de flexion sur les dallettes B et C.

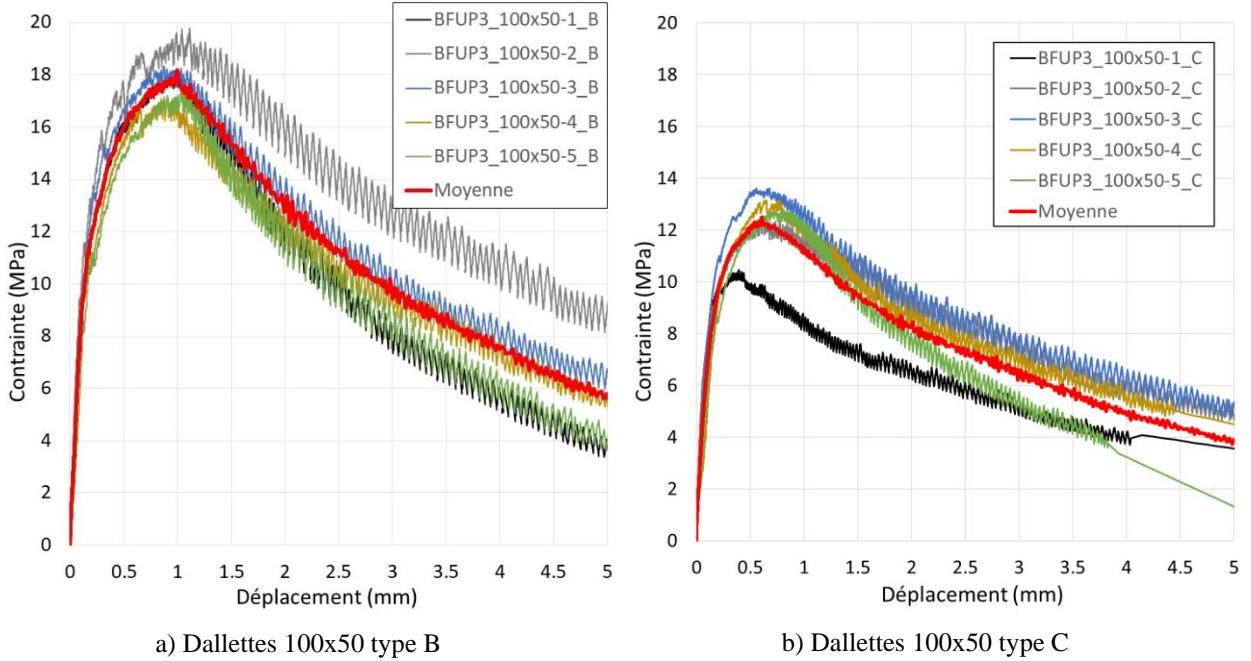


Figure 4.3 Comportement en flexion des dallettes 100x50 de type B et C pour le BFUP3

La dispersion globale des résultats est assez similaire pour les deux types de dallettes (B ou C). La résistance et la flèche au pic des dallettes de type B sont cependant plus importantes que pour les dallettes de type C. En moyenne, la résistance est 49 % plus élevée (18 versus 12.1 MPa) et la flèche au pic est 67 % plus élevée (1 versus 0.6 mm) pour les dallettes B. La fibre extrême tendue des dallettes B était une surface coffrée, en comparaison à une surface sciée au centre des spécimens pour les dallettes C (Figure 4.1, Section 4.1). Cette différence significative de comportement entre ces deux types de dallettes extraites des mêmes spécimens indique que l'orientation des fibres n'est pas uniforme dans les prismes de type P coulés depuis une extrémité. Les fibres sont mieux orientées proche des parois longitudinales du coffrage qu'au centre de celui-ci. En effet, tel que montré par les résultats de Behloul [31], qui sont illustrés à la Figure 2.15 (Section 2.2.6), la contrainte et la flèche au pic en flexion diminue avec une orientation des fibres plus défavorable. Il est attendu que la variation dans l'orientation des fibres soit moins grande entre le cœur et la surface d'une dallette mince que d'un prisme de section carrée plus épais. Ceci est dû aux parois de coffrage qui sont plus rapprochées l'une de l'autre pour une dallette mince que pour un prisme carré plus trapus.

4.3.2 Comportement en flexion des dallettes 150 x 50 (type D)

Les dallettes de type D (de section 150 mm x 50 mm) sont celles généralement utilisées pour les essais de flexion à Polytechnique Montréal. Les dallettes de type D ont cependant été coulées par une extrémité (Tableau 3.2) tel que recommandé par la norme A23.01-19, ce qui est différent de ce qui est généralement réalisé à Polytechnique Montréal où la mise en place est normalement faite avec des mouvements longitudinaux. Cinq dallettes ont été testées à 352 jours. La fissuration s'est produite en zone de moment constant pour les 5 dallettes. Une des dallettes (150x50-1-D) a cependant été retirée de l'analyse à cause d'un problème d'acquisition de la flèche avant l'atteinte du pic de flexion. La Figure 4.4 présente le comportement en flexion des 4 dallettes restantes ainsi que leur comportement moyen (courbe en rouge).

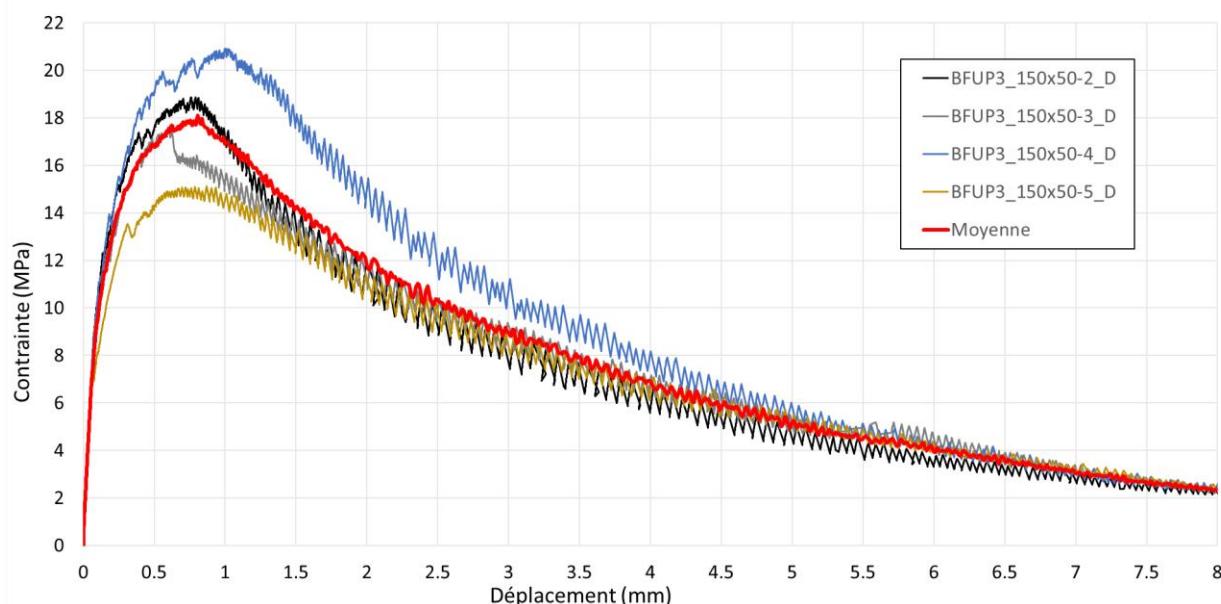


Figure 4.4 Comportement en flexion des dallettes 150x50 de type D pour le BFUP3

La dispersion dans les contraintes maximales des dallettes de type D (Figure 4.4) est un peu plus grande que celles observées sur les dallettes de types B et C (Figure 4.3). La dispersion de la flèche au pic est cependant similaire. En moyenne, la résistance est de 18 MPa et la flèche au pic est de 0.8 mm, soit très similaire au comportement moyen des dallettes de type B. Pour rappel, les deux types de dallettes (B et C) ont été coulés depuis l'extrémité d'une face d'un prisme de type P (de

largeur de 100 mm) pour cette campagne d'essais préliminaire et les dallettes de type D ont été coulée depuis l'extrémité de leur tranche (de largeur 50 mm). Le comportement similaire en flexion pour les dallettes de type B et D peut alors être expliqué par le fait que, dans ces deux configurations de dallettes, la fibre extrême tendue correspond à une paroi coffrée qui favorise une orientation préférentielle des fibres et la méthode de mise en place qui est pratiquement la même. Les petits sauts de contraintes dans la phase post-pic sont de la même ampleur que pour les dallettes B et C. Ceci indique que la méthode de coulée par la tranche, qui permet de réduire la préparation de surface requise pour les essais, mène à des résultats équivalents à ceux de la méthode de coulée par la surface supérieure pour des dallettes de même épaisseur.

4.3.3 Comportement en flexion des prismes 100 x 100 (type P)

Les essais sur les prismes (type P) de section carrée (100 mm x 100 mm) correspondent à la configuration spécifiée par la norme CSA A23.01-02. Cinq (5) prismes ont été testés à 455 jours, soit environ 100 jours plus tard que les dallettes de types B, C et D (report d'essai liés à la pandémie COVID-19). Malgré que les spécimens ont tous une maturité supérieure à une année, il est attendu que cette différence ait un impact négligeable sur le comportement mécanique en flexion du BFUP3. La fissuration s'est produite dans la zone de moment constant ou à moins de 5 mm (pour le spécimen 100x100-5_P seulement). La Figure 4.5 présente le comportement en flexion des 5 prismes ainsi que leur comportement moyen (courbe en rouge).

La dispersion, aussi bien en terme de contrainte qu'en termes de flèche au pic, est similaire à celle observée pour les dallettes de type D. Le comportement moyen diffère cependant de celui des dallettes. Alors que la contrainte moyenne au pic (18.5 MPa) est similaire aux dallettes de type B et D, la flèche moyenne au pic est plus faible (0.5 mm versus 1 et 0.8 mm pour les dallettes de types B et D respectivement). Ce constat témoigne de la rigidité flexionnelle plus grande des prismes. Cette plus grande rigidité du spécimen induit également des sauts plus marqués dans la phase post-pic du comportement en flexion par rapport aux dallettes. Une comparaison plus approfondie entre tous les types de spécimens de flexion est réalisée à la section suivante.

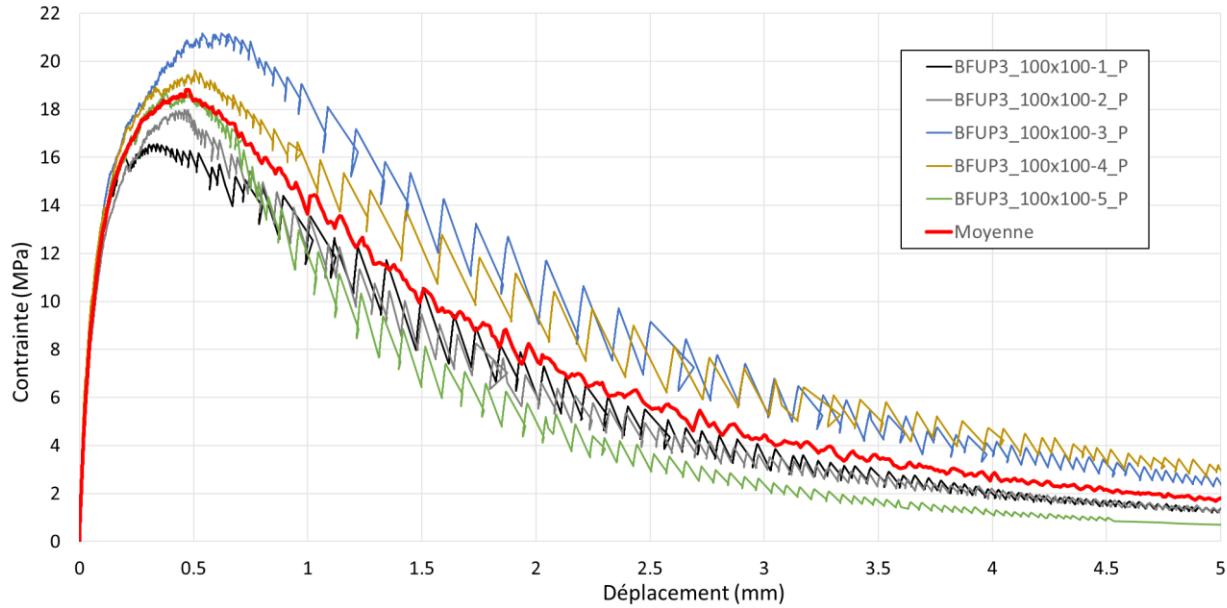


Figure 4.5 Comportement mécanique en flexion des prismes 100x100 de type P pour le BFUP3

4.3.4 Comparaison des comportements en flexion des différents types de spécimens

Les résultats de flexion présentés aux Sections 4.3.1 à 4.3.3 sont regroupés à la Figure 4.6 avec toutes les courbes individuelles à la Figure 4.6a et les courbes moyennes associées par type de spécimen à la Figure 4.6b. Les courbes en jaune représentent les dallettes de type B, les courbes en rouge les dallettes de type C, les courbes en vert les dallettes de type D et les courbes en bleu les prismes de type P.

La Figure 4.6a permet de visualiser les différences de dispersion discutées aux sections précédentes, soit une dispersion un peu plus faible pour les dallettes B et C par rapport aux dallettes D et aux prismes P. Cette différence n'est cependant pas assez significative pour être attribuée seulement aux géométries utilisées. Plusieurs autres raisons (méthode de mise en place lors de la fabrication, préparation des spécimens avant les essais, ajustement du montage, nombre de spécimens testés, etc.) pourraient expliquer cette légère différence de dispersion.

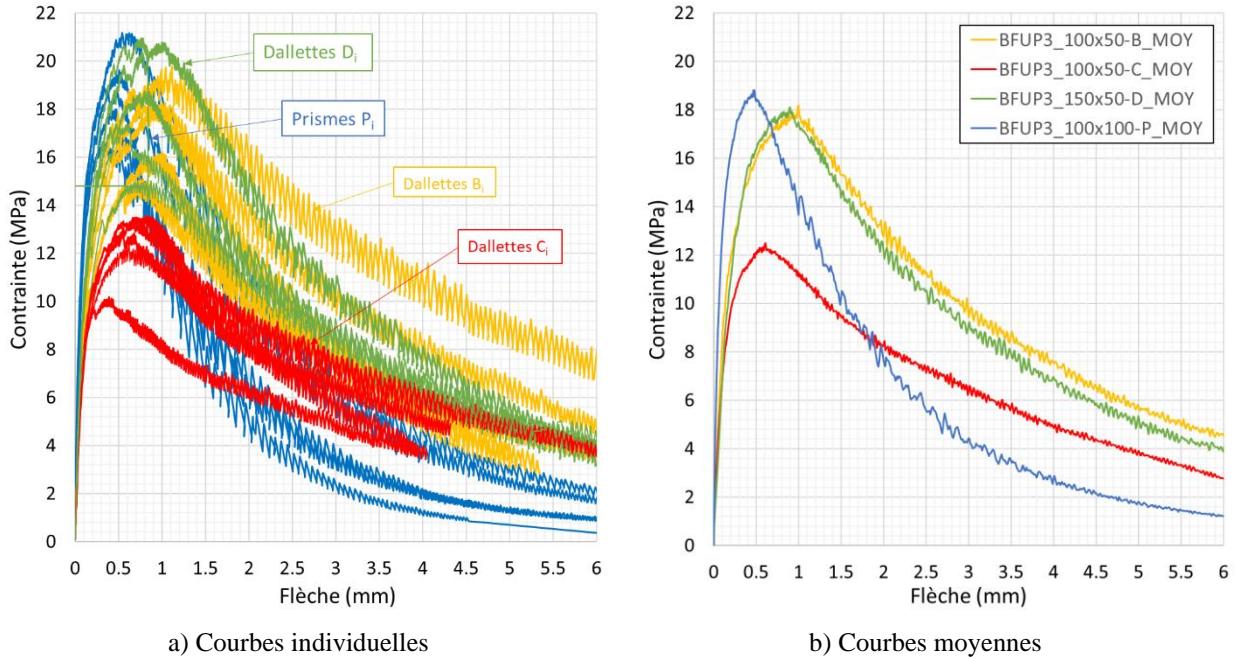


Figure 4.6 Comparaison du comportement flexionnel des différentes géométries pour le BFUP3

La comparaison des comportements moyens à la Figure 4.6b illustre cependant plusieurs points importants mentionnés dans les sections précédentes. Les dallettes de type C, les seuls spécimens dont la fibre extrême tendue correspond au centre d'un prisme de type P et non à une paroi de coffrage (Figure 4.1), performent beaucoup moins bien que tous les autres types de spécimens. Ceci indique que les fibres au centre du prisme sont orientées moins préférentiellement que proche des parois longitudinales de coffrage. Le fait que les dallettes B, de même géométrie, présentent un comportement différent va inévitablement résulter en des comportements différents en traction obtenus via analyse inverse. Le comportement en traction associé aux dallettes de type C sera réduit par rapport à celui obtenu via les résultats de flexion des dallettes de type B, dû à une moins bonne action des fibres. Ceci montre à nouveau qu'il est important, pour valider la performance d'une méthode d'analyse inverse s'appliquant à des essais de flexion, que l'orientation des fibres soit semblable dans les spécimens de flexion et leurs spécimens de référence en traction directe. Pour cela, il est nettement préférable d'adopter la même géométrie de spécimens pour les essais en flexion et en traction, et d'adopter une méthode de coulée fournissant une orientation de fibres similaire.

En ce qui concerne les prismes de type P, les dallettes de type B (sciées dans un prisme) et les dallettes de type D (dallettes coulées et non sciées dans un prisme), leur fibre extrême tendue correspond à une paroi longitudinale de coffrage. Le fait que ces trois types de spécimens présentent des contraintes maximales similaires semble indiquer un effet de paroi assez similaire sur l'orientation des fibres pour ces différentes géométries de spécimen.

Il est intéressant de noter que les dallettes de types B et D, en plus d'avoir une contrainte similaire, ont également une flèche au pic assez semblable. L'augmentation de largeur de 100 à 150 mm entre les dallettes de type B et D n'affecte donc pas significativement leur comportement. En comparaison à ces dallettes, les prismes de type P se distinguent, eux, par une rigidité flexionnelle significativement plus élevée (Figure 4.6b) qui est lié au fait que ces spécimens sont plus trapus (L/h plus faible). En effet, bien que la contrainte au pic moyenne soit similaire pour les trois types de géométrie, la flèche au pic moyenne est beaucoup plus faible pour les prismes de type P. La pente de la zone avant le pic est donc beaucoup plus prononcée pour ces spécimens. Cette rigidité flexionnelle plus élevée affecte également le comportement post-pic des prismes avec une perte de capacité beaucoup plus rapide. Étant donné que les méthodes d'analyse inverse ont été développées pour une certaine configuration d'essai (géométrie de spécimen et L/h spécifiques), les différences observées dans le comportement en flexion selon les géométries testées affecteront fort probablement la performance des différentes méthodes d'analyse inverse existantes. Il serait attendu, par exemple, qu'une méthode de calcul inverse calibrée sur des prismes carrés soit plus performante sur ce type de spécimens que sur des dallettes et inversement pour une méthode de calcul inverse calibrée sur des dallettes rectangulaires. Cela sera étudié à la Section 4.4.

4.3.5 Étude de la fissuration des spécimens de flexion

Le système de mesure par corrélation d'images (DIC) a été utilisé sur 2 dallettes de chaque type (B, C et D) ainsi que sur 5 prismes de type P. L'objectif était d'étudier l'évolution de la fissuration durant les essais afin de déterminer, entre autres, le moment de localisation d'une macrofissure (Section 3.1.6). Ce moment de localisation de la fissuration en flexion est primordial pour l'analyse inverse. Les calculs inverses de la méthode Lopez 5 points et de la méthode de la norme SIA adoptent des hypothèses qui permettent de déterminer l'endroit sur la courbe de flexion où la contrainte ultime du matériau est atteinte à la fibre inférieure du spécimen. Il est donc intéressant de pouvoir aussi déterminer ce moment de localisation de la fissuration de façon expérimentale. Le

DIC permet d'étudier la fissuration dans les spécimens lors des essais de flexion à l'aide de capteur de déplacement virtuels et c'est l'évolution de cette fissuration qui permet d'obtenir le moment de localisation de la fissuration expérimental. La Figure 4.7 présente des exemples d'évolution des fissures à la fibre extrême tendue dans la zone de moment constant pour une dallette de type B (Figure 4.7a) et un prisme de type P (Figure 4.7b). L'évolution de l'ouverture de fissure est exprimée en fonction du temps. Il est ensuite possible, via la synchronisation temporelle du DIC et de l'essai, de déterminer l'état de chargement (force, flèche) correspondant à un temps t . Ceci a permis d'indiquer, sur la Figure 4.7, le temps correspondant à la charge maximale en flexion (T_{max}) représenté par la ligne verticale en pointillés verts.

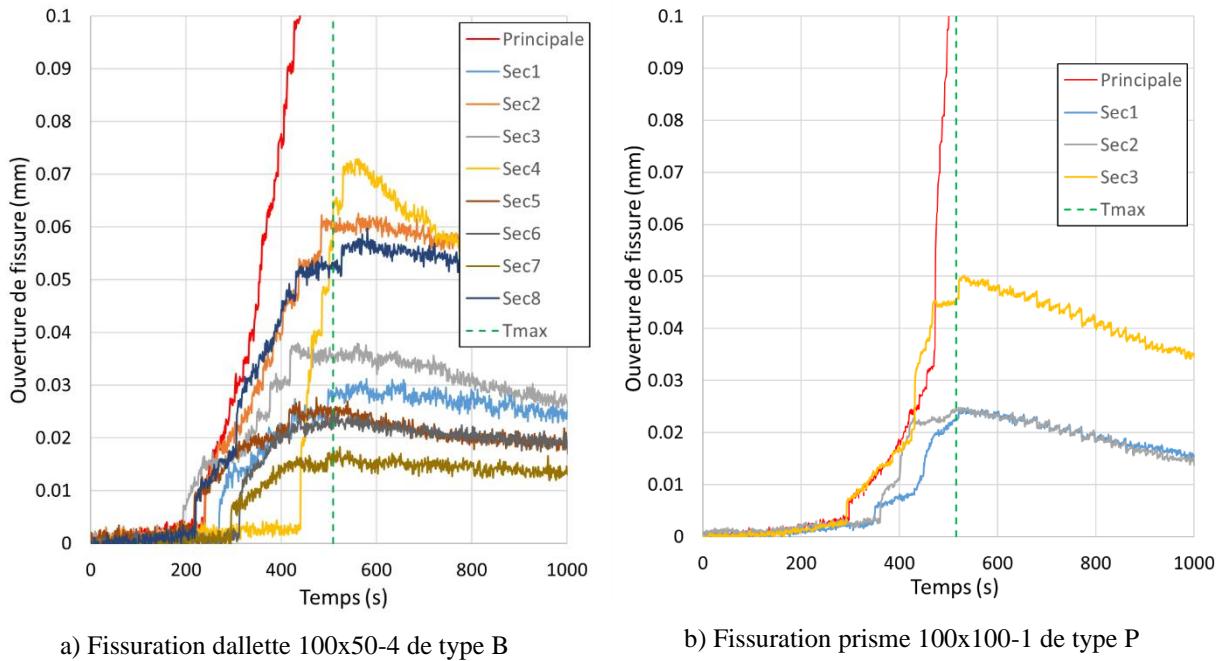


Figure 4.7 Évolution de la fissuration à la fibre extrême tendue d'une dallette de type B et d'un prisme de type P

Il est possible de voir sur la Figure 4.7 que plusieurs fissures de faible ouverture (majoritairement des microfissures d'ouvertures inférieures à 0.05 mm) se forment initialement et qu'une des fissures domine ensuite. Cette fissure dominante est nommée fissure principale et elle contrôle le comportement post-pic en flexion. Une fois que cette fissure principale est assez ouverte, les autres

fissures, dites fissures secondaires, tendent à se refermer progressivement. Il est intéressant de remarquer que la fissure principale devient dominante (se sépare du groupe des autres fissures) avant l'atteinte du pic de flexion à T_{max} . Cela signifie que la localisation de la fissure principale à la fibre extrême tendue des spécimens de flexion (qui correspond au pic de résistance en traction dans les essais de traction directe) se produit avant l'atteinte de la force maximale en flexion. Il est donc intéressant de constater que la localisation de la fissuration survient également avant le pic de résistance en flexion lors des essais expérimentaux, tout comme les hypothèses utilisées dans les différentes méthodes d'analyse inverse.

Il est cependant difficile de déterminer expérimentalement dans un essai de flexion le moment exact de localisation de la macrofissure, défini comme étant le moment où la résistance en traction commencerait à diminuer dans une section sollicitée uniquement en traction directe. Certaines analyses ont été réalisées dans le cadre du présent projet afin de trouver un critère fixe de localisation de cette fissure principale. Il a été décidé d'étudier les ouvertures des fissures secondaires pour déterminer à partir de quand une fissure ne devrait plus être considérée comme secondaire. L'idée étant que, lorsque qu'une fissure dépasse l'ouverture maximale définie pour une fissure secondaire, celle-ci localise et devient la fissure principale qui contrôlera le comportement global en flexion. Les ouvertures des fissures secondaires ont donc été étudiées pour tous les spécimens de la campagne expérimentale préliminaire où le DIC a été utilisé. Le Tableau 4.2 présente les ouvertures de fissure minimale, maximale et moyenne atteintes par les fissures secondaires observées sur chacun des spécimens avant qu'elles commencent à se refermer.

Les ouvertures de fissures secondaires présentées au Tableau 4.2 sont très variables. En effet, la plus petite fissure secondaire mesurée a une ouverture de 0.010 mm, tandis que la plus grande est environ 15 fois plus élevée (0.151 mm). En moyenne, les fissures secondaires ont une ouverture de fissure de 0.049 mm pour tous les spécimens analysés. Il a donc été décidé que la fissure principale localise lorsqu'elle dépasse une ouverture de fissure de 0.05 mm. Il est à noter que ce critère de 0.05 mm est atteint environ à la même période où le changement de pente de la fissure principale est observé (courbe en rouge sur la Figure 4.7). Ceci confirme que ce critère semble adéquat pour considérer que la fissure principale commence à prendre le dessus sur les autres fissures dites secondaires une fois ce critère dépassé. Ainsi, le critère d'ouverture de fissure de 0.05 mm sera utilisé au Chapitre 5 pour déterminer l'instant de localisation de la fissure principale à la fibre extrême tendue des spécimens de flexion modélisés par éléments finis.

Tableau 4.2 Ouvertures de fissure minimale, maximale et moyenne des fissures secondaires mesurées avec le DIC avant qu'elles ne se referment

Spécimen	$\omega_{sec\ min}\ (\text{mm})$	$\omega_{sec\ max}\ (\text{mm})$	$\omega_{sec\ moy}\ (\text{mm})$
100x50-4_B	0.018	0.073	0.042
100x50-5_B	0.010	0.152	0.063
MOYENNE type B	0.014	0.113	0.053
100x50-4_C	0.017	0.062	0.028
100x50-5_C	0.013	0.105	0.040
MOYENNE type C	0.015	0.084	0.034
150x50-4_D	0.016	0.137	0.080
150x50-5_D	0.015	0.132	0.040
MOYENNE type D	0.016	0.135	0.060
100x100-1_P	0.025	0.050	0.033
100x100-2_P	0.010	0.093	0.039
100x100-3_P	0.021	0.151	0.051
100x100-4_P	0.019	0.102	0.065
100x100-5_P	0.011	0.128	0.057
MOYENNE type P	0.017	0.105	0.049

4.4 Performance des différentes méthodes d'analyse inverse

Une fois les courbes de comportement en flexion des différents types de spécimens obtenues (Section 4.3), l'analyse inverse a été réalisée à partir de ces résultats. Le résultat de cette analyse inverse a ensuite été comparé avec les courbes de comportement en traction directe obtenues sur le même BFUP3 (section 4.2). Cette section présente les résultats de l'analyse inverse avec l'utilisation de la méthode Lopez 5 points (Section 4.4.1), de la méthode Lopez itérative (Section 4.4.2) puis de la méthode de la SIA (Section 4.4.3) avant de comparer les avantages et inconvénients de ces différentes méthodes (Section 4.4.4) en vue d'en sélectionner une pour la suite de ce projet.

4.4.1 Méthode Lopez 5 points

La première méthode d'analyse inverse étudiée est la méthode Lopez 5 points détaillée à la Section 2.3.2. Il est important de rappeler que cette méthode a été développée pour des spécimens de section carrée d'élancement (L/h) de 3 ou 4.5, ce qui est le cas pour les prismes de type P de la campagne expérimentale préliminaire (L/h de 3), mais pas pour les dallettes testées dans ce projet. La méthode Lopez 5 points a malgré tout été appliquée à l'ensemble des spécimens (prismes et dallettes) pour étudier l'efficacité et/ou les limitations de la méthode lorsque les conditions d'essais sortent du cadre utilisé pour le développement de la méthode.

La Figure 4.8 présente les résultats de l'analyse inverse via la méthode Lopez 5 points, avec le comportement pré-pic en contrainte-déformation à la Figure 4.8a et le comportement post-pic en contrainte-ouverture de fissure à la Figure 4.8b. Des couleurs différentes sont utilisées pour différencier les résultats obtenus avec les différentes géométries des spécimens de flexion. Ces couleurs sont les mêmes que celles utilisées à la Figure 4.6, soit le rouge pour les dallettes de type C, le jaune pour les dallettes de type B, le vert pour les dallettes de type D et le bleu pour les prismes de type P. Le même code de couleur sera conservé pour les autres analyses inverses effectuées avec les autres méthodes dans les sections qui suivent. Les résultats d'analyse inverse sont comparés aux courbes de traction directe du BFUP3 (courbes grises) à la Figure 4.8.

Le point de limite élastique (f_{te}) se situe entre 4 et 7 MPa pour tous les spécimens de la Figure 4.8. Une dallette de type D donne cependant une valeur très élevée de 9.6 MPa, ce qui est très différent de tous les autres spécimens d'analyse inverse et des spécimens de traction directe.

La Figure 4.8 illustre l'impact du comportement en flexion sur les résultats d'analyse inverse. Les dallettes C, qui ont présenté une résistance en flexion plus faible que les autres spécimens (section 4.3.4) présentent logiquement une résistance en traction (obtenue par l'analyse inverse) plus faible que celles obtenues à partir des résultats de flexion des autres types de spécimens.

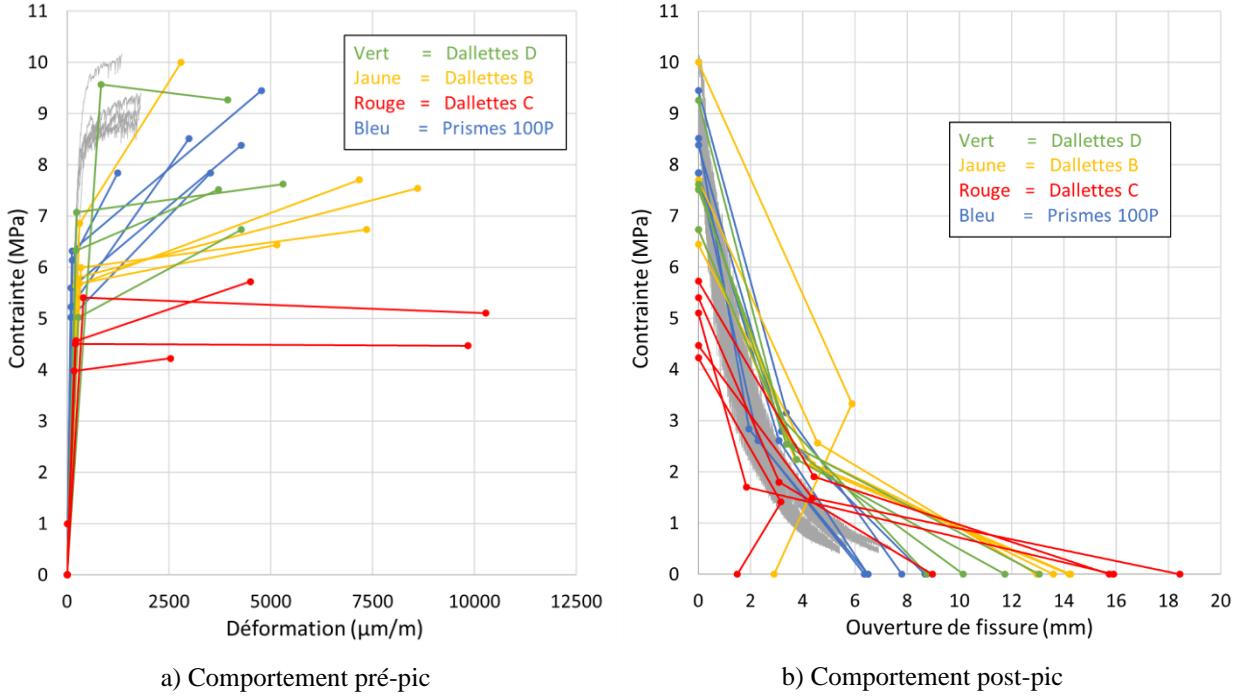


Figure 4.8 Résultats de l'analyse inverse Lopez 5 points pour les différentes géométries flexionnelles du BFUP3

Il est également possible de remarquer que la déformation au pic de traction donnée par la méthode Lopez 5 points est plus grande lorsque la flèche au pic de résistance en flexion est plus élevée. En effet, la Figure 4.6b montre que les dallettes B sont les spécimens avec la plus grande flèche au pic de résistance en flexion. Ces dallettes sont également celles qui ont la plus grande déformation au pic de traction avec la méthode Lopez 5 points (Figure 4.8a). La différence entre la flèche au pic de résistance en flexion des dallettes B et D est faible (Figure 4.6b), mais cette faible différence (moins de 1%) se traduit par un impact majeur sur la déformation au pic de traction des dallettes D qui est beaucoup plus faible que celle des dallettes B (majoration moyenne de 131% montrée à la Figure 4.8a). Une faible variation de la flèche au pic de résistance en flexion a donc un impact très important pour l'analyse inverse avec la méthode Lopez 5 points, ce qui n'est pas nécessairement très réaliste.

Tel qu'anticipé, la Figure 4.8 montre que la méthode Lopez 5 points fonctionne mieux pour les prismes 100x100 de type P. En effet, l'étendue des contraintes ultimes (7.8 à 9.5 MPa) et des déformations ultimes (1250 à 4800 μm/m) sont beaucoup plus près de celles données par les os de traction (830 à 1880 μm/m), mais sont toujours nettement surestimées. Les contraintes et les

déformations ultimes pour les autres configurations de spécimens de flexion avec une section rectangulaire (type D et B par exemple) sont encore plus loin du comportement mesuré en traction directe. La méthode Lopez 5 points sous-estime les contraintes et surestime très largement les déformations au pic de traction pour toutes les géométries étudiées dans cette étude. Cette méthode n'est particulièrement pas adaptée aux géométries rectangulaires plus minces en flexion (ce qui était attendu) et aux BFUP utilisés pour les ouvrages en génie civil pour déterminer la contrainte ultime et la déformation ultime du comportement pré-pic en traction.

Le comportement en post-pic donné par l'analyse inverse Lopez 5 points ressemble plus au comportement post-pic donné par les os de traction. Cependant, la valeur d'ouverture de fissure finale est beaucoup plus élevée pour les trois types de dallettes rectangulaires que pour les prismes carrés. Cela montre encore que cette méthode d'analyse inverse n'est pas adaptée pour ces géométries rectangulaires et le BFUP utilisé dans cette campagne d'essais.

4.4.2 Méthode Lopez itérative

La méthode d'analyse inverse nommée Lopez itérative nécessite d'introduire une loi de traction simplifiée initiale tel que mentionné à la Section 2.3.1. Les lois obtenues par la méthode Lopez 5 points (Section 4.4.1) ont été utilisées comme lois initiales, tel que recommandé par Lopez [15]. Il importe de rappeler que la méthode Lopez itérative, au contraire de la méthode Lopez 5 points, est adaptée pour tout type de configuration de spécimen. Le calcul inverse avec la méthode itérative devrait donc apporter des résultats satisfaisants à la fois pour les dallettes rectangulaires que pour les prismes carrés. La Figure 4.9 présente les résultats obtenus avec la méthode Lopez itérative pour toutes les géométries de flexion de la campagne expérimentale préliminaire. Le code de couleur reste le même que celui décrit précédemment pour la Figure 4.8.

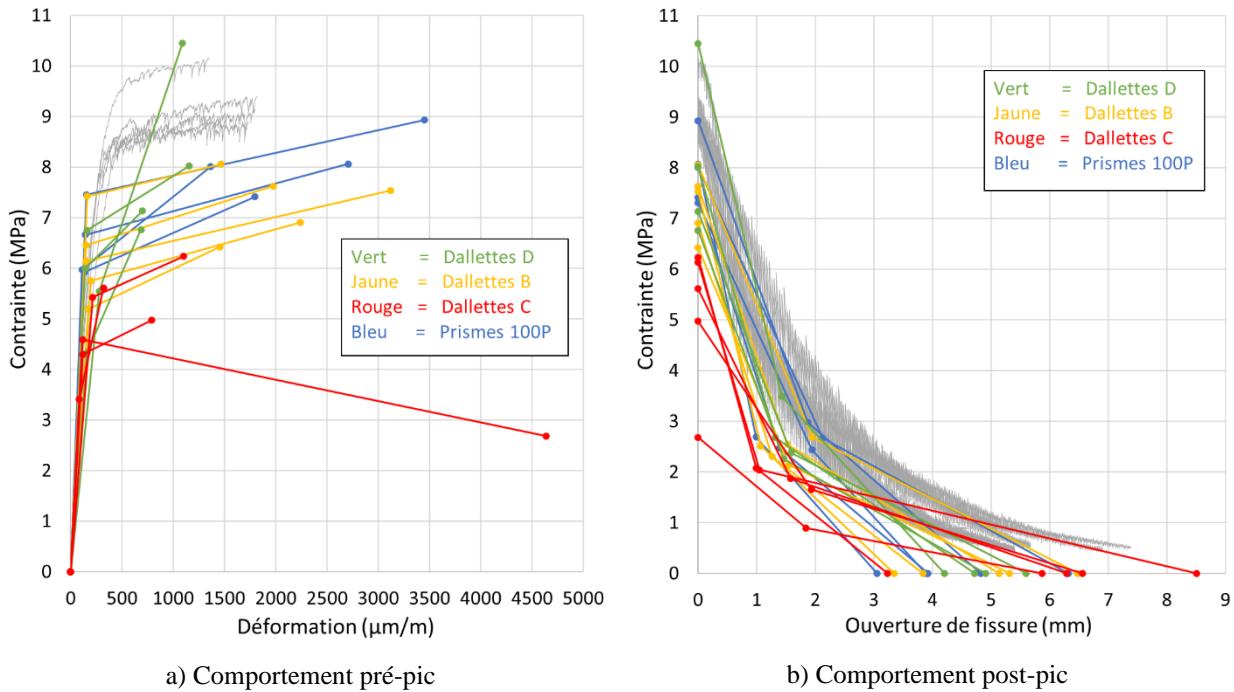


Figure 4.9 Résultats de l'analyse inverse Lopez itérative pour les différentes géométries flexionnelles du BFUP3

L'utilisation de la méthode Lopez itérative améliore les résultats par rapport à ceux obtenus avec la méthode Lopez 5 points, surtout pour les déformations ultimes. L'étendue des déformations ultimes des dallettes B (1450 à 3100 $\mu\text{m/m}$), des dallettes C (318 à 4600 $\mu\text{m/m}$) et des dallettes D (680 à 1150 $\mu\text{m/m}$) est diminuée de beaucoup par rapport aux résultats de la Figure 4.8. Cependant, celles-ci restent encore un peu trop grandes lorsqu'elles sont comparées aux déformations ultimes obtenus avec les os de traction (830 à 1880 $\mu\text{m/m}$). Les contraintes ultimes obtenues avec la méthode d'analyse inverse Lopez itérative sont inférieures à celles obtenues avec les os en traction (8.9 à 10.2 MPa). En effet, l'étendue des contraintes ultimes des dallettes B (6.4 à 8.1 MPa), des dallettes C (5.0 à 6.2 MPa) et des dallettes D (7.1 à 10.5 MPa) sont un peu sous-estimées par rapport à celle obtenue avec les essais de traction directe.

L'impact de la méthode Lopez itérative sur les résultats des prismes de type P est moins important que pour les dallettes. En effet, l'étendue des contraintes ultimes (7.3 à 8.9 MPa) et des déformations ultimes (1350 à 3500 $\mu\text{m/m}$) est moins changée que pour les dallettes. Le fait que la méthode Lopez 5 points a été calibrée à ce type de géométrie explique probablement ce phénomène.

La méthode Lopez itérative ne permet donc pas de réduire suffisamment les déformations ultimes obtenues avec la méthode Lopez 5 points pour être suffisamment cohérent avec les essais de traction directe. Les contraintes ultimes restent également un peu sous-estimées.

La valeur de la contrainte élastique varie entre 4 et 7.5 MPa pour tous les spécimens. Cette étendue est plus grande que celle observée avec la méthode Lopez 5 points. Le comportement en post-pic est également significativement amélioré, surtout pour les dallettes. En effet, le comportement post-pic donné par la méthode Lopez itérative est similaire à celui donné par les os de traction directe pour tous les résultats d'analyse inverse. Cela s'explique par le fait que la méthode Lopez itérative n'est pas adaptée exclusivement aux prismes carrés ayant un élancement (L/h) de 3 ou 4.5 tel que mentionné à la Section 2.3.1.

