



**HAL**  
open science

# Caractérisation et modélisation du domaine d'utilisation d'un matériau tissé en traction biaxiale

Josselin Noel

► **To cite this version:**

Josselin Noel. Caractérisation et modélisation du domaine d'utilisation d'un matériau tissé en traction biaxiale. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2022. Français. NNT : 2022GRALI025 . tel-03689655

**HAL Id: tel-03689655**

**<https://theses.hal.science/tel-03689655>**

Submitted on 7 Jun 2022

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

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

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

### DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : 2MGE : Matériaux, Mécanique, Génie civil,  
Electrochimie

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

### Josselin NOEL

Thèse dirigée par **Ali TOURABI**, Maître de Conférences,  
Université Grenoble Alpes

co-encadrée par **Didier IMBAULT**, Grenoble INP - UGA,  
**Guilhem BLES**, ENSTA Bretagne

et **Stéphane VERAN**, Porcher Industries,

préparée au sein du **Laboratoire Sols, Solides, Structures et  
Risques**

dans l'**École Doctorale I-MEP2 - Ingénierie - Matériaux,  
Mécanique, Environnement, Energétique, Procédés,  
Production**

### Caractérisation et modélisation du domaine d'utilisation d'un matériau tissé en traction biaxiale

### Characterization and modeling of the domain of use of woven fabrics in biaxial tensile

Thèse soutenue publiquement le **2 mars 2022**,  
devant le jury composé de :

**Monsieur Ali TOURABI**

MAITRE DE CONFERENCE HDR, Université Grenoble Alpes, Directeur  
de thèse

**Monsieur Lionel LEOTOING**

MAITRE DE CONFERENCE HDR, INSA Rennes, Rapporteur

**Monsieur Hervé LAURENT**

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Bretagne Sud,  
Rapporteur

**Monsieur Christian GEINDREAU**

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Grenoble Alpes,  
Président



Thèse réalisée en partenariat avec l'**Institut de Recherche  
Dupuy de Lôme** et **Porcher Industries**



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
1.1	Contexte et mise en situation . . . . .	3
1.2	Problématique industrielle du dimensionnement des structures souples . . . . .	5
1.3	Objectifs de la thèse . . . . .	6
1.4	Les matériaux de la thèse . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Etat de l'art</b>	<b>9</b>
2.1	Les matériaux tissés . . . . .	9
2.1.1	Le fil . . . . .	9
2.1.2	Le tissage et les armures . . . . .	9
2.1.3	L'embuvage . . . . .	10
2.1.4	L'ennoblissement . . . . .	11
2.1.5	Les unités de mesure dans les domaines de l'industrie textile . . . . .	11
2.2	Propriétés mécaniques des matériaux tissés . . . . .	12
2.2.1	La contrainte massique . . . . .	12
2.2.2	Le comportement des tissus en traction simple et leur facteur de variation . . . . .	13
2.2.3	Les essais de traction biaxiale . . . . .	16
2.3	Les domaines d'utilisations . . . . .	19
2.3.1	Une application des matériaux tissés : le kite . . . . .	20
2.3.2	Anatomie du kite . . . . .	21
2.4	Les critères de rupture pour les matériaux tissés . . . . .	21
2.4.1	Critère de Tsai Wu . . . . .	23
2.4.2	Critère de Tsai-Hill . . . . .	23
2.4.3	Critère de Norris . . . . .	24
2.4.4	Critère de Yeh-Stratton . . . . .	25
2.4.5	Bilan . . . . .	25
<b>I</b>	<b>Vers la définition d'une limite d'utilisation d'un matériau tissé</b>	<b>27</b>
<b>3</b>	<b>Limite d'utilisation d'un kite en déformation</b>	<b>29</b>
3.1	Préambule . . . . .	29
3.2	Mesure des déformations résiduelles sur des kites usagés . . . . .	31
3.3	Analyse fluide-structure . . . . .	36
3.4	Déformations résiduelles adoptées . . . . .	46
3.5	Conclusion . . . . .	47

<b>II</b>	<b>Mise en œuvre et résultats bruts de traction uniaxiale</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>Techniques expérimentales uniaxiales</b>	<b>51</b>
4.1	Machine d'essai . . . . .	51
4.2	Matériau et éprouvette . . . . .	51
4.2.1	Matériau non confidentiel . . . . .	51
4.2.2	Géométrie de l'éprouvette . . . . .	53
4.2.3	Marquage des cibles . . . . .	54
4.2.4	Numérotation des éprouvettes . . . . .	55
4.3	Mors articulés . . . . .	56
4.4	Mesure de la contrainte et des déformations . . . . .	59
4.4.1	Contrainte axiale appliquée à l'éprouvette . . . . .	59
4.4.2	Extensomètre optique . . . . .	59
4.4.3	Système de suivi de cibles . . . . .	63
4.4.4	Comparaison des mesures de déformation . . . . .	64
4.4.5	Microscope digital . . . . .	64
4.5	Pilotage des essais et acquisition des données . . . . .	64
4.5.1	Asservissement de la machine en déformation . . . . .	64
4.5.2	Vitesse de déformation . . . . .	68
4.6	Programme des essais Uniaxiaux . . . . .	70
4.7	Conclusion . . . . .	70
<b>5</b>	<b>Résultats bruts de traction uniaxiale</b>	<b>73</b>
5.1	Essais de type A . . . . .	73
5.1.1	Sens Chaîne . . . . .	73
5.1.2	Sens Trame . . . . .	74
5.1.3	Sens Biais . . . . .	76
5.1.4	Les autres essais Hors axes . . . . .	77
5.2	Essais de type B . . . . .	80
5.2.1	Sens Chaîne, Trame et Biais . . . . .	80
5.2.2	Autres directions hors axes . . . . .	81
5.3	Conclusion . . . . .	81
<b>III</b>	<b>Mise en œuvre et résultats bruts de traction biaxiale</b>	<b>83</b>
<b>6</b>	<b>Sollicitation 2D : Traction biaxiale</b>	<b>85</b>
6.1	Préambule . . . . .	85
6.2	Le banc d'essai . . . . .	85
6.2.1	Présentation de la machine . . . . .	85
6.2.2	Cinématique de la presse . . . . .	86
6.2.3	Adaptation et modification de la presse . . . . .	86
6.2.4	Mors adapté au tissu . . . . .	88
6.3	Forme de l'éprouvette et essais préliminaires . . . . .	89
6.3.1	Forme de l'éprouvette . . . . .	89
6.3.2	Montage de l'éprouvette . . . . .	90
6.3.3	Validation de la géométrie d'éprouvette . . . . .	91
6.4	Protocole expérimental . . . . .	103
6.4.1	Mesure des déformations . . . . .	103
6.4.2	Pilotage de l'essai . . . . .	107
6.5	Conclusion . . . . .	108

<b>7</b>	<b>Résultats bruts : Traction biaxiale</b>	<b>117</b>
7.1	Résultats bruts des essais . . . . .	117
7.1.1	Essai de traction équibiaxiale . . . . .	117
7.1.2	Essai de traction biaxiale de rapport $\frac{1}{2}$ . . . . .	120
7.1.3	Essai de traction biaxiale de rapport $\frac{2}{1}$ . . . . .	123
7.1.4	La distorsion lors des essais de traction biaxiale . . . . .	124
7.2	Conclusion . . . . .	126
<b>IV</b>	<b>Aspects théoriques</b>	<b>131</b>
<b>8</b>	<b>Définition de la décharge</b>	<b>133</b>
8.1	Avant-propos . . . . .	133
8.2	Modèles de comportement . . . . .	133
8.2.1	Modèle de première charge . . . . .	133
8.2.2	Modèle pour la décharge . . . . .	135
8.3	Modélisation des décharges . . . . .	135
8.3.1	Définition et méthode adoptées . . . . .	135
8.3.2	Choix de la valeur de la constante $N$ . . . . .	136
8.3.3	Choix de la valeur de la constante $\alpha$ . . . . .	138
8.3.4	Choix du nombre de décharge . . . . .	140
8.3.5	Validation de la méthode . . . . .	142
8.3.6	Contrainte limite d'utilisation . . . . .	142
8.4	Cas de la traction biaxiale . . . . .	143
8.5	Conclusion . . . . .	144
<b>9</b>	<b>Critère de limite d'utilisation</b>	<b>151</b>
9.1	Préambule . . . . .	151
9.2	Proposition d'un critère original . . . . .	154
9.3	Méthode d'identification du critère . . . . .	154
9.4	Propriétés du critère en traction simple et biaxiale . . . . .	155
9.4.1	Cas de la traction simple en hors axes . . . . .	155
9.4.2	Cas de la traction biaxiale dans les axes . . . . .	155
9.5	Forme du critère dans l'espace 3D des contraintes . . . . .	159
9.6	Conclusion . . . . .	159
<b>V</b>	<b>Analyse des résultats expérimentaux</b>	<b>161</b>
<b>10</b>	<b>Analyse des résultats de traction uniaxiale</b>	<b>163</b>
10.1	Comportement moyen en première charge . . . . .	163
10.1.1	Directions Chaîne, Trame et Biais . . . . .	163
10.1.2	Autres directions hors axes . . . . .	163
10.1.3	Mise en commun de l'ensemble des résultats . . . . .	165
10.2	Comportement à la décharge . . . . .	170
10.3	Prédiction des limites d'utilisation . . . . .	173
10.4	Conclusion . . . . .	174

<b>11 Analyse des résultats de Traction biaxiale</b>	<b>177</b>
11.1 Modélisation de la courbe de première charge . . . . .	177
11.2 Modélisation des décharges . . . . .	177
11.3 Détermination des limites d'utilisation . . . . .	179
11.4 Conclusion . . . . .	180
<b>12 Identification du critère de limite d'utilisation</b>	<b>183</b>
12.1 Cas de la sollicitation biaxiale et identification des paramètres $A$ , $B$ et $C$ . . . .	183
12.2 Cas de la sollicitation uniaxiale . . . . .	185
12.2.1 Identification du paramètre $S$ . . . . .	185
12.2.2 Cas des chargements hors axes . . . . .	185
12.3 Forme 3D du critère et son utilisation . . . . .	185
12.3.1 Visualisation 3D du critère . . . . .	185
12.3.2 Utilisation du critère pour le dimensionnement mécanique . . . . .	188
12.4 Conclusion . . . . .	188
<b>VI Résultats et analyse concernant les matériaux industriels</b>	<b>189</b>
<b>Conclusion</b>	<b>195</b>
<b>VII Annexes</b>	<b>197</b>
<b>A Analyse des déformations sur kites post-mortem</b>	<b>199</b>
A.1 Analyse des déformations résiduelles . . . . .	199
A.1.1 Kite 1 . . . . .	199
A.1.2 Kite 2 . . . . .	201
A.2 Analyse des espace inter-mailles . . . . .	205
A.3 Analyse de la coloration . . . . .	207
<b>B Impact de l'angle d'incidence du vent sur les performances de l'aile</b>	<b>209</b>
<b>C Influence du paramètre <math>N</math> sur les paramètres de Prony</b>	<b>211</b>
<b>D Invariance du Rayon</b>	<b>215</b>

# Remerciements

Arrivé à la fin de cette page de vie, il est l'heure d'en faire le bilan. Le doctorat est, sans doute, un travail scientifique mais il ne se limite pas à cet aspect. C'est aussi une aventure aux multiples facettes et une expérience humaine riche. Si l'ensemble des pages suivantes est focalisé à décrire la rigueur scientifique (tout en omettant les phases de doute, les échecs, les embûches, les frustrations), prenons quelque temps pour faire le bilan du volet qui me tient le plus à cœur : les rencontres de l'aventurier au cours de sa quête.

Ainsi je tiens à remercier sincèrement Stéphane VERAN avec qui j'ai eu grand plaisir de travailler et partager. Il a su faire preuve de patience face à la lenteur de la recherche et de persévérance face aux notions parfois obscures. Dans un sens, il a su me transmettre ses connaissances de terrain et, inversement, il a su transférer au domaine industriel les travaux présentés ci-après.

Ensuite je suis reconnaissant à Ali TOURABI et Didier IMBAULT qui m'ont mis le pied à l'étrier du laboratoire en 2016 pour une mission initiale de 6 mois. Ils m'ont accompagné tout au long de cette aventure. Je les remercie pour leur confiance, leur soutien, nos discussions variées, les sujets de travail divers et la liberté qu'ils ont su me donner dans la gestion de mon travail. De la même manière, j'inclus Guilhem BLES, dont le soutien, la collaboration et la pertinence, malgré la distance, furent d'une grande aide.

Je n'oublie pas également le personnel du 3SR et Grenoble INP au sens large, Antoine MIRAS, Jean-Marc DESCOURS, Jean-Benoît TONI, pour leurs conseils techniques. Une chaleureuse pensée pour Mireille PFISTER. Elle fut d'abord un appui administratif mais pas seulement : merci pour les discussions et les moments de partage.

Enfin, ce passage au 3SR n'aurait pas été aussi riche et beaucoup moins stimulant sans les liens d'amitié qui s'y sont tissés. Ce sont ces rencontres qui nous permettent d'avancer, de prendre de la hauteur, d'évoluer. Pour commencer je témoigne de ma gratitude aux aventuriers qui m'ont accueilli alors que je débutais dans la jungle de la recherche : Corado, Maxime, Arnaud, Thibault, Jeanne, Marta. Ensuite rejoints par de nouveaux aventuriers et amis qui m'ont supporté pour la deuxième moitié de la thèse et qui ont permis de surmonter des contextes hostiles : une pandémie mondiale et un incendie de laboratoire. . . merci : François, Clara, Julia, Antoine, Nils, Lisa, Quentin, Camille, Emilie, Sophie, Habib, Sébastien.

Une pensée particulière a ceux qui m'ont hébergé à la fin : Sébastien et Laurie (pour un séjour longue durée plein d'émotions) , Antoine et François.

J'exprime aussi mon affection particulière pour quelqu'un qui a aussi vu/suivi l'intégralité de cette péripétie (et pas seulement la mienne d'ailleurs) avec qui les pauses cafés se sont enrichies : Barthélémy.

Merci à tous pour ces moments passés, ces pauses cafés/moments de détente, ces discussions

en tout genre, ces randonnées, ces bières (car le hasard fait bien les choses), ces soirées jeux, ces moments bricolage, ces séances de grimpe/sport, et ce temps accordé à refaire le monde mille fois avec vous.

Pour terminer, ce chemin embarque aussi dans son sillage les proches qui subissent nos doutes et frustrations et encouragent nos avancées et nos victoires, ainsi j'estime ma famille : merci à mes parents, ma sœur et sa famille. Une pensée émue pour ma compagne Laura qui a aussi vécu ces rebondissements au quotidien, et ce n'est pas rien.

A tous merci pour vos qualités humaines. Et désolé pour ceux que j'aurais éventuellement oubliés.

*NB : merci aussi à l'équipe des Sapeurs-Pompiers Sassenageoise pour m'avoir fourni une bulle d'évasion dans ce monde de recherche scientifique.*

“Une solution qui vous démolit vaut mieux que n'importe quelle incertitude.”

Boris VIAN

L'herbe rouge, 1950

À mon frère,

# Chapitre 1

## Introduction

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre d'une convention CIFRE entre l'entreprise PORCHER Industries et les laboratoires de recherche : 3SR à Grenoble et l'IRDL à Brest. Le sujet de thèse s'inscrit dans la thématique de l'étude du comportement mécanique des matériaux tissés destinés à la fabrication de structures souples telles que les parapentes, parachutes, kites, voiles de spinnaker, ballons, montgolfières, ULM...etc. Ce premier chapitre d'introduction a pour objectif de présenter le contexte, les motivations, les objectifs de la thèse, ainsi que la présentation du présent mémoire.

### 1.1 Contexte et mise en situation

Ces dernières années PORCHER Industries s'est inscrit dans le projet novateur Beyond The Sea (BTS), proposé par Yves Parlier dans le but de développer des applications de propulsion auxiliaire de navires par Kites géants [50] (Fig. 1.1). Cette solution technologique, adaptable à différents types de navires, est avantageuse car elle permettrait des économies de carburant jusqu'à 20%, selon les conditions d'utilisations[34] [35], et donc participer grandement à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> à l'échelle mondiale.

Le principe de la traction est celui d'une aile à profil NACA [68]. Grâce à sa géométrie, l'action de l'écoulement du vent sur la voile de kite crée deux forces :

- une force de portance qui tire le kite dans la direction perpendiculaire au vent incident ;
- une force de traînée qui freine le kite dans la direction du vent incident.

La force de portance générée par le kite est la force de traction qui vient soulager le travail fourni par la propulsion classique du navire et permet l'économie de carburant.

Dans le domaine classique du Kite personnel à usage sportif, où le choix des matériaux, la conception et le dimensionnement aboutissent à un système opérationnel et largement utilisé, les voiles ont des surfaces de l'ordre de  $10m^2$  et ils tractent une personne d'environ  $80kg$ . Pour tracter des navires de plusieurs milliers de tonnes, il faut augmenter la superficie du kite afin d'augmenter la force de traction et soulager la puissance fournie par le moteur : pour les plus gros bâtiments, Beyond the Sea envisage des voiles jusqu'à  $1000m^2$ . Une augmentation de la superficie du kite par un simple rapport d'homothétie  $k$  pourrait être envisagée (Fig. 1.2). Cependant, dans ce cas, l'épaisseur du tissu augmenterait et, à masse volumique constante, le tissu deviendrait trop lourd, et impropre au vol. Ainsi, pour maintenir la capacité au vol de la structure, l'épaisseur du tissu doit rester quasi constante. Ceci conduit à une augmentation importante des contraintes vues par le matériau tissé [4].

Par conséquent et selon les objectifs, en termes de performances, fixés par les concepteurs de structures souples (tels que la taille des Kites géants par exemple), PORCHER Industries doit fournir des matériaux adaptés, avec des choix pertinents au niveau des masses surfaciques, des rigidités, des revêtements et voir même des traitements mécaniques des matériaux avant



FIGURE 1.1– Principe de traction de navires par kite géant - Projet BTS - ([www.beyond-the-sea.com](http://www.beyond-the-sea.com))

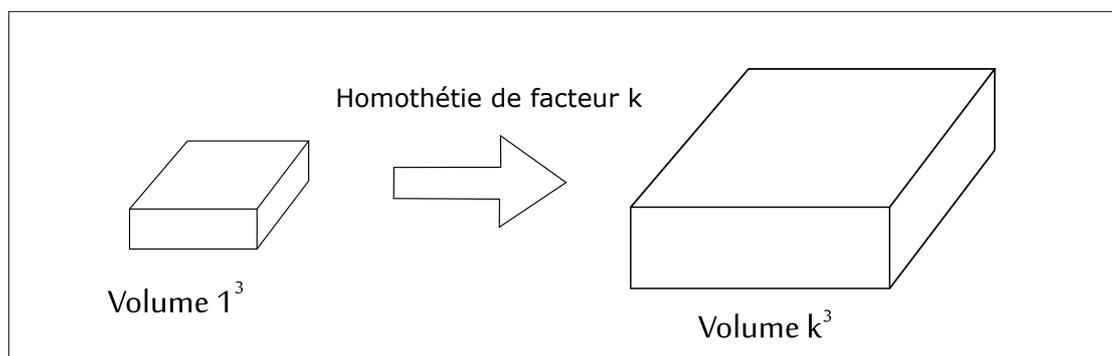


FIGURE 1.2 – Augmentation de la surface d'un kite

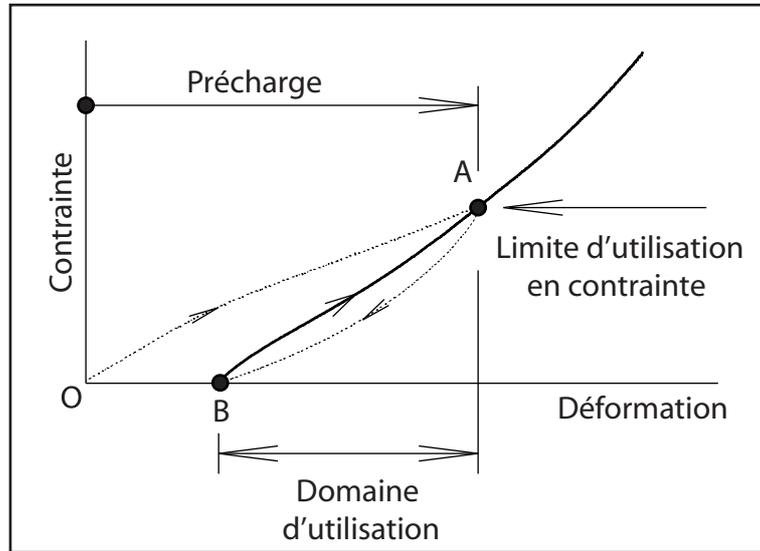


FIGURE 1.3 – Traitements mécaniques par une précharge en contrainte OA et domaine d'utilisation BA, avec une limite d'utilisation en contrainte située en A

leur utilisation (Fig. 1.3). Ceci, afin de fournir aux concepteurs des matériaux tissés avec des "domaines d'utilisation" correspondant à des "limites d'utilisations en contraintes" élevées.

## 1.2 Problématique industrielle du dimensionnement des structures souples et motivation de l'étude

De part leur nature, les structures souples en matériau tissé subissent des contraintes biaxiales et des histoires de chargement complexes [44]. Pour illustrer cet aspect considérons le modèle simplifié d'un kite défini par la Figure 1.4. La géométrie du kite est caractérisée par deux rayons de courbures :  $R_1[m]$  dans le plan  $(y, z)$  ou courbure suivant l'envergure et  $R_2[m]$  dans le plan  $(x, z)$  ou courbure suivant la corde. La pression  $P[Pa]$  que subit le kite s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{P}{\bar{\rho}^t} = \frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} \quad (1.1)$$

où  $\bar{\rho}^t[g/m^2]$  est la masse surfacique actuelle et  $\sigma_1[Nm/g]$ ,  $\sigma_2[Nm/g]$  correspondent aux contraintes massiques biaxiales (sec. 2.2.1) suivant l'envergure et suivant la corde, respectivement.

Au cours du vol le chargement du kite représenté par la pression  $P$  évolue et conduit à une sollicitation complexe du matériau tissé, en contrainte biaxiale  $(\sigma_1, \sigma_2)$ .

Le dimensionnement et l'optimisation de la conception des structures sont soumis à des exigences souvent antagonistes. Dans le cas des Kites géants, par exemple, deux requêtes importantes sont à considérer :

- le poids de la structure compatible avec sa capacité à voler ;
- les performances mécaniques des matériaux tissés compatibles avec la tenue en service de la structure, en chargement biaxial.

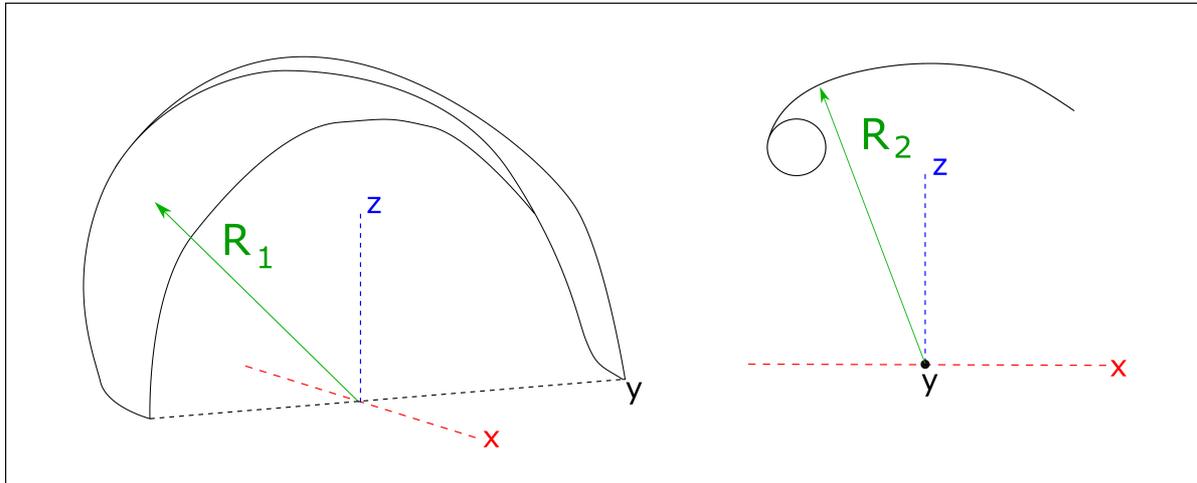


FIGURE 1.4 – Contrainte biaxiale dans un kite

Les concepteurs et les designers se fixent des objectifs préalables, en termes de performances, tels que la taille de la structure, par exemple. Le dimensionnement et l'optimisation de la conception, ainsi que le choix d'un matériau adapté, requièrent une bonne connaissance du comportement mécanique du matériau et une analyse fine de ses propriétés, afin de définir un domaine et des limites d'utilisation du matériau, dans le cas biaxial. La motivation essentielle de ce travail de thèse est de répondre à cette dernière exigence.

### 1.3 Objectifs de la thèse

Le projet de thèse présente deux aspects importants : un aspect théorique et un aspect expérimental. Du point de vue théorique, il est nécessaire de fournir une définition rigoureuse d'une limite d'usage en contrainte pour un matériau tissé dans le cas uniaxial et d'étendre cette notion au cas biaxial, qui se traduit par la définition d'un critère biaxial anisotrope, qui tient compte de l'intensité du chargement dans le plan du tissu. Pour un matériau tissé donné, le critère doit être identifié ; il doit définir une limite d'utilisation en contrainte, qui correspond à un domaine de sécurité pour l'utilisation du matériau. Du point de vue expérimental et compte tenu de l'application dans le domaine des Kites géants, la mise en oeuvre de l'essai de traction biaxiale est à la fois indispensable et présente une partie importante du travail de thèse.

### 1.4 Les matériaux de la thèse

Dans le cadre de ce travail, cinq matériaux ont été étudiés en traction uniaxiale et en traction biaxiale. Ces matériaux ont été fournis par PORCHER Industries. Quatre matériaux industriels, parmi les cinq, présentent un caractère confidentiel et un seul matériau présente un caractère non confidentiel.

Le mémoire de thèse commence par le présent chapitre d'introduction et par un deuxième chapitre destiné à une étude bibliographique. Ensuite, le mémoire se répartit en sept parties comportant chacune un ou plusieurs chapitres. La septième partie correspond à des annexes. Tous les résultats confidentiels, correspondants aux quatre matériaux industriels précités, seront concentrés dans la partie six du mémoire. Les cinq premières parties et la dernière partie des annexes sont consacrées aux différents développements dans le cadre du travail de thèse et aux

résultats relatifs au seul matériau non confidentiel. La première partie du mémoire examine la notion de limite d'utilisation pour un matériau tissé et propose une méthode de définition. Les parties II et III sont consacrées à la mise en oeuvre et la présentation des résultats bruts de traction uniaxiale et biaxiale, respectivement, dans le cas du matériau non confidentiel. La quatrième partie aborde des aspects théoriques liés à la notion de limite d'utilisation et à la proposition d'un critère anisotrope valable dans le cas biaxial. Dans la cinquième partie nous proposons une analyse des résultats bruts présentés dans les parties II et III en utilisant les outils théoriques proposés dans la quatrième partie. Enfin, la sixième partie confidentielle concernera la présentation des résultats bruts et des analyses concernant les quatre matériaux tissés industriels à caractère confidentiel.



# Chapitre 2

## Etat de l'art

### 2.1 Les matériaux tissés

Un textile est un matériau confectionné à partir de fibres. Cette définition regroupe plusieurs matériaux dont : les mèches, les fils, les tricots, les non-tissés, les tressés et les tissés.

Un matériau tissé est défini comme est un assemblage d'éléments unitaires appelés mèches ou fils. Les mèches, ou fils, qui composent la matière s'entrelacent et sont organisées pour former un réseau à deux dimensions. Les mèches sont orientées dans deux directions nommées **Chaîne** (*warp*) et **Trame** (*weft* ou *fill*). Le tissu est donc le produit fini de l'action de tissage. Un tissu est donc à la fois un matériau et une structure. Suivant l'échelle utilisée pour l'étude, les tissés peuvent être assimilés à une structure (assemblage de mèches avec des interactions les unes avec les autres) ou à un matériau. En effet, à l'échelle macroscopique, l'organisation en réseau peut être uniformisé à un matériau dont le comportement mécanique dépend de la direction de sollicitation. C'est cette vision qui sera adoptée pour le reste de la thèse.

#### 2.1.1 Le fil

Les fils (*yarns*) qui composent le tissage sont confectionnés par des torons de fibres (*fibers*). Plusieurs natures de fibre peuvent composer les fils dans l'industrie textile [8] [63] :

**Le coton** : Matière naturelle issue des fleurs de coton constituée de fibres de cellulose vrillées. Il possède un haut pouvoir absorbant et est fortement utilisé dans le domaine de l'habillement.

**Le polyamide 6.6 (abrv. PA 6.6)** : Nylon pour l'appellation commerciale ; ce matériau est issu de la pétrochimie, c'est un homo-polymère semi-cristallin [46]

**Le polyester (abrv. PET)** : issu de la pétrochimie c'est un polytéréphtalate d'éthylène, c'est un polymère thermoplastique semi-cristallin. Les fibres PET présentent une faible absorption à l'eau. Elles sont de plus en plus utilisées pour leur propriétés mécaniques élevées.

**Le Vectran** : fibre d'appellation commerciale proche du PET, c'est un matériau polyester aromatique avec des propriétés mécaniques élevées [67].

#### 2.1.2 Le tissage et les armures

La chaîne est la direction de la longueur du tissu. Ce sont les fils de chaîne qui passent dans un peigne et qui changent de niveau au cours du tissage. Le fil de trame est inséré entre les fils de chaîne à chaque pas de tissage, il se retrouve donc au-dessus d'une partie des fils de chaîne

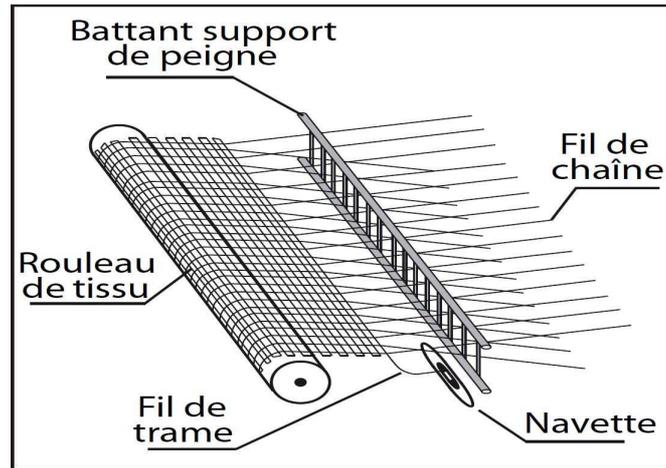


FIGURE 2.1 – Procédé de tissage [17]

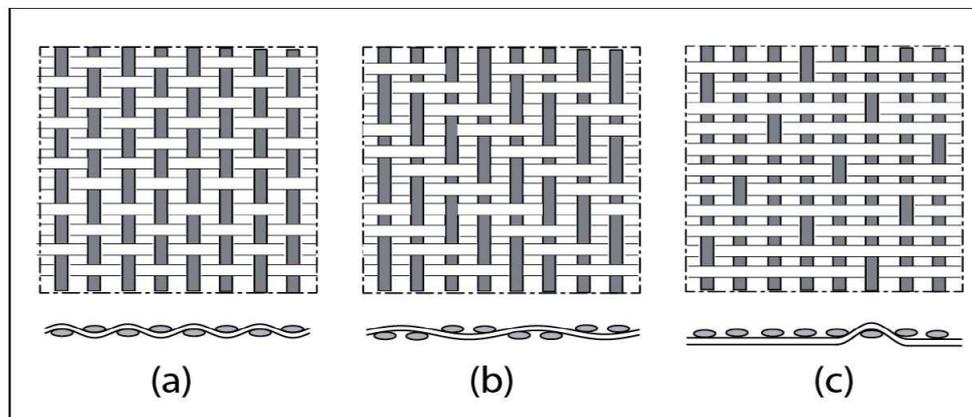


FIGURE 2.2 – Armures : (a) Toile (b) Sergé 2x2 (c) Satin [17]

(ce sont les sautés) et en-dessous de l'autre partie (ce sont les pris). A chaque pas de tissage les niveaux des fils de chaîne s'inversent et un nouveau fil de trame est inséré<sup>1</sup>, voir Figure 2.1.

Le réseau de fils forme un motif qui se répète pour former le matériau tissé. Ce motif s'appelle **armure** (*weave / pattern*) et est directement lié à la technique de tissage utilisée. Il existe plusieurs armures possibles qui forment différentes mailles élémentaires dans le tissu, Figure 2.2 :

**La toile ou taffetas** : un pris, un sauté avec décalage de un fil à chaque pas

**Le sergé  $n \times m$**  :  $n$  pris,  $m$  sautés avec décalage de un fil à chaque pas

**Le satin** : un seul pris par fil de trame avec décalage de  $n$  fil de chaîne à chaque pas

### 2.1.3 L'embuvage

Les armures sont donc un moyen de caractériser le motif de tissage. Ce paramètre n'est cependant pas suffisant pour définir un tissage. En effet, avec une armure identique, l'oscillation

1. L'insertion du fil de trame se faisait avec des navettes qui effectuaient des va-et-vient entre chaque pas, aujourd'hui le fil de trame est propulsé par jet d'eau ou jet d'air et est coupé entre chaque pas (il n'y a plus de va-et-vient)

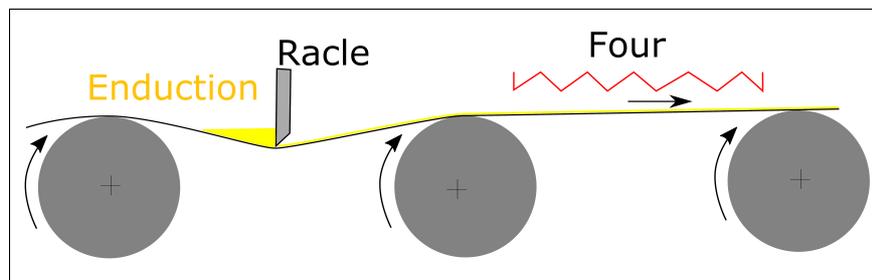


FIGURE 2.3 – Procédé d’enduction à la racle

du fil de chaîne qui ondule autour du fil de trame peut varier. L’oscillation est caractérisée par un phénomène nommé **embuvage** (*Shrinkage / crimp*). L’oscillation ou embuvage a pour conséquence la variation de longueur de fil entre l’état avant et après tissage. L’embuvage peut donc être quantifié par le paramètre de variation de longueur du fil de chaîne entre l’état neutre et l’état tissé.

### 2.1.4 L’ennoblissement

Les matériaux tissés peuvent subir diverses opérations après le tissage. Ces procédés permettent d’améliorer ou de modifier les propriétés d’un textile. Ce sont les procédés post-tissage appelés procédés d’**ennoblissement**. La liste présentée ci-dessous n’est pas une liste exhaustive.

**La teinture** (*dyeing*) : Procédé qui consiste à appliquer un pigment au textile afin de lui conférer la couleur souhaitée. En effet, les fils sont souvent blancs à l’état brut et le résultat du tissage est une étole blanche. La teinture permet donc de moduler la teinte des étoles.

**La thermofixation** (*heat-setting*) : Procédé de chauffage du tissu qui permet d’annuler toutes les contraintes mécaniques résiduelles issues du procédé de tissage. Cette opération permet aussi de fixer les dimensions du tissu et d’éviter les variations dimensionnelles de ce dernier après tissage.

**L’enduction** (*coating*) : Procédé à forte valeur ajoutée car il permet de déposer un film de polymère sur un ou deux côtés du tissu. Il existe plusieurs procédés d’enduction, comme celui à la racle où l’enduction liquide est déposée sur un côté du textile puis étalée par une lame appelée racle. Le textile enduit passe alors dans un four pour polymériser l’enduction, voir Figure 2.3.

**Le calandrage** (*calendering*) : Procédé de mise en forme au cours duquel le tissu passe dans un laminoir. Le tissu est inséré entre deux rouleaux dont l’espace entre les deux est calibré. Ce procédé permet un meilleur étalement des fibres et une meilleure pénétration de l’enduction dans le textile.

### 2.1.5 Les unités de mesure dans les domaines de l’industrie textile

Dans les industries du textile, les fils utilisés pour le tissage peuvent avoir des caractéristiques différentes tel que : le nombre de filaments qui le composent, le diamètre du fil. Cependant, il peut être compliqué d’obtenir ces valeurs de manière précise (certains fils ont des diamètres de l’ordre de  $10\mu m$ ) il est donc plus courant d’utiliser le titre des fils pour les caractériser, c’est-à-dire leur masse par unité de longueur. Le domaine industriel utilise donc les unités suivantes :

- Le *tex* :
  - $1tex = 1g/km$
  - $1dtex = 1g/10km$

— Le denier (ancienne mesure où 1 denier = 1g/9km)

## 2.2 Propriétés mécaniques des matériaux tissés

### 2.2.1 La contrainte massique

Comme tout matériau, les textiles ont des propriétés mécaniques particulières. Pour qualifier la résistance des matériaux tissés, il est possible d'utiliser la contrainte massique pour observer les propriétés mécaniques du textile. Pourquoi utiliser cette unité ? La raison est d'ordre pratique. En effet, pour quantifier l'action des efforts extérieurs dans un solide quelconque les standards utilisent la contrainte de Cauchy, soit une force par unité de surface mais, dans le cas d'un matériau tissé, il peut être compliqué d'avoir une épaisseur de tissu mesurable ou constante entre deux points de mesure pour calculer la surface d'application de l'effort. Tout comme le *tex* pour désigner un fil, la **contrainte massique** (*specific stress*), notée  $\Sigma$ , sera utilisée pour quantifier l'état de contrainte dans le textile en évitant la mesure délicate de l'épaisseur. La contrainte massique est calculée comme la force appliquée sur une largeur de tissu divisée par cette largeur et la masse surfacique du matériau tissé. Son unité est donc le  $N.m/kg$  dans le système international. Il existe des dérivés comme le  $N.m/g$  ou le  $J/kg$  ou  $J/g$ . Regardons de plus près sa définition.

La contrainte de Cauchy  $\sigma$  est définie par :

$$\sigma = \frac{f_a}{s} \quad (2.1)$$

où  $f_a$  la force actuelle axiale appliquée et  $s$  la section actuelle résistante. La contrainte massique s'exprime dans le cas général ainsi :

$$\underline{\underline{\Sigma}} = \frac{1}{\rho^t} \underline{\underline{\sigma}} \quad (2.2)$$

Avec  $\rho^t$ , la masse volumique actuelle,  $\underline{\underline{\Sigma}}$  et  $\underline{\underline{\sigma}}$  respectivement le tenseur des contraintes massiques et le tenseur des contraintes de Cauchy.

La masse volumique actuelle peut être exprimée par :

$$\rho^t = \frac{\overline{\rho^t}}{e} \quad (2.3)$$

Avec  $\overline{\rho^t}$  et  $e$  respectivement la masse surfacique actuelle et l'épaisseur du matériau tissé.

Pour un essai où une bande de textile de largeur actuelle  $l$ , et de section actuelle  $s = l \times e$ , est soumise à une traction de force  $f_a$  on a donc la contrainte massique axiale  $\Sigma_a$  définie par :

$$\Sigma_a = \frac{1}{\overline{\rho^t}} \frac{f_a}{l} \quad (2.4)$$

Or  $\overline{\rho^t}$  évolue au cours de l'essai, et peut être définie par la masse surfacique initiale  $\overline{\rho}$  par :

$$\overline{\rho^t} = \frac{L}{l} \frac{1}{\lambda} \overline{\rho} \quad (2.5)$$

Avec  $\lambda$  l'élongation de l'éprouvette et  $L$  sa largeur initiale. Compte tenu des équations 2.4 et 2.5 nous obtenons :

$$\Sigma_a = \frac{\lambda}{\overline{\rho}} \frac{f_a}{L} \quad (2.6)$$

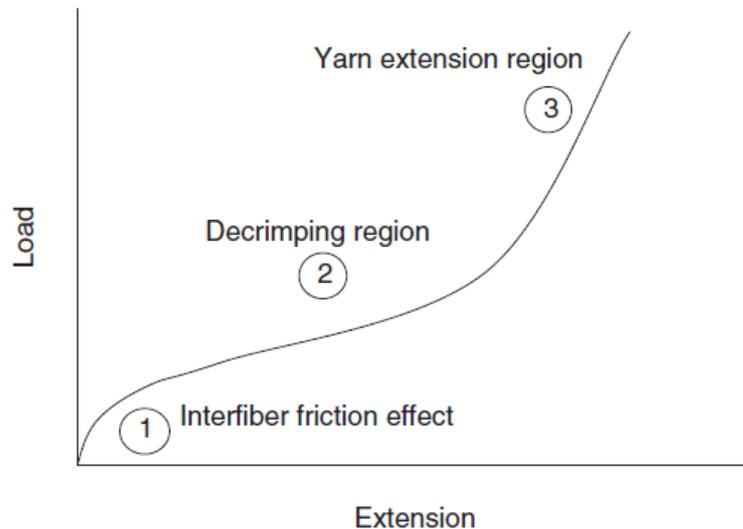


FIGURE 2.4 – Courbe de traction d'un textile [59]

Il est donc possible, à partir des données initiales de l'éprouvette,  $\bar{\rho}$  et  $L$ , de la force axiale appliquée  $f_a$  et de l'élongation  $\lambda$  de l'éprouvette de calculer la contrainte massique axiale.

### 2.2.2 Le comportement des tissus en traction simple et leur facteur de variation

**Direction Chaîne Trame** Du fait de sa structure particulière, le matériau tissé possède deux directions privilégiées : le sens Trame et le sens Chaîne. Le matériau tissé n'est donc pas isotrope.

La Figure 2.4 est obtenue en appliquant un effort de traction  $F$  dans le sens chaîne ou trame et en mesurant l'élongation de l'éprouvette à chaque instant [59]. La courbe est composée de trois zones :

1. au début de la courbe, la rigidité du tissu est liée à un effet de friction entre les fils, c'est le frottement entre fils de chaîne et de trame, l'embuvage diminue ;
2. région de décrêpage : les fils s'alignent progressivement dans la direction de sollicitation, l'embuvage continue à diminuer et, si les fils sont réalisés par torsion, ils se détordent pour aligner les mèches unitaires avec la direction de chargement ;
3. les fils sont tendus et la traction s'exerce directement dessus, la rigidité est donc donnée par les fibres en extension et ce jusqu'à la rupture d'une mèche puis celle de l'éprouvette.

Dans la direction perpendiculaire à la traction, une contraction de l'éprouvette est observée lors de l'essai de traction. Cette contraction est un effet de structure lié au tissage lui-même. Lors de la traction, les fibres dans la direction de sollicitation se tendent et l'embuvage dans la direction transverse joue un rôle important (Figure 2.5 [65]), surtout dans le cas de la traction simple où les bords de l'éprouvette dans la direction transverse sont libres.

Que se passe-t-il si, lors de l'essai de traction, si l'utilisateur décide de décharger le matériau ? Dans ce cas, la force de traction diminue de manière non linéaire et ce jusqu'à une force nulle, c'est ce qui est représenté par le tronçon  $AC$  en Figure 2.6. Une fois le matériau entièrement déchargé il existe un allongement résiduel (distance  $OC$ ) ou une **déformation permanente** notée  $\varepsilon_p$  [70].

Les facteurs de variation du comportement du textile en traction sont nombreux et quelques paramètres sont cités ci-dessous :

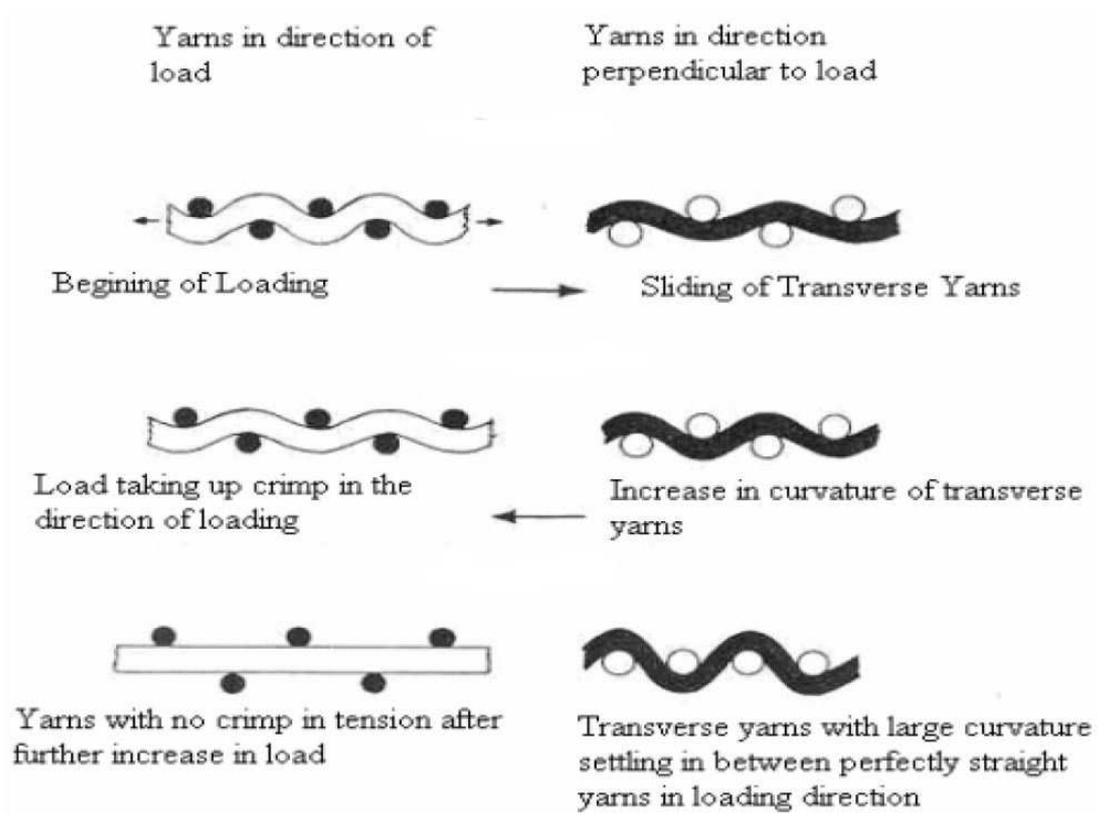


FIGURE 2.5 – Comportement dans la direction transverse [65]

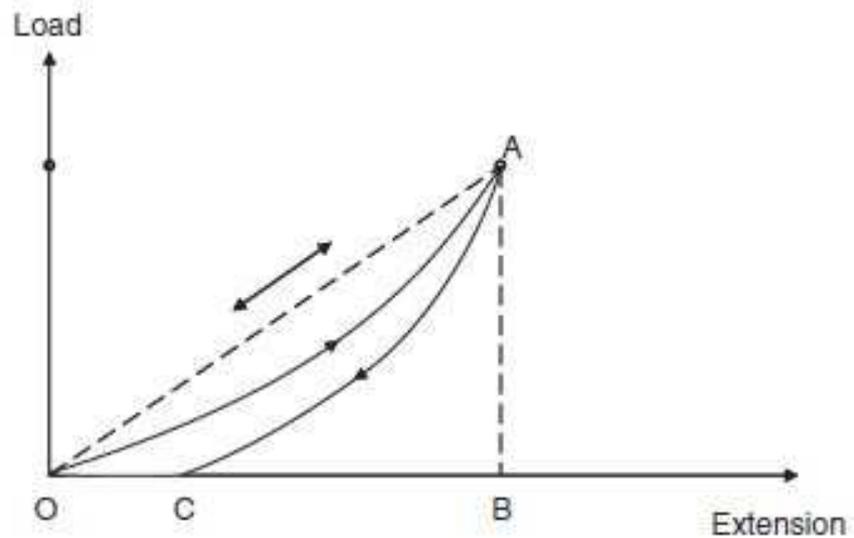


FIGURE 2.6 – Comportement d'un textile à la décharge [59]

- La vitesse de sollicitation [10] [32]
- La température [30]
- L'armure du tissu [21]
- Le titre des fils

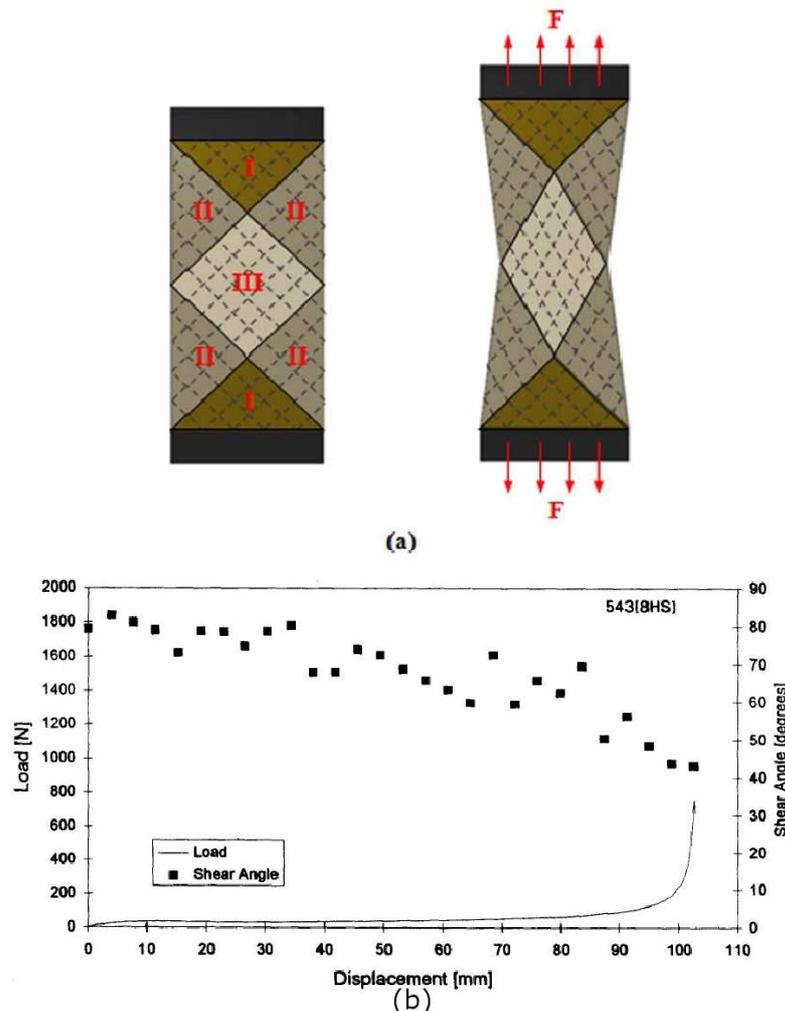


FIGURE 2.7 – (a)Eprouvette de bias test [28] (b)Comportement dans le biais [53]

**Direction Biais** Une autre direction de sollicitation est utilisée dans le domaine industriel le sens du biais, c'est-à-dire la direction orientée à  $45^\circ$  du sens chaîne et trame (si on admet que les directions chaîne et trame sont orientées à  $0^\circ$  et  $90^\circ$ ) ou la bissectrice entre fils de chaîne et de trame [13][74].

Une traction dans cette direction de sollicitation équivaut à un test de cisaillement [57] [52] [53] appelé aussi *bias test* et est utilisée pour modéliser le comportement des tissus [57][71]. Dans cette direction, le comportement du textile est différent de la chaîne et de la trame car, au début de l'essai il y a changement de la configuration des mailles du textile avec un changement de l'angle entre la chaîne et la trame. Puis, les fils de chaîne et de trame entrent en contact et ce contact oppose une résistance plus importante : c'est l'angle de blocage *wrinking angle*. Cette angle est observable seulement dans la partie utile de l'éprouvette définie comme la zone III de la Figure 2.7(a) [28] [57]. Le comportement type pour un essai en biais est donc visible en Figure 2.7 (b) [53]. Au début de l'essai de traction, une force faible est observée pendant l'alignement des fils dans la direction de traction (changement d'angle) puis une fois l'angle de blocage atteint, la force croît jusqu'à la rupture [27].

Certains modèles proposent une prédiction de l'angle de blocage des tissus en fonction de la géométrie des mailles et des fils qui les composent [28] [29]. Cette hypothèse ne prend pas en compte le cas des matériaux avec une enduction. Cette dernière contribue à la rigidité du

matériau dans toutes les directions de sollicitation.

Le comportement d'un tissu dans le biais est donc lié à la nature de l'enduction mais aussi au tissage des fils de chaîne et de trame. L'enchevêtrement a un impact sur la réponse mécanique du tissu dans le biais. Notons d'ailleurs que si les fils de chaîne et de trame sont mis sous tension (précontrainte) la force de frottement entre les fils de chaîne et de trame est plus forte et la résistance au cisaillement augmente [13].

**En résumé,** le comportement d'un matériau tissé dépend de nombreux paramètres liés à sa structure et à sa fabrication et, de manière générale, ce comportement est anisotrope et visco-élasto-plastique. Afin d'étudier le comportement d'un textile en traction simple il est nécessaire de définir la direction de sollicitation de ce dernier. En effet, la réponse est différente pour chacune des directions, comme par exemple pour les résultats de traction sur un tissu PET enduit PVC sollicité suivant diverses directions en Figure 2.8.

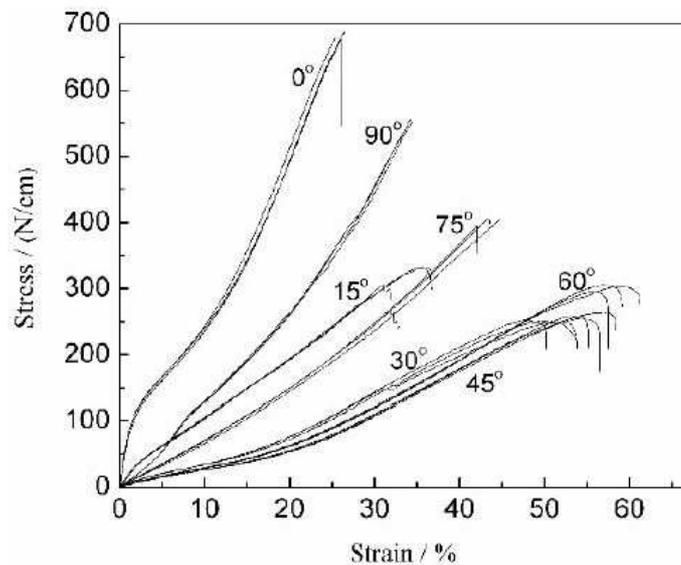


FIGURE 2.8 – Résultats d'essais de traction simple suivant différentes directions de sollicitation d'un tissu PET enduit PVC (angle donné par rapport à la direction Chaîne) [11].

### 2.2.3 Les essais de traction biaxiale

**Les machines d'essais** Les structures textiles sont souvent soumises à une sollicitation biaxiale de par leur utilisation [44]. Plusieurs bancs d'essai ont donc été utilisés pour soumettre les tissus à des sollicitations multidirectionnelles. Nous pouvons citer des essais de gonflage de membrane (*Bulge test*) en Figure 2.9(a) [1] où la pression de gonflage impose une contrainte et la forme du gabarit de gonflage impose les rayons de courbure. C'est un essai complexe qui fournit un état de sollicitation multidirectionnel difficile à quantifier et à adapter si l'on souhaite moduler les intensités de traction suivant une direction. Il existe aussi des bancs de test adaptés à des machines de traction uniaxiale (Fig.2.9(b)[7]) pour appliquer des sollicitations biaxiales via un système de pantographe. Ce montage permet d'imposer un rapport de force entre les deux directions sollicitées en changeant la longueur des barres du pantographe. Enfin des machines de traction biaxiale directe avec deux axes pilotés de façon distincte sont aussi présents dans la littérature (Fig. 2.9(c)) [2].

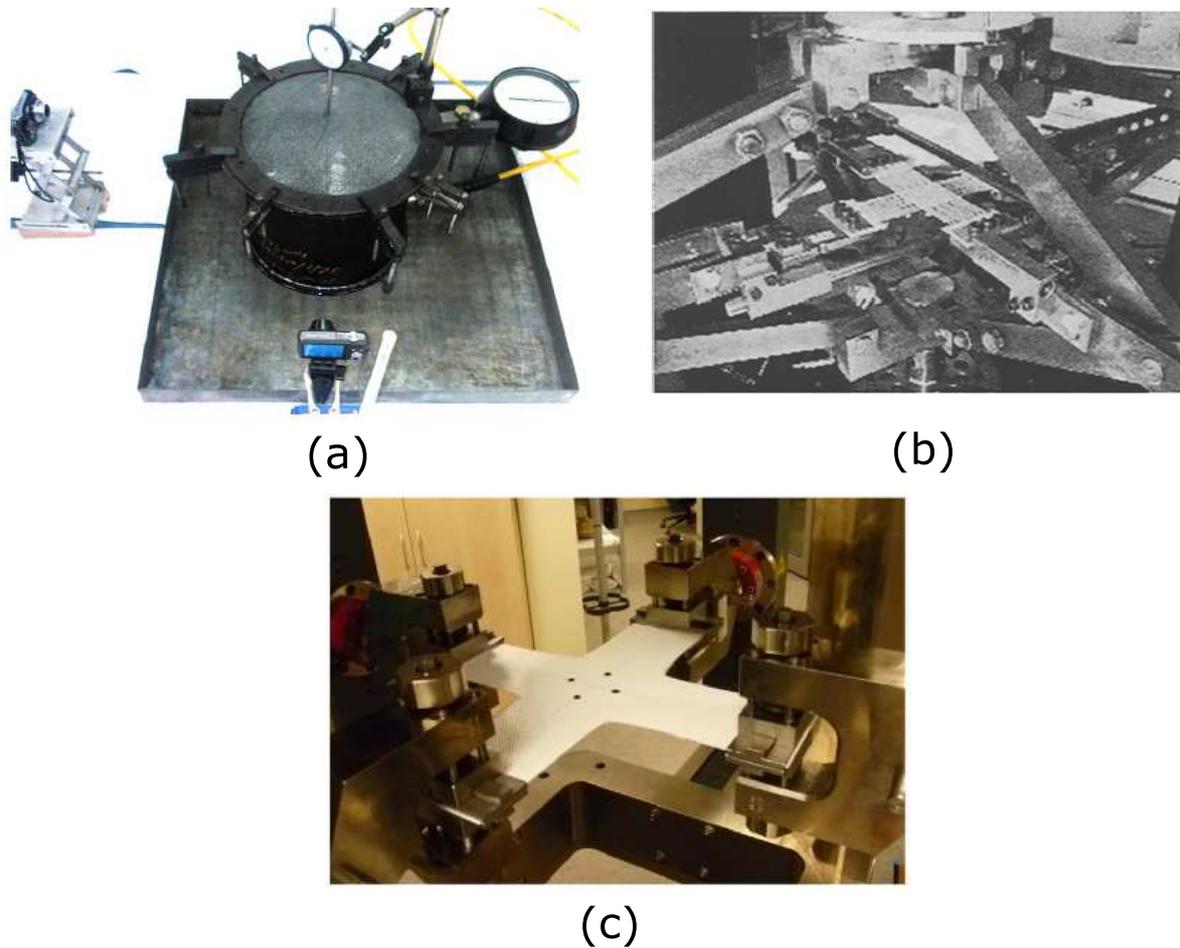


FIGURE 2.9 – Machine de test de traction multidirectionnelle (a) Gonflage de membrane [1] (b) Banc biaxiale adapté à une machine uniaxiale [7] (c) Machine biaxiale de traction directe dans les axes de sollicitation [2]

**Forme de l'éprouvette** Pour des essais similaires sur les métaux, des études d'optimisation de forme ont été menées au Laboratoire 3SR [15]. Ces études concluaient que les branches de l'éprouvette devaient avoir une section supérieure par rapport au centre, pour assurer un niveau de contrainte supérieur en zone centrale, ce qui nécessite des usinages dans l'épaisseur de l'éprouvette. Par ailleurs, des fentes sont prévues le long de chaque branche afin de diminuer la rigidité de celle-ci la direction transverse. Ces actions sont possibles sur les métaux grâce à l'usinage mais comment les réaliser sur des textiles ?