4.4.3 Méthode SIA

La méthode de la norme SIA est complètement différente des deux méthodes de Lopez. En effet, cette méthode donne seulement le comportement pré-pic écrouissant des BFUP en traction et elle est adaptée pour des essais de flexion avec une géométrie mince (Section 2.3.3). Les géométries des dallettes B, C et D sont donc plus adaptées à cette méthode que la géométrie des prismes P. Les résultats des prochaines analyses devraient donc aller dans ce sens. Dans le cadre de la campagne expérimentale préliminaire, il n'a pas été jugé nécessaire de faire les cycles de chargement-déchargement au début des essais de flexions comme demandé par la norme SIA. Ce choix est justifié par le fait que l'annexe U de la norme CSA A23.01-19 et les méthodes d'analyse inverse Lopez ne demandent pas de faire ces cycles et que les résultats d'essais de flexion sont utilisés pour les méthodes Lopez 5 points et Lopez itérative. Il se peut donc que les résultats obtenus pour le point de limite élastique avec la méthode SIA soient inférieurs à ce qu'ils auraient été si des cycles avaient été fait. Les cycles ayant pour but de linéariser et stabiliser le comportement élastique des spécimens, l'omission des cycles peut générer une plus grande variation dans le comportement élastique et mener à la détermination d'une résistance élastique plus faible. L'analyse des résultats donnés par l'analyse inverse SIA se concentre donc principalement sur la performance de cette méthode pour déterminer le point de traction ultime du BFUP3, et non le point de limite élastique. Le même code de couleurs est encore une fois utilisé pour présenter les résultats d'analyse inverse de la méthode SIA sur la Figure 4.10.

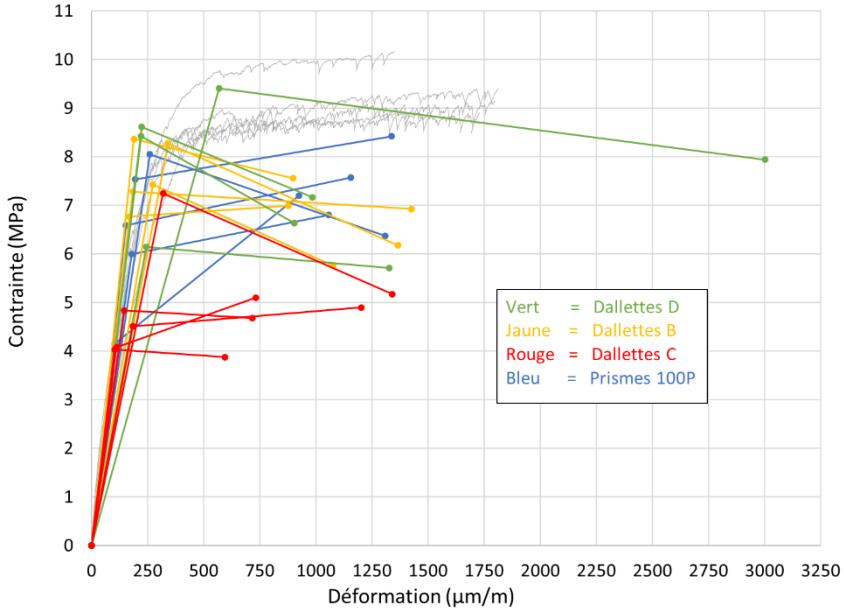


Figure 4.10 Performance de l'analyse inverse SIA pour les différentes géométries flexionnelles du BFUP3

La Figure 4.10 montre que la méthode SIA donne des déformations ultimes beaucoup plus faibles et réalistes que celles obtenues avec les méthodes Lopez (5 points et itérative). Ce constat est vrai pour presque tous les types de géométries, soit les dallettes B (900 à 1400 $\mu\text{m}/\text{m}$), les dallettes C (600 à 1350 $\mu\text{m}/\text{m}$) et les prismes P (925 à 1350 μm), alors que la déformation des os de traction directe est de 830 à 1880 $\mu\text{m}/\text{m}$. Les déformations ultimes pour les dallettes D sont aussi diminuées (900 à 3000 μm), mais la valeur maximale d'un spécimen en particulier est beaucoup plus grande que la majorité des autres déformations ultimes ce qui fausse un peu les résultats. La méthode SIA semble également sous-estimer un peu plus les contraintes ultimes des os de traction (8.9 à 10.2 MPa) que les deux méthodes Lopez. En effet, l'étendue des contraintes ultimes des dallettes B (5.8 à 7.6 MPa), des dallettes C (3.9 à 5.2 MPa), des dallettes D (5.7 à 7.9 MPa) et des primes P (6.4 à 8.4 MPa) est inférieure à celles données par les méthodes Lopez.

La Figure 4.10 montre que la méthode SIA donne des résultats plus uniformes pour plusieurs types de géométrie. En effet, la différence entre le comportement ultime des dallettes et celui des prismes de type P est beaucoup moins grande que celles observées pour les deux méthodes Lopez. Le comportement en traction obtenus avec la méthode SIA pour toutes les géométries est également beaucoup plus près du comportement expérimental obtenu avec les os de traction directe. L'étendue

des contraintes élastiques est cependant plus grande que celles obtenues avec les méthodes Lopez. En effet, les contraintes élastiques varient entre 4 et 9 MPa pour la méthode SIA. Cette variation plus importante est probablement due à l'absence de cycles de chargement-déchargement lors des essais de flexion qui sont importants pour la méthode de calcul SIA.

4.4.4 Choix d'une méthode d'analyse inverse à adapter

La présente section vise à résumer les apprentissages réalisés lors du Chapitre 4 et d'utiliser ces apprentissages pour choisir une méthode d'analyse inverse qui sera adaptée. Le Tableau 4.3 résume et compare les étendues obtenues aux Sections 4.4.1 à 4.4.3 pour les trois méthodes d'analyse inverse ainsi que les résultats de traction directe de la Section 4.2.

Le Tableau 4.3 met en évidence la différence entre la grandeur des étendues des valeurs ultimes (entre parenthèse) pour les trois méthodes d'analyse inverse. En effet, l'étendue des contraintes ultimes et des déformations ultimes donnée par la méthode SIA est plus petite ou égale à celles données avec les deux méthodes Lopez pour la majorité des types de spécimens de flexion. Seule l'étendue des déformations ultimes pour les dallettes D avec la SIA est plus grande qu'avec les méthodes Lopez pour les raisons expliquées à la Section 4.4.3.

Le Tableau 4.3 résume également bien une faiblesse des méthodes Lopez par rapport à la méthode SIA. Les déformations ultimes données par la méthode Lopez 5 points sont grandement surestimées, même pour la configuration carrée des prismes P pour laquelle elle a été calibrée. La méthode Lopez itérative, d'application plus générale sur diverses géométries de spécimens, ne permet pas d'améliorer suffisamment ces résultats pour être près de ceux donnés par les résultats de traction directe sur os. En revanche, la méthode SIA donne des déformations ultimes beaucoup plus près des résultats de traction expérimentaux.

Des modifications doivent donc être apportées aux trois méthodes pour qu'elles soient plus adaptées au contexte des essais utilisés dans le présent projet de recherche. En plus de la performance numérique de ces méthodes, il est important de comparer le fonctionnement des différentes méthodes d'analyse inverse pour évaluer la faisabilité d'adaptation des méthodes au contexte canadien. Le Tableau 4.4 présente une comparaison qualitative des trois méthodes d'analyse inverse selon ce qui a été présenté à la Section 2.3.

Tableau 4.3 Comparaison de l'étendue des trois méthodes d'analyse inverse pour le BFUP3

Paramètre ultime	Traction directe sur Os	Type de spécimen	Lopez 5 points	Lopez itérative	SIA
Contrainte ultime (MPa)	8.9 à 10.2 (1.3)	100x50 type B	6.4 à 10.0 (3.6)	6.4 à 8.1 (1.7)	5.8 à 7.6 (1.8)
		100x50 type C	4.2 à 5.7 (1.5)	5.0 à 6.2 (1.2)	3.9 à 5.2 (1.3)
		150x50 type D	6.7 à 9.3 (2.6)	7.1 à 10.5 (3.4)	5.7 à 7.9 (2.2)
Déformation ultime (µm/m)	830 à 1 880 (1 050)	100x100 type P	7.8 à 9.5 (1.7)	7.3 à 8.9 (1.6)	6.4 à 8.4 (2.0)
		100x50 type B	2 800 à 8 600 (5 800)	1 450 à 3 100 (1 650)	900 à 1 400 (500)
		100x50 type C	2 500 à 10 300 (7 800)	320 à 4 600 (4 280)	600 à 1 350 (750)
		150x50 type D	3 700 à 5 300 (1 600)	680 à 1 150 (470)	900 à 3 000 (2 100)
		100x100 type P	1 250 à 4 800 (3 550)	1 350 à 3 500 (2 150)	925 à 1 350 (425)

*Les valeurs entre parenthèses représentent la différence entre le maximum et le minimum du point ultime

Une différence majeure entre les méthodes Lopez et la méthode SIA est que la méthode SIA a été validée sur des essais de traction, tandis que les méthodes Lopez ne l'ont pas été. Dans le cas du présent projet de recherche, il a été déterminé que la loi de traction directe de référence doit être celle obtenue sur des essais de traction directe. La méthode d'analyse inverse doit donc donner des résultats comparables à ces essais de référence et c'est davantage le cas pour la méthode d'analyse inverse SIA. La méthode SIA est également plus facile à appliquer en industrie (laboratoire de caractérisation des matériaux). Les équations à utiliser sont moins nombreuses et leur origine est plus facile à démontrer et à comprendre. Enfin, la méthode d'analyse inverse adaptée et développée dans le présent projet de recherche doit également être applicable à un contexte normatif. Encore

une fois, la méthode d'analyse inverse SIA est plus adaptée à ce contexte étant donné sa simplicité et de sa rapidité d'application.

Tableau 4.4 Comparaison qualitative de la performance des méthodes Lopez 5 points, Lopez itérative et SIA et de leur applicabilité au contexte canadien

Comparaison	Lopez 5 points	Lopez itérative	SIA
Facilité d'application	Oui	Non	Oui
Facilité de compréhension	Plus ou moins	Non	Oui
Comportement post-pic	Oui	Oui	Non
Validation des équations	Difficile	Difficile	Simple
Validation sur essais de traction	Non	Non	Oui
Géométrie des spécimens	Carrée	Carrée et Rectangulaire	Rectangulaire

Un désavantage de la méthode SIA est qu'elle ne donne pas le comportement post-pic adoucissant du BFUP en traction. Ce désavantage n'est cependant pas très grave dans un contexte normatif puisque les valeurs de contrainte et de déformation ultimes du matériau sont uniquement celles requises pour la conception d'élément en BFUP avec la norme CSA S6 [2]. C'est donc pour toutes ces raisons qu'il a été décidé dans ce projet de recherche d'adapter et d'améliorer la méthode d'analyse inverse de la norme SIA pour qu'elle soit plus performante dans un contexte normatif. Une étude sur plusieurs paramètres importants au fonctionnement de la méthode SIA ainsi que les modifications apportées à celle-ci sont présentées au Chapitre 5.

4.5 Synthèse

Le Chapitre 4 porte sur la campagne expérimentale préliminaire réalisée sur le BFUP3. Cette campagne avait pour objectif d'évaluer la performance des trois méthodes d'analyse inverse détaillées au Chapitre 2 pour différentes géométries en flexion. Cette campagne a également permis de sélectionner une des trois méthodes pour l'adapter au contexte canadien des BFUP. Les conclusions tirées de cette campagne expérimentale sont les suivantes :

- Le BFUP3 a un comportement faiblement écrouissant en traction et les déformations ultimes enregistrées sur les os O100x50 sont en moyenne de 1 550 µm/m. La résistance ultime du matériau semble adéquate pour un BFUP avec 3% de fibres et est de 9.1 MPa en moyenne.
- L'orientation des fibres au centre des prismes carrés 100x100 est très différente de celle près des bords des spécimens. Les dallettes 100x50 de type C avec une zone tendue issue du centre de ces prismes sont beaucoup moins résistantes que les dallettes 100x50 de type B avec une zone tendue issue de la paroi coffrée.
- Les prismes 100x100 ont un comportement en flexion plus rigide que les dallettes de types B et D. La résistance des prismes 100x100 est cependant similaire à celle des dallettes 100x50.
- Le comportement en flexion des dallettes 100x50 de type B est très similaire à celui observé sur les dallettes 150x50 de type D. Cela veut donc dire que la largeur des spécimens n'influence pas le comportement en flexion des spécimens.
- Les microfissures qui se propagent lors des essais de flexion ont en moyenne une ouverture de fissure de 50 µm lorsqu'une de ces fissures devient dominante (macrofissure). Le moment où la macrofissure atteint une ouverture de fissure de 50 µm est l'endroit de localisation de la fissuration en flexion pour le BFUP3. Cela veut dire que l'effort de traction ultime est atteint lorsque la macrofissure atteint environ 50 µm, ce qui se produit toujours avant le pic de résistance en flexion.
- Les deux méthodes d'analyse inverse de Lopez (Lopez itérative et Lopez 5 points) performent mieux sur les prismes 100x100 que sur les dallettes 100x50 de type B ou 150x50 de type D. En moyenne, la contrainte ultime obtenue sur les prismes 100x100 est supérieure

à celle obtenue sur les dallettes rectangulaires et plus près des résultats de traction directe. Ceci s'explique par le fait que ces méthodes ont été calibrées pour des spécimens de flexion carrés. Ces deux méthodes surestiment grandement les déformations ultimes sur le BFUP3, même pour les prismes 100x100. Les résultats d'analyse sont également très variables entre les différents spécimens.

- La méthode d'analyse inverse SIA donnent des résultats conservateurs pour l'évaluation de la contrainte et de la déformation ultimes pour tous les types de spécimens en flexion (prismes et dallettes) pour le BFUP3. Les résultats d'analyse sont également moins variables entre les spécimens, et les résultats moins bons peuvent facilement être expliqués avec des défauts observables sur la courbe de flexion. La méthode SIA a donc un meilleur potentiel d'applicabilité au contexte normatif canadien des BFUP.
- Il est important de réaliser les analyses inverses sur des spécimens de flexion ayant la géométrie adéquate selon la méthode de calcul inverse utilisée. En utilisant la géométrie de spécimen en flexion pour laquelle une méthode de calcul inverse est calibrée, la rigidité flexionnelle des spécimens (qui est influencée entre autres par la géométrie) est près des spécimens qui ont été utilisés pour développer les équations mathématiques d'une méthode de calcul inverse spécifique.
- La méthode d'analyse inverse SIA est celle qui a été sélectionnée pour être adaptée au contexte canadien des BFUP. La simplicité de ses équations et du fonctionnement de la méthode rend l'adaptation plus facile. Les résultats sont également meilleurs et conservateurs par rapport à ce qui est observé en traction directe pour le BFUP3, ce qui est souhaité dans un contexte normatif.

CHAPITRE 5 CALIBRATION ET ADAPTATION DE LA MÉTHODE D'ANALYSE INVERSE SIA POUR LE CONTEXTE NORMATIF CANADIEN

La méthode d'analyse inverse des essais de flexion de la norme SIA a été choisie au Chapitre 4 pour évaluer le comportement en traction du BFUP et être adaptée au contexte canadien. Les paramètres essentiels à l'utilisation de la méthode SIA et leur importance dans le calcul inverse ont été présentés à la Section 2.3.3. Le Chapitre 5 présente donc plusieurs études numériques réalisées avec le modèle éléments finis décrit à la Section 3.3 pour modifier ces paramètres et les adapter à la configuration de l'essai de flexion et la taille des spécimens d'essais utilisés dans le présent projet de recherche. Le Chapitre 5 décrit également deux adaptations possibles de la méthode SIA.

5.1 Calibration des essais de flexion et de l'analyse inverse

Lors de la campagne expérimentale préliminaire, un seul BFUP a été caractérisé. Ce choix a permis d'évaluer la performance des trois méthodes d'analyse inverse pour différentes conditions d'essais en flexion. Le fait d'avoir des courbes de traction directe et de flexion 4 points pour un seul matériau n'est cependant pas idéal pour valider certains paramètres de la méthode SIA. En effet, un des objectifs du présent projet de recherche est de développer une méthode d'analyse inverse qui soit applicable pour plusieurs types de BFUP qui sont utilisés en génie civil. Trois autres mélanges de BFUP ont donc été utilisés dans la présente section pour analyser la performance de la méthode SIA pour des BFUP contenant différents dosages en fibres. Le premier BFUP contient 2% vol. de fibres (KING 2%), le deuxième a un dosage en fibres de 3% vol. (KING 3%) et le troisième a un dosage en fibres de 4% vol. (KING 4%). Les courbes de traction directe et de flexion 4 points pour ces matériaux ont été obtenues lors de travaux réalisés précédemment à Polytechnique Montréal, via des essais sur os O100x50 (Figure 3.3a, Section 3.1.3.1) et sur dallettes 150x50 (Tableau 3.3, Section 3.1.4) respectivement. Ces essais ont été réalisés selon la même méthodologie que les essais de caractérisation présentés au Chapitre 4. La Figure 5.1 présente le comportement moyen en traction pré-pic (Figure 5.1a) et post-pic (Figure 5.1b) ainsi que le comportement moyen en flexion 4 points (Figure 5.1c) pour les BFUP mentionnés ci-dessus (KING 2,3 et 4%) ainsi que pour le BFUP3 utilisé dans la campagne préliminaire et présenté au Chapitre 4. Les résultats illustrés en flexion pour le BFUP 3 sont ceux des dallettes coulées de type D, de même géométrie

que les dallettes des BFUP KING. Les barres d'erreurs sur les différentes courbes de la Figure 5.1 représentent la variabilité (étendue maximale des valeurs entre les spécimens) aux pics de résistance en traction (Figure 5.1a) et en flexion (Figure 5.1c).

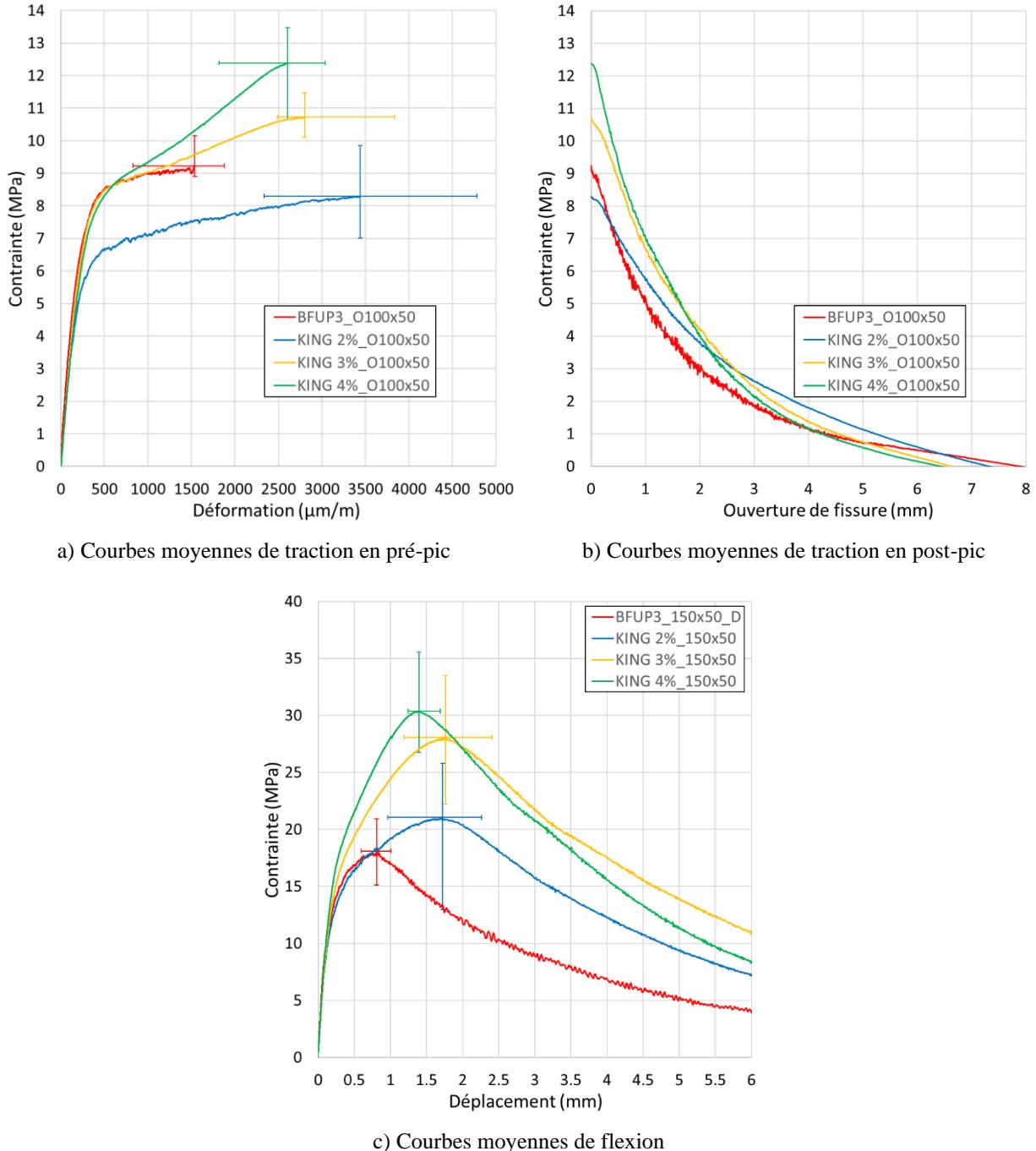


Figure 5.1 Comparaison des comportements en traction (O100x50) et en flexion (dallettes 150x50) des BFUP KING 2%, KING 3%, KING 4% et BFUP3

La Figure 5.1 permet d'observer des comportements différents pour les deux BFUP contenant 3% vol. de fibres, soit le BFUP3 et le KING 3%. Le KING 3% a un plateau d'écrouissage beaucoup plus long (déformation ultime moyenne de 2 800 $\mu\text{m}/\text{m}$) que le BFUP3 (déformation ultime moyenne de 1 550 $\mu\text{m}/\text{m}$) (Figure 5.1a). Le BFUP3 présente également des résistances ultimes de traction et de flexion inférieures à celle du KING 3%.

La comparaison des BFUP KING 2, 3 et 4% à la Figure 5.1 permet également d'observer l'impact du dosage en fibre sur le comportement en traction et en flexion d'un BFUP. Plus le dosage en fibre diminue, plus la résistance en traction et en flexion diminue, tandis que la déformation au pic de résistance augmente (Figure 5.1a). Les contraintes ultimes de traction et de flexion sont donc plus importantes pour le KING 4%, mais sa déformation ultime de traction et sa flèche au pic de flexion sont plus petites que pour les mélanges KING 2% et KING 3%.

L'utilisation des quatre mélanges permet donc d'avoir des BFUP avec des comportements très différents et des dosages en fibres différents. Les lois de traction moyennes de ces quatre BFUP (Figure 5.1a et Figure 5.1b) ont été introduites dans le modèle éléments finis (EF) décrit à la Section 3.3 pour reproduire le comportement en flexion de ces matériaux selon différentes géométries de spécimens afin de pouvoir valider les paramètres importants de la méthode d'analyse inverse SIA et étudier l'impact de différentes géométries en flexion sur ces paramètres.

5.1.1 Étude des champs de contraintes près des appuis de l'essai de flexion

Au cours des dernières années, certains projets de recherche réalisés à Polytechnique Montréal ont démontré que des ruptures en cisaillement pouvaient occasionnellement survenir lors de la réalisation des essais de flexion sur des prismes 100x100. Cette situation causait donc la perte des résultats attendus en flexion avec les prismes. Cette situation n'a jamais été observée avec des dallettes rectangulaires.

Ainsi, la première étude réalisée avec le modèle éléments finis porte sur les contraintes de cisaillement qui se développent près des appuis lors des essais de flexion 4 points. Cette étude est réalisée pour mieux comprendre la différence de comportement entre des spécimens minces de section rectangulaire (dallette) et des spécimens plus trapus de section carrée (prisme).

L'importance du cisaillement près des appuis a été évaluée via l'étude des contraintes principales de traction ainsi que via la microfissuration visible proche des appuis, au pic de résistance en flexion. La Figure 5.2 illustre la différence, en termes de contraintes de traction et de microfissuration, entre une dallette (150x50) et un prisme (100x100) du même BFUP KING 3% avec une portée d'essai ($L = 300$ mm) identique au pic de résistance en flexion. La couleur grise, présente dans le haut des spécimens principalement à gauche du point d'application de la charge, représente des contraintes de compression et la couleur bleue représente les endroits où la contrainte de traction ultime est atteinte en flexion. Les contraintes principales de traction sont illustrées par une échelle de couleurs allant du jaune (traction faible) au rouge foncé (traction élevée). Les lignes noires représentent des microfissures qui se sont développées dans le spécimen de flexion. Afin d'étudier l'importance du cisaillement, les contraintes de traction et la fissuration ont été évaluées plus spécifiquement le long d'une ligne tracée à 45 degrés par rapport au point d'application de la charge supérieure. Cette ligne est représentée par une droite pointillée blanche sur la Figure 5.2.

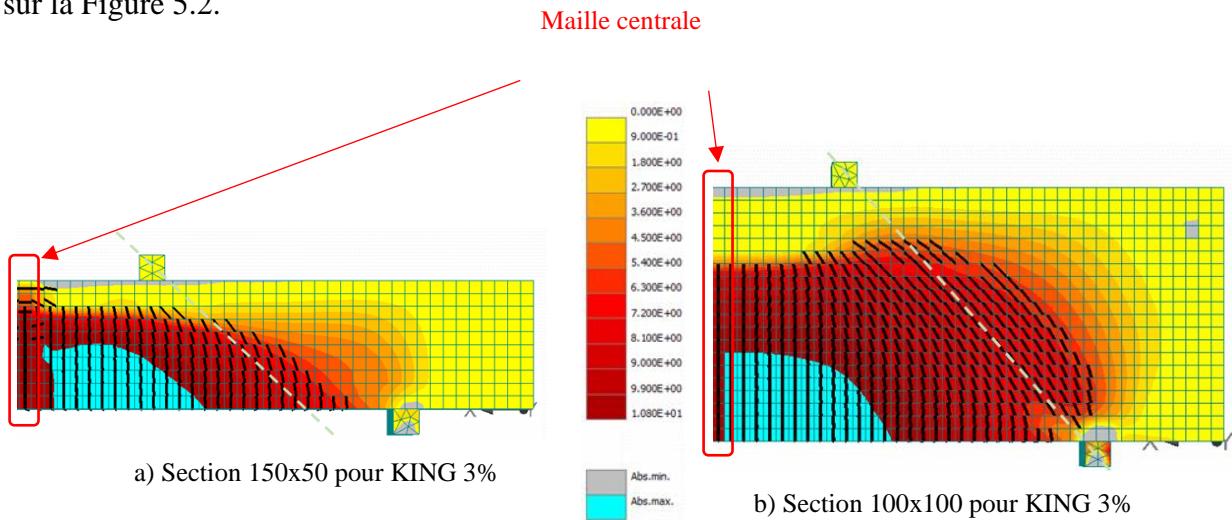


Figure 5.2 Répartition des contraintes principales de traction et microfissuration près des appuis au pic de résistance en flexion pour une section rectangulaire (150x50) et une section carrée (100x100)

La microfissuration observée à la Figure 5.2 est très différente entre un spécimen de section rectangulaire (Figure 5.2a) et de section carrée (Figure 5.2b). Les microfissures sont plus inclinées pour le prisme 100x100 et elles sont plus nombreuses près de l'appui inférieur. Aussi, les

microfissures se développent plus haut au centre du spécimen rectangulaire (Figure 5.2a) tandis que les fissures sont plus hautes près des appuis pour la section carrée (Figure 5.2b). Les contraintes de traction sont également plus importantes (rouge plus foncé) près des appuis pour la section carrée de 100x100, ce qui indique des contraintes de cisaillement plus grandes pour ce spécimen plus trapu.

Pour évaluer de manière quantitative la sollicitation en cisaillement des deux types de géométrie, la contrainte de traction maximale obtenue le long de la ligne pointillée blanche de la Figure 5.2 ($\sigma_{t 45^\circ}$) a été évaluée au pic de résistance en flexion. Cette contrainte est par la suite comparée à la contrainte de traction maximale (f_{tu}) du BFUP utilisé dans le modèle éléments finis. Le Tableau 5.1 résume ces contraintes pour les deux géométries à l'étude (150x50 et 100x100) et pour les quatre BFUP étudiés.

Tableau 5.1 Comparaison de la contrainte de traction mesurée à 45° près des appuis par rapport à la résistance maximale du matériau, pour des spécimens rectangulaires et carrés et pour les quatre BFUP étudiés

Section	Loi de traction	f_{tu} (MPa)	$\sigma_{t 45^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{t 45^\circ}/f_{tu}$
150x50 (L/h = 6)	BFUP3	9.1	5.1	56%
	KING 2%	8.3	4.6	55%
	KING 3%	10.8	5.4	50%
	KING 4%	12.3	6.0	49%
100x100 (L/h = 3)	BFUP3	9.1	5.6	62%
	KING 2%	8.3	4.9	59%
	KING 3%	10.8	6.3	58%
	KING 4%	12.3	8.0	65%

De façon générale, les contraintes de traction près des appuis ($\sigma_{t 45^\circ}$) sont plus grandes pour les prismes 100x100 que pour les dalles 150x50. L'importance de ces contraintes par rapport à la résistance ultime ($\sigma_{t 45^\circ}/f_{tu}$) des prismes 100x100 est systématiquement supérieure, d'environ 8% pour les quatre BFUP. Il est donc possible de conclure que plus l'élancement (L/h) d'un spécimen est faible, plus les contraintes de traction liées au cisaillement sont élevées près des appuis. Une augmentation des efforts de cisaillement près des appuis accroît le risque d'une fissuration en dehors de la zone de moment constant (zone entre les deux points d'application de la charge), ce

qui rendrait l'essai invalide et non exploitable pour obtenir le comportement en traction par méthode d'analyse inverse.

Bien que les analyses EF démontrent que le ratio $\sigma_t 45^\circ/f_u$ demeure inférieur à 70%, celui-ci peut devenir plus élevé dans des spécimens avec une orientation des fibres défavorable et/ou avec la présence de défauts à l'appui. Ainsi, il est préférable d'utiliser des dalles rectangulaires avec un élancement (L/h) élevé pour réduire le risque de rupture en cisaillement lors de la réalisation de l'essai de flexion.

5.1.2 Étude de la hauteur tendue des spécimens de flexion à la section fissurée

La hauteur tendue des spécimens de flexion au pic de résistance (h_{tendue}) est un paramètre important dans la méthode SIA. Selon la norme SIA, h_{tendue} est égale à 82% de la hauteur totale du spécimen à la force maximale de flexion (Section 2.3.3). Cette valeur est valide pour la géométrie d'essai de flexion adoptée par la SIA (Figure c de la Section 2.2.2). Étant donné que plusieurs géométries sont utilisées dans le présent projet de recherche, il est nécessaire de valider la valeur de la hauteur tendue pour ces géométries.

L'évaluation de la hauteur tendue dans les modèles éléments finis se fait en réalisant une coupe au centre de la maille centrale fissurée (section 3.3.2), une fois le pic de résistance en flexion atteint. Les contraintes de traction perpendiculaires au plan de coupe sont par la suite analysées. L'axe neutre est localisé et la hauteur tendue est mesurée. La Figure 5.3 présente les contraintes de traction observées sur la coupe des spécimens de BFUP3 de sections 150x50 (Figure 5.3a) et 100x100 (Figure 5.3b). La couleur grise représente les contraintes de compression, tandis qu'une échelle de couleur allant du jaune au rouge foncé représente les contraintes de traction, respectivement faibles à élevées. L'axe neutre est représenté par la ligne horizontale en pointillés noirs.

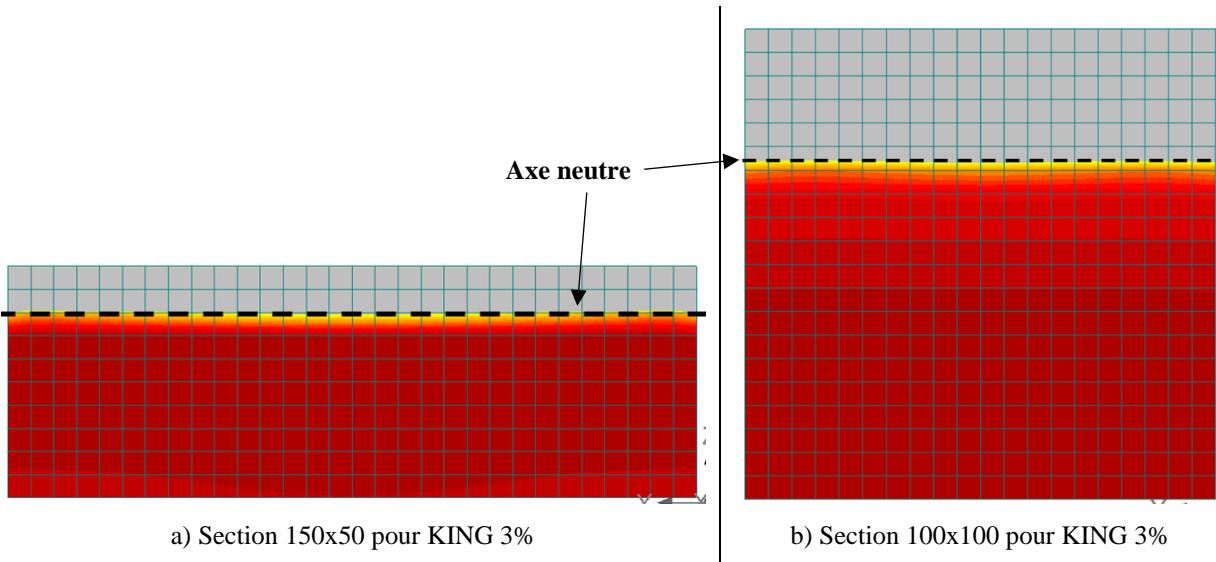


Figure 5.3 Répartition des contraintes de traction sur une coupe de la section fissurée pour deux géométries de spécimens de flexion

La hauteur tendue est déterminée en soustrayant le nombre de mailles grises présentes sur la hauteur de la coupe du nombre total de maille. Le ratio du nombre de mailles tendues sur le nombre total de mailles permet d'obtenir le pourcentage de hauteur tendue. Par exemple, sur la Figure 5.3a, deux mailles sont grises sur les dix mailles constituant la hauteur du spécimen. La hauteur tendue est donc égale à 80% de la hauteur total pour le spécimen de BFUP3 de section 150x50. La hauteur tendue est différente pour le spécimen de BFUP3 de section 100x100 (Figure 5.3b), puisque 4.6 mailles sont grises sur les 20 mailles en hauteur, ce qui induit une hauteur tendue égale à 77% de la hauteur totale. La hauteur tendue a été mesurée pour trois géométries de spécimen de flexion (100x50, 150x50 et 100x100) ainsi que pour les quatre BFUP étudiés. Ces résultats sont regroupés au Tableau 5.2.

Le Tableau 5.2 montre que la géométrie utilisée influence la hauteur tendue obtenue avec les modèles éléments finis. Pour le BFUP3, cette hauteur est de 80% de la hauteur totale pour le spécimen de section 150x50 et elle diminue à 77% pour le spécimen de section 100x100. La diminution du pourcentage de hauteur tendue pour les spécimens de section 100x100 par rapport à ceux de section 150x50 est également observée pour tous les autres BFUP à l'étude. La comparaison du spécimen de BFUP3 de section 100x50 avec celui de section 150x50 montre logiquement que la largeur hors plan des spécimens modélisés n'influence pas la hauteur tendue

qui reste égale à 80% dans les deux cas. L’élancement (L/h) est donc le paramètre géométrique qui influence la hauteur tendue dans un spécimen de flexion. Plus l’élancement est petit, plus la hauteur tendue diminue selon les résultats du Tableau 5.2.

Tableau 5.2 Hauteur tendue mesurée en éléments finis pour différents BFUP et différentes géométries en flexion 4 points

Section	Matériau	Hauteur tendue (% h_m)
100x50 ($L/h = 6$)	BFUP3	80%
150x50 ($L/h = 6$)	BFUP3	80%
	KING 2%	80%
	KING 3%	80%
	KING 4%	76%
100x100 ($L/h = 3$)	BFUP3	77%
	KING 2%	77%
	KING 3%	72%
	KING 4%	76%

Le type de BFUP n’influence pas la hauteur tendue. Une valeur est différente des autres pour le spécimen de BFUP KING4% de section 150x50 et pour le spécimen de BFUP KING3% de section 100x100. Cependant, de façon générale, la hauteur tendue est égale 80% pour un élancement L/h de 6 et elle est égale à 77% pour un élancement de 3 pour les trois autres BFUP du Tableau 5.2 et la hauteur tendue a donc été jugée comme étant fixe pour les élancements étudiés, peu importe le BFUP.

Les hauteurs tendues déterminées dans cette section pourraient remplacer la valeur de 82% utilisée par la SIA et permettre de modifier le facteur « 0.383 » de l’Équation (2.23) de la méthode de calcul inverse SIA, qui sert à calculer la valeur de la contrainte ultime en traction f_{Utu} (Section 2.3.3). Cette modification devrait permettre d’améliorer la précision de f_{Utu} pour les configurations d’essais de ce projet. Les modifications apportées à la méthode SIA pour le changement de la hauteur tendue seront expliquées davantage à la Section 5.2.

5.1.3 Étude de la localisation de la fissuration dans l'essai de flexion selon un critère d'ouverture de fissure

La calibration de la méthode de calcul inverse appliquée sur les résultats des essais de flexion dépend entre autres du moment où certaines microfissures se localisent dans le BFUP et créent une macrofissure. À ce moment, la contrainte de traction a atteint localement dans le spécimen de flexion la résistance ultime en traction (normalement à la fibre tendue). Cette zone de localisation passe ensuite en comportement adoucissant du BFUP, c'est-à-dire que la contrainte de traction diminue à mesure que la macrofissure s'ouvre, tandis que le reste du spécimen demeure en comportement écrouissant. Il importe de bien déterminer à quel endroit sur la courbe force-déplacement (F vs d) de l'essai de flexion la localisation survient, car celui-ci permet de définir ensuite, par calcul inverse, la contrainte ultime en traction du BFUP étudié et la déformation maximale d'écrouissage associée.

Plusieurs chercheurs (Denarié [32], Lopez [15], ...) ont démontré que la localisation (atteinte de la contrainte ultime de traction à la fibre tendue) se produit avant l'atteinte du pic en flexion. L'endroit exact où cela survient sur la courbe force-déplacement du comportement en flexion est difficile à déterminer. Cependant, l'étude sur la fissuration du BFUP3 en flexion (Section 4.3.5) a montré qu'une fissure devenait dominante en flexion lorsque celle-ci atteint une ouverture de fissure de 0.05 mm (50 µm). Il est alors possible de considérer que la localisation de la fissuration survient lorsque la microfissure dominante atteint 0.05 mm et qu'elle devient donc une macrofissure. Les modèles éléments finis permettent d'étudier la fissuration formée lors d'un essai de flexion. Il est donc possible de localiser sur la courbe de flexion l'endroit où la fissure principale de la maille centrale atteint une ouverture de 0.05 mm. Les emplacements de la force à cet endroit ($F_{\omega=0.05}$) et de la force au pic de résistance (F_{max}) sont illustrés sur des exemples de courbes force-déplacement de modèles EF à la Figure 5.4, pour une dallette 150x50 (Figure 5.4a) et pour un prisme 100x50 (Figure 5.4b) du BFUP KING 2%.

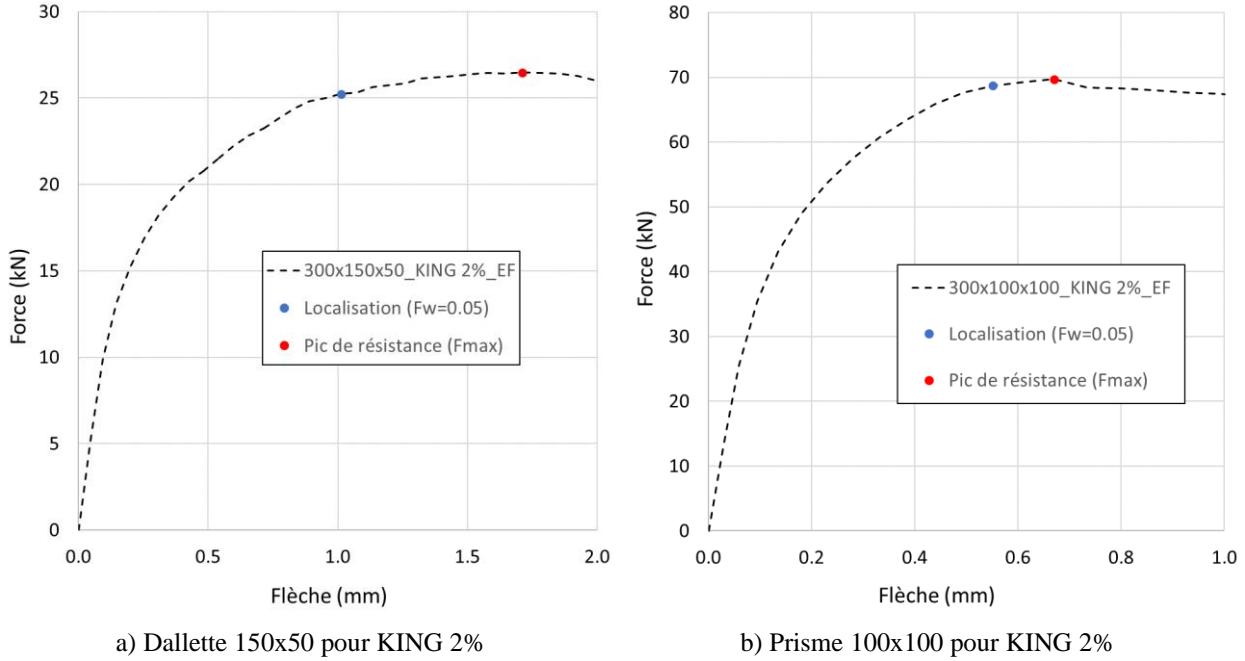


Figure 5.4 Emplacement de la force de localisation ($F_{\omega=0.05}$) sur les courbes EF d'une dallette (150x50) et d'un prisme (100x100) du BFUP KING 2%

La force à la localisation ($F_{\omega=0.05}$) est comparée à la force au pic de résistance (F_{max}) au Tableau 5.3 pour des modèles EF avec différentes géométries de spécimens (150x50 et 100x100) et les différents BFUP étudiés. Un ratio de localisation ($F_{\omega=0.05}/F_{max}$) est utilisé pour bien comparer les deux forces obtenues.