Une étude sur un tissu PET enduit PVC [55] a montré que pour limiter la rigidité transverse, les branches sont incisées dans la direction de sollicitation (Fig 2.10 (a)). Une étude sur un tissu de dirigeable [60] a montré des conclusions proches de celle faite par [15]. En effet, pour limiter la contrainte dans les branches, ces dernières sont renforcées par des couches de tissu collé (Fig 2.10(c)) sur les branches, puis incisées. Chaque branche est donc composée de deux laizes de tissu.

D'autres études comme [73] (Fig 2.10(b)), ou bien [45], ont proposé des formes d'éprouvette respectivement avec des branches de moins en moins large vers le centre et avec une incision centrale, ou bien des branches de largeur fixe et sans incision, mais les résultats proposés ne montrent pas de rupture en zone utile.

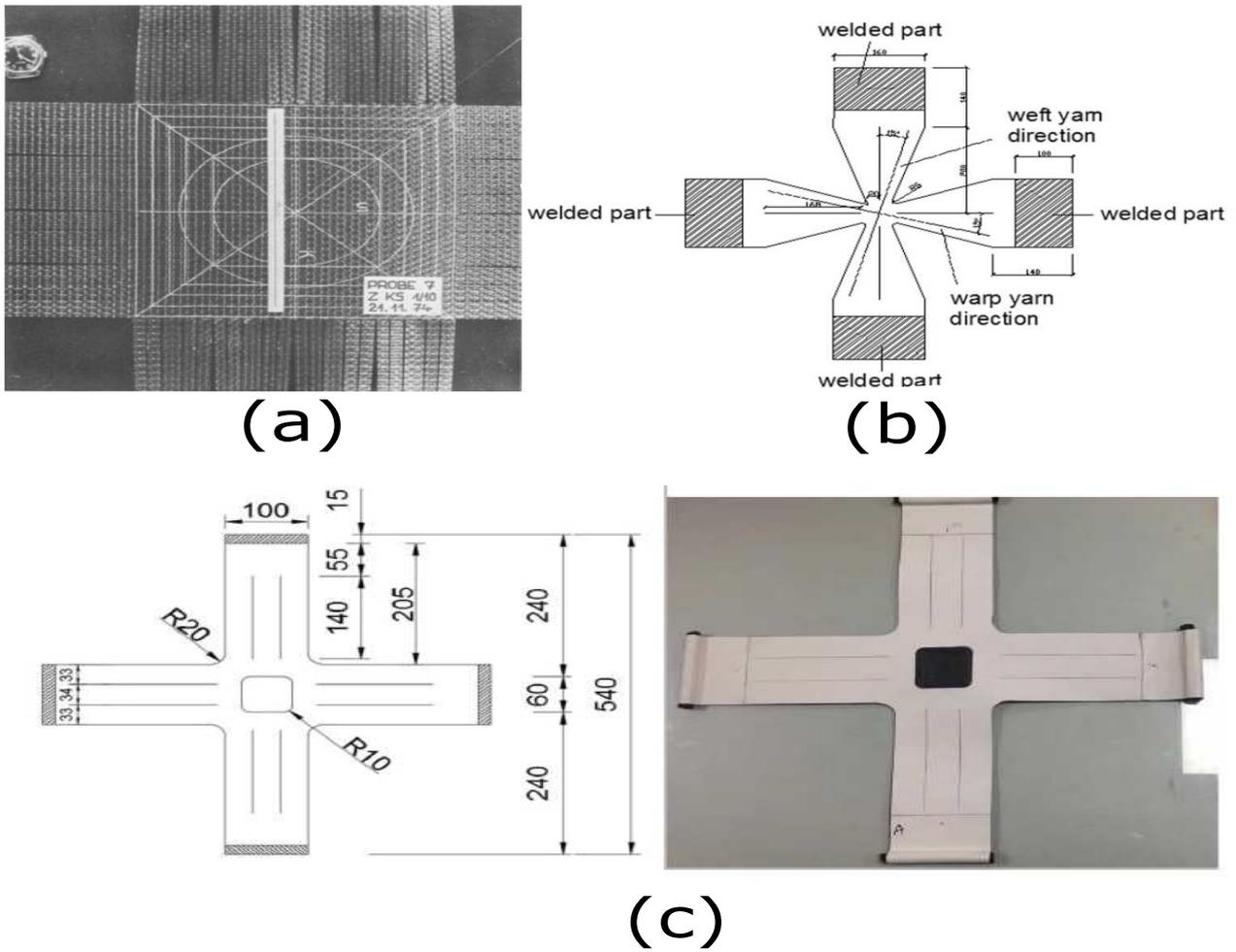


FIGURE 2.10 – Exemples de proposition de géométrie d'éprouvette biaxiale disponibles dans la littérature (a)*Reinhardt et al.*[55] (b)*Yingying et al.* [73] (c)*Shi et al.*[60]

**Les essais réalisés** Dans le cas de chargement radiaux, ou proportionnels, dans le plan des contraintes biaxiales, les essais sont définis par leur rapport de chargement, c'est-à-dire le rapport entre la force appliquée dans la direction de traction 1 et la force appliquée dans la direction de traction 2 ; ceci est illustré dans la Figure 2.11 [24]. Des résultats typiques sont présentés sur la Figure 2.12 sous la forme de graphe force/déplacement ou contrainte/déformation sur lesquels deux courbes sont visibles, une pour chaque direction de sollicitation.

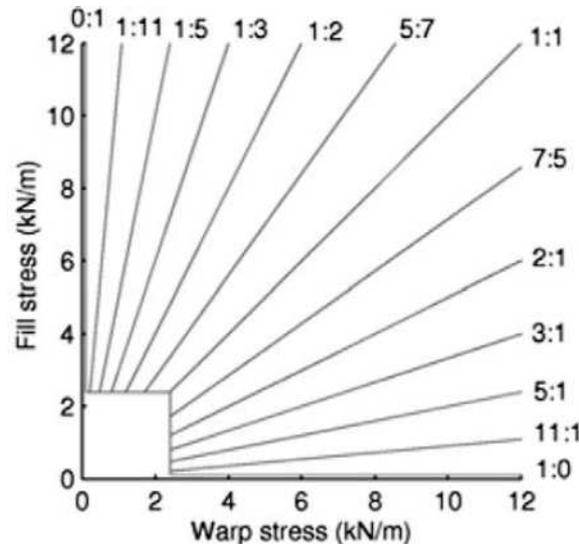


FIGURE 2.11 – Définition des rapports de chargement en sollicitation biaxiale [24]

Même si les résultats sont fortement dépendants du matériau, quelques remarques peuvent être notées :

- un chargement équi-biaxial n'implique pas un comportement chaîne/trame équivalent (Fig.2.12(a))
- l'action du tissage peut, selon la sollicitation imposée, donner comme résultat une déformation négative du tissu et une augmentation des contraintes dans la direction considérée (Fig.2.12(c))
- la forme des courbes de décharge pour une sollicitation biaxiale peut être proche de celle observée pour un chargement uniaxial (Fig.2.12(b))

## 2.3 Les domaines d'utilisations

L'industrie du textile peut être divisée en deux grandes catégories : le secteur de l'habillement où les besoins sont définis par l'offre et la demande en fonction des modes et le secteur des textiles techniques où les matériaux doivent remplir un cahier des charges et répondre à des fonctionnalités [67]. Dans le domaine des textiles techniques, les performances des matériaux s'améliorent constamment et la connaissance des matériaux entraîne une utilisation de ces derniers dans de nombreux domaines. Nous citerons de manière non-exhaustive les domaines suivants [9] :

- Le bâtiment : toile enduite PVC pour les chapiteaux, renfort géotextile dans le génie civil
- Le vêtement de protection : EPI
- L'industrie aéronautique et le transport : renfort composite, airbag
- Le biomédical : orthèse, champ opératoire, biomatériaux de remplacement
- Le sport et le loisir : textile déperlant, voile de parapente
- ...

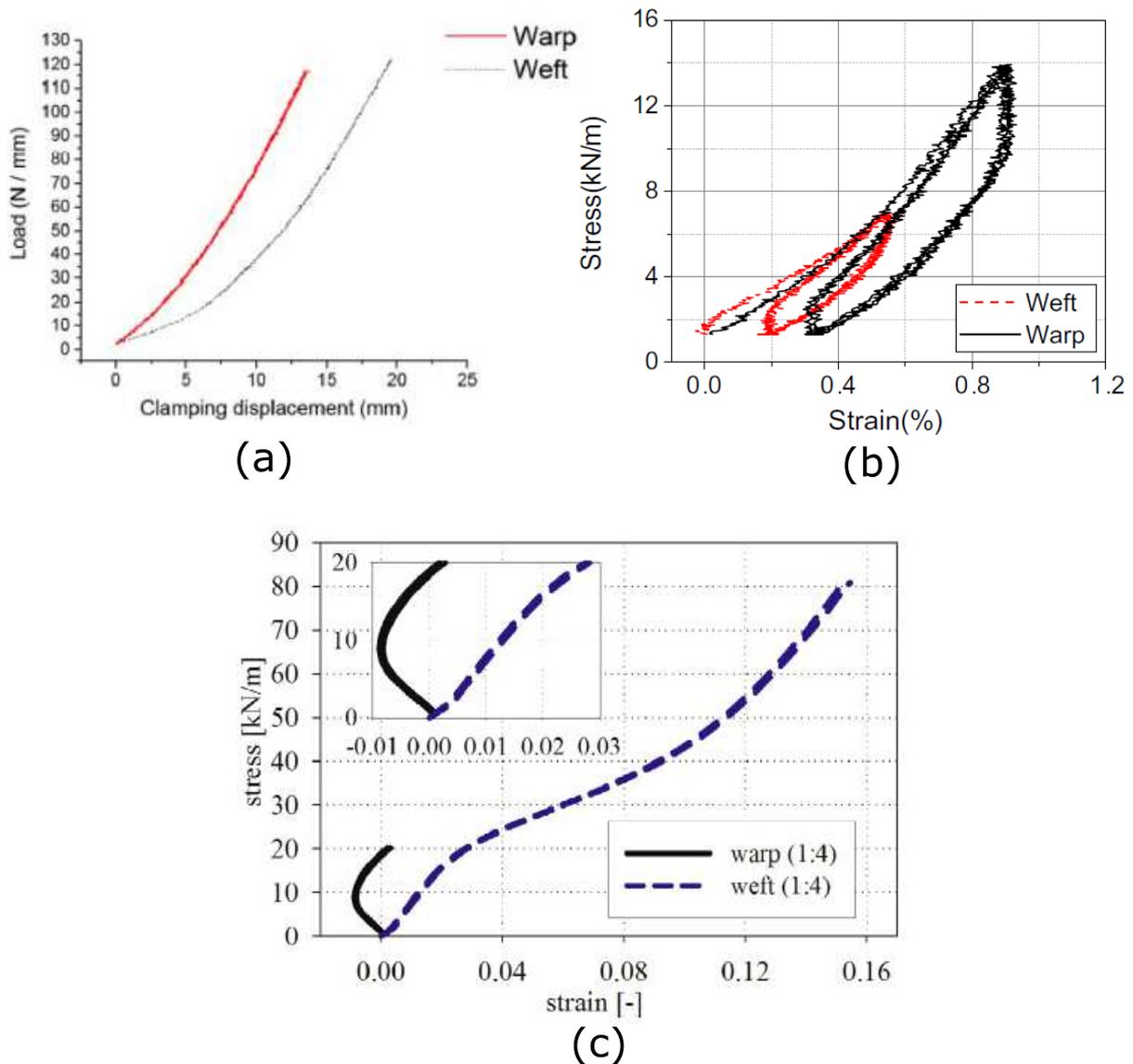


FIGURE 2.12 – Résultats typiques d'un essai de traction (a) équi-biaxiale pour un rapport  $\frac{1}{1}$  [60] (b) pour un essai de rapport  $\frac{2}{1}$  [54] (c) pour un essai de rapport  $\frac{1}{4}$  [2]

### 2.3.1 Une application des matériaux tissés : le kite

Parmi les nombreux domaines d'utilisation des matériaux tissés, il existe celui de la voile maritime. Les voiles des bateaux du nautisme sont des exemples de structures composées de matériaux tissés. Des produits d'un nouveau genre sont à l'étude : la voile de **kite** (ou cerf-volant) géant directement tiré du domaine sportif associé, le kitesurf.

Ces voiles sont une évolution des cerfs-volants. Selon l'utilisation qui en est faite, il existe plusieurs formes de kite : [5]

- les voiles de vol loisir où les formes peuvent être très variées, voir Figure 2.13(a)
- Les voiles en *C-shape* servant au domaine sportif et maritime, voir Figures 2.13(b) et 2.15
- Les voiles en forme d'aéroplane (*kiteplane*) pour les turbines électriques activées par la traction de kite, voir Figure 2.13(c) [3] [48] [58]

Quelle que soit la forme adoptée, le principe des kites est de pouvoir voler en étant manœuvré depuis le sol, ou la surface de l'eau pour les kitesurfs, à l'aide de lignes de commande. La gestion de la tension dans les lignes en fonction du vent permet de manœuvrer le kite et de suivre des

trajectoires de vol. Dans le cadre de ce travail, le type de kite adopté sera celui issu du domaine sportif : *C-shape*.



FIGURE 2.13 – Trois différents types de kites (a)cerf-volant de loisir (b)*C-shape* de kitesurf (c)*Kiteplane* pour turbine à kite

### 2.3.2 Anatomie du kite

Il existe deux types de kite :

**Le kite à caisson** : la géométrie de la structure du kite est donnée par le vent qui s'engouffre dans des caissons et gonfle naturellement la structure. C'est la même technologie que pour les structures des parapentes, ceci est illustré par la Figure 2.14.

**Le kite à boudin** : La forme générale du kite est obtenue par des boudins gonflés situés au niveau du bord d'attaque et sous la canopée. Ces boudins sont gonflés grâce à une pompe avant le vol, voir Figure 2.15.

Le kite est composé de :

**le bords d'attaque ou le guindant** (*leading edge*) : arête où arrive le vent ;

**le bord de fuite ou la chute** (*trailing edge*) : bords situé à la fin de l'écoulement de l'air ;

**les lignes** (*lines*) : éléments de manœuvre du kite et de transmission de l'effort de traction ;

**les oreilles** (*ears*) : les deux zones du kite proches des lignes d'attache, aux extrémités de l'envergure ;

**la canopée** (*canopy*) : élément qui forme la surface de prise au vent du kite et sépare l'intrados de l'extrados ;

**l'intrados** (*intrados*) : surface du kite qui se voit imposer une surpression relative ;

**l'extrados** (*extrados*) : surface du kite qui se voit imposer une dépression relative.

## 2.4 Les critères de rupture pour les matériaux tissés

Il existe plusieurs critères mécaniques de rupture pour les matériaux textiles. Dans la littérature, les critères mécaniques sont utilisés pour définir une contrainte à la rupture (ou force de rupture) en fonction de la direction de sollicitation du textile dans le cas uniaxial. De part la nature des tissus, ces critères sont adaptés aux matériaux anisotropes. Certains critères s'appuient sur des essais particuliers, notamment des essais de déchirure [51]. La liste des critères



FIGURE 2.14 – Kite à caisson - ([www.mackiteboarding.com](http://www.mackiteboarding.com))

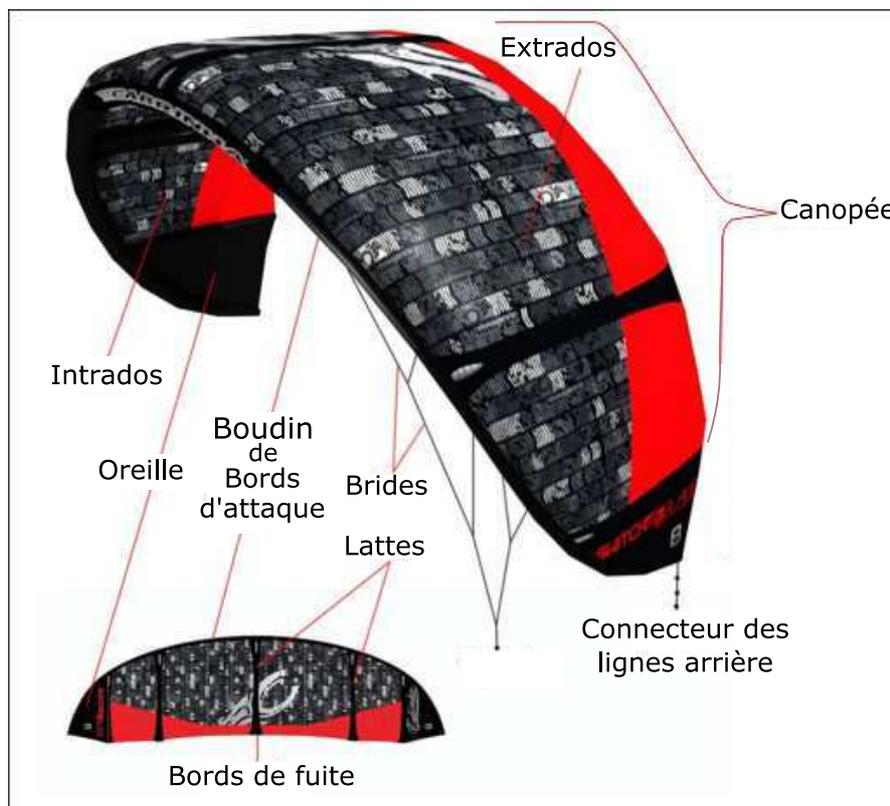


FIGURE 2.15 – Anatomie d'un kite à boudin - ([kiteunssdunkerque.fr/le-materiel](http://kiteunssdunkerque.fr/le-materiel))

présentés dans cette section n'est pas exhaustive mais représente les critères les plus couramment rencontrés dans la littérature [11] [45] [73], et peuvent être considérés comme des critères dérivés de la forme générale de celle du critère de Tsai Wu [64].

### 2.4.1 Critère de Tsai Wu

Ce critère a été développé pour les matériaux anisotropes [64] et est aujourd'hui employé fréquemment pour les matériaux composites uni ou multicouches [61]. Le critère de Tsai-Wu propose le calcul d'une contrainte équivalente qui prend en considération toutes les directions du matériau. Sa forme générale pour un état de contrainte 2D dans le plan (1, 2) est donnée en équation 2.7.

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_6\tau_{12} + F_{66}\tau_{12}^2 = 1 \quad (2.7)$$

Avec les contraintes  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\tau_{12}$  respectivement les contraintes dans la direction 1, 2 et la contrainte de cisaillement dans le plan. Les paramètres  $F_{ij}$  sont des paramètres matériau liés à sa ruine et définis par :

$$\begin{aligned} F_1 &= \left( \frac{1}{X} - \frac{1}{X'} \right) \\ F_2 &= \left( \frac{1}{Y} - \frac{1}{Y'} \right) \\ F_{12} &= -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{XX'} \frac{1}{YY'}} \\ F_{11} &= \frac{1}{XX'} \\ F_{22} &= \frac{1}{YY'} \\ F_6 &= \left( \frac{1}{S} - \frac{1}{S'} \right) \\ F_{66} &= \frac{1}{SS'} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Avec  $X$ ,  $Y$  et  $S$  respectivement les limites à rupture en **traction uniaxiale** dans les directions 1, 2 et la rupture en cisaillement ;  $X'$ ,  $Y'$  et  $S'$  représentent respectivement les limites à rupture en **compression uniaxiale** dans les directions 1, 2 et en cisaillement.

Ce critère est proposé sous sa forme générale et prend en compte le comportement des matériaux ayant une résistance à la compression. Des critères adaptés aux matériaux tissés sont présentés ci-après. Par la suite, nous considérerons le cas où la sollicitation est orientée dans les axes Chaîne et Trame et notre convention de numérotation des axes est la suivante :  $1 \equiv C$  et  $2 \equiv T$ .

### 2.4.2 Critère de Tsai-Hill

Le critère de Tsai-Hill est un critère général pour les matériaux anisotropes. Il définit un état de sollicitation équivalent qui correspond à une valeur seuil qu'il ne faut pas dépasser pour éviter la rupture. Cette contrainte équivalente prend en compte la contrainte appliquée dans le sens Chaîne noté  $\Sigma_C$ , dans le sens Trame notée  $\Sigma_T$  et la contrainte de cisaillement  $\Sigma_{CT}$ . Sa formule est donnée par l'équation 2.9. Le critère est normé de sorte que la contrainte équivalente calculée doit être inférieur à 1 pour éviter toute rupture. C'est un critère de Tsai-Wu où les contraintes limites

en compression sont remplacées par des contraintes limites en traction ( $X = X', Y = Y', S = S'$ ) [40].

$$\left(\frac{\Sigma_C}{X}\right)^2 + \left(\frac{\Sigma_T}{Y}\right)^2 - \frac{\Sigma_C \Sigma_T}{X^2} + \left(\frac{\Sigma_{CT}}{S}\right)^2 = 1 \quad (2.9)$$

Avec les paramètres matériau  $X$ ,  $Y$  et  $S$  respectivement la contrainte à la rupture en traction dans le sens Chaîne, Trame et la contrainte de rupture en Cisaillement.

La forme (2.9) du critère peut s'écrire sous forme matricielle ainsi :

$$(\Sigma_C \quad \Sigma_T \quad \Sigma_{CT}) \begin{pmatrix} \frac{1}{X^2} & -\frac{1}{2} \frac{1}{X^2} & 0 \\ -\frac{1}{2} \frac{1}{X^2} & \frac{1}{Y^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{S^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Sigma_C \\ \Sigma_T \\ \Sigma_{CT} \end{pmatrix} = 1 \quad (2.10)$$

Considérons un chargement du matériau dans une base orthonormée  $(\vec{e}_1^\theta, \vec{e}_2^\theta)$  tel que l'axe  $\vec{e}_1^\theta$  soit orienté d'un angle  $\theta$  par rapport à la direction chaîne. La rotation du tenseur des contraintes en notation de l'ingénieur s'écrit :

$$\begin{pmatrix} \Sigma_C \\ \Sigma_T \\ \Sigma_{CT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & -\sin 2\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & \sin 2\theta \\ \sin\theta \cos\theta & -\sin\theta \cos\theta & \cos 2\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Sigma_{11}^\theta \\ \Sigma_{22}^\theta \\ \Sigma_{12}^\theta \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

où  $(\Sigma_{11}^\theta, \Sigma_{22}^\theta, \Sigma_{12}^\theta)$  représente les composantes du tenseur des contraintes dans la base du chargement. Dans le cas d'un chargement de traction simple dans la direction  $\theta$  par rapport à la direction chaîne :  $\Sigma_{22}^\theta = \Sigma_{12}^\theta = 0$  et  $\Sigma_{11}^\theta$  notée  $\Sigma_\theta$ , la relation 2.11 conduit au changement de variable suivant :

$$\begin{cases} \Sigma_C = \Sigma_\theta \cdot \cos^2\theta \\ \Sigma_T = \Sigma_\theta \cdot \sin^2\theta \\ \Sigma_{CT} = \Sigma_\theta \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta \end{cases} \quad (2.12)$$

et l'expression du critère dans les axes  $(\vec{e}_1^\theta, \vec{e}_2^\theta)$  devient :

$$\left(\frac{\cos^2\theta}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sin^2\theta}{Y}\right)^2 + \left(\frac{1}{S^2} - \frac{1}{X^2}\right) \cos^2\theta \sin^2\theta = \frac{1}{\Sigma_\theta^2} \quad (2.13)$$

La forme du critère 2.13 est reprise par [11] [45] et permet d'établir des graphes de contrainte en fonction de l'angle d'application de l'effort. La Figure 2.16 donne un résultat typique de prédiction du critère de Tsai-Hill dans le cas d'un matériau tissé PET enduit PVC [11].

### 2.4.3 Critère de Norris

Des études [45] [73] ont utilisé le critère de Norris qui propose une correction du critère de Tsai-Hill. Cette correction concerne le terme  $\Sigma_C \Sigma_T$  ; en prenant en compte la différence des niveaux de contrainte à la rupture dans le sens chaîne et trame :

$$\left(\frac{\Sigma_C}{X}\right)^2 + \left(\frac{\Sigma_T}{Y}\right)^2 - \frac{\Sigma_C \Sigma_T}{XY} + \left(\frac{\Sigma_{CT}}{S}\right)^2 = 1 \quad (2.14)$$

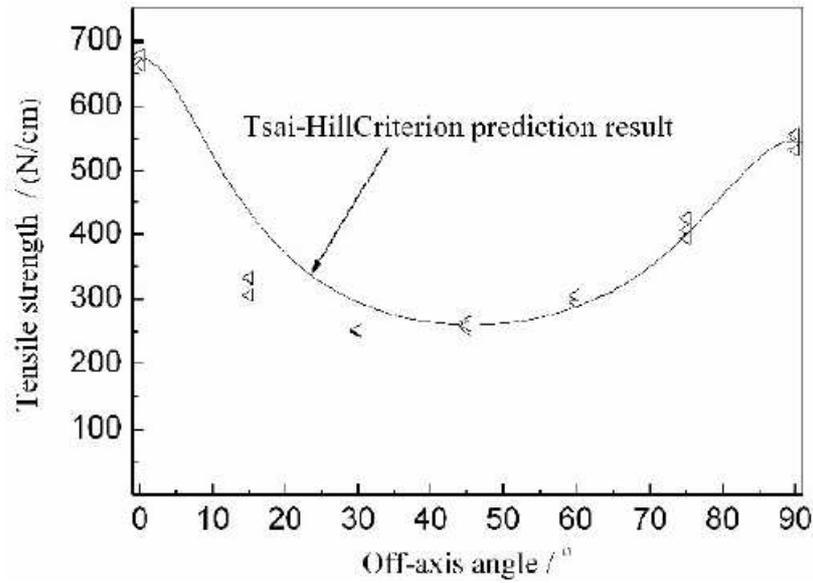


FIGURE 2.16 – Exemple de prédiction du critère de Tsai Hill pour un tissu PET enduit PVC [11]

#### 2.4.4 Critère de Yeh-Stratton

De même, le critère de Yeh-Stratton utilisé dans certains travaux [73] [74], propose la correction suivante :

$$\left(\frac{\Sigma_C}{X}\right) + \left(\frac{\Sigma_T}{Y}\right) - \frac{\Sigma_C \Sigma_T}{X^2} + \left(\frac{\Sigma_{CT}}{S}\right)^2 = 1 \quad (2.15)$$

Cette correction propose de mettre un classement dans l'ordre d'influence en plaçant les termes de contraintes dans les directions naturelles à l'ordre 1 et les termes de contraintes mixte et de cisaillement à l'ordre 2.

#### 2.4.5 Bilan

Les études menées dans la littérature présentent des critères mécaniques à la rupture pour les matériaux tissés. Les propositions correspondent généralement à des critères de type Tsai-Wu modifié dont les paramètres sont souvent identifiés à partir de sollicitations uniaxiales comme le montre la Figure 2.17, par exemple. L'étude de la prédiction de ce type de critères en sollicitations biaxiales est rarement traitée dans la littérature.

De même, les auteurs qui étudient l'évolution des contraintes résiduelles au cours d'essais cycliques uniaxiaux [70], ou biaxiaux [72], s'intéressent rarement à leur application à des critères de limite d'élasticité ou limite d'utilisation du matériau.

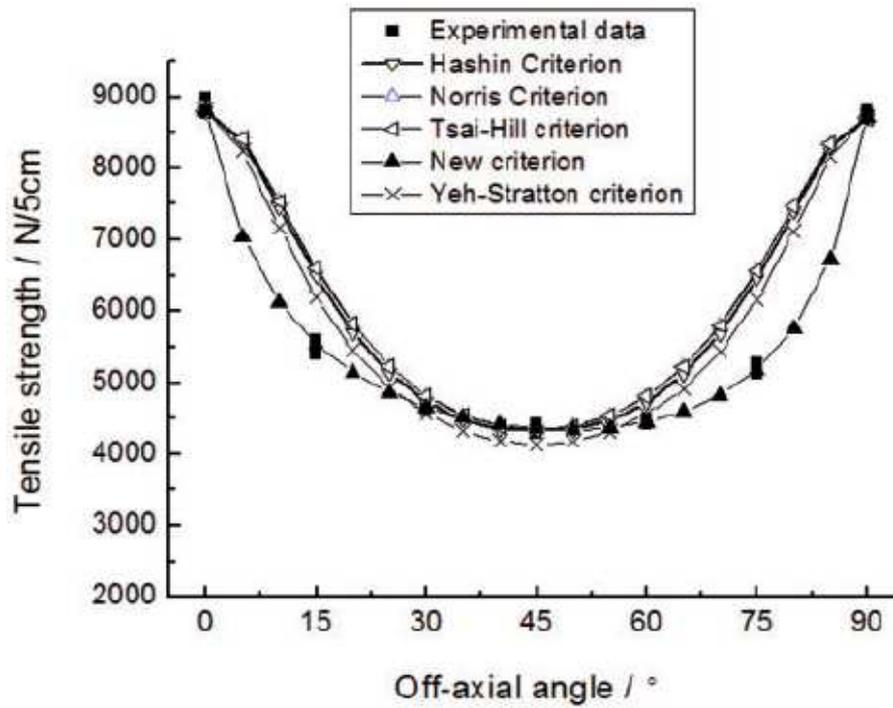


FIGURE 2.17 – Exemple de comparaison de critère à la rupture pour un tissu fibre de verre enduit PTFE [73]

## Première partie

Vers la définition d'une limite d'utilisation  
pour un matériau tissé



# Chapitre 3

## Limite d'utilisation d'un kite en déformation

### 3.1 Préambule

Dans le cas du dimensionnement d'une pièce mécanique métallique subissant des efforts extérieurs, le concepteur doit trouver un compromis entre son besoin fonctionnel (la fonction que doit réaliser la pièce) et les contraintes de conception (limitation du poids, encombrement, coût, technique de fabrication ...). En particulier, le concepteur doit choisir pour chaque pièce le matériau adéquat pour réaliser ce compromis et répondre au cahier des charges. Dans l'exemple des industries du transport, le concepteur choisira le matériau le plus léger pour économiser du carburant, mais aussi celui qui est capable de supporter les contraintes mécaniques appliquées sur la pièce. Pour l'aider dans son choix, notamment par rapport à la résistance des matériaux, il a, à sa disposition, des critères mécaniques : la contrainte appliquée doit être inférieure à la contrainte limite d'utilisation du matériau. Pour les matériaux métalliques, la contrainte limite d'utilisation correspond souvent à la limite d'élasticité du matériau. Cette limite est définie par une convention telle que la contrainte qui induit une déformation permanente de 0.2% à la décharge, avec l'hypothèse d'une décharge élastique [23].

Dans le cas des structures tissées, la logique de conception est équivalente. Le concepteur requiert un critère mécanique et une contrainte limite d'utilisation. Cela amène la question suivante : **Qu'est-ce qu'une contrainte limite d'utilisation pour un matériau tissé ?** (Points *A*, *C* et *E* de la Figure 3.1)

Il existe des travaux permettant de calculer et dimensionner des structures textiles de manière générale [44] et notamment dans le cadre des textiles utilisés dans l'architecture [6]. Cependant et à notre connaissance, la réponse à cette question n'a pas fait l'objet de travaux spécifiques, notamment dans le domaine des kites. Pourtant la réponse à cette question correspond à une nécessité, dans ce domaine.

Ainsi, dans ce chapitre, qui correspond à la première partie du mémoire, nous proposons une méthode pour définir un domaine d'utilisation des matériaux tissés destinés à la confection des kites. Dans une première étape de l'étude, le domaine d'utilisation sera défini par des valeurs de déformation résiduelle à la décharge (Points *B*, *D* et *F* de la Figure 3.1).

Adopter l'hypothèse d'un domaine élastique, très proche de l'origine, avec une déformation résiduelle de 0.2%, comme dans le cas des matériaux métalliques, n'est pas réaliste et ne correspond pas à une pratique courante dans le domaine des matériaux tissés. Alors comment faire

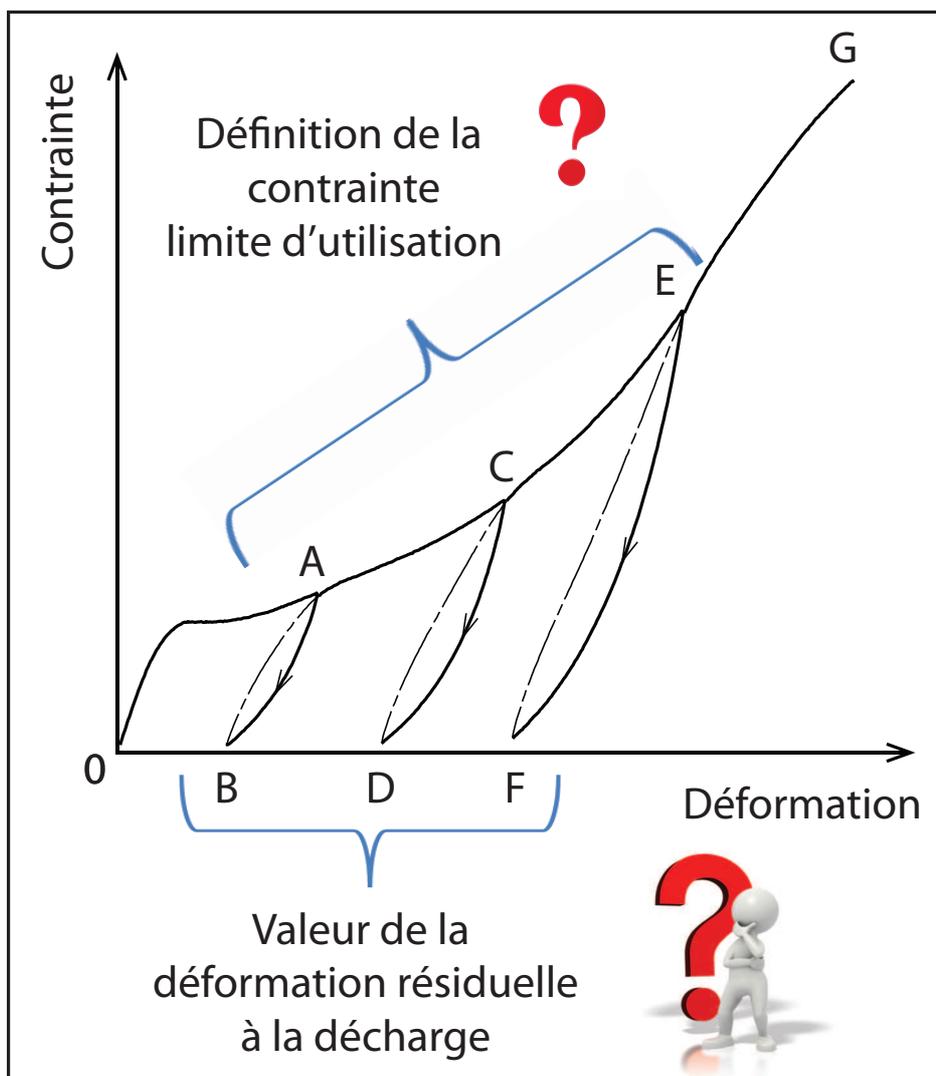


FIGURE 3.1 – Contrainte limite d'utilisation et déformation résiduelle pour un matériau tissé

pour déterminer une valeur de déformation résiduelle compatible avec l'utilisation des matériaux dans le domaine des kites ?

Pour ce faire il faudrait connaître la valeur de déformation résiduelle qui dégrade un kite d'un état neuf à un état impropre au vol ou dont les performances aérodynamiques seraient amoindries voir délétères pour les applications envisagées par Beyond The Sea. Afin de proposer une valeur de déformation résiduelle limite, deux approches ont été menées :

- Une mesure des déformations post-mortem de kites de taille normale ou Kites personnels dit "Hors d'usage" ; ces structures ont subi une utilisation intensive par des sportifs de haut niveau, durant une période suffisante, dans des conditions réelles d'usage ;
- Une analyse par simulation numérique de l'impact de la déformation d'une aile sur ses performances aérodynamiques

A l'issu de ce travail, nous reviendrons sur la question initiale : la contrainte limite d'utilisation sera alors définie comme la contrainte correspondante à la déformation résiduelle limite adoptée et qui résulte d'une décharge. Pour les matériaux tissés l'hypothèse de décharge élastique, adoptée dans le cas des matériaux métalliques, n'est pas réaliste compte tenu de la forte irréversibilité et la forte non-linéarité du comportement lors des décharges (branches  $AB$ ,  $CD$  et  $EF$  de la Figure 3.1). Une prise en compte de la forme des décharges est alors nécessaire. Nous reviendrons sur cet aspect à la fin de ce chapitre et dans la partie IV de ce mémoire où une définition complète de l'hypothèse de décharge sera donnée.

## 3.2 Mesure des déformations résiduelles sur des kites usagés

L'objectif de cette première approche expérimentale correspond à la mesure des déformations permanentes des matériaux qui composent des kites usagés. Cette mesure est obtenue grâce à la comparaison des géométries des mailles élémentaires des tissus neufs et des tissus usagés. Ce travail a été réalisé sur le tissu qui constitue le kite, à l'exception de celui des boudins, qui servent de renforts à l'ensemble de la structure.

Pour cette étude, deux kites usagés étaient disponibles. Ces deux structures seront appelées Kite 1 et Kite 2. Les références des matériaux constituants sont confidentielles. Le Kite 1, de couleur vert-jaune, est essentiellement réalisé avec un seul matériau tissé, appelé matériau A. Le Kite 2 est constitué de deux matériaux : B, de couleur verte et C, de couleur violette. Notons que le matériau B a subi un traitement d'ennoblissement, qui correspond à un laminage, qui permet une meilleure adhésion de l'enduction avec la toile. Les trois matériaux testés existent dans des états neufs et des états usagés. Les échantillons des matériaux usagés sont prélevés dans des kites usagés de  $9m^2$  qui ont été utilisés, de façon intensive, durant plusieurs mois au Cap Vert, par des sportifs de haut niveau (cf. Fig. 3.2). Ces échantillons ont donc subi un vieillissement sous sollicitations mécaniques en conditions réelles d'utilisation, dans un environnement marin avec une exposition aux UV, à l'humidité et au milieu salin.

Pour caractériser la géométrie des mailles élémentaires des matériaux tissés nous avons utilisé un montage sur une loupe binoculaire, présentée sur Figure 3.3. Le matériau tissé est positionné sur un panneau de LED, qui fournit un éclairage, sous le matériau tissé, symbolisé par un carré blanc sur la Figure 3.3. Une mire en verre, graduée au  $0.1mm$  est positionnée sur le matériau tissé et permet une mesure des deux longueurs de la maille élémentaire du tissu, dans les directions chaîne et trame (Fig. 3.3). Par ailleurs, la loupe binoculaire permet la mesure de l'angle de maille ou angle entre les fils de chaîne et les fils de trame. L'appareil photographique installé sur la loupe binoculaire permet de réaliser des photographies à l'aide d'un capteur de 45 millions de pixels. Les images du tissu sont prises avec un grossissement  $\times 90$ , obtenu grâce à la loupe



FIGURE 3.2 – Prélèvement d'échantillons sur un kite usagé

binoculaire.

La Figure 3.4 donne des images typiques obtenues grâce à la binoculaire et l'appareil photographique. La longueur d'une maille dans la direction chaîne sera notée  $w$ , la longueur d'une maille dans la direction trame sera notée  $f$  et l'angle entre les directions chaîne et trame sera noté  $\alpha$ . La mesure des longueurs est effectuée à partir des clichés obtenus grâce à l'appareil photographique et au logiciel d'analyse d'image : ImageJ. Un étalonnage préalable est réalisé grâce à la mire, graduée au dixième de millimètre, placée sur le tissu. Cet étalonnage permet au logiciel d'analyse d'image de convertir les pixels en distances exprimées en millimètres (Fig. 3.4 – Etape 1). Pour obtenir une mesure de la déformation résiduelle, il est nécessaire d'avoir un état de référence non-déformé, de la maille élémentaire. Cette information est obtenue sur un échantillon de tissu neuf (Fig. 3.5). Dans ce cas la longueur d'une maille dans la direction chaîne sera notée  $w_0$ , la longueur d'une maille dans la direction trame sera notée  $f_0$  et l'angle entre les directions chaîne et trame sera noté  $\alpha_0$ . Notons que la maille élémentaire n'est pas parfaitement couverte par des fils et qu'il existe un espace au milieu de la maille entre les fils de chaîne et de trame, rempli par l'enduction seule, que nous appellerons espace inter-maille ; ceci est illustré par la Figure 3.5.

Les déformations résiduelles dans les directions chaîne et trame seront notées  $\varepsilon_p^w$  et  $\varepsilon_p^f$ , respectivement. Ces déformations sont exprimées par :

$$\varepsilon_p^w = \frac{w - w_0}{w_0} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_p^f = \frac{f - f_0}{f_0} \quad (3.2)$$

Les mailles élémentaires peuvent subir des sollicitations de cisaillement qui se traduisent par une variation d'angle entre la chaîne et la trame, cette variation est aussi mesurable sur les clichés. La déformation résiduelle de distorsion  $\varepsilon_p^{wf}$  ou  $\frac{\gamma}{2}$  est alors calculée par :

$$\varepsilon_p^{wf} = \frac{\gamma}{2} = \frac{\alpha - \alpha_0}{2} \quad (3.3)$$

Pour les deux kites usagés disponibles, différentes zones ont été étudiées : zone de la canopée ou zone intermédiaire et zone des oreilles. Pour chaque zone nous avons réalisé différents points

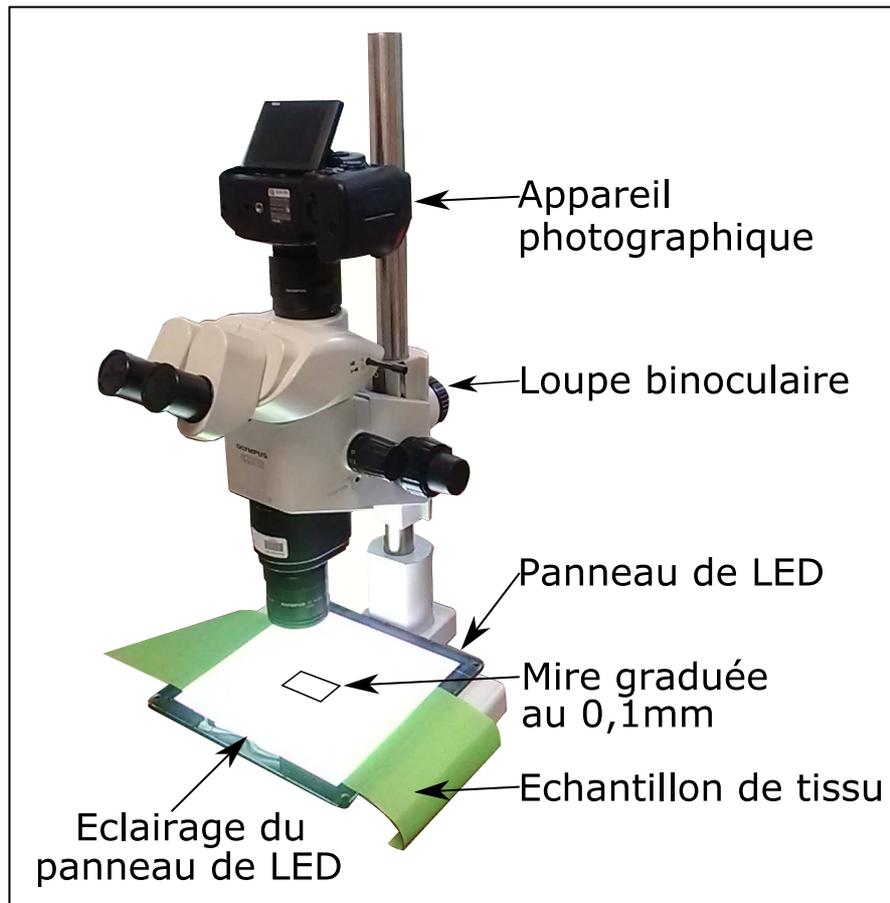


FIGURE 3.3 – Montage et observation du matériau tissé à l'aide d'un binoculaire et d'un appareil photographique

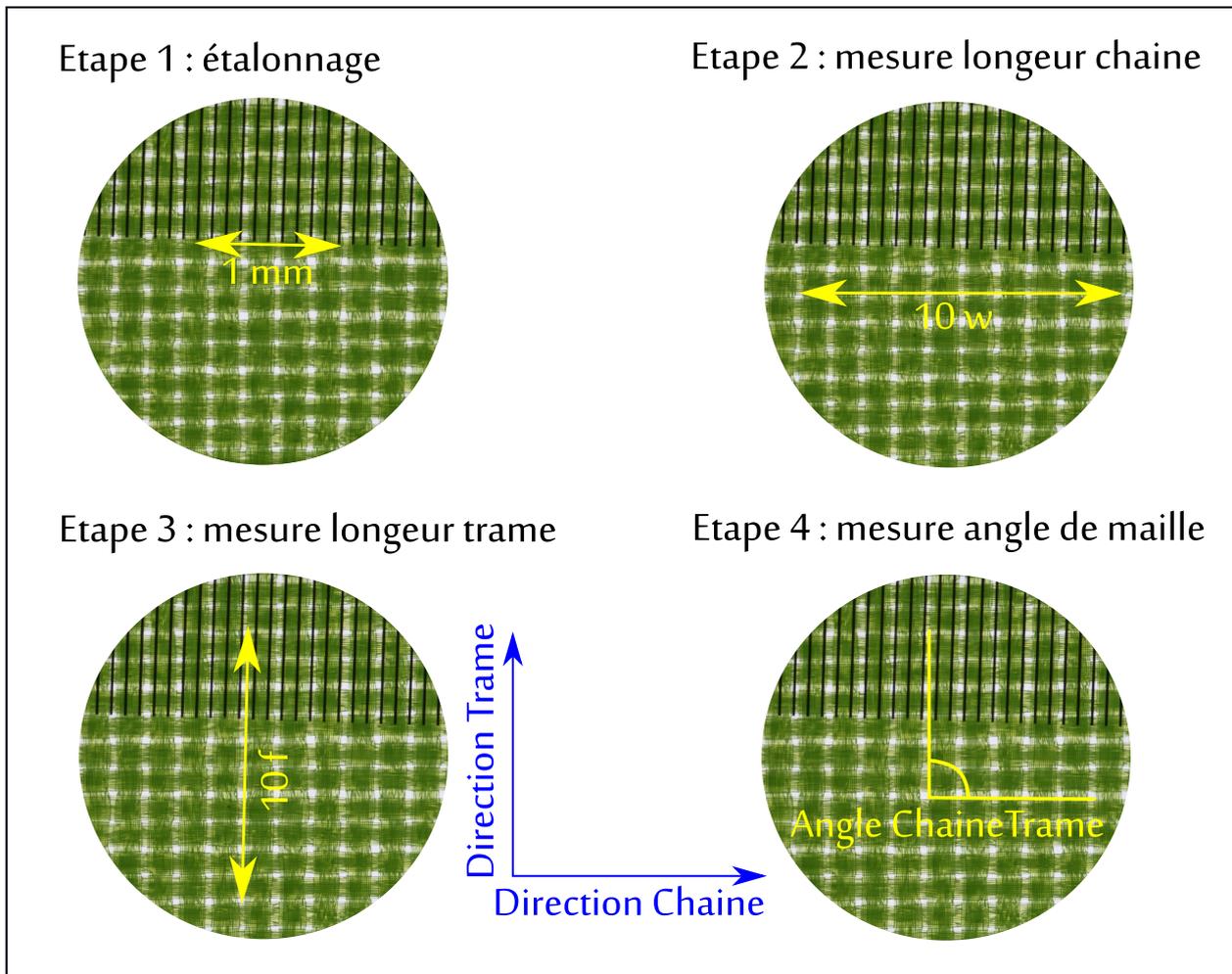


FIGURE 3.4 – La mire graduée au  $0.1\text{mm}$  permet une mesure des deux longueurs de la maille élémentaire du tissu, dans les directions chaîne et trame. L'équipement permet aussi la mesure de l'angle de maille ou angle entre les fils de chaîne et de trame

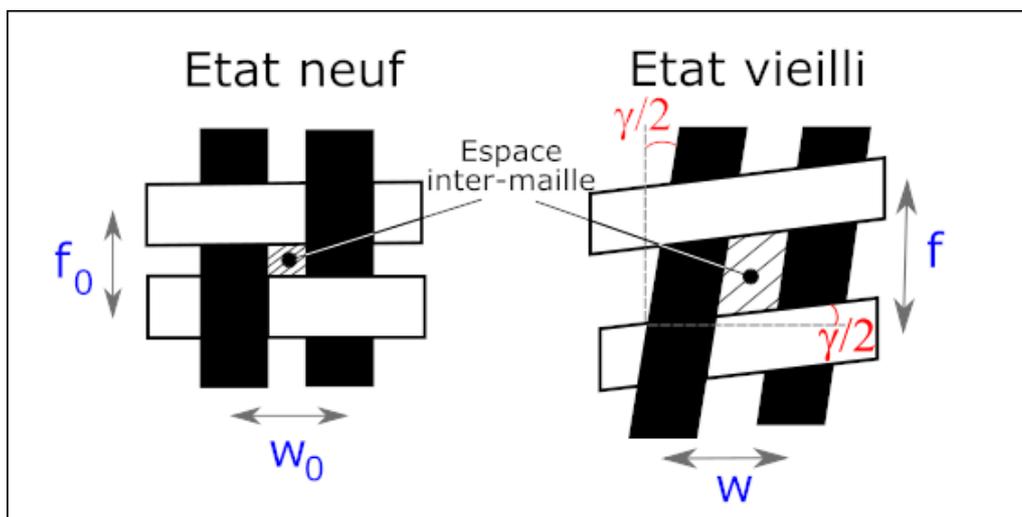


FIGURE 3.5 – Mesures géométriques sur les mailles

de mesure. Pour chacun des points de mesure, cinq clichés ont été réalisés, à partir desquels cinq caractérisations de la maille élémentaire ont été effectuées ( $w, f, \alpha$ ). Les annexes A1 et A2 donnent les emplacements des points de mesure et les valeurs moyennes des mesures de ( $w, f, \alpha$ ), pour les trois matériaux A, B et C. Pour chacun de ces matériaux, dix mesures des paramètres initiaux ( $w_0, f_0, \alpha_0$ ) sont réalisés, sur le matériau neuf, afin de pouvoir en déduire les valeurs des trois déformations ( $\varepsilon_p^w, \varepsilon_p^f, \varepsilon_p^{wf}$ ). Les annexes A1 et A2 donnent, pour les trois matériaux, les valeurs moyennes de ces trois composantes de déformation à la surface des voiles. Les valeurs moyennes des trois composantes de déformation ( $\varepsilon_p^w, \varepsilon_p^f, \varepsilon_p^{wf}$ ) et la position respective de leur point de mesure sont résumées sur la Figure 3.6 pour les kites 1 et 2. Pour le Kite 2, nous indiquons sur chaque point de mesure le matériau correspondant (B ou C). Notons que pour les deux structures, la chaîne est orientée le long de la corde et la trame le long de l'envergure du kite.

En examinant les résultats de mesure présentés sur la Figure 3.6, il est possible d'en extraire les valeurs minimales et maximales, pour chaque matériau. Ces valeurs sont données dans le tableau 3.1.

Déformation	Matériau A		Matériau B		Matériau C	
	Min (%)	Max (%)	Min (%)	Max (%)	Min (%)	Max (%)
$\varepsilon_p^w$	-2,4	-0,6	-3,7	-0,2	-2	-0,7
$\varepsilon_p^f$	2,1	3,8	-0,4	0,1	-0,9	0,5
$\varepsilon_p^{wf}$	-0,2	1,3	-0,7	2,4	-1,3	0

TABLE 3.1 – valeurs moyennes minimales et maximales des trois composantes de déformation ( $\varepsilon_p^w, \varepsilon_p^f, \varepsilon_p^{wf}$ ), pour chacun des matériaux A, B et C

Le tableau 3.1 montre que la déformation le long de la direction chaîne est systématiquement une déformation de contraction. Cet aspect est certainement lié au phénomène d'embuvage associé à un chargement en traction plus intense dans la direction de l'envergure du kite. Les matériaux A et C présentent des valeurs très proches de déformation le long de la direction chaîne et le matériau B, qui a subi un laminage, présente une valeur de déformation de contraction plus importante. Notons, néanmoins que les déformations résiduelles de type allongement ont un impact plus défavorable, que celles en contraction, en terme d'endommagement et de rupture du matériau. Dans la direction trame, le matériau A présente l'allongement maximal le plus important : la déformation résiduelle atteint la valeur de 3,8%. Le matériau C présente une déformation résiduelle maximale plus faible de 0,5%. Le laminage subi par le matériau B semble lui conférer une rigidité importante dans le sens trame, puisque c'est le matériau qui présente l'allongement maximal le plus faible. En distorsion, la déformation est entre -1% et 2% tous matériaux confondus.

En plus de l'analyse des déformations résiduelles, l'observation des mailles des matériaux tissés usagés a révélé la présence d'inclusion dans le textile. Cet aspect est illustré par la Figure 3.7.

Par ailleurs, cette étude a permis de mettre en évidence une influence du vieillissement sous sollicitations mécaniques et de l'exposition aux UV qui conduisent d'une part à une modification des couleurs des textiles et à une augmentation de l'espace inter-maille (cf. Annexe A).

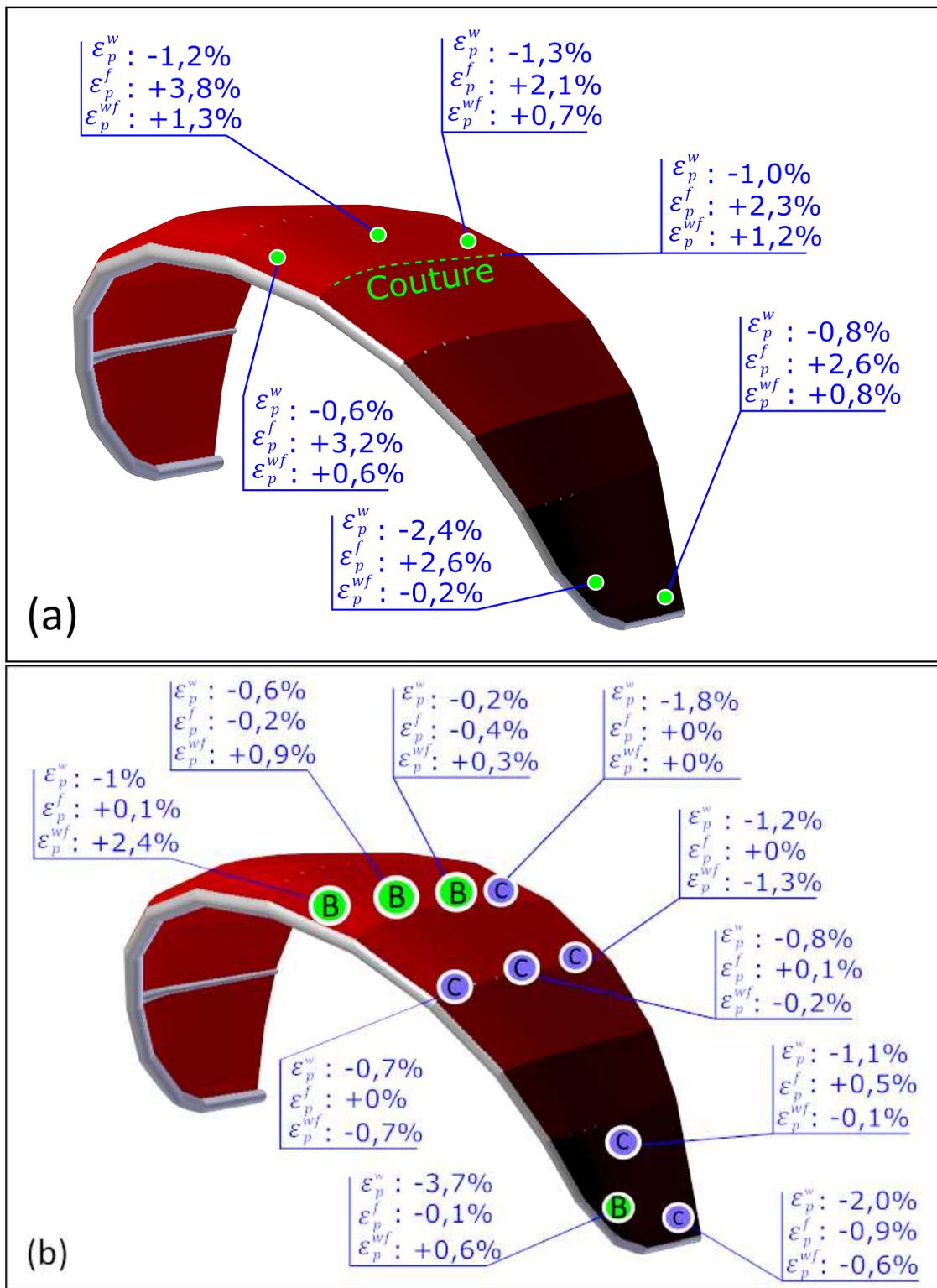


FIGURE 3.6 – Résumé des mesures de déformations sur deux kites sportifs - (a) kite 1, (b) kite 2

### 3.3 Analyse de l'impact de la déformation d'un kite sur ses capacités aérodynamiques

Ce paragraphe propose de simuler la déformation d'une voile de kite géant et de voir l'impact des déformations sur ses performances aérodynamiques, grâce à un calcul fluide-structure. Ce

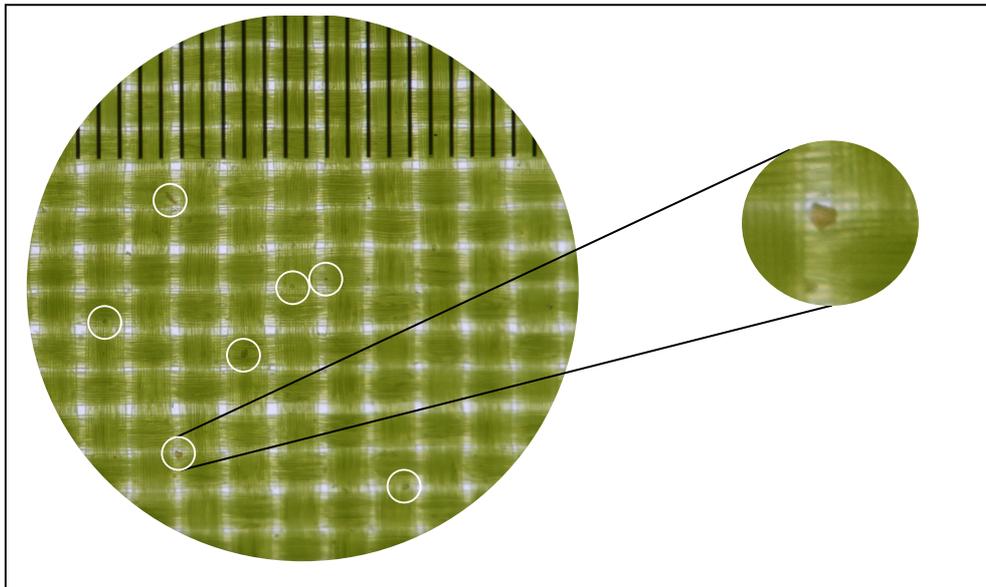


FIGURE 3.7 – Inclusions visible dans le tissu usagé

travail a été réalisé en collaboration avec la Société *Wolfgang R&D* de Richard Leloup [38], dont les algorithmes de calcul ont été développés pour l'application de traction par kite géant [34] [36].

L'objectif essentiel de ce travail est d'étudier l'impact de la déformation du tissu sur les capacités aérodynamiques d'un kite de grande envergure et d'en déduire les valeurs des déformations sous charge, dans des conditions aérodynamiques et de rendement acceptables.

L'ensemble des calculs sont menés sur un modèle de kite 3D de  $50m^2$  déjà modélisé pour *Beyond the Sea*. La voile est composée d'un matériau tissé, de renforts gonflés ou boudins et de lignes de commande. Le matériau tissé et les boudins sont modélisés par une loi de comportement élastique linéaire orthotrope et les lignes de commande sont modélisées par une loi élastique linéaire isotrope. Les paramètres des différents matériaux composant la structure sont donnés dans les tableaux 3.2, 3.3 et 3.4. Si on considère le matériau tissé, le modèle élastique linéaire orthotrope adopté, correspond, dans le sens chaîne et dans le sens trame, à une simplification importante du comportement réel. Ceci est illustré, en traction simple, par la Figure 3.8, qui montre que le modèle adopté sous estime la déformation pour une contrainte donnée, compte tenu de la non linéarité du comportement réel.

Matériau	10080E37
Grammage	$83g.m^{-2}$
Module d'Young Chaîne	$177kN.m^{-1}$
Coefficient de poisson Chaîne	0.22
Module d'Young Trame	$97kN.m^{-2}$
Coefficient de poisson Trame	0.22
Module de cisaillement	$4,395kN.m^{-1}$

TABLE 3.2 – Paramètre matériau de la voile

La modélisation fluide-structure utilise le logiciel CFD *OpenFOAM* pour le calcul fluide et le logiciel d'éléments finis *Calculix* pour le calcul structure. La procédure de calcul fluide-structure s'effectue en plusieurs étapes, résumées sur la Figure 3.9.

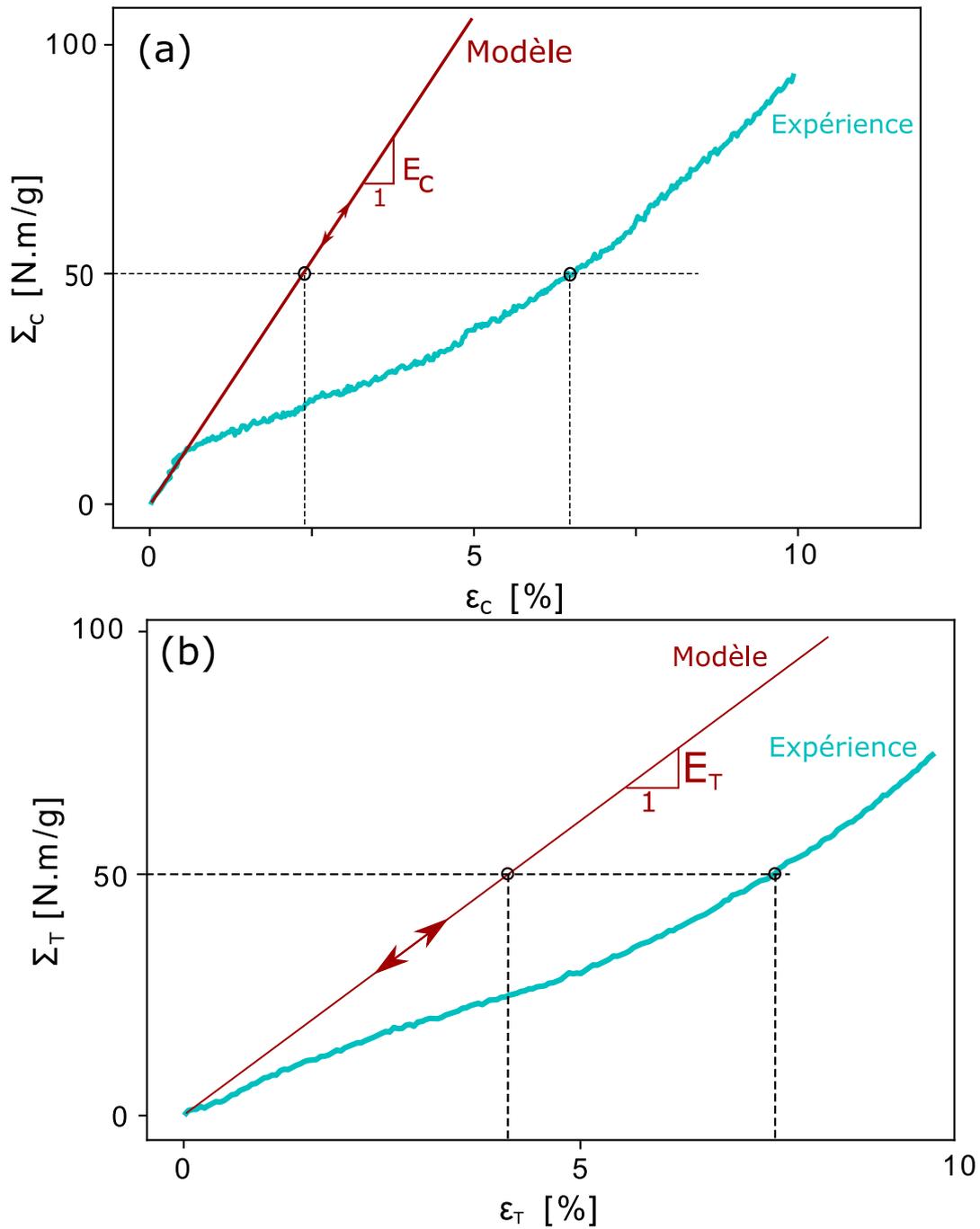


FIGURE 3.8 – Comparaison du modèle adopté à un résultat type de traction sur un matériau tissé utilisé pour les voiles : (a) dans le sens Chaîne ; (b) dans le sens Trame

Matériau	50058E45
Grammage	$223g.m^{-2}$
Module d'Young Chaîne	$245kN.m^{-1}$
Coefficient de poisson Chaîne	0.09
Module d'Young Trame	$454kN.m^{-2}$
Coefficient de poisson Trame	0.09
Module de cisaillement	$29kN.m^{-1}$

TABLE 3.3 – Paramètre matériau du boudin

Matériau	Dyneema
Module d'Young	$175MPa$
Coefficient de poisson	0
Diamètre lignes avant	$0.01m$
Diamètre lignes arrière	$0.005m$
Diamètre des brides	$0.005m$
Longueur des lignes	$75m$

TABLE 3.4 – Paramètre matériau des lignes

Etape 1 : cette étape correspond à un calcul fluide. Un écoulement d'air, paramétré par un angle d'incidence et une vitesse d'écoulement (force du vent), est appliqué sur le kite. Ce premier calcul fluide donne en résultat, d'une part, un champ de coefficient de pression  $C_p$  sur le kite (Fig. 3.10) ; d'autre part, l'application de cet écoulement permet le calcul des coefficients de portance  $C_L$  et de traînée  $C_D$  nécessaires à l'appréciation des capacités aérodynamiques.

Etape 2 : Dans cette étape on passe au calcul structure où le champ de pression est converti en conditions limites en effort. Le détail de transfert du chargement entre le modèle fluide et le modèle structure du kite est présenté en détail dans *Leloup 2014* [38] (Fig. 3.11) .

Etape 3 : La dernière étape consiste à calculer le champ de déformation du kite à l'aide des modèles matériaux (Fig. 3.12).

La nouvelle géométrie du kite déformé est soumise à nouveau à la première étape. Le calcul est ainsi réitéré jusqu'à ce que la géométrie déformée de la structure n'évolue plus avec le nombre d'itération.

Les coefficients de portance  $C_L$  et de traînée  $C_D$  liés à la géométrie déformée servent à calculer le coefficient de Loyd [42], noté  $C_{Loyd}$ . Ce coefficient est un scalaire adimensionnel utilisé pour quantifier les performances aérodynamiques d'une aile, dont l'équation est donnée ci-dessous (3.4) :

$$C_{Loyd} = C_L \left( \frac{C_L}{C_D} \right)^2 \quad (3.4)$$

Le coefficient de Loyd est utilisé pour le calcul de la puissance  $P$  d'un kite (3.5) :

$$P = \frac{2}{27} \rho_a A C_{Loyd} V^3 \quad (3.5)$$

Où les paramètres  $\rho_a$ ,  $V^3$  sont respectivement la densité de l'air à une altitude donnée et la vitesse du vent incident. Ces paramètres sont liés aux conditions de chargement de la voile et correspondent à des constantes. Le paramètre  $A$  correspond à la surface de l'aile et sa variation est faible au cours du vol. Ainsi, la variation de la puissance aérodynamique du kite est surtout liée à celle du coefficient de Loyd  $C_{Loyd}$ . Pour cela nous utiliserons la valeur du coefficient de

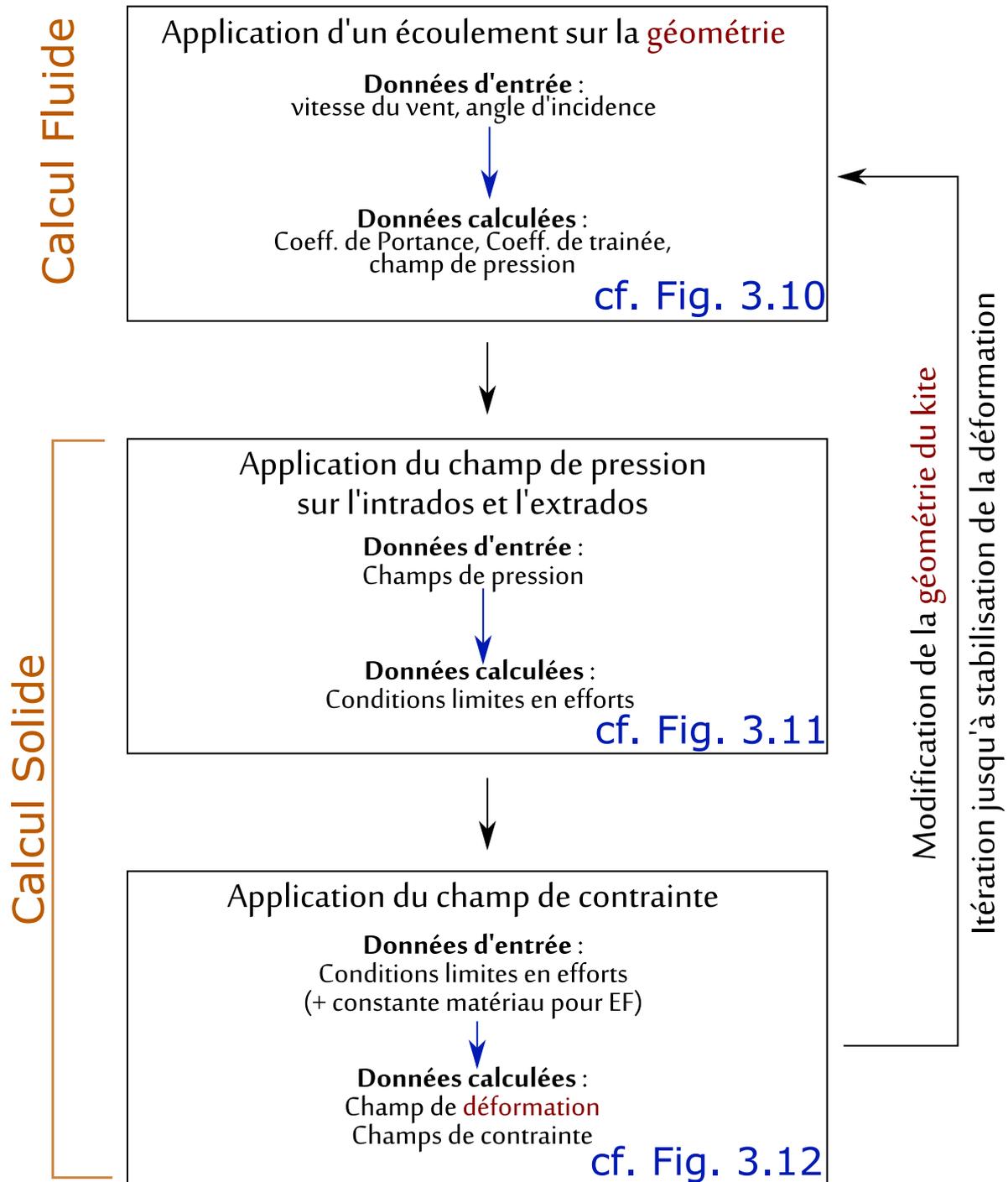


FIGURE 3.9 – Procédure de calcul fluide-structure

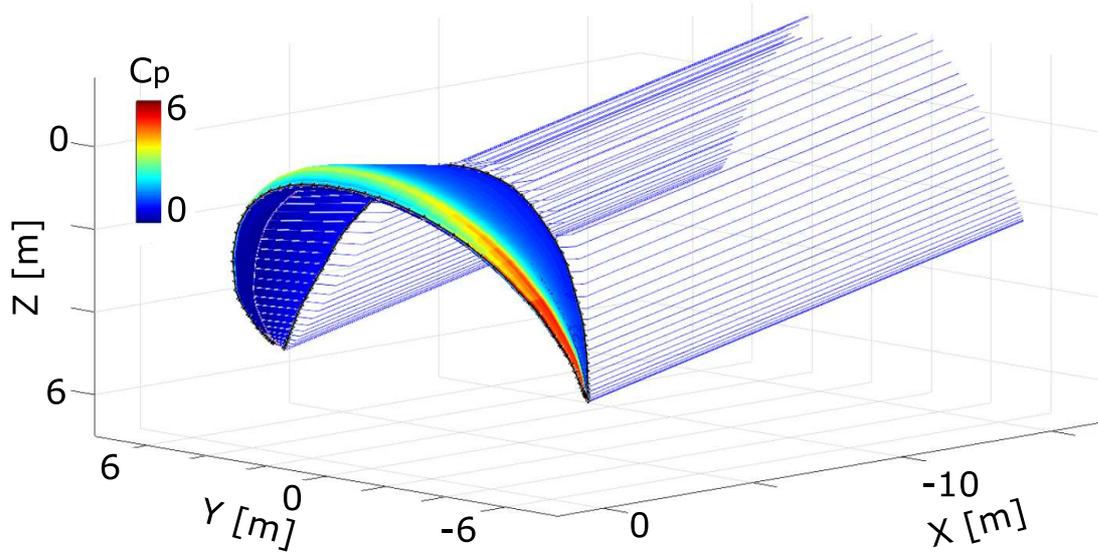


FIGURE 3.10 – Modèle fluide : écoulement d'air appliqué au kite et calcul du coefficient de pression  $C_p$  ( $C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho V^2}$ ) sur la surface de l'aile pour une vitesse de vent de  $V = 17m.s^{-1}$  [38]

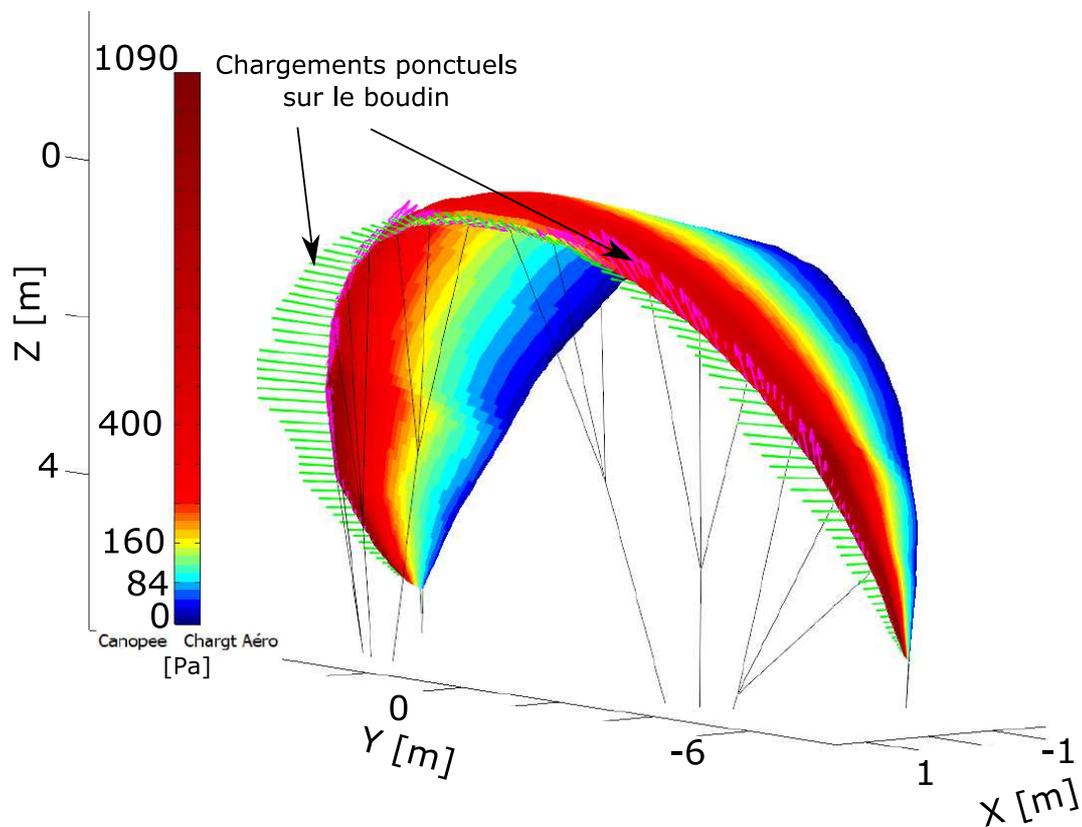


FIGURE 3.11 – Transfert de chargement du modèle fluide au modèle structure [37] : le champ de pression est converti en conditions limites en contrainte ( $V = 17m.s^{-1}$ ) [38]

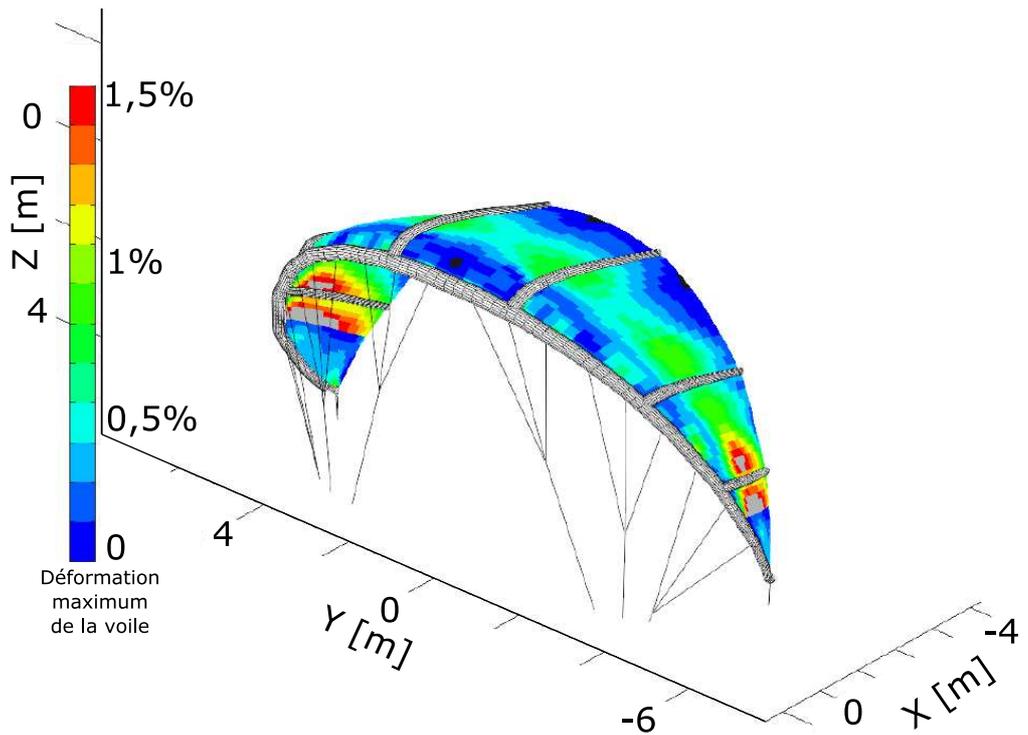


FIGURE 3.12 – Résultats du champ de déformation maximale du tissu de la voile pour une vitesse de vent de  $17m.s^{-1}$  [38]

Loyd comme un indicateur de la performance du kite au regard de sa puissance, qui peut être considéré aussi comme un indicateur de la capacité aérodynamique de l'aile.

Dans des conditions de vol données et pour un coefficient de Loyd  $C_{Loyd}$  donné, le modèle numérique nous permet d'obtenir le champ de déformation du matériau tissé sur toute la surface de la voile. Afin de caractériser l'évolution des déformations en fonction du coefficient de Loyd  $C_{Loyd}$  de l'aile, la déformation du kite sera caractérisée par les valeurs des déformations maximales obtenues dans trois zones distinctes de la voile. Ces zones sont définies sur la Figure 3.13 : le sommet de la canopée en zone 1, la jonction avec les oreilles en zone 3 et une zone 2 intermédiaire. Pour chacune de ces zones, le maximum de déformation dans les sens chaîne, trame et la distorsion sont considérées.

Pour différentes conditions de vent incident, la Figure 3.14 donne l'évolution des déformations maximales dans les trois zones d'intérêt prédéfinies. Au cours de la première étape de calcul fluide, ces conditions de vent incident sont caractérisées par des coefficients de portance  $C_L$  et de traînée  $C_D$ , qui conduisent à un coefficient de Loyd  $C_{Loyd}$  donné, en vertu de la relation (3.4). Ainsi, l'évolution des déformations maximales dans les trois zones est donnée sur la Figure 3.14 en fonction du coefficient de Loyd. L'évolution des performances aérodynamiques du kite dépend de l'angle d'incidence choisi, et donc de la précision dans le pilotage de l'aile (Cf. B). C'est ce qui est observable entre les traits en pointillé (incidence à  $10^\circ$ ) et les traits pleins (incidence à  $5^\circ$ ) pour les trois composantes de déformation (fig. 3.14-a), (fig. 3.14-b) et (fig. 3.14-c). Notons que les évolutions des déformations dans le sens Chaîne (fig. 3.14-a) et dans le sens Trame (fig. 3.14-b) sont caractérisées par une seule courbe indépendamment de la zone considérée, ceci est dû au fait que les déformations maximales sont les mêmes quelle que soit la zone du kite considérée.

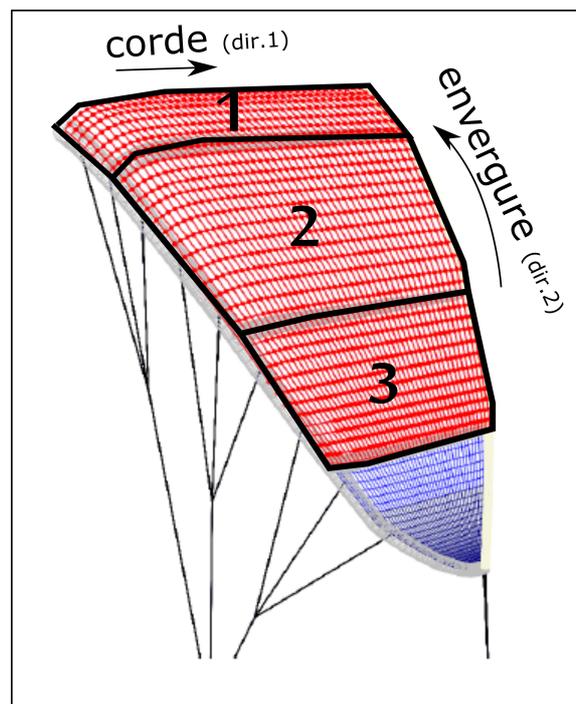


FIGURE 3.13 – Séparation de la surface du kite  $50 \text{ m}^2$  en trois zones d'intérêt [38]

Pour les trois composantes de déformation et au début du chargement pour des vents de faible intensité, nous observons une augmentation du coefficient de Loyd. Cette augmentation correspond à une mise en place de la voile dans le flux d'air, c'est à dire que la forme de la voile soumis à un écoulement est meilleure que sa forme initiale.

Les résultats de la Figure 3.14 montre une déformation plus importante dans le sens trame, qui est orienté le long de l'envergure de l'aile, par rapport au sens chaîne, qui est orienté le long de la corde de l'aile. La zone 3 de l'aile présente la valeur de déformation la plus élevée de la composante de distorsion (fig. 3.14-c).

Au regard de ces résultats, une question pertinente peut être posée : pour quelle valeur du coefficient de Loyd, une voile peut-elle être considérée comme dégradée et ses performances aérodynamiques altérées ? Pour répondre à cette question considérons l'évolution d'un paramètre économique, qui correspond à l'économie de carburant, en fonction du coefficient de Loyd. Cette évolution est présentée à la Figure 3.15 ; elle a été obtenue par Richard Leloup pour un Kite de  $320 \text{ m}^2$  qui équipe le pétrolier « British Bombardier » [38]. Cette figure présente plusieurs courbes, qui relient trois paramètres : l'incidence du vent, le pourcentage d'économie de carburant et la performance du kite. Pour un coefficient de Loyd optimal le paramètre performance du kite est de 100% ; la valeur de ce paramètre diminue ensuite avec celle du coefficient de Loyd. La Figure 3.15 présente des cercles concentriques, sur lesquels une orientation angulaire est indiquée ; le rayon de ces cercles indique le pourcentage d'économie de carburant et l'orientation des axes en degrés indique l'angle d'incidence du vent par rapport au bateau. Cette figure montre qu'une perte de 30% de performance par rapport à la configuration optimale fait baisser les économies de carburant en dessous de 20%. Cette valeur est considérée comme une valeur seuil et le rendement de la voile sera jugé médiocre à partir d'une perte de 30% de ses capacités aérodynamiques.

En appliquant ce critère pour déterminer la valeur minimale du coefficient de Loyd au dessous de laquelle un kite peut être considéré comme dégradé, les résultats présentés sur la Figure 3.15

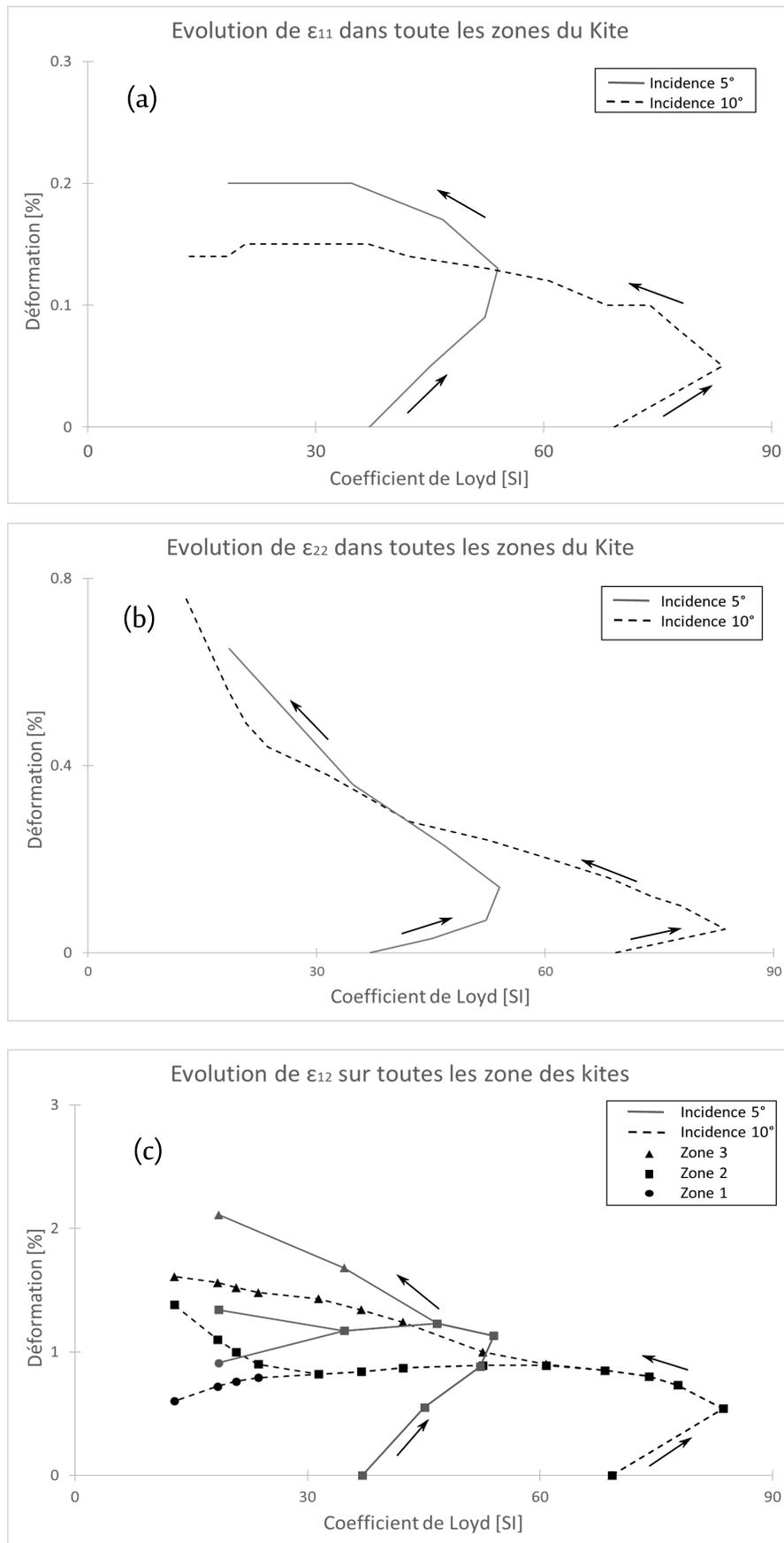


FIGURE 3.14 – Résultats de l'évolution des déformations en fonction du coefficient de Loyd (a) sens Chaîne (b) sens Trame (c) en distorsion [38]

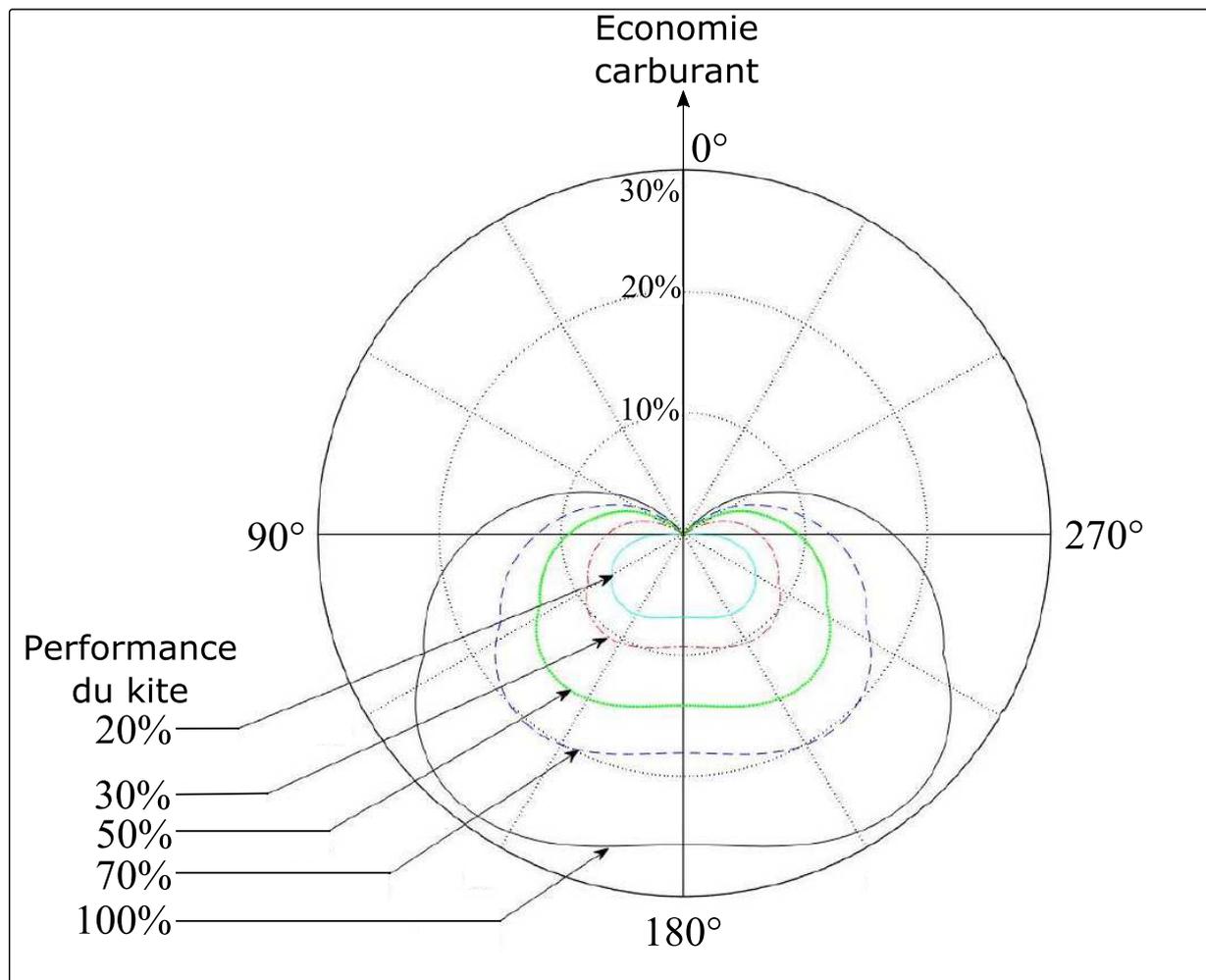


FIGURE 3.15 – Économie de carburant en fonction de l'orientation du vent incident et de la performance du kite [38]

permettent de déterminer les valeurs correspondantes des trois composantes de déformation. Ces valeurs sont données sur le Tableau 3.5.

Incidence	sens Chaîne %	sens Trame %	Distorsion (Zone 3) %
5°	0,19	0,33	1,62
10°	0,15	0,21	1,98

TABLE 3.5 – Déformations maximales pour une perte de 30% de performance par rapport à la configuration optimale.

### 3.4 Déformations résiduelles adoptées pour un kite

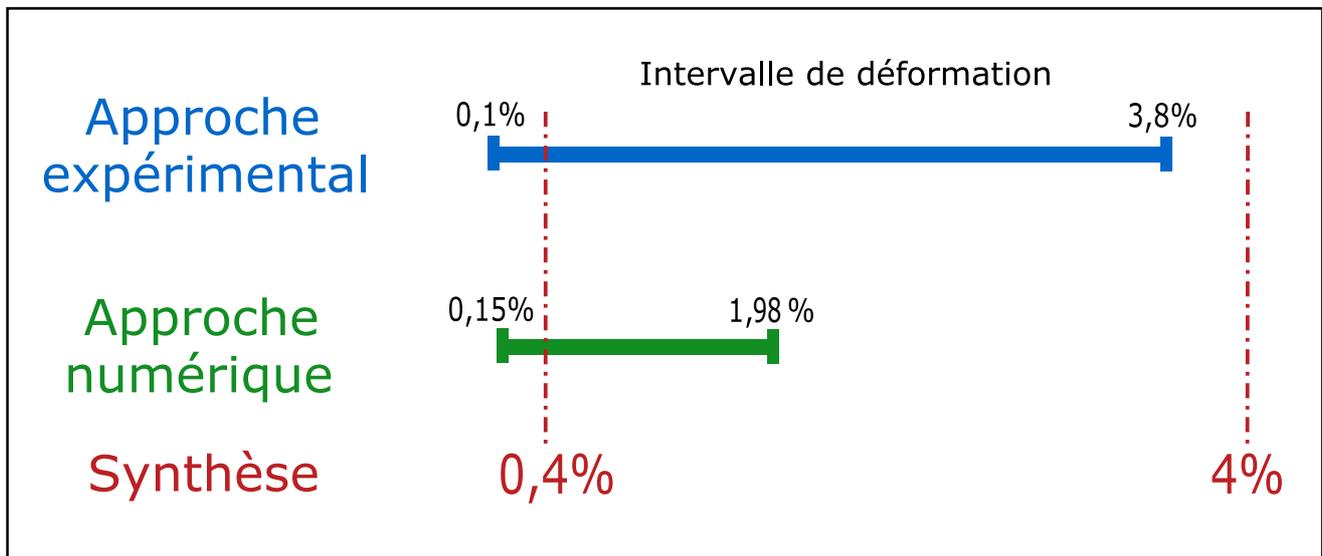


FIGURE 3.16 – Intervalle limite d'utilisation en déformation pour un matériaux tissé dans le domaine des kites

Les résultats des deux approches que nous avons adoptées, respectivement expérimentale et numérique, sont synthétisés sur la Figure 3.16. Cette figure donne les intervalles de variation des déformations maximales de toutes les composantes de déformation confondues. Au vu de ces résultats et suite à une décision concertée entre les différents acteurs du projet, un intervalle de déformation résiduelle conventionnelle a été adopté. Cet intervalle est tel que :

$$0,4\% \leq \varepsilon_p \leq 4\% \quad (3.6)$$

Le Tableau 3.1 et la Figure 3.16 montrent que la borne inférieure de 0,1%, concerne le matériau B laminé. Cette valeur est trop faible pour le domaine de la voile. Par ailleurs, les modèles élastiques adoptés par l'approche numérique sous-estiment les valeurs de déformation (fig. 3.8). Ceci justifie notre choix de la valeur de 0,4%.

Ainsi la déformation résiduelle conventionnelle de 0,4% correspond au point B de la Figure 3.1 et la déformation résiduelle conventionnelle de 4% correspond au point F de la Figure 3.1. Cet intervalle serait alors un intervalle limite d'utilisation exprimé en déformation. L'utilisateur du matériau tissé pour la confection d'une voile peut adopter la borne inférieure de cet intervalle ou

sa borne supérieure. Cette notion pourrait même être étendue au cas des valeurs intermédiaires comprises dans cet intervalle. Dans ce cas le concepteur pourra choisir en fonction de critères tels que la sécurité, la rigidité ou autre, sa propre valeur de déformation résiduelle. Néanmoins, il ne dispose toujours pas d'une valeur de contrainte limite pour le dimensionnement de sa structure. Ceci sachant que pour les matériaux tissés, l'hypothèse de décharge élastique, n'est pas réaliste compte tenu de la forte irréversibilité et la forte non-linéarité du comportement lors des décharges (branches AB, CD et EF de la Figure 3.1). Par conséquent la définition (Équation 3.6) d'un intervalle de déformations résiduelles conventionnelles ne constitue pas une définition complète d'un domaine d'utilisation des matériaux tissés, destinés à la confection des kites. Car, à ce niveau de l'analyse, nous ne disposons pas d'une définition de la décharge pour un matériau tissé. Nous reviendrons sur cet aspect dans la partie IV de ce mémoire où une définition complète de l'hypothèse de décharge sera donnée.

## 3.5 Conclusion

L'étude du comportement mécanique des matériaux tissés, utilisés pour la confection des kites, a conduit à mener une démarche globale intégrant à la fois un dialogue avec les concepteurs et une analyse quantitative pour des kites ayant subi un usage intensif, ainsi que des analyses numériques fluide-structure. Au cours de cette démarche, la notion essentielle de limite d'usage en déformation est apparue comme une preuve de l'amplitude des sollicitations en service. Cette démarche a permis de conclure que des déformations rémanentes de plusieurs pourcents étaient mémorisées au sein des mailles du matériau tissé. La notion de contrainte limite d'élasticité, couramment utilisée pour les matériaux métalliques, devait être remplacée par une notion de limite d'usage ou limite d'utilisation, puisqu'un tissu en fibres polymère ne présente pas réellement de domaine d'élasticité. Finalement, l'ensemble de la démarche a conduit à la définition d'un intervalle conventionnel d'utilisation en déformation.



## Deuxième partie

### Mise en œuvre et résultats bruts de traction uniaxiale



# Chapitre 4

## Techniques expérimentales uniaxiales

L'objectif dans ce chapitre est de présenter les moyens d'essais, le matériau non-confidentiel testé et la forme des éprouvettes. Il s'agit aussi de présenter les méthodes de mesure de la contrainte et des déformations de l'éprouvette ainsi que les protocoles d'essais employés pour les tests.

### 4.1 Machine d'essai

La machine d'essai est une presse biaxiale électrohydraulique asservie de traction-torsion alternée, de marque M.T.S. (Fig. 4.1). Ses capacités maximales sont de  $\pm 100kN$  en force axiale avec un déplacement axial de  $\pm 100mm$  et de  $\pm 1200Nm$  en couple de torsion avec une rotation de  $\pm 45^\circ$ . La machine est utilisée uniquement pour sa fonction de traction avec un contrôle de la vitesse axiale du vérin. La consigne peut être le déplacement du vérin, la déformation au centre de l'éprouvette ou la force appliquée sur l'éprouvette. Durant tous les essais de traction ou de traction ondulée, la voie de torsion de la machine est bloquée à angle nul. Au cours des essais, l'utilisateur dispose de plusieurs informations enregistrées au cours du temps comme la force exercée, le déplacement du vérin et d'autres signaux, dont ceux de l'extensomètre optique. Les essais ont été pilotés avec les procédures spécialement développées pour la thèse sur le logiciel MPE de MTS.

### 4.2 Matériau et éprouvette

#### 4.2.1 Matériau non confidentiel

La référence d'un matériau tissé de Porcher Industries est défini par le type du tissage indiqué par un nombre et par le type de son enduction noté "E" suivi d'un numéro qui indique le type de mélange de l'enduction. Le matériau non-confidentiel est un tissu enduit *9017E25* présent sous différents coloris dans la thèse : blanc ou jaune pour les essais de traction uniaxiale et rouge pour les essais de traction biaxiale.

Le tableau 4.1 présente la référence du matériau non confidentiel, la nature des fibres et de l'enduction.

Référence	Nature des fibres	Titre des fils <i>dtex</i>	Nature de l'enduction	Fraction de fibre %
9017E25	PA 6.6	33	PU	82.06

TABLE 4.1 – Référence du matériau non confidentiel et nature des fibres et de l'enduction (PU : Polyuréthane ; PA : Polyamide)

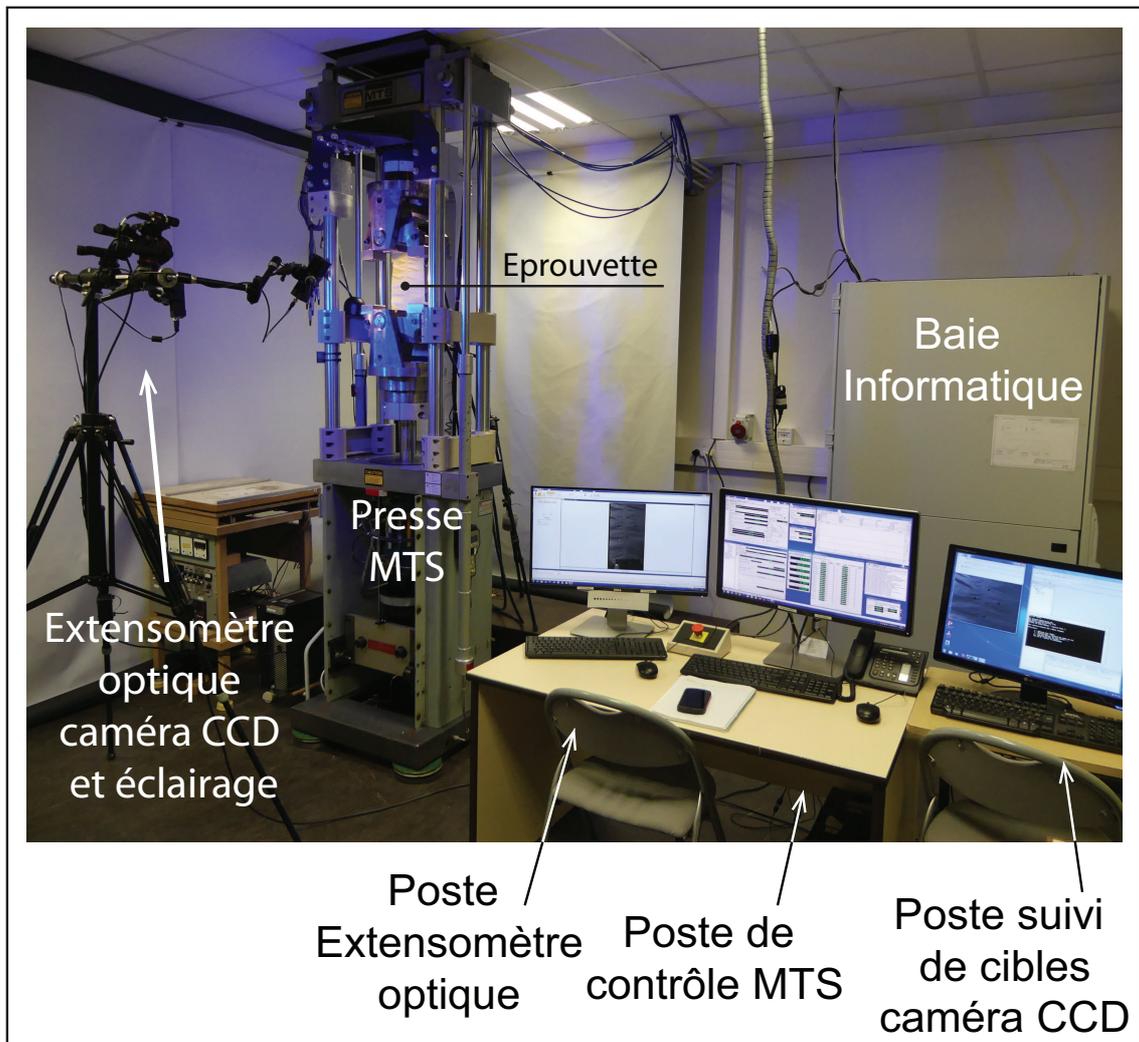


FIGURE 4.1 – Installation expérimentale

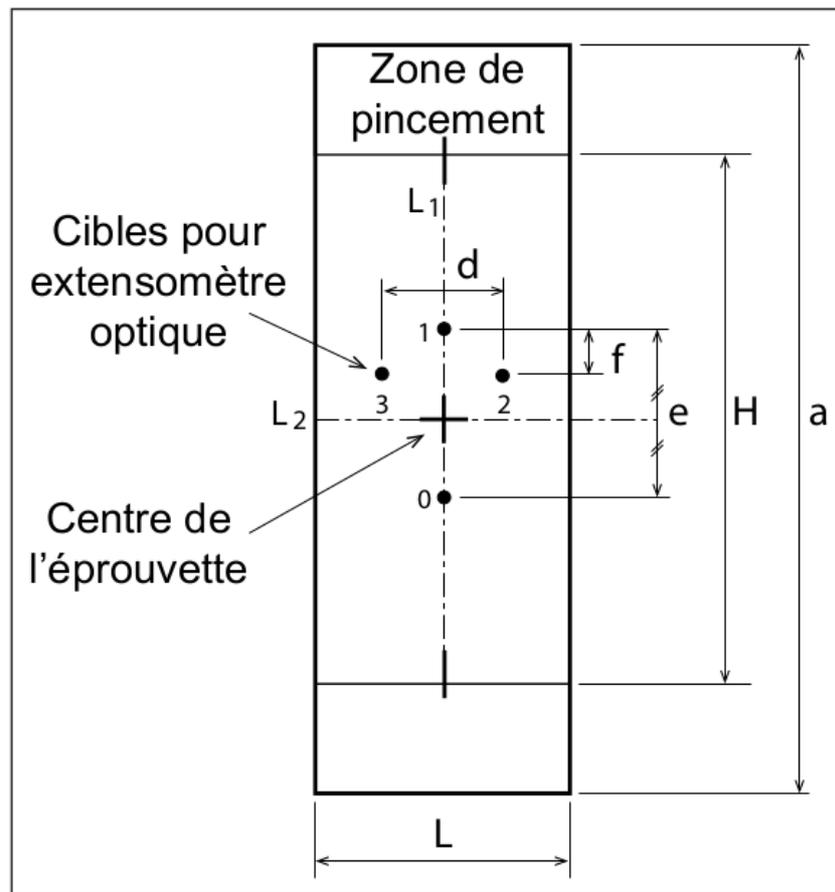


FIGURE 4.2 – Géométrie des éprouvettes de traction uni-axiale

### 4.2.2 Géométrie de l'éprouvette

L'éprouvette a une forme standardisée adoptée pour tous les essais de traction uniaxiale et pour tous les matériaux (Fig. 4.2). C'est un rectangle de matériau tissé, constituée d'une zone utile centrale et de deux zones de pincement, situées à chaque extrémité. La zone utile a une longueur  $H$  et une largeur  $L$ . Quatre cibles sont imprimées au centre de la zone utile de l'éprouvette. Ces cibles sont destinées à la mesure des déformations locales au centre de l'éprouvette, par un extensomètre optique.

Deux tailles d'éprouvettes ont été adoptées, en tenant compte des capacités en déplacement de la machine d'essai et des déformations des matériaux. Le Tableau 4.2 donne les dimensions de ces deux éprouvettes, notées respectivement Taille 1 et Taille 2.

Mesure	Taille 1 (Chaîne/Trame) <i>mm</i>	Taille 2 (Hors Axes) <i>mm</i>
a	400	300
L	100	50
H	300	200
d	50	25
e	50	25
f	15	5

TABLE 4.2 – Dimensions des éprouvettes de traction uni-axiale

Les éprouvettes de Taille 1 sont destinées aux essais de traction dans les axes du matériau

et les éprouvettes de Taille 2 sont destinées aux essais hors axes. Les éprouvettes sollicitées en hors axes et notamment dans les sens biais présentent en général une déformation importante à faible rigidité. Les dimensions des éprouvettes de Taille 2 ont été optimisées vis-à-vis de cet aspect et vis-à-vis du phénomène de flambement. Ce phénomène d'instabilité de déformation, peut se révéler parfois, dans la zone utile de l'éprouvette et se manifester par l'apparition de plis dans le sens transversal (Fig. 4.3).

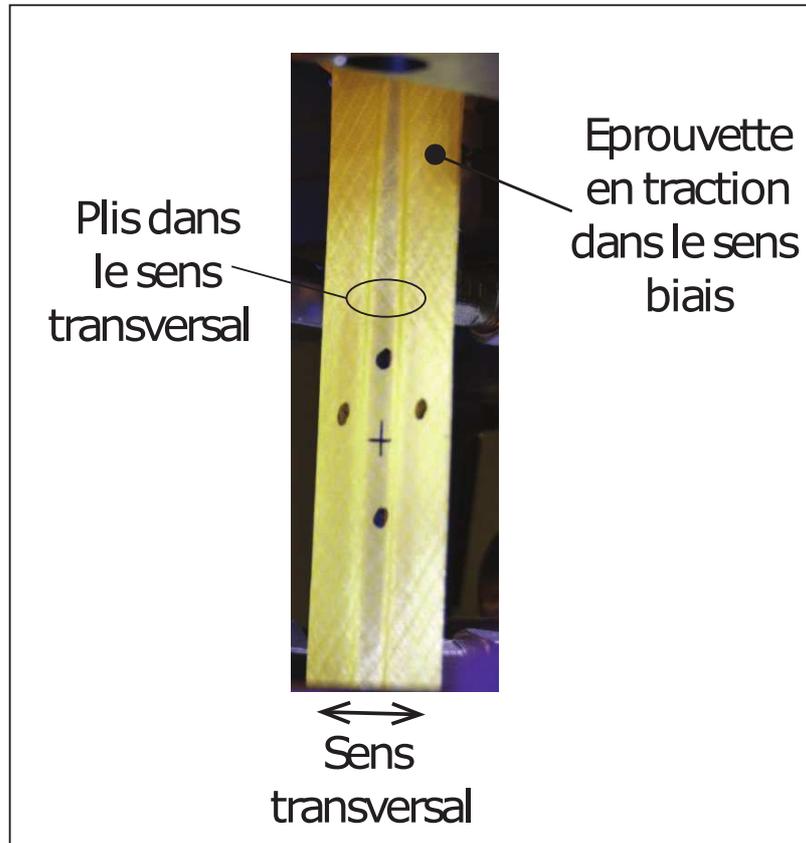


FIGURE 4.3 – Apparition de plis dans le sens transversal sur une éprouvette en traction dans le sens biais

Pour les éprouvettes de Taille 2, en traction dans le sens biais, la rupture de l'éprouvette est systématiquement dans la zone des mors (Fig.4.4-a). Afin de limiter ce phénomène, la zone de pincement des éprouvettes de Taille 2 est renforcée par le collage d'un patch en matériau tissé autocollant. Le patch est constitué d'un matériau tissé enduit *9017E25* et d'une couche de colle PU de  $100g/m^2$ . Grâce à l'ajout de ce renfort, nous constatons une réduction du phénomène de flambement et une rupture de l'éprouvette qui se produit systématiquement dans la zone utile (Fig.4.4-b). Notons, par ailleurs, que les dimensions de l'éprouvette de Taille 1 et Taille 2, définies dans la Tableau 4.2, sont telles que  $\frac{H}{L} > 2$ . Ce qui est compatible avec les recommandations faites pour les éprouvettes dans le sens biais où le rapport  $\frac{H}{L}$  doit être supérieur à 2 [52].

Concernant les éprouvettes de Taille 1, la Figure 4.5 montre une rupture nette perpendiculaire au sens de la traction avec la création de plis en accordéon, postérieure à la rupture.

### 4.2.3 Marquage des cibles

Pour l'utilisation d'un extensomètre optique, l'éprouvette doit être marquée. Les cibles dessinées sur l'éprouvette permettent de caractériser l'état de déformation dans le plan de l'éprouvette. Pour ce faire, le centre de la zone utile de l'éprouvette est identifié préalablement puis quatre

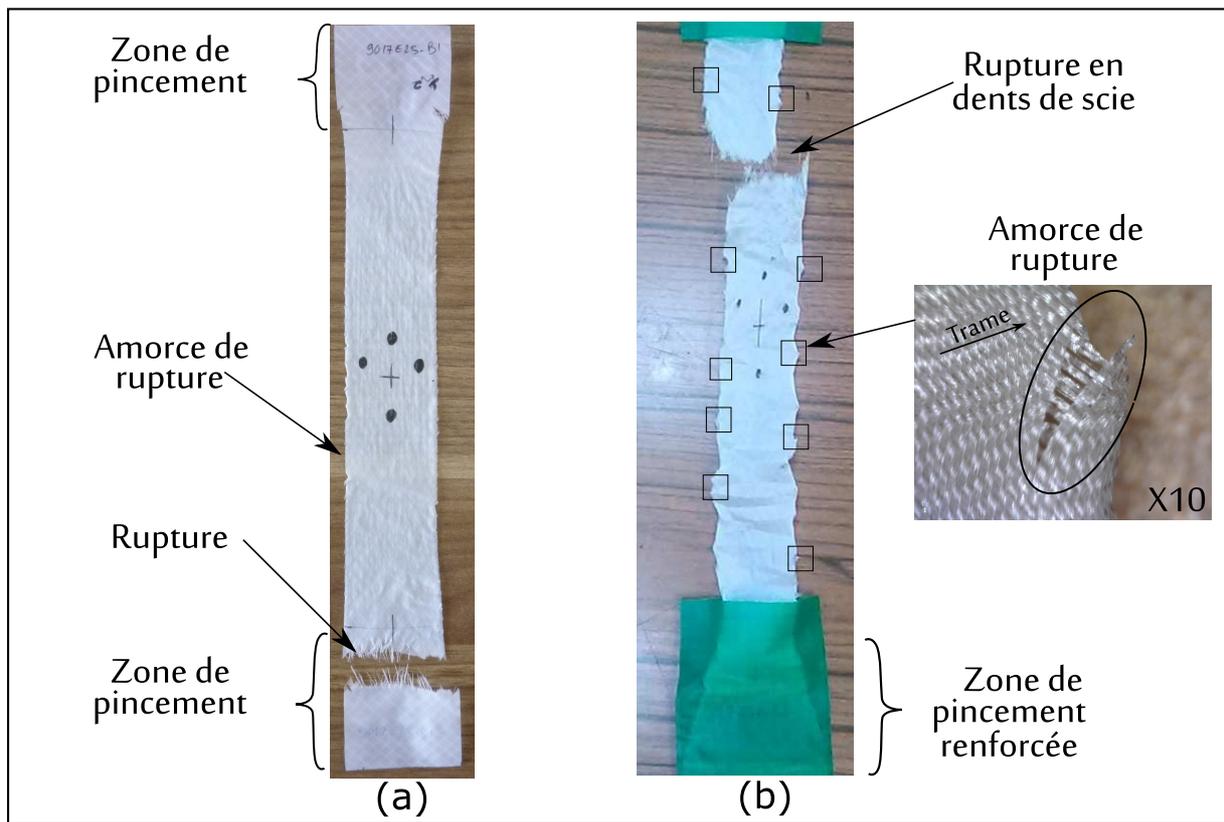


FIGURE 4.4 – Rupture de deux éprouvettes de traction simple dans le biais : (a) rupture dans les mors d’une éprouvette non renforcée et (b) rupture dans la zone utile d’une éprouvette renforcée

marques formant un quadrilatère autour de ce centre sont faites. La couleur des marques n’a pas d’importance mais le contraste entre la couleur du tissu et la marque doit être suffisant pour permettre la détection des cibles par le système optique de suivi. La forme du quadrilatère est pré-établie en adéquation avec le logiciel de l’extensomètre et les distances entre les points sont toujours les mêmes sur l’ensemble des éprouvettes d’une même Taille, comme cela est indiqué sur la Figure 4.2 et le Tableau 4.2. Le plus grand soin a été apporté au cours de l’opération de marquage des cibles sur les éprouvettes. Cette opération est réalisée à l’aide d’un gabarit positionné par rapport aux bords de l’éprouvette et par rapport à son centre. Le gabarit est réalisé avec une feuille transparente munie de trous à l’endroit des cibles et le marquage des cibles est réalisé à l’aide d’un stylo feutre de couleur noire généralement. Ainsi, comme l’indique la Figure 4.2, les cibles 0 et 1 sont positionnées sur la ligne  $L_1$ , de façon symétrique à la ligne  $L_2$ . Et, les cibles 2 et 3 sont telles que le segment  $\overline{23}$  est parallèle à la ligne  $L_2$ . Les lignes  $L_1$  et  $L_2$  correspondent aux axes de symétrie de l’éprouvette.

#### 4.2.4 Numérotation des éprouvettes

Les éprouvettes ont été désignées par le code alphanumérique suivant :

MAT-D-AA

Où MAT représente la désignation Porcher du matériau. Le paramètre D indique la direction de découpage de l’éprouvette et prend la valeur C, T ou B respectivement pour Chaîne, Trame ou Biais. Pour les autres orientations, la paramètre D indique l’angle par rapport à la direction de la chaîne. Le paramètre AA correspond à un numéro d’ordre de l’éprouvette.

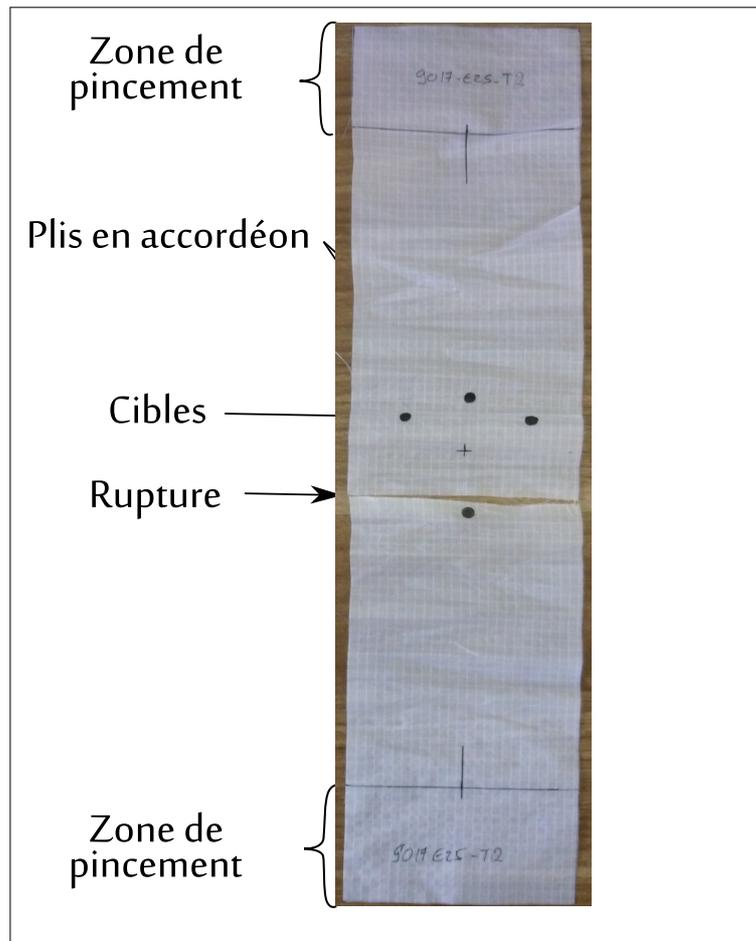


FIGURE 4.5 – Rupture systématique des éprouvettes de Taille 1, de traction dans les axes, sur 9017 E25

### 4.3 Mors articulés

L'éprouvette est fixée à la machine par pincement, à l'aide de deux mors articulés. Ce dispositif spécifique aux matériaux tissés permet la réalisation d'essais de traction dans le sens chaîne, le sens trame et des essais de traction hors axes (Fig.4.6). Les mors sont articulés par rapport à deux plateaux fixes à l'aide respectivement de deux bras. Le plateau inférieur est fixé au vérin de la machine d'essai et le plateau supérieur est fixé à la traverse fixe de la machine d'essai et au capteur d'effort. L'éprouvette est pincée entre deux plaquettes mobiles dans le mors articulé (Fig. 4.7 et 4.8). L'effort de pincement est produit par trois vérins hydrauliques de  $50kN$  de capacité chacun, ce qui conduit à un effort maximal de serrage de  $150kN$ . Ces vérins sont implantés dans le mors articulé.