Tableau 5.3 Comparaison de la force de localisation (selon $\omega = 50 \mu\text{m}$) avec la forme maximale en flexion pour différentes géométries en flexion et différents BFUP

Section	Matériau	$F_{\omega=0.05}$ (kN)	F_{max} (kN)	$F_{\omega=0.05}/F_{max}$ (%)
150x50	BFUP3	26.96	27.7	97%
	KING 2%	25.23	26.48	95%
	KING 3%	31.26	33.2	94%
	KING 4%	36.35	36.96	98%
100x100	BFUP3	71.86	72.85	99%
	KING 2%	68.71	69.68	99%
	KING 3%	86.24	93.3	92%
	KING 4%	92.20	114.15	81%

Le Tableau 5.3 montre que le moment de localisation en traction est très variable selon la condition d'essai (géométrie et type de BFUP). Pour les spécimens rectangulaires (150x50), le ratio de localisation ($F_{\omega=0.05}/F_{max}$) varie de 4% et est en moyenne de 96%. Les spécimens de section carrée (100x100) donnent des résultats encore plus variables, puisque le ratio de localisation varie de 18% et est en moyenne égal à 93%. Le ratio de localisation moyen est plus élevé pour les sections rectangulaires que les sections carrées. Au vu de ces résultats obtenus via les modèles EF, il est donc difficile de déterminer un ratio de localisation fixe qui puisse être utilisé pour toute condition d'essai.

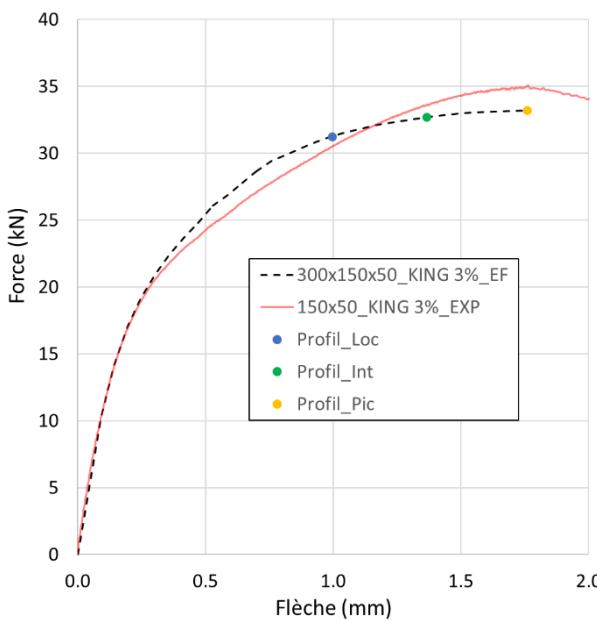
Cette même analyse sera réalisée avec des analyses par corrélation d'images sur les essais de flexion de la campagne expérimentale finale pour valider si le ratio de localisation est moins variable expérimentalement que ce qui a été obtenu via les modèles éléments finis. Tel que mentionné précédemment, la détermination du moment de localisation de la fissuration durant les essais de flexion est particulièrement importante pour la calibration de la méthode de calcul inverse.

5.1.4 Étude du profil de contraintes à la section fissurée des spécimens de flexion

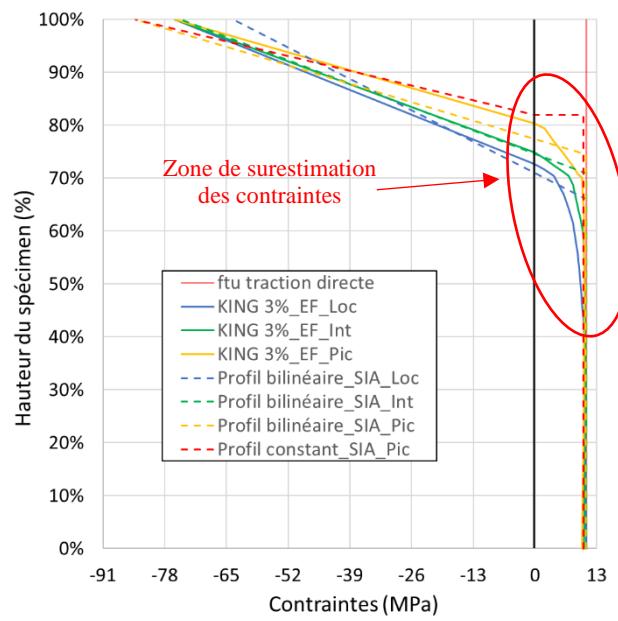
L'évolution des contraintes à la section fissurée d'un essai de flexion est très importante pour la méthode SIA. En effet, deux profils de contraintes hypothétiques sont utilisés pour développer les équations nécessaires au calcul inverse SIA. L'utilisation de modèles éléments finis permet d'obtenir ces profils de contraintes à différents moments lors de l'essai de flexion. Ces profils de contraintes numériques peuvent ensuite être comparés à ceux proposés par la méthode SIA. Il importe de rappeler que la méthode SIA considère un profil de contrainte bilinéaire en traction pour la détermination de la déformation ultime (hypothèse H2, Section 2.3.3) et un profil constant en traction pour évaluer la contrainte ultime (hypothèse H3, Section 2.3.3).

La méthodologie utilisée à la Section 5.1.2 pour obtenir une coupe transversale dans la maille centrale des modèles est utilisée pour tracer le profil des contraintes sur la hauteur des spécimens de flexion. Les profils de contrainte ont été déterminés pour trois points de la courbe force-déplacement de flexion des modèles. Le premier point est le pic de résistance en flexion (à F_{max}), le deuxième est le point de localisation (à $F_{\omega=0.05}$) et le troisième est un point intermédiaire situé à un déplacement médian entre le pic de résistance et le point de localisation. Le profil de contraintes

du modèle éléments finis ainsi que le profil de contraintes bilinéaire de la méthode SIA (Figure 2.24b de la Section 2.3.3) sont obtenus pour les trois points de la courbe décrites précédemment. Le profil de contraintes constant de la méthode SIA (Figure 2.25b de la Section 2.3.3) est également présenté pour le point représentant le pic de résistance en flexion. La Figure 5.5 montre un exemple de profils de contraintes obtenus du modèle éléments finis et ceux donnés par la SIA pour une dallette 150x50 de BFUP KING 3%. La Figure 5.5a présente la comparaison entre la courbe moyenne expérimentale (rouge pâle) et la courbe de comportement obtenue par modélisation éléments finis (pointillée noire) ainsi que l'emplacement des trois points où les profils de contraintes ont été déterminés numériquement. La Figure 5.5b présente ces profils de contraintes numériques (courbes continues) ainsi que ceux de la méthode SIA (courbes pointillées). La couleur de chaque courbe sur cette figure correspond au point de calcul qui lui est associé. Le point au pic de résistance est associé à la couleur jaune, le point de localisation à la couleur bleue et le point intermédiaire à la couleur verte. La courbe pointillée rouge représente le profil de contraintes constant qui est calculé au pic de résistance en flexion.



a) Endroit de calcul des profils de contraintes



b) Profils de contraintes éléments finis (EF) et SIA

Figure 5.5 Profils de contraintes numériques versus SIA pour une dallette de section 150x50 de BFUP KING 3%

La Figure 5.5 présente seulement les résultats pour un modèle (spécimen 150x50 de BFUP KING 3%). Des résultats similaires ont cependant été obtenus pour tous les modèles du Tableau 5.3 (différents spécimens et matériaux) et les conclusions sont donc les mêmes que celles extraites de la Figure 5.5 pour ceux-ci.

Tout d'abord, la Figure 5.5a montre que le modèle éléments finis reproduit très bien le comportement moyen en flexion du matériau. Ensuite, la comparaison des profils de même couleur sur la Figure 5.5b montre que le profil de contraintes bilinéaire considéré par la SIA pour calculer la déformation ultime de traction surestime la hauteur de la zone plastifiée en traction pour les deux premiers points de calcul (couleurs bleue et verte). Par exemple, la zone de plastifiée en traction (contrainte uniforme sur une certaine hauteur du spécimen) sur la courbe pointillée verte se termine plus haut que celle observée sur la courbe pleine verte. L'aire sous la courbe pour la partie en traction des courbes pointillées est donc plus grande que pour les courbes pleines des couleurs bleue et verte. Ce phénomène n'est pas aussi important pour les courbes jaunes (pic de résistance en flexion), mais il est important de rappeler que le profil bilinéaire proposé par la SIA ne s'applique pas à ce point. Le profil constant (courbe rouge pointillée) est celui qui doit être appliqué et celui-ci surestime beaucoup les contraintes, plus que pour le profil bilinéaire.

La zone de surestimation des contraintes encerclée en rouge sur la Figure 5.5b met également en évidence la différence de forme entre les profils éléments finis (courbes continues) et les profils bilinéaires SIA (courbes pointillées) pour les trois points de calcul. Le changement de pente en traction dans les profils éléments finis se fait beaucoup plus graduellement que ce qui est montré par les profils bilinéaires SIA. Ainsi, l'aire sous la courbe en traction des modèles éléments finis est plus faible que celle des profils bilinéaires SIA, à l'exception du profil bilinéaire au pic (courbe jaune pointillée) qui est théoriquement non applicable. Ceci entraîne une surestimation des contraintes de traction par la méthode d'analyse inverse de la SIA pour les points de calcul se situant avant le pic de résistance en flexion. Ce phénomène est encore plus amplifié lors de l'utilisation d'un profil de contraintes en traction constant (courbe pointillée rouge sur la Figure 5.5b en comparaison à la courbe continue jaune obtenue numériquement). Pour rappel, la SIA fait l'hypothèse d'un tel profil constant en traction pour calculer la contrainte ultime de traction. Ce profil de contraintes constant, qui surestime également les contraintes par rapport au profil

bilinéaire de la SIA calculé au pic de résistance en flexion, est donc le moins bien adapté pour exprimer le comportement au pic de résistance des essais de flexion pour des géométries de spécimens et des BFUP utilisés dans l'industrie.

Ces analyses démontrent que les profils de contraintes simplifiés considérés par la méthode SIA sous-estiment les contraintes de traction dans les spécimens. Cependant, l'utilisation d'un profil de contraintes simplifié est essentielle pour que l'analyse inverse soit simple à effectuer, ce qui est primordial pour l'utilisation d'une méthode d'analyse inverse dans un contexte normatif. Dans ce contexte, il semble préférable de seulement utiliser un profil de contraintes bilinéaire (plus proche de la réalité) lors de l'analyse inverse pour estimer à la fois la contrainte ultime (f_{Ult}) et la déformation ultime correspondante (ϵ_{Ult}). Cette conclusion importante mènera à la proposition d'une adaptation de la méthode de calcul inverse spécifique (Section 5.2.2).

5.2 Adaptation de la méthode d'analyse inverse

Avant de débuter la correction de la méthode SIA pour améliorer sa performance, il est important de connaître la performance de la méthode originale sur les différents BFUP et géométries étudiées. La performance de la méthode SIA a déjà été évaluée pour plusieurs géométries du BFUP3 à la Section 4.4.3. La performance de la SIA a également été étudiée ici pour les BFUP KING contenant 2, 3 ou 4% vol. de fibres. La Figure 5.6 présente les résultats du calcul inverse SIA (courbes pointillées) réalisé sur les courbes moyennes de flexion des quatre BFUP présentées à la Figure 5.1c. Les courbes de traction issues du calcul inverse sont comparées aux courbes moyennes de traction directe en pré-pic (courbes continues) pour ces mêmes BFUP.

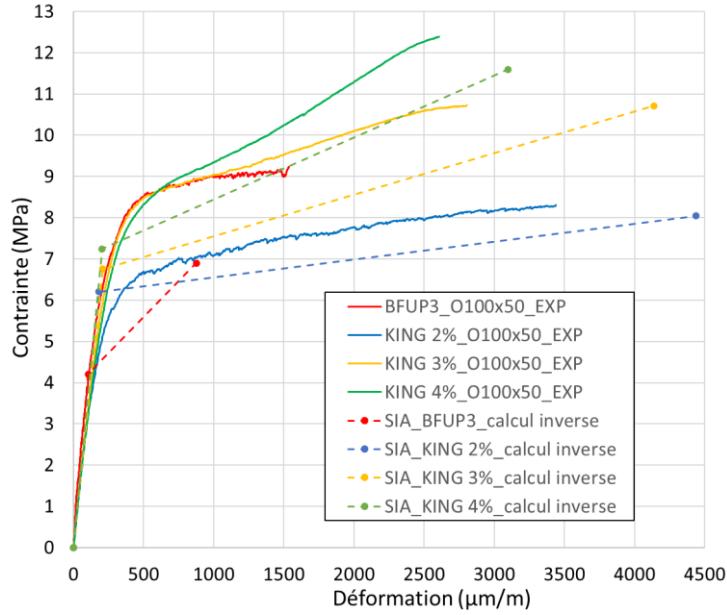


Figure 5.6 Courbes moyennes de traction issues du calcul inverse SIA original et des essais de traction directe pour les BFUP3 et KING 2, 3 et 4%

La performance de la méthode SIA pour la courbe moyenne des dallettes de type D en BFUP3 n'est pas très bonne. La contrainte ultime et la déformation ultime sont très faibles en comparaison à ce qui est obtenu en traction directe. Ce constat était moins évident lorsque l'analyse a été réalisée sur les courbes individuelles (Section 4.4.3) puisqu'une des courbes donnait une très grande déformation. Il y a donc une différence majeure entre le comportement en flexion et le comportement en traction du BFUP3. Cela pourrait être dû à la technique de mise en place qui est différente pour les deux types de spécimens (Tableau 3.2, Section 3.1.2), ou bien à une imprécision du calcul inverse pour ce BFUP. Les résultats pour les 3 autres BFUP semblent indiquer que la différence de mise en place pourrait être le problème et non le calcul inverse. La méthode SIA donne de très bons résultats pour les BFUP KING 2, 3 et 4% en termes de contrainte ultime (f_{Utu}), quoiqu'elle soit très légèrement sous-estimée par rapport à celle obtenue avec les os de traction directe. Les déformations maximales d'écrouissage (ε_{Utu}) sont cependant passablement surestimées par rapport aux valeurs obtenues expérimentalement. Il est donc primordial de considérer cette surestimation des déformations lors du développement des adaptations de la méthode SIA.

La Section 5.1 du présent chapitre a permis de réaliser plusieurs apprentissages quant au comportement en flexion de différents BFUP avec différentes géométries de spécimens. Premièrement, les essais sur des spécimens carrés avec un élancement (L/h) plus faible génèrent plus de contraintes de cisaillement près des appuis et la hauteur tendue en section fissurée est plus faible. Deuxièmement, l'atteinte de la localisation de la fissuration (lorsque la contrainte ultime de traction est mesurée à la fibre inférieure) lors de l'essai de flexion est difficile à évaluer selon un ratio de localisation ($F_{\omega=0.05}/F_{max}$) fixe. Ce ratio est très variable et n'est pas uniforme pour des géométries et des BFUP différents selon les résultats des modèles éléments finis. Finalement, les profils de contraintes simplifiés considérés par la méthode SIA surestiment les contraintes par rapport aux profils obtenus avec les éléments finis. Le profil de contraintes constant en traction considéré pour déterminer la contrainte ultime de traction (f_{Utu}) est celui qui surestime le plus le profil de contraintes du modèle éléments finis au pic de résistante en flexion.

Les différentes conclusions obtenues de la Section 5.1 et l'évaluation de la performance de la méthode de calcul inverse SIA sur les BFUP KING permettent d'envisager le développement de deux adaptations. Ces adaptations visent à améliorer la précision de la contrainte ultime (f_{Utu}) et de la déformation d'écrouissage correspondante (ϵ_{Utu}) en traction, obtenues par calcul inverse, afin d'obtenir des valeurs plus proches de celles obtenues expérimentalement via les essais de traction directe sur os O100x50. Il est important de noter que le calcul du point de limite élastique (de contrainte f_{Ute} et de déformation associée ϵ_{Ute}) ne sera pas modifié par ces adaptations et que la méthodologie pour déterminer ce point reste donc la même que celle utilisée par la méthode SIA originale (Section 2.3.3).

5.2.1 Adaptation 1 : hauteur tendue et déformation à l'ultime

La première adaptation développée pour améliorer la méthode SIA conserve les principes de la méthode originale. L'objectif de cette méthode est d'augmenter la contrainte ultime et de diminuer la déformation ultime selon les observations faites à la Section 5.1. La première modification est l'ajustement de la hauteur tendue (h_{tendue}) qui est nécessaire pour déterminer la contrainte ultime (f_{Utu}) et qui modifie le facteur 0.383 devant l'Équation (2.23) de la Section 2.3.3. Avec l'utilisation d'une hauteur tendue de 0.77 hm et 0.80 hm obtenues à la Section 5.1.2 respectivement pour les prismes (100x100) et les dallettes (100x50 ou 150x50), l'Équation (2.23) devient l'Équation (5.1) ou l'Équation (5.2) suivantes.

*Dalettes rectangulaires
(100x50 ou 150x50)*

$$f_{Utu} = \textcolor{red}{0.390} \frac{F_B l_m}{b_m h_m^2} \quad (h_{tendue} = 0.80 h_m \text{ pour } \frac{L}{h} = 6) \quad (5.1)$$

*Prismes carrés
(100x100)*

$$f_{Utu} = \textcolor{red}{0.402} \frac{F_B l_m}{b_m h_m^2} \quad (h_{tendue} = 0.77 h_m \text{ pour } \frac{L}{h} = 3) \quad (5.2)$$

Deux équations sont désormais possibles pour déterminer f_{Utu} . Si l'élancement lors de l'essai de flexion est égal à 6 (ex : dallette 150x50 avec $L = 300$), le facteur 0.383 de l'équation originale devient égal à 0.390. Si l'élancement est égal à 3 (ex : prisme 100x100 avec $L = 300$), ce même facteur devient égal à 0.402. Dans les deux cas, la contrainte ultime est légèrement augmentée (de 2% et 5%) par rapport à la valeur de f_{Utu} donnée par la méthode originale. Les Équations (5.1) et (5.2) sont valides seulement pour des spécimens ayant un élancement de 6 et de 3 respectivement. Pour des spécimens avec des élancements différents, la hauteur tendue doit être obtenue avec la procédure décrite à la Section 5.1.2.

L'adaptation 1 de la SIA doit également permettre de diminuer la déformation ultime (ε_{Utu}). Une façon simple et efficace est d'appliquer un facteur réducteur (C) à la portion représentant la déformation plastique dans l'Équation (2.22) de la Section 2.3.3. L'Équation (5.3) présente la modification apportée à l'aide du facteur C .

$$\varepsilon_{Uti} = \frac{\sigma_{Uti}}{E_u} + \chi_i \alpha_i h_m \textcolor{red}{C} \quad \text{où } C \in [0, 1] \quad (5.3)$$

La diminution de la déformation ultime à l'aide du facteur C dans l'Équation (5.3) n'est pas un choix arbitraire. Cette diminution est justifiée par la surestimation des contraintes par le profil de contraintes bilinéaire considéré par la méthode SIA. L'Équation (2.22) découle directement du choix d'un profil bilinéaire par la SIA. En diminuant la partie représentant les déformations plastiques dans l'Équation (5.3), la hauteur plastifiée correspondant à la combinaison des paramètres α_i et h_m est diminuée pour le calcul des déformations (ε_{Uti}). Cette hauteur plastifiée est justement trop grande tel que montré à la Figure 5.5b. Le facteur C permet donc de réduire la surestimation des contraintes dans la méthode SIA pour calculer les déformations.

Le facteur C doit cependant être fixe pour tous les types de BFUP pour que l'Équation (5.3) soit facilement applicable. Il doit donc être calibré pour les BFUP et les conditions d'essais associés. La Figure 5.7 présente l'impact du changement de la hauteur tendue dans l'Équation (5.1) et

l'impact de différent choix de facteur C dans l'Équation (5.3) sur la performance de l'adaptation 1 de la méthode SIA. La courbe rouge représente la courbe moyenne de traction directe ainsi que l'étendue des valeurs de contraintes et de déformations ultimes. Les autres courbes continues représentent les résultats d'analyse inverse SIA pour une hauteur tendue égale à 82% de la hauteur totale (h_m) (méthode originale), tandis que les courbes pointillées représentent les résultats pour une hauteur tendue modifiée à 80% de h_m , pour les dalles rectangulaires (adaptation 1). Les résultats d'analyse inverse sont divisés en trois couleurs. La couleur bleue représente les courbes où un facteur $C = 1$ a été utilisé (méthode originale), tandis que les courbes vertes ($C = 0.50$) et jaunes ($C = 0.67$) représentent deux choix possibles pour la calibration initiale du facteur C dans l'équation (5.3). Les dix points d'interpolation calculés lors de l'application de la méthode SIA (Figure 2.26 de la Section 2.3.3) sont également représentés par un point blanc avec une bordure de la même couleur que le facteur C associé. Le changement de hauteur tendue n'a aucun impact sur les points d'interpolation. En résumé, la méthode SIA originale est représentée par la courbe continue bleue ($h_{tendue} = 0.82 h_m$ et $C = 1$), tandis que les autres courbes pointillées représentent les possibilités d'adaptation de la méthode. La hauteur tendue est nommée « ht » exclusivement sur la Figure 5.7 pour alléger l'identification des différentes courbes présentées.

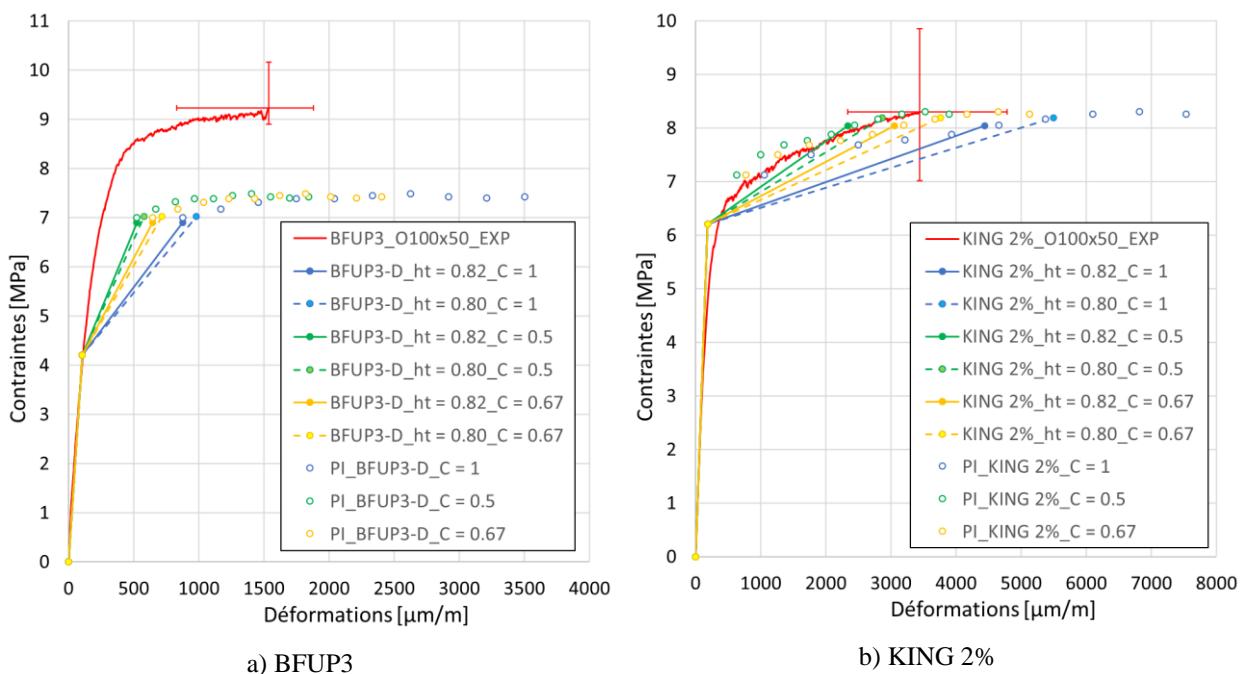


Figure 5.7 Impact du changement de la hauteur tendue (ht) et de l'utilisation d'un facteur C dans l'adaptation 1 proposée de la SIA, essais sur dalles (150x50) pour différents BFUP

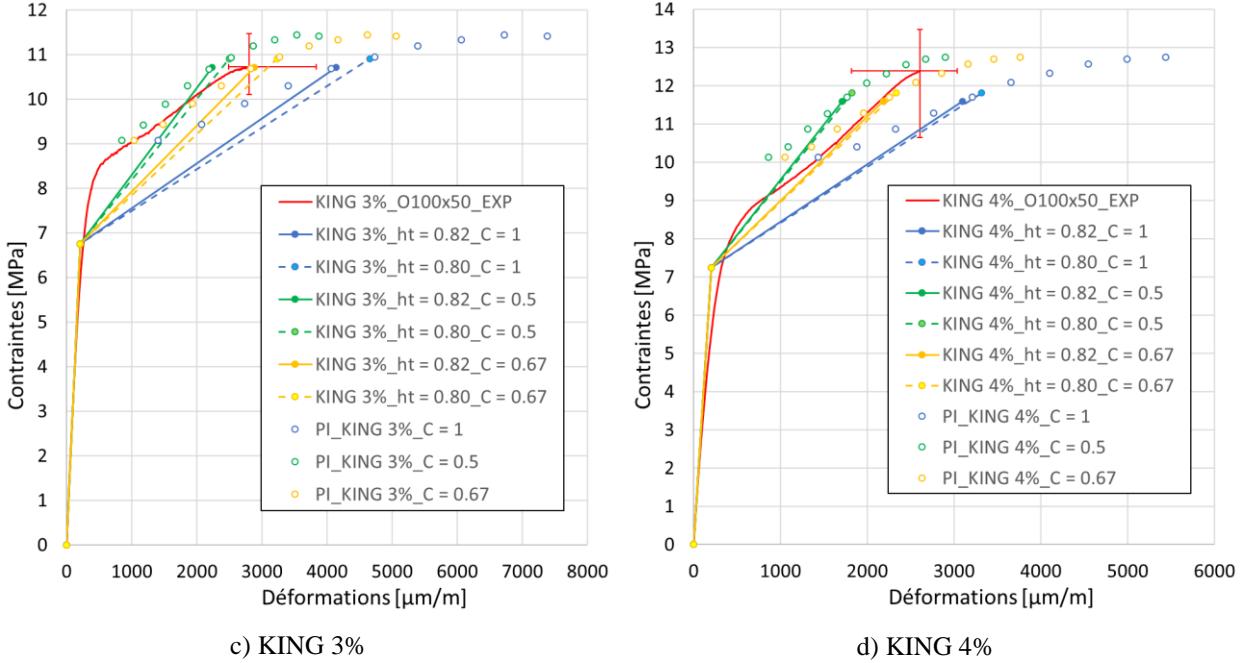


Figure 5.7 Impact du changement de la hauteur tendue (ht) et de l'utilisation d'un facteur C dans l'adaptation 1 proposée de la SIA, essais sur dallettes (150x50) pour différents BFUP (suite)

La comparaison entre les courbes pointillées et les courbes continues permet tout d'abord de voir l'impact du changement de hauteur tendue sur les résultats. La prise en considération de la diminution de la hauteur tendue dans l'équation (5.1) ne permet pas d'augmenter considérablement la contrainte ultime (f_{Utu}). Pour les BFUP KING 2% et KING 4%, cette augmentation permet malgré tout de se rapprocher de la contrainte ultime des os en traction directe. L'augmentation de f_{Utu} entraîne cependant une augmentation non négligeable de la déformation ultime (ε_{Utu}). L'augmentation de ε_{Utu} est plus grande lorsque les points d'interpolation sont fortement alignés horizontalement, soit quand le BFUP est moins écrouissant (ex : KING 2%). L'utilisation du facteur C dans l'équation (5.3) devient donc encore plus importante.

La comparaison entre les courbes vertes, jaunes et bleues sur la Figure 5.7 permet de comprendre l'impact du facteur C sur la déformation ultime obtenue par calcul inverse. Pour les BFUP KING 2 à 4% (Figure 5.7b à d), un facteur $C = 0.67$ est adéquat pour bien représenter la déformation ultime obtenue en traction directe avec les os (courbe rouge). La combinaison du changement de hauteur tendue à 80% de h_m et de l'utilisation d'un facteur C de 0.67 présente une bonne calibration

initiale pour l'adaptation 1. Cette calibration initiale sera utilisée lors de la campagne expérimentale finale (Chapitre 6) pour valider la performance de l'adaptation 1 proposée à la méthode SIA.

L'adaptation 1 n'est pas très performante pour le BFUP3. L'augmentation de la hauteur tendue ne permet pas de diminuer significativement la différence entre le comportement ultime de traction obtenu par analyse inverse et celui donné par les essais de traction directe sur os. Cette faible performance peut s'expliquer par le fait que le BFUP3 a eu un comportement en flexion très peu résistant versus son comportement en traction, tel qu'illustré à la Figure 5.1 et qu'expliqué au début de la section 5.2. La Figure 5.7a n'est donc pas considérée pour la calibration du facteur C . La mauvaise performance de l'adaptation 1 sur le matériau BFUP3 est d'ailleurs à l'origine du développement de l'adaptation 2 de la méthode SIA.

5.2.2 Adaptation 2 : Profil de contraintes et localisation de la fissuration en flexion

La deuxième adaptation proposée à la méthode SIA a pour but d'éliminer l'utilisation de deux profils de contraintes différents pour déterminer les coordonnées du point ultime en traction avec l'analyse inverse (profil bilinéaire pour ϵ_{Utu} et profil constant pour f_{Utu}), tel qu'utilisé dans la méthode originale de la SIA. Cette incohérence entraîne certains résultats erronés de la méthode SIA, qui sont surtout liés à l'utilisation du profil de contraintes constant en traction qui surestime les contraintes de traction dans le spécimen de flexion. La différence entre ce profil qui est adopté pour déterminer f_{Utu} et le profil réel déterminé avec les éléments finis est très grande (Figure 5.5). Le fait d'utiliser deux types de profils pour déterminer le point ultime de traction (Section 2.3.3) entraîne également de mauvais résultats pour des BFUP avec un plateau d'écrouissage très court comme le BFUP3.

L'adaptation 2 de la méthode SIA permet de supprimer l'utilisation de f_{Utu} . L'hypothèse H3 de la SIA n'est plus requise (Section 2.3.3) pour déterminer l'endroit de localisation en flexion. Seule l'hypothèse H2 est conservée pour calculer la contrainte et la déformation ultimes avec un seul profil simplifié qui est le profil bilinéaire. La contrainte de traction ultime est donc calculée avec l'Équation (2.21) de la Section 2.3.3 représentant σ_{Uti} . La déformation de traction ultime est quant à elle calculée avec l'Équation (5.3) développée pour la méthode adaptée 1. Il a été choisi de calculer la déformation ultime avec l'Équation (5.3) (intégrant le facteur C) au lieu de l'Équation

(2.22) de la SIA, puisque le profil bilinéaire surestime toujours les contraintes, tel qu'illustré à la Figure 5.5b. Puisque les déformations devaient être diminuées pour l'adaptation 1, elles doivent également l'être dans l'adaptation 2. De façon préliminaire, le facteur C est considéré égal à 0.67 comme pour l'adaptation 1 dans le but de rester cohérent avec les résultats de la Figure 5.7.

Le fait de supprimer l'utilisation de l'hypothèse H3 de la SIA entraîne cependant un certain défi. Une nouvelle méthode doit être développée pour déterminer quand a lieu la localisation de la fissuration sur la courbe de flexion, soit quand la contrainte de traction ultime est atteinte à la fibre inférieure du spécimen. La première option considérée est d'utiliser un ratio de localisation, soit de considérer que la force correspondant à la localisation (F_{loc}) est égal à un certain pourcentage de la force maximale au pic de flexion (F_{max}). En fixant un tel pourcentage, il est possible déterminer F_{loc} et de calculer la contrainte et la déformation ultimes à cet endroit (respectivement σ_{Utu} et ε_{Utu}). La section 5.1.3 a cependant montré qu'il n'est pas facile de fixer un ratio de localisation de la fissuration, puisque celui-ci varie beaucoup selon le BFUP utilisé (surtout pour les prismes 100x100, Tableau 5.3). La possibilité de choisir une valeur de la portion de la hauteur plastifiée (α_i) fixe a donc également été étudiée. Cette valeur serait ensuite implémentée dans les équations (2.21) et (5.3) qui servent à déterminer respectivement la contrainte σ_{Uti} et la déformation ε_{Uti} . Ce choix pourrait être une alternative pour déterminer l'endroit de localisation sur la courbe de flexion s'il s'avère que α_i est constant à l'endroit de localisation en flexion pour tous les BFUP.

Une étude a été réalisée pour calibrer de façon préliminaire l'adaptation 2. L'objectif est de déterminer un ratio de force de localisation ($r_{loc} = F_{loc}/F_{max}$) et une portion de la hauteur qui est plastifiée (α_i) communs aux quatre BFUP utilisés pour la calibration (BFUP3 et BFUP KING 2, 3 et 4%). Lors de cette étude, plusieurs valeurs de α_i ont été étudiées afin de voir quelle valeur permet de mieux représenter la déformation ultime obtenue expérimentalement sur les os de traction directe pour chaque BFUP. La Figure 5.8 présente les résultats de cette étude pour le BFUP3 et les BFUP KING 2 à 4%. Sur chaque graphique, la courbe rouge représente la moyenne en traction directe et la dispersion en contrainte et en déformation à l'ultime. Les courbes bleue, verte, jaune et grise représentent les résultats de l'analyse inverse pour différents choix de α_i . Par exemple, la courbe verte sur la Figure 5.8a nommée BFUP3-D_α = 0.60 représente le résultat d'analyse inverse de l'adaptation 2 appliquée sur la courbe de flexion moyenne des dallettes D en BFUP3 pour une hauteur plastifiée égale à 60% de la hauteur totale h_m (soit $\alpha_i = 0.6$). La courbe noire sur les différents graphiques de la Figure 5.8 représente la courbe selon l'adaptation 2 qui permet d'obtenir

une déformation ultime identique à celle donnée par les os de traction directe. La hauteur plastique associée à ces courbes noires est identifiée par le paramètre $\alpha_{\varepsilon_{tu} \text{ exacte}}$, et elle procure la déformation ε_{Uii} égale à celle de l'essai de traction.

La Figure 5.8 montre qu'une faible variation de α_i a un impact important sur la déformation ultime déterminée avec l'adaptation 2 de la méthode SIA. En effet, une augmentation de 5% de la hauteur plastifiée peut augmenter la déformation ultime de 1800 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 2600 $\mu\text{m}/\text{m}$ par exemple (courbes verte et jaune de la Figure 5.8b). De plus, l'impact de la variation de α_i sur la déformation ultime est plus grand si α_i est plus élevée. Autrement dit, la variation de α_i entre 65% et 70% à un plus gros impact sur la déformation ultime qu'une variation de α_i entre 55% et 60 %. La contrainte ultime augmente également lorsque la hauteur plastifiée augmente. Cette augmentation de contraintes est plus importante lorsque le gain de contraintes sur le plateau d'écrouissement en traction est plus grand. Par exemple, la variation des contraintes ultimes pour les différentes valeurs de α_i du BFUP KING 2% (Figure 5.8b) est moins grande que celle obtenue sur le BFUP KING 4% (Figure 5.8d).

Les courbes noires sur la Figure 5.8, pour lesquelles α_i a été calibré pour obtenir une déformation ultime très similaire à celle obtenue expérimentalement sur les os en traction directe, ont pour objectif de voir si une valeur constante de $\alpha_{\varepsilon_{tu} \text{ exacte}}$ pourrait être utilisée pour les quatre BFUP, et donc déterminer si ce paramètre est indépendant du type de BFUP, entre autres du dosage en fibres. La force associée à la hauteur tendue correspondante ($\alpha_{\varepsilon_{tu} \text{ exacte}} h_m$) peut également être obtenue pour déterminer le ratio de localisation associé ($F_{\varepsilon_{tu} \text{ exacte}}/F_{\max}$). Le Tableau 5.4 présente les résultats obtenus pour les quatre BFUP étudiés ainsi que la valeur de la contrainte ultime (f_u) et de la déformation ultime (ε_{tu}) donnés par les os de traction directe pour ces matériaux.

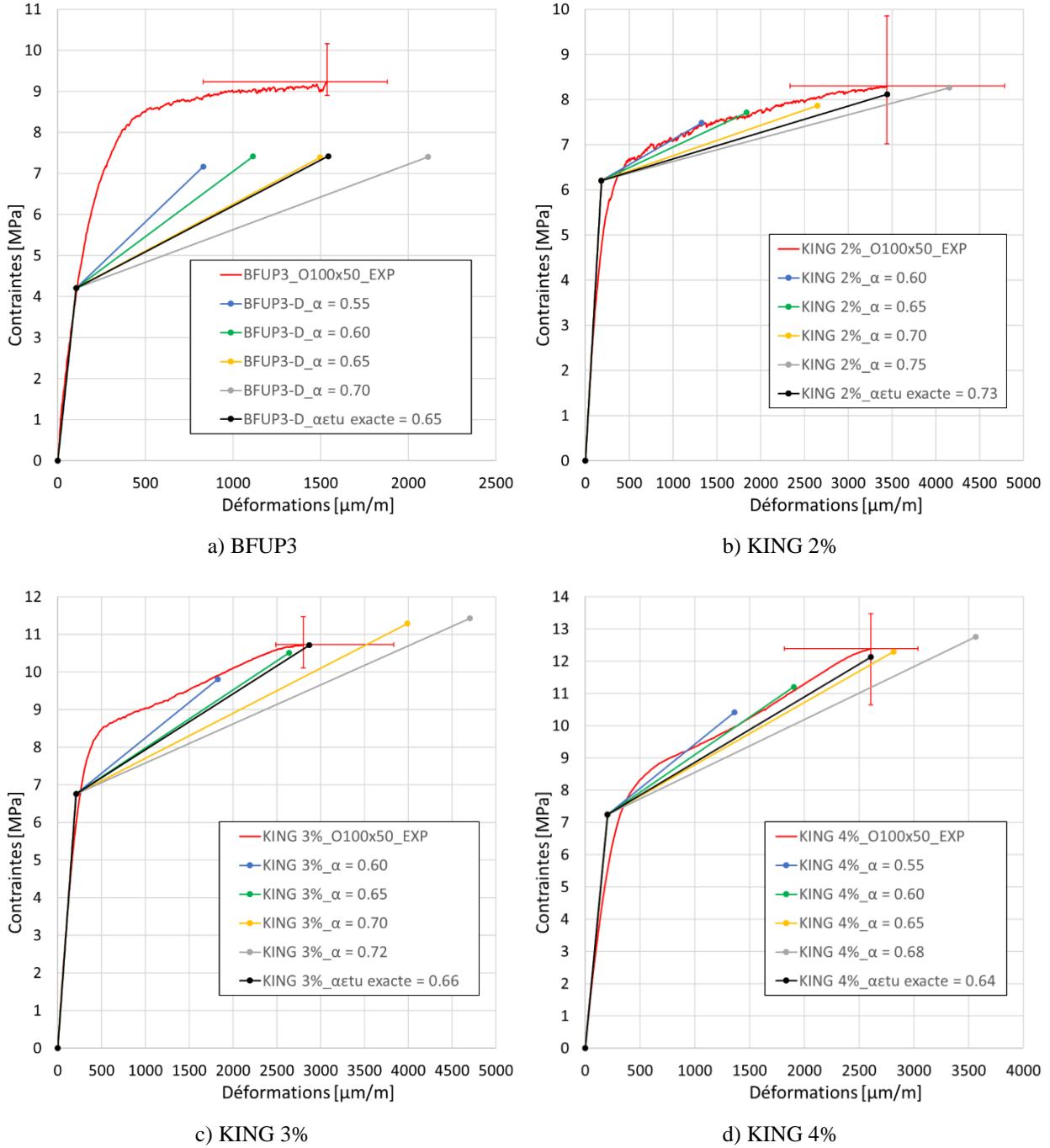


Figure 5.8 Impact du choix d'une valeur de α_i comme critère de localisation pour l'adaptation 2 de la méthode SIA

Tableau 5.4 Valeurs de α_i et r_{loc} idéales pour retrouver la déformation ultime en traction directe obtenue expérimentalement

Matériau	Essais de traction directe sur os		Paramètres adaptation 2	
	f_{tu} (MPa)	ϵ_{tu} ($\mu\text{m/m}$)	$\alpha_{etu \text{ exacte}}$ (%)	$F_{etu \text{ exacte}} / F_{max}$ (%)
BFUP3 - D	9.10	1550	65%	95%
KING 2%	8.30	3450	73%	95%
KING 3%	10.80	2800	66%	88%
KING 4%	12.30	2600	64%	91%

Le Tableau 5.4 montre que le pourcentage de hauteur plastifiée idéale ($\alpha_{etu \text{ exacte}}$) pour représenter la déformation ultime des os de traction varie beaucoup selon le dosage en fibres. Ce pourcentage tend à augmenter lorsque la déformation ultime du BFUP (ϵ_{tu}) augmente, et donc que le dosage en fibre diminue. Cette hauteur plastifiée $\alpha_{etu \text{ exacte}}$ passe de 64% (KING 4%) à 73% (KING 2%), ce qui représente une différence de 9% entre les deux valeurs. Cette différence a un impact majeur sur les résultats ultimes en traction donnés par l'adaptation 2, tel que présenté à la Figure 5.8. Cela veut donc dire qu'il semble impossible de choisir une valeur de α_i fixe pour déterminer le comportement en traction ultime d'un BFUP sans prendre en considération son dosage en fibre. Malgré le comportement en traction du BFUP3 qui est très différent de ceux des BFUP KING, il est intéressant de remarquer que la hauteur plastifiée idéale du BFUP3 (65%) est très similaire à celle donnée par le KING 3% (66%). La valeur de la hauteur plastifiée idéale semble donc liée au dosage en fibres. L'adaptation 2 permet également de déterminer une déformation ultime plus adéquate pour le BFUP3 que celle obtenue avec l'adaptation 1 (Section 5.2.1).

Puisque le choix d'une hauteur plastifiée fixe pour différent BFUP semble difficile, le choix d'un ratio de localisation en termes de force ($F_{etu \text{ exacte}}/F_{max}$) est considéré. Ce ratio varie entre 88% et 95% pour les quatre BFUP (Tableau 5.4). Le ratio ne semble pas lié au dosage en fibres, puisque la tendance observée pour α_i n'est pas vraie pour le ratio de localisation. La moyenne des différents ratios obtenus est de 92%. Le choix de cette valeur fixe pour les quatre BFUP a un impact beaucoup moins grand sur la déformation ultime donnée par l'adaptation 2, que de considérer un pourcentage fixe ($\alpha_{etu \text{ exacte moyen}} = 67\%$) de hauteur plastifiée. Les ratios de localisation en terme de force ($F_{etu \text{ exacte}}/F_{max}$) du Tableau 5.4 (92% en moyenne) sont plus faibles que ceux obtenus lors des analyses par éléments finis sur les mêmes matériaux (96% en moyenne pour la même géométrie de spécimens, Tableau 5.3), mais restent cependant dans le même ordre de grandeur. Ainsi,

l'adaptation 2 de la méthode de calcul inverse de la SIA consiste à déterminer les coordonnées du point ultime de traction (ε_{Utu} et σ_{Utu}) avec un seul profil simplifié bilinéaire et à l'aide d'un critère de localisation, soit α_i ou r_{loc} . De façon préliminaire, le critère de localisation α_i est égal à 67% et r_{loc} est égal à 92%, mais ces valeurs doivent être validées.

La campagne expérimentale finale du projet de recherche (Chapitre 6) permettra de finaliser la calibration de ces deux critères de localisation (α_i et r_{loc}). Cette campagne permettra notamment de déterminer si la hauteur plastifiée idéale est réellement dépendante du dosage en fibres d'un BFUP et de déterminer si l'utilisation d'un ratio de localisation (r_{loc}) est un meilleur choix pour obtenir le comportement ultime selon l'adaptation 2 de la méthode SIA que l'utilisation d'un pourcentage fixe (α_i) de hauteur plastifiée. Une fois le meilleur critère de localisation validé, la campagne expérimentale permettra également de fixer sa valeur constante optimale.

5.3 Synthèse

Le Chapitre 5 porte sur la calibration et l'adaptation de la méthode SIA au contexte normatif canadien. Des études ont été réalisées avec le modèle éléments finis des essais de flexion 4 points décrit au Chapitre 3 pour adapter certains paramètres de la méthode SIA aux types d'essais et aux BFUP utilisés pour les ouvrages en génie civil. Ceci a permis le développement de deux adaptations possibles de la SIA. Les conclusions de ce chapitre sont les suivantes :

- L'utilisation de prismes carrés 100x100 (élancement faible) lors des essais de flexion engendre des contraintes de traction près des appuis beaucoup plus grande qu'avec l'utilisation de dallettes minces 150x50 (élancement élevé). L'utilisation de spécimens avec un élancement élevé (de type dallettes) permet de diminuer le risque de rupture en cisaillement non souhaitable lors des essais de flexion 4 points.
- La hauteur tendue au pic de résistance en flexion pour les dallettes rectangulaires avec un élancement (L/h) de 6 est égale à 80% de la hauteur totale du spécimen (h_m), tandis que la hauteur tendue est égale à 77% de h_m pour les prismes carrés avec un élancement de 3. Ces valeurs sont différentes de ce qui est originalement indiqué par la méthode SIA (82% de h_m), car celle-ci a été calibrée pour des dallettes avec un élancement (L/h) de 14. Cette différence de hauteur tendue a été prise en compte lors l'adaptation de la méthode SIA.

- L'utilisation des profils de contraintes simplifiés par la SIA (profil bilinéaire et profil constant) engendre une surestimation des contraintes, en particulier près de l'axe neutre dans les spécimens de flexion, par rapport à ce qui est observé sur les modèles éléments finis. Cette surestimation de contraintes est plus grande pour le profil simplifié constant nécessaire au calcul de la contrainte ultime (f_{Ult}) par la méthode SIA, ce qui fait que l'utilisation du profil bilinéaire est à privilégier. Cette surestimation des contraintes par les profils simplifiés a été prise en compte lors de l'adaptation de la méthode SIA au contexte normatif.
- La méthode SIA surestime un peu les déformations ultimes en traction pour trois BFUP (KING 2 à 4%), alors que ce n'était pas le cas pour le BFUP3 caractérisé au Chapitre 4. L'adaptation de la méthode SIA a permis de réduire légèrement les déformations ultimes de traction données par la méthode originale.
- La première adaptation (Adaptation 1) a pour objectif d'augmenter la contrainte ultime et de diminuer la déformation ultime obtenues avec l'analyse inverse. La contrainte ultime est modifiée en réduisant la hauteur tendue au pic pour que celle-ci concorde avec les résultats obtenus pour les géométries de spécimens et les BFUP utilisés dans les ouvrages en génie civil (80% pour les dallettes 100x50 et 77% pour les prismes 100x100). La déformation ultime est diminuée en intégrant un facteur réducteur C qui est appliqué aux équations des déformations données par la SIA. Ce facteur est égal à 0.67 selon la calibration initiale de l'adaptation 1 et réduit donc de 33% la déformation d'écrouissement du BFUP.
- La deuxième adaptation (Adaptation 2) a pour objectif de supprimer l'utilisation contradictoire de deux profils de contraintes simplifiés différents par la SIA et d'utiliser l'endroit de localisation de la fissuration durant l'essai de flexion pour obtenir le comportement ultime en traction du matériau. La déformation et la contrainte ultimes sont maintenant déterminées toutes deux par les équations issues du profil de contrainte bilinéaire, puisque celui-ci surestime moins les contraintes que le profil constant. Enfin, un nouveau critère de localisation de la fissuration sur la courbe de flexion est nécessaire pour l'utilisation de l'Adaptation 2. L'utilisation d'une hauteur plastifiée constante (α_i) ou d'un ratio de force de localisation ($\%F_{loc} = F_{loc}/F_{max}$) est possible. Les valeurs initiales pour ces deux critères sont préliminairement calibrées à $\alpha_i = 67\%$ et $\%F_{loc} = 92\%$ selon les analyses

du Chapitre 5. Ces valeurs devront être confirmées avec la campagne expérimentale finale du Chapitre 6.

CHAPITRE 6 CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE FINALE - PERFORMANCE EN FLEXION DE BFUP AVEC DIFFÉRENTS DOSAGES EN FIBRES POUR VALIDER LES ADAPTIONS DE LA MÉTHODE SIA

Le Chapitre 6 et la campagne expérimentale associée ont pour objectif de calibrer les deux adaptations de la méthode d'analyse inverse SIA proposées au Chapitre 5. Les adaptations de la méthode d'analyse inverse doivent être performantes pour plusieurs types de BFUP. La calibration est donc réalisée sur deux BFUP avec des dosages en fibres différents ainsi que sur plusieurs géométries de spécimens en traction et en flexion.

Le Chapitre 6 présente d'abord le comportement mécanique en traction et en flexion de deux BFUP ainsi que la comparaison et la normalisation de ces résultats d'essais en fonction de l'orientation des fibres dans chaque spécimen. Ensuite, l'évolution de la fissuration dans les essais de traction et de flexion est analysée pour définir certains paramètres de l'analyse inverse. Enfin, une analyse de la performance des méthodes adaptées 1 et 2 de l'analyse inverse SIA est réalisée sur les essais de flexion de la campagne expérimentale.

6.1 BFUP et spécimens à l'étude

La campagne expérimentale finale consistait à caractériser en traction et en flexion deux BFUP, nommés UP-F2 (2% vol. de fibres) et UP-F3 (3% vol. de fibres). Les propriétés générales de ces deux BFUP ont été présentées à la Section 3.1.1. Deux géométries de spécimens ont été utilisées pour la caractérisation en traction et en flexion pour chacun des deux BFUP. Des os avec une section réduite de 100 mm x 50 mm et des os avec une section réduite de 50 mm x 50 mm (Figure 3.3, Section 3.1.3) ont été utilisés pour les essais de traction, tandis que des dallettes de section 100 mm x 50 mm et des prismes de section 100 mm x 100 mm (Section 3.1.4) ont été utilisés pour les essais de flexion. Une portée (L) de 300 mm est utilisée pour tous les spécimens de flexion (dallettes et prisme). Le Tableau 6.1 présente le nombre de spécimens caractérisés pour chaque géométrie et pour chaque BFUP.

Tableau 6.1 Description des spécimens de la campagne expérimentale finale

Matériaux	Type d'essai	Type de spécimen	Nombre de spécimen
UP-F2	Traction directe	O100x50	4
		O50x50	4
	Flexion 4 points	100x50	5
		100x100	5
UP-F3	Traction directe	O100x50	2 normaux et 2 renforcés
		O50x50	2 normaux et 2 renforcés
	Flexion 4 points	100x50	5
		100x100	5

Pour chaque BFUP, quatre os O100x50 et quatre os O50x50 ont été caractérisés, soit un total de huit os. Deux os sur quatre pour chaque géométrie en UP-F3 ont été renforcés par des treillis métalliques positionnés aux extrémités de la section réduite des os, à mi-épaisseur. Ce renforcement avait pour objectif de forcer la fissuration au centre de la section réduite des os, puisqu'elle survient fréquemment à l'une des extrémités de la section réduite tel qu'expliqué à la Section 3.1.3.1. La Figure 6.1 présente l'emplacement du treillis dans les os renforcés pour le matériau UP-F3.

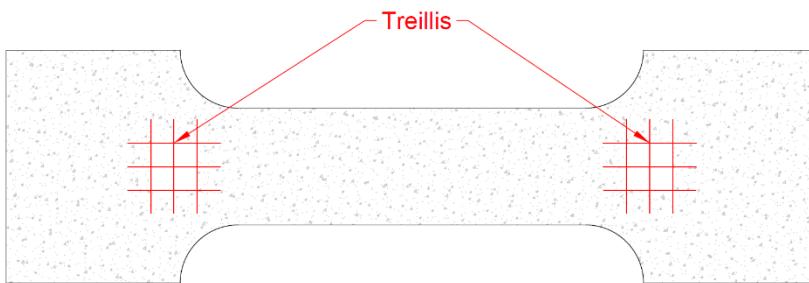


Figure 6.1 Emplacement du treillis pour les os renforcés en UP-F3

Cinq spécimens de flexion de chaque géométrie (100x50 et 100x100) ont été caractérisés pour chaque BFUP pour un total de 10 essais par type de BFUP. En plus de l'instrumentation habituelle sur les essais de traction et de flexion, le système de corrélation d'images a également été utilisé sur l'une des faces des spécimens pour tous les essais (Section 3.1.6).

6.2 Comportement mécanique d'un BFUP avec 2% de fibres

La présente section porte sur la caractérisation en traction et en flexion du BFUP UP-F2 pour les différentes géométries de spécimens présentées au Tableau 6.1.

6.2.1 Résultats des essais de traction du UP-F2

Les premiers os testés pour le BFUP UP-F2 sont les O50x50. Ceux-ci ont été testés 48 jours après leur fabrication. La fissuration s'est produite au centre de la section réduite 3 fois sur 4. La Figure 6.2 présente les résultats individuels obtenus sur chaque os O50x50 de UP-F2 ainsi que le comportement moyen, dans la phase pré-pic (Figure 6.2a) et post-pic (Figure 6.2b).

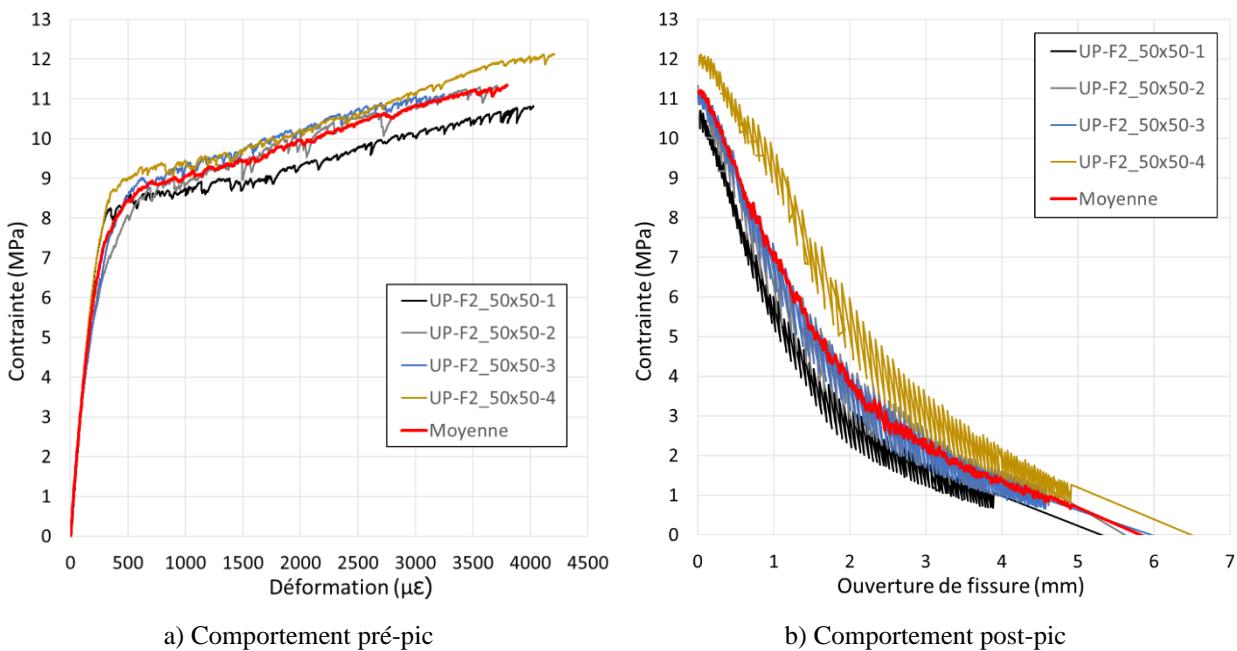


Figure 6.2 Comportement en traction directe des spécimens O50x50 de UP-F2

La Figure 6.2 montre que la dispersion au pic des résultats sur les spécimens O50x50 en UP-F2 est faible. La dispersion maximale en contrainte est de 1.3 MPa (10.8 à 12.1 MPa), tandis qu'elle est de 950 $\mu\text{m}/\text{m}$ (3 250 à 4 200 $\mu\text{m}/\text{m}$) pour les déformations à l'ultime. La contrainte ultime moyenne est de 11.4 MPa et la déformation ultime moyenne est de 3 800 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Le plateau d'écrouissage des os O50x50 est assez long. Ce plateau commence à une déformation d'environ 600 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ensuite, la microfissuration se développe sur une plage de déformations d'environ 3 200 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ce plateau d'écrouissage est également caractérisé par une augmentation de contrainte de 2.6 MPa (8.8 à 11.4 MPa). Cette augmentation est assez élevée considérant le faible dosage en fibre de ce matériau. Le comportement post-pic est assez similaire pour tous les spécimens. Le spécimen UP-F2_50x50-4 a une perte de capacité plus lente, mais ceci est dû à la résistance au pic plus grande pour ce spécimen.

Les os O100x50 ont été caractérisés le lendemain, soit avec une échéance de 49 jours. La fissuration s'est produite en changement de section pour les quatre os O100x50 de UP-F2. Les capteurs de déplacement couvrant la section réduite centrale de 300 mm de longueur (Section 3.1.3) n'ont donc pas pu être utilisés pour le traitement des résultats de ces essais et les capteurs couvrant une zone élargie de 400 mm de longueur (Section 3.1.3) ont alors été utilisés. La Figure 6.3 présente le comportement pré-pic (Figure 6.3a) et post-pic (Figure 6.3b) des quatre os O100x50 de UP-F2.

La dispersion des résultats au pic de traction pour les os O100x50 est plus petite que celle observée sur les os O50x50. La dispersion des contraintes ultime est de 0.5 MPa (9.9 à 10.4 MPa) et elle est de 700 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les déformations ultimes (2 500 à 3 200 $\mu\text{m}/\text{m}$). Le comportement moyen ultime de ces os, avec une contrainte moyenne de 10.1 MPa et une déformation moyenne de 2 950 $\mu\text{m}/\text{m}$, est légèrement moins performant que celui observé avec les os O50x50. Ceci pourrait être attribuable à une orientation de fibres légèrement moins favorable dans la section réduite plus large des os O100x50.

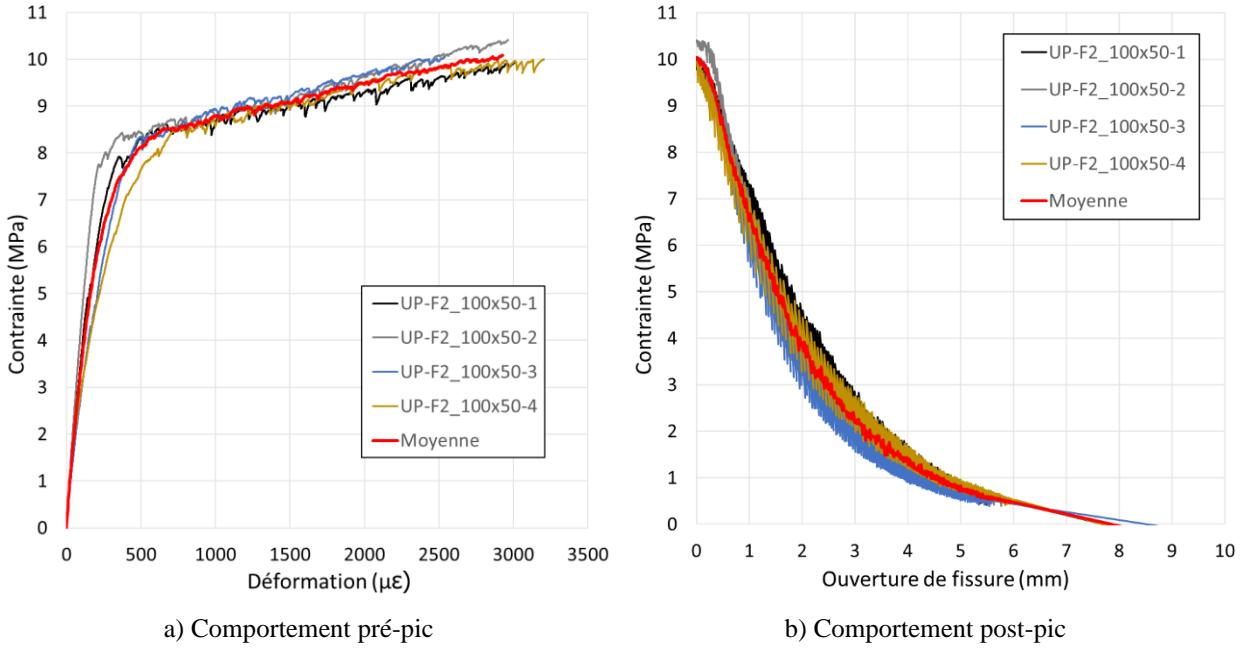


Figure 6.3 Comportement en traction directe des spécimens O100x50 de UP-F2

Le plateau d'écrouissage des os O100x50 est également moins long que celui observé sur les os O50x50. Les déformations moyennes permises durant cette phase sont de 2 350 $\mu\text{m}/\text{m}$ (600 à 2 950 $\mu\text{m}/\text{m}$) et le gain de contrainte est de 1.6 MPa (8.5 à 10.1 MPa) en moyenne. Le comportement post-pic est cependant très uniforme pour ces spécimens avec une perte de capacité après l'atteinte du pic de traction très semblable pour les deux types de spécimens d'os.

6.2.2 Résultats des essais de flexion du UP-F2

Les essais de flexion sur le UP-F2 ont été réalisés moins de 5 jours après les essais de traction (aux échéances de 51 et 52 jours pour les prismes 100x100 et les dallettes 100x50 respectivement). Cette petite différence de temps entre les essais de traction et de flexion est jugée négligeable sur la maturité du BFUP, celui-ci étant considéré mature (âge supérieur à 28 jours).

Les résultats des essais de flexion sont présentés aux Figure 6.4 et Figure 6.5. Pour les cinq dallettes 100x50 de UP-F2, la fissuration s'est toujours produite en zone de moment constant (entre les deux points d'application de la charge). La Figure 6.4 présente les courbes de flexion obtenues en contrainte-déplacement. La contrainte est ici calculée en considérant un comportement élastique du BFUP, comme c'est le cas pour les bétons conventionnels, afin de pouvoir comparer les résultats

indépendamment de la géométrie des spécimens. Le déplacement correspond à la flèche mesurée au centre longitudinal du spécimen.

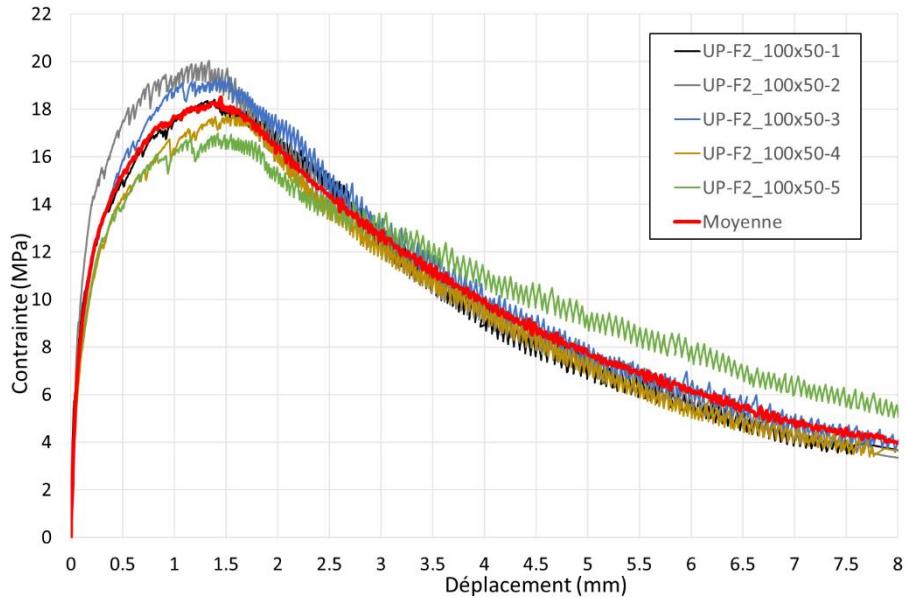


Figure 6.4 Comportement en flexion 4 points des spécimens 100x50 de UP-F2

La dispersion des contraintes au pic de flexion est plus grande que celle observée en traction. En effet, l'écart entre la contrainte maximale (20 MPa) et la contrainte minimale (17 MPa) au pic est de 3 MPa. La dispersion maximale de la flèche au pic de flexion est de 0.3 mm (1.3 à 1.6 mm). La courbe moyenne en rouge a une contrainte au pic de 18.5 MPa et une flèche au pic de 1.45 mm.

Le comportement élastique des courbes est très similaire. Cependant, la propagation des microfissures après la fin du comportement élastique est un peu différente entre chaque spécimen jusqu'à l'atteinte de la résistance maximale. C'est d'ailleurs ce qui explique la dispersion de la contrainte maximale des spécimens. C'est également dans cette phase de la courbe de flexion, soit la zone d'écrouissage en flexion, que le point de traction ultime des deux méthodes adaptées de calcul inverse est calculé. Il est donc primordial que le comportement des différentes courbes ne soit pas trop différent à cet endroit. Des petits sauts apparaissent également après l'atteinte du pic et chaque saut correspond à l'arrachement d'une fibre au droit de la fissure principale.

Pour les prismes 100x100 de UP-F2, la fissuration s'est produite 4 fois sur 5 dans la zone de moment constant. La fissure qui s'est produite à l'extérieur de la zone de moment constant était quand même assez près de cette même zone pour conserver malgré tout cet essai. La Figure 6.5 présente les résultats individuels obtenus ainsi que le comportement moyen calculé pour ces spécimens.

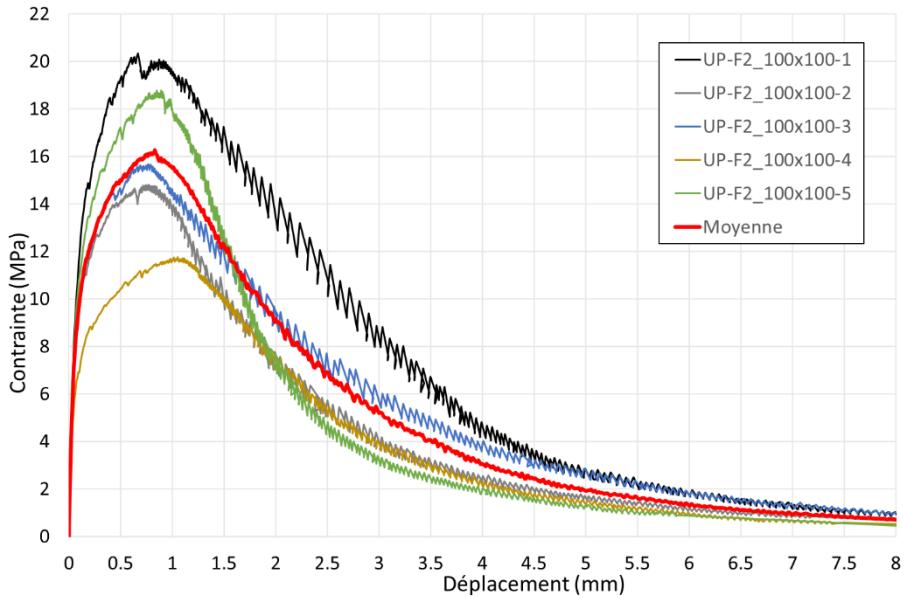


Figure 6.5 Comportement en flexion 4 points des spécimens 100x100 de UP-F2

La dispersion de la contrainte maximale observée à la Figure 6.5 est beaucoup plus grande que celle obtenue avec les dallettes 100x50 (Figure 6.4). La différence entre la contrainte au pic maximale (20.3 MPa) et minimale (11.8 MPa) est de 8.5 MPa, ce qui est presque trois fois plus grande que pour les dallettes 100x50. La dispersion de la flèche au pic est également un peu plus grande et est égale à 0.4 mm (0.7 à 1.1 mm). La contrainte (16.3 MPa) et la flèche (0.83 mm) moyennes au pic sont inférieures à ce qui a été observé avec les dallettes 100x50. Ceci pourrait être attribuable à une orientation de fibres légèrement moins favorable dans les prismes 100x100 que dans les dallettes 100x50.

La différence de comportement lors de la microfissuration du BFUP (entre la fin du domaine élastique et le pic de résistance en flexion) est très importante pour les prismes 100x100 de UP-F2. La microfissuration commence à une contrainte très faible pour un des spécimens (UP-

F2_100x100-4), tandis qu'elle se produit à une contrainte beaucoup plus grande pour un autre (UP-F2_100x100-1). Cette grande différence aura nécessairement un impact majeur sur les résultats de l'analyse inverse. L'apparition de sauts après l'atteinte du pic de flexion peut également être observée. Ces sauts sont légèrement plus grands que ceux observés pour les dallettes 100x50.

Globalement, la forte dispersion des résultats sur prismes 100x100 de même qu'une des ruptures hors de la zone centrale de moment constant semblent démontrer que les essais sur dallettes 100x50 sont préférables.

6.3 Comportement mécanique d'un BFUP avec 3% de fibres

La présente section porte sur la caractérisation en traction et en flexion du BFUP UP-F3 pour les différentes géométries de spécimens présentées au Tableau 6.1.

6.3.1 Résultats des essais de traction du UP-F3

Les essais traction sur les os O50x50 en UP-F3 ont été réalisés 71 jours après leur fabrication. Lors des essais, les quatre os ont fissuré dans la section réduite. La Figure 6.6 présente les résultats du comportement pré-pic (Figure 6.6a) et post-pic (Figure 6.6b) en traction directe obtenu avec les os O50x50 de UP-F3. Les spécimens UP-F3_50x50-2R et UP-F3_50x50-4R sont ceux où un renforcement a été ajouté dans le changement de section (Figure 6.1). Comme la fissuration s'est produite dans la section réduite pour ces deux os, l'apport du treillis est jugé négligeable sur le comportement en traction de ces spécimens. Ils sont donc utilisés pour calculer la moyenne en traction sur la Figure 6.6.

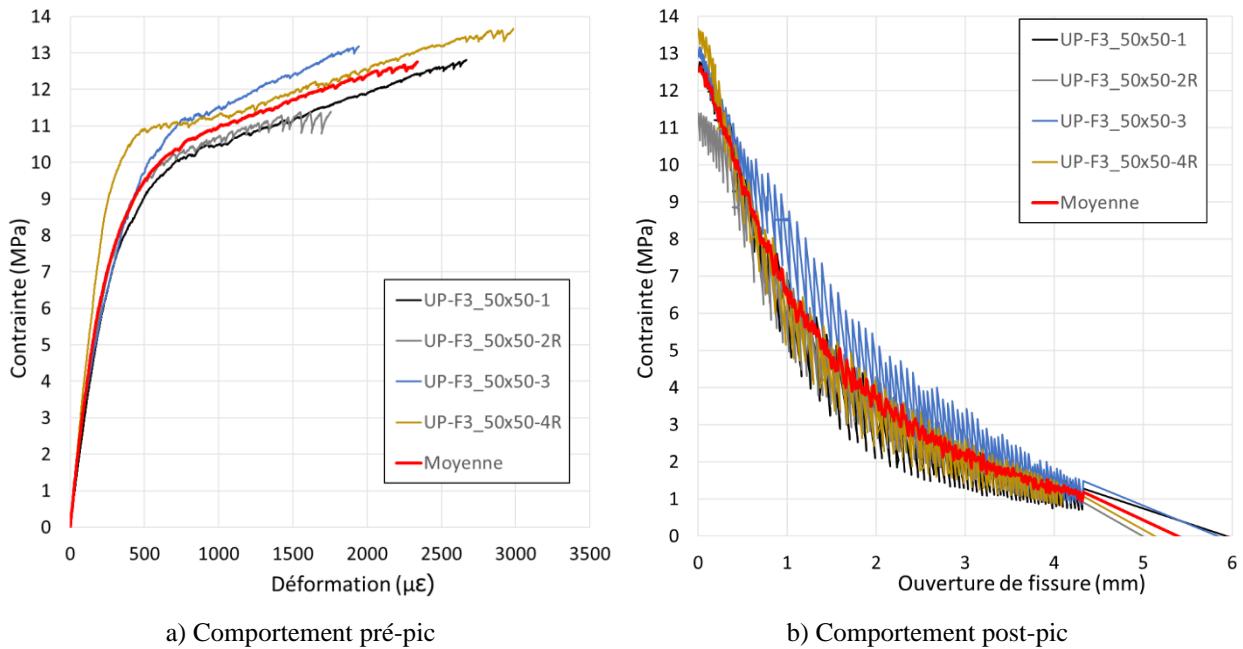


Figure 6.6 Comportement en traction directe des spécimens O50x50 de UP-F3

La dispersion des résultats au pic de traction est beaucoup plus grande sur la Figure 6.6 que ce qui a été observé sur les os O50x50 en UP-F2. La dispersion de la contrainte ultime est de 2.3 MPa (11.4 à 13.7 MPa) et elle est de 1 250 $\mu\text{m}/\text{m}$ (1 750 à 3 000 $\mu\text{m}/\text{m}$) pour les déformations ultimes. La contrainte ultime moyenne (12.8 MPa) est supérieure à ce qui a été obtenu pour les O50x50 en UP-F2, ce qui est attendu dû à la plus grande quantité de fibres utilisées dans le UP-F3. La déformation ultime moyenne est cependant plus petite (2 350 $\mu\text{m}/\text{m}$), ce qui est généralement observé avec une plus grande quantité de fibres.

Le plateau d'écrouissage (où se produit la microfissuration), est beaucoup moins long pour le UP-F3 que pour le UP-F2 avec les os O50x50. Il commence en moyenne lorsque la même déformation est atteinte (600 $\mu\text{m}/\text{m}$), mais se termine au pic avec une déformation beaucoup moins grande (2 350 $\mu\text{m}/\text{m}$). La longueur moyenne du plateau est donc fortement réduite (1 750 $\mu\text{m}/\text{m}$). Le gain de contrainte sur ce plateau est cependant similaire à celui observé sur les O50x50 en UP-F2 avec une augmentation de 2.7 MPa (10.1 à 12.8 MPa) en moyenne. Le comportement post-pic des spécimens est assez uniforme, mais les sauts observés sont beaucoup plus importants que ceux obtenus avec le UP-F2.

Pour les os O100x50 en UP-F3, la fissuration s'est produite dans la section réduite pour un spécimen sur 4. Ces os ont été testés la veille des os O50x50, ils ont donc une échéance de 70 jours. La Figure 6.7 présente les résultats obtenus du comportement en traction pré-pic (Figure 6.7a) et post-pic (Figure 6.7b) pour les os O100x50 en UP-F3.

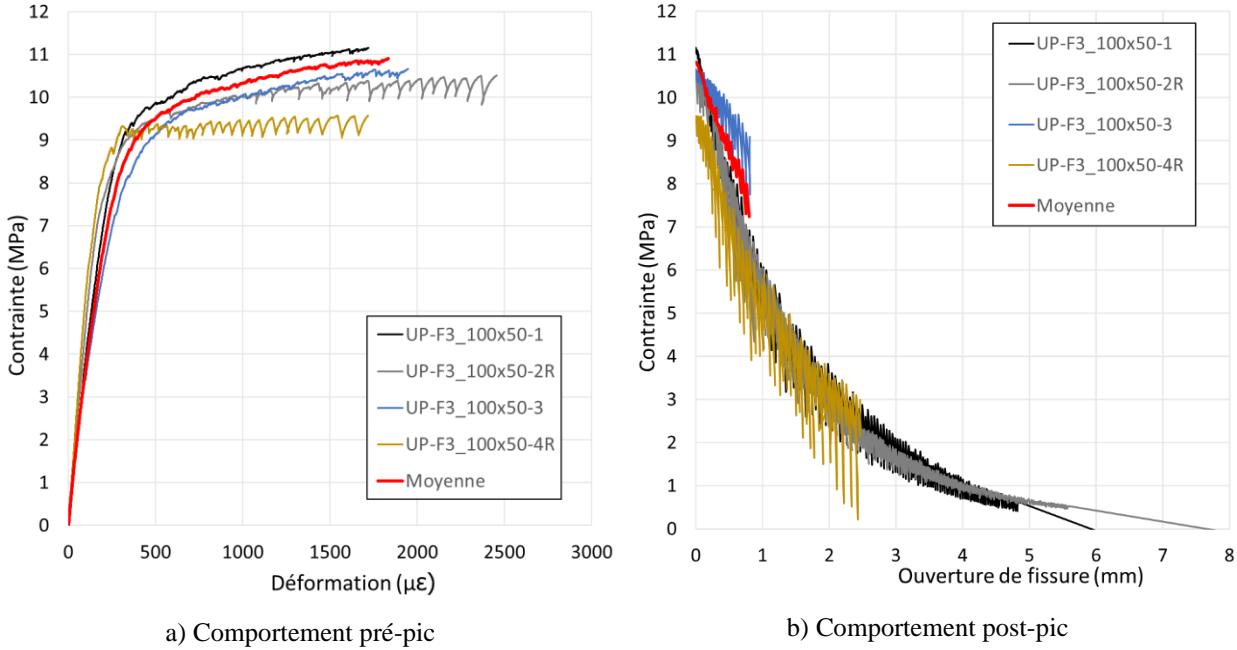


Figure 6.7 Comportement en traction directe des spécimens O100x50 de UP-F3

La Figure 6.7 présente l'impact du treillis sur le comportement en traction pré-pic des os O100x50. Des sauts de plus grande amplitude sont présents sur le plateau d'écrouissage des os renforcés (2R et 4R) et la pente de ce plateau est beaucoup plus faible que celle obtenue avec les deux autres spécimens (phénomène moins observable sur les spécimens O50x50). De plus, la fissuration pour les deux os renforcés (2R et 4R) s'est produite en changement de section. La pente du plateau d'écrouissage et la fissuration en changement de section des os renforcés (2R et 4R) font en sorte que ces os n'ont pas été considérés dans le calcul de la moyenne dans l'éventualité où le treillis métallique situé dans le changement de section aurait modifié les résultats. À noter également que les capteurs de déplacement qui couvre une longueur de 400 mm sur les os se sont décollés de la surface des spécimens pour les os 3 et 4R après le pic, ce qui explique que le comportement post-pic est arrêté plus tôt pour ces spécimens sur la Figure 6.7b. Le comportement post-pic moyen n'est

pas représentatif de ce qui est observé sur les spécimens individuels et ne sera pas analysé. L'arrêt prématuré de l'essai sur l'os UP-F3_100x50-3 qui vient perturber le calcul du comportement post-pic moyen, ce calcul est donc arrêté à la fin de l'essai sur cet os (Figure 6.7b).

La dispersion observée sur les spécimens sans renforts (1 et 3) est de 0.5 MPa pour les contraintes ultimes (10.7 à 11.2 MPa) et de 250 $\mu\text{m}/\text{m}$ (1 700 à 1 950 $\mu\text{m}/\text{m}$) pour les déformations ultimes. La contrainte moyenne ultime (10.9 MPa) et la déformation moyenne ultime (1 850 $\mu\text{m}/\text{m}$) sont plus faibles que ce qui a été observé pour les os O50x50 en UP-F3. À nouveau, ceci pourrait être attribuable à une orientation de fibres légèrement moins favorable dans la section réduite plus large des os O100x50.

Le plateau d'écrouissage observé pour les os O100x50 est le plus court de tous les os testés en traction. Ceci est attendu avec le dosage en fibres plus élevé à 3% et l'orientation moins favorable que dans les os O50x50. Le plateau d'écrouissage commence en moyenne à une déformation un peu plus faible (500 $\mu\text{m}/\text{m}$) et se termine à la déformation ultime (1 850 $\mu\text{m}/\text{m}$), ce qui donne une différence de 1 350 $\mu\text{m}/\text{m}$. Le gain de contrainte sur ce plateau est similaire à ce qui a été observé sur les os O100x50 en UP-F2 et est égal à 1.4 MPa (9.5 à 10.9 MPa).

Globalement, l'utilisation du treillis aux extrémités de la zone centrale des os n'a pas permis de favoriser la rupture dans la zone centrale. De plus, le treillis semble avoir perturbé légèrement le comportement en traction pré-pic des spécimens O100x50 puisque la rupture est survenue dans le changement de section des os. L'utilisation d'un tel treillis ne semble donc pas appropriée pour les BFUP.

6.3.2 Résultats des essais de flexion du UP-F3

Les essais de flexion sur les dallettes 100x50 et sur les prismes 100x100 ont été effectués à 73 et 72 jours respectivement, soit moins de 5 jours après les essais de traction sur UP-F3. Il n'y a donc pas de différence significative de maturité entre les essais de traction et de flexion. Pour les dallettes 100x50, la fissuration s'est produite 4 fois sur 5 en zone de moment constant. La fissure qui s'est produite à l'extérieur de la zone de moment constant était assez proche de cette zone pour conserver malgré tout cet essai. La Figure 6.8 présente les courbes individuelles de flexion pour les dallettes 100x50 ainsi que la courbe moyenne associée, en rouge.