La Figure 4.7 présente le principe de ce mode de fixation, par une coupe du mors articulé. Chaque plaquette de serrage est équipée d'une rainure prévue pour insérer une bande de caoutchouc, qui permet d'assurer un meilleur grip et une protection de l'éprouvette. Les mors articulés sont guidés en rotation par rapport aux attaches fixes grâce à des roulements à aiguilles (Fig. 4.7). L'axe de rotation de l'attache articulée passe par le milieu de la zone de pincement de l'éprouvette.

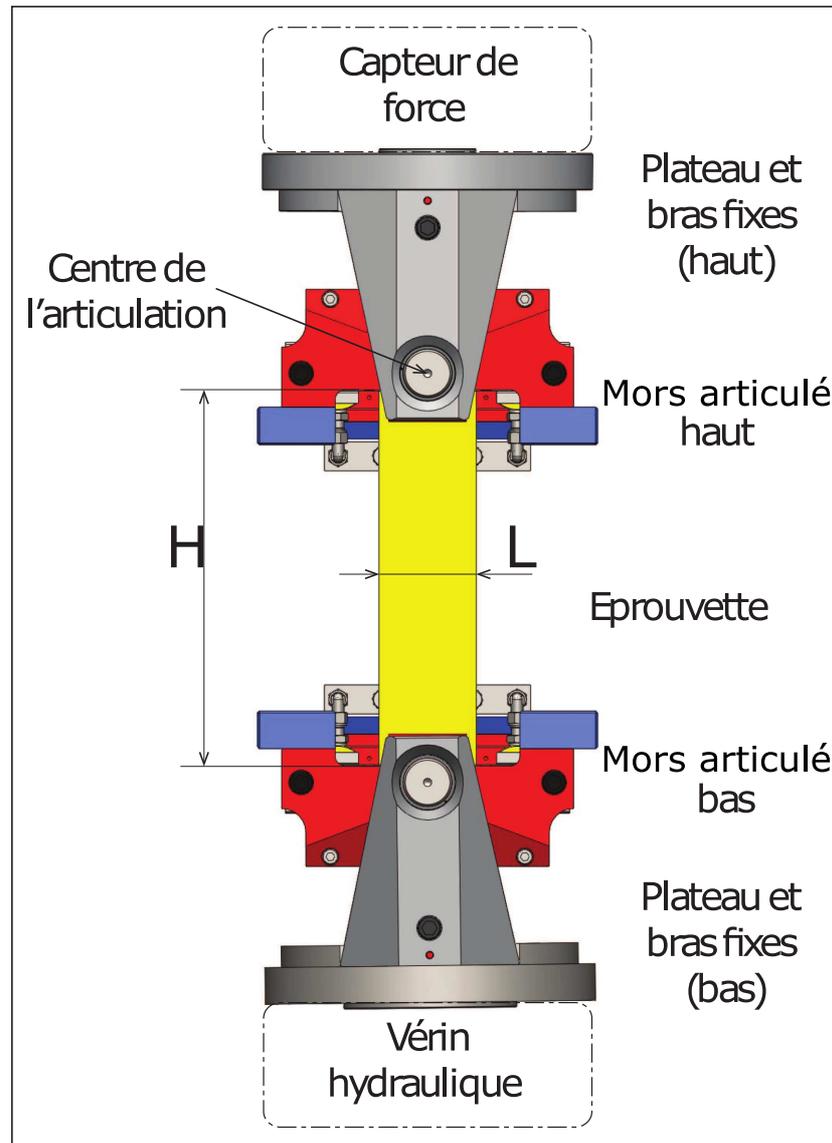


FIGURE 4.6 – Fixation de l'éprouvette à l'aide de mors articulés

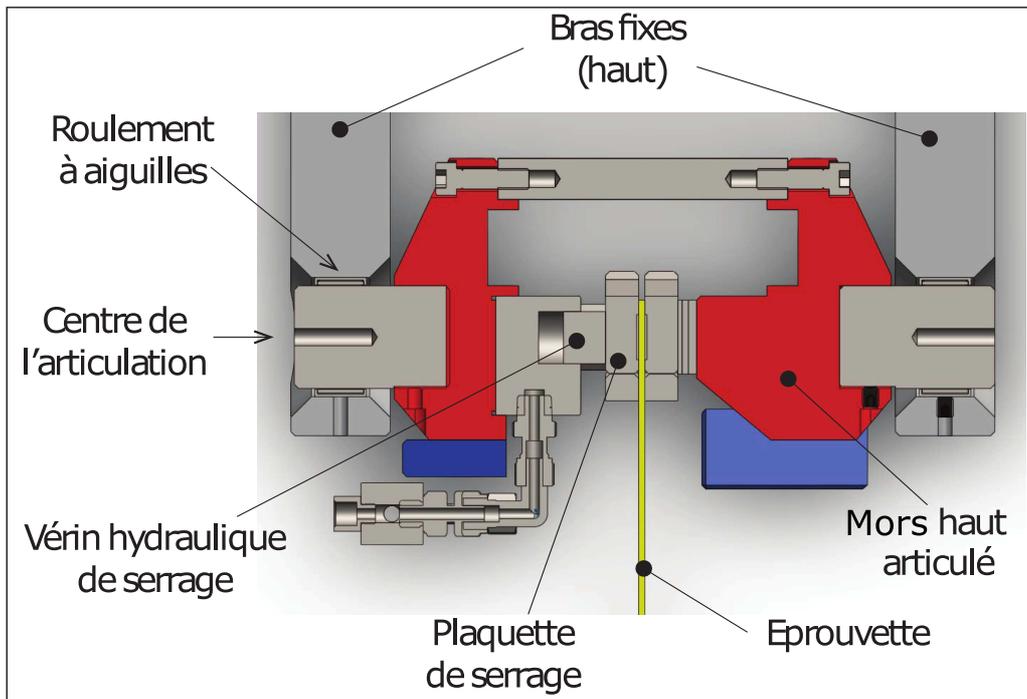


FIGURE 4.7 – Principe de fixation de l'éprouvette dans le mors articulé

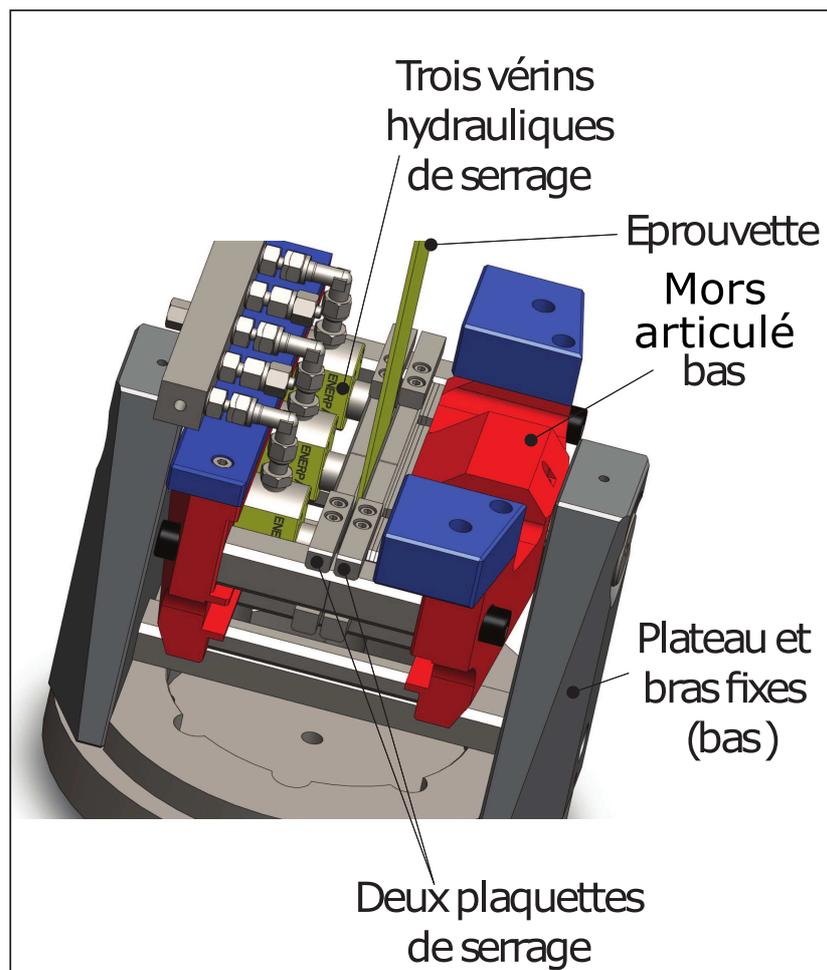


FIGURE 4.8 – Serrage de l'éprouvette par trois vérins hydrauliques

## 4.4 Mesure de la contrainte et des déformations

### 4.4.1 Contrainte axiale appliquée à l'éprouvette

Compte tenu de la difficulté de mesurer une épaisseur sur des éprouvettes tissées, la définition de la contrainte massique est adoptée comme décrit dans la section 2.2.1. La contrainte massique, est définie comme le rapport de la contrainte de Cauchy par la masse volumique actuelle du matériau. Dans le cas de la traction simple, la contrainte massique axiale  $\Sigma_a$ , est telle que :

$$\Sigma_a = \frac{\lambda_a f_a}{\bar{\rho} L} \quad (4.1)$$

Où  $\lambda_a$  est l'élongation axiale de l'éprouvette,  $L$  la largeur initiale de l'éprouvette,  $f_a$  la force axiale appliquée sur l'éprouvette et  $\bar{\rho}$  la masse surfacique initiale. Il est rappelé que la contrainte massique s'exprime en  $Nm/g$  ou en  $J/g$ .

La masse surfacique initiale de l'éprouvette est telle que :

$$\bar{\rho} = \frac{m}{L \times a} \quad (4.2)$$

Où  $m$  est la masse de l'éprouvette et  $L \times a$  sa surface (Fig. 4.2). Après le découpage des éprouvettes, chaque éprouvette est mesurée et pesée [62]. Pour le matériau *9017E25* les mesures donnent le résultat suivant avec un degré de certitude à 95% ( $dc$ ) :

$$\langle \bar{\rho} \rangle = \langle 39,6 \rangle \pm 0,1g/m^2 \quad (dc = 95\%, n = 30)$$

### 4.4.2 Extensomètre optique

Un extensomètre optique a été développé en collaboration avec les entreprises MTS, PROVISYS Engineering implantée à Nancy [33] et le laboratoire 3SR. Cet extensomètre utilise une caméra de marque IDS de 2048(H) x 1088(V) pixels et de fréquence 141 images/s. Cet appareil permet d'une part de mesurer les trois composantes de déformation ( $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{12}$ ), dans le plan de l'éprouvette (Fig.4.9) ; d'autre part, il permet le pilotage de la machine d'essai en traction et en torsion en temps réel. L'extensomètre permet un pilotage des essais en déformation sans contact avec l'éprouvette, contrairement à un extensomètre mécanique difficile à mettre en œuvre. Ce principe de mesure, non intrusif, présente un grand avantage pour l'étude du comportement des matériaux tissés. Lors du développement de l'extensomètre optique, nous avons proposé au constructeur PROVISYS Engineering un algorithme efficace de mesure et de calcul de la déformation, adapté à la machine d'essai. Cet algorithme est basé sur le principe de mesure d'une rosette à trois jauges de déformation. En effet, grâce aux quatre cibles 0, 1, 2 et 3 marquées sur la surface de l'éprouvette (Fig. 4.10), il est possible de déterminer trois mesures qui permettent de caractériser complètement l'état de déformation dans le plan  $(0, \vec{X}_1, \vec{X}_2)$  de l'éprouvette. Pour cela, le principe de mesure des trois déformations  $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$  repose sur la mesure des trois distances  $a_0, b_0$  et  $c_0$  à l'état initial, avant déformation et sur la mesure des trois distances  $a, b$  et  $c$  au cours de la déformation (Fig. 4.10). Une déformation  $\varepsilon_i, i = a, b$  ou  $c$ , est alors définie par :

$$\varepsilon_i = \frac{i - i_0}{i_0} \quad (4.3)$$

En début d'essai, l'extensomètre optique discrimine automatiquement l'ensemble des quatre cibles et fournit pour chaque cible  $M$  ses coordonnées  $(X_1^M, X_2^M)$  au cours du temps. La mesure d'une distance donnée entre deux cibles est alors déterminée grâce aux mesures de ces coordonnées.

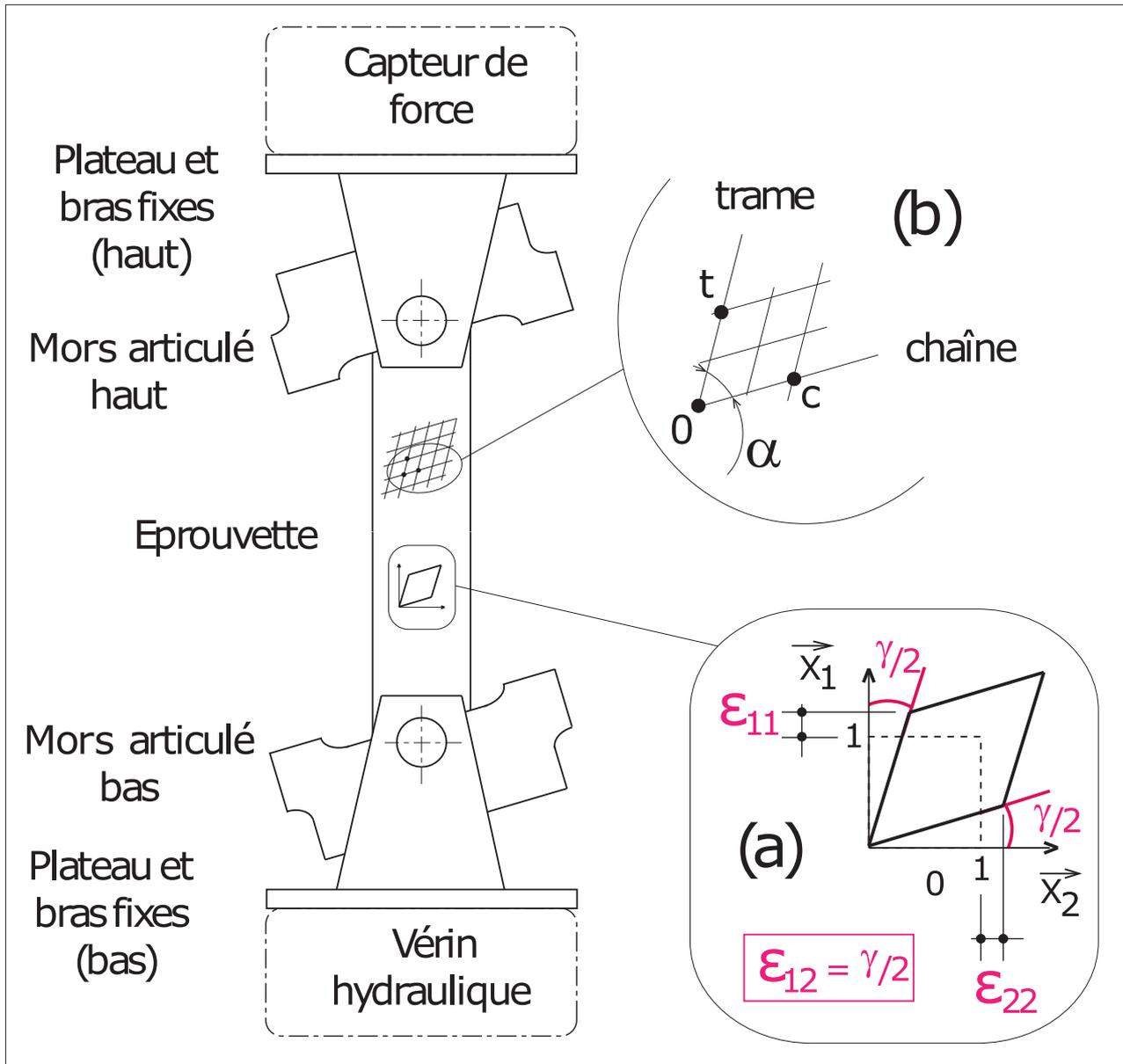


FIGURE 4.9 – Traction hors axes : (a) état de déformation dans le plan de l'éprouvette ( $\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{12}$ ), (b) angle de maille  $\alpha$  entre le fil de chaîne et le fil de trame

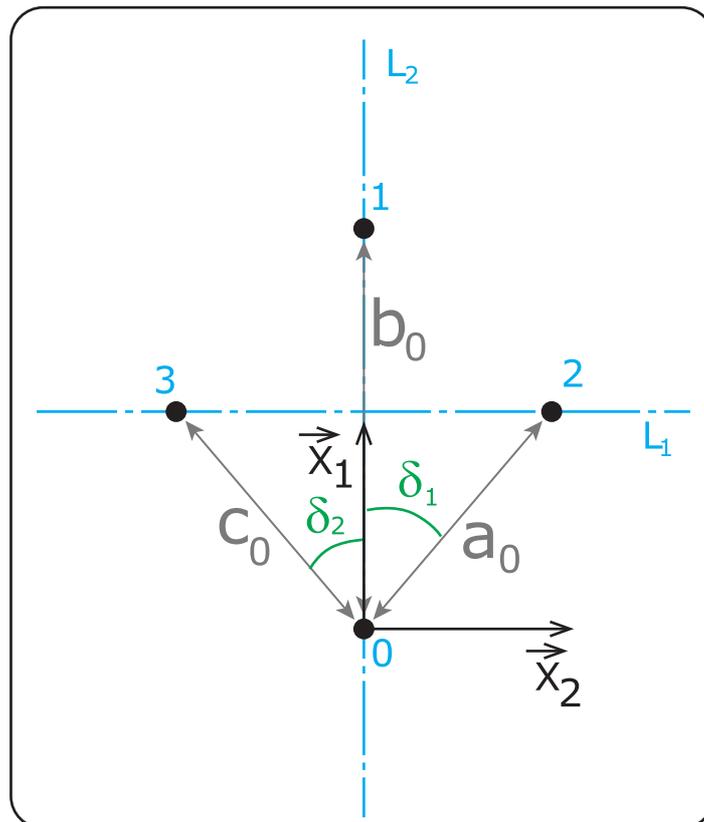


FIGURE 4.10 – Principe de mesure de l'extensomètre optique basé sur la mesure de trois distances  $a_0$ ,  $b_0$  et  $c_0$  à l'état initial et la mesure de trois distances  $a$ ,  $b$  et  $c$  au cours de la déformation

La caméra doit être placée de sorte que le plan de l'éprouvette et le plan image de la caméra soient parallèles, avec la meilleure précision possible. Le défaut de parallélisme est en général très faible et correspond à un angle dont le cosinus est très proche de l'unité. Par ailleurs, le plan image de la caméra doit être bien orienté par rapport au plan de l'éprouvette et cette orientation doit rester stable au cours de l'essai. Pour cela, la caméra est fixée sur un pied rigide, dont le positionnement est contrôlé par un système de niveaux à bulle, qui permet une orientation de la caméra par rapport à l'éprouvette relativement précise et répétitive. Par conséquent, nous considérons que le plan image de la caméra est confondu avec celui de l'éprouvette. Néanmoins, l'algorithme de l'extensomètre optique tient compte de l'erreur éventuelle de marquage de l'éprouvette due à la réalisation du gabarit. Pour cela, les orientations des cibles (0, 2) et (0, 3) seront paramétrées par  $\delta_1$  et  $\delta_2$ , deux angles mesurés au début de l'essai grâce aux produits scalaires  $\vec{a}_0 \cdot \vec{b}_0$  et  $\vec{b}_0 \cdot \vec{c}_0$  définis par les vecteurs  $\vec{a}_0 = \vec{02}$ ,  $\vec{b}_0 = \vec{01}$  et  $\vec{c}_0 = \vec{03}$ , à l'état initial sans déformation.

L'état de déformation dans la base  $(\vec{X}_1, \vec{X}_2)$  est défini par les trois composantes de déformation  $\varepsilon_{11}$ ,  $\varepsilon_{22}$  et  $\varepsilon_{12}$  ; soit :

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} \end{pmatrix}_{(\vec{X}_1, \vec{X}_2)} \quad (4.4)$$

Soient  $\vec{u}_{a_0}, \vec{u}_{b_0}, \vec{u}_{c_0}$  les trois vecteurs unitaires qui indiquent les directions des trois jauges, telles que :

$$\vec{u}_{a_0} = \frac{\vec{a}_0}{a_0}, \vec{u}_{b_0} = \frac{\vec{b}_0}{b_0}, \vec{u}_{c_0} = \frac{\vec{c}_0}{c_0}$$

exprimés dans la base  $(\vec{X}_1, \vec{X}_2)$  par leurs composantes :

$$\vec{u}_{a_0} = \begin{bmatrix} \cos(\delta_1) \\ \sin(\delta_1) \end{bmatrix}, \vec{u}_{b_0} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \vec{u}_{c_0} = \begin{bmatrix} \cos(\delta_2) \\ -\sin(\delta_2) \end{bmatrix}$$

Les déformations données par les trois jauges :

$$\begin{aligned} \varepsilon_a &= \vec{u}_{a_0}^T \cdot \underline{\underline{\varepsilon}} \cdot \vec{u}_{a_0} = \varepsilon_{11} \cos^2(\delta_1) + \varepsilon_{12} \sin(2\delta_1) + \varepsilon_{22} \sin^2(\delta_1) \\ \varepsilon_b &= \vec{u}_{b_0}^T \cdot \underline{\underline{\varepsilon}} \cdot \vec{u}_{b_0} = \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_c &= \vec{u}_{c_0}^T \cdot \underline{\underline{\varepsilon}} \cdot \vec{u}_{c_0} = \varepsilon_{11} \cos^2(\delta_2) - \varepsilon_{12} \sin(2\delta_2) + \varepsilon_{22} \sin^2(\delta_2) \end{aligned}$$

Soit :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_a \\ \varepsilon_b \\ \varepsilon_c \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos^2(\delta_1) & \sin^2(\delta_1) & \sin(2\delta_1) \\ 1 & 0 & 0 \\ \cos^2(\delta_2) & \sin^2(\delta_2) & -\sin(2\delta_2) \end{bmatrix}}_{[\mathbf{M}]} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix}$$

D'où :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_a \\ \varepsilon_b \\ \varepsilon_c \end{pmatrix} = [\mathbf{M}] \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix}$$

et donc :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix} = [\mathbf{M}]^{-1} \begin{pmatrix} \varepsilon_a \\ \varepsilon_b \\ \varepsilon_c \end{pmatrix}$$

Ainsi, l'extensomètre mesure les trois composantes de déformation dans le plan de l'éprouvette ;  $\varepsilon_{11}$  la déformation axiale,  $\varepsilon_{22}$  la déformation de contraction et  $\varepsilon_{12}$  la distorsion (Fig.4.9). Parmi ces trois mesures, seules les deux mesures de déformation (axiale  $\varepsilon_{11}$  et de distorsion  $\gamma = 2\varepsilon_{12}$ ) sont transmises à la machine de traction-torsion, sous la forme de deux signaux analogiques  $\pm 10V$ , qui permettent de contrôler les vérins axial et de torsion, respectivement. Dans notre application, seul le signal analogique relatif à la déformation axiale est utilisé.

### 4.4.3 Système de suivi de cibles

L'extensomètre optique, présenté au paragraphe précédent, permet de contrôler la machine en déformation mesurée au centre de l'éprouvette. Pour la mesure et l'acquisition des trois données de déformation dans le plan de l'éprouvette, nous utilisons une deuxième caméra CCD de suivi de cibles qui enregistre les coordonnées des quatre cibles 0, 1, 2 et 3 marquées sur la surface de l'éprouvette, dans le repère  $(\vec{X}_1, \vec{X}_2)$  (Fig. 4.9). Cette caméra a une fréquence d'acquisition de 25 images/s et une résolution de 1280(H) par 1024(V) pixels et le système a été développé au laboratoire 3SR.

Dans la configuration initiale non déformée, la mesure des coordonnées des trois cibles 0, 1 et 2 permet de définir les coordonnées des deux vecteurs  $\vec{a}_0 = \sum_{i=1}^2 a_{0i} \vec{X}_i$  et  $\vec{b}_0 = \sum_{i=1}^2 b_{0i} \vec{X}_i$ . De la même manière le suivi des cibles 0, 1 et 2 au cours de la déformation permet de définir les coordonnées des deux vecteurs  $\vec{a} = \sum_{i=1}^2 a_i \vec{X}_i$  et  $\vec{b} = \sum_{i=1}^2 b_i \vec{X}_i$  dans la configuration actuelle.

En considérant un champ de déformation homogène au centre de l'éprouvette, on peut écrire :

$$\vec{a} = \underline{\underline{F}} \cdot \vec{a}_0; \vec{b} = \underline{\underline{F}} \cdot \vec{b}_0 \quad (4.5)$$

où  $\underline{\underline{F}}$  est le tenseur gradient de la transformation dans le plan de l'éprouvette, tel que :

$$\underline{\underline{F}} = \sum_{i,j=1}^2 F_{ij} (\vec{X}_i \otimes \vec{X}_j) \quad (4.6)$$

où les composantes  $F_{ij}$  sont des inconnues à déterminer. La relation (4.5) peut s'écrire :

$$\begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{01} & b_{01} \\ a_{02} & b_{02} \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

d'où :

$$\begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{01} & b_{01} \\ a_{02} & b_{02} \end{pmatrix}^{-1} \quad (4.8)$$

Ainsi la relation (4.8) permet de calculer les composantes  $F_{ij}$  du tenseur gradient de la transformation en fonction des mesures du système de suivi de cibles.

En vertu de la décomposition polaire, on peut écrire de façon unique :

$$\underline{\underline{F}} = \underline{\underline{V}} \underline{\underline{R}} = \underline{\underline{R}} \underline{\underline{U}} \quad (4.9)$$

où  $\underline{\underline{R}}$  est le tenseur orthogonal de rotation propre et  $\underline{\underline{U}}, \underline{\underline{V}}$  sont les tenseurs de déformation pure droit et gauche respectivement.

Ainsi :

$$\underline{\underline{U}} = \underline{\underline{R}}^T \underline{\underline{F}} \quad (4.10)$$

Et la matrice des composantes du tenseur de rotation notée  $\underline{\underline{R}}$ , est telle que [14] :

$$\underline{\underline{R}} = \frac{1}{\xi} \begin{pmatrix} F_{11} + F_{22} & F_{12} - F_{21} \\ F_{21} - F_{12} & F_{11} + F_{22} \end{pmatrix} \quad \text{où} \quad \xi = \sqrt{(F_{11} + F_{22})^2 + (F_{12} - F_{21})^2} \quad (4.11)$$

Les relations (4.8), (4.10) et (4.11) nous permettent de calculer les composantes du tenseur de déformation BIOT1 noté  $\varepsilon_{BIOT1}$ , tel que :

$$\underline{\underline{\varepsilon_{BIOT1}}} = \underline{\underline{U}} - \underline{\underline{I}} \quad (4.12)$$

où  $\underline{\underline{I}}$  désigne le tenseur identité.

#### 4.4.4 Comparaison des mesures de déformation

L'extensomètre optique et le système de suivi de cibles permettent de faire les mêmes mesures. Dans ce paragraphe, nous proposons de comparer les mesures de ces deux extensomètres. Cette comparaison est basée sur les résultats de l'essai *9017E25-C-03*. La Figure 4.11(a) montre l'évolution des mesures axiale et transversale de l'extensomètre optique et de celles du système de suivi de cible en fonction du temps. Les mesures des deux extensomètres se superposent. La Figure 4.11(b) présente l'évolution de la déformation axiale mesurée par le système de suivi de cible en fonction de celle de l'extensomètre optique. En effectuant une régression linéaire, nous obtenons une pente très proche de l'unité :  $0,968 \pm 0,003$ .

Ainsi, dans la suite de ce document, la **déformation axiale** sera notée  $\varepsilon_a$ , la **déformation transversale** sera notée  $\varepsilon_t$ , sans indication de l'extensomètre utilisé pour faire la mesure. Pour les essais hors axes, la **distorsion** est caractérisée par le système de suivi de cibles et sera notée  $\varepsilon_{12}$ .

#### 4.4.5 Microscope digital

En plus des deux extensomètres présentés aux deux paragraphes précédents, un microscope digital est disponible au laboratoire. Il est possible de l'installer sur l'autre face de l'éprouvette (Fig. 4.12 (a)). Ce dispositif filme le tissu avec un grossissement  $\times 20$ . Grâce à ce film, il est possible de caractériser l'angle de maille qui correspond à l'angle entre la Chaîne et la Trame. Un résultat typique est présenté en Figures 4.12 et 4.13 au cours d'un essai de traction dans le sens biais (*9017E25-B-03*).

Pour une trentaine de points sélectionnés à intervalles réguliers sur la durée totale de l'essai, une mesure manuelle de l'angle de maille est effectuée sur les images obtenues par le microscope digital à l'aide du logiciel de traitement d'image ImageJ. La Figure 4.12-(b) illustre la mesure de l'angle de maille dans un diagramme  $(\Sigma_a, \varepsilon_a)$ . Sur ce diagramme des images du microscope digital sont insérées et indiquent l'évolution de l'orientation entre les fils de Chaîne (C) et de Trame (T) en fonction du chargement. Il est possible, avec une base de temps commune de faire correspondre les informations de déformation et de contrainte avec l'angle de maille. La Figure 4.13-(a) donne l'évolution de l'angle de maille en fonction de la déformation. Le diagramme  $(\alpha, \varepsilon_a)$  montre une évolution quasi-linéaire, au début de l'essai, ensuite l'angle de maille tend vers un angle de blocage de l'ordre de  $30^\circ$ . La droite de régression, en pointillé dans ce diagramme, donne une pente de  $-1,25(^\circ/\%)$ , qui correspond à la réduction de l'angle de maille en fonction de la déformation axiale.

La Figure 4.13-(b) donne l'évolution de la contrainte en fonction de l'angle de maille. Ce résultat confirme l'existence d'un angle de blocage du tissu de l'ordre de  $30^\circ$ . L'évolution de l'angle de maille vers cette valeur, correspond à une phase de forte augmentation de la contrainte.

### 4.5 Pilotage des essais et acquisition des données

Les essais sont réalisés au laboratoire 3SR, dans une salle de  $40m^2$  environ, située à l'intérieur des bâtiments, sans fenêtres extérieures. Au cours des essais, la température de la salle est maintenue à  $20 \pm 1^\circ C$ .

#### 4.5.1 Asservissement de la machine en déformation

Grâce à l'extensomètre co-développé par MTS et le laboratoire 3SR, la machine d'essais peut être pilotée en déformation. En effet, comme le montre la Figure 4.14, l'extensomètre mesure la déformation au centre de l'éprouvette grâce aux cibles préalablement réalisées. Trois informations

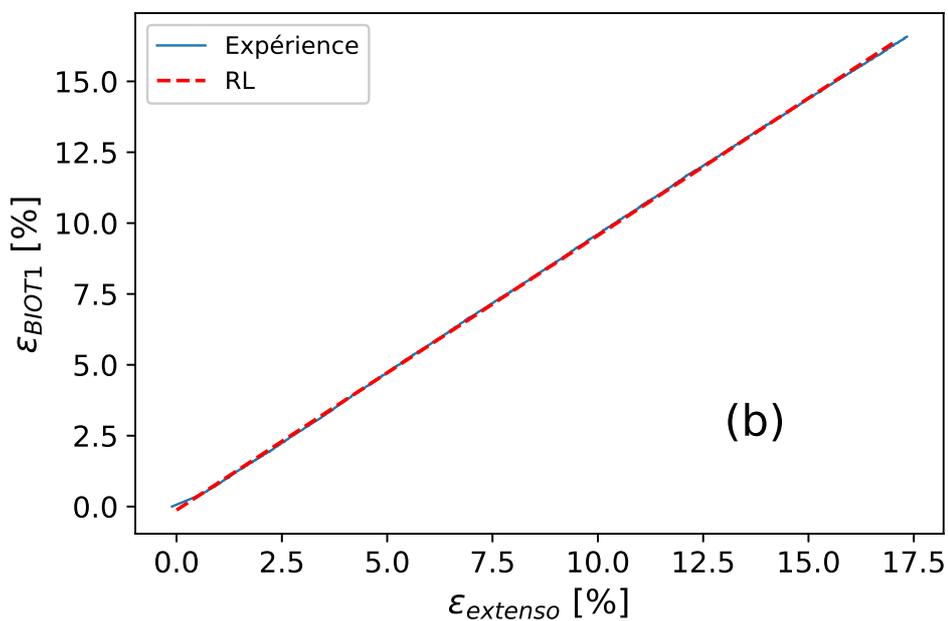
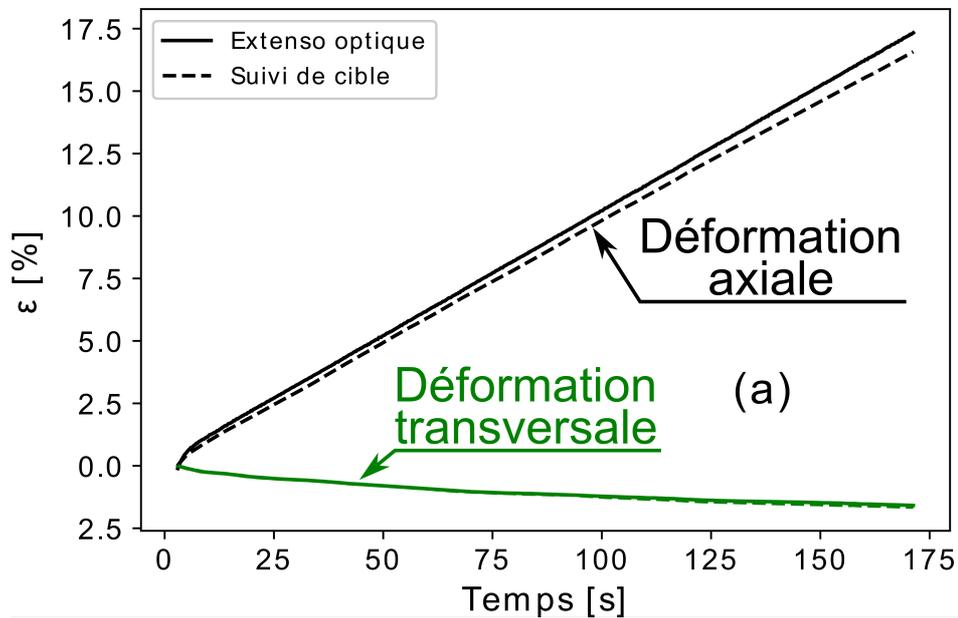


FIGURE 4.11 – Résultats de l'essai 9017E25-C-03(a) Comparaison des mesures de déformation axiale et transversale de l'extensomètre optique et du système de suivi de cible (b) Régression linéaire entre la mesure de la déformation axiale obtenue par suivi de cible et par extensomètre ( $\varepsilon_{\text{BIOT1}} = 0,968\varepsilon_{\text{extenso}}$ )- $\dot{\varepsilon} = 10^{-3}\text{s}^{-1}$

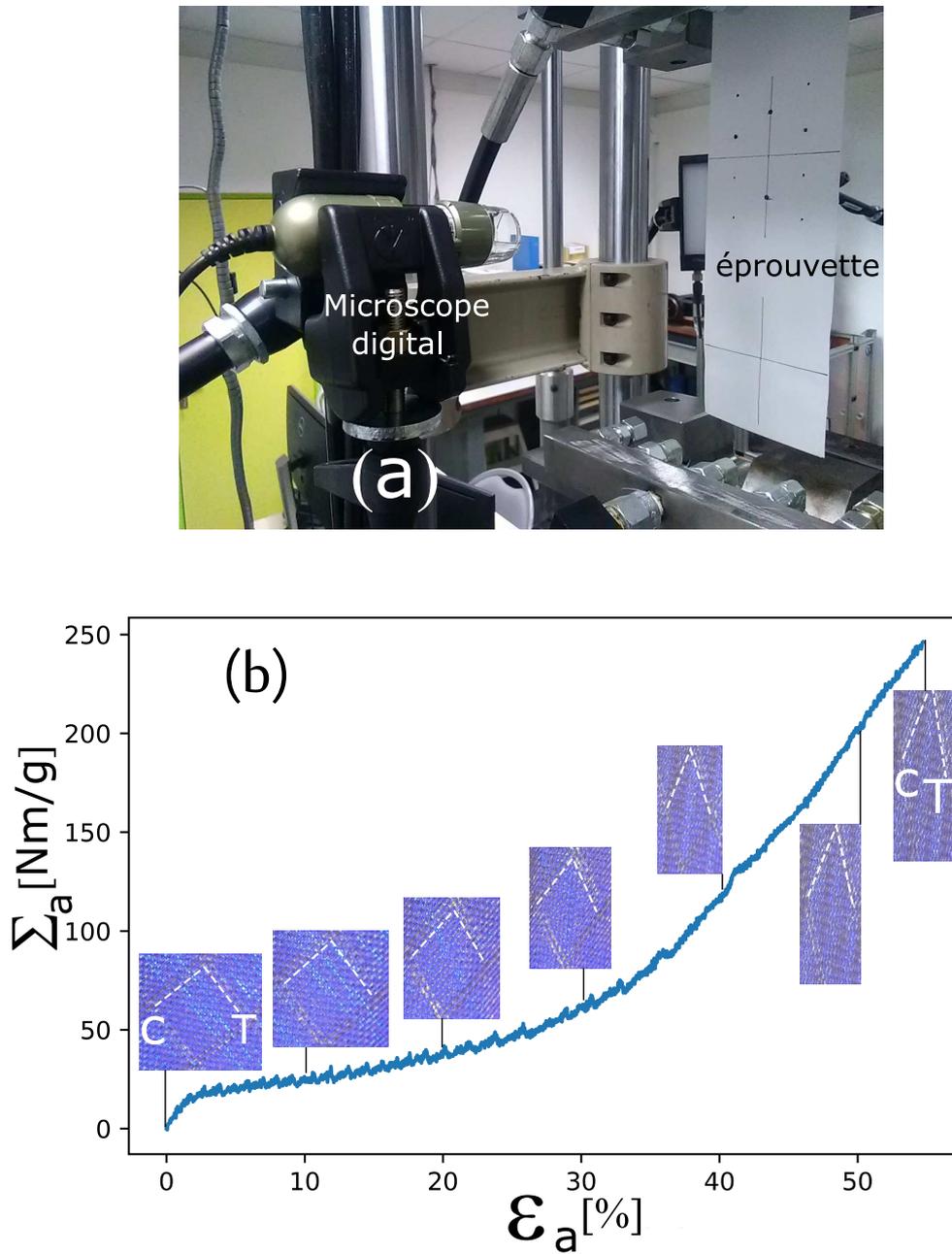


FIGURE 4.12 – Mise en œuvre du microscope digital - 9017E25-B-03 : (a) Installation du microscope digital (b) Mesure de l'évolution de l'angle de maille au cours du chargement de traction

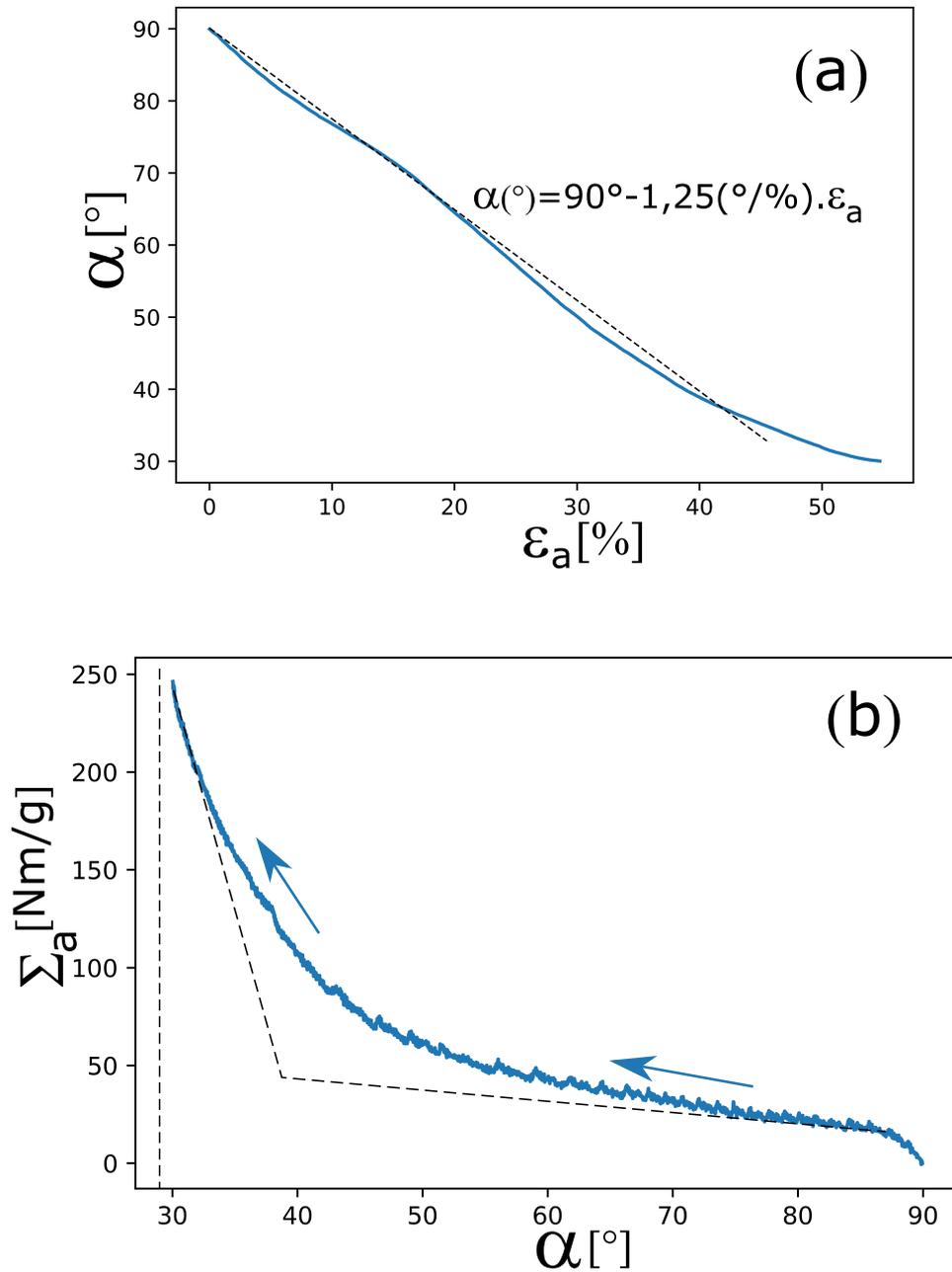


FIGURE 4.13 – Résultats de mesures obtenus grâce au microscope digital - 9017E25-B-03 : (a) Évolution de l'angle de maille en fonction de la déformation d'axiale (b) Evolution de la contrainte appliquée en fonction de l'angle de maille

sont mesurées : les déformations dans le plan de l'éprouvette ( $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, 2\varepsilon_{12}$ ). Deux canaux de transmission d'information sont disponibles entre le contrôleur de la presse et l'extensomètre. Ainsi deux informations de déformation sont directement transmises par l'extensomètre, en temps réel, au contrôleur et servent de voies de pilotage à l'utilisateur ( $\varepsilon_{11}, 2\varepsilon_{12}$ ). Ces deux informations sont associées respectivement aux commandes axiale et de torsion. L'utilisateur peut alors utiliser ces canaux directement dans le logiciel MPE de MTS pour définir le protocole d'essai. Dans le cas des tissus, seul le pilotage de la déformation axiale est pertinent au regard de l'étude menée. Aucun essais ne sera piloté ni en déformation transversale ni en distorsion. Par ailleurs, la presse offre d'autres voies de pilotage, que sont :

- pilotage en force
- pilotage en déplacement
- pilotage en couple
- pilotage en angle

L'ensemble des essais uniaxiaux présentés dans le cadre de ce travail ont été réalisés avec un pilotage en déformation à vitesse de déformation constante imposée.

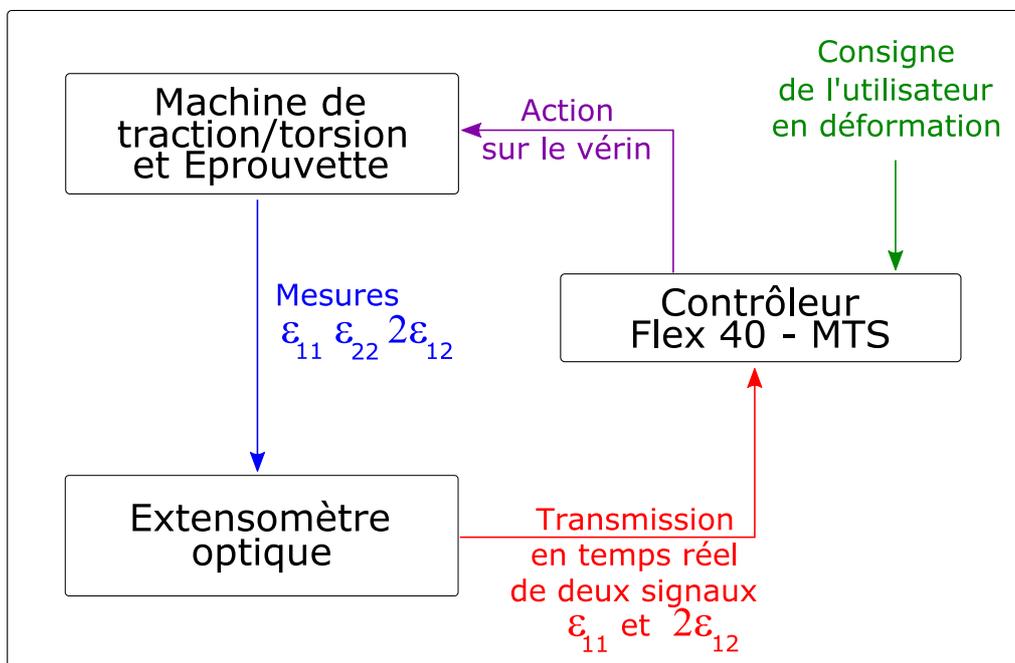


FIGURE 4.14 – Boucle d'asservissement de la presse MTS

### 4.5.2 Vitesse de déformation

L'influence de la vitesse de déformation sur le comportement des matériaux testés est relativement faible. Cet aspect est illustré par les Figures 4.15 et 4.16, qui donnent respectivement des résultats de traction à différentes vitesses de déformation, dans le sens Chaîne et dans le sens Trame. En effet, les résultats dans le sens chaîne et au début du chargement dans le sens trame montrent que pour une vitesse  $\dot{\varepsilon} = 10^{-2}.s^{-1}$ , la réponse en contrainte est encadrée par celles obtenues pour deux vitesses plus faibles,  $\dot{\varepsilon} = 10^{-3}.s^{-1}$  et  $\dot{\varepsilon} = 10^{-4}.s^{-1}$  respectivement. Ceci montre que la réponse en contrainte est relativement peu sensible à la valeur de la vitesse de déformation.

Ainsi, afin d'optimiser la durée des essais et minimiser les effets visqueux sur le comportement des matériaux testés, une valeur de vitesse de déformation quasi-statique  $\dot{\varepsilon} = 10^{-3}.s^{-1}$  est adoptée pour l'ensemble des essais.

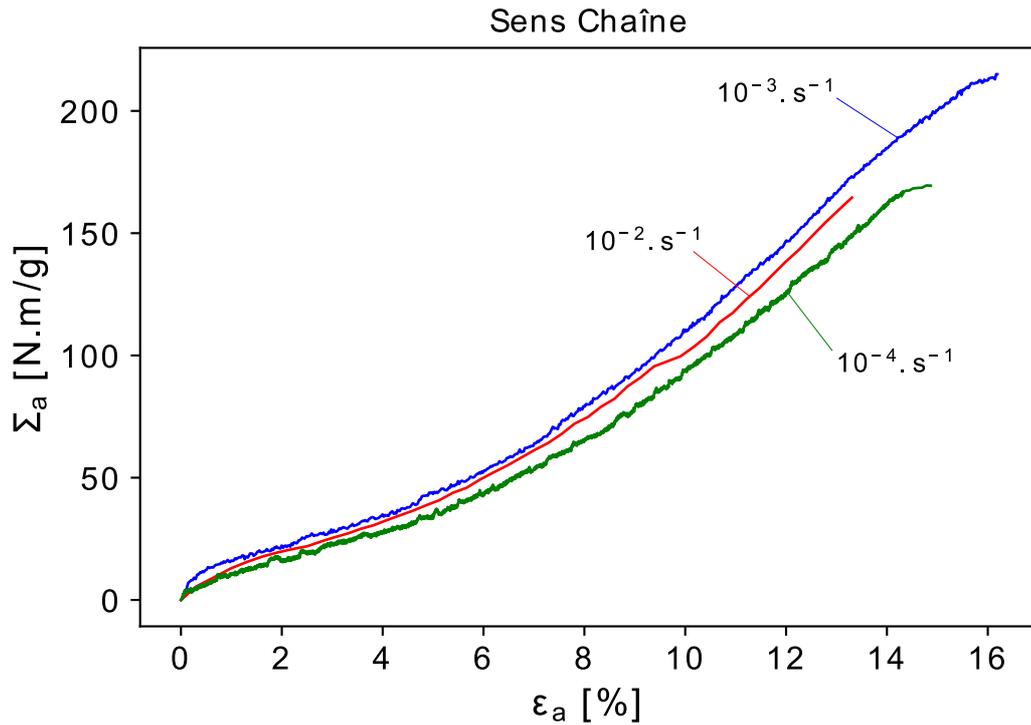


FIGURE 4.15 – Tractions à différentes vitesses de déformation 9017E25-C

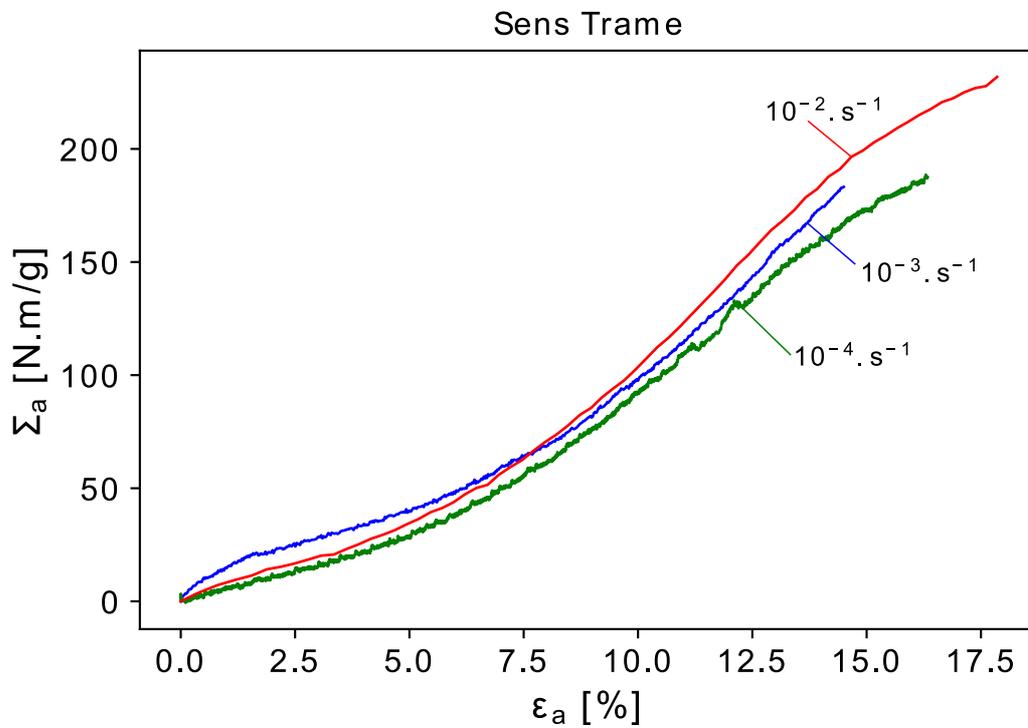


FIGURE 4.16 – Tractions à différentes vitesses de déformation 9017E25-T

## 4.6 Programme des essais Uniaxiaux

Deux types d'essai de traction simple sont envisagés pour chacun des matériaux : essai de type A et essai de type B. Ces essais sont réalisés dans différentes directions du matériau. Le tableau 4.3 donne pour chaque type d'essai les directions et le nombre d'essais réalisés au minimum, dans chaque cas.

Type d'essai	Description	Direction	Nombre d'essais identiques réalisés au minimum
A	Traction à rupture	Chaîne et Trame	3
		Biais	2
		22,5° et 67,5°	1
B	Traction avec Charge/décharge	Chaîne, Trame, Biais, 22,5° et 67,5°	1 1

TABLE 4.3 – Types d'essais en traction simple, réalisés sur chacun des matériaux

L'essai de type A est contrôlé en vitesse de déformation constante  $\dot{\varepsilon} = 10^{-3}.s^{-1}$  et correspond à une traction monotone jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Pour les directions Chaîne et Trame, au moins trois essais de type A sont effectués. Pour les essais hors axes, le nombre d'échantillon est plus faible : deux au minimum dans la direction du biais et un essai dans les autres directions.

L'essai de type B correspond à un chargement de traction ondulée constitué de charges et de décharges (Fig. 4.17). L'essai est contrôlé en vitesse de déformation constante  $\dot{\varepsilon} = 10^{-3}.s^{-1}$ . Lors des décharges la vitesse de déformation change de signe et garde la même valeur absolue. Les inversions à droite (a, b et c) sont déterminées par trois valeurs de déformation prédéfinies  $\varepsilon_R^i$  et les inversions à gauche (d, e et f) sont détectées automatiquement au cours de l'essai à force de traction nulle ( $F = 0N$ ). Ainsi le pilotage de l'essai de type B est un pilotage mixte déformation/force. Les valeurs de déformation  $\varepsilon_R^i$ , qui caractérisent les inversions à droite (a, b et c) et pour lesquelles les décharges s'amorcent, sont définies par la formule suivante :

$$\varepsilon_R^i = i \times \frac{\varepsilon_{UTS}}{4}; i = 1, 2, 3 \quad (4.13)$$

Avec  $\varepsilon_{UTS}$  la déformation à la rupture sous charge, de l'anglais « **U**ltimate **T**ensile **S**tress ». Pour toutes les directions un seul essai de type B est effectué.

## 4.7 Conclusion

Les développements techniques propres à la traction uniaxiale ont été l'occasion de définir les méthodes de confection et de marquage des éprouvettes. Plus généralement les mises au point expérimentales ont concerné la conception d'une ergonomie face à la mise en place d'une éprouvette dans les mors à pincement hydraulique à haute pression. L'ambition initiale des développements techniques de la presse uniaxiale a été de disposer d'un dispositif expérimental permettant des modes de pilotage originaux : qu'il s'agisse d'un pilotage en déformation ou en mode mixte déformation/force. Ces développements techniques ont impliqué un fort investissement notamment dans le développement du logiciel et de l'extensomètre optique en collaboration avec *MTS Provisys Eng.*

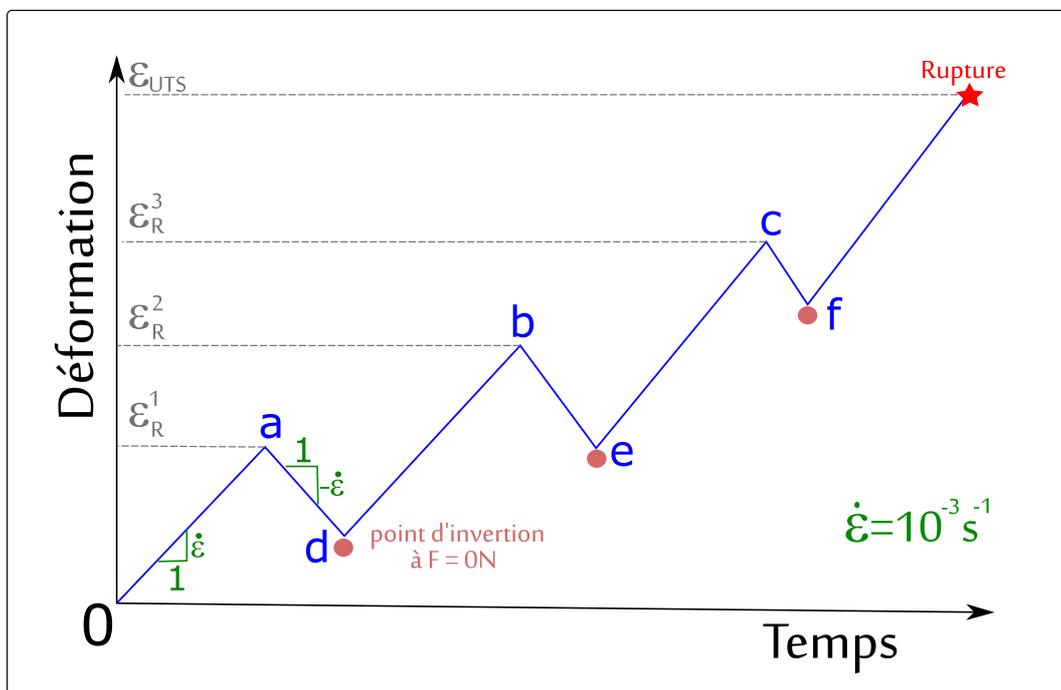


FIGURE 4.17 – Programme de chargement pour l'essai de type B



# Chapitre 5

## Résultats bruts de traction uniaxiale

Ce chapitre présente les résultats bruts des essais uniaxiaux. Le post-traitement et l'analyse de ces résultats sont disponibles au chapitre 10.

### 5.1 Essais de type A

#### 5.1.1 Sens Chaîne

Quatre essais de type A sont effectués dans le sens Chaîne. Les résultats dans le diagramme contrainte-déformation sont présentés en Figure 5.1.