La dispersion des courbes de flexion des dallettes 100x50 en UP-F3 (Figure 6.8) est plus grande que celle observée pour les dallettes 100x50 en UP-F2 (Figure 6.4). Tout d'abord, comme les prismes 100x100 en UP-F2 (Figure 6.5), les dallettes en UP-F3 présentent une dispersion dans la contrainte à laquelle débute la microfissuration. Ensuite, la phase d'écrouissage est plus ou moins longue et abrupte selon les spécimens. En conséquence, la dispersion pour la contrainte au pic est de 6.9 MPa (20.8 à 27.7 MPa) et celle pour la flèche au pic est de 0.5 mm (0.8 à 1.3 mm). La contrainte moyenne au pic (24.8 MPa) est plus grande que celle obtenue pour les dallettes en UP-F2, mais la flèche moyenne au pic (1.0 mm) est plus faible. Ces résultats sont cohérents avec les résultats de traction (Sections 6.2.1 et 6.3.1) qui montrent qu'une augmentation du pourcentage de fibres de 2 à 3% induit une augmentation de la résistance en traction mais réduit la capacité de déformation du BFUP. À noter, finalement, que les sauts en post-pic sont plus grands que ceux donnés par les dallettes en UP-F2 et similaires aux prismes en UP-F2. Cela pourrait s'expliquer par le fait qu'un plus grand dosage en fibres augmente la quantité d'énergie libérée lors de l'arrachement des fibres.

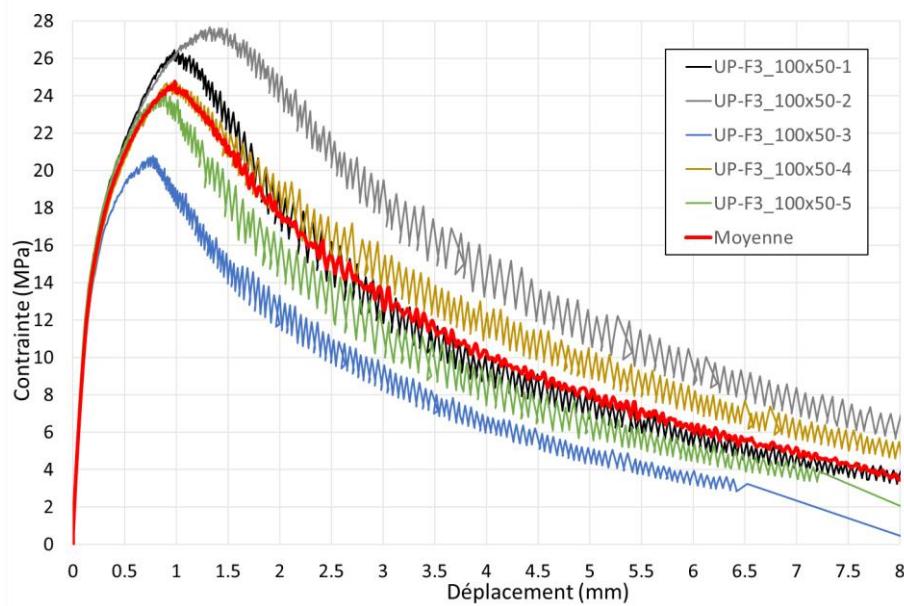


Figure 6.8 Comportement en flexion 4 points des dallettes 100x50 en UP-F3

La Figure 6.9 présente les courbes individuelles de flexion des prismes 100x100 en UP-F3 ainsi que la courbe moyenne associée, en rouge. Des problèmes sont survenus lors des essais sur les prismes 100x100 en UP-F3. Premièrement, seulement 3 prismes sur 5 ont eu une fissuration dans la zone de moment constant. Les fissures des 2 autres prismes n'étant cependant pas très loin de cette zone, ces essais ont quand même été conservés. Le deuxième problème a été le décollement de deux cornières sur lesquelles s'accotent les LVDT. Ces décollements ont eu lieu après l'atteinte du pic de flexion mais ont entraîné l'arrêt prématuré des essais concernés (UP-F3_100x100-1 et 4). La courbe moyenne initialement déterminée à partir des 5 spécimens a alors été obtenue à partir des spécimens restants après le décollement des cornières, ce qui induit des sauts sur la courbe moyenne. Ainsi, la courbe moyenne n'est pas représentative lorsque la UP-F3_100x100-4 se termine, un saut est observé dans la courbe moyenne de la Figure 6.9 lorsque la courbe de UP-F3_100x100-4 se termine étant donné que la courbe UP-F3_100x100-4 est beaucoup plus basse que les courbes UP-F3_100x100-1, 2 et 5. Ce saut n'a pas d'importance pour le calcul inverse puisque celui-ci est réalisé sur les courbes individuelles des spécimens et non sur la courbe moyenne. De plus seule la partie pré-pic de la courbe est considérée pour le calcul inverse selon la SIA.

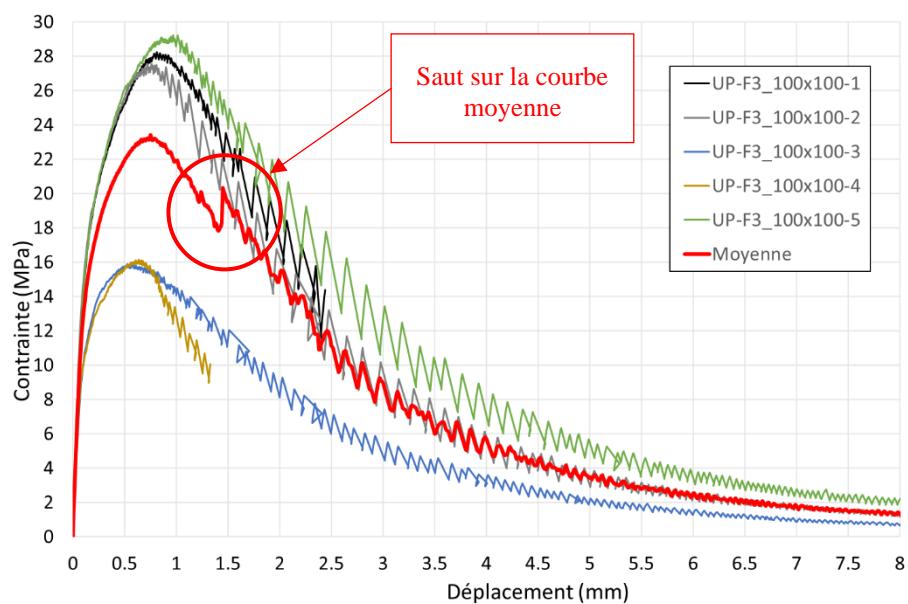


Figure 6.9 Comportement en flexion 4 points des prismes 100x100 en UP-F3

La dispersion de la contrainte maximale des prismes 100x100 en UP-F3 est très grande (Figure 6.9), plus que dans le cas des dallettes du même BFUP. La dispersion de la contrainte maximale s'explique par la différence de comportement au début de la phase d'écrouissage en flexion, et c'est également ce qui avait été observé pour les prismes en UP-F2 à la Section 6.2.2 (Figure 6.8). La différence entre la contrainte maximale (29.2 MPa) et minimale (15.9 MPa) au pic est de 13.3 MPa. Cet écart est environ 1.5 fois plus grand que celui observé pour les prismes en UP-F2, pour lesquels la dispersion était déjà très grande. La dispersion de la flèche au pic est cependant similaire et égale à 0.4 mm (0.6 à 1.0 mm). La contrainte moyenne au pic (23.4 MPa) est plus grande que pour les prismes en UP-F2 et la flèche moyenne au pic (0.75 mm) est plus faible, ce qui est cohérent à ce qui a été observé en comparant les dallettes 100x50 en UP-F2 et en UP-F3. Cela s'explique avec l'augmentation du dosage en fibres.

Finalement, les sauts après le pic de flexion sont de plus grande amplitude que ceux observés précédemment pour tous les spécimens de flexion. Cela veut dire que l'arrachement des fibres de la matrice cimentaire des spécimens a généré une plus grande perte d'énergie, ce qui peut expliquer le décollement de deux cornières sur les prismes 1 et 4 de la Figure 6.9. En conclusion, il semble que plus on augmente la section des spécimens et plus le dosage en fibres du matériau augmente, plus les sauts observés en post-pic en flexion sont importants. C'est donc dire qu'il y a un plus grand relâchement d'énergie durant le processus de fissuration.

6.4 Comparaison des résultats et normalisation de résultats de flexion selon la densité et l'orientation des fibres

6.4.1 Propriétés moyennes

Les courbes moyennes de traction et de flexion présentées aux Sections 6.2 et 6.3 pour les BFUP UP-F2 et UP-F3 sont regroupées sur la Figure 6.10. Seul le comportement pré-pic en traction est présenté (Figure 6.10a) puisque la méthode SIA et les deux adaptations développées donnent seulement les résultats pré-pic en traction. Pour les courbes de flexion (Figure 6.10b), un zoom a été fait sur le début des courbes (jusqu'à une flèche de 4 mm) puisque la portion de courbe considérée dans l'analyse inverse sélectionnée (SIA) est celle avant le pic de flexion. Les courbes en rouge sur la Figure 6.10 correspondent au BFUP UP-F3 et celles en bleue le UP-F2. Les courbes pleines sur cette même figure sont pour les spécimens de plus petite section (os 50x50 pour la

traction et dallettes 100x50 pour la flexion) et les courbes pointillées représentent les spécimens de plus grande section (os 100x50 en traction et prismes 100x100 en flexion). Les barres d'erreurs sur ces graphiques représentent la dispersion aux pics de traction et de flexion.

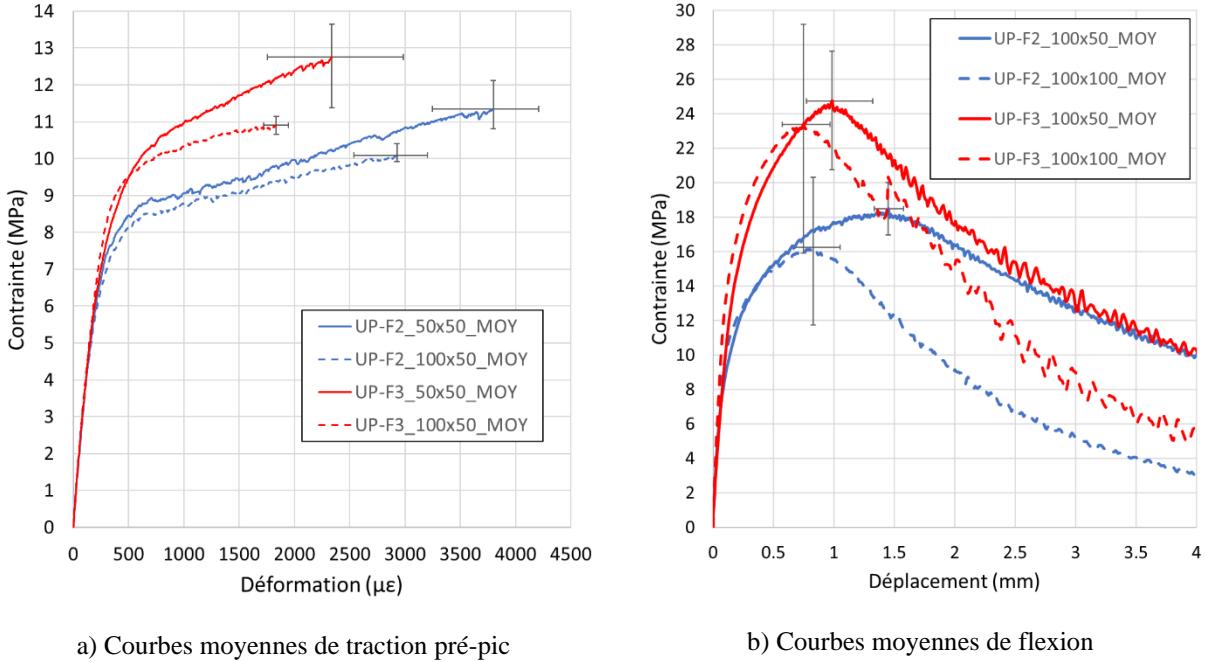


Figure 6.10 Comparaison des courbes moyennes de traction et de flexion de la campagne expérimentale finale

La résistance et la déformabilité des os 50x50 en traction est supérieure à ce qui est observé sur les os 100x50 pour les deux BFUP (Figure 6.10a). Ceci pourrait être expliqué par une orientation des fibres plus favorable dans la section centrale plus petite des os 50x50. Il est également important de rappeler que 7 os 50x50 sur 8 ont fissurés dans la zone centrale de section réduite, tandis que seul 1 os 100x50 sur 8 a fissuré dans cette zone, les autres spécimens ayant fissuré dans la zone de changement de section de l'os. Les longs capteurs de déplacement (LVDT) de 400 mm (Section 3.1.3.2) ont donc été utilisés plus souvent pour les os 100x50 que pour les os 50x50, ce qui pourrait également expliquer en partie la différence des déformations ultimes pour ces deux géométries en traction.

Les prismes 100x100 de flexion sont plus rigides que les dallettes 100x50 pour les deux BFUP et la performance de ces spécimens plus trapus est moins bonne. Ils présentent une contrainte

maximale et une flèche au pic plus faibles que les dallettes du même BFUP (Figure 6.10b). Il est donc possible de dire que les spécimens de traction et de flexion plus minces (courbes pleines) sont plus résistants et se déforment plus que les spécimens plus larges et trapus pour les deux BFUP de la campagne expérimentale. La dispersion des contraintes au pic des prismes 100x100 est également beaucoup plus élevée que celle des dallettes 100x50 pour les deux BFUP. Les barres d'erreurs des prismes en UP-F3 croisent même celles des prismes en UP-F2, ce qui veut dire que le spécimen le plus résistant en UP-F2 est plus performant que le moins bon en UP-F3. Ce constat, combiné à la faible performance des spécimens trapus mentionnée précédemment, pourrait être mieux compris et expliqué par une analyse de l'orientation des fibres dans les spécimens. L'effet de paroi est moins important pour les plus gros spécimens (Section 2.2.4.2) et l'orientation des fibres peut donc être moins bonne. Une moins bonne orientation des fibres diminue la résistance des spécimens (Section 2.2.6), ce qui pourrait être la cause de la plus grande dispersion et de la moins bonne résistance des prismes 100x100 pour les deux matériaux.

6.4.2 Orientation des fibres pour les différentes sections de spécimens

Des essais ont été effectués pour déterminer la densité et l'orientation des fibres sur certains spécimens de la campagne expérimentale finale en suivant la méthodologie décrite à la section 3.1.5. Ces analyses avaient pour objectif de préciser la comparaison des résultats de traction et de flexion réalisée à la Figure 6.10. Les mesures de densité et d'orientation des fibres ont été effectuées sur un spécimen dont le comportement était proche du comportement moyen, pour chaque géométrie de spécimen et pour chaque BFUP étudié (UP-F2 et UP-F3), pour un total de 8 spécimens. Il est donc considéré que l'orientation et la densité des fibres mesurées sur le spécimen près de la moyenne sont représentatives du comportement mécanique donné par les courbes moyennes de la Figure 6.10. Pour ces 8 spécimens, une coupe a été effectuée près de la zone fissurée. Cette coupe a été préparée et numérisée pour pouvoir détecter les fibres ainsi que leur orientation par rapport au plan de coupe (Section 3.1.5).

En plus des 8 coupes mentionnées ci-dessus, l'orientation des fibres a également été étudiée à d'autres endroits spécifiques pour pousser un peu plus loin l'analyse. Sur les os 100x50 de traction de UP-F2, deux coupes ont été réalisées dans le changement de section pour comparer l'orientation des fibres à cet endroit avec celle de la section réduite près de la fissure. Pour les prismes 100x100 de UP-F2 et UP-F3, une mesure additionnelle d'orientation des fibres a été effectuée sur le

spécimen qui a obtenu la résistance en flexion la plus faible. L'objectif était alors de vérifier si l'orientation des fibres permet d'expliquer la grande variabilité des résultats de flexion des prismes 100x100. Ainsi, au total, 12 mesures de densité et d'orientation des fibres ont été effectuées et les résultats sont compilés au Tableau 6.2. Le type de spécimen associé à chaque mesure est identifié à la troisième colonne du Tableau 6.2 avec une indication de l'endroit de la mesure, soit « CS » pour indiquer le changement de section des os de traction et « F » pour indiquer qu'il s'agit d'une mesure normale réalisée près de la zone fissurée selon la méthodologie présentée à la Section 3.1.5.

Tableau 6.2 Orientations et densités des fibres pour les différentes géométries de spécimens en traction et en flexion des matériaux UP-F2 et UP-F3

Matériau	Type d'essai	Spécimen (*)	Orientation Minimum (degrés)	Orientation Maximum (degrés)	Orientation Moyenne (degrés)	Orientation Écart-type (degrés)	Densité (fibres/mm ²)
UP-F2	Traction	50x50-2-CS	11.94	84.93	40.15	11.94	0.39
		50x50-2-F	11.89	75.45	38.78	10.38	0.47
		100x50-1-CS	13.92	87.70	40.06	11.47	0.42
	Flexion	100x50-1-F	14.61	83.43	46.52	11.18	0.46
		100x50-1-F	5.32	86.65	43.79	13.90	0.33
		100x100-3-F	8.64	87.93	46.60	14.92	0.27
UP-F3	Traction	100x100-4-F	6.46	87.26	49.63	14.69	0.24
		50x50-1-F	12.68	82.49	41.24	13.07	0.73
		100x50-1-F	10.60	84.92	38.37	11.25	0.66
	Flexion	100x50-4-F	8.72	85.71	38.08	11.30	0.62
		100x100-2-F	8.61	87.57	40.95	12.53	0.60
		100x100-3-F	7.24	86.69	41.40	12.75	0.59

(*) Indice « CS » signifie coupe dans le Changement de Section, Indice « F » signifie coupe près de la Fissure

La comparaison de la densité et de l'orientation des fibres au changement de section (CS) versus à la section réduite fissurée (F) des os en UP-F2 montre une différence entre les os 50x50 et 100x50. L'os 50x50 analysé a une meilleure orientation moyenne (angle moyen plus petit) et une densité plus élevée des fibres dans la section réduite fissurée (F) que dans le changement de section (CS). Pour l'os 100x50, l'orientation des fibres moyenne est moins bonne dans la section réduite fissurée (F) que dans le changement de section (CS). La densité dans la section réduite fissurée est cependant supérieure. La différence d'orientation des fibres moyenne est beaucoup plus grande entre le changement de section et la section réduite fissurée pour l'os 100x50 (6.46 degrés) que

pour l'os 50x50 (1.37 degrés), ce qui indique une orientation moyenne des fibres plus uniforme dans la longueur de l'os 50x50 que pour l'os 100x50.

La comparaison de l'orientation et de la densité des fibres près de la zone fissurée (F) pour les os en UP-F2 et UP-F3 permet d'expliquer la différence des résultats de traction de la Figure 6.10. En effet, pour le UP-F2, l'orientation des fibres moyenne est beaucoup moins bonne pour les os 100x50 que pour les os 50x50 (+7.74 degrés), tandis que la densité des fibres est semblable (-0.01 fibres/mm²). Cela permet donc d'expliquer, au moins partiellement, le meilleur comportement des os 100x50 en UP-F2. Pour UP-F3, l'orientation des fibres est légèrement plus favorable pour les os 100x50 (-2.87 degrés), mais la densité est beaucoup plus faible que pour les os 50x50 (-0.07 fibres/mm²). La plus faible densité de fibres peut donc expliquer, au moins partiellement, le comportement moyen plus faible des os 100x50 en UP-F3. Ainsi, l'effet combiné de l'orientation et de la densité des fibres à l'endroit de fissuration dans les os peut expliquer la sous performance des os 100x50 par rapport aux os 50x50 pour les deux BFUP étudiés.

Les valeurs d'orientation et de densité des fibres en flexion du Tableau 6.2 sont également très révélatrices pour mieux comprendre le comportement des courbes de flexion présentées à la Figure 6.10. L'orientation moyenne est moins bonne et la densité des fibres est plus faible pour les prismes 100x100 que pour les dallettes 100x50 pour les deux BFUP. Les dallettes 100x50 ont donc plus de fibres, et mieux orientées, près de la zone fissurée, ce qui explique leur meilleure performance. Pour mieux comprendre la différence d'orientation et de densité de fibres entre les prismes et les dallettes, une analyse spatiale des fibres sera présentée un peu plus tard à la Figure 6.11.

Puisque l'analyse inverse consiste à déterminer le comportement en traction à partir du comportement en flexion, il est important de calibrer la méthode d'analyse inverse avec des spécimens de traction et de flexion présentant une orientation moyenne et une densité des fibres similaires. Dans cette étude, l'orientation moyenne des fibres des os de traction 100x50 est très semblable à celle donnée par les dallettes 100x50 pour les deux BFUP (Tableau 6.2). Cependant, l'orientation des fibres dans les prismes 100x100 est plus grande et s'éloigne de l'orientation observée dans les spécimens de traction. Pour la densité des fibres, les spécimens de flexion ont en général une densité plus faible que les spécimens de traction. Les dallettes ont une densité de fibres plus élevée que les prismes et ont donc une densité plus proche de celles mesurées sur les spécimens de traction, en particulier les os 100x50. Les os 100x50 et les dallettes 100x50 semblent donc être

les géométries les plus compatibles pour obtenir une orientation et une densité des fibres similaires en traction et en flexion. Il semble donc intéressant que la section réduite des os soit identique ou très similaire à celle des spécimens de flexion et que la méthode de mise en place soit similaire entre ces spécimens pour s'assurer d'avoir une orientation et une densité des fibres similaires entre les spécimens de traction et ceux en flexion.

Tel que mentionné précédemment, il est également intéressant d'analyser la répartition spatiale des fibres sur la tranche utilisée pour l'analyse de l'orientation et de densité des fibres des prismes et des dallettes, afin de mieux comprendre ce qui induit les différences d'orientation et de densité entre les spécimens présentés au Tableau 6.2. Ce type d'analyse a été réalisée principalement sur les spécimens de flexion dans l'objectif de mieux comprendre la différence entre l'orientation des fibres dans les dallettes 100x50 et les prismes 100x100 présentée au Tableau 6.2. Cette analyse spatiale est illustrée à la Figure 6.11 pour les dallettes 100x50 et les prismes 100x100 de UP-F2 et de UP-F3. Elle consiste à positionner chaque fibre détectée par l'algorithme de calcul de la Section 3.1.5 sur la tranche des spécimens et d'organiser ces fibres selon l'orientation des fibres qui leur est associée. Quatre groupes d'orientation des fibres ont été définis, soit les fibres avec un angle d'orientation entre 0 et 30 degrés (points verts), entre 30 et 45 degrés (points jaunes), entre 45 et 60 degrés (points rouge) et entre 60 et 90 degrés (points violets). Plus l'angle est élevé, moins la fibre est efficace pour reprendre les efforts de traction et elle est donc orientée défavorablement à l'effort de traction.

Un premier constat évident est la différence dans le nombre total de fibres pour les spécimens en UP-F2 et ceux en UP-F3. Les spécimens en UP-F3 (Figure 6.11b et d), avec 3% vol. de fibres, ont beaucoup plus de fibres que les spécimens en UP-F2 (Figure 6.11a et c), ce qui est cohérent avec les densités obtenues au Tableau 6.2. Le fait d'avoir plus de fibres dans les spécimens en UP-F3 peut quand même conduire ponctuellement à des zones avec peu de fibres telles qu'illustrées par les zones plus noires sur la Figure 6.11b.

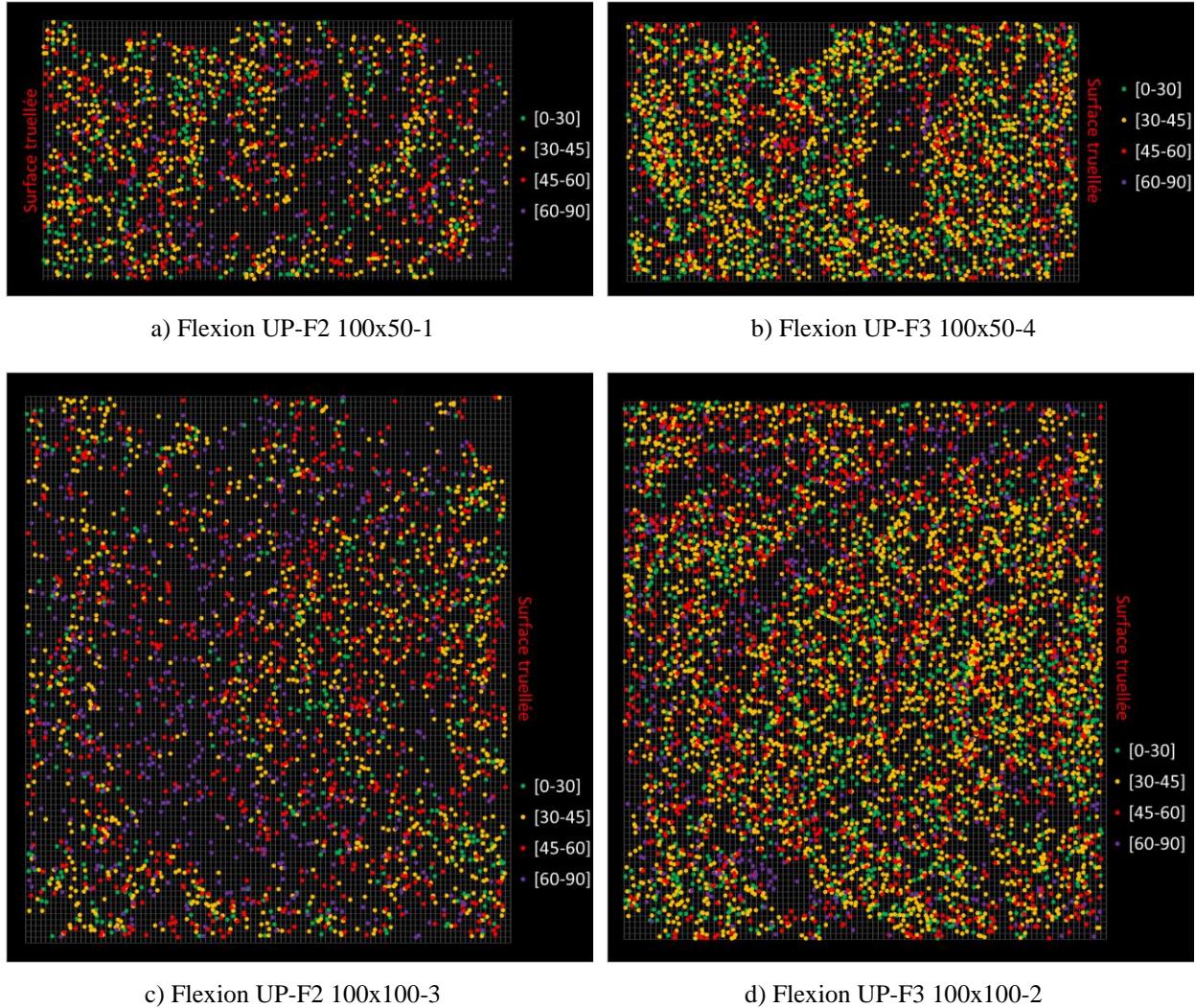


Figure 6.11 Localisation et orientation des fibres dans des spécimens 100x50 et 100x100 en flexion

À la Figure 6.11, les spécimens sont présentés dans le même sens qu'ils étaient positionnés lors de la réalisation de l'essai de flexion (Figure 3.7, Section 3.1.4). Ils sont donc tournés de 90 degrés selon le sens de mise en place et la surface truellée est alors sur le côté des spécimens, tel qu'indiqué en rouge sur la Figure 6.11. Il est possible de remarquer que l'orientation des fibres est moins bonne dans la partie inférieure des spécimens selon leur positionnement lors de la mise en place, principalement pour le UP-F2. Le fait de tourner les spécimens de 90 degrés (tel que recommandé par les normes canadiennes) lors des essais permet donc de réduire la quantité de fibres moins bien orientées dans la partie inférieure tendue lors des essais de flexion. Il est donc important de faire

cette rotation de 90 degrés pour éviter d'avoir trop de fibres orientées défavorablement dans la zone tendue, en plus des autres avantages de faire cette rotation décrits à la Section 3.1.4.

La Figure 6.11 montre également la différence entre l'écoulement du BFUP dans les dallettes minces (Figure 6.11a et b) et dans les prismes plus larges (Figure 6.11c et d). Il est important de rappeler que ces spécimens ont été coulés de la même façon, soit par mouvements de va et vient selon la direction longitudinale des spécimens. Il est possible d'observer sur les Figure 6.11c et Figure 6.11d un arc formé par les fibres les moins bien orientées (points violettes). Ceci semble dû à un écoulement des fibres dans le sens transversal (largeur) des prismes 100x100 (Figure 6.11c et d), ce qui ne se produit presque pas dans les dallettes 100x50 (Figure 6.11a et b) pour lesquelles la largeur, par rapport au sens d'écoulement, est plus faible que pour les prismes (50 versus 100 mm). Étant donné que le BFUP se dépose dans le coffrage avec une largeur approximative de 50 mm, un écoulement dans le sens de la largeur est improbable pour les dallettes alors que ça laisse la possibilité pour le BFUP de s'écouler dans les 50 mm restant dans la largeur des prismes. Ce phénomène entraîne des orientations des fibres plus défavorables pour les prismes 100x100 que pour les dallettes 100x50, ce qui explique les résultats présentés au Tableau 6.2.

En résumé, la Figure 6.11 montre qu'il est plus difficile de créer un écoulement majoritairement longitudinal pour les prismes 100x100 avec des mouvements de va et vient longitudinaux étant donné la plus grande largeur de ces spécimens. Cela fait en sorte que des zones avec des fibres moins bien orientées sont créées et cela diminue le comportement en flexion de ces spécimens. Ce phénomène est plus critique si la densité de fibres est plus faible (UP-F2, Figure 6.11a et c).

6.4.3 Choix des géométries des spécimens de traction et de flexion pour la calibration de la méthode d'analyse inverse

D'après les apprentissages réalisés au Chapitre 5 et dans les précédentes sections du Chapitre 6, l'os 100x50 en traction (Figure 3.3a) et la dallette 100x50 en flexion (Figure 3.7) semblent être les géométries les plus optimales pour calibrer les deux adaptations de l'analyse inverse de SIA. Les raisons qui justifient ces choix sont détaillées ci-dessous.

Dallettes de section 100x50 pour les essais de flexion :

1. La réalisation des essais de flexion au laboratoire est moins problématique avec les dallettes 100x50 qu'avec les prismes 100x100. Le décollement de certaines cornières (Section 6.3.2) et l'amplitude des sauts en post-pic pour les prismes 100x100 (surtout pour le UP-F3, Section 6.3.2) sont problématiques et peuvent rendre les résultats de ces essais inexploitables. La fissuration se produit également plus souvent en zone de moment constant pour les dallettes 100x50, ce qui fait que les résultats de ces spécimens sont moins susceptibles d'être rejetés.
2. Les résultats de flexion pour les dallettes 100x50 sont plus homogènes et la dispersion au pic est moins grande que pour les prismes 100x100 (Figure 6.10). Ainsi, le comportement moyen est plus représentatif de l'ensemble des spécimens individuels pour les dallettes que pour les prismes. Aussi, la plus petite dispersion dans le comportement des dallettes 100x50 se traduit inévitablement par une variabilité moins grande des résultats d'analyse inverse avec cette géométrie et augmentera la performance de la méthode.
3. Les contraintes de cisaillement près des appuis sont beaucoup moins importantes pour les dallettes 100x50 que pour les prismes 100x100 (Figure 5.2 de la Section 5.1.1). Des contraintes de cisaillement importantes près des appuis peuvent entraîner des ruptures en cisaillement ou favoriser la macrofissuration en dehors de la zone de moment constant, ce qui rend les résultats de ces essais inutilisables. L'utilisation des dallettes 100x50 permet de réduire la probabilité que cela se produise.
4. L'orientation des fibres est meilleure pour les dallettes 100x50 que pour les prismes 100x100. Cela s'explique par le fait que l'écoulement du BFUP est majoritairement longitudinal dans les dallettes, tandis qu'un écoulement transversal (sur le sens de la largeur) se produit également dans les prismes (Section 6.4.2). La meilleure orientation des fibres dans les dallettes 100x50 leur permet de mieux performer en flexion que les prismes 100x100 (Figure 6.10). L'orientation des fibres dans les dallettes est également plus près de celle obtenue dans les spécimens de traction, spécialement sur les os 100x50. Il est primordial d'avoir une orientation des fibres similaires en traction et en flexion pour assurer une performance optimale de la méthode d'analyse inverse. Il est donc primordial d'avoir

une géométrie similaire en traction et en flexion puisque la géométrie a un impact sur l'orientation des fibres dans un spécimen (Section 2.2.4).

5. La méthode SIA originale a été calibrée pour des essais de flexion 4 points sur des spécimens minces (100x30) avec un élancement (L/h) de 14 (Figure c). Cette méthode est donc plus performante sur des spécimens avec un élancement (L/h) plus élevé, ce qui est davantage le cas des dallettes 100x50 ($L/h = 6$) que des prismes 100x100 ($L/h = 3$). La calibration des adaptations de la SIA est donc plus facile sur les dallettes et la performance de ces adaptations sera probablement meilleure pour cette géométrie de spécimens de flexion.

Os de section 100x50 pour les essais de traction :

1. Les os 100x50 en traction présentent un comportement plus représentatif de la performance d'un BFUP dans des applications en génie civil (principalement de minces et larges couches) que les os 50x50. La performance (Figure 6.10) et l'orientation des fibres (Tableau 6.2) sont maximales pour les os 50x50, ce qui fait que le comportement de ces os serait diminué de beaucoup lors de son utilisation dans un contexte de conception de structures en BFUP. Il est donc préférable de calibrer les adaptations de la méthode d'analyse inverse SIA avec les os 100x50 qui sont plus représentatifs du comportement en traction présent dans des éléments structuraux en BFUP.
2. L'orientation et la densité des fibres dans les os 100x50 sont davantage similaires à celles des dallettes 100x50 que dans les os 50x50, pour lesquels l'orientation et la densité des fibres sont meilleures. Cette meilleure correspondance entre les os 100x50 et les dallettes de même section (100x50) permet une calibration plus robuste des deux adaptations de la méthode de calcul inverse de la SIA.

Pour toutes ces raisons, seuls les résultats des os 100x50 et des dallettes 100x50 seront utilisés pour calibrer les deux adaptations de la SIA proposées à la Section 5.2. La suite des analyses réalisées dans ce Chapitre 6 référeront donc à ces deux types de spécimens.

6.4.4 Pondération des résultats de flexion expérimentaux selon leur orientation et leur densité des fibres

Le Tableau 6.2 de la Section 6.4.2 a illustré les différences d'orientation et de densité des fibres entre les os de traction et les spécimens de flexion. Les spécimens d'essais sélectionnés (os 100x50 en traction et dallettes 100x50 en flexion) permettent de réduire en partie ces différences. Il reste malgré tout une légère différence d'orientation et de densité des fibres entre les spécimens de traction et de flexion sélectionnés. Cette différence, si elle n'est pas corrigée, mènera à une légère sous-estimation ou une surestimation des résultats du calcul inverse. Les résultats de flexion des dallettes 100x50 ont donc été pondérés pour ramener ces résultats sur une base d'orientation et de densité des fibres similaire à celle obtenue dans les essais de traction afin de calibrer les méthodes dans le meilleur contexte possible.

Pour ce faire, il est intéressant de connaître l'orientation et la densité des fibres de tous les spécimens de ces géométries d'essais pour mieux évaluer la variabilité de l'orientation et de la densité des fibres pour une même géométrie d'essai. Étant donné que les analyses d'orientation et de densité des fibres présentées au Tableau 6.2 ont seulement été réalisées sur une courbe d'essai près de la moyenne, des analyses complémentaires ont donc été réalisées pour tous les autres spécimens des géométries sélectionnées. Les résultats de ces nouvelles analyses sont présentés au Tableau 6.3.

L'orientation et la densité des fibres des deux os renforcés en UP-F3 (100x50-2R et 100x50-4R) ont été évaluées malgré le fait que ces os n'ont pas été considérés dans le calcul de la courbe moyenne (Section 6.3.1). La tranche analysée pour ces spécimens ne provient pas du changement de section ce qui fait que le treillis de renforcement (Figure 6.1) n'influence pas l'orientation et la densité des fibres obtenues. Les résultats pour ces os sont simplement utilisés pour mieux comprendre la variabilité au sein de ce groupe de spécimens.

L'analyse de l'orientation et de la densité des fibres dans les dallettes 100x50 au Tableau 6.3 est également un peu différente de celle réalisée sur les mêmes types de spécimens au Tableau 6.2. En effet, alors que l'ensemble de la section 100x50 avait été analysé pour déterminer les résultats du Tableau 6.2, seule la hauteur correspondant à la zone tendue au pic de flexion a été considérée pour obtenir les résultats du Tableau 6.3 puisque celle-ci est principalement responsable du comportement en flexion. La hauteur tendue étant égale à 80% de la hauteur totale du spécimen au

pic de flexion (Section 5.1.2), l'orientation et la densité des fibres ont donc été évaluées sur une section de 100mm x 40mm (à partir de la fibre extrême tendue des dallettes). Cette particularité permet de mieux représenter l'orientation et la densité des fibres qui participent à la reprise des efforts de traction. Les zones en compression où les fibres n'impactent pas le comportement ne sont donc pas considérées dans les résultats du Tableau 6.3.

Tableau 6.3 Orientation et densité des fibres dans la zone tendue des os 100x50 en traction et des dallettes 100x50 en flexion pour le UP-F2 et le UP-F3

Matériau	Type d'essai	Spécimen	Orientation Minimum (degrés)	Orientation Maximum (degrés)	Orientation Moyenne $\bar{\theta}_i$ (degrés)	Orientation Écart-type (degrés)	Densité ρ_i (fibres/mm ²)
UP-F2	Traction	100x50-1	14.61	83.43	46.52	11.18	0.46
		100x50-2	9.40	79.86	36.97	10.51	0.46
		100x50-3	6.88	84.27	44.37	10.93	0.43
		100x50-4	14.78	87.70	43.28	11.84	0.46
	Flexion	100x50-1	5.32	85.65	44.07	14.04	0.35
		100x50-2	17.24	86.08	45.22	14.13	0.30
		100x50-3	12.85	83.31	42.06	13.29	0.36
		100x50-4	13.33	87.33	41.62	12.89	0.41
		100x50-5	13.81	87.24	47.42	14.25	0.31
	UP-F3	100x50-1	10.60	84.92	38.37	11.25	0.66
		100x50-2R	7.14	86.55	37.00	11.51	0.72
		100x50-3	9.11	83.67	36.65	11.20	0.69
		100x50-4R	10.20	85.16	43.21	11.61	0.61
		100x50-1	12.17	87.09	40.74	12.59	0.62
	Flexion	100x50-2	10.97	85.51	35.74	10.32	0.67
		100x50-3	8.84	82.11	39.19	11.90	0.68
		100x50-4	8.72	85.71	38.08	11.30	0.62
		100x50-5	12.14	86.20	45.78	12.29	0.61

Le Tableau 6.3 permet d'observer que l'orientation et la densité des fibres sont un peu différentes entre les spécimens de traction et de flexion de même section 100x50. Quoique parfois très proches pour certains spécimens, l'orientation des fibres est moins favorable (angle plus grand) et la densité des fibres est plus faible pour les dallettes que pour les os, surtout pour le UP-F2, ce qui vient confirmer les observations faites au Tableau 6.2.

Considérant ces légères différences d'orientation et de densité des fibres, il est pertinent de pondérer les courbes expérimentales de flexion des dallettes avec les résultats du Tableau 6.3, pour les ramener sur une base d'orientation et de densité des fibres commune avec les os de traction.

Ceci évitera que les résultats d'analyse inverse obtenus des courbes de flexion résultent en un comportement inférieur en traction par rapport aux os simplement dû à une orientation légèrement moins favorable dans les dallettes. La pondération des courbes de flexion a été effectuée avec l'Équation (3.1) présentée à la Section 3.1.5, en prenant comme référence l'orientation et la densité moyenne des fibres dans les os 100x50 (θ_{ref} et ρ_{ref} respectivement). Ceci permet d'obtenir les facteurs de pondération (γ_t) présentés au Tableau 6.4. Ces facteurs sont supérieurs à 1 pour presque tous les spécimens de flexion. La pondération permet donc d'augmenter le comportement flexionnel des dallettes pour tenir compte de l'orientation et la densité de fibres un peu moins favorables dans les dallettes que dans les os.

Le Tableau 6.4 présente également le coefficient de pondération par rapport à la moyenne du groupe de spécimens de même géométrie et de même BFUP (γ_m) pour rendre compte de la variabilité du comportement attribué à la différence d'orientation et de densité des fibres au sein d'un même type de spécimen. Il est à noter que les deux os renforcés en UP-F3 ne sont pas inclus dans les résultats du Tableau 6.4 puisqu'ils ne sont pas représentatifs du comportement en traction moyen de ce groupe.

Tableau 6.4 Facteurs de pondération des spécimens 100x50 pour UP-F2 et UP-F3

Matériau	Type d'essai	Spécimen	Orientation Moyenne θ_m (degrés)	Densité Moyenne ρ_m (fibres/mm ²)	Pondération par rapport à la MOYENNE γ_m (*)	Pondération par rapport à la TRACTION γ_t (*)
UP-F2	Traction	100x50-1			1.03	-
		100x50-2			0.92	-
		100x50-3	42.79	0.45	1.04	-
		100x50-4			1.00	-
	Flexion	100x50-1			1.00	1.16
		100x50-2			1.09	1.27
		100x50-3	44.08	0.35	0.96	1.11
		100x50-4			0.89	1.04
		100x50-5			1.09	1.27
UP-F3	Traction	100x50-1			1.03	-
		100x50-3	37.51	0.67	0.97	-
		100x50-1			1.02	1.08
	Flexion	100x50-2			0.93	0.98
		100x50-3	39.91	0.64	0.96	1.02
		100x50-4			0.99	1.05
		100x50-5			1.09	1.16

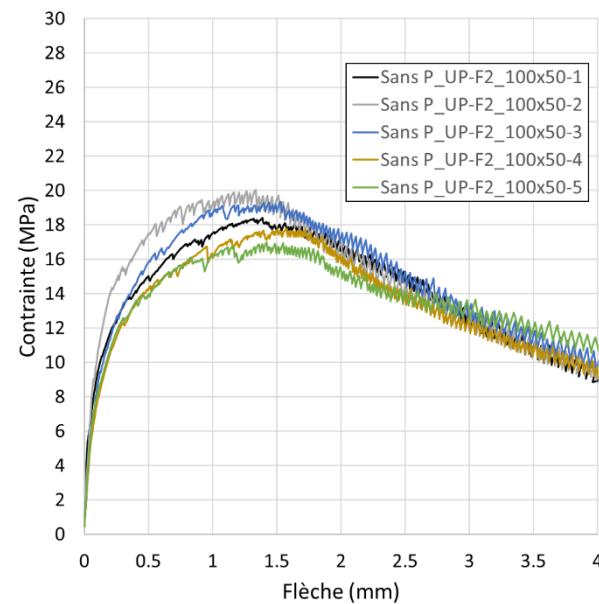
$$(*) \gamma_m = \sqrt{\frac{\theta_i}{\theta_m} \times \frac{\rho_m}{\rho_i}} \quad \text{et} \quad \gamma_t = \sqrt{\frac{\theta_i}{\theta_{m \text{ traction}}} \times \frac{\rho_{m \text{ traction}}}{\rho_i}}$$

Les valeurs moyennes d'orientation et de densité au sein d'un même groupe de spécimens au Tableau 6.4 permettent de confirmer les observations réalisées au Tableau 6.3. En moyenne, l'orientation des fibres (θ_m) est moins favorable pour les spécimens de flexion que pour les spécimens de traction (différence d'environ 2 degrés pour les deux BFUP) et la densité de fibres moyenne (ρ_m) est plus faible en flexion qu'en traction (différence de 0.1 fibres/mm² pour UP-F2 et 0.03 fibres/mm² pour UP-F3). Cette plus grande différence de densité pour le UP-F2 fait en sorte que les facteurs de pondération obtenus par rapport à la traction (γ_t au Tableau 6.4) sont plus grands pour le UP-F2 que pour le UP-F3.

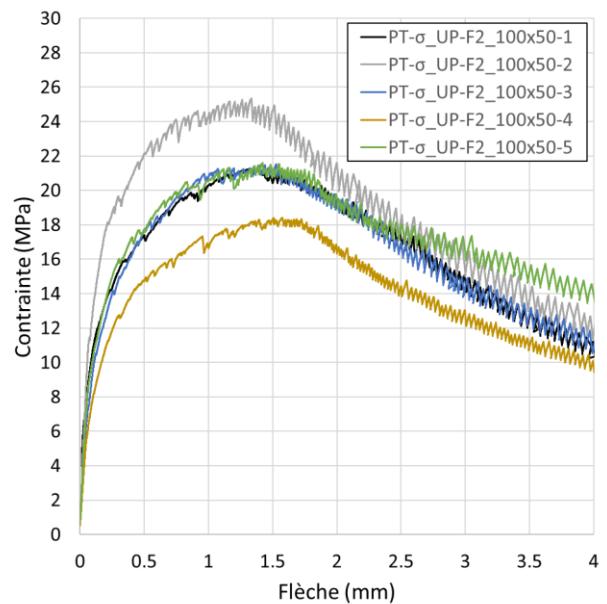
Deaux [34] a également déterminé des facteurs de pondération avec l'équation (3.1) et les a ensuite utilisés pour pondérer les contraintes des courbes de flexion qu'il avait obtenues sur des spécimens de BFUP, sans modifier la déformation de ces spécimens. Ceci revient à poser l'hypothèse que l'orientation et la densité des fibres impactent seulement la résistance en flexion et non la capacité de déformation du BFUP. Cette hypothèse n'est pas totalement valable, puisqu'il est connu qu'un plus grand dosage en fibres (et donc une densité plus élevée) augmente la contrainte maximale obtenue en flexion (résistance), mais diminue la flèche au pic (déformabilité). Cet aspect a d'ailleurs été démontré à la Figure 6.10 en comparant le comportement flexionnel du UP-F2 avec celui du UP-F3. L'impact de la densité de fibres sur la déformabilité flexionnelle est cependant significatif seulement pour des grandes différences de densité comme entre un BFUP contenant 2 ou 3% vol. de fibres (différence de densité d'environ 0.3 fibres/mm² dans ce projet entre le UP-F2 et le UP-F3). En comparant les mesures de densité sur les spécimens de traction et de flexion pour un même BFUP au Tableau 6.4, la différence de densité est au maximum de 0.1 fibres/mm². Cette différence a donc été jugée assez faible pour avoir un impact limité sur la flèche au pic des dalles 100x50 en flexion. La pondération des courbes de flexion a donc été effectuée seulement en termes de contrainte, comme cela avait été réalisé dans l'étude de Deaux [34]. La Figure 6.12 présente les courbes de flexion des dalles 100x50 avant et après pondération des contraintes, pour le UP-F2 et le UP-F3.

La pondération des courbes de flexion des dalles 100x50 augmente la dispersion des contraintes au pic de flexion pour le UP-F2 (Figure 6.12b versus Figure 6.12a) alors qu'elle diminue très légèrement (peu significatif) cette dispersion pour le UP-F3 (Figure 6.12d versus Figure 6.12c).

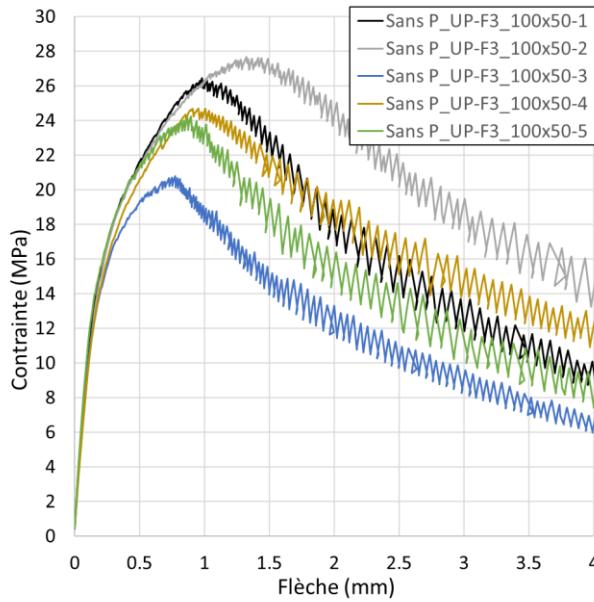
Pour les deux BFUP, le comportement moyen des dallettes 100x50 est augmenté, puisque la majorité des facteurs de pondérations sont supérieur à 1 (Tableau 6.4).



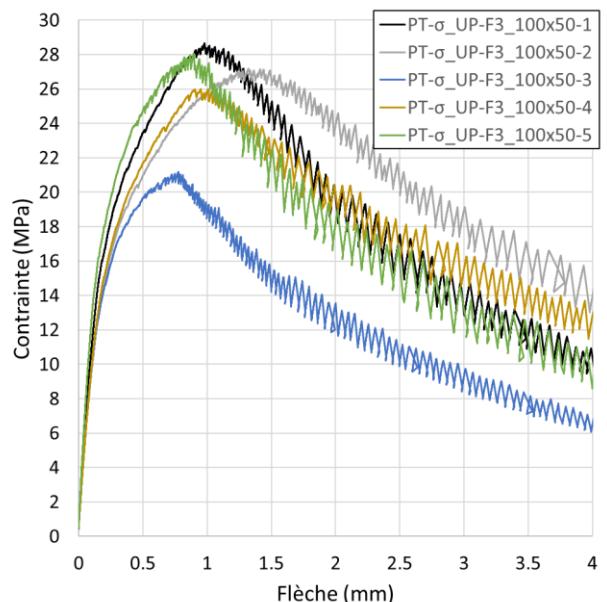
a) UP-F2 sans pondération



b) UP-F2 avec pondération sur contraintes



c) UP-F3 sans pondération



d) UP-F3 avec pondération sur contraintes

Figure 6.12 Impact de la pondération des contraintes par rapport à la traction sur les courbes de flexion 100x50 pour le UP-F2 et le UP-F3

Les courbes pondérées des dallettes 100x50 (Figure 6.12b et d) seront utilisées pour calibrer les deux adaptations de la méthode d'analyse inverse de la SIA. Ces courbes représentent celles qui auraient été obtenues en flexion pour une orientation et une densité des fibres similaires à celles observées dans les os de traction. Ces courbes pondérées devraient donc donner la meilleure performance avec les deux adaptations de la méthode de calcul inverse.

6.5 Étude de la fissuration avec un système de corrélation d'images

La compréhension de l'évolution de la fissuration lors des essais de traction et de flexion est primordiale pour bien calibrer les deux adaptations proposées de la méthode SIA. D'une part, l'apparition d'une macrofissure à la fibre inférieure tendue des spécimens de flexion correspond au moment de localisation en traction (atteinte de la résistance maximale en traction). La détermination de ce moment de localisation est primordiale pour l'utilisation de la méthode adaptée 2 (Section 5.2.2). La Section 4.3.5 a montré que le moment de localisation en flexion pour le BFUP3 semblait correspondre au moment où la fissure principale atteint une ouverture de 0.05 mm (50 µm) à la fibre extrême tendue. Il sera donc intéressant de déterminer, dans cette section, si ce critère d'ouverture de fissure est toujours valable ou non pour les dallettes 100x50 de UP-F2 et de UP-F3.

D'autre part, la cohérence entre les comportements en traction et en flexion est également un élément essentiel pour l'analyse inverse, et en particulier pour calibrer une telle analyse. La géométrie, l'orientation des fibres et la densité des fibres doivent être similaires pour obtenir une performance optimale de l'analyse inverse (Section 6.4.3). Il est donc logique de penser que l'évolution de la fissuration à la fibre extrême tendue des spécimens de flexion doit aussi être assez similaire à celle observée dans les spécimens de traction pour obtenir une bonne performance de l'analyse inverse. Dans cette section, la fissuration en traction et en flexion sera donc étudiée.

6.5.1 Fissuration en traction

L'analyse de la fissuration sur les os 100x50 sollicités en traction a été réalisée avec le logiciel VIC3D selon la méthodologie présentée à la Section 3.1.6. Des capteurs de déplacements virtuels ont été positionnés dans le sens longitudinal du spécimen étudié (Figure 6.13). Afin d'obtenir

l'évolution de l'ouverture de chaque fissure en fonction du temps, un capteur virtuel couvre chaque fissure (micro ou macro-fissures) tel qu'illustré à la Figure 6.13, soit la même procédure que celle réalisée pour les essais de flexion du BFUP3 (Section 4.3.5). Il y a donc autant de capteurs virtuels de déplacement que de fissures. En plus de ces capteurs qui couvrent une zone très locale, d'autres capteurs du même type ont été utilisés pour mesurer le déplacement global du spécimen sur différentes distances. Un capteur virtuel de 300 mm a tout d'abord été utilisé. Cette distance correspond à la longueur de la section réduite des os (Section 3.1.3.1), sur laquelle se fait idéalement le calcul des déformations durant l'essai si la macrofissure se trouve dans cette zone. Étant donné que plusieurs os ont présenté une fissuration au changement de section plutôt que dans la section réduite des os, les capteurs conventionnels (LVDT) couvrant la zone de 300 mm n'ont pas souvent pu être exploités. Le capteur virtuel de 300 mm permet alors de décaler légèrement la position du capteur pour capter la fissure principale formée au changement de section et pouvoir calculer la déformation sur une longueur de 300 mm (Figure 6.13). Cette valeur de déformation peut ensuite être comparée à celle obtenue à partir des données des LVDT conventionnels plus longs qui couvraient une distance de 400 mm durant les essais et qui ont été utilisés pour déterminer les déformations des spécimens qui ont présenté une fissure en changement de section. Un autre capteur virtuel, cette fois de 100 mm de longueur, a également été positionné de la même façon que celui de 300 mm, soit de manière à inclure la macrofissure, mais en s'étendant ensuite sur une longueur plus faible (100 mm). Cette longueur de 100 mm correspond à la longueur de la zone de moment constant des dalles 100x50 sollicitées en flexion. Le capteur virtuel de 100 mm a donc pour objectif d'étudier l'impact de la longueur de mesure sur le calcul des déformations en comparant ses résultats avec ceux des capteurs de 300 mm (virtuel) et 400 mm (LVDT).

Étant donné que la localisation de la macrofissure en traction est associée au pic de résistance en traction, l'analyse des ouvertures de fissures et les déformations obtenues par les capteurs plus globaux de 100, 300 et 400 mm de longueur ont été étudiées plus spécifiquement au pic, soit à la force maximale en traction. L'idée est de trouver un critère de fissuration qui puisse être associé à la localisation de la fissuration pour faciliter ensuite la détermination du moment de localisation dans les essais de flexion, moment qui survient avant l'atteinte du pic de flexion tel qu'expliqué à la Section 5.1.3.

Le Tableau 6.5 présente les résultats des os 100x50 pour le UP-F2 et le UP-F3. Il est important de rappeler que les os 2 et 4 pour le UP-F3 (O100x50-2R et 4R) ont des renforts et qu'ils n'ont pas

été considérés dans le calcul du comportement moyen en traction de ce BFUP. La fissuration pour ces deux os n'est donc pas étudiée au Tableau 6.5. La présente section (Section 6.5.1) traite seulement de l'ouverture de la macrofissure au pic ($\omega_{\text{pic princ}}$) et des déformations au pic mesurées avec les capteurs virtuels (ϵ_{pic} sur 100 mm et 300 mm) et avec les longs LVDT (ϵ_{pic} sur 400 mm). L'étude de la microfissuration sera réalisée plus tard, à la Section 6.5.3.

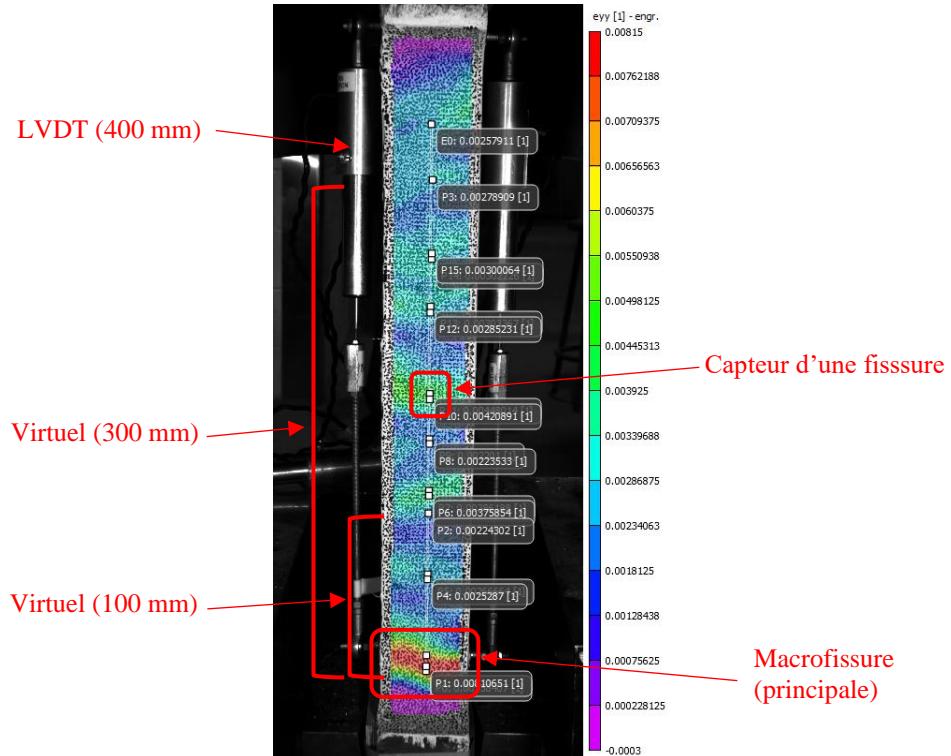


Figure 6.13 Localisation des capteurs de déplacements virtuels pour étudier la fissuration en traction sur les os 100x50 de UP-F2 et de UP-F3

Tableau 6.5 Étude de la macrofissuration sur les os 100x50 de traction pour le UP-F2 et le UP-F3

Matériaux	Spécimen	T_{pic} (secondes)	$\omega_{pic\ princ}$ (μm)	ε_{pic} sur 100mm ($\mu\varepsilon$)	ε_{pic} sur 300mm ($\mu\varepsilon$)	ε_{pic} sur 400 mm (LVDT) ($\mu\varepsilon$)
UP-F2	100x50-1	722	54	4019	3532	3008
	100x50-2	710	104	3661	3229	2963
	100x50-3	609	38	2436	2465	2537
	100x50-4	768	113	4928	3613	3211
MOYENNE		702	77	3761	3210	2930
UP-F3	100x50-1	411	23	2276	1645	1720
	100x50-3	465	62	3625	2384	1947
	MOYENNE	438	43	2951	2014	1833

Le Tableau 6.5 montre que la longueur de mesure a un impact important sur le calcul des déformations au pic. Pour tous les os des deux BFUP étudiés, plus la longueur du capteur de déplacement est grande, plus la déformation calculée au pic de traction est petite. Ce constat permet d'expliquer en partie la différence entre les déformations ultimes obtenues avec les os 100x50 (calcul à partir des LVDT de 400 mm) par rapport à celles obtenues sur les os 50x50 (calcul à partir des LVDT de 300 mm) (Figure 6.10, Section 6.4). La déformation plus importante obtenue avec les capteurs de 100 mm versus ceux de 300 ou 400 mm (augmentation de 28% pour le UP-F2 et de 60% pour le UP-F3 versus le capteur de 400 mm) explique également que les déformations obtenues des essais de flexion avec la méthode d'analyse inverse SIA originale, qui sont basées sur une zone tendue uniforme de 100 mm (Figure 5.6, Section 5.2), soient supérieures à celles obtenues sur les os 100x50 (mesure sur 300 ou 400 mm). Il est donc primordial de considérer la longueur des capteurs de déplacement lorsque la déformation ultime en traction directe est analysée. Il faut également se demander quel comportement en traction directe doit être obtenu avec l'analyse inverse (un comportement plus global tel qu'obtenu sur une zone plus large dans les os ou une mesure plus locale de déformation autour de la macrofissure). Si le comportement en traction directe des os est celui visé par l'analyse inverse, il est nécessaire que la zone de moment constant des spécimens de flexion soit d'une longueur identique à la longueur de la section réduite des os.

Le Tableau 6.5 permet également d'observer que l'ouverture moyenne de la fissure principale au pic ($\omega_{pic\ princ}$) est plus grande pour le UP-F2 que pour le UP-F3. Le critère d'ouverture de fissure obtenu à la Section 4.3.5 pour le BFUP3 (50 μm) est similaire à ce qui est observé pour le UP-F3 (43 μm en moyenne). C'est donc dire que l'ouverture de la fissure principale au pic de traction est

d'environ 50 µm pour un BFUP avec 3% vol. de fibres et qu'elle est d'environ 80 µm pour un BFUP avec 2% de fibres. Ces valeurs seront utilisées à la Section 6.5.2 comme critère de localisation dans les essais de flexion. Autrement dit, il sera considéré que l'effort de traction maximal est atteint à la fibre extrême tendue (fibres inférieure) des dallettes 100x50 sollicitées en flexion lorsque la fissure principale atteint une ouverture de 80 µm pour le UP-F2 et de 50 µm pour le UP-F3 à cet endroit.

6.5.2 Fissuration en flexion

L'analyse de la fissuration des dallettes 100x50 de UP-F2 et UP-F3 sollicitées en flexion est réalisée de façon similaire à ce qui est fait à la Section 4.3.5 pour le BFUP3. Des capteurs virtuels ont été positionnés de chaque côté des différentes fissures (typiquement sur une distance de 5 mm) à la fibre inférieure des spécimens pour obtenir l'ouverture des fissures en fonction du temps. En plus de l'ouverture des fissures, un plus long capteur virtuel de 100 mm a été positionné au bas du spécimen pour mesurer le déplacement sur cette longueur et en déduire la déformation de la partie inférieure de la zone de moment constant. La Figure 6.14 présente un exemple du positionnement des capteurs sur les dallettes 100x50 pour le UP-F2 et le UP-F3 dans VIC3D.

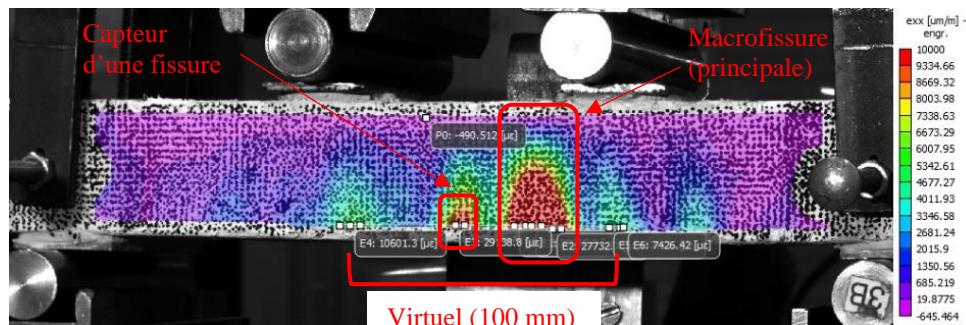


Figure 6.14 Localisation des capteurs virtuels dans VIC3D pour obtenir l'évolution de la fissuration en flexion pour le UP-F2 et le UP-F3

Une fois les capteurs virtuels positionnés, l'analyse de la fissuration et des déformations peut être réalisée. L'objectif de cette étude est de déterminer quand a lieu la localisation de la fissuration (atteinte de l'effort maximal de traction) à la fibre extrême tendue des dallettes sollicitées en flexion. Pour ce faire, les critères d'ouvertures de la macrofissure (fissure principale) déterminés à

la Section 6.5.1 précédente (80 µm pour le UP-F2 et 50 µm pour le UP-F3) sont utilisés. Les temps (dans le déroulement de l'essai) associés au moment où ces ouvertures sont atteintes sont notés $T_{\omega=0.080}$ ou $T_{\omega=0.050}$ respectivement. En corrélant le temps de l'essai avec l'évolution de la courbe de flexion, il est ensuite possible de déterminer l'endroit correspondant (point de localisation) sur la courbe de flexion et de déterminer les déformations associées (mesure sur 100 mm avec le capteur virtuel) à la fibre inférieure (notés $\varepsilon_{\omega=0.080}$ ou $\varepsilon_{\omega=0.050}$ respectivement). Il est également possible de déterminer le ratio de force de localisation (notés $\% F_{\omega=0.080}$ ou $\% F_{\omega=0.050}$). Ce ratio de force est obtenu en divisant la force associée au moment de localisation par la force maximale atteinte au pic en flexion. Le Tableau 6.6 présente les résultats obtenus pour les dalles 100x50 pour le UP-F2 et le UP-F3. Des cases hachurées sont présentes dans ce tableau lorsque le critère de localisation (80 µm ou 50 µm) n'est pas applicable.

Le Tableau 6.6 permet de mettre en évidence la plus grande déformation à la fibre inférieure pour les dalles en UP-F2 que pour celle en UP-F3. La déformation moyenne pour le UP-F2 (4 124 µε) est environ 40% plus grande que celle observée en moyenne sur le UP-F3 (2 917 µε). Ce constat est cohérent avec ce qui est observé en traction directe pour les deux BFUP, puisque le UP-F2 a une plus grande déformabilité que le UP-F3 (Section 6.4).

Tableau 6.6 Étude de la macrofissuration sur les dalles 100x50 de UP-F2 et UP-F3

Matériau	Spécimen	T_{pic} (secondes)	$T_{\omega = 0.080}$ (secondes)	$\varepsilon_{\omega = 0.080}$ (µε)	$\% F_{\omega = 0.080}$	$T_{\omega = 0.050}$ (secondes)	$\varepsilon_{\omega = 0.050}$ (µε)	$\% F_{\omega = 0.050}$
UP-F2	100x50-1	610	421	3839	92%			
	100x50-2	583	319	2154	86%			
	100x50-3	579	461	4700	95%			
	100x50-4	590	478	5277	96%			
	100x50-5	569	455	4652	96%			
MOYENNE		586	427	4124	93%			
UP-F3	100x50-1	485				501	4629	98%
	100x50-2	577				439	3262	92%
	100x50-3	410				351	2251	95%
	100x50-4	448				324	1590	86%
	100x50-5	571				433	2852	89%
MOYENNE		498				410	2917	92%

Un élément important illustré par le Tableau 6.6 est la similarité des ratios de force de localisation moyens pour les deux BFUP. Les ratios de force de localisation moyens en flexion pour le UP-F2

(93%) et pour le UP-F3 (92%) diffèrent seulement de 1%. Cette constance du ratio de force de localisation malgré un dosage en fibres différent est très intéressante. Ce ratio de force de localisation sera utilisé pour la méthode adaptée 2 de la SIA (Section 5.2.2). Il pourrait s'agir d'un critère de localisation indépendant du dosage en fibres.

6.5.3 Comparaison des déformations mesurées et de la fissuration

Tel que mentionné précédemment, la cohérence entre les comportements en traction et en flexion est primordiale pour assurer une bonne performance de l'analyse inverse. L'évolution de la fissuration lors des essais de traction et de flexion doit donc être semblable pour un même BFUP. La Figure 6.15 présente l'évolution de l'ouverture des fissures en fonction du temps dans les spécimens de traction et de flexion, pour le UP-F2 et le UP-F3. Le spécimen sélectionné à Figure 6.15 est représentatif des autres résultats obtenus sur les mêmes types de spécimens. Par exemple l'os UP-F2_100x50-2 (Figure 6.15a) est représentatif de la fissuration de tous les os 100x50 en UP-F2. Les courbes en rouge sur les graphiques de la Figure 6.15 représentent la fissure principale (macrofissure), tandis que les courbes avec d'autres couleurs correspondent aux autres fissures formées dans le spécimen. La droite verticale en pointillés verts représente, quant à elle, le temps de l'essai auquel a été atteint le pic de résistance (traction ou flexion).

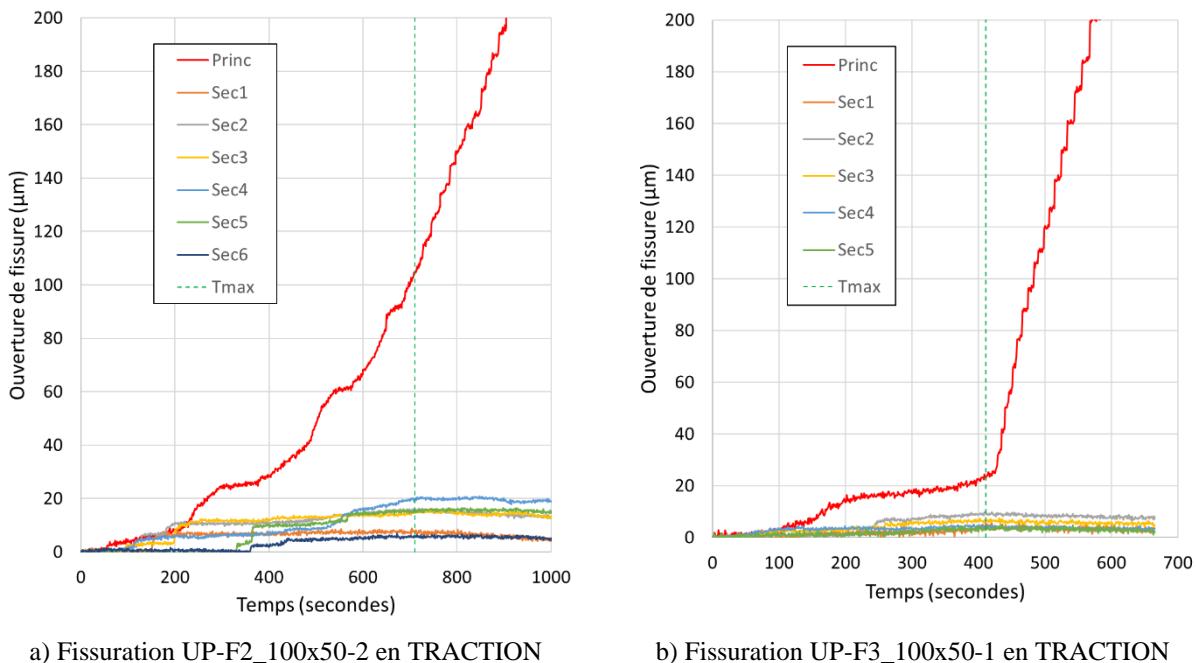


Figure 6.15 Évolution de l'ouverture des fissures pour un os et une dallette en UP-F2 et UP-F3

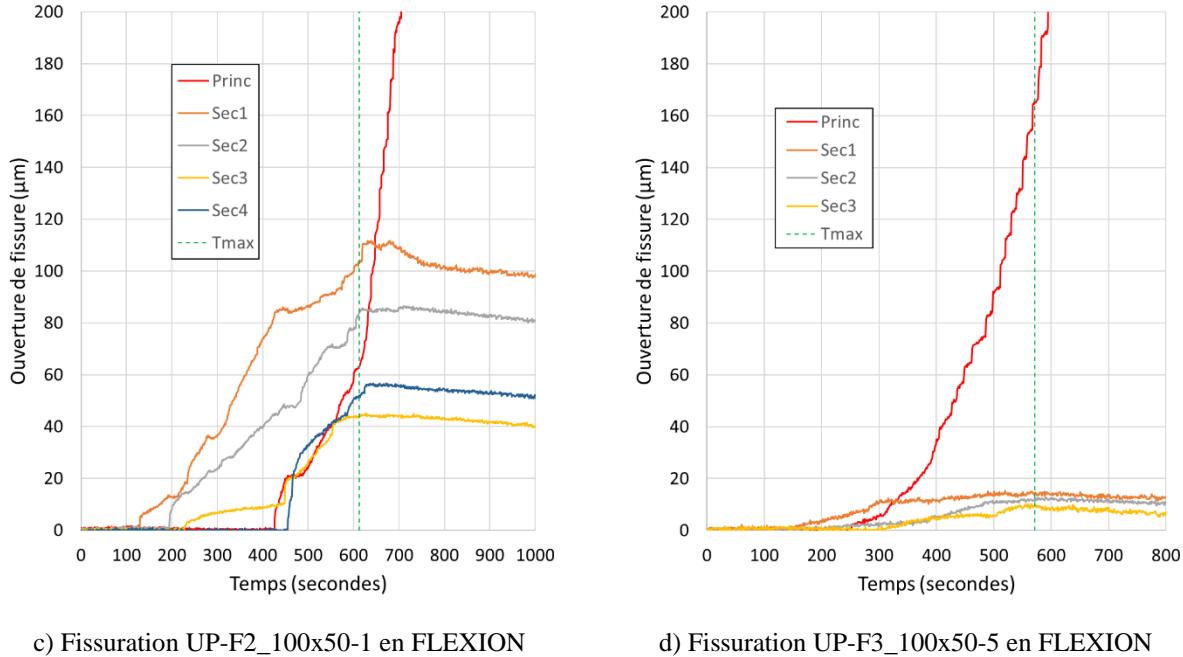


Figure 6.15 Évolution de l'ouverture des fissures pour un os et une dallette en UP-F2 et en UP-F3
(suite)

En complément aux données d'ouvertures des macrofissures (fissures principales) présentées et discutées aux sections 6.5.1 et 6.5.2, la Figure 6.15 permet de comparer la fissuration des deux types de BFUP à l'étude d'un point de vue plus global soit notamment en regardant le nombre de fissures ainsi que les ouvertures des fissures secondaires, soit les fissures autres que la fissure principale. La Figure 6.15 montre que, pour un même type de spécimens (os ou dallette), les fissures secondaires ont des ouvertures plus grandes pour le UP-F2 (Figure 6.15a et c) que pour le UP-F3 (Figure 6.15b et d). Il est également possible de voir que les fissures secondaires sont plus ouvertes en flexion (Figure 6.15c et Figure 6.15d) qu'en traction (Figure 6.15a et Figure 6.15b), ce qui est particulièrement marqué pour le UP-F2.

Concernant le nombre de fissures détectées sur chaque spécimen, la Figure 6.15 montre qu'un plus grand nombre de fissures ont été détectées en traction qu'en flexion, pour les deux BFUP. Cette observation est assez logique puisque les fissures se sont développées sur 400 mm en traction (longueur des longs LVDT) versus 100 mm en flexion (zone de moment constant). Malgré cette longueur quatre fois plus grande de la zone fissurée en traction versus en flexion, le nombre de

fissures obtenues n'est pas multiplié par quatre dans les os. Ceci peut donc expliquer en partie les faibles déformations enregistrées avec le capteur de déplacement (long LVDT) des essais de traction, tel que montré au Tableau 6.5 (Section 6.5.1). Il semble donc pertinent d'avoir un nombre de fissures similaire en traction et en flexion, et donc d'avoir une longueur de mesure similaire pour calculer les déformations.

Les déformations moyennes calculées sur 400 mm (réelles avec LVDT) et sur 100 mm (virtuelles avec DIC) au pic de traction sont comparées à celles calculées sur 100 mm au moment de localisation de la fissure principale en flexion, moment défini par les critères d'ouverture de fissures déterminés précédemment (80 et 50 μm pour le UP-F2 et le UP-F3 respectivement) tel qu'expliqué à la section 6.5.2). Les déformations obtenues ($\varepsilon_{\omega}=0.080$ et $\varepsilon_{\omega}=0.050$, pour le UP-F2 et UP-F3 respectivement) sont présentées au Tableau 6.7. Ces valeurs sont également exprimées par un ratio par rapport à la déformation du LVDT de 400 mm en traction.

Le Tableau 6.7 permet de constater que la déformation calculée sur 100 mm (DIC) en traction est très similaire à celle calculée sur 100 mm (DIC) en flexion. La différence entre ces deux déformations est de 363 μe pour le UP-F2 (variation de 10%) et de 34 μe pour le UP-F3 (variation de 1%). La différence entre la déformation mesurée à partir du LVDT de 400 mm en traction et celle mesurée sur 100 mm en flexion est beaucoup plus grande. Elle est de 1 194 μe pour le UP-F2 (variation de 41%) et de 1 084 μe pour le UP-F3 (variation de 59%). Il est donc impossible de faire correspondre une déformation mesurée en flexion sur 100 mm de zone de moment constant avec une déformation mesurée en traction sur 400 mm. L'idéal serait d'avoir une même longueur de mesure sur les deux spécimens. Cependant, les os sollicités en traction n'étant pas entaillés, il n'est pas possible d'utiliser une zone de mesure de 100 mm en traction sur les os O100x50, car il est improbable d'anticiper la position de la fissure principale sur la zone réduite de 300 mm de l'os lors de l'essai de traction. La différence de plages de mesure des déformations dans les spécimens de traction et de flexion permet d'expliquer la surestimation des déformations par la méthode SIA originale sur les BFUP testés dans les conditions d'essais ici utilisées (dallettes et os de cette étude) (Figure 5.6, Section 5.2). Ceci justifie également la nécessité de réduire les déformations obtenues de l'analyse inverse appliquées sur les résultats de flexion par l'utilisation du facteur C dans les adaptations 1 et 2 proposées de la SIA (Section 5.2.1 et 5.2.2) afin de retrouver les résultats qui seraient obtenus via les essais de traction sur les os 100x50.

Tableau 6.7 Comparaison des déformations calculées au pic sur différentes longueurs de mesure en traction et au moment de localisation de la fissure en flexion pour le UP-F2 et le UP-F3

Matériaux	Type de mesure	ε_{moy} (*) ($\mu\epsilon$)	Ratio (LVDT/DIC)
UP-F2	LVDT traction (400 mm)	2930	1.00
	DIC traction (100 mm)	3761	0.78
	DIC flexion (100 mm)	4124	0.71
UP-F3	LVDT traction (400 mm)	1833	1.00
	DIC traction (100 mm)	2951	0.62
	DIC flexion (100 mm)	2917	0.63

(*) En traction : ε_{moy} au pic

En flexion : ε_{moy} à la localisation

Les ratios ($LVDT/DIC$) présentés au Tableau 6.7 permettent de mieux comprendre la valeur initiale de la calibration du facteur C réalisée à la Section 5.2.1. La calibration initiale du facteur C a montré qu'une valeur de 0.67 permet d'améliorer grandement les déformations ultimes calculées avec l'analyse inverse adaptée 1 (Section 5.2.1). Cette valeur est très près de celle obtenue via les ratios de déformations du Tableau 6.7 entre la zone de mesure en traction sur 400 mm et celle en flexion sur 100 mm (0.71 pour le UP-F2 et 0.63 pour le UP-F3). Il est donc plus facile de comprendre pourquoi la valeur de $C = 0.67$ fonctionne bien pour les adaptations 1 et 2 du calcul inverse SIA. Ce facteur sera également validé en évaluant la performance des adaptations 1 et 2 de la méthode SIA sur le UP-F2 et le UP-F3 (Sections 6.6 et 6.7).

Le facteur réducteur $C = 0.67$ est donc basé sur des observations rationnelles du fonctionnement de la méthode SIA qui se base sur des principes de l'ingénierie, et non sur une étude paramétrique statistique comme la méthode Lopez 5 points. La longueur de mesure de la déformation en traction étant plus grande dans l'essai de traction directe que dans l'essai de flexion 4 points, les équations de ces principes d'ingénierie doivent être adaptées pour tenir compte de cette différence et donc donner des résultats compatibles pour le calcul inverse. La calibration initiale (Section 5.2.1) a

permis de démontrer que la performance analytique des adaptations de la SIA est augmentée lorsqu'un facteur réducteur $C = 0.67$ est utilisé.

La nécessité d'adapter les équations pour le calcul des déformations est également démontré par les résultats expérimentaux d'évolution de fissuration des os en traction directe (O100x50) et celle des dallettes (D100x50). Cette évolution de fissuration a permis de déterminer le moment adéquat pour mesurer la déformation à la fibre inférieure tendue des spécimens de flexion et donc de comparer adéquatement la déformation entre les essais de traction directe et les essais de flexion 4 points. La comparaison des déformations de traction expérimentales obtenues pour les deux types d'essais (traction et flexion) permet de démontrer que le ratio des déformations de l'essai de traction par rapport aux déformations de l'essai de flexion ($LVDT/DIC$ au Tableau 6.7) donne une valeur proche de 0.67. L'utilisation du facteur réducteur C est donc justifiée analytiquement puisqu'il permet d'augmenter la performance analytique des équations de la SIA qui sont déterminées selon des principes de l'ingénierie, mais elle est également justifiée expérimentalement puisque la valeur de 0.67 représente bien la différence entre les déformations de traction mesurées dans l'essai de traction directe et l'essai de flexion.

6.6 Performance de l'adaptation 1 – Ajustement de la déformation au pic

Les courbes de flexion pondérées (prise en compte de l'orientation et densité des fibres) et non pondérées présentées à la Figure 6.12 (Section 6.4.4) ont été utilisées pour évaluer la performance de l'adaptation 1 du calcul inverse de la SIA sur les dallettes 100x50 de UP-F2 et de UP-F3. Pour rappel, cette adaptation de la SIA, décrite en détail à la section 5.2.1, consiste tout d'abord à calculer la contrainte ultime en traction (f_{Utu} , Équation (5.1) de la Section 5.2.1) en considérant une hauteur tendue au pic de flexion égale à 80% de la hauteur totale des dallettes 100x50 (0.80 h_m) plutôt qu'une valeur de 82% dans la méthode SIA originale. La valeur de f_{Utu} ainsi déterminée permet d'obtenir la déformation ultime associée (ε_{Utu} , Équation (5.3) de la Section 5.2.1) qui est ensuite réduite par un facteur C égal à 0.67.

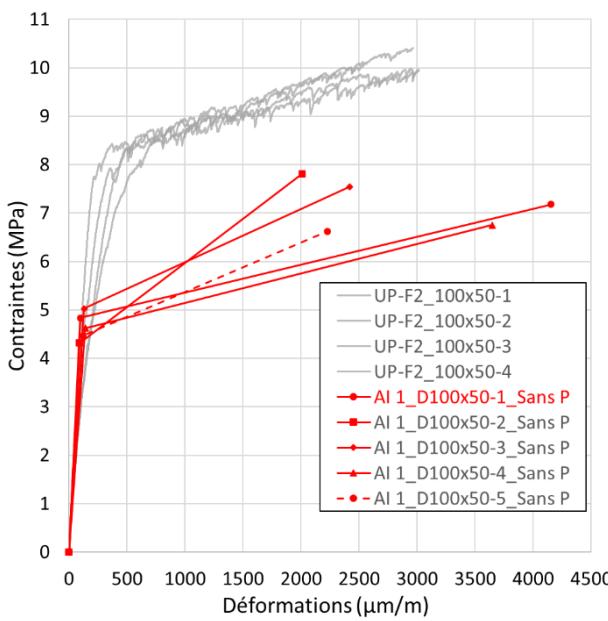
La Figure 6.16 illustre la performance de l'adaptation 1 pour le UP-F2. Les courbes grises représentent les résultats individuels de traction directe obtenus sur les os 100x50. Ces résultats servent de référence pour évaluer la performance de l'analyse inverse. Les courbes de traction

obtenues en appliquant l'adaptation 1 de la SIA sur les courbes de flexion non pondérées sont illustrées en rouge à la Figure 6.16a alors que les résultats provenant des courbes de flexion pondérées sont illustrés en bleu à Figure 6.16b. Les courbes moyennes des courbes de traction obtenues avec l'adaptation 1 aux Figure 6.16a et Figure 6.16b sont ensuite regroupées à la Figure 6.16c avec illustration de la dispersion au pic.