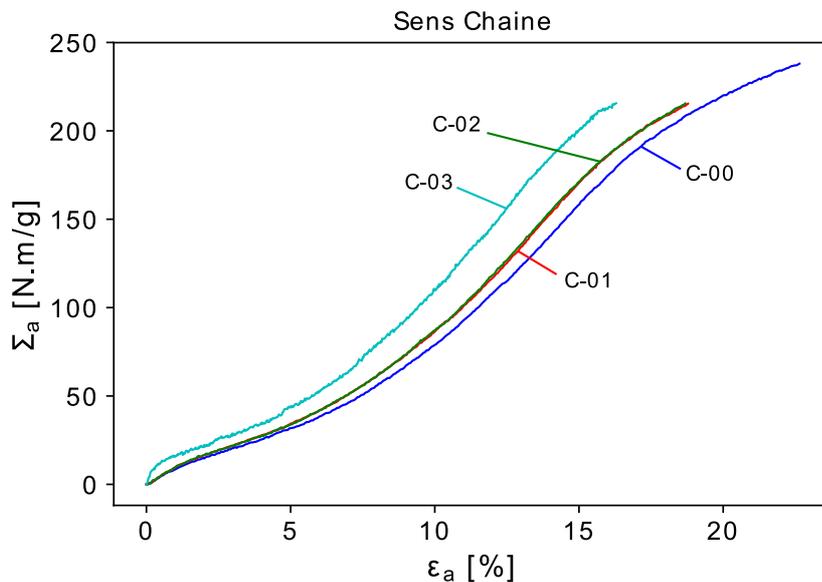


FIGURE 5.1 – 9017 E25 - Résultats dans le diagramme contrainte axiale( $\Sigma_a$ )- déformation axiale( $\varepsilon_a$ ) pour quatre essais de type A dans le sens Chaîne

Le comportement du matériau en traction simple se caractérise par une forme caractéristique, en trois zones, qui se distinguent par leurs pentes dans le diagramme contrainte-déformation. La première zone, se situe à droite de l'origine de la courbe et jusqu'à une déformation de 2% environ. Cette zone se termine par une diminution de pente, qui produit un changement de pente plus au moins prononcé. La deuxième zone s'étend jusqu'à une déformation de l'ordre de 10%. Dans la troisième et dernière zone, on observe une augmentation progressive de la pente dans le diagramme contrainte-déformation. La fin des essais correspond à la ruine des éprouvettes,

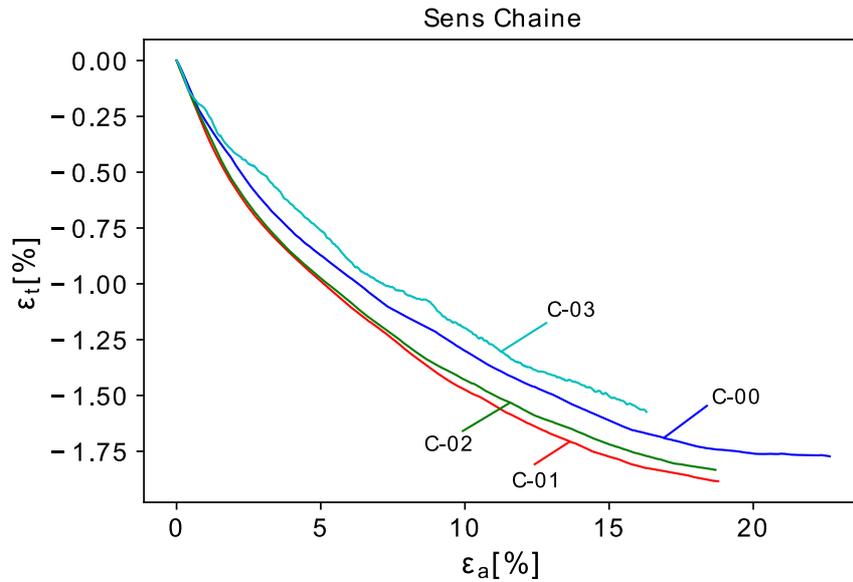


FIGURE 5.2 – 9017 E25 - Résultats dans le diagramme déformation transverse( $\varepsilon_t$ )-déformation axiale( $\varepsilon_a$ ) pour quatre essais de type A dans le sens Chaîne

c'est-à-dire, à une rupture des fils dans la direction de traction : ici les fils de chaîne. Cette rupture s'effectue dans la zone utile de l'éprouvette avec un effet "accordéon" (cf paragraphe 4.2.2 Fig.4.5). La valeur moyenne de la contrainte à rupture est telle que :

$$\langle \Sigma_{UTS-C} \rangle = \langle 221 \rangle \pm 11 \text{ Nm/g} (dc = 95\%, n = 4) \quad (5.1)$$

La valeur moyenne de la déformation à rupture est telle que :

$$\langle \varepsilon_{aUTS-C} \rangle = \langle 19,15 \rangle \pm 2,65\% (dc = 95\%, n = 4) \quad (5.2)$$

La Figure 5.2 donne les résultats de l'effet de contraction au cours des quatre essais de type A, dans le sens Chaîne : C-00 à C-03. Cette figure donne l'évolution de la déformation transversale en fonction de la déformation axiale.

La valeur moyenne de la déformation transversale à rupture est telle que :

$$\langle \varepsilon_{tUTS-C} \rangle = \langle -1.67 \rangle \pm 0,10\% (dc = 95\%, n = 4) \quad (5.3)$$

### 5.1.2 Sens Trame

Quatre essais de type A sont effectués dans le sens Trame, les résultats dans un diagramme contrainte-déformation sont présentés en Figure 5.3.

Dans le diagramme contrainte-déformation, le comportement du matériau dans le sens Trame se caractérise aussi par une forme en trois zones, similaire à celle observée dans le cas de la traction dans le sens Chaîne. La rupture s'effectue dans la zone utile de l'éprouvette avec un effet "accordéon", comme dans le cas de la traction dans le sens Chaîne.

La valeur moyenne de la contrainte à rupture est telle que :

$$\langle \Sigma_{UTS-T} \rangle = \langle 222 \rangle \pm 24 \text{ Nm/g} (dc = 95\%, n = 4) \quad (5.4)$$

La valeur moyenne de la déformation à rupture est telle que :

$$\langle \varepsilon_{aUTS-T} \rangle = \langle 19,15 \rangle \pm 3,13\% (dc = 95\%, n = 4) \quad (5.5)$$

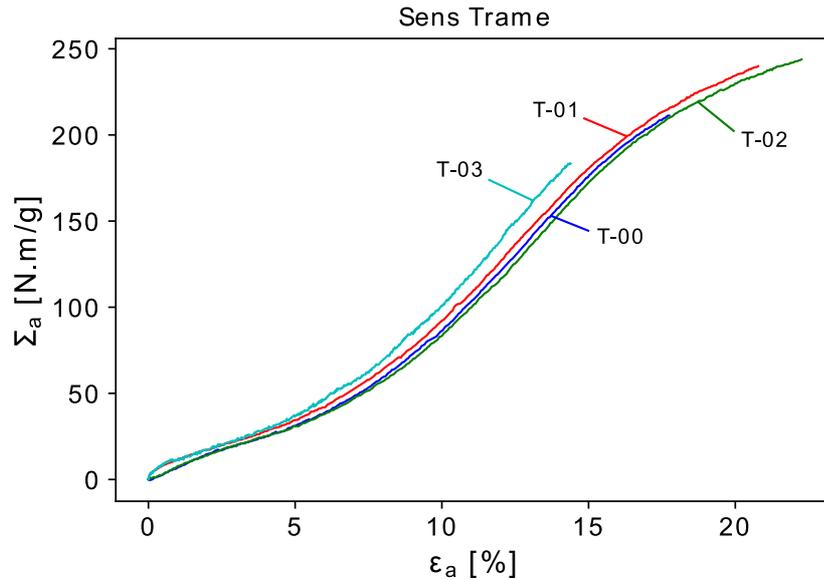


FIGURE 5.3 – 9017 E25 - Résultats dans le diagramme contrainte axiale( $\Sigma_a$ )-déformation axiale( $\varepsilon_a$ ) pour quatre essais de type A dans le sens Trame

La figure 5.4 donne dans un diagramme déformation transversale - déformation axiale l'évolution de la contraction au cours des quatre essais de type A, dans le sens Trame :  $T-00$  à  $T-03$ .

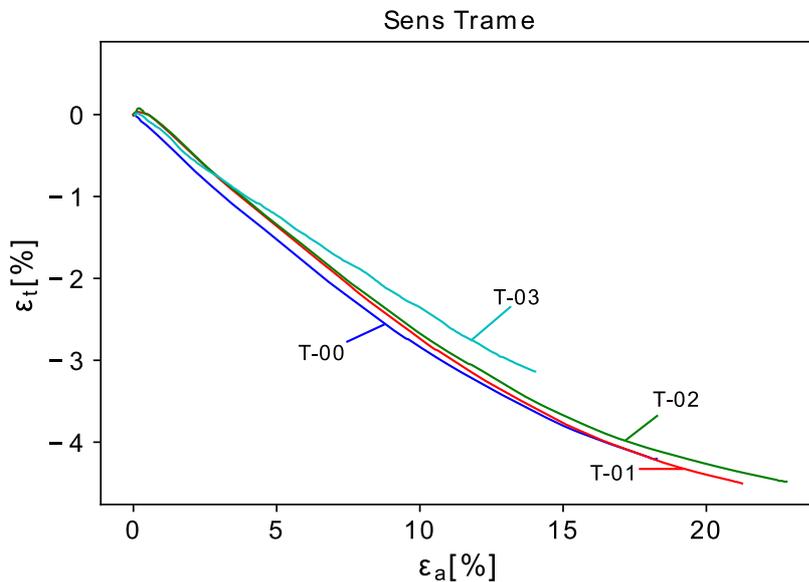


FIGURE 5.4 – 9017 E25 - Résultats dans le diagramme déformation transversale( $\varepsilon_t$ )-déformation axiale( $\varepsilon_a$ ) pour quatre essais de type A dans le sens Trame

La valeur moyenne de la déformation transversale à la rupture est telle que :

$$\langle \varepsilon_{tUTS-T} \rangle = \langle -4,14 \rangle \pm 0,44\% (dc = 95\%, n = 4) \quad (5.6)$$

La comparaison des valeurs moyennes de  $\varepsilon_{tUTS-C}$  et  $\varepsilon_{tUTS-T}$ , données par les relations (5.3) et (5.6) respectivement, montre un effet de contraction plus prononcé lors de la traction dans

le sens Trame. Ce phénomène s'explique par l'effet de l'embuage sur les fils de Chaîne, qui favorise l'effet de contraction lors de la traction dans le sens Trame. Lors de la traction dans le sens Chaîne le fil de Trame de forme droite s'oppose à la contraction et limite son effet.

### 5.1.3 Sens Biais

Deux essais dans le sens du biais sont réalisés. Les Figures 5.5 et 5.6 montrent les résultats de mesure dans le diagramme  $(\Sigma_a - \varepsilon_a)$  et dans le diagramme  $(\varepsilon_t - \varepsilon_a)$ , respectivement.

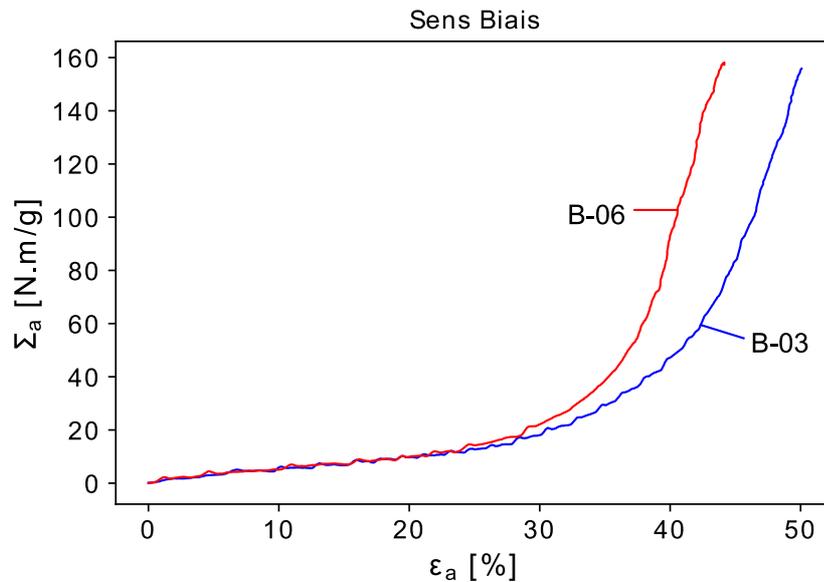


FIGURE 5.5 – 9017 E25 - Résultats dans le diagramme contrainte axiale( $\Sigma_a$ )-déformation axiale( $\varepsilon_a$ ) pour deux essais de type A dans le sens Biais

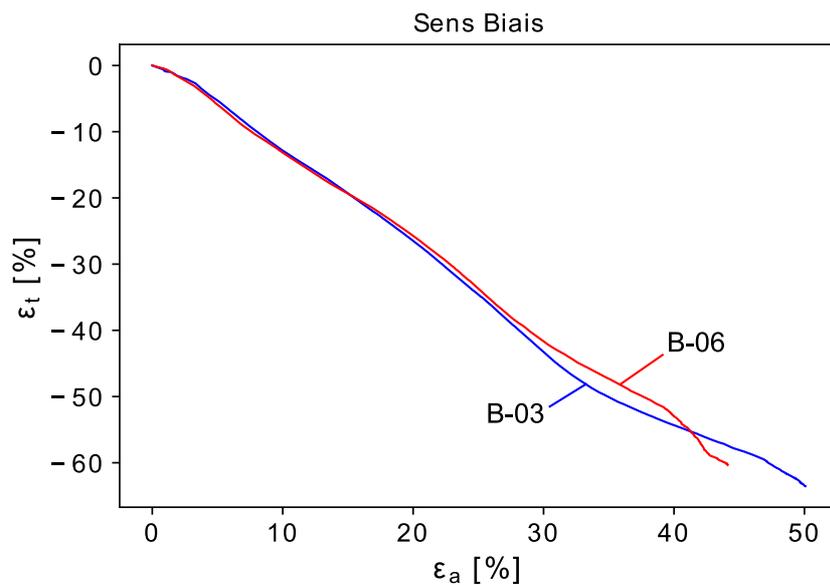


FIGURE 5.6 – 9017 E25 - Résultats dans le diagramme déformation transverse( $\varepsilon_t$ )-déformation axiale( $\varepsilon_a$ ) pour deux essais de type A dans le sens Biais

L'allure de la courbe contrainte-déformation est différente de celles dans les directions Chaîne et Trame. Un comportement linéaire à faible pente pour les contraintes faibles est visible dès le début de la courbe et correspond à la déformation des mailles sans allongement des fibres ; on observe une fermeture de l'angle de maille  $\alpha$  (cf. paragraphe 4.4.5 Fig. 4.12). Une fois que les mailles ne se déforment plus, la sollicitation est directement reprise par les fibres quasi-alignées dans le sens de la traction ; l'angle de blocage de maille est alors atteint. Ceci entraîne une forte augmentation de pente dans la courbe ( $\Sigma_a - \varepsilon_a$ ) à partir d'une déformation de l'ordre de  $\varepsilon_a = 35\%$ .

Les éprouvettes en biais ne rompent pas comme les éprouvettes de traction dans les directions chaîne et trame. En effet, les ruptures observées ne sont pas aussi nettes. Plusieurs amorces de rupture sont observées sur les bords libres de l'éprouvette et laissent à penser que la rupture s'initie sur les bords en plusieurs endroits et que c'est une des amorces qui se propage dans le sens chaîne ou trame. Le faciès est donc en dents de scie avec propagation de la rupture entre la chaîne et la trame. Cette propagation est rapide et il arrive que des morceaux de tissu se détachent au niveau de la rupture.

Le tableau 5.1 donne les valeurs moyennes à rupture de la contrainte et des déformations axiale et transversale, obtenues dans le cas de la traction dans le sens biais.

$\langle \Sigma_{UTS-B} \rangle$	$\langle 156 \rangle \pm 2Nm/g$
$\langle \varepsilon_{aUTS-B} \rangle$	$\langle 47,13 \rangle \pm 5,93\%$
$\langle \varepsilon_{tUTS-B} \rangle$	$\langle -62,05 \rangle \pm 3,01\%$

TABLE 5.1 – Valeurs moyennes à rupture de la contrainte, des déformations axiale et transversale, dans le sens biais

#### 5.1.4 Les autres essais Hors axes

La Figure 5.7 présente les courbes contrainte-déformation obtenues pour une traction à  $22,5^\circ$ (a) et à  $67,5^\circ$ (b). La forme des courbes est proche d'une droite monotone croissante jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Les valeurs de contrainte sont d'un ordre de grandeur plus faible que celles obtenues dans les sens chaîne, trame et biais. La contrainte est de l'ordre de  $10Nm/g$ . Ces résultats bruts sont bruités car les valeurs d'effort mesuré sont très faibles et s'approchent des limites d'utilisation de la machine d'essai.

La Figure 5.8 présente les résultats de la déformation de contraction en fonction de la déformation axiale.

Le tableau 5.2 donne les valeurs à rupture des contraintes et des déformations axiale et transversale, obtenues dans le cas des essais hors axes à  $22,5^\circ$  et  $67,5^\circ$ .

Paramètre	$22,5^\circ$	$67,5^\circ$
$\langle \Sigma_{UTS} \rangle$	$10Nm/g$	$13Nm/g$
$\langle \varepsilon_{aUTS} \rangle$	$19,49\%$	$20,26\%$
$\langle \varepsilon_{tUTS} \rangle$	$-11,18\%$	$-10,00\%$

TABLE 5.2 – Valeurs moyennes à la rupture de la contrainte, des déformations axiale et transversale, dans le sens  $22,5^\circ$  et  $67,5^\circ$

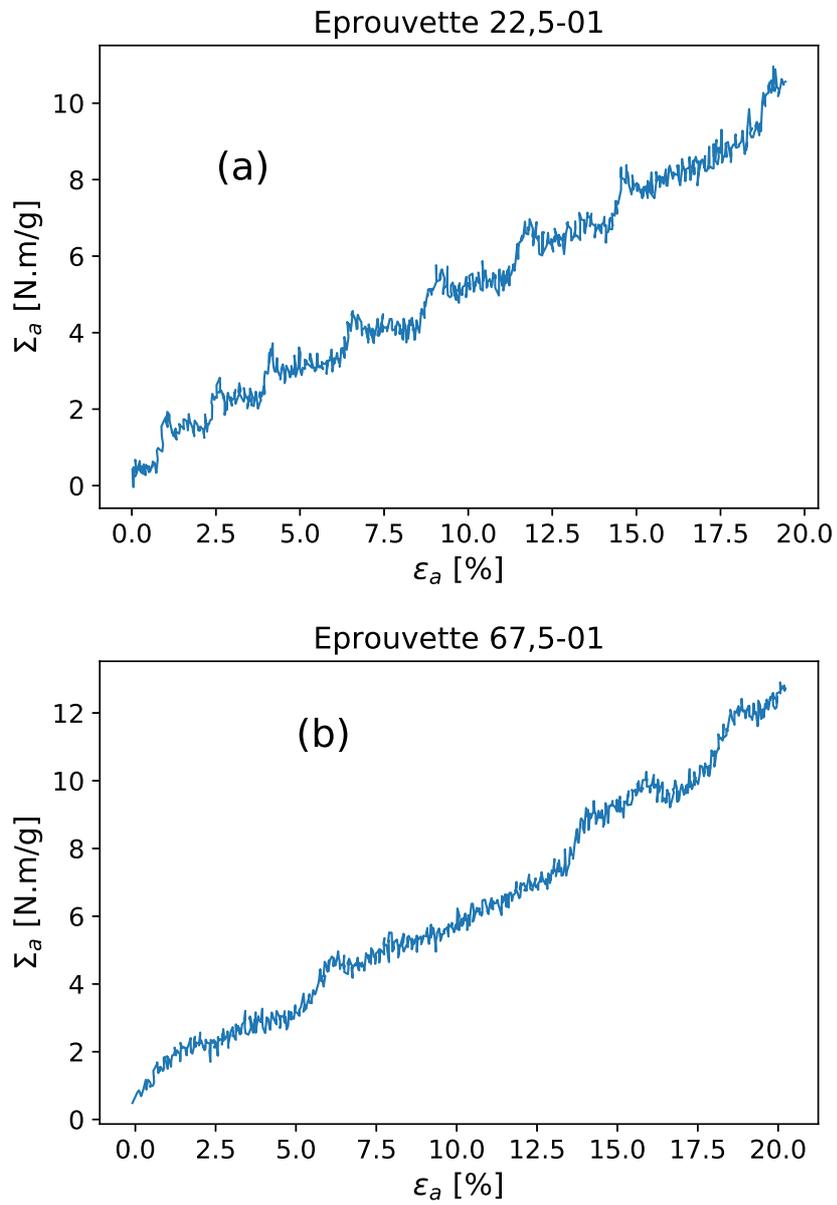


FIGURE 5.7 – 9017E25-22,5-1 et 9017E25-67,5-1 -Résultats des essais de traction simple , courbe contrainte-déformation, dans les directions hors axes : (a) 22,5° et (b) 67,5°

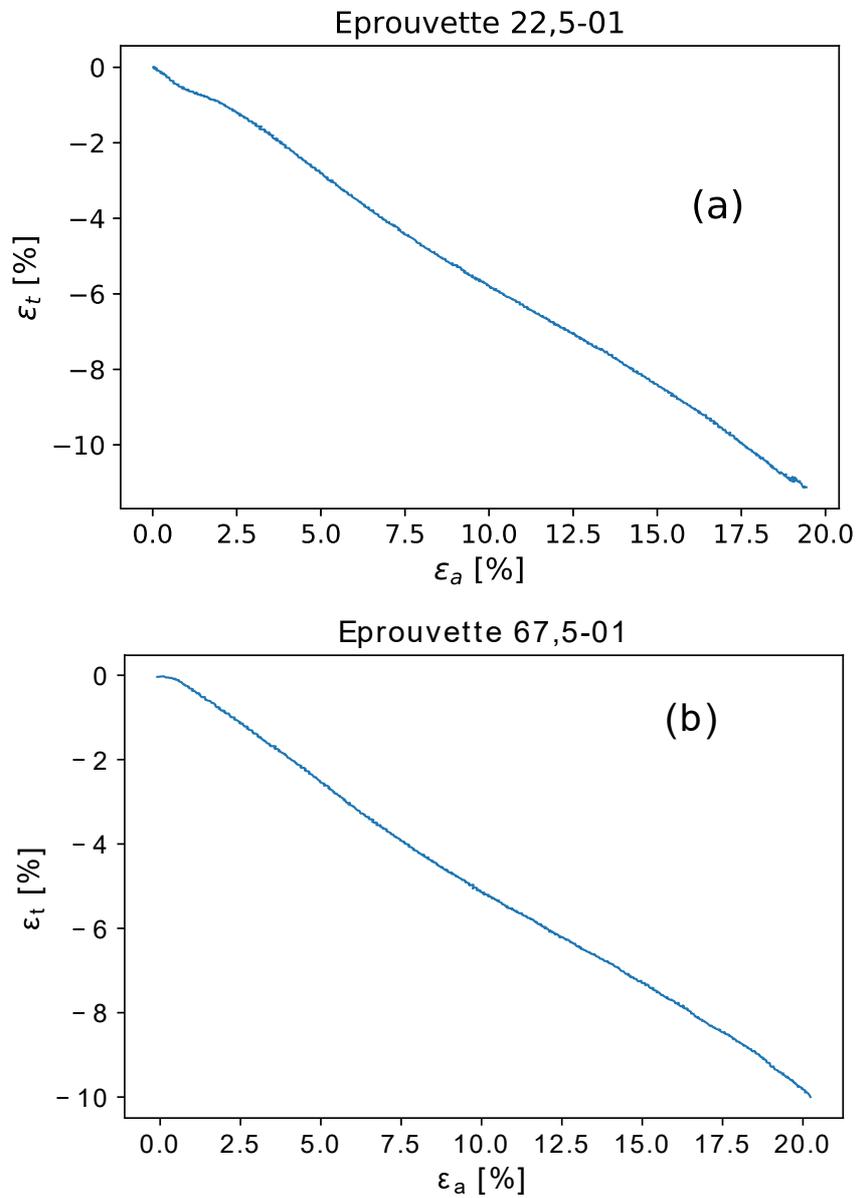


FIGURE 5.8 – 9017E25-22,5-1 et 9017E25-67,5-1 Résultats des essais dans le diagramme déformation transverse( $\epsilon_t$ )-déformation axiale( $\epsilon_a$ ) dans les directions hors axes :(a) 22,5°et (b) 67,5°

## 5.2 Essais de type B

### 5.2.1 Sens Chaîne, Trame et Biais

Les courbes en Figure 5.9 montrent les résultats pour trois directions Chaîne, Trame et Biais, dans le diagramme contrainte-déformation. Notons pour l'essai *B-08*, dans le sens biais, quatre décharges-recharges ont été appliquées, ceci pour tenir compte de la plage plus étendue de la déformation.

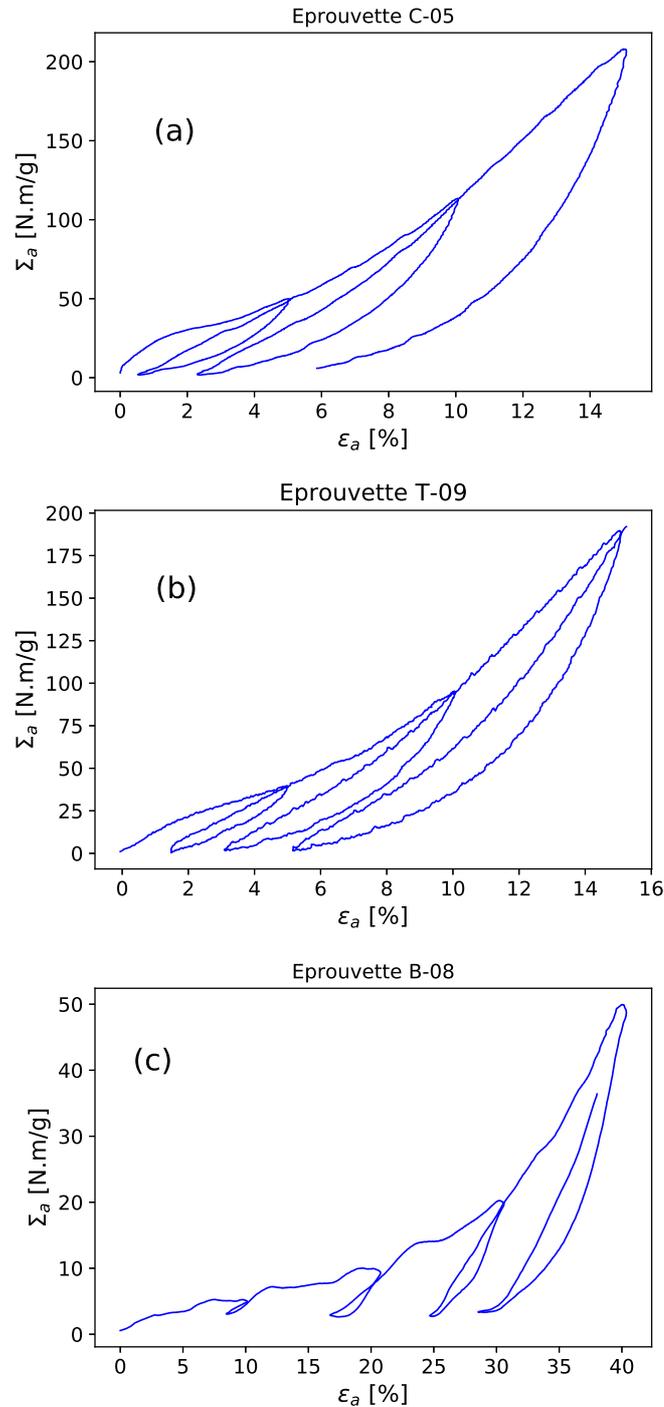


FIGURE 5.9 – Résultats des essais de type B en charge/décharge : (a) sens Chaîne *9017E25-C-05* (b) sens Trame *9017E25-T-09* (c) sens Biais *9017E25-B-08*

### 5.2.2 Autres directions hors axes

Les résultats des essais charge/décharge de type B dans les directions à  $22,5^\circ$  et  $67,5^\circ$  sont présentés dans la Figure 5.10. Cette figure montre les courbes contrainte-déformation pour les deux directions hors axes. Pour chacun des essais quatre décharges ont été programmées. Comme pour les essais de type A, le bruit observé sur les mesures est lié au faible niveau d'effort mesuré.

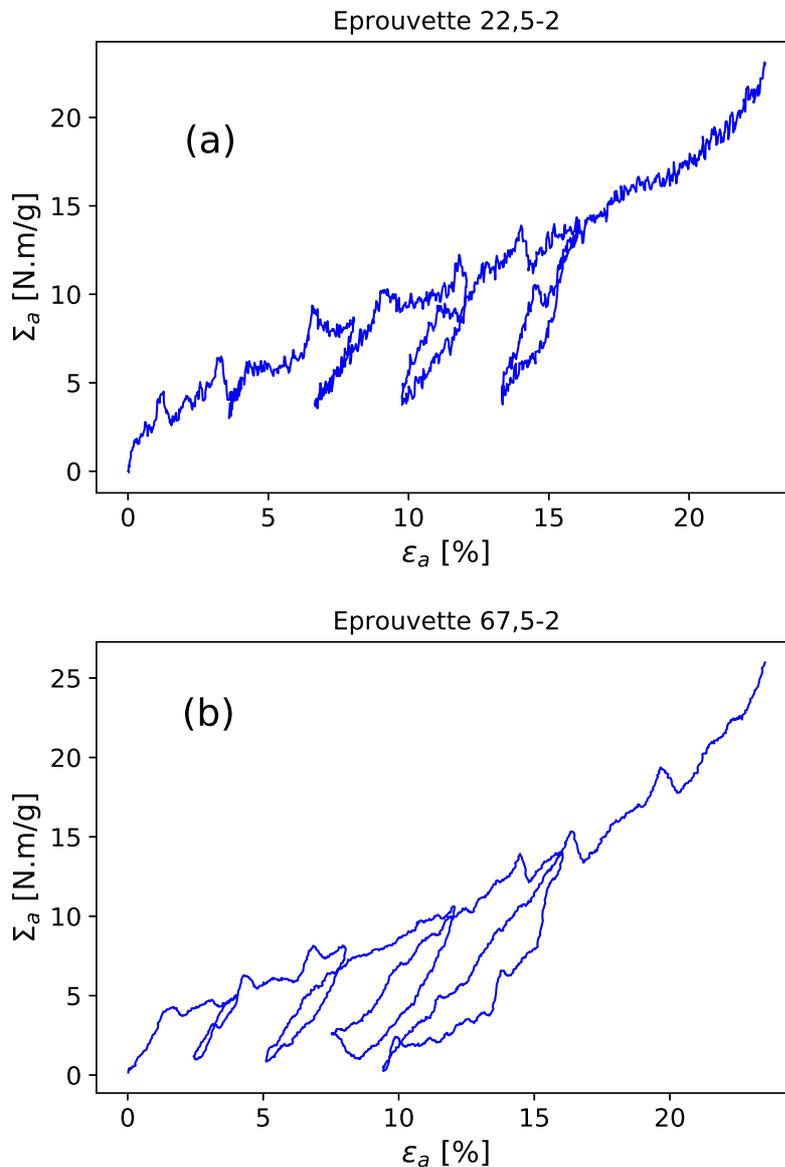


FIGURE 5.10 – Résultats dans des diagrammes contrainte-déformation des essais de type B en hors axes : (a) en direction  $22,5^\circ$  9017E25-22,5-02 (b) en direction  $67,5^\circ$  9017E25-67,5-02

## 5.3 Conclusion

La réalisation des essais de traction uniaxiale a permis de valider le protocole complet de l'essai de traction uniaxiale. Ce protocole s'étend de la découpe de l'éprouvette jusqu'au mode de pilotage en déformation ou en pilotage mixte déformation/force. Ce protocole aboutit à fournir l'ensemble des informations nécessaires à l'application de la méthode de recherche de limite

d'utilisation, dans le cas restreint de la sollicitation 1D. Ce protocole a permis de prospecter les comportements dans les directions Chaîne, Trame et en hors axes avec le sens Biais,  $22.5^\circ$  et  $67.5^\circ$ . Les résultats expérimentaux bruts obtenus permettent d'analyser toute la complexité du comportement du matériau.

## Troisième partie

### Mise en œuvre et résultats bruts de traction biaxiale



# Chapitre 6

## Sollicitation 2D : Traction biaxiale

Ce chapitre est dédié à l'essai de traction biaxiale. Compte tenu de l'application dans le domaine du kite, la mise en œuvre de l'essai de traction biaxiale est essentielle, étant donné les conditions de service réelles des matériaux tissés. Par ailleurs, le développement et la mise en œuvre de cet essai correspondent à un aspect original de ce travail de thèse.

Ce chapitre sera consacré à la présentation du banc de test utilisé pour réaliser les essais de traction biaxiale, la géométrie des éprouvettes et les protocoles de test. Nous présentons aussi dans ce chapitre, les premiers résultats expérimentaux de traction biaxiale. Nous tenons à noter une difficulté majeure que nous avons rencontrée lors de la réalisation de ce travail. Cette difficulté concerne l'incendie du bâtiment Eiffel du Laboratoire 3SR le dimanche 22 mars 2020. Cet incident a conduit à une longue interruption de la campagne des essais biaxiaux. Il nous a fallu déménager les moyens d'essai, rendus indisponibles, pour les installer dans un bâtiment sain : le bâtiment Berges. Ce déménagement impliqua de nombreuses opérations : démontage, déplacement, diagnostic, remontage, étalonnage des capteurs de la machine de traction biaxiale ainsi que la réinstallation des circuits de commande et d'asservissement.

### 6.1 Préambule

L'essai de traction biaxiale présente un certain nombre de difficultés, liées à trois aspects essentiels : le banc d'essai, la géométrie de l'éprouvette et le mode d'attache de l'éprouvette en matériau tissé. Ces trois aspects ont été abordés dans le cadre de ce travail sur la mise en œuvre de l'essai biaxial. Nous présentons dans ce chapitre les choix, les solutions adoptées et le travail réalisé, concernant ces aspects. Compte tenu des applications visées, nous avons limité le champ des investigations expérimentales au cas des essais biaxiaux dans les axes du matériau.

### 6.2 Le banc d'essai

#### 6.2.1 Présentation de la machine

Le moyen d'essai utilisé pour la réalisation des tests est une machine conçue, développée et réalisée au Laboratoire 3SR. Cette dernière se compose de quatre actionneurs opposés deux à deux et perpendiculaires les uns aux autres dans le plan, voir Figure 6.1. Ils forment donc deux axes de traction, nommés X et Y par la suite. Les actionneurs qui composent un même axe travaillent en symétrie ou en opposition, de sorte à rendre fixe le centre géométrique de l'éprouvette au cours d'un essai. Cette machine était initialement conçue pour tester des matériaux métalliques. Les axes ont une capacité de traction maximum de 10 tonnes et une course de 300mm par

axe. Pour son utilisation avec des matériaux tissés, la gamme des capteurs de force est fixée à 0 – 2 tonnes afin d’améliorer la précision des mesures. Notons que pour la mesure de la force sur les deux axes deux mesures sont disponibles : une mesure brute et une mesure filtrée. La mesure filtrée correspond à un filtre par une moyenne mobile de 20 points.

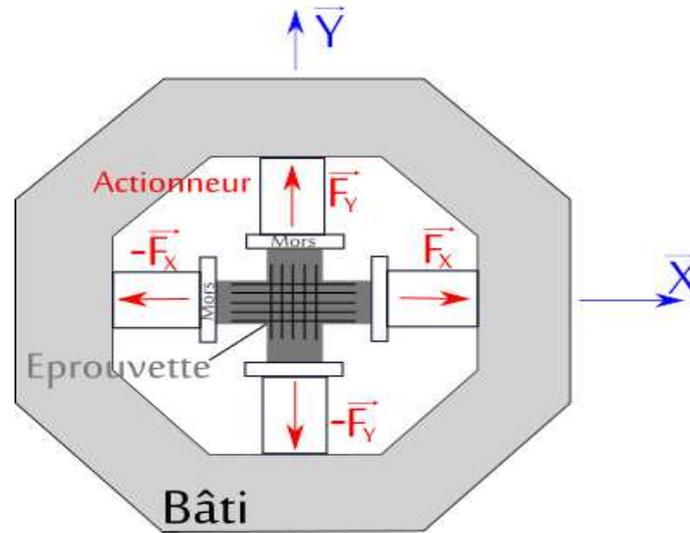


FIGURE 6.1 – Schéma de principe de la machine de traction biaxiale

### 6.2.2 Cinématique de la presse

La Figure 6.2 présente les éléments du banc de test. La presse est équipée de quatre moteurs brushless *Parvex*, soit un par actionneur. Le moteur entraîne une vis sans fin qui transforme le mouvement de rotation en un mouvement de translation du piston cylindrique dans sa chambre, visible sur la coupe d’un actionneur en Figure 6.3. L’arrêt en rotation du piston est garanti par une coquille qui maintient le piston à une glissière. Cette dernière reprend le couple du moteur et sert de guide à la translation. La position du vérin est connue grâce à des capteurs de type canne magnétostrictif de marque *MTS* avec une précision de  $\pm 10\mu m$ . Des capteurs de fin de course physique permettent une coupure de l’alimentation électrique des actionneurs en cas de dépassement et préservent l’intégrité de la machine. Enfin un capteur de force est placé à l’extrémité des pistons de chaque axe et sur lequel sont montés les mors de traction spécialement conçus pour les tissus.

### 6.2.3 Adaptation et modification de la presse

Pour adapter la presse au test des matériaux tissés, il était nécessaire d’améliorer la mécanique existante ainsi que de réaliser et adapter de nouveaux éléments compatibles avec sa nouvelle fonctionnalité de test des matériaux tissés. Voici la liste des modifications apportées à la presse :

- La mise à l’horizontal de la machine initialement verticale et l’adaptation de l’ensemble de moyen à cette configuration avec notamment la conception de pieds pour un maintien horizontal du bâti de la machine (Fig. 6.2).
- La création d’une estrade comme surface de travail adaptée à la configuration horizontale.
- L’amélioration du guidage du piston des actionneurs, grâce au montage de bagues en bronze avec un système de lubrification de la liaison bagues-piston.
- L’amélioration de la liaison mécanique entre le moteur et le piston avec le montage de vis à rouleaux satellites de la marque *Elitec* [19] à la place des vis à billes moins précises, voir

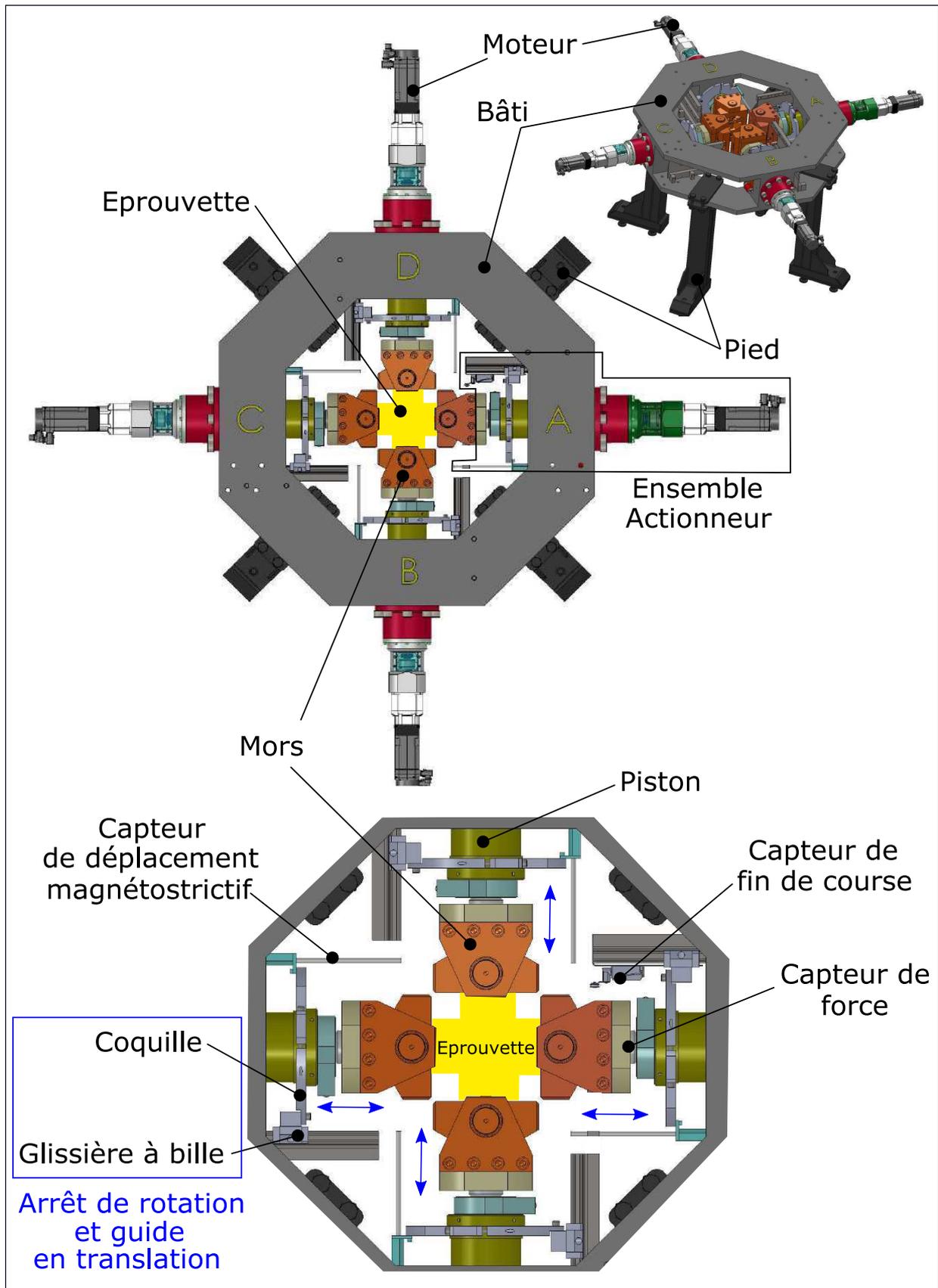


FIGURE 6.2 – Nomenclature des éléments de la presse biaxiale

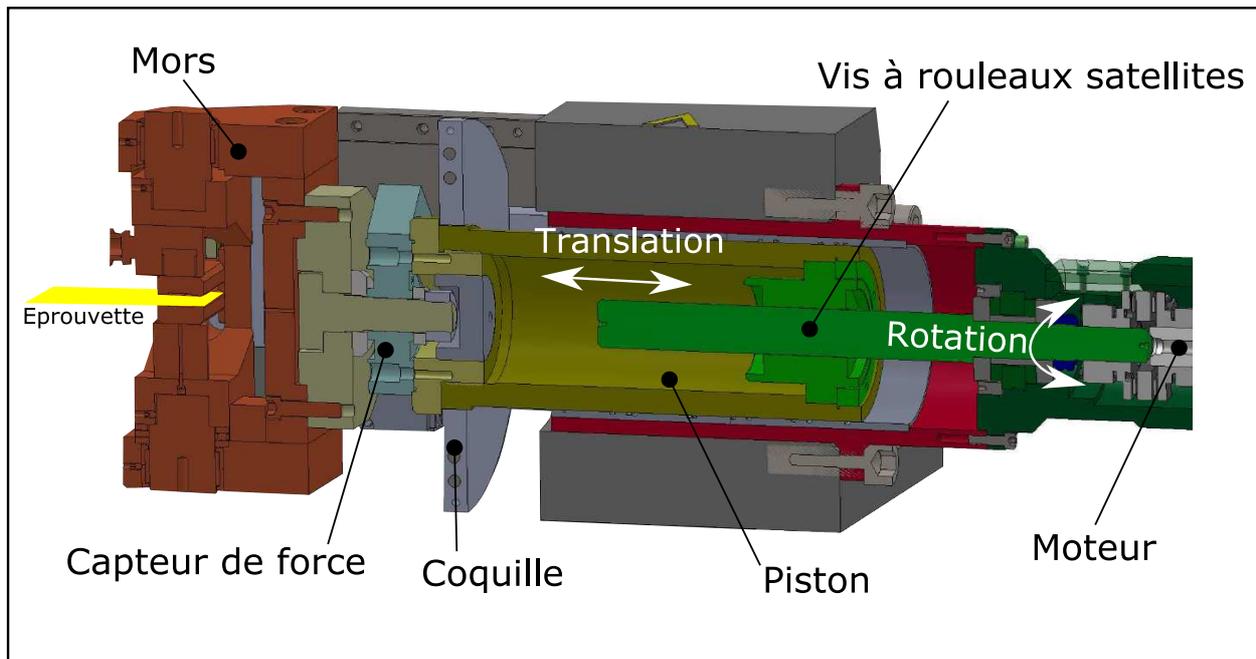


FIGURE 6.3 – Coupe d'un actionneur de la presse biaxiale

Figure 6.4.

- Le réglage et l'étalonnage des capteurs (position, force, capteur de fin de course).
- La mise à jour complète du système de pilotage de la presse pour une configuration adaptée à la réalisation d'essais sur les tissus.
- La conception et la réalisation de mors spécifiques pour les matériaux tissés.
- L'adaptation des systèmes de mesure optique à la presse biaxiale, visible en Figure 6.28.

### 6.2.4 Mors adapté au tissu

Afin de réaliser les essais de traction biaxiale, la presse a dû être équipée de mors capables de tester une éprouvette tissée. Nous avons donc conçu des mors adaptés inspirés du principe des mors de la presse *MTS* uniaxiale, présentés dans le paragraphe 4.3. La capacité des mors de la machine de traction biaxiale a été diminuée par rapport celle des mors uniaxiaux. Ces mors ont été dimensionnés pour être compatibles avec les fixations présentes sur la presse ainsi que l'encombrement et l'espace disponible au centre du bâti de la machine biaxiale. Il s'agit donc de mors par pincement hydraulique articulés. L'éprouvette est pincée entre deux réglés par un vérin hydraulique similaire à ceux utilisés en traction uniaxiale. La conception du système de mors de la presse biaxiale a nécessité une démarche d'optimisation intégrant de nombreuses contraintes. Une force de pincement de  $5t$  est donc disponible. Ces mors ont un débattement potentiel en rotation de  $\pm 30^\circ$  autour de l'axe du mors pour garantir l'auto-alignement de l'éprouvette, voir Figure 6.5 et 6.6.

Fort de la mise en place de ce moyen d'essai, plusieurs questions restent à résoudre : quelle forme adopter pour l'éprouvette de traction biaxiale ? Comment assurer la mise en place de l'éprouvette et son maintien tout au long de l'essai ? Ou encore, comment piloter la presse ? Ces questions seront traitées dans les sections suivantes.

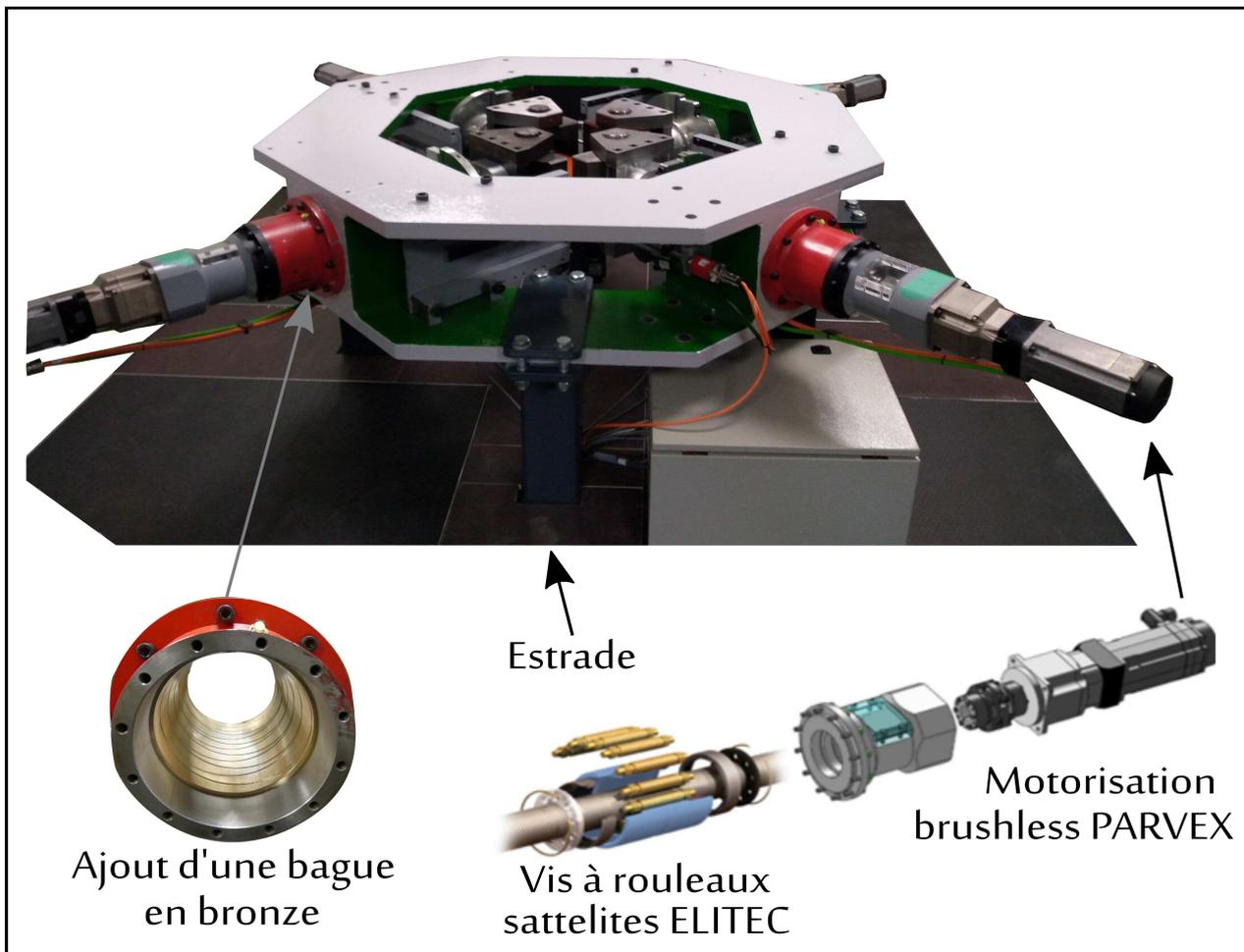


FIGURE 6.4 – Amélioration de la presse biaxiale

## 6.3 Forme de l'éprouvette et essais préliminaires

### 6.3.1 Forme de l'éprouvette

La définition de la forme d'une éprouvette de traction biaxiale n'est pas une opération aisée. En effet, l'éprouvette doit allier plusieurs caractéristiques qui peuvent paraître contradictoires. Pour être montée sur ce banc d'essai, l'éprouvette doit être cruciforme et doit présenter une zone utile au centre de l'éprouvette (fig. 2.10). Les branches, qui ne font pas partie de la zone utile, doivent être le plus rigides possible pour assurer une déformation maximale au centre de l'éprouvette. Cependant, l'éprouvette est sollicitée dans les deux directions et les branches ne doivent pas gêner les déformations dans la direction transverse, tout en assurant leur rôle de transmission des efforts à la zone utile. Finalement, produire avec une bonne répétabilité des ruptures en zone utile nécessite des travaux de mise au point spécifiques à cet essai.

Les éléments bibliographiques au paragraphe 2.2.3 ont permis de guider la conception d'une géométrie d'éprouvette avec les matériaux *Porcher Industries*. La forme générale finale de l'éprouvette est donnée en Figure 6.7 et une photographie d'une éprouvette est donnée en Figure 6.8. Il s'agit d'une éprouvette cruciforme dont les branches sont renforcées, par augmentation de leur épaisseur, avec du patch collant de même constitution que les renforts des éprouvettes de traction dans le biais (tissu 9017 à  $40g/m^2$  encollé avec PU à  $100g/m^2$ ). Les branches renforcées sont ensuite incisées pour former dix bandes de  $10mm$  de large. La zone centrale est un carré de

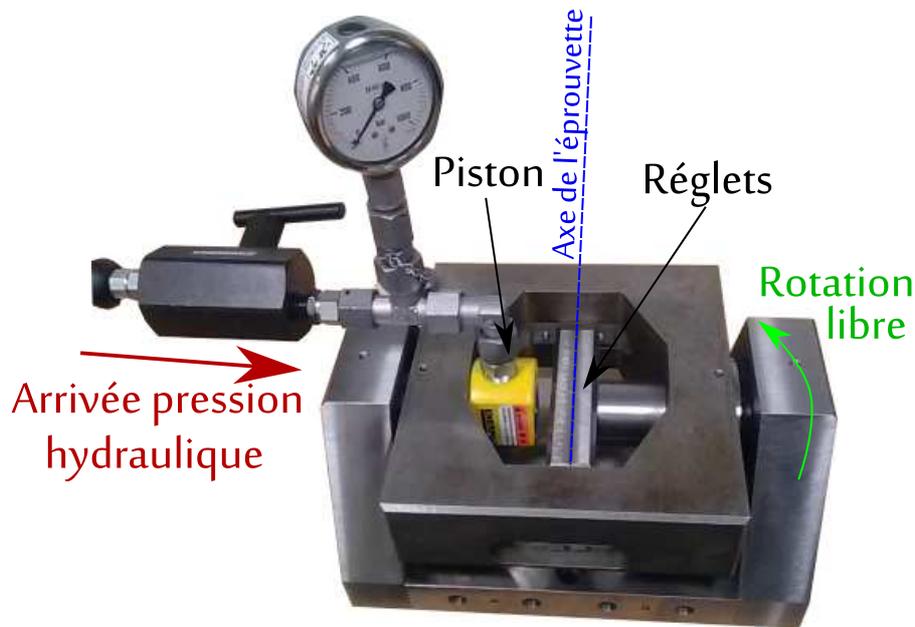


FIGURE 6.5 – Mors de la presse biaxiale

$100 \times 100 \text{ mm}^2$ .

Les composantes  $\Sigma_C$  et  $\Sigma_T$  de la contrainte massique biaxiale, dans les sens chaîne et trame, sont telles que :

$$\Sigma_C = \frac{\lambda_C f_C}{\bar{\rho} L} \quad \text{et} \quad \Sigma_T = \frac{\lambda_T f_T}{\bar{\rho} L} \quad (6.1)$$

Où  $\lambda_C$  et  $\lambda_T$  correspondent aux élongations dans les sens chaîne et trame, respectivement ;  $L = 100 \text{ mm}$  la largeur de la zone centrale de l'éprouvette ;  $f_C$  et  $f_T$  les modules des forces dans les sens chaîne et trame, respectivement ;  $\bar{\rho}$  la masse surfacique initiale (cf. relation 4.2).

### 6.3.2 Montage de l'éprouvette

Pour installer l'éprouvette dans les mors, chaque branche de l'éprouvette est scotchée sur le réglet supérieur (fig.6.9) puis enroulée autour du réglet afin de faire deux tours et demi autour de ce dernier, comme présenté en Figure 6.9. Ensuite, l'éprouvette et les réglets sont mis en position dans les mors. Le réglet supérieur, qui porte l'éprouvette, est alors serré par le vérin hydraulique entre le réglet inférieur et le bâti du mors. Cette technique permet un blocage de l'éprouvette par obstacle (sur le réglet) et par friction (frottement sur elle-même grâce aux enroulements successifs). Cette technique ressemble à des techniques de maintien d'éprouvette par friction autour de rouleaux [55] [60].

L'avantage d'un tel montage est de pouvoir augmenter la force de maintien de l'éprouvette avec une force de pincement limitée à  $5t$  dans notre cas. Le désavantage de ce système est le suivant : la longueur de branche dans l'enroulement va aussi travailler lors de l'essai et la longueur totale de la branche va se déformer. Ainsi les déplacements imposés aux mors n'auront pas de correspondance directe avec les valeurs de déformations subies par la zone utile. Par ailleurs, il est nécessaire d'avoir une course de vérin importante entre les mors pour pallier les allongements des branches. Ce mode de fixation sera à l'origine d'un décalage entre déplacement des mors et déformation de la zone utile. Par ailleurs, il est observé un phénomène de mise en place de l'éprouvette sous contrainte : ce phénomène est induit par le serrage progressif de l'éprouvette

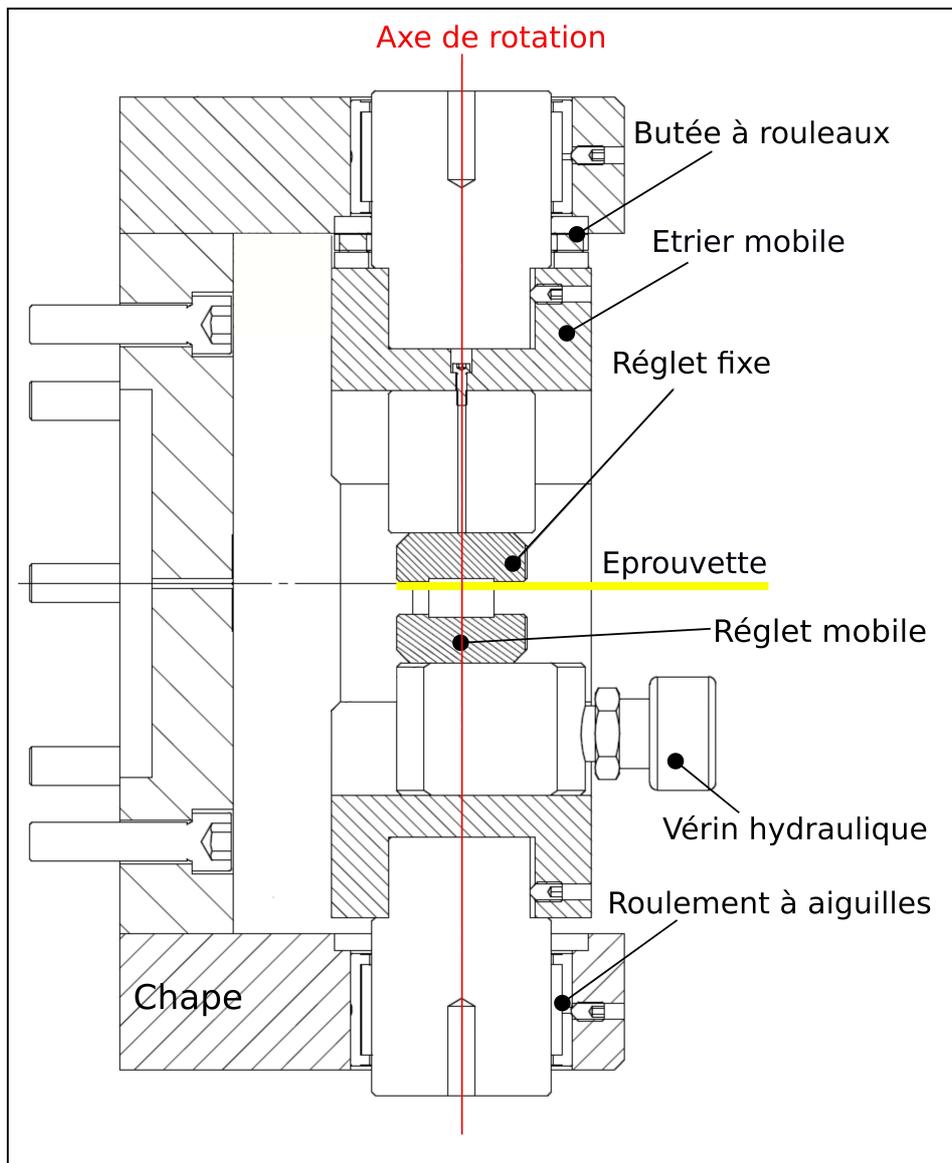


FIGURE 6.6 – Vue en coupe du mors hydraulique articulé de la machine biaxiale

autour du réglet. Ce montage est la solution, que nous avons adoptée pour assurer la transmission des efforts, sans glissement, jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

### 6.3.3 Validation de la géométrie d'éprouvette

Pour tester la validité de la forme de cette éprouvette, une mesure de champs de déformation par stéréo-corrélation d'images (D.I.C. - Système de mesure de *Dantec Dynamics* [18]) est réalisée avec différents modes de pilotage. La mesure de champ de déformation par stéréo-corrélation d'images permet de révéler les éventuelles hétérogénéités de la déformation dans la zone utile de l'éprouvette [22],[31],[47]. Cette technique est notamment utilisée pour la mesure de champ de déformation directement sur les tissus sollicités en traction biaxiale [56] ou lors de cisaillement de matériaux textiles [69].