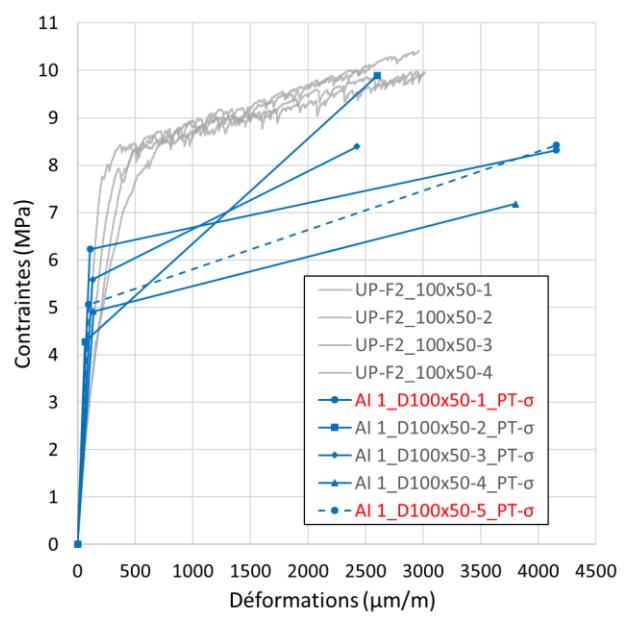
Dans la légende des Figure 6.16a (sans pondération) et Figure 6.16b (avec pondération), certains spécimens sont indiqués par un texte rouge. Il s'agit de dallettes pour lesquelles certains problèmes ont été rencontrés lors de l'application de l'adaptation 1 de l'analyse inverse de la SIA. Pour ces spécimens, la valeur de f_{Utu} obtenue avec l'Équation (5.1) était plus grande que les valeurs de σ_{Uti} calculées avec l'Équation (2.21) et donc que les dix points d'interpolations de la SIA (Section 2.3.3). Ceci fait en sorte que la localisation, qui a normalement lieu lorsque σ_{Uti} dépasse f_{Utu} ne peut être obtenue avant le pic. Pour ces spécimens spécifiquement, la déformation ultime retenue, et présentée sur les Figure 6.16a et b sont correspond à la valeur de déformation du dernier point d'interpolation linéaire correspondant au pic de flexion, ce qui induit des valeurs de déformations ultimes (ε_{Utu}) très grandes par rapport aux autres spécimens (ε_{Ut} supérieures à 4 000 $\mu\text{m/m}$). Ces courbes ont malgré tout été utilisées pour le calcul des courbes moyennes présentées à la Figure 6.16c, puisque la déformation ainsi déterminée n'est pas complètement hors champ par rapport à celle du au spécimen D100x50-4 (entre 3 500 et 4 000 $\mu\text{m/m}$, Figure 6.16a et Figure 6.16b) pour lequel l'adaptation 1 de la SIA a pu être adéquatement appliquée (texte en noir dans la légende). Il est donc possible que les spécimens D100x50-1 (Figure 6.16a et b) et D100x50-5 (Figure 6.16b) aient des déformations ultimes assez grandes et que la déformation donnée par le pic de flexion soit légèrement erronée, mais représentative pour ces spécimens.

La comparaison des courbes moyennes à la Figure 6.16c permet de voir l'impact de la pondération des contraintes due à l'orientation et la densité des fibres sur la performance de l'adaptation 1 de la SIA. La pondération, qui est jugée essentielle pour une bonne cohérence entre les spécimens de traction et de flexion, augmente les valeurs de f_{Utu} et ε_{Utu} obtenues du calcul inverse en plus de réduire la dispersion des déformations ultimes. La dispersion des contraintes ultimes est cependant légèrement augmentée puisque la pondération a augmenté la dispersion de la contrainte au pic de résistance des courbes de flexion (Section 6.4.4). L'analyse inverse selon l'adaptation 1 de la SIA pour le UP-F2 sous-estime encore la contrainte ultime malgré l'augmentation de la contrainte f_{Utu}

avec l'Équation (5.1) et la pondération des courbes de flexion selon l'orientation et la densité des fibres (Figure 6.16c). Il est préférable d'avoir une méthode qui sous-estime les contraintes dans un contexte normatif que l'inverse. L'adaptation 1 du calcul inverse permet également de diminuer la surestimation des déformations ultimes de la méthode SIA originale (Figure 5.6, Section 5.2). La déformation ultime moyenne obtenue avec les courbes pondérées (courbe bleue) est légèrement plus grande que celles obtenues sur les os de traction directe (courbes grises), mais les déformations ultimes des os se situent dans la dispersion des déformations ultimes des courbes pondérées (Figure 6.16c). Il est également important de rappeler que les déformations ultimes de deux courbes sur cinq, pour les courbes de flexion pondérées, sont trop grandes dues à la mauvaise performance de l'adaptation 1 (Figure 6.16b), ce qui augmente artificiellement la déformation moyenne ultime obtenue de l'analyse inverse.

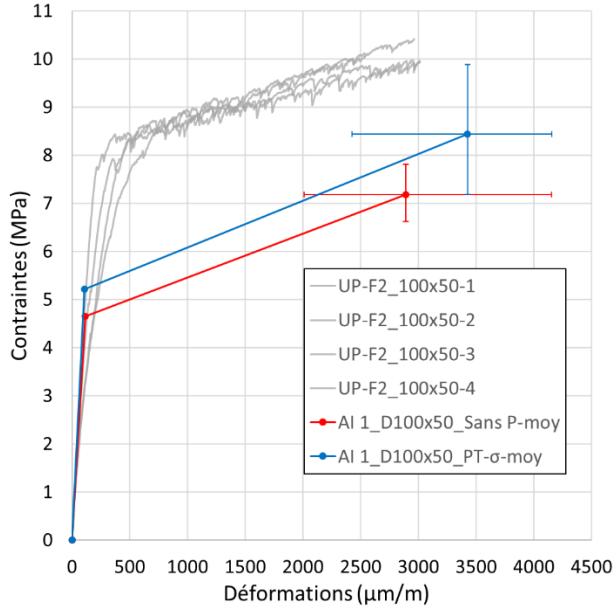


a) Sans pondération (courbe originale)



b) Avec pondération sur la contrainte

Figure 6.16 Performance de l'adaptation 1 de la méthode SIA appliquée sur les courbes de flexion pondérées et non-pondérées des dallettes 100x50 de UP-F2



c) Courbes moyennes avec dispersion à l'ultime

Figure 6.16 Performance de l'adaptation 1 de la méthode SIA appliquée sur les courbes de flexion pondérées et non-pondérées des dalles 100x50 de UP-F2 (suite)

La performance de l'adaptation 1 a également été évaluée sur les dalles 100x50 de UP-F3. Les courbes de traction obtenues de l'adaptation 1 du calcul inverse sur les courbes de flexion non pondérées sont présentées en rouge à la Figure 6.17a et celles obtenues des courbes de flexion pondérées sont présentées en bleu à la Figure 6.17b. Les courbes moyennes associées sont ensuite regroupées et comparées à la Figure 6.17c. Les courbes de traction directe en gris représentent les deux os 100x50 sans renfort et servent de comportement de référence en traction pour le UP-F3.

Le même type de problème d'analyse que pour certaines dalles de UP-F2 (pas d'intersection entre les points d'interpolations σ_{Uti} et f_{Utu}) s'est également produit pour certaines dalles de UP-F3. Les spécimens en question sont indiqués rouge dans les légendes des Figure 6.17a et Figure 6.17b. Cependant, contrairement à ce qui a été observé pour le UP-F2 (f_{Utu} supérieure à σ_{Uti}), la contrainte f_{Utu} était cette fois trop petite par rapport aux contraintes σ_{Uti} des dix points d'interpolation (f_{Utu} inférieure à σ_{Uti}). La déformation ultime pour ces spécimens problématiques a donc été considérée comme étant celle donnée par le premier point d'interpolation. Cette valeur est très petite lorsqu'elle est comparée à la déformation ultime obtenue en traction directe sur les os (courbes grises).

Sur les Figure 6.17a et b, trois spécimens sur cinq (D100x50-3 à 5) ont rencontré ce problème (f_{Utu} inférieure à σ_{Uti}). Les déformations ultimes obtenues par analyse inverse pour ces spécimens sont donc les plus petites (inférieures à 1 200 $\mu\text{m}/\text{m}$) que ce soit pour les courbes de flexion sans pondération (Figure 6.17a) ou avec pondération (Figure 6.17b). Même si les déformations ultimes des deux autres courbes (D100x50-1 et 2) sont un peu plus grandes, elles restent également dans le même ordre de grandeur. Ainsi, les déformations ultimes sont assez faibles comparées à celles obtenues en traction directe, peu importe si elles proviennent des courbes pondérées ou non pour tenir compte des différences d'orientation et de densité des fibres. L'adaptation 1 de la SIA n'est donc pas très performante pour obtenir les déformations ultimes (ε_{Utu}) du UP-F3.

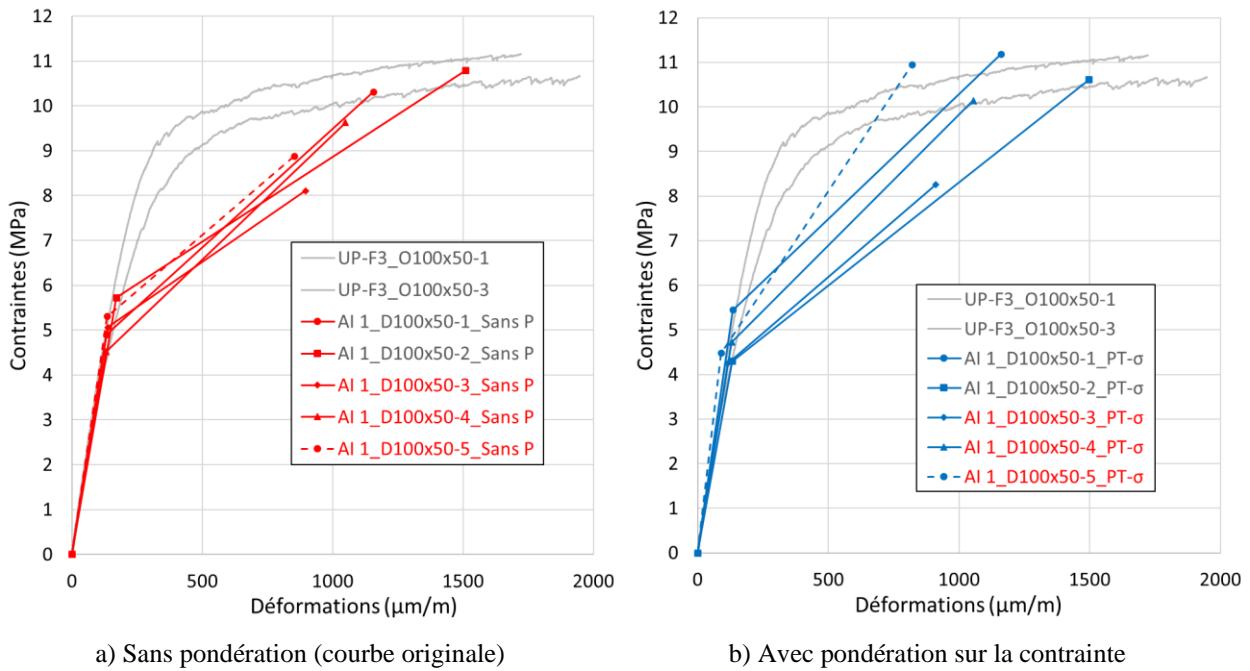
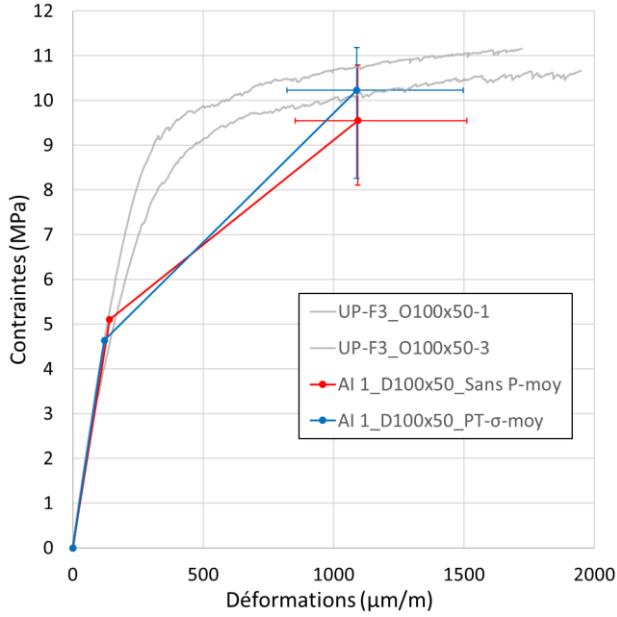


Figure 6.17 Performance de l'adaptation 1 de la méthode SIA appliquée sur les courbes de flexion pondérées et non-pondérées des dallettes 100x50 de UP-F3



c) Courbes moyennes avec dispersion à l'ultime

Figure 6.17 Performance de l'adaptation 1 de la méthode SIA appliquée sur les courbes de flexion pondérées et non-pondérées des dallettes 100x50 de UP-F3 (suite)

La valeur de la contrainte ultime obtenue avec l'adaptation 1 de la méthode SIA est cependant assez bonne en comparaison à celle obtenue en traction directe. La pondération des contraintes mesurées en flexion pour tenir compte de l'orientation et de la densité de fibres permet également d'augmenter f_{Utu} et donc de réduire l'écart entre les résultats d'analyse inverse avec cette méthode et les résultats de traction directe. Il est important de rappeler que la contrainte f_{Utu} est trop faible pour 3 spécimens sur 5 par rapport aux points d'interpolation. Celle-ci devrait donc être légèrement plus grande si la méthode fonctionnait adéquatement et cela augmenterait également les déformations ultimes.

Les Figure 6.16 et Figure 6.17 permettent de conclure que la méthode adaptée 1 de la SIA n'est pas très performante pour les dallettes 100x50 en UP-F2 et en UP-F3 malgré les améliorations amenées par cette méthode (Section 5.2.1). Pour les deux BFUP, des problèmes se sont produits pour plusieurs spécimens lors de l'utilisation de la contrainte ultime f_{Utu} pour déterminer la localisation de la contrainte ultime de traction en flexion et donc pour déterminer la déformation ultime (ϵ_{Utu}). L'utilisation de deux profils de contraintes simplifiés différents pour déterminer les

coordonnées du même point ultime (hypothèse H2 et H3, Section 2.3.3) ne semble pas adaptée aux configurations d'essai et BFUP étudiés.

6.7 Performance de l'adaptation 2 – Ajustement de la déformation au pic et profil de contraintes unique

La performance de l'adaptation 2 de la méthode SIA a été évaluée sur les mêmes courbes que celles utilisées pour l'adaptation 1. Pour rappel, la méthode adaptée 2, décrite en détail à la Section 5.2.2, supprime l'utilisation du profil de contraintes constant utilisé pour déterminer la contrainte ultime f_{Utu} dans la méthode originale. Cette contrainte f_{Utu} n'est donc plus utilisée pour la détermination de la déformation ultime ε_{Utu} . Un seul profil de contraintes est maintenant utilisé, soit le profil de contraintes bilinéaire en traction de l'hypothèse H2 de la méthode originale (Section 2.3.3) et les deux coordonnées du point ultime en traction (σ_{Utu} et ε_{Utu}) sont déterminées à partir de ce profil. Aussi, afin de déterminer le moment de localisation (correspondant à ce point ultime en traction) dans la courbe de flexion, deux méthodologies sont étudiées, soit de se baser sur une un pourcentage de la hauteur plastifiée de localisation (α_{loc}) ou sur un ratio entre la force de localisation et la force au pic (r_{loc}). Pour décider lequel de ces critères de localisation est le plus pertinent à utiliser pour les BFUP étudiés dans le présent projet de recherche, ces critères ont été déterminés aux moments où la fissure principale atteint une ouverture de 80 µm ou de 50 µm pour le UP-F2 et le UP-F3 respectivement. Ces critères de fissuration en lien avec le moment de localisation ont été déterminés précédemment, à la Section 6.5.2, lors de l'évaluation de l'évolution de la fissuration dans les dallettes en flexion. Le Tableau 6.8 regroupe les temps d'essais (données du DIC) T_{loc} associés à ces critères d'ouvertures de fissures (T_{loc} correspond donc à $T_{\omega=0.08}$ pour le UP-F2 et $T_{\omega=0.05}$ pour le UP-F3). Le temps de localisation T_{loc} est l'endroit privilégié pour déterminer le meilleur critère de localisation, puisque la déformation à la fibre inférieure des dallettes en flexion à T_{loc} est très proche de celle mesurée sur une distance de 100 mm en traction (Section 6.5.3). Les pourcentages de la hauteur plastifiée (α_{loc}) et les ratios entre la force de localisation et la force au pic (r_{loc}) déterminés à T_{loc} sont regroupés au Tableau 6.8.

Tableau 6.8 Impacts du temps de localisation obtenu avec l'étude de la fissuration sur les deux critères de localisation (α_{loc} et r_{loc}) possibles pour la méthode adaptée 2 de la SIA

Matériaux	Spécimen	T _{loc} (secondes)	α_{loc} (%)	r _{loc}
UP-F2	D100x50-1	421	75%	92%
	D100x50-2	319	66%	86%
	D100x50-3	461	75%	95%
	D100x50-4	478	75%	96%
	D100x50-5	455	76%	96%
MOYENNE		454	75%	93%
UP-F3	D100x50-1	501	65%	98%
	D100x50-2	439	61%	92%
	D100x50-3	351	60%	95%
	D100x50-4	324	55%	86%
	D100x50-5	433	59%	89%
MOYENNE		410	60%	92%

Le Tableau 6.8 montre la différence entre les pourcentages de la hauteur plastifiée de localisation (α_{loc}) dans la section des dallettes en UP-F2 et en UP-F3. Une valeur de 75% signifie que 75% de la hauteur totale du spécimen (h_m) est plastifiée et donc que les contraintes sont constantes (sur le profil de contraintes bilinéaire de la SIA) sur cette hauteur (Figure 2.24, Section 2.3.3). Il est tout d'abord possible de constater que la variabilité des valeurs de α_{loc} est moins grande pour le UP-F2 que pour le UP-F3. En ce qui concerne les valeurs moyennes de α_{loc} , la valeur pour les dallettes de UP-F2 (75%) est plus grande que celle obtenue pour les dallettes de UP-F3 (60%). Cette grande différence (15%) a un impact important sur le résultat de l'analyse inverse de l'adaptation 2 tel que présenté à la Section 5.2.2. Il ne semble donc pas possible de déterminer une valeur unique de α_{loc} pour les deux BFUP et une telle valeur devrait donc être ajustée pour chaque nouveau BFUP testé, ce qui représenterait un travail de grande envergure à chaque fois.

Les ratios moyens entre la force de localisation et la force au pic (r_{loc}) résumés au Tableau 6.8 sont beaucoup plus uniformes pour les deux BFUP à dosage en fibres différent tel que discuté à la Section 6.5.2, malgré une variabilité un peu plus grande au sein d'un même BFUP par rapport à α_{loc} (surtout pour le UP-F2). Ce ratio de force semble donc le critère de localisation le plus pertinent pour obtenir la meilleure performance de l'analyse inverse adaptée 2 de la SIA. C'est donc ce critère qui a été utilisé pour évaluer la performance de cette méthode sur le UP-F2 et le UP-F3. Ceci signifie que le point de la courbe de flexion pour lequel la force est égale au pourcentage déterminé (r_{loc}) de la force au pic de flexion (F_{max}) est celui sélectionné pour calculer la déformation

ultime (ε_{Utu}) et la contrainte ultime (σ_{Utu}). Ce point est illustré par un cercle bleu sur la Figure 6.18. La force maximale (carré blanc et bleu) et la force associée à 93% de la force maximale (ligne pointillée verte) sont également présentées sur la Figure 6.18.

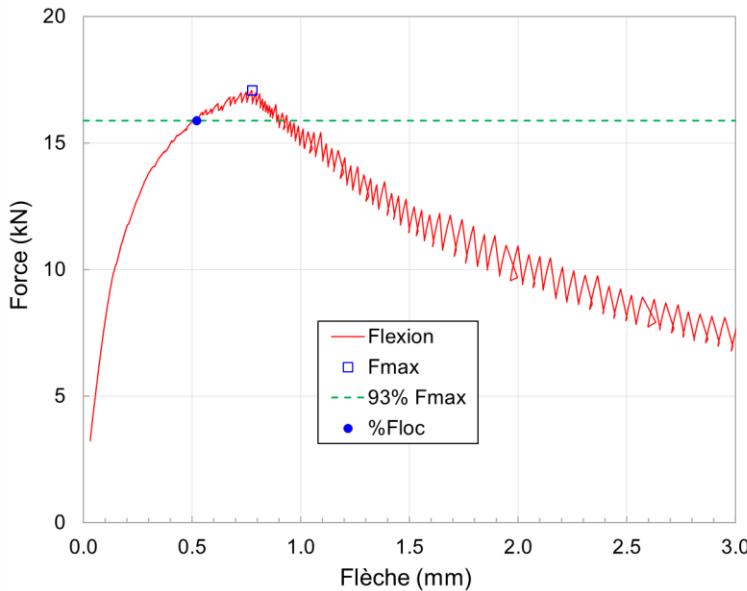


Figure 6.18 Exemple illustrant l'emplacement du point de localisation déterminé avec r_{loc} sur une courbe de flexion de UP-F2

Les résultats provenant de l'application de l'adaptation 2 de la SIA sont présentés de la même manière que pour l'adaptation 1. La Figure 6.19a présente les résultats pour les courbes de traction obtenues de l'adaptation 2 de l'analyse inverse appliquée sur les courbes non pondérées de flexion (courbes rouges) et la Figure 6.19b présente les résultats pour les courbes de traction obtenues de l'analyse inverse appliquée sur les courbes pondérées de flexion (courbes bleues), pour les dalles 100x50 en UP-F2. Les courbes individuelles des os en traction sont également présentées en gris à la Figure 6.19. Contrairement à la méthode adaptée 1 (section 6.6), aucun problème n'a été rencontré lors de l'application de la méthode adaptée 2. Les courbes moyennes présentées à la Figure 6.19c sont donc bien représentatives du comportement moyen obtenu de cette méthode.

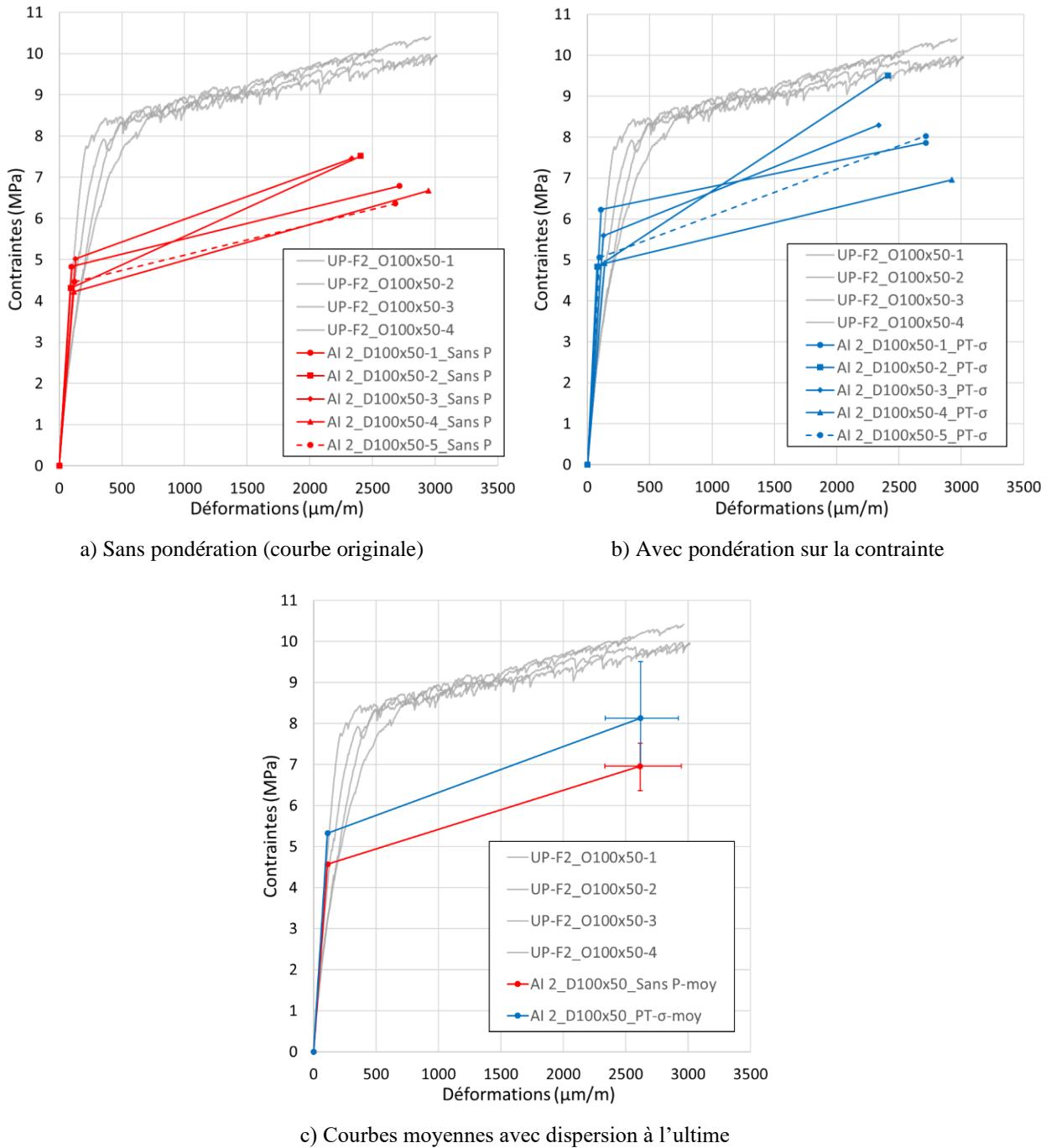


Figure 6.19 Performance de l'adaptation 2 de la méthode SIA appliquée sur les courbes de flexion pondérées et non-pondérées des dallettes 100x50 de UP-F2

La Figure 6.19a et la Figure 6.19b montrent l'impact de la pondération des contraintes appliquée sur les courbes de flexion pour tenir compte de l'effet de l'orientation et de la densité des fibres.

La contrainte ultime (σ_{Utu}) obtenue de l'analyse inverse adaptée 2 est augmentée pour les courbes de flexion pondérées (Figure 6.19b) par rapport aux courbes de flexion non pondérées (Figure 6.19a), tandis que la déformation ultime est presque inchangée, ce qui est logique puisqu'aucune pondération n'a été appliquée sur la flèche tel qu'indiqué à la section 6.4.4. Cet impact de la pondération des courbes de flexion peut également être observé en comparant le comportement moyen des deux types de courbes à la Figure 6.19c. La pondération augmente également la dispersion des contraintes ultimes obtenue par la méthode adaptée 2, tel qu'observé sur les barres d'erreurs des courbes moyennes de la Figure 6.19c. Cela est également cohérent avec l'impact de la pondération sur les courbes de flexion, puisque celle-ci avait augmenté la dispersion des courbes de flexion à la section 6.4.4. Les résultats obtenus via la méthode adaptée 2 de la SIA sont donc intimement liés au comportement en flexion des dalles 100x50.

La performance de l'adaptation 2 sur le UP-F2 est meilleure que celle de l'adaptation 1. La dispersion des déformations et des contraintes ultimes de l'adaptation 2 sur la Figure 6.19c est beaucoup plus faible que ce qui avait été noté à la Figure 6.16c pour l'adaptation 1. La déformation ultime moyenne obtenue avec l'adaptation 2 (Figure 6.19c) est également très près de celle observée sur les os 100x50 (courbes grises) et la contrainte ultime moyenne est un peu plus faible que celle des os. Tel que discuté plus tôt, il n'est pas trop préoccupant de légèrement sous-estimer les contraintes ultimes obtenues par analyse inverse dans un contexte normatif. Cependant, le fait que ces contraintes soient sous-estimées par rapport à celles obtenues en traction directe sur les os pour les deux adaptations de la SIA (Figure 6.16c et Figure 6.19c) indique une différence de performance entre le comportement des os de traction et celui des dalles en flexion pour UP-F2. Cette différence s'explique en partie par l'orientation et la densité des fibres, mais la pondération n'améliore pas suffisamment les résultats en flexion pour obtenir une contrainte ultime avec l'analyse inverse aussi grande que celle observée en sur les os de traction pour le UP-F2.

La performance de l'adaptation 2 a également été évaluée sur les dalles 100x50 en UP-F3. Les résultats sont présentés à la Figure 6.20, en conservant exactement le même format que celui utilisé à la Figure 6.19 pour les résultats sur UP-F2, soit les courbes individuelles de traction en gris, les résultats de l'analyse inverse appliquée sur les courbes de flexion non-pondérées en rouge et ceux provenant des courbes de flexion pondérées en bleu.

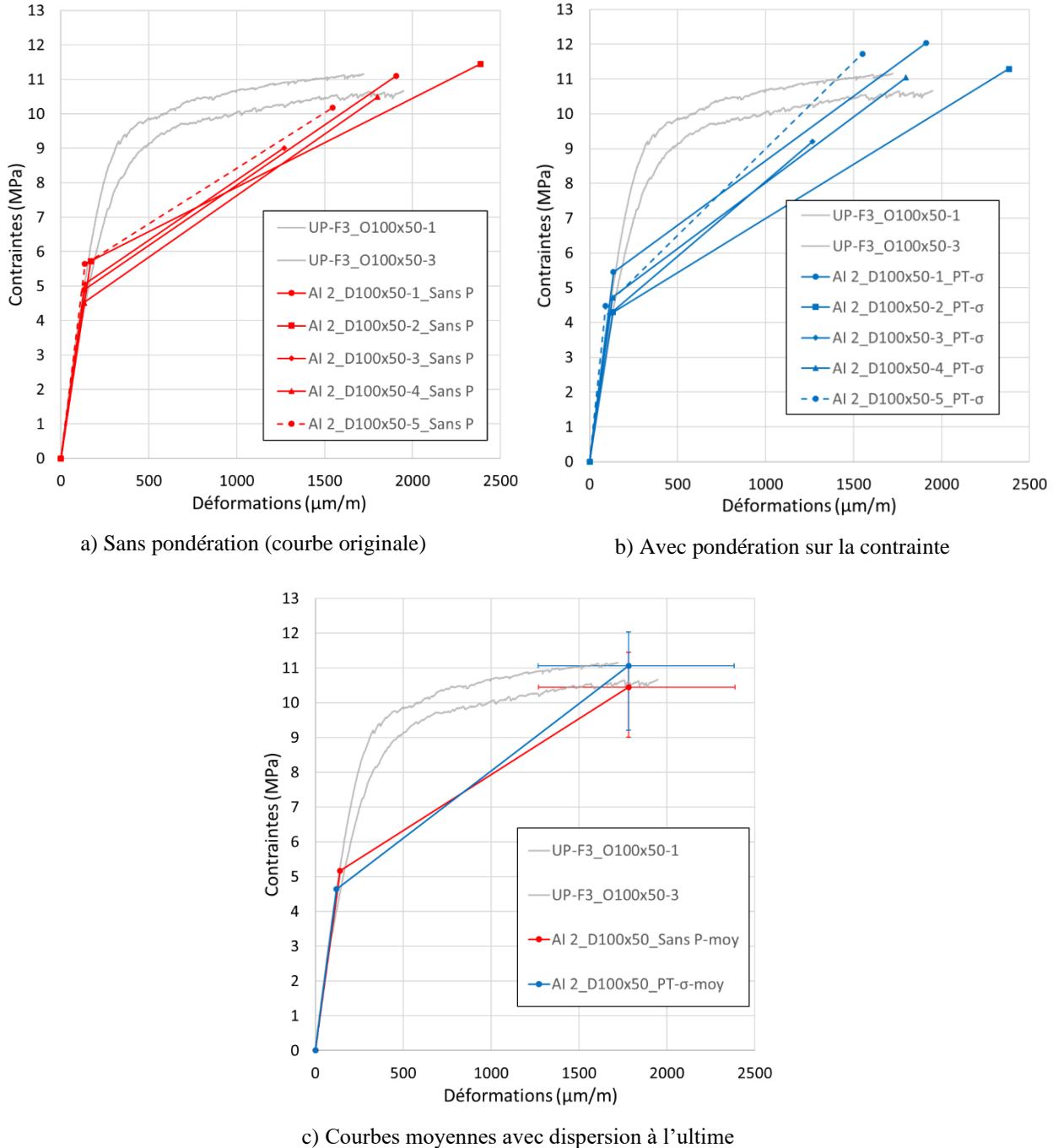


Figure 6.20 Performance de l'adaptation 2 de la méthode SIA appliquée sur les courbes de flexion pondérées et non-pondérées des dallettes 100x50 de UP-F3

La comparaison entre les résultats d'analyse inverse de l'adaptation 2 sur le UP-F3 pour les courbes de flexion non pondérées (Figure 6.20a) et les courbes pondérées (Figure 6.20b) montre encore une

fois que la pondération augmente la contrainte ultime, sans modifier la déformation ultime. L'augmentation de contrainte est cependant moins grande que pour le UP-F2, ce qui est cohérent avec les facteurs de pondération qui étaient plus faibles pour le UP-F3 (Section 6.4.4). La dispersion des déformations ultimes est plus importante pour le UP-F3 (Figure 6.20) que pour le UP-F2 (Figure 6.19). Cela s'explique par la plus grande dispersion des flèches au pic pour les dallettes 100x50 en UP-F3 que pour celles en UP-F2. Encore une fois, les résultats d'analyse inverse de l'adaptation 2 sont très cohérents avec le comportement en flexion des dallettes, ce qui est un atout pour cette méthode. L'emplacement du point ultime moyen en contrainte (σ_{Uu}) et en déformation (ε_{Uu}) obtenu avec l'analyse inverse adaptée 2 sur les courbes de flexion pondérées (courbe bleue de la Figure 6.20c) est très près du point ultime des os en traction directe (courbes grises). La performance de l'adaptation 2 pour les dallettes 100x50 en UP-F3 est donc excellente.

En résumé, l'adaptation 2 de la méthode SIA qui utilise un seul profil de contraintes bilinéaire simplifié et qui ajuste la déformation ultime via un facteur réducteur C offre une bonne performance pour le UP-F2 et une excellente performance pour le UP-F3. Les résultats de l'adaptation 2 semblent également très cohérents avec le comportement en flexion du matériau. L'adaptation 2 est donc très bien adaptée aux matériaux UP-F2 et UP-F3 qui représentent certains des BFUP utilisés actuellement dans l'industrie. Pour renforcer davantage cette conclusion, la performance des deux adaptations a également été évaluée, à la section suivante, sur les autres BFUP étudiés au Chapitre 5.

6.8 Comparaison de la performance des deux adaptations pour plusieurs BFUP

Pour mieux conclure sur la performance des deux adaptations de la méthode de calcul inverse de la SIA, celle-ci a également été évaluée sur quatre autres BFUP. Ces BFUP sont le KING 2%, le KING 3%, le KING 4% et le BFUP3 utilisés au Chapitre 5 pour développer les adaptations (Figure 5.1). Ces BFUP possèdent un dosage volumique en fibres variant de 2 à 4%. Les analyses inverses comprenant les adaptations 1 ou 2 ont été réalisées sur les dallettes 150x50 testées en flexion pour ces quatre BFUP. Les paramètres utilisés pour ces analyses sont ceux calibrés et validés aux sections 6.6 et 6.7 sur les BFUP UP-F2 et UP-F3, soient une hauteur tendue égale à 80% de la hauteur totale de ces dallettes pour le calcul de f_{Uu} de l'adaptation 1, une valeur du facteur réducteur

de déformation C de 0.67 pour les deux adaptations et une force de localisation égale à 93% de la force maximale pour l'adaptation 2.

La Figure 6.21, qui s'étend sur deux pages, résume les résultats pour les six BFUP (UP-F2, UP-F3 et les 4 autres BFUP mentionnés ci-dessus). Les courbes en gris représentent les résultats individuels de traction sur os 100x50 et la courbe rouge est la courbe moyenne associée. Ces résultats de traction servent de référence pour évaluer la performance de l'analyse inverse. La courbe en bleu représente la courbe moyenne de traction résultant de l'analyse inverse lorsque l'adaptation 1 est appliquée sur les courbes de comportement en flexion des dalles, pour le BFUP étudié, tandis que la courbe en vert représente la courbe moyenne de traction obtenue avec l'adaptation 2. Pour le UP-F2 et UP-F3 (Figure 6.21a et Figure 6.21b respectivement), la courbe de traction moyenne provenant de l'analyse inverse qui a été retenue est celle provenant des courbes de flexion pondérées.

Il est important de mentionner qu'aucun problème d'analyse ne s'est produit lors du traitement des résultats avec la méthode adaptée 1 pour les trois BFUP KING (Figure 6.21c, d et e), contrairement aux BFUP UP-F2 et UP-F3 tel qu'indiqué à la section 6.6. C'est d'ailleurs probablement ce qui explique la faible différence de performance entre la méthode adaptée 1 (courbes bleues) et la méthode adaptée 2 (courbes vertes) pour les BFUP KING. La méthode adaptée 1 donne donc de très bons résultats pour ces BFUP qui présentent une bonne capacité de déformation en traction (3 500 et 2 800 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les BFUP KING 2 et 3% respectivement, Figure 5.1). En comparaison, les BFUP UP-F2 et UP-F3 ont montré des déformations en traction un peu plus faibles pour les mêmes pourcentages de fibres (2 900 et 1 800 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le UP-F2 et UP-F3 respectivement, Figure 6.10). La méthode adaptée 2, quant à elle, donne de très bons résultats pour les cinq BFUP, qu'ils aient une faible ou une grande capacité de déformation, ce qui la rend plus polyvalente pour reproduire le comportement en traction de différents BFUP commercialisés.

La comparaison entre la performance de la méthode adaptée 2 de la SIA pour les BFUP KING et les BFUP UP-F2 et UP-F3 permet également de conclure que cette méthode performe aussi bien sur des dalles 100x50 (UP-F2 et UP-F3) que sur des dalles 150x50 (BFUP KING). L'élancement (L/h) est identique pour ces deux géométries, ce qui permet de penser que le ratio de localisation (r_{loc}) de 93% est valide pour des spécimens ayant un élancement égal à 6 ($L/h = 6$), peu importe sa largeur.