Nous utilisons ici cette technique de mesure de champs de déformation comme un moyen de validation de la forme de notre éprouvette et son bon comportement sous charge. La stratégie de validation consiste à apprécier l'homogénéité du champ de déformation produit, dans la zone utile de l'éprouvette, pour différents chemins de chargement. Pour réaliser cette validation nous

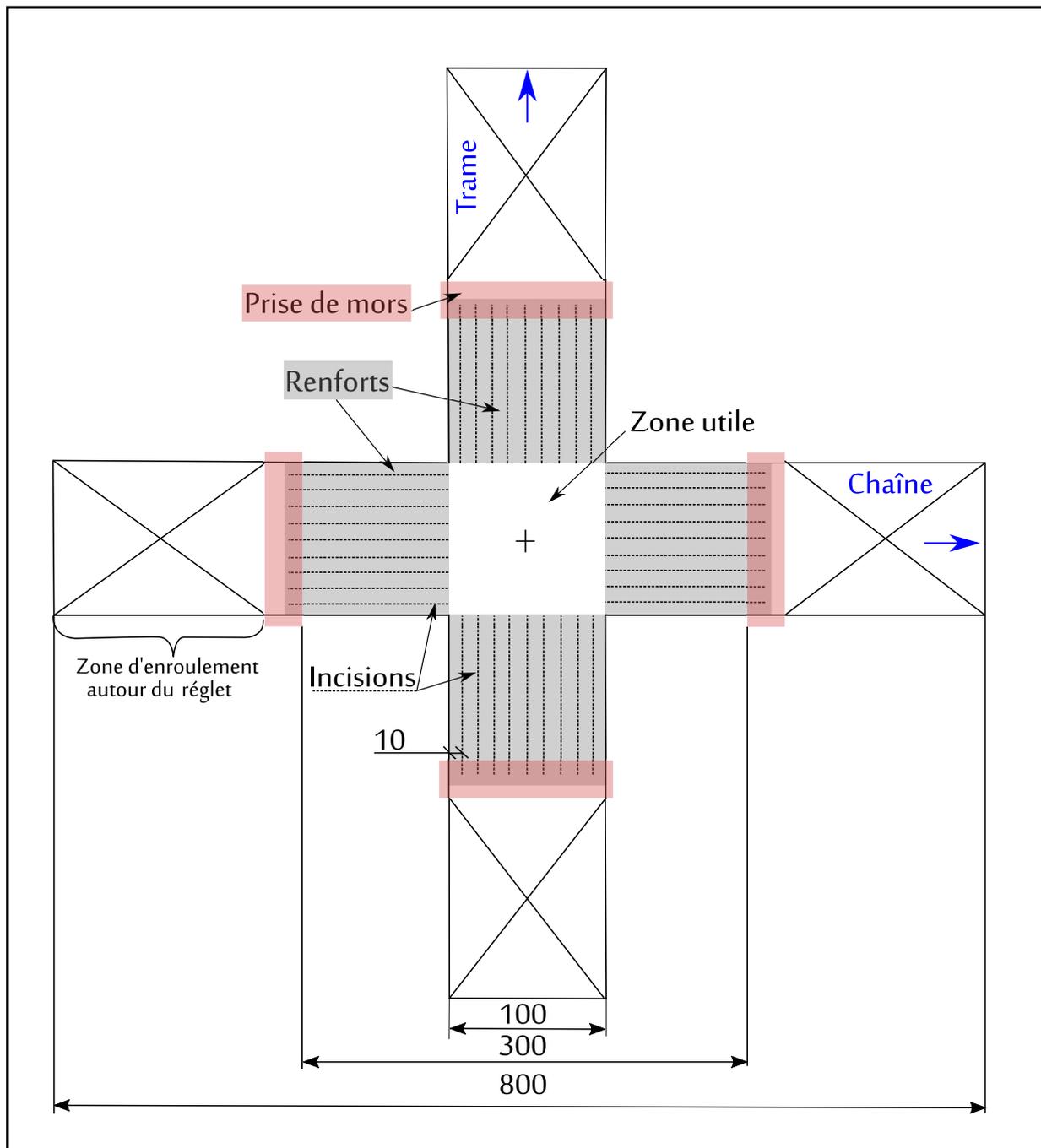


FIGURE 6.7 – Géométrie de l'éprouvette de traction biaxiale adoptée

utilisons le matériau non confidentiel (cf. paragraphe 4.2.1).

Pour analyser le comportement du matériau dans les plans des déplacements, des déformations et des contraintes biaxiales, on introduit les invariants scalaires permettant de prendre en compte les deux composantes de déplacement, de déformation et de contrainte activées dans le tissu :

$$\begin{aligned}
 R_h &= \sqrt{h_x^2 + h_y^2} \\
 R_\varepsilon &= \sqrt{\varepsilon_C^2 + \varepsilon_T^2} \\
 R_\Sigma &= \sqrt{\Sigma_C^2 + \Sigma_T^2}
 \end{aligned}
 \tag{6.2}$$

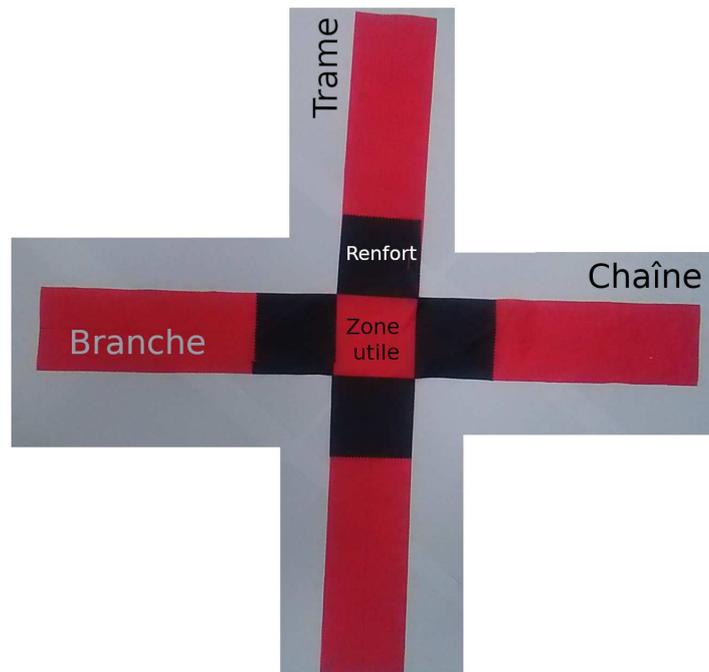


FIGURE 6.8 – Photographie d'une éprouvette réelle de traction biaxiale

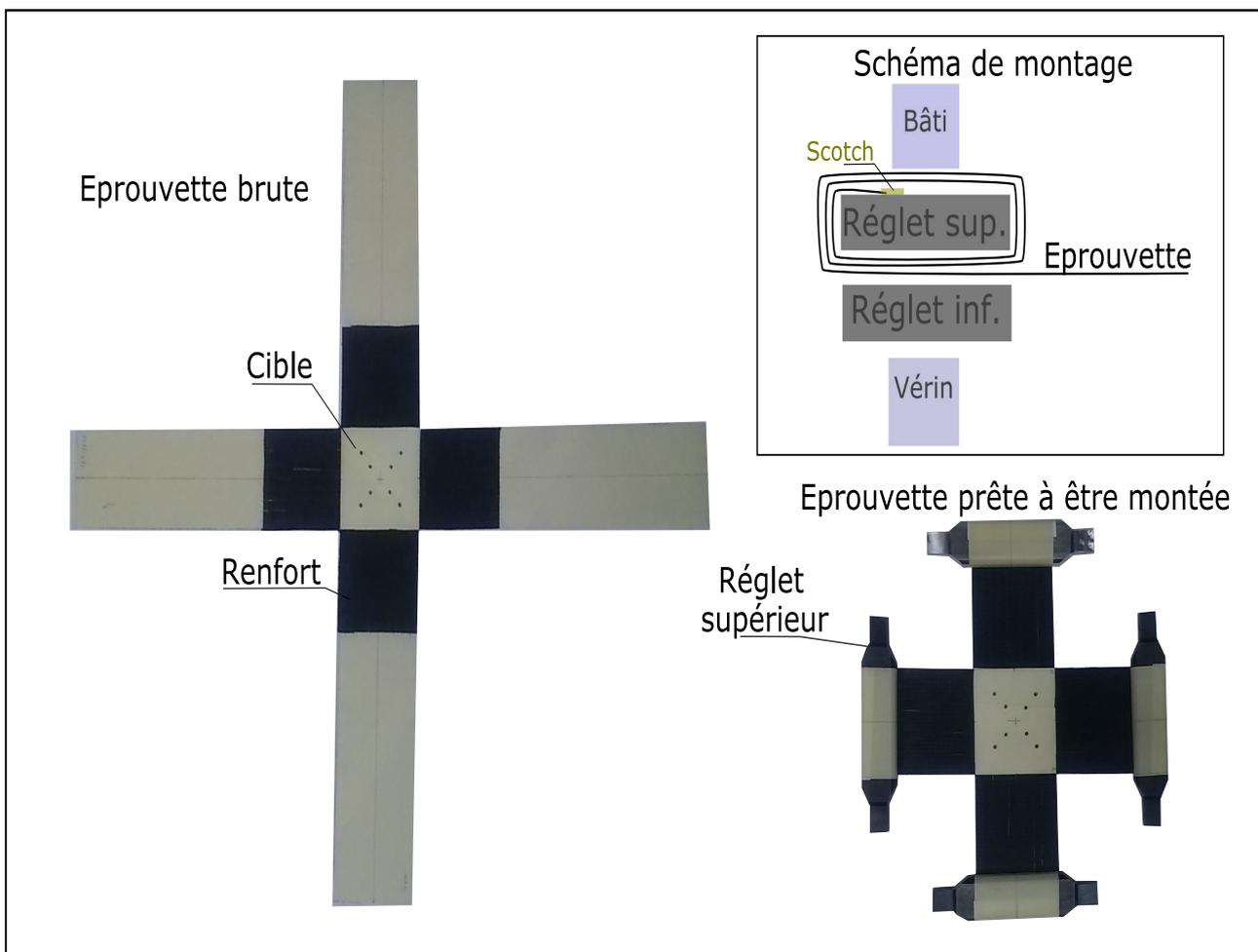


FIGURE 6.9 – Schéma de préparation et de montage de l'éprouvette de traction biaxiale

Où  $R_h$ ,  $R_\varepsilon$  et  $R_\Sigma$  représentent les rayons dans les plans des déplacements  $(h_x, h_y)$ , des déformations  $(\varepsilon_C, \varepsilon_T)$  et des contraintes  $(\Sigma_C, \Sigma_T)$ , respectivement. Pour caractériser le déphasage entre la contrainte et la déformation dans leurs plans respectifs, on définit deux angles, tels que :

$$\theta_\varepsilon = \arctan\left(\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_C}\right) \text{ et } \theta_\Sigma = \arctan\left(\frac{\Sigma_T}{\Sigma_C}\right) \quad (6.3)$$

**Essai découplé** Le chemin de chargement proposé correspond à un pilotage en déplacement à une vitesse de  $0,17\text{mm/s}$ . Une traction suivant la trame ( $Y$ ) est d'abord effectuée. L'éprouvette reste chargée en trame puis un déplacement suivant la chaîne ( $X$ ) est réalisé. Pendant cet essai, un système de stéréo-corrélation d'images filme l'éprouvette et permet d'obtenir les champs de déformation en fonction du temps. Le champ de déformation suivant la direction de la chaîne ( $X$ ), soit  $\varepsilon_C$ , est visible en Figure 6.10 et les champs de déformation correspondant à  $\varepsilon_T$  et  $\varepsilon_{CT}$  sont disponibles en Figure 6.11.

Dans les Figures 6.10 et 6.11, les champs de déformation sont homogènes au centre de l'éprouvette. Les champs en direction de la chaîne et de la trame sont ceux qui montrent les plus fortes valeurs de déformation avec les maxima suivants :  $\varepsilon_C = 14\%$  et  $\varepsilon_T = 6\%$  alors que la valeur maximum du champ de déformation de distorsion n'atteint que  $\varepsilon_{CT} = 2\%$ . Par ailleurs, quel que soit le champ de déformation observé, les valeurs de déformation vues sur les branches sont inférieures aux valeurs au centre de l'éprouvette. Ces observations montrent que la zone utile de l'éprouvette est la zone la plus sollicitée (comparativement aux branches renforcées de patch) et que les déformations sont orientées dans les directions des efforts, c'est-à-dire dans les axes de machine et dans les directions Chaîne et Trame sans cisaillement. Enfin, l'évolution des champs de déformation mesurés est en accord avec la consigne de déplacement : en sens Chaîne, elle montre peu d'évolution entre l'instant A et B mais une forte augmentation des valeurs entre B et C. En sens Trame, il y a une modification du champ de déformation entre A et B mais peu d'évolution entre B et C. Notons qu'il existe des variations de champ même lorsque la direction mesurée n'est pas sollicitée, cette action est due à un phénomène de réseau et à l'enchevêtrement des fils de chaîne et de trame, comme pour l'effet Poisson. Ces premières mesures constituent des éléments de validation du protocole proposé.

Le déplacement imposé à l'éprouvette, défini par la Figure 6.10-(a), conduit à un chargement biaxial en déformation dans la zone utile de l'éprouvette caractérisé par la Figure 6.12-(a). La vitesse de déformation imposée au cours du trajet  $AB$  est de  $9.10^{-4}\text{s}^{-1}$  et au cours du trajet  $BC$  de  $6.10^{-4}\text{s}^{-1}$ . La réponse correspondante dans un diagramme  $R_\Sigma$  en fonction du temps est donnée par la Figure 6.12-(b).

La réponse du matériau dans le diagramme rhéologique  $(R_\Sigma, R_\varepsilon)$  est donnée par la Figure 6.13.

Le chargement biaxial correspondant au trajet découplé de la Figure 6.10-(a), dans l'espace des déformations est donné par la Figure 6.14-(a) et la réponse correspondante dans l'espace des contraintes est donnée par la Figure 6.14-(b).

Au cours du trajet  $AB$  dans le sens trame ( $Y$ ), le déplacement imposé dans le sens chaîne ( $X$ ) est nul ; compte tenu de l'effet de contraction de Poisson, ce chargement induit un comportement combiné dans la zone utile de l'éprouvette, qui se manifeste par un effet de contraction dans l'espace des déformations (Trajet  $AB$  fig. 6.14-(a)) et par une contrainte  $\Sigma_X$  de traction (Trajet  $AB$  fig. 6.14-(b)).

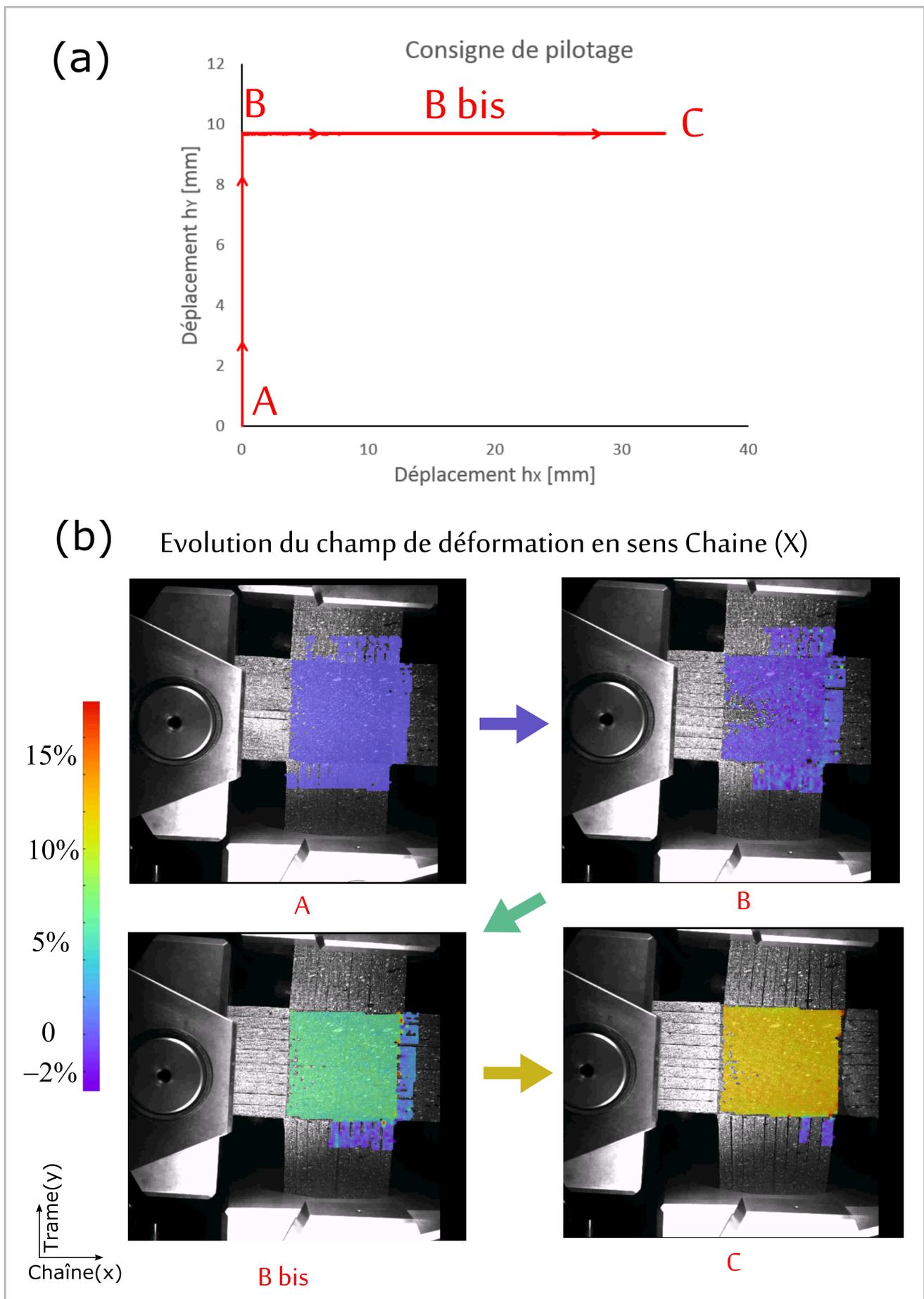


FIGURE 6.10 – (a) Consigne de pilotage en déplacement pour le trajet découplé ; (b) Résultat de la stéréo-corrélation d'images avec affichage du champ de déformation suivant la Chaîne (suivant X ou  $\varepsilon_C$ )

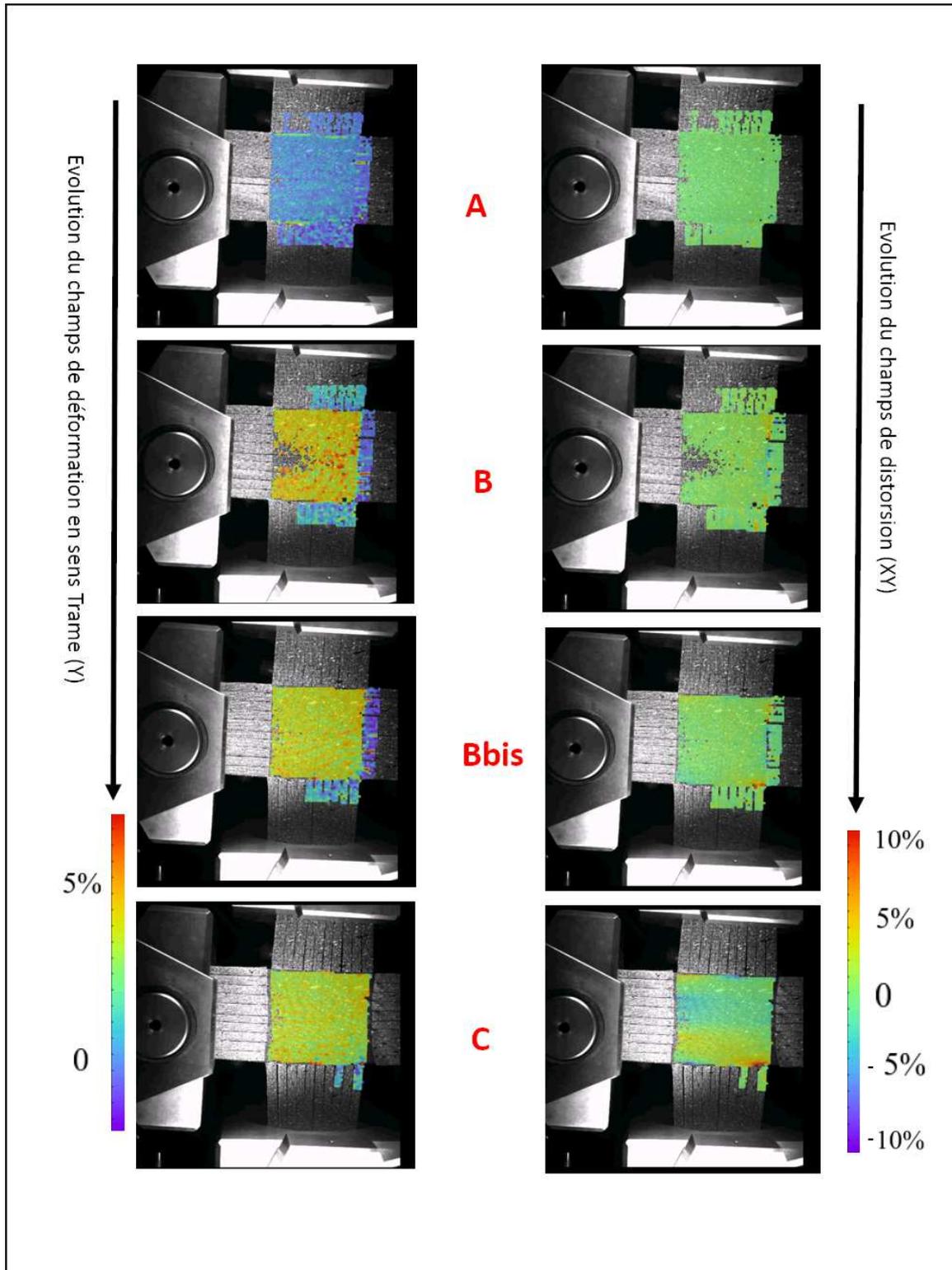


FIGURE 6.11 – Résultats de la stéréo-corrélation d'images avec affichage du champ de déformation suivant la trame (suivant Y ou  $\varepsilon_T$ ) et en distorsion (XY ou  $\varepsilon_{CT}$ ) pour le trajet découpé de la figure 6.10

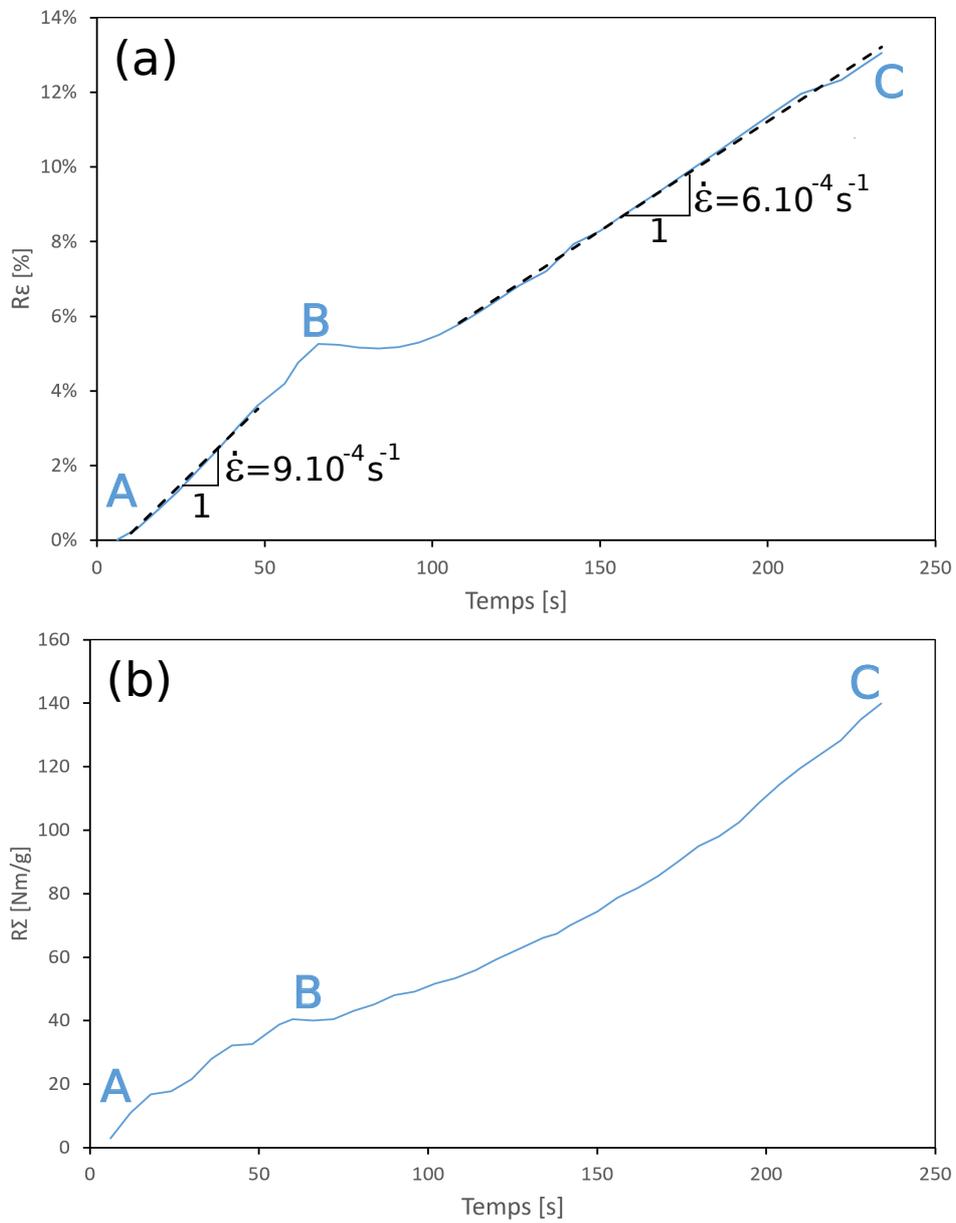


FIGURE 6.12 – (a) Chargement dans un diagramme  $R_\epsilon$  en fonction du temps, (b) réponse dans un diagramme  $R_\Sigma$  en fonction du temps

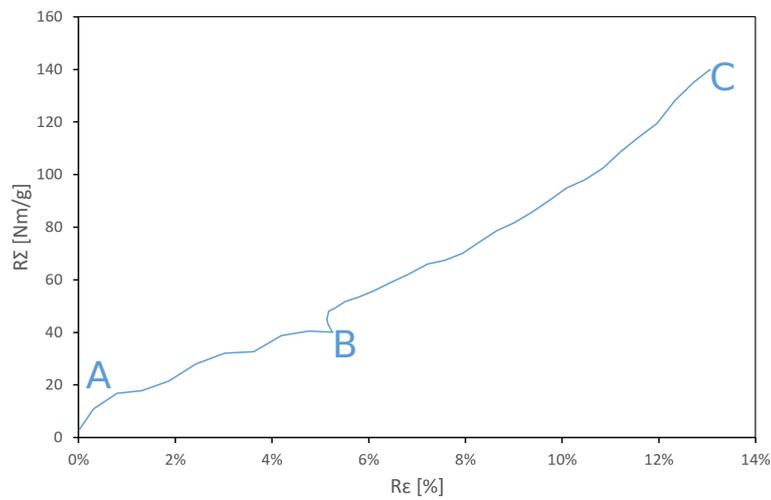


FIGURE 6.13 – Réponse du matériau au trajet découpé de la Figure 6.10-(a), dans le diagramme rhéologique ( $R_\Sigma$ ,  $R_\epsilon$ )

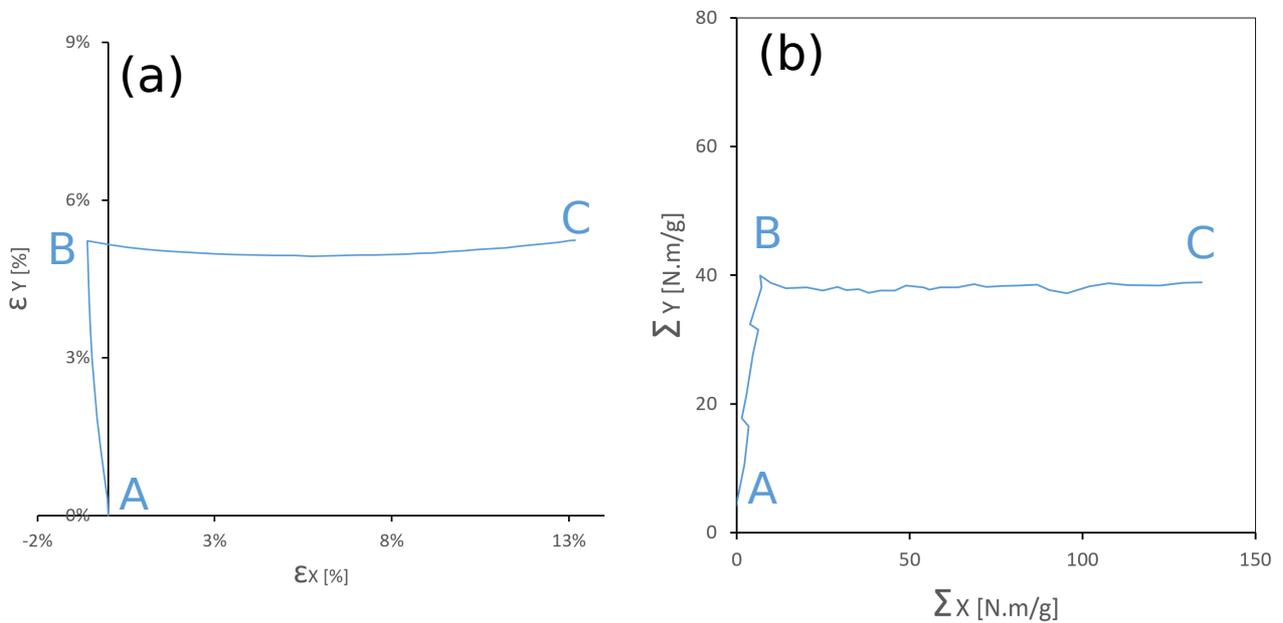


FIGURE 6.14 – Comportement mécanique du tissu pour l'essai de traction biaxiale correspondant au chargement de la Figure 6.10-(a) : (a) chargement dans le plan des déformations, (b) réponse dans le plan des contraintes

**Essai couplé radial puis circulaire** Ce chemin de chargement active à la fois les directions Chaîne et Trame de manière proportionnelle. Puis le pilotage activera simultanément des sollicitations dans le sens Trame et dans le sens Chaîne de manière à tracer un cercle dans le plan des déplacements (Figure 6.15-(a)). Les résultats des champs de déformation sont donnés par la Figure 6.15-(b) pour les valeurs de  $\varepsilon_C$  et par la Figure 6.16 pour les valeurs de  $\varepsilon_T$  et  $\varepsilon_{CT}$ . Les mêmes remarques, que pour l'essai découplé peuvent être soulignées : la zone centrale est la plus sollicitée et les champs de déformation mesurés sont homogènes. De plus, le niveau de distorsion est très faible par rapport à celui de la déformation dans le sens chaîne et trame : des maxima à environ 1% pour  $\varepsilon_{CT}$  par rapport à 8% et 5% respectivement pour  $\varepsilon_C$  et  $\varepsilon_T$ .

Le déplacement imposé à l'éprouvette en fonction du temps et le chargement correspondant en déformation en fonction du temps sont donnés sur la Figure 6.17. La vitesse de déformation imposée au cours de l'essai est de l'ordre de  $9.10^{-4}s^{-1}$ .

La réponse du matériau dans le diagramme rhéologique  $(R_\Sigma, R_\varepsilon)$  est donnée par la figure 6.18.

La Figure 6.19-(a) donne le chargement de l'éprouvette dans le plan des déformations et la Figure 6.19-(b) présente la réponse correspondante du matériau dans le plan des contraintes. Les Figures 6.19-(c) et 6.19-(d) montrent les diagrammes rhéologiques contrainte-déformation dans la direction  $X$  et  $Y$ , respectivement. Le comportement biaxial du matériau est relativement complexe. Au cours du chargement et à un instant donné, un point représentatif de l'état de déformation dans le plan  $(\varepsilon_X, \varepsilon_Y)$  n'a pas obligatoirement la même orientation  $\theta_\varepsilon$  que celle  $\theta_\Sigma$  du point représentatif correspondant, de l'état de contrainte dans le plan  $(\Sigma_x, \Sigma_y)$ . Cet aspect est illustré par la Figure 6.20, qui donne l'évolution de  $\theta_\Sigma$  en fonction de  $\theta_\varepsilon$ , au cours du trajet radial puis circulaire envisagé. Ce résultat révèle un déphasage entre la contrainte et la déformation. Ce déphasage est caractérisé en fonction de  $R_\varepsilon$  et en fonction du temps, par la figure 6.21.

La Figure 6.21 montre que la valeur du déphasage est négligeable au cours du trajet radial  $AB$  et sa valeur se situe entre  $\pm 20^\circ$  au cours du trajet circulaire. Au cours du tronçon  $CDE$  du trajet circulaire la contrainte est en avance de phase par rapport à la déformation et au cours du tronçon  $EBC$  du trajet circulaire la contrainte est en retard de phase par rapport à la déformation.

**Bilan sur la géométrie de l'éprouvette** Les essais précédents nous permettent d'affirmer que la géométrie choisie est efficace, car les déformations maximales sont enregistrées au centre de l'éprouvette, en zone utile, et que les champs de déformation sont suffisamment homogènes. Il convient également de souligner que des éléments du protocole incluant découpe, positionnement et maintien de l'éprouvette sont validés pour le cas où les directions de traction biaxiale sont parallèles aux sens chaîne et trame.

**Résultats d'un essai biaxial avec un chargement complexe** La Figure 6.22-(a) définit le chargement complexe adopté. C'est un trajet en déplacement imposé à une vitesse de  $\dot{R}_h = 0.07mm/s$ . Dans le plan des déplacements ce chargement est composé de plusieurs tronçons en ligne droite ( $0A, AB, BC, CD$  et  $DE$ ) et se termine par trois cycles identiques  $EFE$  en arc de cercle.

Le chargement de l'éprouvette dans le plan des déformations est donné sur la Figure 6.22-(b) et la réponse correspondante du matériau est donnée dans le plan des contraintes sur la Figure 6.22-(c). Les Figures 6.22-(d) et 6.22-(e) donnent les diagrammes rhéologiques contrainte-déformation dans les directions Chaîne et Trame, respectivement.

Le déplacement imposé à l'éprouvette en fonction du temps et le chargement correspondant en déformation en fonction du temps sont donnés sur la Figure 6.23. La vitesse de déformation

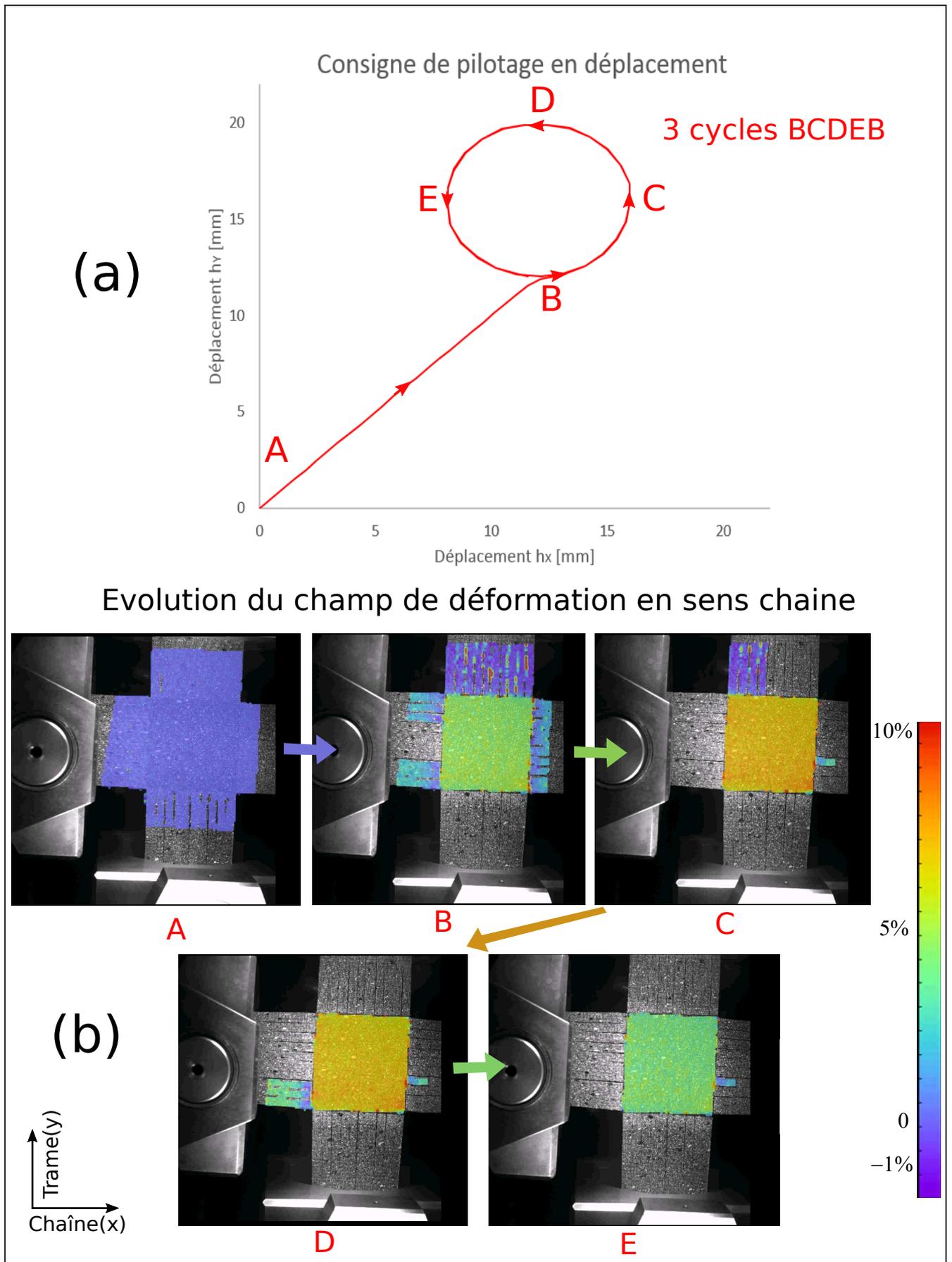


FIGURE 6.15 – (a) Consigne de pilotage en déplacement pour le trajet radial puis circulaire à une vitesse de chargement  $\dot{R}_h = 0,17\text{mm/s}$ ; (b) Résultats de la stéréo-corrélation d'images avec affichage du champ de déformation suivant la Chaîne (suivant X ou  $\varepsilon_C$ )

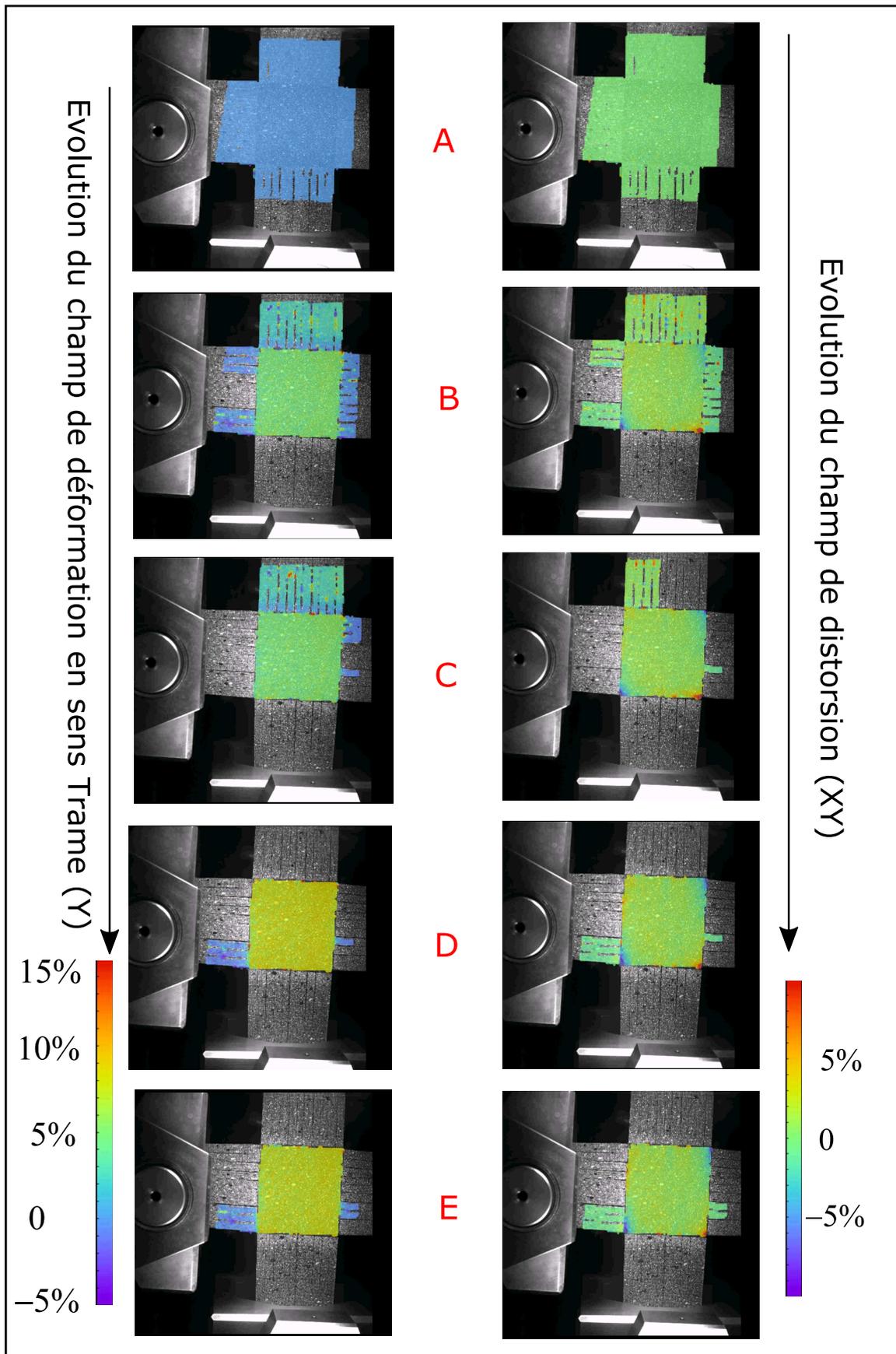


FIGURE 6.16 – Résultats de la stéréo-corrélation d'images avec affichage des champs de déformation suivant la trame (suivant Y ou  $\varepsilon_T$ ) et en distorsion (XY ou  $\varepsilon_{CT}$ ) pour le trajet radial puis circulaire de la figure 6.15

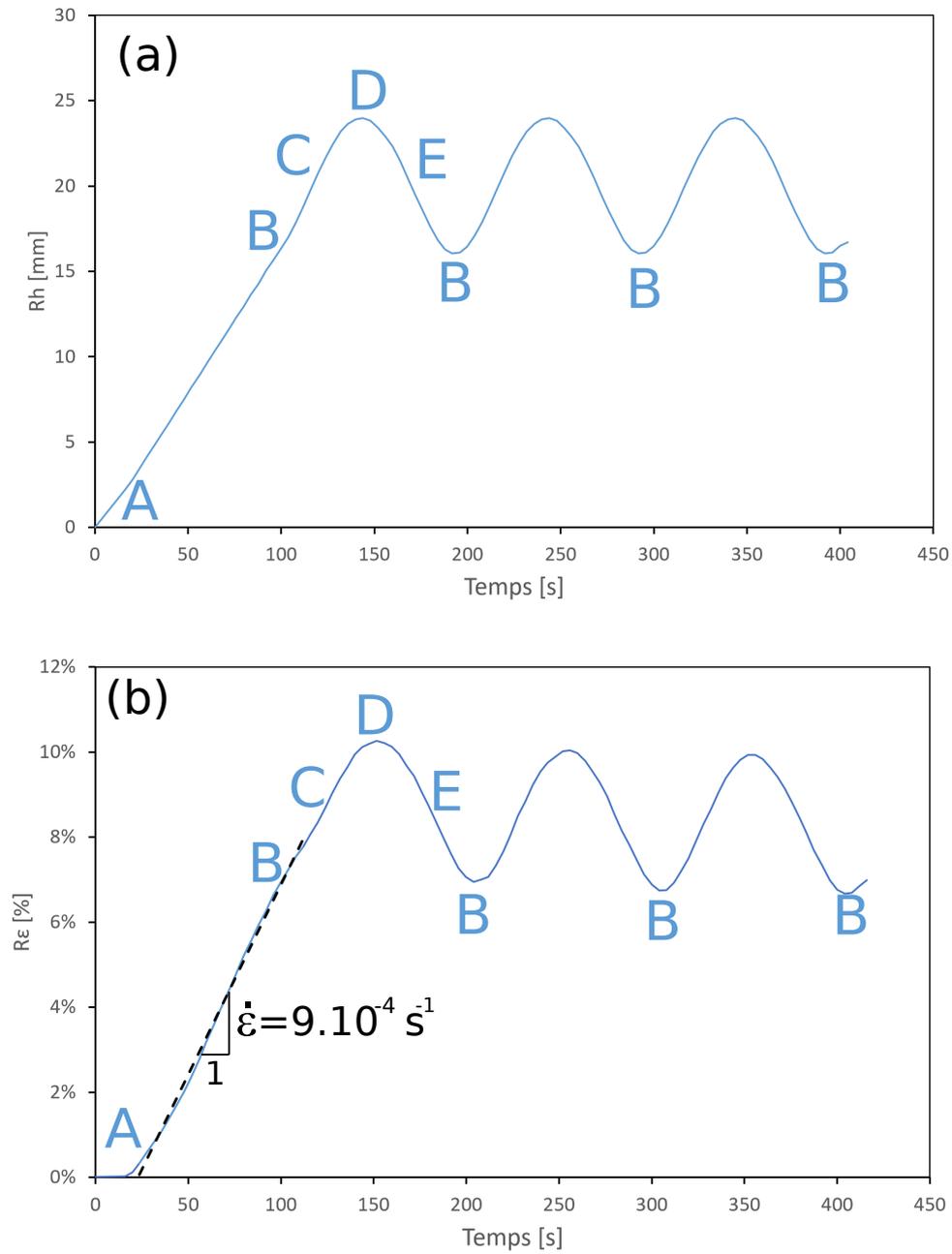


FIGURE 6.17 – Chargement imposé pour le trajet radial puis circulaire : (a) déplacement imposé en fonction du temps, (b) déformation imposée en fonction du temps

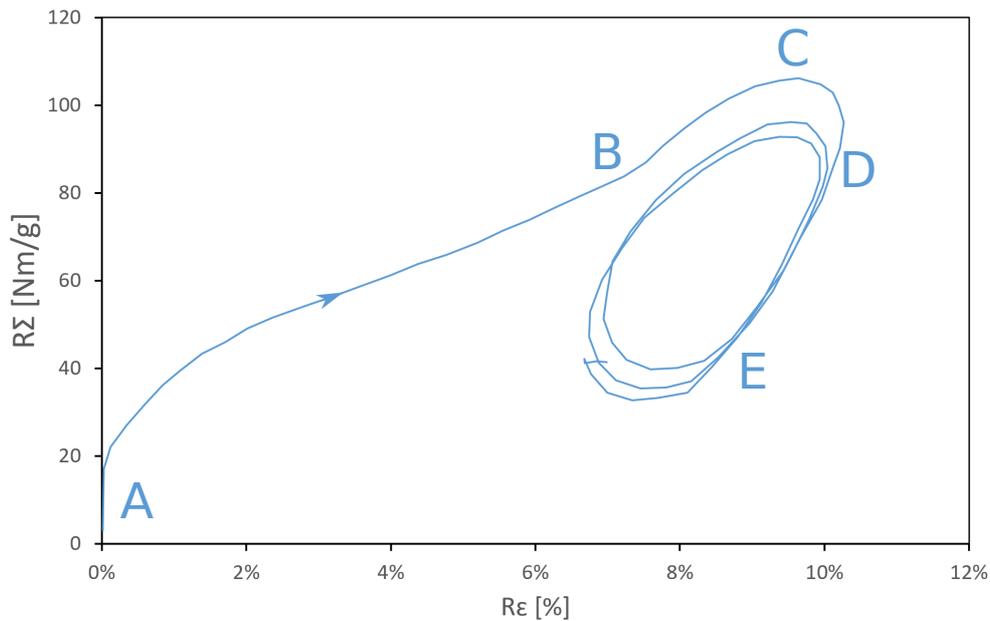


FIGURE 6.18 – Réponse du matériau à un trajet radial puis circulaire dans le diagramme rhéologique ( $R_\Sigma, R_\epsilon$ )

imposée au cours de l'essai est de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-4} s^{-1}$ .

La réponse du matériau dans le diagramme rhéologique ( $R_\Sigma, R_\epsilon$ ) est donnée par la Figure 6.24.

La Figure 6.25, donne l'évolution de  $\theta_\Sigma$  en fonction de  $\theta_\epsilon$ , au cours du trajet complexe. Ce résultat révèle un déphasage entre la contrainte et la déformation. Ce déphasage est caractérisé en fonction de  $R_\epsilon$  et en fonction du temps, par la Figure 6.26.

La Figure 6.26 caractérise le déphasage au cours du trajet complexe. Au cours du chargement en arc de cercle la contrainte est en avance de phase par rapport à la déformation sur le tronçon  $EF$  et sur une partie du trajet retour  $FE$  la contrainte se place en retard de phase par rapport à la déformation.

## 6.4 Protocole expérimental

### 6.4.1 Mesure des déformations

Pour les essais uniaxiaux, un extensomètre optique doublé d'un système de suivi de cibles a été mis en place. L'extensomètre optique étant développé avec MTS, il n'est pas directement compatible avec le système de pilotage du banc de test biaxial. Le suivi d'un champ complet de mesure par stéréo-corrélation d'images est lourd à post-traiter et ne présente pas un intérêt majeur pour ces tests. La technique retenue pour la mesure de déformation au cours de l'essai a consisté en un suivi de cibles par une caméra placée au dessus de l'éprouvette, voir Figure 6.28. Cette technique reprend les principes déjà présentés pour le cas de la traction uniaxiale, elle permet d'apprécier les ratios de déformation dans la zone utile de l'éprouvette. Des marques sont placées sur l'éprouvette comme présenté en Figure 6.27 et la position de chacune d'elles est enregistrée au cours du temps. Il est ainsi possible de calculer les déformations par mesure de la distance entre les marques : ce sont des jauges virtuelles. Cette mesure permet le calcul des déformations dans les directions de la chaîne et de la trame.

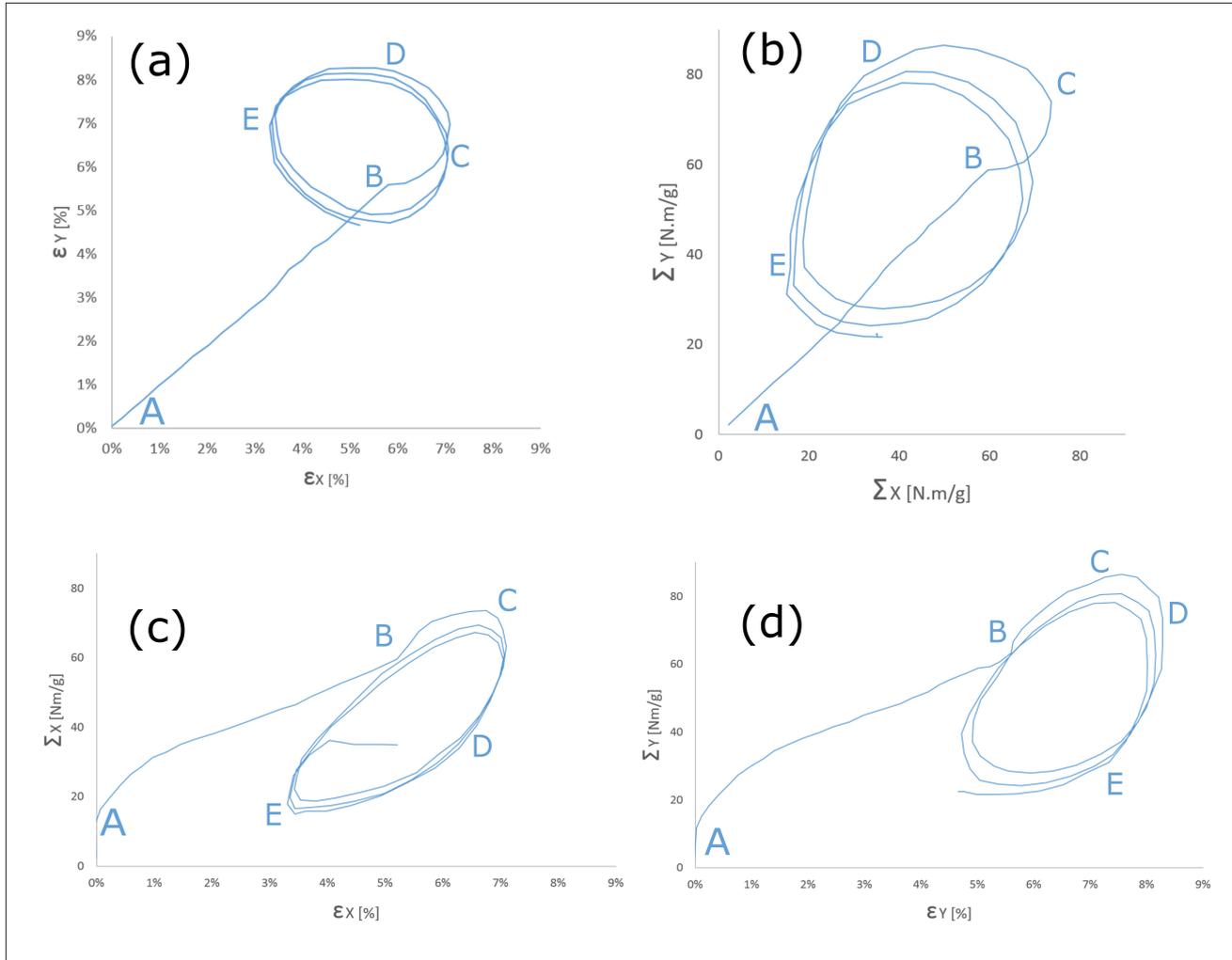


FIGURE 6.19 – Comportement mécanique du tissu pour l’essai de traction biaxiale correspondant au chargement de la Figure 6.15-(a) : (a) chargement dans le plan des déformations, (b) réponse dans le plan des contraintes, (c) comportement mécanique dans la direction  $X$ , (d) comportement mécanique dans la direction  $Y$

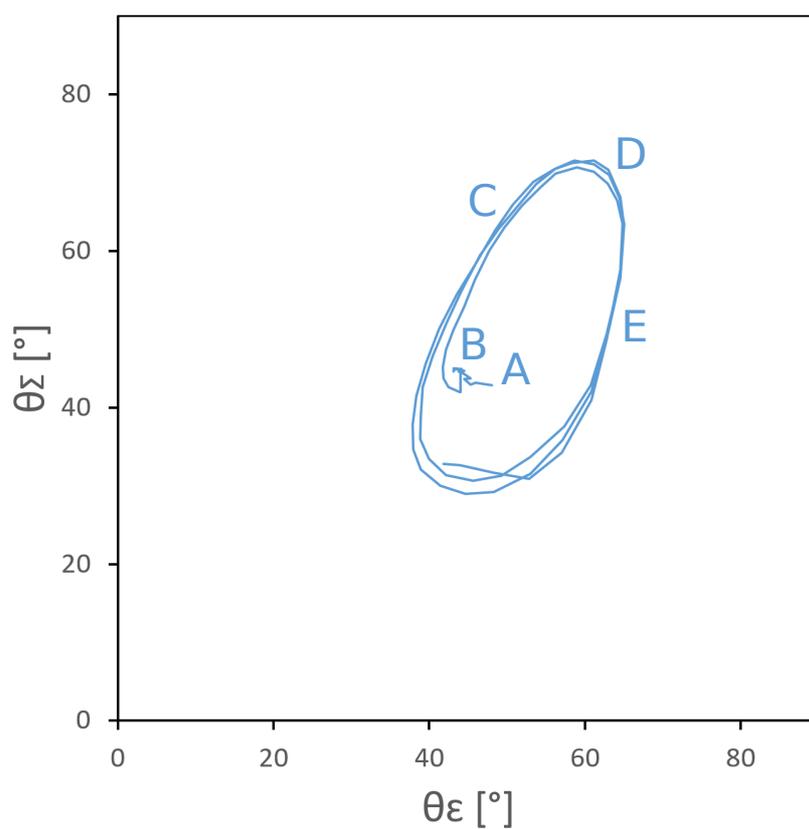


FIGURE 6.20 – Evolution de  $\theta_\Sigma$  en fonction de  $\theta_\epsilon$ , correspondant au chargement de la Figure 6.15-(a)

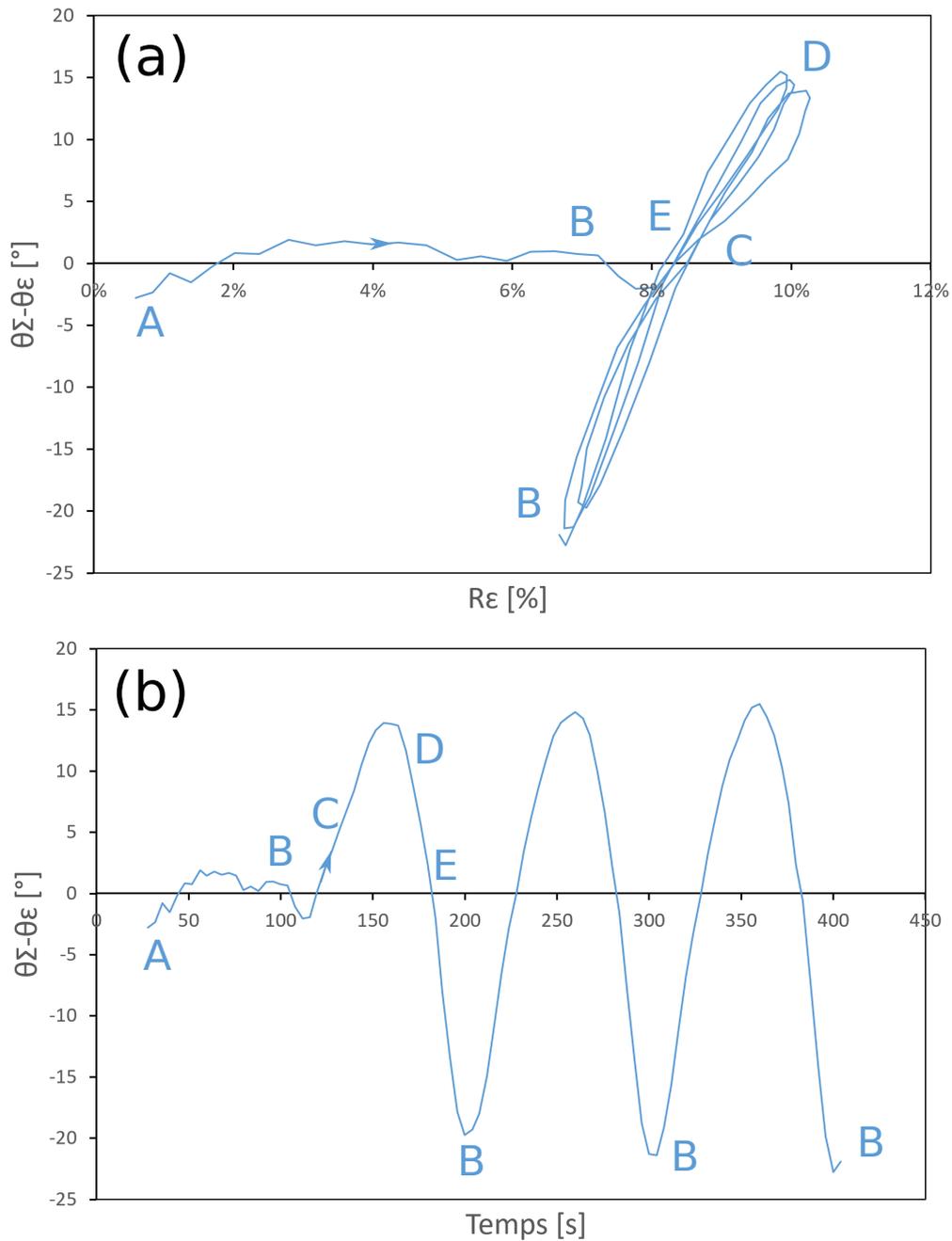


FIGURE 6.21 – Caractérisation du déphasage entre la contrainte et la déformation au cours du trajet radial puis circulaire : (a) en fonction de  $R\epsilon$ , (b) en fonction du temps

Avant d'adopter la technique de suivi de cibles pour la campagne expérimentale, il convient de s'assurer de la pertinence et de la précision des mesures. Des jauges virtuelles correspondant aux cibles de la Figure 6.27 sont placées sur les résultats de D.I.C. La mesure de chacune des huit jauges est tracée en fonction du temps dans la Figure 6.29. L'essai pris en exemple est l'essai biaxial avec un chargement proportionnel dans le plan de déplacement  $(h_x; h_y)$  puis trois cercles dans ce plan; voir Figure 6.29. Pour les deux directions, les valeurs des quatre jauges virtuelles  $(X_1, X_2, X_3, X_4)$  et  $(Y_1, Y_2, Y_3, Y_4)$  sont représentées et forment un faisceau de courbes avec un écart-type acceptable de  $\pm 10^{-3}$  en déformation, dans les deux directions. La mesure de déformation par suivi de cibles est donc validée pour les essais biaxiaux. Les déformations seront

définies par la moyenne des jauges  $X$  pour  $\varepsilon_X = \varepsilon_C$  et la moyenne des jauges  $Y$  pour  $\varepsilon_Y = \varepsilon_T$ . Le suivi de cibles permet aussi d'obtenir une mesure de la distorsion selon la méthode présentée dans la section 4.4.3. La moyenne des distorsions entre les jauges  $(X_1, Y_4)$ ,  $(X_2, Y_3)$ ,  $(X_4, Y_1)$  et  $(X_3, Y_2)$  donnera la mesure de distorsion.

### 6.4.2 Pilotage de l'essai

De manière similaire à ce qui a été mené pour la cas de la traction uniaxiale, l'objectif des essais biaxiaux consistera en l'analyse des comportements pour un chemin de charge-décharge. Il s'agit en effet de disposer d'une base de donnée expérimentale pour déterminer les paramètres nécessaires à la recherche des limites d'utilisation dans le cas de la sollicitation biaxiale.

L'analyse du comportement biaxial peut être menée, dans un premier temps, dans un espace à deux dimensions exprimé en contrainte. Par ailleurs cette analyse est, ici, restreinte au cas où la chaîne et la trame sont parallèles respectivement à chaque direction de traction. Si des données en traction uniaxiale sont disponibles, il est possible de placer un point sur l'axe des abscisses et un point sur l'axe des ordonnées correspondant respectivement à la contrainte limite en traction uniaxiale dans les sens Chaîne et Trame. Pour les chargements en traction biaxiale, il est choisi d'étudier trois directions supplémentaires dans cet espace selon les rapports de contrainte suivants :

$$\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T} = \frac{2}{1} = 2 \quad , \quad \frac{\Sigma_C}{\Sigma_T} = \frac{1}{1} = 1 \quad \text{et} \quad \frac{\Sigma_C}{\Sigma_T} = \frac{1}{2}$$

Le rapport  $\frac{1}{1}$  correspond à un essai où les contraintes dans le sens Chaîne et Trame sont appliquées dans les mêmes proportions, autrement dit, un essai de traction équilibrée, comme présenté dans la Figure 6.30.

Afin de mener à bien cet objectif, nous prendrons la définition du protocole de recherche d'une limite d'élasticité présentée en Chapitre 8. Cependant, la contrainte n'est plus uniaxiale mais biaxiale, d'où l'utilisation du rayon de contrainte  $R_\Sigma$  et du rayon de déformation  $R_\varepsilon$ . Ces invariants scalaires permettent de prendre en compte les deux composantes de contrainte et de déformation activées dans le tissu. Les formules de  $R_\Sigma$  et  $R_\varepsilon$  sont définies par la relation 6.2.

Le rapport  $\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T}$  représente, quant à lui, la cotangente de l'angle  $\theta_\Sigma$  entre l'axe des abscisses (la chaîne) et la direction du point de sollicitation. Pour obtenir des limites d'élasticité pour différents rapports de contraintes  $\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T}$ , il faut imposer un trajet radial dans le plan  $(\Sigma_C - \Sigma_T)$ . Autrement dit, l'utilisateur doit imposer des niveaux de contraintes  $\Sigma_C$  et  $\Sigma_T$  à l'échantillon qui permettent de rester sur les droites en pointillées de la Figure 6.30 et effectuer des cycles entre l'origine et un niveau de contrainte de plus en plus grand. Pour faire ces essais radiaux de charge/décharge, la consigne de pilotage est donnée en déplacement. Plusieurs hypothèses sont nécessaires pour passer du niveau de contrainte souhaité aux déplacements à imposer :

1. un trajet radial dans l'espace des déplacements  $(h_C - h_T)$  produit un trajet radial dans l'espace des déformations  $(\varepsilon_C - \varepsilon_T)$ ,
2. cette précédente correspondance se fait à phases identiques dans le plan de déplacement et de déformation,
3. un trajet radial dans l'espace des déformations  $(\varepsilon_C - \varepsilon_T)$  produit un trajet radial dans l'espace des contraintes  $(\Sigma_C - \Sigma_T)$ ,
4. cette précédente correspondance se fait à phases identiques dans le plan de déformation et de contrainte.

Un moyen pour éviter le recours aux première et seconde hypothèses et pour améliorer la maîtrise du rapport  $\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T}$  serait de piloter en déformation, avec un extensomètre connecté au système de pilotage. Cette solution nécessite encore la troisième et quatrième hypothèse sur le comportement du tissu. Une autre solution serait de piloter l'essai en force biaxiale, ainsi les hypothèses ne seraient plus requises et le rapport  $\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T}$  garanti. Cependant aucun extensomètre n'est actuellement connecté au système de pilotage de la machine biaxiale et le pilotage en force requiert une grande précision dans le choix des paramètres de la boucle d'asservissement de la machine ; cette solution a été tentée mais elle a donné des courbes chahutées, fortement bruitées, en raison d'instabilités dans le pilotage de la machine en force.

Ainsi, pour un essai équi-biaxial par exemple, le trajet de pilotage sera réalisé par un même niveau de déplacement sur les deux axes, comme explicité en Figure 6.31. Ces hypothèses intègrent les spécificités de nos éprouvettes que ce soit en termes de géométrie ou en termes de matériau constitutif. Elles permettent d'établir les protocoles de pilotage, cependant, une vérification du rapport  $\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T}$  entre valeur cible et comportement réel est indispensable lors du post-traitement des données.

## 6.5 Conclusion

Dans le cadre de cette thèse, dédiée au comportement mécanique des matériaux tissés, la disponibilité d'un dispositif de traction biaxiale des matériaux tissés était un des objectifs majeurs. Suite à une adaptation de la presse, les nombreuses modifications apportées ont permis, dans le temps imparti, de développer un système de mors adapté aux matériaux tissés et à un mode de pilotage en déplacement. La définition d'une géométrie d'éprouvette, qui permet de garantir des champs homogènes dans la zone utile, était un aspect crucial à l'intérêt du dispositif. Après de multiples essais préliminaires, incluant des échecs, la fabrication et l'ergonomie de mise en place des éprouvettes cruciformes a abouti à une solution. Des résultats génériques originaux en traction biaxiale ont ainsi été obtenus.

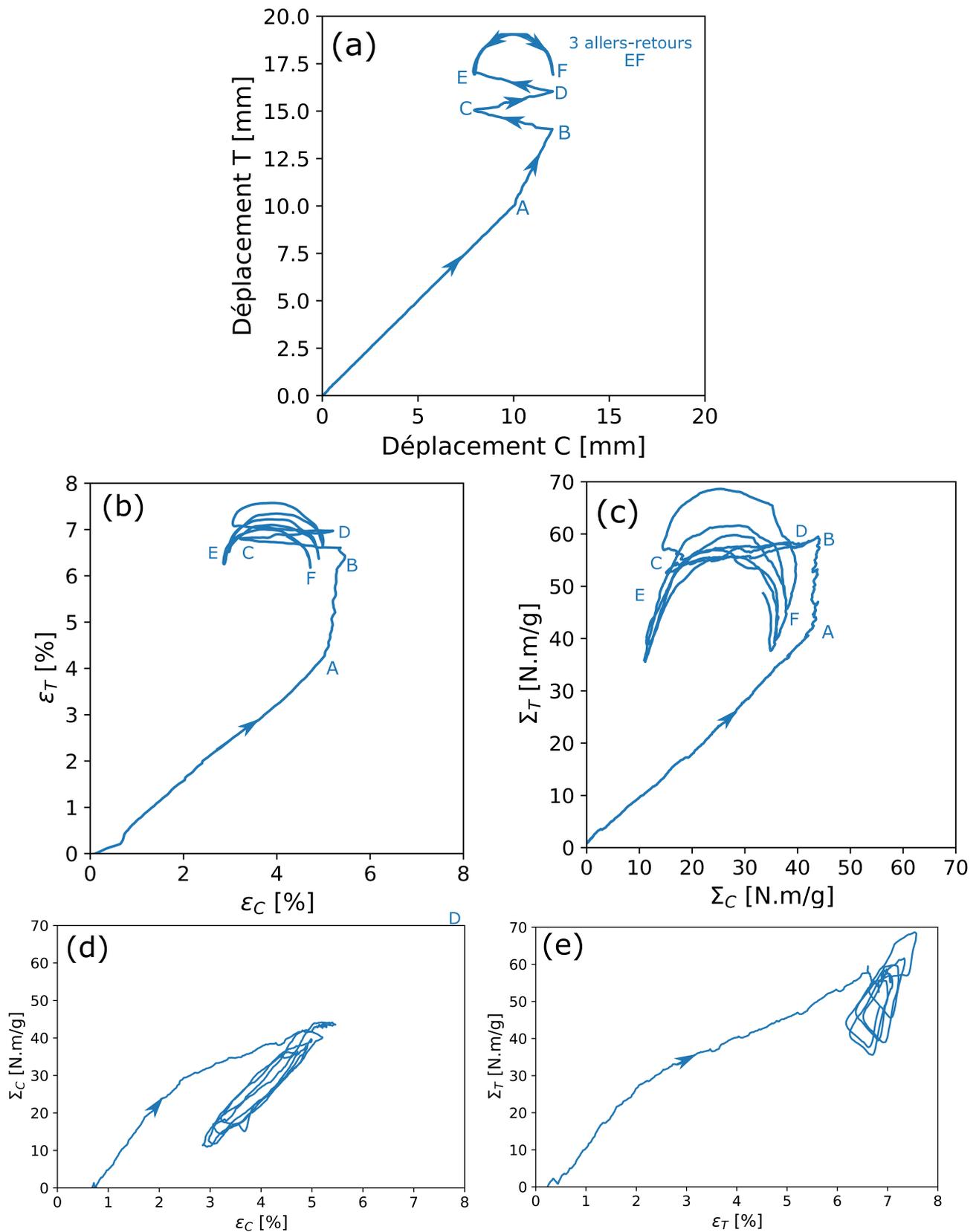


FIGURE 6.22 – Comportement mécanique du tissu pour un chargement complexe en traction biaxiale piloté en déplacement(a), (b) chargement dans le plan des déformations, (c) réponse dans le plan des contraintes, (d) comportement mécanique dans la direction de la Chaîne, (e) comportement mécanique dans la direction de la Trame

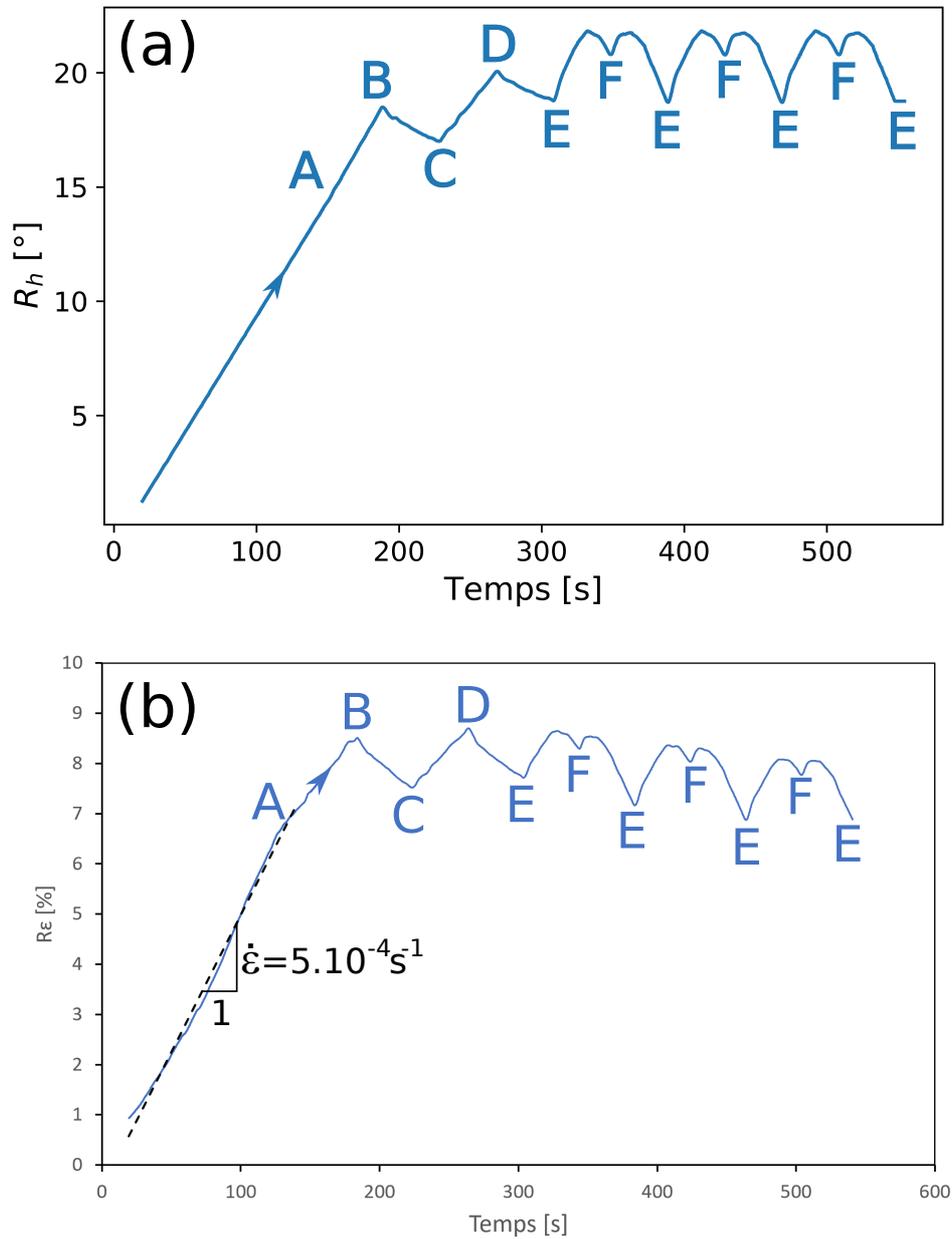


FIGURE 6.23 – Chargement imposé pour le trajet complexe : (a) déplacement imposé en fonction du temps, (b) déformation imposée en fonction du temps

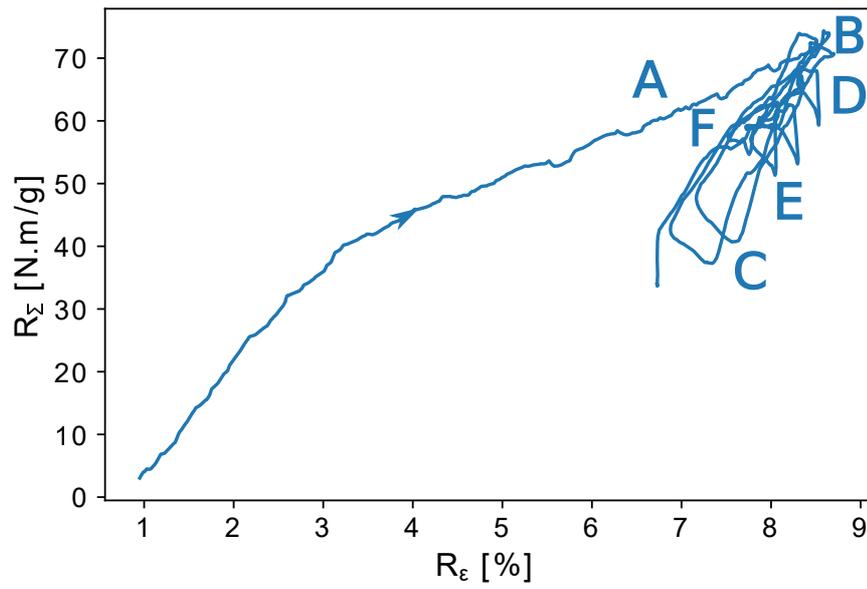


FIGURE 6.24 – Réponse du matériau à un trajet complexe dans le diagramme rhéologique  $(R_\Sigma, R_\epsilon)$

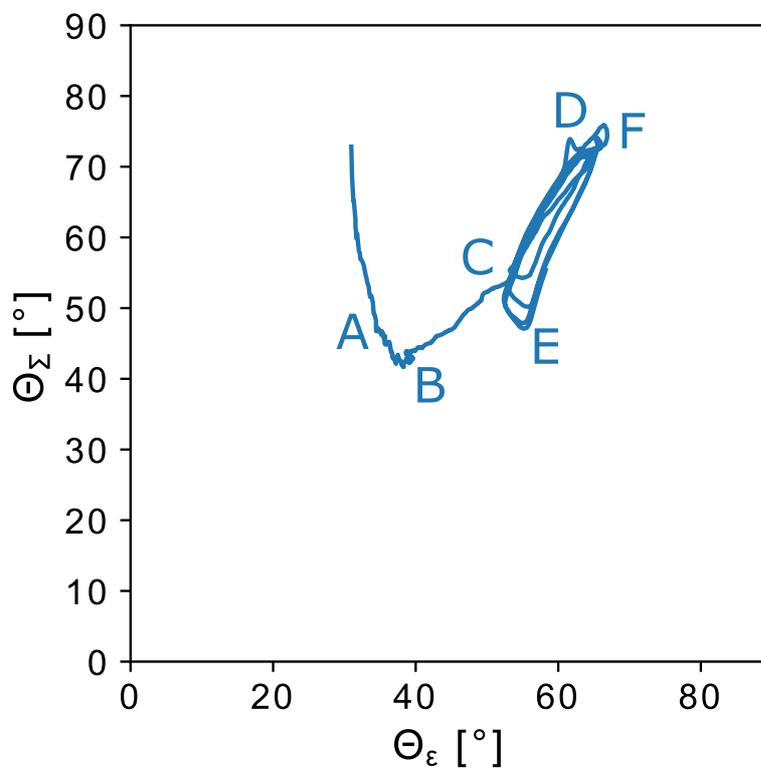


FIGURE 6.25 – Evolution de  $\theta_\Sigma$  en fonction de  $\theta_\epsilon$ , correspondant au chargement complexe de la Figure 6.22-(a)

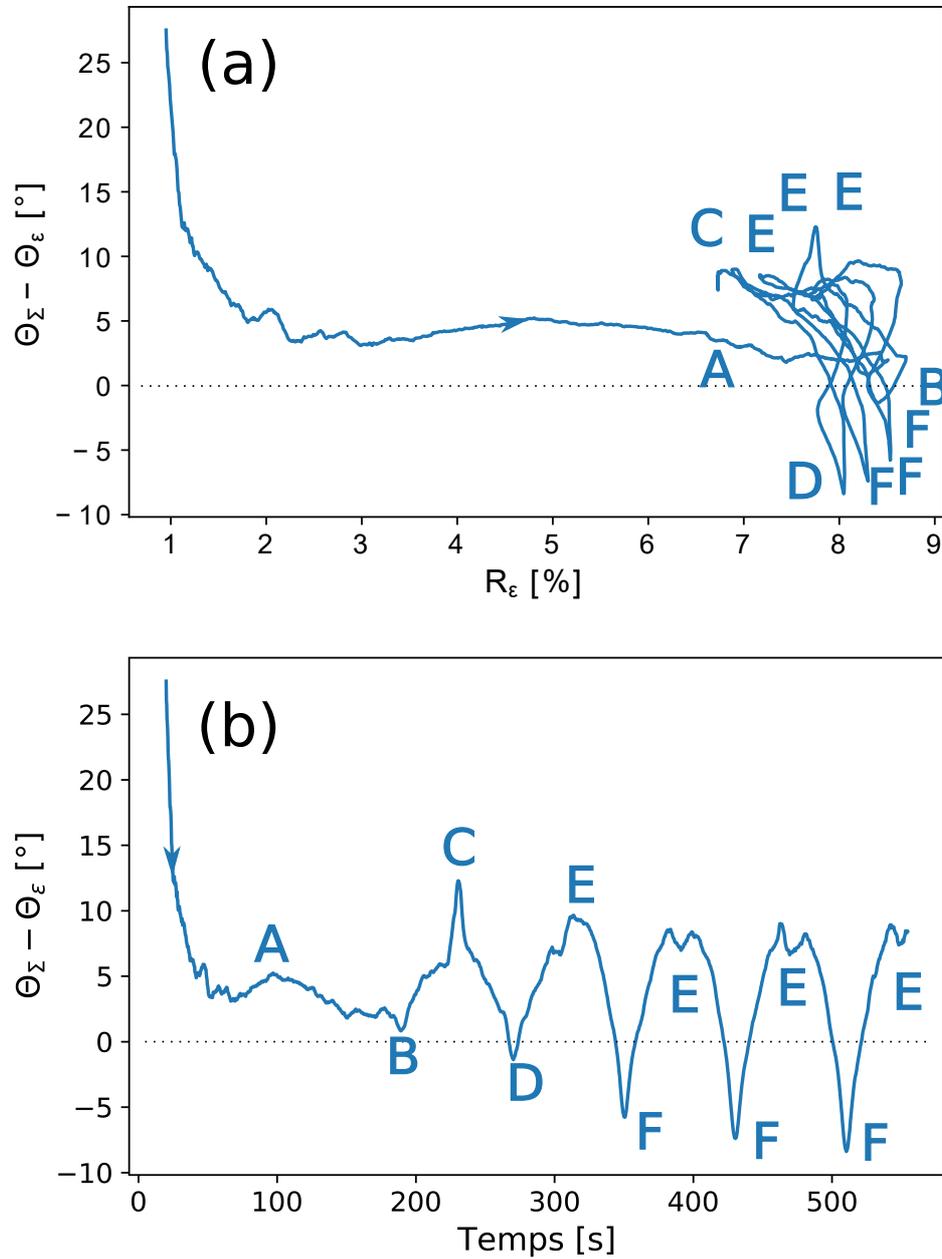


FIGURE 6.26 – Caractérisation du déphasage entre la contrainte et la déformation au cours du trajet complexe : (a) en fonction de  $R_\epsilon$ , (b) en fonction du temps

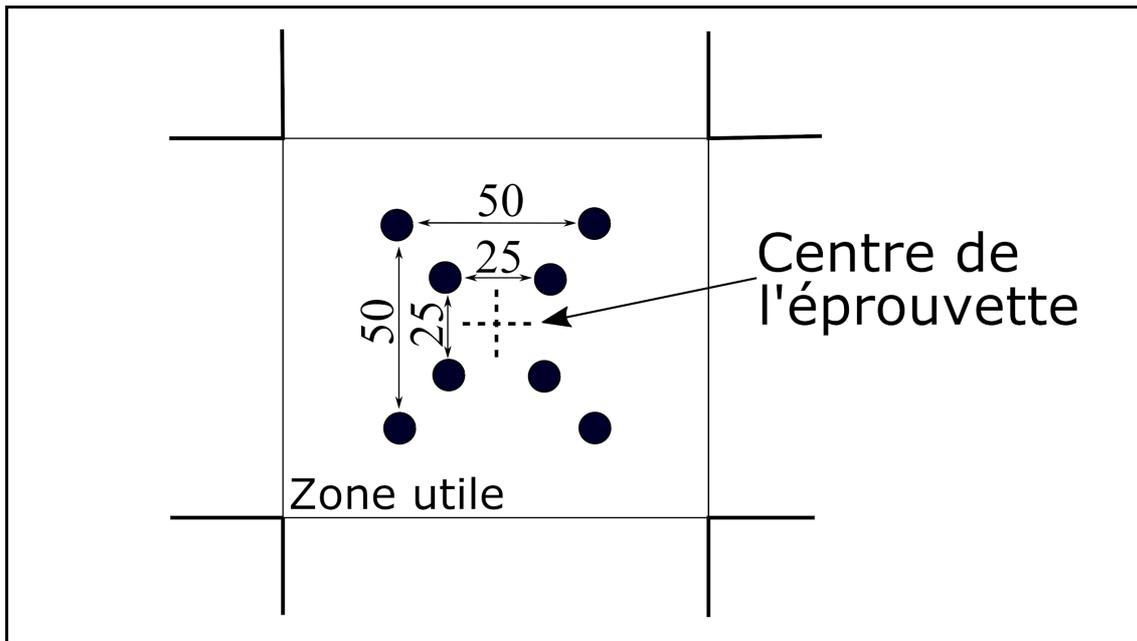


FIGURE 6.27 – Schéma de placement des cibles de suivi pour la mesure des déformations des éprouvettes de traction biaxiale (distances au repos en millimètres)

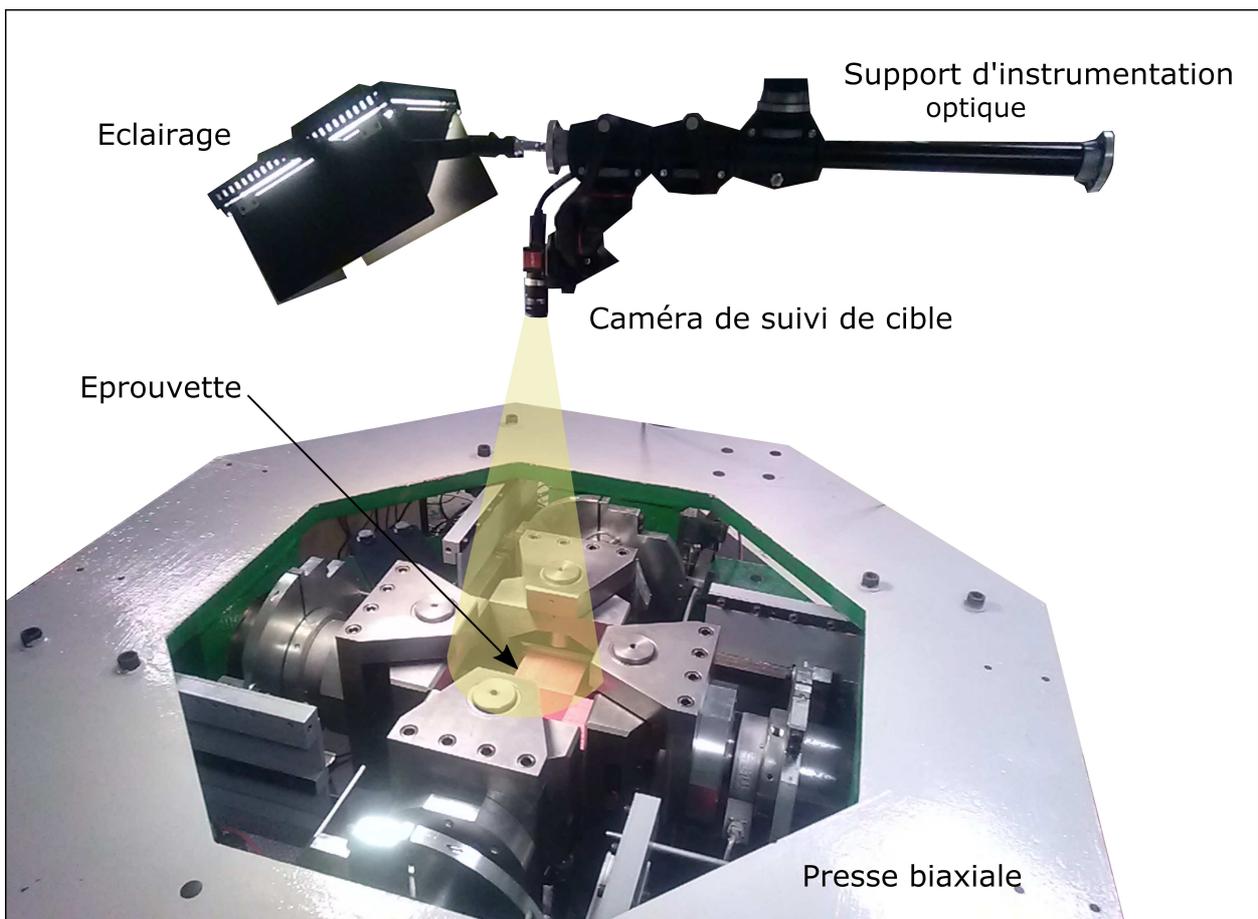


FIGURE 6.28 – Installation des moyens de mesure optique sur la machine de traction biaxiale

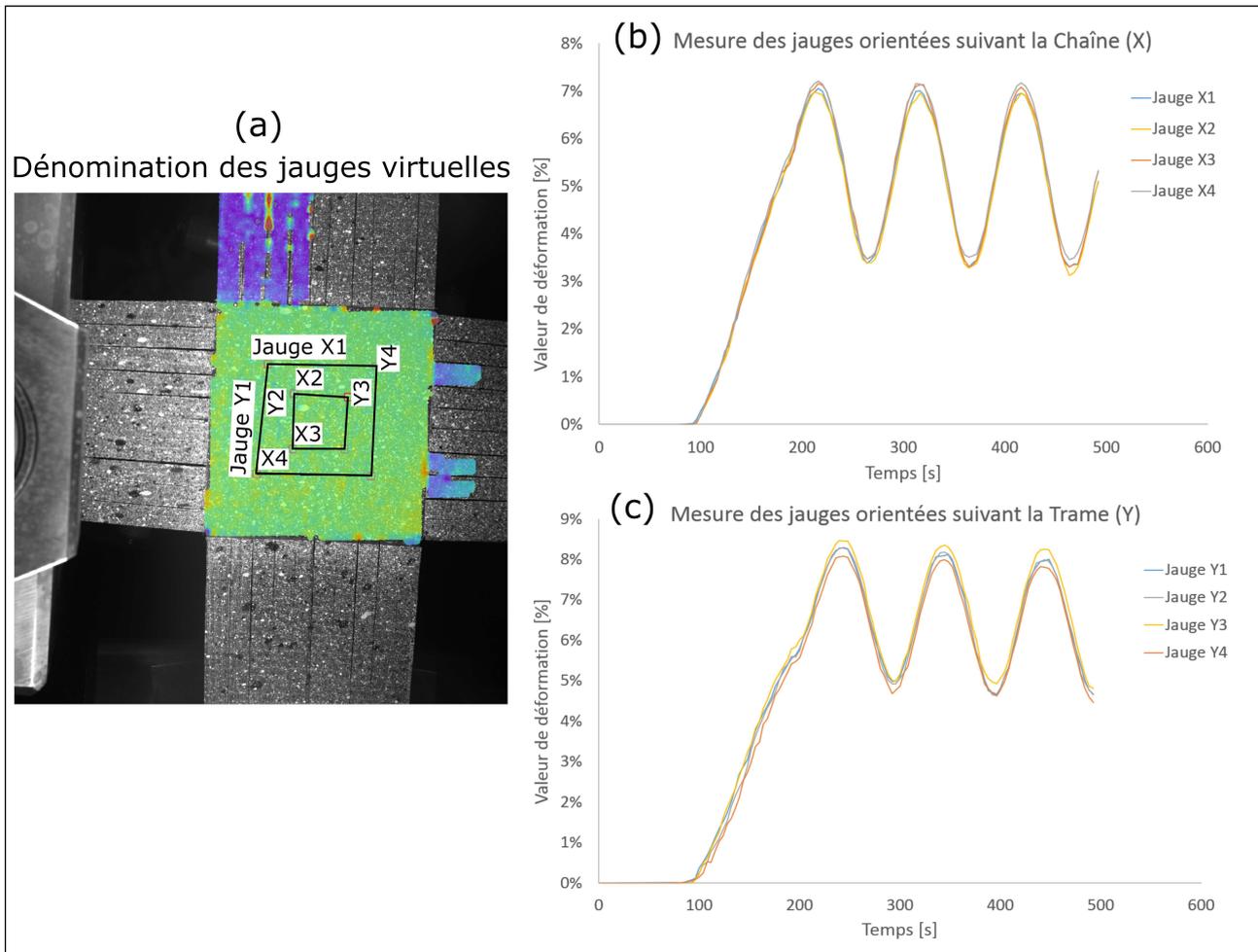


FIGURE 6.29 – Jauges virtuelles pour un essai biaxial avec stéréo-corrélation d'images selon un chargement de cercles dans le plan des déplacements : (a) placement des jauges, (b) suivi des jauges orientées en X, (c) suivi des jauges orientées en Y

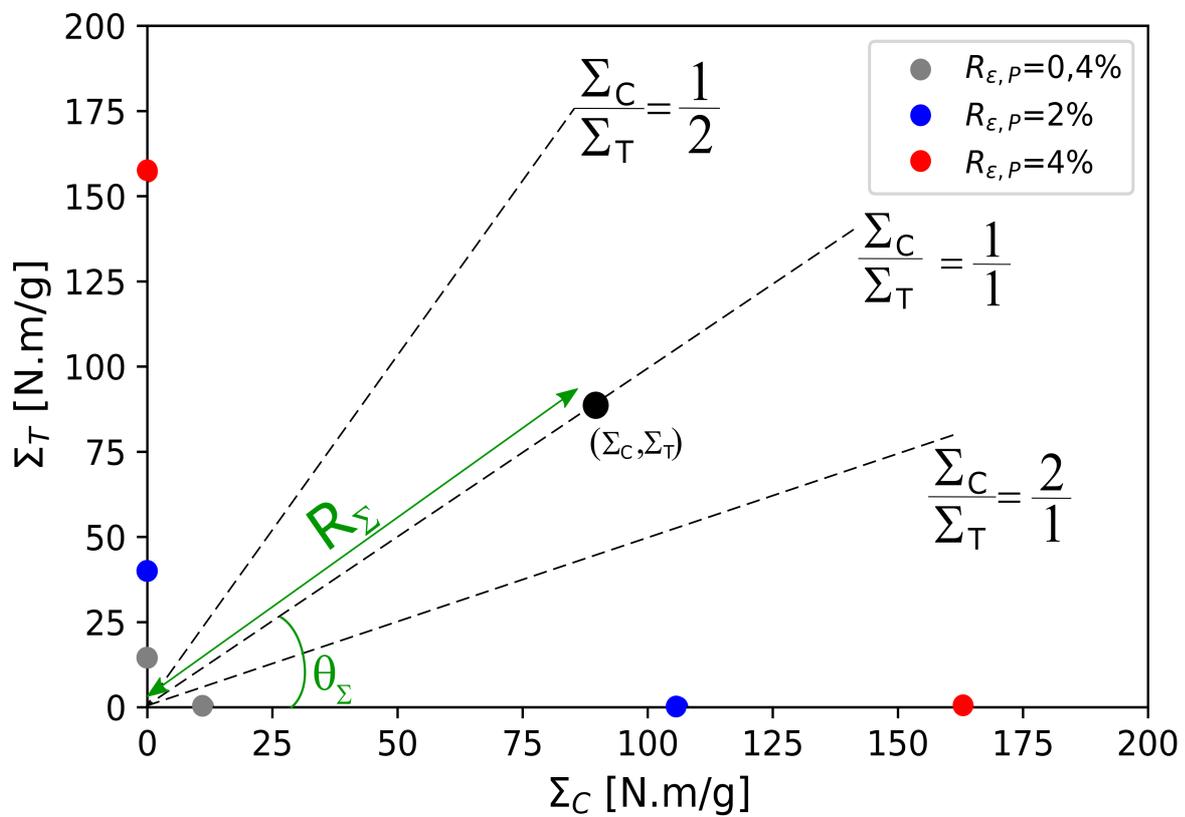


FIGURE 6.30 – Limites d'utilisation supposées connues en traction uniaxiale et orientations des chargements radiaux, i.e. proportionnels, envisagés pour les essais de traction biaxiale

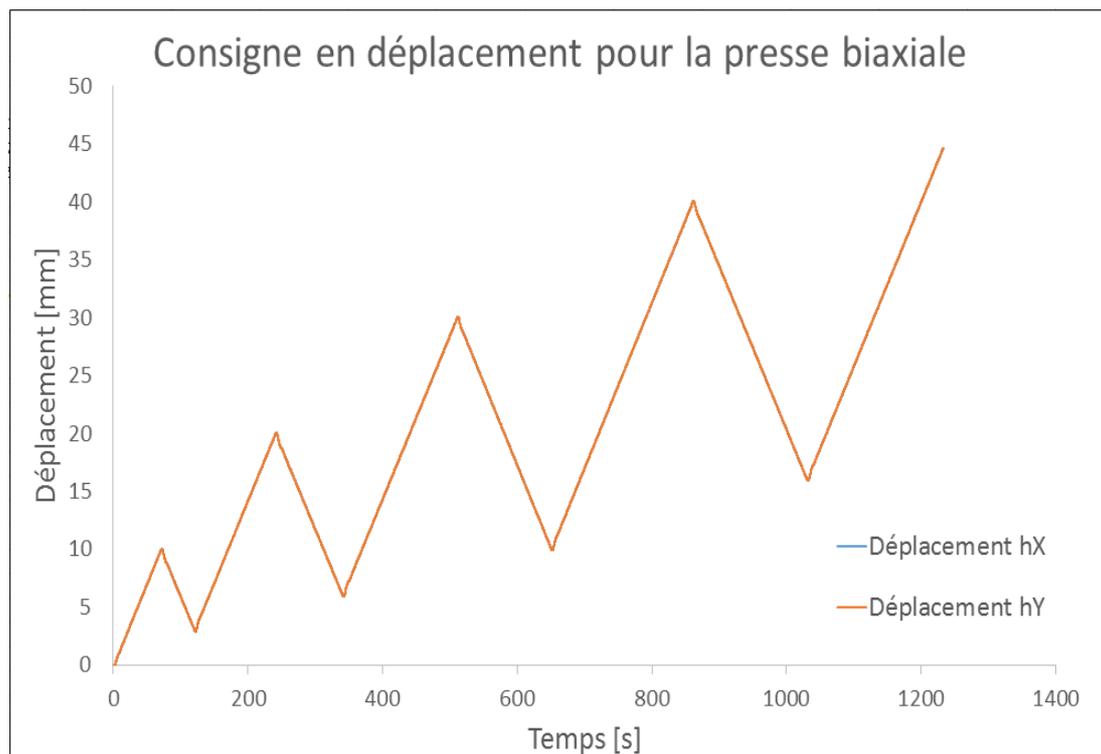


FIGURE 6.31 – Consigne en déplacement pour l'essai de traction équi-biaxiale, les déplacements  $h_X$  et  $h_Y$  sont superposés

# Chapitre 7

## Résultats bruts : Traction biaxiale

Dans ce chapitre les résultats bruts des essais biaxiaux sont présentés. Les post-traitements et analyses détaillées sont exposés au chapitre 11.

### 7.1 Résultats bruts des essais

Dans cette section, les résultats des essais avec les trois rapports  $\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T}$  de chargement seront présentés. Il est rappelé que chaque essai est piloté en déplacement avec une vitesse de rayon de déplacement fixé à  $\dot{R}_h = 0,2mm/s$ , ce qui correspond à une vitesse de déformation de l'ordre de  $\dot{\epsilon} = 10^{-3}s^{-1}$ . De plus, ces trajets de pilotage en déplacement prendront la forme de rampes cycliques de charge/décharge.

Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi de réaliser des essais biaxiaux uniquement dans les axes du tissu, c'est-à-dire que les deux directions de traction sont confondues avec les directions Chaîne et Trame.

Pour chacun des essais, la présentation suivante sera adoptée : présentation du trajet de consigne en déplacement, présentation du trajet de consigne en déformation et la réponse du matériau en contrainte, puis la réponse mécanique dans le sens chaîne et trame. Enfin, la réponse en rayon de contrainte  $R_\Sigma$  en fonction du rayon de déformation  $R_\epsilon$  sera présentée.

Pour chaque essai, le protocole implique une mesure de la déformation par suivi de cibles et une mesure de la force par axe  $X$  et  $Y$ . Nous montrerons le décalage entre les trajets de consigne en déplacement et les comportements dans la zone utile de l'éprouvette en déformation comme en contrainte, avec notamment la mesure de l'angle réel de sollicitation dans le plan  $(\Sigma_C, \Sigma_T)$ .

#### 7.1.1 Essai de traction équilibaxiale

Le rapport  $\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T}$  de chargement est ici  $\frac{1}{1}$ .

**Consigne de chargement** Le trajet de chargement imposé a déjà été présenté en Figure 6.31. Les points d'inversion de charge en décharge (équivalant aux points  $\epsilon_R^i$  sur la figure 4.17) sont choisis de manière à avoir des cycles régulièrement espacés dans la gamme de déformation. Les points d'inversion de décharge en recharge sont choisis de sorte à atteindre des niveaux de contraintes bas sans être nuls. En résumé, au cours des séquences charge-décharge et décharge-recharge, les valeurs d'amplitude de déplacement du pilotage sont choisies pour atteindre des points spécifiques exprimés respectivement en déformation ou en contrainte.

Les consignes en déplacements en sens Chaîne et Trame respectivement  $X$  et  $Y$  sont les mêmes. La réponse en déformation est présentée en Figure 7.1. Le trajet imposé en déformation est radial comme le trajet de consigne en déplacement mais l'angle de  $45^\circ$  n'est pas respecté. En effet, probablement en raison de rigidités différentes du matériau des branches de l'éprouvette, le rapport mesuré dans le plan des déformations est de  $\frac{1}{0,879} = 1,1$  soit un angle de  $\theta_\varepsilon = 41^\circ$ . Des décalages orthoradiaux existent lors des décharges mais la recharge se fait toujours de manière parallèle à la droite de première charge. La réponse en force est aussi présente en Figure 7.1.

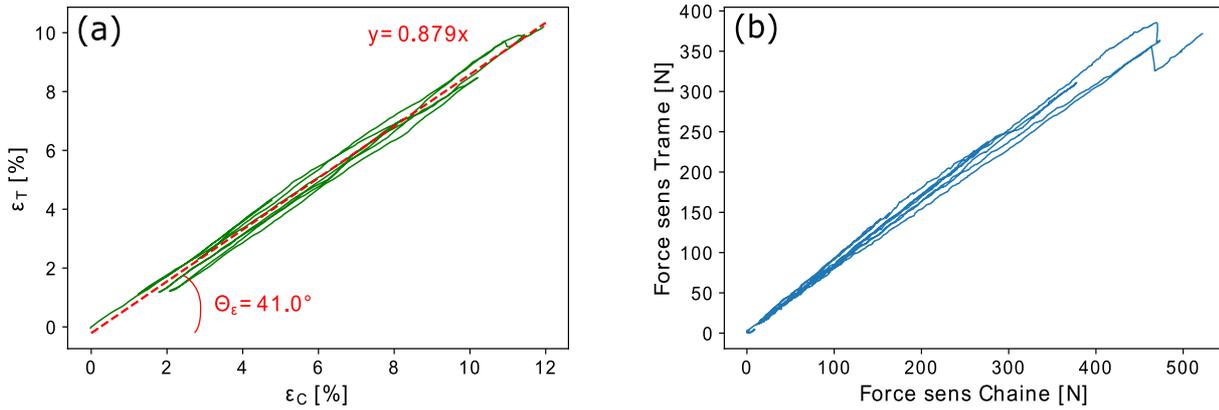


FIGURE 7.1 – Résultats d'essai de traction équi-biaxiale sur le tissu 9017E25 ; (a) chargement en déformation dans le plan ( $\varepsilon_C, \varepsilon_T$ ) (b) réponse en force dans le plan ( $F_C, F_T$ )

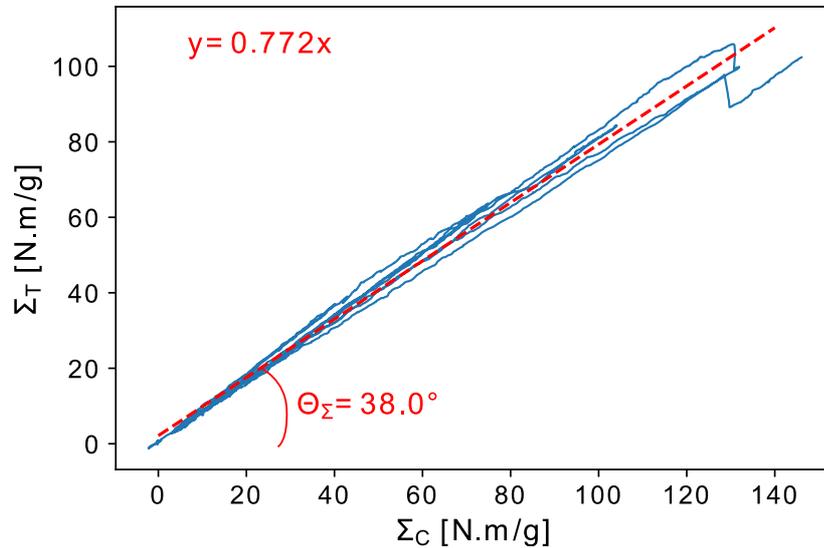


FIGURE 7.2 – Réponse en contrainte dans le plan ( $\Sigma_C, \Sigma_T$ ) de l'éprouvette pour un essai de traction équi-biaxiale sur le tissu 9017E25

A partir des mesures de force, les contraintes dans les directions Chaîne et Trame sont calculées (cf. relation 6.1). La réponse de l'éprouvette dans le plan des contraintes ( $\Sigma_C, \Sigma_T$ ) est visible en Figure 7.2. Cette figure montre que l'évolution de la contrainte en sens Trame

$(\Sigma_T)$  en fonction de la contrainte en sens Chaîne  $(\Sigma_C)$  se fait suivant une droite d'équation  $y = 0.772x$ . Cette valeur est obtenue par une régression linéaire. A partir de la courbe de réponse en contrainte, il est aussi possible de quantifier l'écart-type sur la pente  $S_a$ , et donc sur l'angle, grâce à la formule :

$$S_a = \frac{S_b}{\sqrt{\sum_0^N (\Sigma_{C;i} - \langle \Sigma_C \rangle)^2}} \quad (7.1)$$

Avec  $S_b$  l'écart type lié au jeu de données (dont le calcul est explicité dans l'équation 7.2),  $\Sigma_{C;i}$  la  $i^{\text{ème}}$  mesure de la contrainte dans la direction Chaîne,  $\langle \Sigma_C \rangle$  la valeur moyenne des contraintes en sens Chaîne.

$$S_b = \sqrt{\frac{\sum_0^N (\Sigma_{T;i} - a\Sigma_{C;i} - b)^2}{N - 2}} \quad (7.2)$$

Avec  $a$  et  $b$  respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite obtenue par régression linéaire et  $N$  la taille de l'échantillon statistique, soit le nombre de points sur la courbe de réponse en contrainte.

L'angle de la réponse obtenue dans le plan des contraintes est mesuré à  $38^\circ \pm 0,12^\circ$  avec  $0,12^\circ = 2S_a$ . Le rapport  $\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T} = 1$  n'est donc pas rigoureusement respecté, même si nous nous en approchons avec une valeur de  $\frac{1}{0.772}$ . Le décalage par rapport à l'angle ciblé est essentiellement lié à la différence de rigidité du matériau entre la chaîne et la trame. Pour pallier ce problème, un moyen serait d'utiliser un pilotage en force et non en déplacement (voir la section 6.4.2). Le comportement de l'éprouvette ne permet donc pas un passage simple entre déplacement, déformation et contrainte. Cependant, un chargement radial dans le plan des déplacements produit tout de même un chargement radial dans le plan de déformation et une réponse radiale dans le plan de contrainte.

La Figure 7.3 montre le déphasage entre le chargement en déformation et la réponse en contrainte grâce à une représentation dans un repère normé. Les courbes des Figures 7.1 et 7.2 sont normées par leur valeur maximale en contrainte  $\Sigma_{MAX}$  définie par  $\Sigma_{MAX} = \text{Max}(\Sigma_C^{UTS}; \Sigma_T^{UTS})$  pour l'essai considéré. En déformation nous prenons  $\varepsilon_{MAX}$  définie par  $\varepsilon_{MAX} = \text{Max}(\varepsilon_C^{UTS}; \varepsilon_T^{UTS})$ . La Figure 7.3 regroupe ces deux résultats dans le sens Chaîne avec  $\frac{\Sigma_C}{\Sigma_{MAX}}$  et  $\frac{\varepsilon_C}{\varepsilon_{MAX}}$  et dans le sens Trame  $\frac{\Sigma_T}{\Sigma_{MAX}}$  et  $\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_{MAX}}$ .

**Courbes contrainte-déformation en chaîne et trame** Le comportement contrainte-déformation est donné par la Figure 7.4 pour les directions chaîne et trame, respectivement en (a) et en (b).

**Courbe en rayons de contrainte et déformation** Le graphique d'évolution du rayon de contrainte en fonction du rayon de déformation est présenté en Figure 7.5-(a). Notons que l'allure de la courbe est similaire à celle des essais de traction uniaxiale. C'est à partir de cette courbe que le protocole de recherche de la limite d'élasticité sera appliqué pour le cas des essais biaxiaux.

Sur la Figure 7.5-(b), nous présentons l'éprouvette à la fin de l'essai après déchirement. La déchirure s'est initiée à la fin d'une incision d'une branche dans le sens Trame et s'est propagée le long d'un fil de Trame dans la zone utile de l'éprouvette.

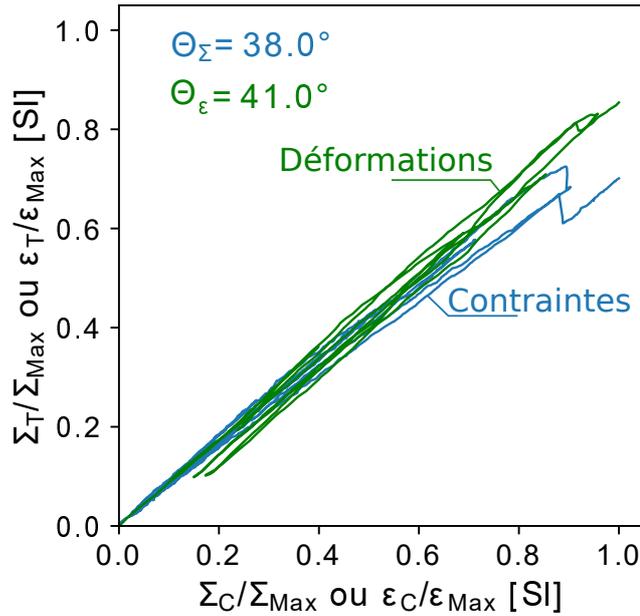


FIGURE 7.3 – Déphasage entre le chargement en déformation et la réponse en contrainte pour l'essai de traction biaxiale sur le *9017E25*

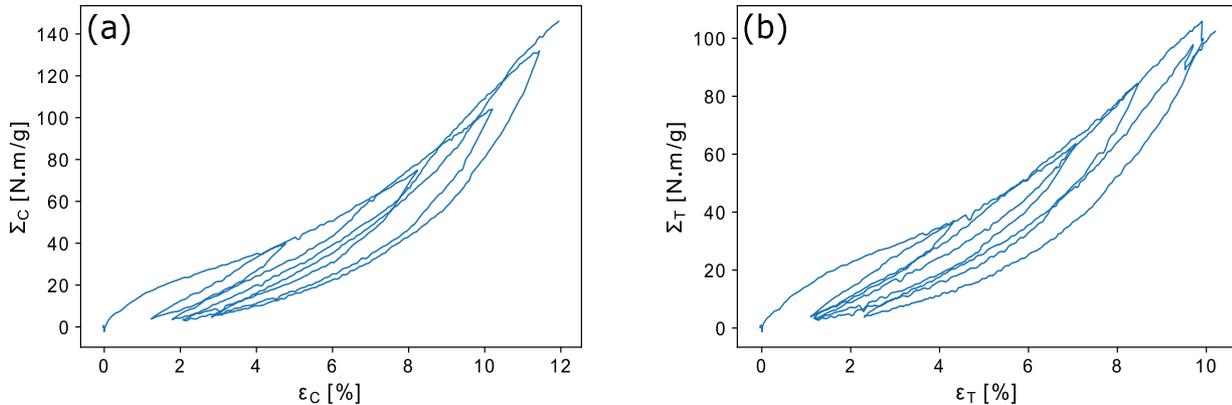


FIGURE 7.4 – Résultats d'essai cyclique de traction équi-biaxiale du tissu *9017E25* ; (a) courbe  $\Sigma - \varepsilon$  en direction de la Chaîne et (b) en direction de la Trame

### 7.1.2 Essai de traction biaxiale de rapport $\frac{1}{2}$

**Consigne de chargement** Les mêmes règles que pour la consigne de l'essai équi-biaxial sont utilisées pour établir la consigne de cet essai avec, ici, une sollicitation en déplacement dans le sens Trame deux fois plus importante que le sens Chaîne. La consigne est donnée en Figure 7.6.

La mesure des déformations et des efforts est présentée en Figure 7.7. Le calcul des contraintes permet de vérifier que le trajet correspond au rapport de contrainte souhaité ; voir Figure 7.8. Dans ce cas, l'angle visé est de  $63.4^\circ$  or nous voyons que nous obtenons un rapport en contrainte de  $\frac{1}{1,572}$  soit un angle de  $57.5^\circ \pm 0,42^\circ$ . Cette différence est certainement expliquée par un décalage de pré-tension lors de la mise en place de l'éprouvette. En effet, la pré-tension est gérée avant le début de l'essai et lors de cette phase, si les deux axes de l'éprouvette ne sont pas prétendus de

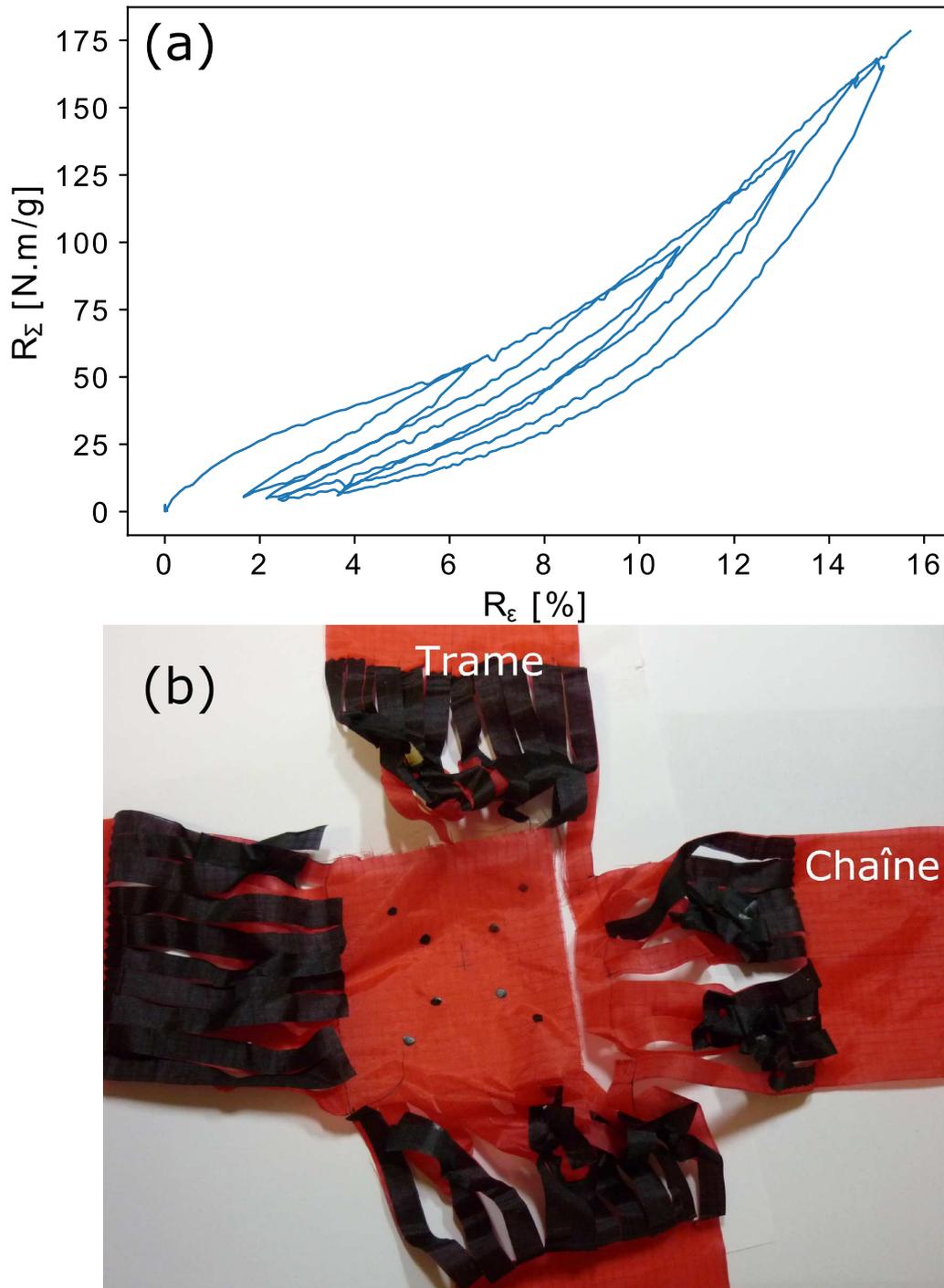


FIGURE 7.5 – Résultats d’essai cyclique de traction équi-biaxiale du tissu 9017E25 ; (a) courbe  $R_\Sigma - R_\epsilon$  et (b) photographie de l’éprouvette après sa rupture

la même manière, il peut subsister un décalage en contrainte par rapport à la valeur cible. Cet aspect explique aussi la valeur de  $55^\circ$  d’angle obtenue dans le plan de déformation, visible sur la Figure 7.7-(a).

La Figure 7.9 montre le déphasage entre le chargement en déformation et la réponse en contrainte grâce à une représentation dans un repère normé.

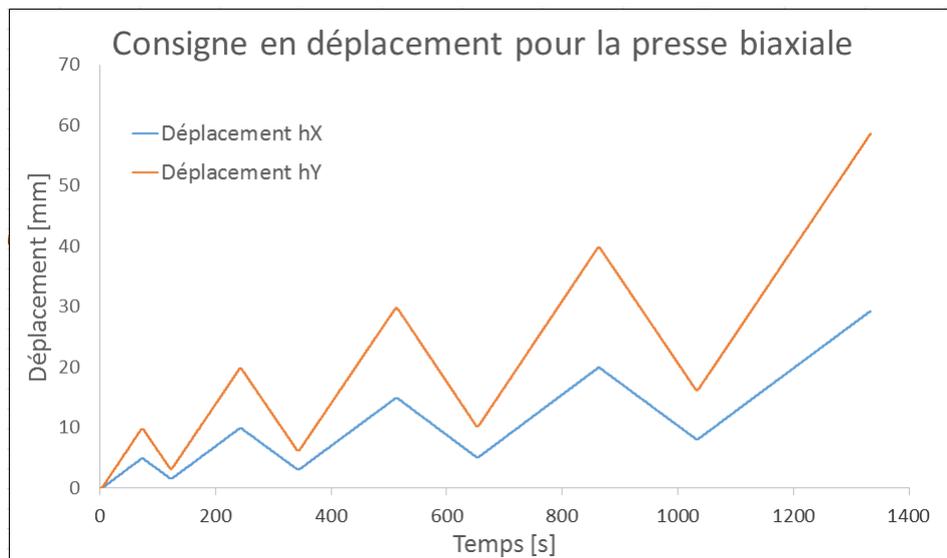


FIGURE 7.6 – Consigne en déplacement pour l’essai de traction  $\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T} = \frac{1}{2}$  ( $X = C, Y = T$ )

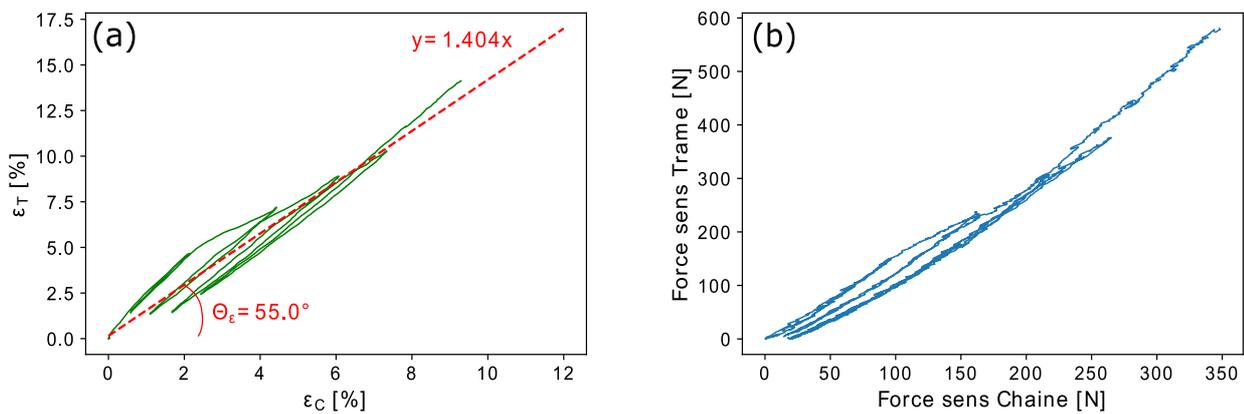


FIGURE 7.7 – Pour l’essai de traction biaxiale de rapport  $\frac{1}{2}$  sur le tissu 9017E25 ; (a) chargement en déformation dans le plan ( $\varepsilon_C, \varepsilon_T$ ) (b) réponse en force dans le plan ( $F_C, F_T$ )

**Courbes contrainte-déformation en chaîne et trame** Comme précédemment il est possible de voir la réponse du matériau dans chacun de ses axes dans la Figure 7.10.