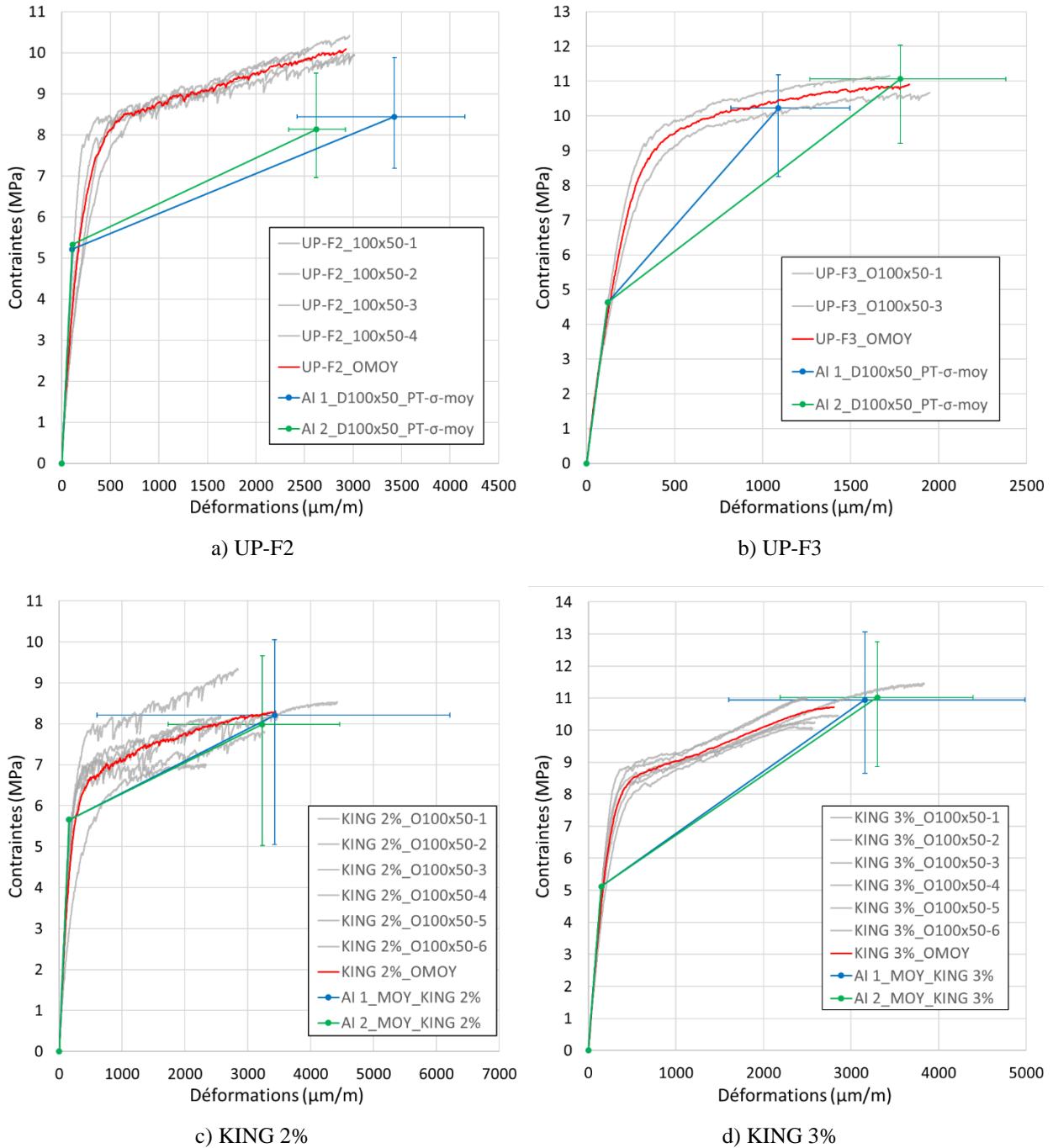


Figure 6.21 Performance de l'analyse inverse avec les adaptations 1 et 2 sur six BFUP

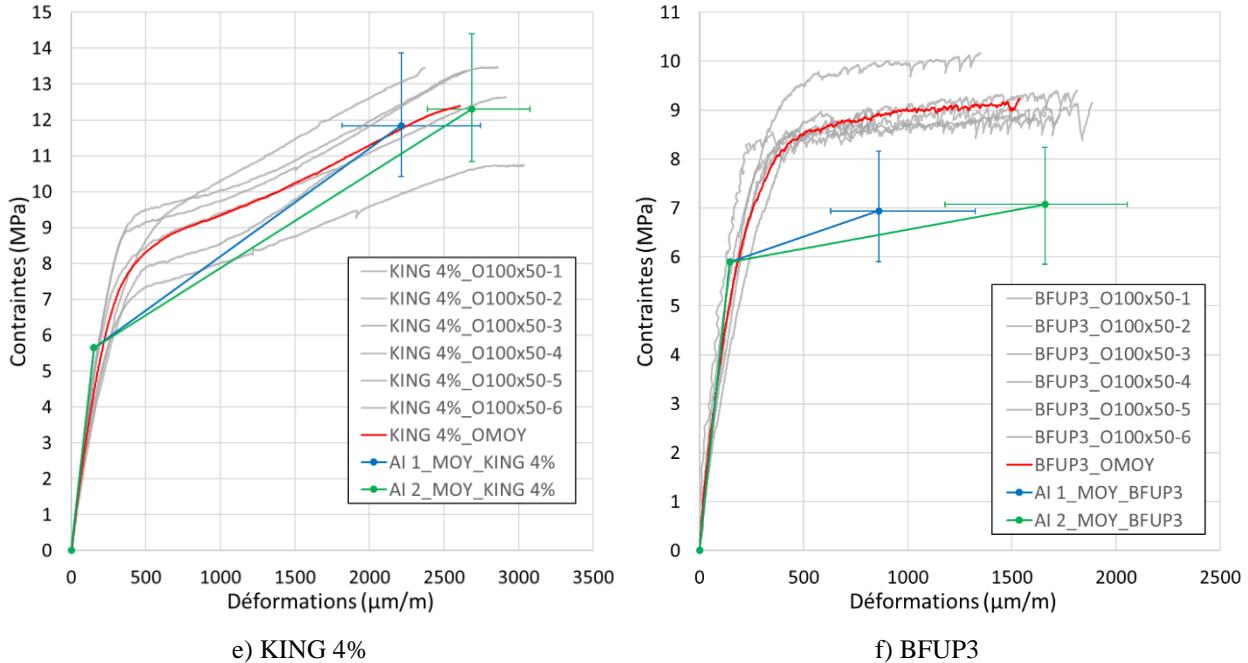


Figure 6.21 Performance de l'analyse inverse avec les adaptations 1 et 2 sur six BFUP (suite)

Pour ce qui est du BFUP3, la méthode adaptée 1 n'a pas donné de bons résultats. Le même problème d'analyse qui s'est produit sur 3 dallettes en UP-F3 (Section 6.6) s'est également produit pour tous les spécimens en BFUP3. C'est pour cette raison que la déformation ultime moyenne donnée par la méthode adaptée 1 pour le BFUP3 est très faible (Figure 6.21f). L'utilisation de la méthode adaptée 2 sur le BFUP3 permet cependant d'améliorer grandement les résultats de l'analyse inverse. La déformation ultime obtenue avec l'adaptation 2 est beaucoup plus grande que celle obtenue en appliquant l'adaptation 1 et elle est similaire à ce qui est observé sur les os de traction directe. La contrainte ultime reste cependant très faible, ce qui est probablement dû à une moins bonne orientation et densité des fibres dans les spécimens en flexion pour le BFUP3 que pour les spécimens de traction. L'analyse de l'orientation et de la densité des fibres n'a pas été réalisée pour le BFUP3 pour confirmer cette hypothèse, mais la méthode de mise en place différente utilisée entre les spécimens de flexion et de traction pour ce matériau tend à supporter cette hypothèse (Section 3.1.2).

En résumé, la méthode adaptée 1 de la méthode de calcul inverse de la SIA n'est pas beaucoup plus performante pour les BFUP étudiés dans le présent projet de recherche que la méthode SIA

originale. Le seul avantage de cette méthode par rapport à la méthode SIA est qu'elle diminue un peu la déformation ultime obtenue. Plusieurs problèmes sont survenus lors de l'utilisation de la méthode adaptée 1 pour les BFUP ayant une déformabilité plus faible (UP-F2, UP-F3 et BFUP3). Cela permet donc de conclure que l'hypothèse de profil de contraintes constant nécessaire au calcul de la contrainte ultime (f_{Utu}) de l'adaptation 1 et de la méthode SIA originale (hypothèse H3, Section 2.3.3) n'est pas adaptée à tous les types de BFUP.

Pour sa part, la méthode adaptée 2 est l'adaptation de la méthode de calcul inverse de la SIA la plus performante pour le contexte canadien des essais de caractérisation des BFUP. Le critère de force de localisation (r_{loc}) de 93% de la force maximale en flexion nécessaire pour l'adaptation 2 semble être valide pour un élancement (L/h) de 6 et des BFUP ayant différents comportements en traction (résistance et capacité de déformation) dû à différents dosages en fibres. Cela rend l'adaptation 2 de la méthode SIA méthode beaucoup plus polyvalente.

6.9 Synthèse

Le Chapitre 6 porte sur la validation des deux adaptations de la méthode SIA développées au Chapitre 5. Cette validation est réalisée sur deux BFUP (UP-F2 et UP-F3) qui sont caractérisés en traction et en flexion lors de la campagne expérimentale finale. La campagne expérimentale finale permet d'étudier l'orientation et la densité des fibres ainsi que l'évolution de la fissuration pour les matériaux UP-F2 et UP-F3. L'analyse de ces paramètres est primordiale pour améliorer la performance des adaptations 1 et 2 de la SIA. Les conclusions tirées du Chapitre 6 sont les suivantes.

- Les os de traction O50x50 (minces et carrés) sont plus résistants et permettent des déformations ultimes plus grandes que les os O100x50 (minces et rectangulaires) pour les matériaux UP-F2 et UP-F3. La fissuration principale des os O50x50 se produit majoritairement dans la section réduite (endroit souhaité), tandis que cette fissuration se produit majoritairement dans le changement de section (non souhaité) pour les os O100x50.
- Les dallettes 100x50 sont plus résistantes et se déforment plus au pic de résistance en flexion que les prismes 100x100 pour les matériaux UP-F2 et UP-F3. La dispersion des résultats au pic de résistance est beaucoup plus élevée pour les prismes 100x100 que pour les dallettes 100x50.

- L'orientation et la densité des fibres dans les os O50x50 est généralement plus favorable que celle des os O100x50, ce qui explique la meilleure performance des os O50x50. L'orientation des fibres et la densité pour les prismes 100x100 est moins favorable que pour les dallettes 100x50, ce qui explique la moins bonne performance et la plus grande dispersion en flexion des prismes. Or l'orientation et la densité des fibres est semblable entre les os O100x50 et les dallettes 100x50. L'orientation et la densité des fibres entre les spécimens de même géométrie en flexion et en traction est donc très similaire étant donné les effets de bord et d'écoulement similaire. En conclusion, les dallettes 100x50 en flexion et les os O100x50 en traction sont les géométries qui ont été utilisées pour évaluer la performance des adaptations 1 et 2 de la méthode d'analyse inverse SIA.
- La longueur de la zone de mesure sur les os en traction a un impact important sur les déformations enregistrées. Plus la longueur de mesure sur les os est grande (400 mm vs 300 mm vs 100 mm), plus la déformation calculée au pic de résistance est petite. La déformation au pic calculée avec les LVDT (400 mm) est environ 33% plus faible que celle calculée avec le DIC sur 100 mm. Le DIC permet également de calculer la déformation à la fibre inférieure en traction des spécimens de flexion sur 100 mm, et cette déformation est très similaire à celle enregistrée sur une longueur de 100 mm en traction sur les os. Il est donc primordial d'analyser une longueur de mesure similaire en traction et en flexion pour comparer les déformations issues des deux essais, ou de déterminer une correction pour passer des déformations de l'essai de flexion à celui de l'essai de traction. Ici, les analyses ont démontré que comparer les déformations d'une dallette avec une zone de moment constant de 100 mm donne une déformation équivalente à une zone tendue de 100 mm mesurée avec le DIC sur un os de traction. Aucune correction est alors requise avec des essais instrumentés avec le DIC. Or, la configuration d'essai en traction avec LVDT (la plus couramment utilisée) couvre une zone de 400 mm et correspond à 67% des déformations sur la dallette. Dans ce cas spécifique, la configuration des essais de traction et de flexion du présent projet fait en sorte qu'un facteur réducteur C égal à 0.67 doit être utilisé pour les deux adaptations de la méthode SIA.
- L'ouverture de fissure qui indique la localisation de la fissuration dans l'essai de traction est différente pour les matériaux UP-F2 et UP-F3. La fissure principale (macrofissure) devient dominante lorsqu'elle atteint une ouverture de 80 µm pour le UP-F2 et 50 µm pour

le UP-F3 de dosage en fibres différent. Cette ouverture de fissure permet de déterminer le moment de localisation de la fissuration en flexion et l'endroit de cette localisation sur la courbe de flexion. Cet endroit correspond à un ratio de force de localisation (r_{loc}) uniforme de 93% pour les deux BFUP rendant ce critère intéressant pour l'analyse inverse. La hauteur plastifiée de localisation (α_{loc}) est très différente pour les deux BFUP (75% pour le UP-F2 et 60% pour le UP-F3) rendant ce critère difficilement applicable pour l'analyse inverse de divers matériaux. Par conséquent, le ratio de localisation ($r_{loc} = 93\%$) est donc utilisé pour évaluer la performance de l'adaptation 2 de la SIA et non la hauteur plastifiée de localisation (α_{loc}).

- La performance de la méthode adaptée 1 n'est pas très bonne puisqu'elle surestime les déformations ultimes pour le UP-F2 et les sous-estime pour le UP-F3 par rapport aux déformations obtenues en traction directe. La méthode adaptée 1 de la SIA performe bien pour des courbes de flexion où la flèche au pic est plus grande comme celle observée sur les matériaux KING 2 à 4%. Des problèmes sont survenus lors de la détermination de la déformation ultime (ε_{Utu}) avec le profil constant nécessaire pour déterminer f_{Utu} . L'utilisation du profil de contraintes constant pour déterminer la contrainte ultime en traction avec l'analyse inverse n'est pas adéquat pour tous les BFUP.
- La méthode adaptée 2 performe très bien pour 5 mélanges de BFUP utilisés dans l'industrie (UP-F2, UP-F3 et les KING 2 à 4%), soit des BFUP avec une capacité de déformation plus ou moins grande. La déformation et la contrainte ultimes données par cette méthode sont équivalentes à ce qui est obtenu sur les os O100x50 en traction directe. La performance de la méthode adaptée 2 est également très similaire à celle de la méthode adaptée 1 lorsque celle-ci fonctionne bien, soit pour des matériaux avec une plus grande flèche au pic de résistance en flexion (KING 2 à 4%). La méthode adaptée 2 est donc beaucoup plus polyvalente que la méthode adaptée 1 et devrait être priorisée pour déterminer le comportement en traction à partir du comportement en flexion d'un BFUP.

CHAPITRE 7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

7.1 Rappel du contexte et des objectifs

La conception d'éléments en BFUP requiert une excellente connaissance du comportement en traction du matériau. Ce dernier peut être déterminé par essai de traction directe ou par un calcul inverse appliqué aux résultats d'un essai de flexion. L'essai de traction directe étant complexe à réaliser, l'essai de flexion est très souvent préconisé. Dans ce contexte, le développement d'une méthode d'analyse inverse adaptée au contexte canadien des BFUP est primordial. Actuellement, les méthodes d'analyse inverse existantes considérées par les deux normes canadiennes encadrant la production et la caractérisation du BFUP (CSA A23.01-19) et la conception des structures en BFUP (CSA S6-19) sont très différentes. La méthode SIA a été intégrée dans la norme CSA A23.01-19 et la méthode Lopez 5 points dans la norme CSA S6-19, or elles n'ont pas été calibrées pour le contexte normatif canadien des BFUP. La méthode SIA est d'origine suisse et a été calibrée sur des essais de flexion avec des dallettes rectangulaires, tandis que la méthode Lopez 5 points est espagnole et est issue d'essais de flexion sur prismes carrés. Les propriétés des BFUP et les conditions des essais de traction et de flexion ayant servies à la validation de ces méthodes sont différentes de celles présentes par les normes canadiennes, ce qui entraîne logiquement une performance moindre de ces méthodes pour le contexte canadien.

L'objectif principal de ce projet de recherche était donc de développer une méthode d'analyse inverse fiable et performante pour déduire le comportement en traction des BFUP de l'industrie à l'aide de leur comportement en flexion. Pour y arriver, des configurations d'essais optimales pour les essais de caractérisation en traction et en flexion ont été sélectionnées, ce qui a permis de modifier une des méthodes d'analyse inverse existante (SIA) et d'améliorer sa performance.

Le cheminement nécessaire au développement de cette méthode d'analyse inverse a été décrit en détails aux Chapitre 2 à 6. Les conclusions les plus importantes sont résumées dans le présent chapitre. De plus, des recommandations sont également formulées pour bien expliquer les limitations de la nouvelle méthode d'analyse inverse développée ainsi que les travaux à prévoir pour améliorer davantage cette méthode.

7.2 Conclusions

Les conclusions détaillées des activités de recherche ont été décrites à la fin de chacun des chapitres de résultats, soit les chapitres 4 à 6. Les conclusions majeures tirées du présent projet de recherche sont résumées dans ce qui suit.

- Il est primordial d'obtenir un comportement en traction (résistance ultime et une déformation d'écrouissage) équivalent avec les spécimens de traction directe et les spécimens de flexion sur lesquels le calcul inverse est effectué. Pour ce faire, une attention particulière doit être portée sur le comportement en traction de la section réduite des os en traction directe puisque c'est le comportement de celle-ci qui est comparé avec le comportement de la zone de moment constant des spécimens de flexion. L'orientation et la densité des fibres ont un fort impact sur la résistance et la déformation atteinte par un BFUP, ainsi une attention particulière doit leur être portée pour assurer la similitude du comportement en traction pour les deux types d'essais dans les zones étudiées. La géométrie de la section réduite de l'essai de traction et de la zone de moment constant en flexion, ainsi que l'écoulement du BFUP dans les coffrages lors de la mise en place du matériau doivent logiquement être identiques pour les 2 types de spécimens afin d'assurer une orientation et une densité des fibres similaires. Dans le cadre de ce projet, le programme expérimental finale (Section 6.4.3) a permis de démontrer que les spécimens idéaux utilisés pour comparer des résultats d'analyse inverse avec des résultats de traction directe devaient avoir une section de spécimens identique. Les spécimens retenus dans le cadre du présent projet présentaient les sections suivantes : os en traction directe O100x50 et dallettes rectangulaires 100x50 (section de 100 mm x 50 mm pour les deux). Par ailleurs, si l'orientation et la densité des fibres diffèrent légèrement dans les spécimens utilisés dans les essais de traction et de flexion malgré les recommandations mentionnées, il est recommandé de normaliser les résultats d'essais en fonction de l'orientation et la densité des fibres pour améliorer la comparaison des résultats.
- La plage de mesure de la déformation du BFUP influence grandement les résultats obtenus des essais de caractérisation. Plus la longueur de mesure est grande, moins la déformation calculée pour un essai est élevée. Cela veut donc dire qu'il est primordial d'avoir une longueur de mesure de la déformation dans la section réduite des os identique à la longueur

de la zone de moment constant des prismes en flexion. Si cela n'est pas le cas pour différentes raisons techniques, un facteur de correspondance des déformations doit être utilisé pour obtenir une performance optimale de la méthode de calcul inverse utilisée. C'est ce qui a été fait dans le cadre de ce projet avec les deux adaptations de la méthode SIA proposées dans ce projet de recherche. Les os 100x50 sont les spécimens qui ont été utilisés pour obtenir le comportement en traction directe et une longueur de mesure de la déformation de 400 mm a été utilisée. Les dallettes 100x50 coulées selon la même méthodologie ont été utilisées en flexion pour assurer une orientation et une densité des fibres similaires, mais la longueur de la zone de moment constant était de 100 mm pour ces spécimens. Lors de la calibration de la méthode de calcul inverse réalisée avec les résultats du programme expérimental final (Section 6.5.3), un facteur de correspondance des déformations C de 0.67 a été obtenu dans les deux adaptations de la méthode SIA proposées, pour réduire la déformation mesurée dans l'essai de flexion et la rendre équivalente à celle mesurée dans l'essai de traction. Ce facteur réducteur a ensuite été validé expérimentalement en comparant les déformations mesurées dans les zones uniformes tendues des os de traction et des dallettes de flexion. C'est donc dire que la valeur de 0.67 est valeur adéquate pour représenter l'impact de la différence de longueur de mesure sur les déformations expérimentales dans l'os de traction et dans la dallette de flexion. Le facteur réducteur C est donc primordial pour assurer une bonne performance du calcul inverse selon des principes analytiques de l'ingénierie, mais également pour représenter le comportement expérimental des déformations de traction dans l'essai de traction directe par rapport à celles de l'essai de flexion 4 points.

- Il est impératif d'obtenir la rupture en flexion dans la zone de moment constant du spécimen de flexion, sinon les résultats de l'essai doivent être rejettés. Pour favoriser cette rupture, il est important d'utiliser des spécimens de flexion avec un grand élancement (L/h). Les analyses par éléments finis des différentes configurations d'essais de flexion (Section 5.1.1) ont démontré que les spécimens avec un élancement faible favorisent l'apparition de fissures de cisaillement près des appuis et à l'extérieur de la zone de moment constant. Dans ce projet de recherche, il a été déterminé que des spécimens ayant un élancement de 3 (prismes carrés 100x100) sont plus propices à la propagation d'importantes fissures à l'extérieur de la zone de moment constant que des spécimens avec un élancement de 6

(dallettes rectangulaires 100x50 ou 150x50). Par ailleurs, la calibration de la méthode de calcul inverse avec les résultats du programme expérimental final (Section 6.8) a montré que les spécimens ayant un grand élancement sont également moins rigides en flexion (déplacement au pic de résistance plus grand), ce qui augmente la performance de la méthode de calcul inverse SIA originale et adaptée 1. Dans ce contexte, l'utilisation de spécimens en forme de dallettes de L/h égal à 6 est recommandée pour les essais de flexion.

- Avant d'utiliser une méthode d'analyse inverse, il est important de savoir si celle-ci est adaptée au contexte dans lequel elle est utilisée. La géométrie des spécimens (traction et flexion), l'instrumentation des essais ainsi que les matériaux peuvent tous avoir un impact sur la performance d'une méthode de calcul inverse. Il est possible que certaines hypothèses adoptées par une méthode soient moins performantes ou non applicables pour certaines géométries ou certains matériaux. Par exemple, la méthode d'analyse Lopez 5 points n'est théoriquement pas applicable pour des géométries de spécimens en flexion ayant un élancement (L/h) différent de 3 et 4.5. La méthode SIA, quant à elle, a été validée sur des spécimens très élancés ($L/h = 14$) et adoptent des hypothèses axées sur ces géométries (hauteur tendue au pic de 82% de h_m par exemple). C'est donc pourquoi il était important dans le présent projet de recherche de développer une méthode de calcul inverse adaptée aux géométries et aux BFUP qui sont les plus utilisés dans l'industrie. Deux adaptations ont été développés pour la méthode d'analyse inverse de la norme SIA et elles ont été calibrées avec les résultats de programme expérimental final.
- L'Adaptation 1 de la SIA permet de modifier l'hypothèse prise par la SIA sur la hauteur tendue au pic de résistance en flexion et elle permet de réduire la déformation ultime d'écrouissage obtenues avec l'analyse inverse. La hauteur tendue des dallettes 100x50 utilisées pour calibrer les adaptations de la SIA ont une hauteur tendue au pic de résistance en flexion égale à 80 % de h_m . Cette diminution de hauteur tendue modifie l'équation nécessaire pour déterminer la contrainte ultime de traction (f_{Utu}) avec l'Adaptation 1 et fait en sorte d'augmenter quelque peu f_{Utu} (Équation (5.1), Section 5.2.1). La déformation ultime est quant à elle diminuée par un facteur réducteur C selon l'Équation (5.3) (Section 5.2.1) égal à 0.67. L'Adaptation 1 de la SIA performe bien pour les courbes de flexion ayant une flèche au pic de résistance élevée par rapport à la force qui lui est associée. Cela veut donc dire que l'Adaptation 1 de la SIA est performante sur les spécimens très mince

(élançement $L/h > 6$) et sur les BFUP permettant une grande déformation d'écrouissage en traction (BFUP KING 2 à 4%). Pour les spécimens un peu plus trapus ($L/h \leq 6$) et les BFUP avec une faible déformation d'écrouissage en traction (BFUP3, UP-F2 et UP-F3), des problèmes dans l'application de la méthode peuvent survenir pour déterminer la déformation ultime d'écrouissage (ε_{Utu}), ce qui fait que les résultats donnés par l'Adaptation 1 sont moins bons pour ces spécimens.

- L'Adaptation 2 de la méthode SIA permet d'éliminer l'incohérence présente avec l'utilisation de deux profils de contraintes simplifiés pour déterminer le point de traction ultime par la méthode SIA originale. L'Adaptation 2 utilise seulement le profil de contraintes simplifié bilinéaire et propose un nouveau critère pour déterminer le moment de localisation de la fissuration en flexion ($r_{loc} = 93\%$). Le critère r_{loc} est un ratio de force (F_{loc}/F_{max}) qui permet de localiser l'endroit sur la courbe de flexion où la contrainte ultime (σ_{Utu} , Équation (2.21), Section 2.3.3) et la déformation ultime (ε_{Utu} , Équation (5.3), Section 5.2.2) sont calculées. La contrainte ultime f_{Utu} obtenue selon un profil de contrainte simplifié constant, et présente dans l'Adaptation 1 ainsi que dans la méthode SIA originale, n'est plus nécessaire et n'est plus utilisée dans l'Adaptation 2. Contrairement à l'Adaptation 1, l'Adaptation 2 de la méthode SIA est très performante pour tous les BFUP étudiés dans le présent projet de recherche. Le comportement en traction moyen obtenu avec le calcul inverse selon l'Adaptation 2 est très proche du comportement moyen obtenu en traction directe pour les 5 BFUP étudiés (BFUP3, UP-F2, UP-F3 et BFUP KING 2 à 4%). L'allure de la courbe de flexion a donc un impact beaucoup moins important sur la performance de l'Adaptation 2 par rapport à l'Adaptation 1. L'Adaptation 2 représente donc de façon fidèle le comportement en traction d'un BFUP dans une dallette 100x50 testée en flexion pour tous les spécimens caractérisés.
- La polyvalence de l'Adaptation 2 est un grand avantage par rapport à l'Adaptation 1. L'Adaptation 2 de la SIA est donc la meilleure des deux méthodes proposées dans le présent projet de recherche pour déterminer le comportement en traction d'un os O100x50 en BFUP à l'aide du comportement en flexion d'une dallette 100x50 du même matériau.

7.3 Limitations et recommandations

Le développement des deux adaptations de la méthode de calcul inverse SIA dans le présent projet de recherche a permis de déduire le comportement en traction à partir du comportement en flexion de façon efficace pour le contexte canadien des BFUP. Malgré l'amélioration de la performance de la méthode originale de la norme SIA, les deux adaptations développées ont certaines limitations.

- Les hauteurs tendues utilisées pour l'Adaptation 1 de la méthode SIA ne sont valides que pour des géométries précises en flexion. Les hauteurs tendues au pic de résistance en flexion déterminées au Chapitre 5 ne sont valides que pour des dallettes rectangulaires 100x50 ou 150x50 et des prismes 100x100 avec une portée (L) égal à 300 mm. L'importance de l'élancement sur la hauteur tendue au pic a été mentionné dans les conclusions du projet de recherche. Il est donc permis de déduire que les hauteurs tendues au pic de résistance en flexion de 80% et 77% sont valides pour des élancements de 6 et 3 respectivement ($L/h = 6$ ou 3). Il serait pertinent de démontrer si cette hypothèse est applicable à d'autres géométries de spécimen en flexion avec ces deux élancements.
- Le ratio de force de localisation ($\%F_{loc}$) égal à 93% déterminé au Chapitre 6 pour l'Adaptation 2 de la SIA n'est valide que pour les dallettes 100x50 en flexion. Ce ratio semble également être adéquat pour des dallettes 150x50, tel que démontré sur les matériaux KING 2 à 4% (Figure 6.21). Il est donc possible d'en déduire que le ratio de localisation utilisé pour l'Adaptation 2 ($\%F_{loc} = 93\%$) est valide pour des spécimens ayant un élancement de 6 ($L/h = 6$). Il serait intéressant de vérifier si cette hypothèse est valide pour d'autres géométries de spécimen en flexion avec ces deux élancements.
- L'utilisation du facteur réducteur C égal à 0.67 ($C = 0.67$) nécessaire aux deux adaptations de la méthode SIA est valide seulement pour la comparaison des résultats d'analyse inverse réalisés sur des dallettes 100x50 ou 150x50 (zone de moment constant de 100 mm) avec les résultats des os O100x50 en traction directe (zone de mesure LVDT de 400 mm). Ce facteur étant intimement lié à la longueur de mesure des déformations, tout changement sur la configuration des essais de traction ou de flexion peut entraîner une modification de la longueur de mesure qui aura un impact important sur les déformations obtenues. Il serait utile d'évaluer comment le facteur de correction des déformations évolue en fonction de la

grandeur de la section centrale de l'essai de traction, dans l'éventualité où celle-ci changerait.

- Les deux adaptations de la méthode d'analyse inverse SIA développées lors du présent projet de recherche sont calibrées sur les configurations d'essais en traction et en flexion et les zones d'instrumentation décrites précédemment. Tout changement à ces essais pourrait affecter la performance des méthodes. Il est donc important de valider la performance des deux adaptations proposées dans le présent projet de recherche pour des conditions d'essais de caractérisation en traction et en flexion différentes de celles des os O100x50 et des dallettes 100x50. Autrement dit, la performance des méthodes pourrait être diminuée de beaucoup si les géométries des spécimens de caractérisation est différente de celles utilisées dans le présent projet de recherche.

La géométrie et la longueur de mesure lors des essais de caractérisation en traction et en flexion sont deux aspects primordiaux pour le bon fonctionnement des deux adaptations de la méthode SIA. Des géométries de spécimen précises en traction et en flexion ont été choisies dans le cadre du présent projet de recherche pour faciliter et simplifier le développement d'au moins une méthode adaptée du calcul inverse SIA. La méthodologie utilisée pour calibrer l'Adaptation 1 et l'Adaptation 2 de la méthode SIA peut cependant s'appliquer à n'importe quelle géométrie d'essai en traction et en flexion. Il serait donc intéressant de déterminer si la méthodologie développée dans le cadre du présent projet de recherche est adéquate pour d'autres géométries de spécimens, ou si les Adaptations 1 et 2 pourraient être calibrées sur d'autres géométries en traction et en flexion pour élargir leur champ d'application. Voici quelques idées de travaux qui pourraient être réalisés pour améliorer la compréhension et la performance des deux adaptations de la méthode SIA développées dans le présent projet de recherche :

- La Section 6.8 a montré que l'Adaptation 1 était beaucoup plus performante pour des spécimens ayant une plus grande flèche au pic de résistance en flexion. L'utilisation de géométries de spécimens de flexion plus minces, soit avec un élancement plus élevé ($L/h \geq 6$), et flexible augmente la flèche au pic de résistance en flexion. Il pourrait donc être intéressant d'évaluer la performance de l'Adaptation 1 sur des spécimens avec un élancement (L/h) plus grand que celui des dallettes 100x50 qui est égal à 6. Il est cependant important de comparer les résultats de l'Adaptation 1 du calcul inverse de la norme SIA

avec des essais de traction sur os qui ont une section réduite ayant la même longueur que la longueur de la zone de moment constant des spécimens de flexion. Cela permet d'augmenter les chances d'avoir des orientations et une densité de fibres similaires en traction et en flexion, en plus de s'assurer que la plage de mesure de la déformation d'écrouissage du matériau est la même. Ainsi, l'option la plus simple pour faire une telle étude serait d'augmenter la portée (L) des spécimens de flexion, et donc la longueur de la zone centrale de moment constant. Le comportement en traction déduit avec l'Adaptation 1 du calcul inverse SIA pourrait être obtenu sur des essais en flexion avec des dallettes 100x50 avec $L = 300, 450$ et 600 mm (zone de moment constant de $100, 150$ et 200 mm respectivement). Ces résultats seraient alors comparés sur les mêmes os O100x50 utilisés dans le présent projet de recherche, mais également sur des os O100x50 avec des sections réduites plus courtes. Des sections réduites de 300 mm (comme utilisé dans le projet), 250 et 200 mm pourraient être utilisées. La comparaison entre les dallettes 600x100x50 (avec zone de moment constant de 200 mm) et les os O200x100x50 (avec section réduite de 200 mm de long) pourrait enrichir l'étude réalisée dans le présent projet en ce qui concerne l'importance de la longueur de mesure en traction par rapport à la longueur de la zone de moment constant en flexion. L'impact de l'utilisation de ces géométries sur le facteur réducteur C pourrait également être étudié.

- Il est fort probable que l'élancement (L/h) des spécimens en flexion ait un impact sur le ratio de force de localisation (r_{loc}). Une étude pourrait être réalisée pour valider cette affirmation en étudiant la fissuration des spécimens de caractérisation comme ce qui a été fait dans le cadre du présent projet. Des spécimens de traction seraient caractérisés et l'évolution de la fissuration serait étudiée. Un critère d'ouverture de fissure de localisation serait déterminé et utilisé pour déterminer l'endroit de localisation de la fissuration en flexion comme réalisé à la Section 6.5. Cet endroit de localisation de la fissuration en flexion pourrait être obtenu pour différentes géométries de spécimen, mais il est encore une fois important de s'assurer d'avoir une géométrie similaire entre les spécimens de traction et de flexion pour obtenir des orientations et densités des fibres équivalentes. L'étude sur le ratio de force de localisation (r_{loc}) pourrait donc être réalisée de la même façon que décrit au point précédent, c'est-à-dire en faisant varier la portée (L) des spécimens de flexion tout en gardant une section constante (par exemple 100x50).

- L'utilisation des os O100x50 n'est pas optimale dans le cadre du présent projet. Cette géométrie en traction a certes été sélectionnée pour adapter la méthode de calcul inverse de la norme SIA au contexte canadien, mais certaines problématiques sont connues avec l'utilisation de ces os. La fissuration principale se développe très souvent à l'extérieur de la section réduite des os (7 sur 8 lors de la campagne expérimentale finale) et cela n'est pas souhaitable. Il serait donc intéressant de développer une géométrie d'essai en traction où l'endroit de fissuration est mieux contrôlé. Il est cependant important de rappeler que les dimensions de la section fissurée en traction doivent être identiques ou très similaires à celles de la section des spécimens de flexion.
- La méthode de calcul inverse SIA originale propose d'effectuer des cycles de chargement-déchargement au début des essais de flexion 4 points. Ces cycles sont réalisés durant le comportement élastique du matériau (0.5 MPa à 3 MPa) et ont comme objectif de stabiliser la courbe de flexion dans cette zone pour mieux estimer le point de limite élastique du BFUP pour le spécimen testé. Les cycles de chargement-déchargement n'ont pas été faits dans le cadre du présent projet, puisque des études réalisées à Polytechnique Montréal ont montré qu'ils avaient un impact minime sur les courbes de flexion pour des géométries de spécimen de flexion et des BFUP utilisés dans l'industrie. C'est d'ailleurs pourquoi les Adaptations 1 et 2 de la méthode SIA apportent des améliorations seulement pour déterminer le point ultime de traction. Les résultats d'analyse inverse obtenus avec la méthode SIA originale et les deux adaptations de celle-ci montrent cependant que le point de limite élastique déterminé avec ces procédures est très variable. Il serait donc intéressant d'évaluer l'impact des cycles sur le point de limite élastique déterminé avec les Adaptations 1 et 2 de la méthodes SIA pour les dallettes 100x50.

RÉFÉRENCES

- [1] CSA Group, «CSA A23.01-02 - Annex U - Ultra-high performance concrete (UHPC),» 2019.
- [2] Annex to Section 8 of CSA S6-2019, «Fibre Reinforced Concrete».
- [3] S. Brunauer, M. Yundenfreund, I. Odler et J. Skalny, «Hardened Portland cement pastes of low porosity, VI mechanism of the hydration process,» *Cement and Concrete Research*, vol. 3, n° %12, pp. 129-147, 1973.
- [4] I. Odler, M. Yundenfreund, J. Skalny et S. Brunauer, «Hardened Portland cement pastes of low porosity, III degree of hydration - expansion of paste - total porosity,» *Cement and Concrete Research*, vol. 2, n° %14, pp. 463-480, 1972.
- [5] M. Yundenfreund, I. Odler et S. Brunauer, «Hardened Portland cement pastes of low porosity, I materials and experimental methods,» *Cement and Concrete Research*, vol. 2, n° %13, pp. 313-329, 1972.
- [6] D. Roy, G. G.R. et Bobrowsky, «Very high cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques,» *Cement and Concrete Research*, vol. 2, n° %13, pp. 349-365, 1972.
- [7] J. Birchall, A. Howard et K. Kendall, «Flexural strength and porosity of cements,» *Nature*, vol. 289, n° %15796, pp. 388-390, 1981.
- [8] J. Kasparkiewicz, «discussion, in Proceedings of RILEM Symposium on Testing and Test Methods of Fiber Cement Composites,» *The Construction Press*, pp. 493-495, 1978.
- [9] E. Brühwiler, «Providing a second service life for bridges,» *Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure - Bakker, Frangopol & van Breugel (Eds)*, 2017 *Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02847-0*.

- [10] J. Resplendino, «Béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) et les ouvrages d'art en Amérique du Nord,» CETE de Lyon, AFGC, Toulouse, 2006.
- [11] AFGC, «Ultra-hig performance fibre-reinforced concretes, Recommendations,» Paris, 2013.
- [12] SIA 2052, «Béton fibré ultra-performant (BFUP) - Matériaux, dimensionnement et exécution,» SNR - Règle Suisse, Zurich, 2015.
- [13] U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration, «Tension Testing of Ultra-High Performance Concrete,» Research, Development and Technology - Turner-Fairbank Highway Research Center, McLean, 2019.
- [14] Groupe de recherche en génie des structures (GRS), «Procédure d'essai - Traction sur os en BRF - version 1.2.2,» Polytechnique Montréal, Montréal, 2019.
- [15] J. A. L. Martinez, «Characterisation of the tensile behavior of UHPFRC by means of four-point bending tests,» Universitat Politecnica de Valencia, Valence, 2017.
- [16] R. Féret, «Sur la compacité des mortiers hydrauliques,» in *Annales des Ponts et Chaussées*, vol. 4, n° % 12ème semestre, pp. 5-161, 1892.
- [17] T. Stovall, F. De Lillard et M. Buil, «Linear Packing Density Model of Grain Mixtures,» in *Powder Technology*, vol. 48, pp. 1-12, 1986.
- [18] H. Bache, «Fracture Mechanics in Integrated Design of New, Ultra-Strong materials and Structures,» in *Fracture Mechanics of Concrete Structures - From Theory to Applications, Report of RILEM Committee TC 90/FMA - Fracture Mechanics Applications, L. Elfgren Ed., Chapman & Hall, London*, pp. 382-398.
- [19] P. Richard et M. Cheyrezy, «Les Bétons de Poudres Réactives,» *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics (ITBTP)* in *Les Bétons de Poudres Réactives (BPR) à Ultra Haute Résistance (200 à 800 MPa)*, n° % 1532, pp. 85-102, 1995.

- [20] A. Naaman, «High Performance Fiber Reinforced Cement Composites,» *Proceedings of the IABSE Symposium on Concrete Structures for the Future*, pp. 371-376, 1987.
- [21] J.-P. Charron et C. Desmettre, «Intérêt de l'utilisation des bétons renforcés de fibres pour la construction d'ouvrages d'art durables,» Polytechnique Montréal, Montréal, 2013.
- [22] Groupe de recherche en génie des structures (GRS), «Procédure d'essai - Flexion 4 points sur prisme en BRF/BFUP - version 1.8,» Polytechnique Montréal, Montréal, 2019.
- [23] S. Delsol, «Évaluation du coefficient d'orientation dans les bétons renforcés de fibres métalliques,» Polytechnique Montréal, Montréal, 2012.
- [24] S.-k. Lee, «Résistance au cisaillement des bétons renforcés de fibres,» Polytechnique Montréal, Montréal, 2009.
- [25] K. Wille et G. J. Parra-Montesinos, «Effet of Beam Size, Casting Method, and Support Conditions on Flexural Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete,» *ACI Materials Journal*, Vol. %1 de %2May-June, pp. 379-388, 2012.
- [26] B. Zhou et Y. Uchida, «Influence of flowability, casting time and formwork geometry on fiber orientation and mechanical properties of UHPFRC,» *Cement and Concrete Research*, vol. 95, pp. 164-177, 2017.
- [27] P. Staehli, R. Custer et J. G. M. van Mier, «On Flow Properties, Fibre Distribution, Fibre Orientation and Flexural Behaviour of FRC,» *Materials and Structures*, vol. 41, n° 11, pp. 189-196, 2008.
- [28] L. Martinie et N. Roussel, «Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice,» *Cement and Concrete Research*, vol. 41, pp. 993-1000, 2011.
- [29] J. Resplendino et F. Toutlemonde, «The UHPFRC revolution in structural design and construction,» *Indian Concrete Journal*, pp. 72-83, 2014.

- [30] L. F. Maya Duque et B. Graybeal, «Fiber orientation distribution and tensile mechanical response in UHPFRC,» *Materials and Structures*, 2017.
- [31] M. Behloul, «Analyse et modélisation du comportement d'un matériau à matrice cimentaire fibrée à ultra hautes performances (Bétons de Poudres Réactives),» École Normale Supérieure de Cachan, Cachan, 1996.
- [32] E. Denarié, «Actes de la 2ème Journée d'étude du 22 octobre 2015: Béton Fibré Ultra-Performance - concevoir, dimensionner, construire (editors: Brühwiler, E., Oesterlee, C., Redaelli, D., Suter, R.),» *Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg ISBN 978-2-940156-50-4 et Berner Fachhochschule ISBN 978-3-9523787-6-2*, pp. pp. 25-36, 22 octobre 2015.
- [33] ASTM C1856/C1856M-17, «Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete,» ASTM International, 2017.
- [34] O. Deaux, «Optimisation de bétons fibrés à ultra-hautes performances et caractérisation de leurs propriétés en contexte industriel,» Polytechnique Montréal, Montréal, 2018.
- [35] H. El Guerouahi, «Étude comparative des méthodes d'analyses inverses pour l'évaluation de la loi de traction de BFUP à partir d'essais de flexion 4 points,» Polytechnique Montréal, Montréal, 2019.
- [36] V. Cervenka, L. Jendele et J. Cervenka, «ATENA Program Documentation - Part 1 - Theory,» Cervenka Consulting, Prague, République tchèque, 2016.
- [37] F. Létourneau, «Validation du renforcement sismique d'une pile de pont trapue par chemisage en béton fibré à ultra-hautes performances,» Université de Montréal, Polytechnique Montréal, Montréal, 2019.

- [38] J. Minguez, D. C. Gonzalez et M. A. Vicente, «Fiber geometrical parameters of fiber-reinforced high strength concrete and their influence on the residual post-peak flexural tensile strength,» *Construction and Building Materials*, n° %1168, pp. 906-922, 2018.