**Courbe en rayons de contrainte et déformation** La Figure 7.11-(a) montre l’évolution de  $R_\Sigma$  en fonction de  $R_\varepsilon$ . Sur la Figure 7.11-(b), est présentée une photographie de l’éprouvette après rupture : la rupture a lieu au centre de l’éprouvette perpendiculairement à la contrainte la plus élevée, dans le sens trame. La rupture relie l’extrémité d’une incision sur une branche de l’éprouvette à une autre incision sur la branche opposée.

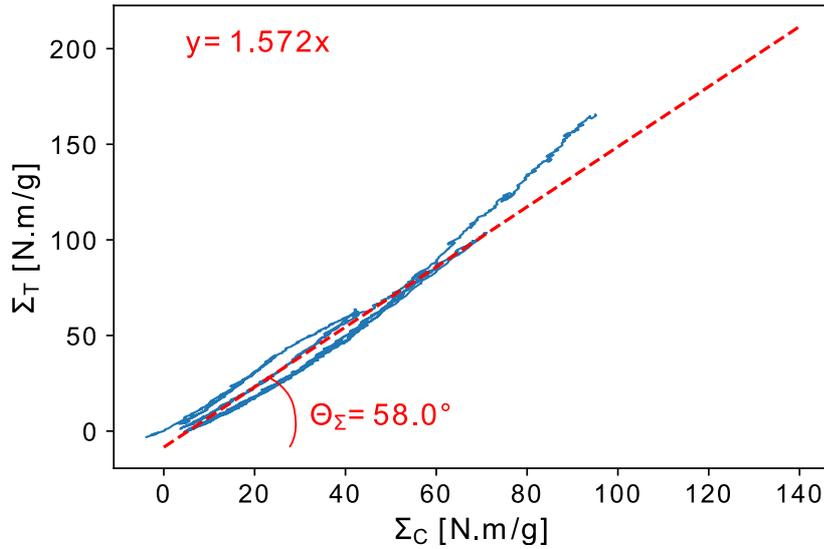


FIGURE 7.8 – Réponse en contrainte dans le plan  $(\Sigma_C, \Sigma_T)$  de l'éprouvette pour un essai de traction biaxiale de rapport  $\frac{1}{2}$  sur le tissu 9017E25

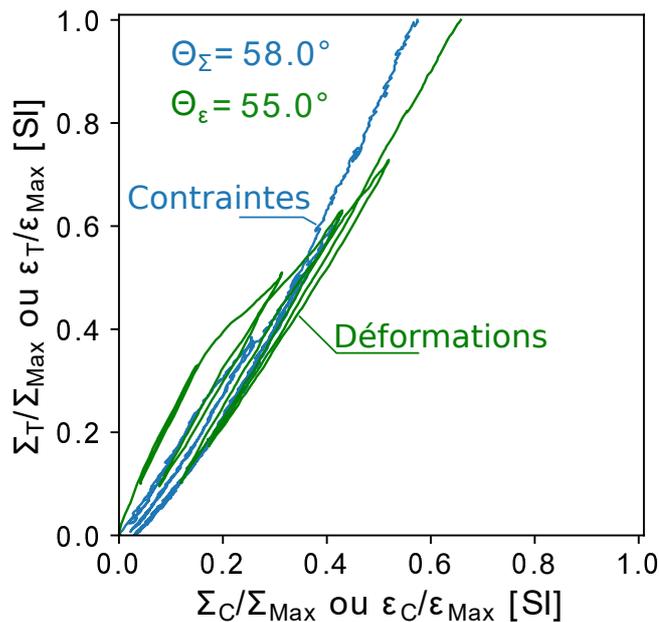


FIGURE 7.9 – Déphasage entre le chargement en déformation et la réponse en contrainte pour l'essai de traction biaxiale sur le 9017E25

### 7.1.3 Essai de traction biaxiale de rapport $\frac{2}{1}$

**Consigne de chargement** Les mêmes règles que pour la consigne des essais précédents sont utilisées avec, ici, une sollicitation dans le sens Chaîne deux fois plus importante que le sens Trame. La consigne est donnée en Figure 7.12.

La mesure des déformations et des efforts est donnée en Figure 7.13. La réponse dans le plan

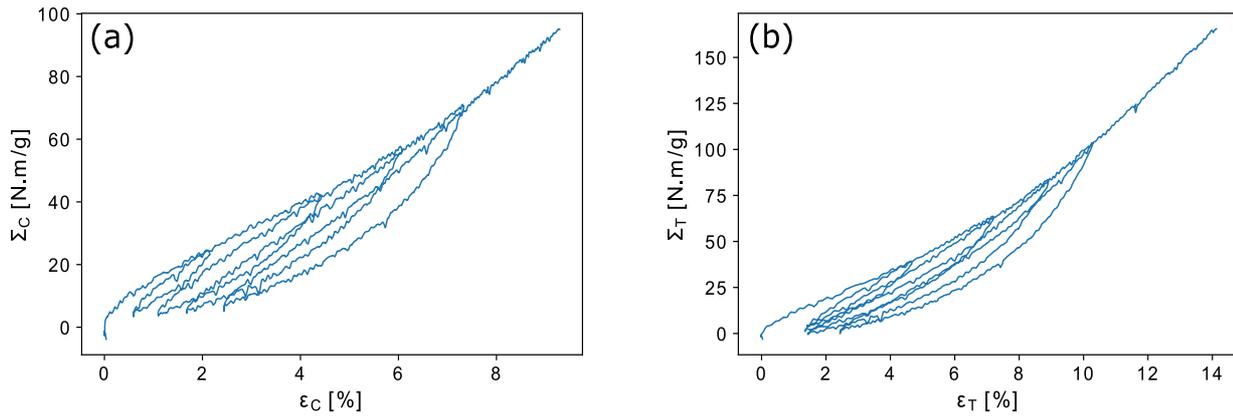


FIGURE 7.10 – Résultats d’essai cyclique de traction biaxiale de rapport  $\frac{1}{2}$  du tissu 9017E25 ; (a) courbe  $\Sigma - \varepsilon$  en direction de la Chaîne et (b) en direction de la Trame

des contraintes est donnée par la Figure 7.14.

Le trajet de chargement, dans le plan des déformations est bien radial, tandis que la réponse dans le plan des contraintes est légèrement courbée, quoique située sur une seule courbe malgré les cycles.

L’angle dans le plan des déformations est assez bien respecté avec un rapport de  $\frac{1}{0.532} = \frac{1.88}{1}$  équivalent à un angle de  $28^\circ$  pour un angle visé de  $26.6^\circ$ . L’angle visé, a priori, dans l’espace des contraintes était aussi de  $26.6^\circ$ , mais cela était sans compter sur le comportement du matériau. En effet, un rapport de  $\frac{1}{0.397} = \frac{2.52}{1}$  est obtenu soit un angle de  $21.6^\circ \pm 0.12^\circ$ . Cette différence d’angle entre le chargement radial en déformation et sa réponse dans le plan des contraintes est le résultat du comportement du matériau.

La Figure 7.15 montre le déphasage entre le chargement en déformation et la réponse en contrainte grâce à une représentation dans un repère normé.

**Courbes contrainte-déformation en chaîne et trame** Comme précédemment il est possible de voir la réponse du matériau dans chacun de ses axes à la Figure 7.16.

**Courbe en rayons de contrainte et déformation** Le résultat en  $R_\Sigma$  en fonction de  $R_\varepsilon$  issu des données précédentes est disponible Figure 7.17 -(a) et la rupture de l’éprouvette est donnée sur la Figure 7.17-(b). La déchirure s’est initiée à la fin d’une incision d’une branche dans le sens Trame et s’est propagée le long d’un fil de Trame dans la zone utile de l’éprouvette. Ce qui est cohérent avec l’essai car la direction Chaîne est la plus sollicitée, la déchirure est bien perpendiculaire à cette direction.

#### 7.1.4 La distorsion lors des essais de traction biaxiale

Les essais présentés ci-dessus sont orientés dans les directions Chaîne-Trame, a priori les directions de symétrie de l’éprouvette. Ainsi, par symétrie du chargement et du matériau, les déformations de distorsion chaîne-trame devraient être nulles. Toutefois, la mesure de la distorsion  $\varepsilon_{CT}$  est effectuée pour chacun des essais. L’évolution de la valeur de la distorsion en fonction du temps est visible à la Figure 7.18.

Ces résultats sont cohérents avec ce qui est attendu, c’est-à-dire que de faibles valeurs de distorsion sont mesurées. En effet, les valeurs pour les essais de rapports  $\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T} = \frac{1}{2}$  et  $\frac{2}{1}$  sont

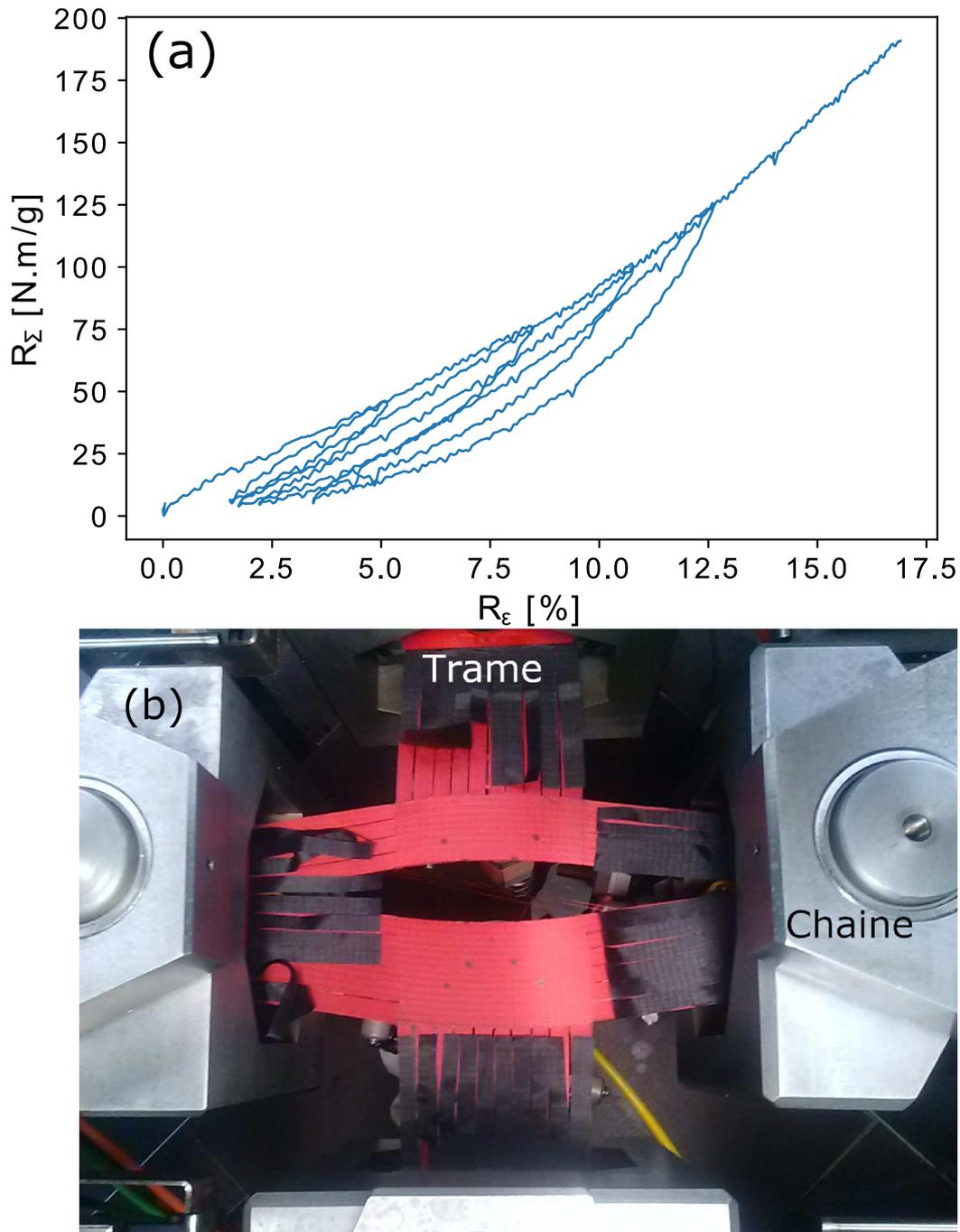


FIGURE 7.11 – Résultats d’essai cyclique de traction biaxiale de rapport  $\frac{1}{2}$  du tissu 9017E25 ; (a) courbe  $R_{\Sigma} - R_{\epsilon}$  et (b) photographie de l’éprouvette après sa rupture

inférieures, respectivement, à 1% et à 0.6% en valeur absolue. Pour l’essai de traction équibiaxiale, les valeurs sont inférieures à 2% en valeur absolue. Ces valeurs sont d’un ordre de grandeur inférieur par rapport à celles des déformations dans les autres directions  $\epsilon_C$  et  $\epsilon_T$ .

Ces distorsions pourraient être expliquées par une dissymétrie présente dans le tissu avant essai. En effet, la trame n’est pas toujours précisément perpendiculaire à la chaîne, en raison du procédé de fabrication. Les fils de trame sont parfois légèrement arqués le long de la largeur du rouleau alors que les fils de chaîne sont droits. La valeur de la mesure de l’angle de maille à l’état

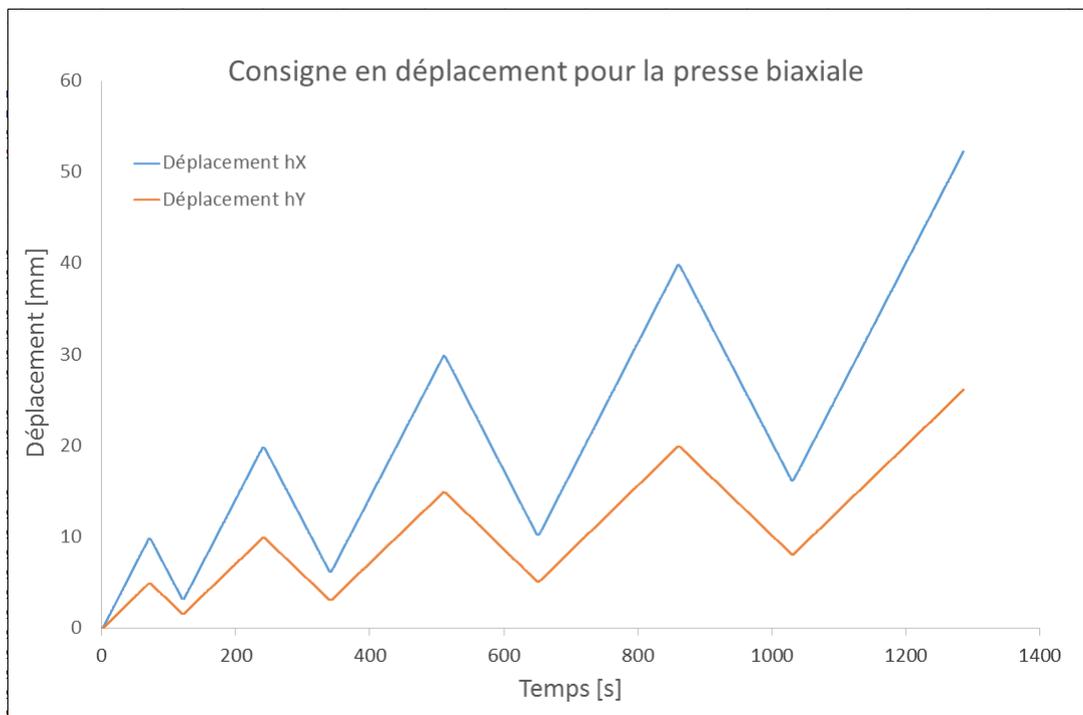


FIGURE 7.12 – Consigne en déplacement pour l’essai de traction  $\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T} = \frac{2}{1}$  ( $X = C, Y = T$ )

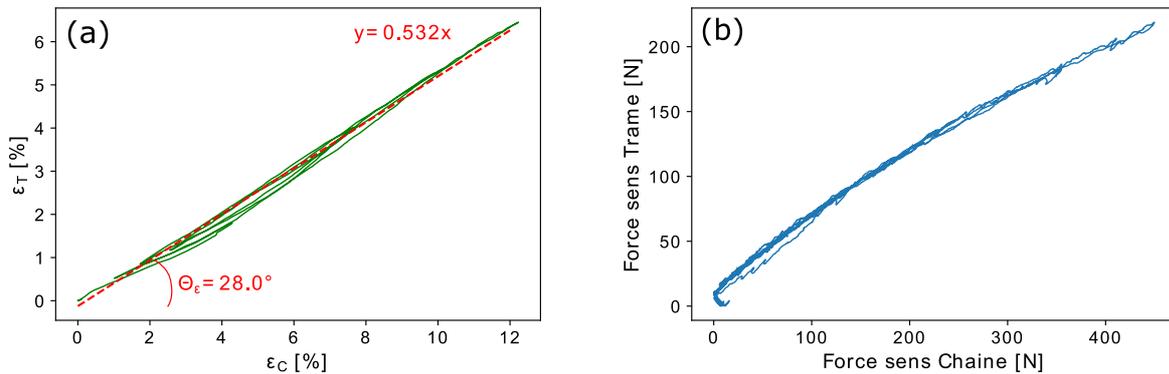


FIGURE 7.13 – Pour l’essai de traction biaxiale de rapport  $\frac{2}{1}$  sur le tissu 9017E25 ; (a) chargement en déformation dans le plan ( $\varepsilon_C, \varepsilon_T$ ) (b) réponse en force dans le plan ( $F_C, F_T$ )

neuf oscille de  $\pm 1^\circ$ .

## 7.2 Conclusion

La réalisation des essais de traction biaxiale a permis de valider le protocole complet de l’essai de traction biaxiale. Ce protocole s’étend de la découpe de l’éprouvette jusqu’au mode de pilotage en déplacement et la mesure des contraintes et des déformations dans la zone utile de l’éprouvette. Ce protocole aboutit à fournir l’ensemble des informations nécessaires à l’application de la méthode de recherche de limite d’utilisation, dans un espace 2D de contraintes biaxiales. Le protocole consiste en des tractions biaxiales suivant les directions Chaîne et Trame. Ce choix est lié essentiellement à un aspect en relation avec la conception et la confection des voiles, qui

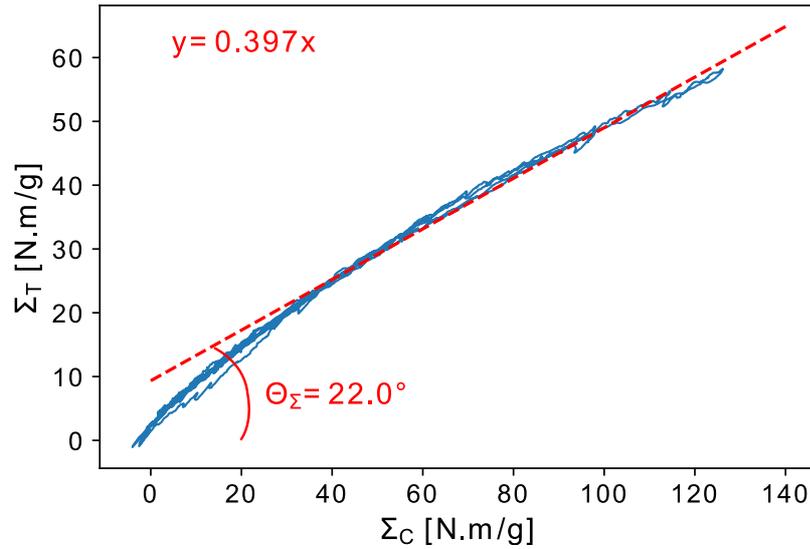


FIGURE 7.14 – Réponse en contrainte dans le plan  $(\Sigma_C, \Sigma_T)$  de l'éprouvette pour un essai de traction biaxiale de rapport  $\frac{2}{1}$  sur le tissu *9017E25*

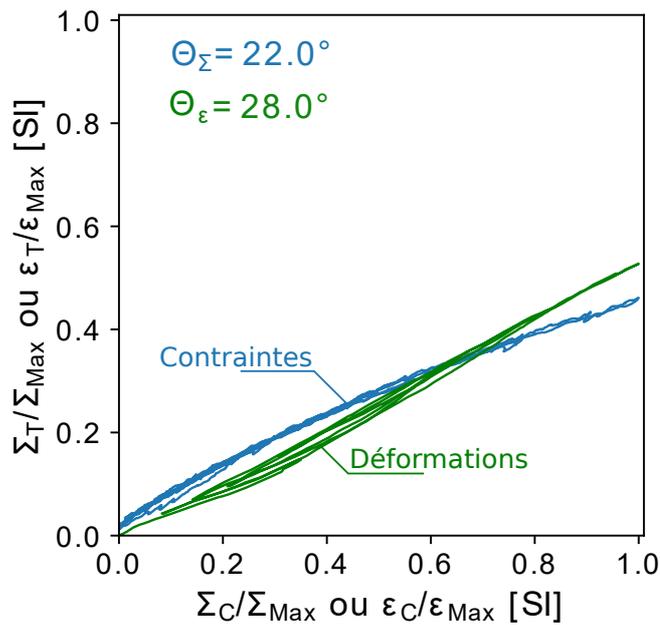


FIGURE 7.15 – Déphasage entre le chargement en déformation et la réponse en contrainte pour l'essai de traction biaxiale sur le *9017E25*

consiste à orienter les fils du tissu dans les directions principales des contraintes subies par la structure.

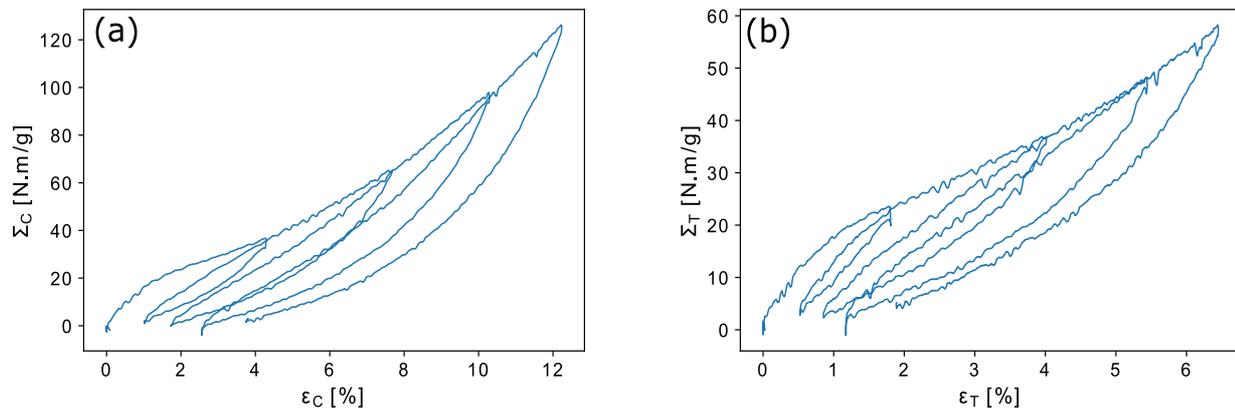


FIGURE 7.16 – Résultats d'essai cyclique de traction biaxiale de rapport  $\frac{2}{1}$  du tissu 9017E25 ; (a) courbe  $\Sigma - \varepsilon$  en direction de la Chaîne et (b) en direction de la Trame

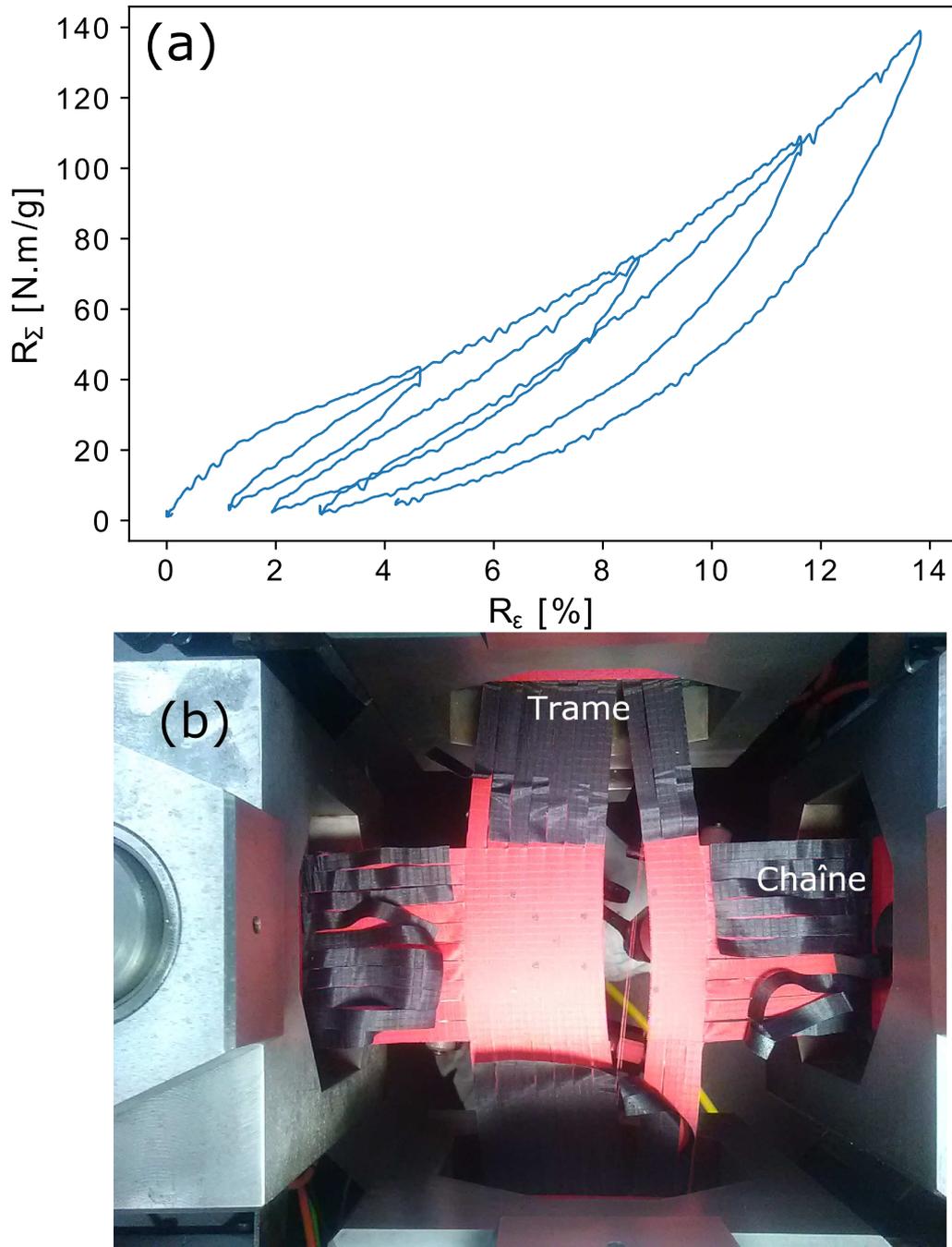


FIGURE 7.17 – Résultats d'essai cyclique de traction biaxiale de rapport  $\frac{2}{1}$  du tissu 9017E25 ; (a) courbe  $R_\Sigma - R_\epsilon$  et (b) photographie de l'éprouvette après sa rupture

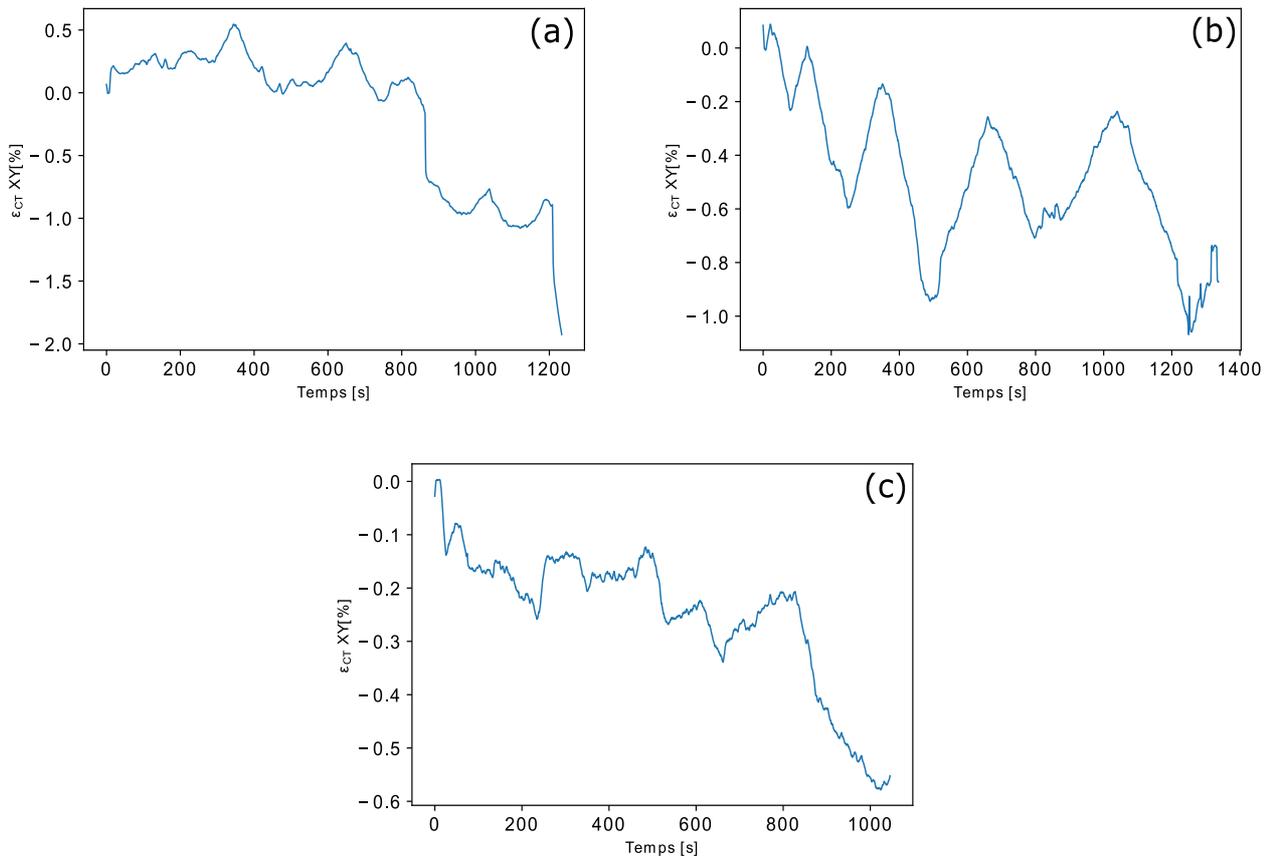


FIGURE 7.18 – Mesures de la distorsion  $\varepsilon_{CT}$  en fonction du temps pour les différents rapports de traction biaxiale cyclique sur le tissu 9017E25 : (a)  $\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T} = \frac{1}{1}$ , (b)  $\frac{1}{2}$  et (c)  $\frac{2}{1}$

Quatrième partie  
Aspects théoriques



# Chapitre 8

## Définition de la décharge pour un matériau tissé

### 8.1 Avant-propos

Pour les matériaux tissés, l'hypothèse de décharge élastique – adoptée dans le cas des matériaux métalliques – n'est pas réaliste compte tenu de la forte irréversibilité et la forte non-linéarité du comportement. Par conséquent, une prise en compte de la forme des décharges est nécessaire.

Nous proposons dans ce chapitre, un cadre théorique pour décrire les décharges pour un matériau tissé. Ceci nous permettra de proposer une méthode de mesure de la contrainte limite d'utilisation du matériau tissé, pour une valeur de déformation résiduelle choisie préalablement. Cette méthode sera ensuite validée.

### 8.2 Modèles de comportement

Pour les matériaux considérés, les résultats expérimentaux montrent une faible influence de la vitesse de sollicitation. Par conséquent, nous nous plaçons dans des conditions de chargement quasi-statique et nous négligeons l'influence des effets visqueux sur le comportement. Ainsi, le comportement du matériau tissé est caractérisé essentiellement par son irréversibilité indépendante du temps et sa non-linéarité. Par ailleurs, et du point de vue méthodologique, cette hypothèse permet de proposer une approche accessible et efficace, tout en étant capable de rendre compte de la complexité du comportement du matériau tissé.

#### 8.2.1 Modèle de première charge

Pour décrire le comportement en première charge des matériaux tissés, à notre connaissance peu de modèles existent dans la littérature, nous pouvons citer néanmoins les modèles de *A. Ambroziak* [2] et celui de *Y. Yang et al.* [71].

Pour décrire le comportement en première charge, nous adoptons le modèle proposé par *W. Dib* [16], [17]. Ce modèle est caractérisé par l'équation de la contrainte  $\Sigma$  en fonction de la déformation  $\varepsilon$  suivante :

$$\Sigma(\varepsilon) = (G - L) \varepsilon^* \tanh\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon^*}\right) + L\varepsilon + H\varepsilon^2 + K\varepsilon^3 \quad (8.1)$$

Avec  $G, L, H, K, \varepsilon^*$  des paramètres du matériau. Le module tangent peut être déterminé :

$$\frac{d\Sigma}{d\varepsilon}(\varepsilon) = (G - L) \left\{ 1 - \tanh^2 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon^*} \right) \right\} + L + 2H\varepsilon + 3K\varepsilon^2$$

Et à l'origine, quand le déformation  $\varepsilon$  vaut zéro, le module est :

$$\frac{d\Sigma}{d\varepsilon}(0) = G \quad (8.2)$$

Ainsi,  $G$  correspond au module tangent à l'origine.

La Figure 8.1 illustre quelques propriétés du modèle. Prenons  $G = L$ , le terme en tangente hyperbolique de l'équation (8.1) devient nul et le modèle a la forme d'un polynôme de degrés 3 (courbe fig. 8.1-a) ou de degrés 2 si  $K = 0$  (courbe fig. 8.1-b). Si on prend  $G = L$  et  $H = K = 0$ , le comportement est alors linéaire avec comme module  $G$  (courbe fig.8.1-c). Enfin, si  $G \neq L$ , le terme en tangente hyperbolique intervient (courbe fig.8.1-d). Dans ce cas, si  $L = H = K = 0$ , alors le terme en tangente hyperbolique est seul (courbe fig.8.1-e). Dans ce cas, le paramètre  $\varepsilon^*$  est la déformation au coude de la tangente hyperbolique (courbe fig.8.1-e), ce qui correspond à l'intersection du module à l'origine avec le seuil à l'infini.

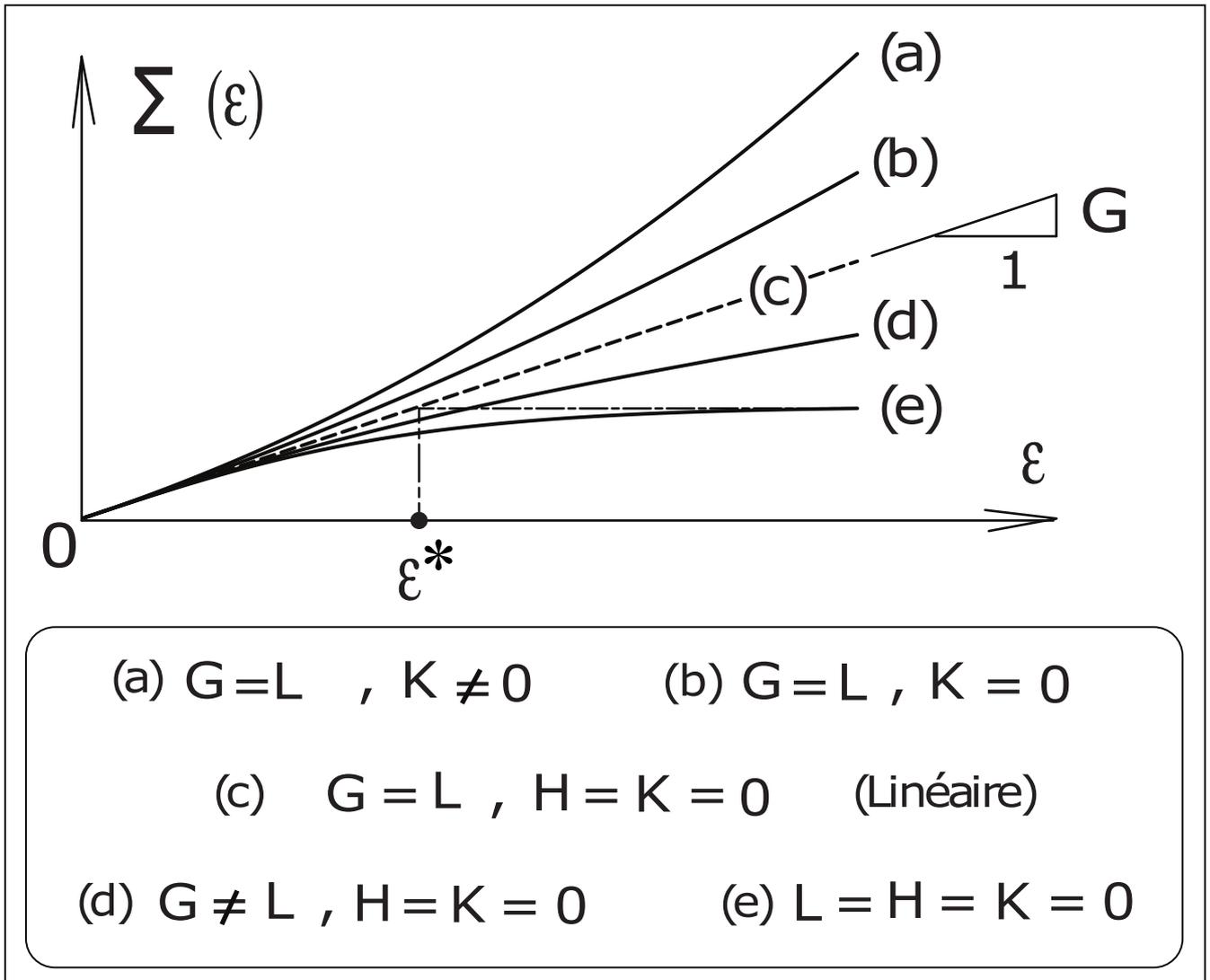


FIGURE 8.1 – Impact des paramètres  $G, L, \varepsilon^*, K$  et  $H$  sur la fonction de charge 8.1 [16]

Les paramètres matériaux seront évalués grâce aux résultats des essais de tractions et l'ensemble sera présenté au chapitre 10.

## 8.2.2 Modèle pour la décharge

La forme typique d'une décharge est donnée au chapitre 2 ou sur la Figure 3.1 [17]. Pour décrire le comportement en décharge, nous proposons une loi générique constituée d'une somme de fonction exponentielle ou série de Prony. Cette méthode est habituellement utilisée pour décrire des évolutions en fonction du temps de la contrainte dans le cas des matériaux viscoélastiques [12], [49], [25]. Dans notre cas, la contrainte  $\Sigma$  évolue en fonction de la déformation  $\varepsilon$  et la loi s'écrit :

$$\Sigma(\varepsilon) = \sum_{i=1}^N A_i e^{\frac{\varepsilon}{\alpha_i}} + A_0 \text{ avec } \alpha_i = \frac{\alpha}{i} \quad (8.3)$$

Où les  $A_i$  sont des paramètres matériaux de la loi. Et  $\alpha$  et  $N$  sont des constantes indépendantes du matériau. Pour décrire une branche de décharge, il est nécessaire d'identifier le vecteur des paramètres  $A_i$ , pour les  $N + 1$  couples de mesures  $(\Sigma_i, \varepsilon_i)$ , tels que :

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & e^{\frac{\varepsilon_1}{\alpha_1}} & \cdots & e^{\frac{\varepsilon_1}{\alpha_N}} \\ 1 & e^{\frac{\varepsilon_2}{\alpha_1}} & \cdots & e^{\frac{\varepsilon_2}{\alpha_N}} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 1 & e^{\frac{\varepsilon_{N+1}}{\alpha_1}} & \cdots & e^{\frac{\varepsilon_{N+1}}{\alpha_N}} \end{pmatrix}}_{\mathbf{B}} \underbrace{\begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ \vdots \\ A_N \end{pmatrix}}_X = \underbrace{\begin{pmatrix} \Sigma(\varepsilon_1) \\ \Sigma(\varepsilon_2) \\ \vdots \\ \Sigma(\varepsilon_{N+1}) \end{pmatrix}}_Y \quad (8.4)$$

Ce système peut être résolu par une inversion de matrice :

$$X = \mathbf{B}^{-1}Y$$

## 8.3 Modélisation des décharges

### 8.3.1 Définition et méthode adoptées

Afin de paramétrer la décharge, un changement de repère est réalisé avec les nouvelles variables définies ainsi :

$$\begin{aligned} \Delta\Sigma &= \Sigma - \Sigma_R \\ \Delta\varepsilon &= \varepsilon - \varepsilon_R \end{aligned} \quad (8.5)$$

Où  $\Sigma_R$  et  $\varepsilon_R$  représentent respectivement la contrainte et la déformation au point d'inversion (Fig. 8.2).

En injectant 8.5 dans l'équation 8.4, elle devient :

$$\begin{pmatrix} 1 & e^{\frac{\Delta\varepsilon_1}{\alpha_1}} & \cdots & e^{\frac{\Delta\varepsilon_1}{\alpha_N}} \\ 1 & e^{\frac{\Delta\varepsilon_2}{\alpha_1}} & \cdots & e^{\frac{\Delta\varepsilon_2}{\alpha_N}} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 1 & e^{\frac{\Delta\varepsilon_{N+1}}{\alpha_1}} & \cdots & e^{\frac{\Delta\varepsilon_{N+1}}{\alpha_N}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ \vdots \\ A_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta\Sigma_1 \\ \Delta\Sigma_2 \\ \vdots \\ \Delta\Sigma_{N+1} \end{pmatrix} \quad (8.6)$$

Une fois les paramètres  $A_i$  calculés, pour obtenir la contrainte  $\Sigma$  dans les axes d'origine  $\{\Sigma, \varepsilon\}$ , la fonction de décharge devient :

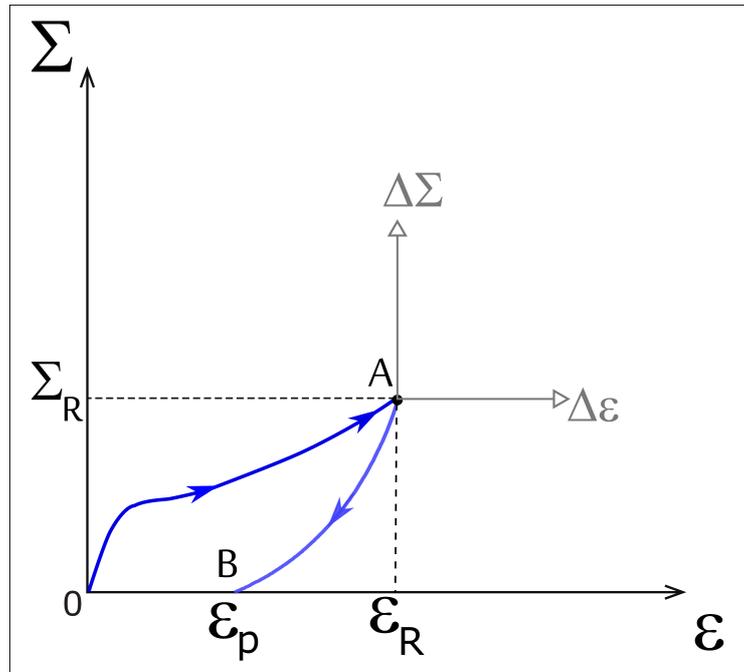


FIGURE 8.2 – Illustration de la définition de la décharge

$$\Sigma = \Sigma_R + \sum_{i=1}^N A_i e^{\frac{\Delta \varepsilon_i}{\alpha_i}} + A_0 \quad \text{et} \quad \alpha_i = \frac{\alpha}{i} \quad (8.7)$$

A une décharge donnée, réalisée avec une contrainte à l'inversion  $\Sigma_R$  donnée, correspond un vecteur de paramètres  $A_i$  identifié. Par conséquent, ce vecteur de paramètres  $A_i$  n'est valable que pour cette seule courbe de décharge.

Notre objectif est de se donner une valeur de contrainte à l'inversion  $\Sigma_R$  et de chercher les valeurs des composantes  $A_i$  du vecteur de paramètres correspondant à la décharge en ce point d'inversion particulier.

Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de caractériser l'ensemble des évolutions des paramètres  $A_i$  en fonction de la contrainte à l'inversion  $\Sigma_R$ , notées  $A_i(\Sigma_R)$  et d'en déduire les valeurs des paramètres  $A_i$  pour une contrainte donnée à l'inversion. La Figure 8.3 illustre cette méthode, pour un paramètre donné  $A_i$ . Un ensemble de points de mesure est réalisé préalablement et correspond à une courbe  $A_i(\Sigma_R)$ . Cette courbe est ensuite exploitée pour extrapoler ou interpoler des valeurs particulières du paramètre  $A_i$ , comme par exemple  $A_i^1$  ou  $A_i^2$ .

La définition et la méthode adoptées pour modéliser une décharge, à partir d'une contrainte à l'inversion donnée, seront complétées dans la suite de ce chapitre par le choix des valeurs des constantes  $\alpha$  et  $N$  et par le choix du nombre de points optimal pour définir les courbes  $A_i(\Sigma_R)$ .

### 8.3.2 Choix de la valeur de la constante $N$

Les paramètres  $A_i$  de la fonction de décharge dépendent du choix préalable des constantes  $\alpha$  et  $N$ . Pour étudier l'impact des valeurs de ces constantes, considérons la modélisation de la courbe expérimentale de décharge de la Figure 8.4. Adoptons, pour cela, la valeur de  $\alpha = 7$  et

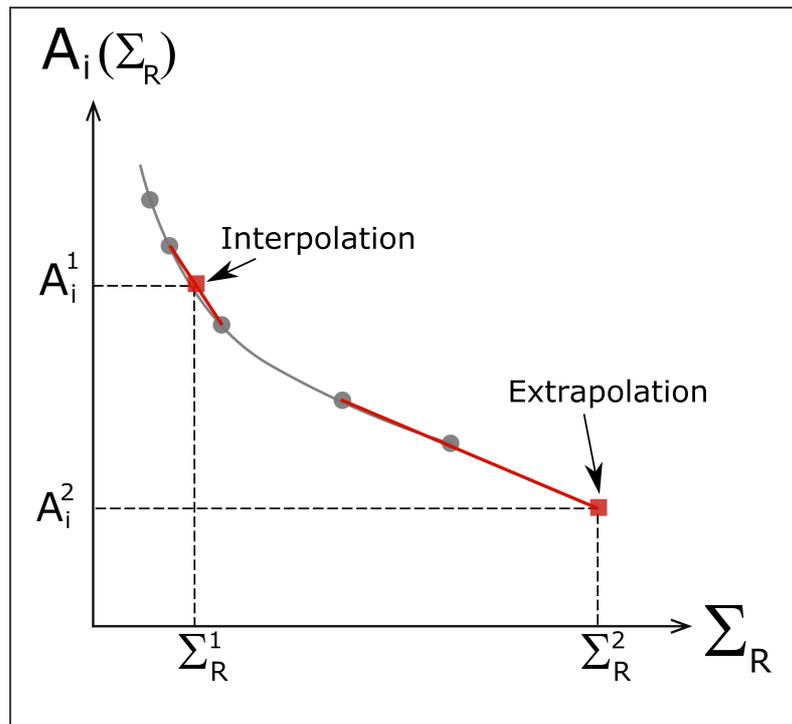


FIGURE 8.3 – Illustration de la méthode de détermination d'un paramètre  $A_i$  pour une valeur donnée de  $\Sigma_R$  : Les ronds correspondent aux points de mesures et les carrés à des points calculés

trois valeurs de  $N + 1$ , soient : 2, 3 et 10.

Ainsi, l'utilisateur a besoin de sélectionner  $N + 1$  points de mesure sur la courbe expérimentale pour résoudre l'équation (8.6) et déterminer le vecteur de paramètres  $A_i$  nécessaire à la modélisation de cette courbe expérimentale. Trois cas  $N + 1 = 2, 3$  et 10 ont été envisagés sur la Figure 8.4(a). Les points sélectionnés sont répartis de manière équidistante sur l'intervalle de déformation, qui couvre l'ensemble de la courbe expérimentale de décharge. Il convient que les points aux extrémités de la courbe soient considérés pour chacun des trois cas envisagés pour  $N + 1$  ; ceci est illustré par la Figure 8.4(a).

Les modélisations obtenues pour chacun des cas envisagés pour  $N + 1$ , sont comparées à la courbe expérimentale d'origine. La Figure 8.4(b) donne la comparaison modélisation-expérience pour  $N + 1 = 2$  et  $N + 1 = 3$ . La Figure 8.4(c) donne la comparaison modélisation-expérience pour  $N + 1 = 10$ . Le nombre  $N + 1$  de points de mesure qui caractérise la courbe expérimentale dans le processus de détermination du vecteur de paramètres  $A_i$  a bien un impact sur la précision de modélisation de la décharge.

Ainsi pour  $N + 1 = 2$ , on ne reproduit pas assez la courbure expérimentale ; en effet, le résultat tend à devenir une droite passant par les deux extrémités. Pour  $N + 1 = 10$ , l'information est surabondante et la modélisation s'éloigne de la courbe expérimentale ; en effet, cela produit des oscillations autour de la courbe expérimentale 8.4(c). Pour  $N + 1 = 3$  le modèle de décharge reproduit convenablement la courbe expérimentale 8.4(b). Il existe donc un nombre  $N + 1 = 3$  optimal pour la détermination des  $A_i$ . Ainsi, pour  $N = 2$  et compte tenu de la relation (8.6), la modélisation de la courbe de décharge met en jeu trois paramètres  $A_0, A_1, A_2$  et nécessite trois points de mesure sur la courbe de décharge. Dans la suite nous adopterons ces valeurs pour l'ensemble de nos modélisations.

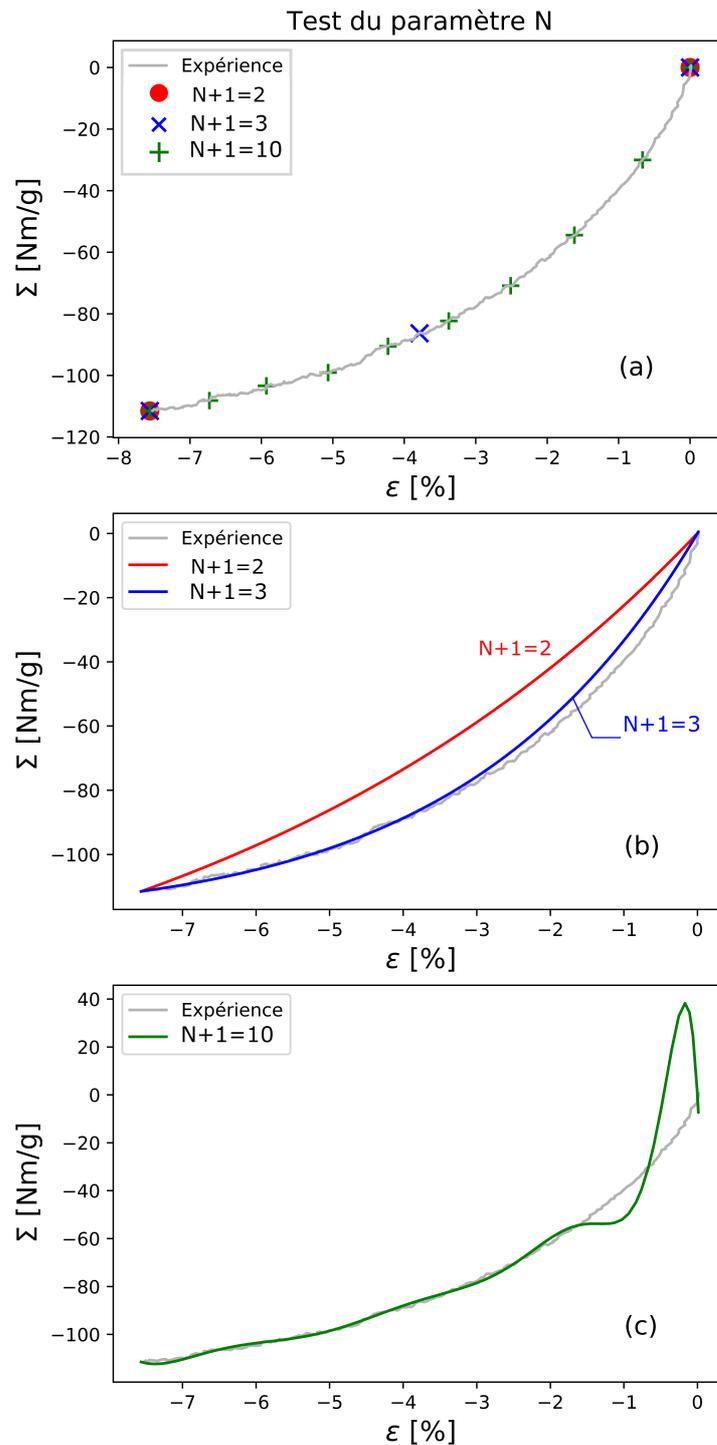


FIGURE 8.4 – Modélisation d’une courbe de décharge : (a) Sélection de  $N + 1$  points pour la fonction de décharge, (b) Résultat de modélisation pour  $N + 1 = 2$  et  $N + 1 = 3$ , (c) Résultat de la modélisation pour  $N + 1 = 10$

### 8.3.3 Choix de la valeur de la constante $\alpha$

De la même manière que pour la constante  $N$ , une étude de sensibilité est faite pour la constante  $\alpha$  sur la base d’une comparaison avec la même courbe expérimentale de décharge. Pour cela, nous adoptons la valeur de  $N = 2$  et trois valeurs de  $\alpha$  : 2, 7 et 20.

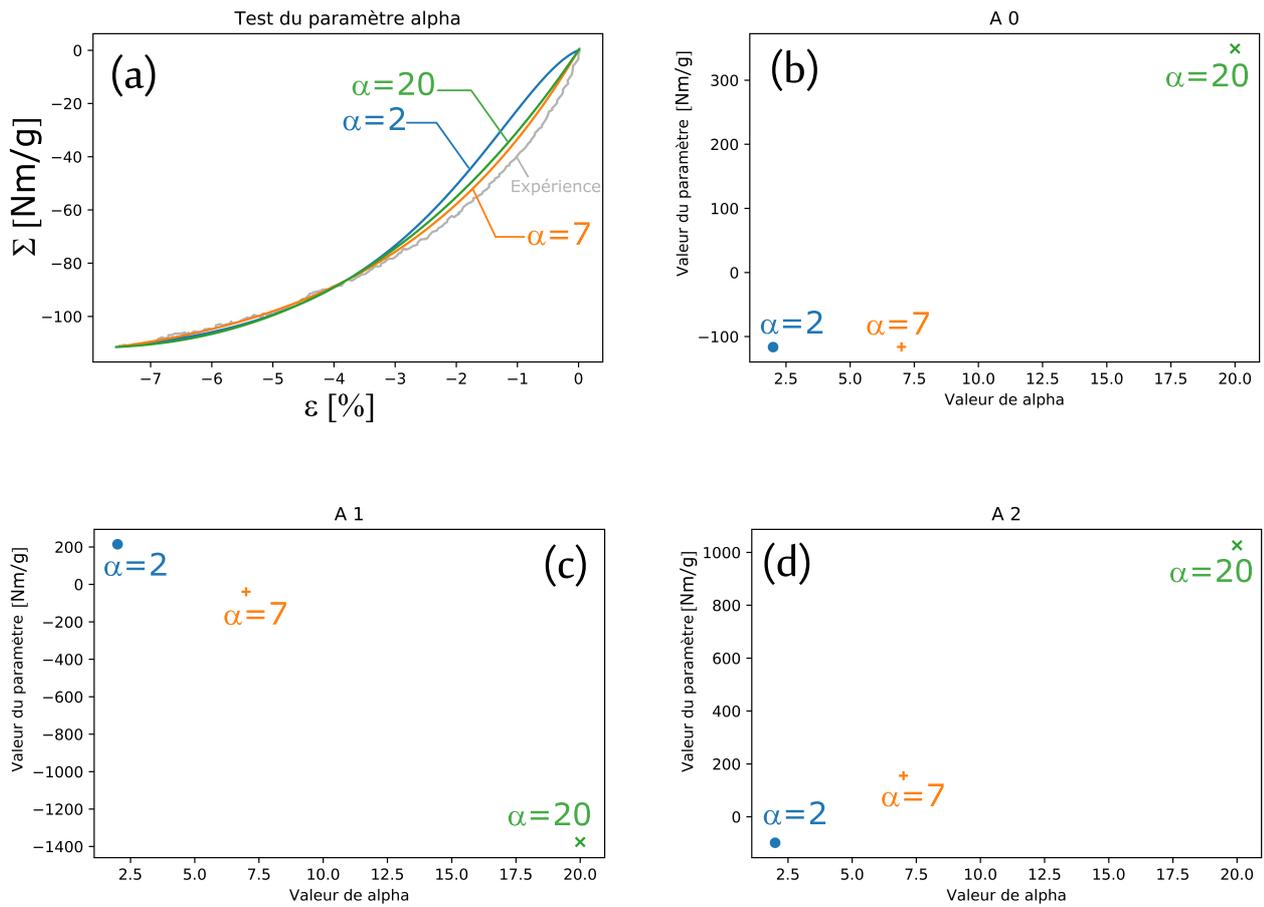


FIGURE 8.5 – Modélisation d’une courbe de décharge et influence de la constante  $\alpha$  : (a) Comparaisons modélisation-expérience, (b)(c)(d) Evolution des paramètres  $A_i$

Dans ce cas, le nombre de point dans la décharge et donc le nombre de paramètres  $A_i$  est fixé et seul le paramètre  $\alpha$  varie. Comme précédemment le système explicité en (8.6) est résolu trois fois pour chaque valeur de  $\alpha$ . Trois jeux de paramètre  $A_i$  sont obtenus et l'évolution de la valeur des  $A_i$  est visible en Figure 8.5(b)(c)(d). La comparaison modélisation- expérience avec les trois valeurs de la constante  $\alpha$  est donné sur Figure 8.5(a).

Pour  $\alpha = 2$  la modélisation ne donne pas une allure aussi précise que pour des valeurs de  $\alpha$  plus élevé Figure 8.5(a). Comme pour la constante  $N$ , il existe une valeur optimale de  $\alpha$ . Dans la suite nous adopterons la valeur  $\alpha = 7$  pour modéliser les décharges. Cette valeur donne une modélisation satisfaisante avec une précision optimale.

### 8.3.4 Choix du nombre de décharge

Les courbes  $A_i(\Sigma_R)$  permettent l'extrapolation ou l'interpolation des valeurs des paramètres  $A_i$  correspondants à des valeurs particulières des contraintes à l'inversion  $\Sigma_R$ . Par conséquent, la précision de ces courbes peut influencer la précision globale de la modélisation des décharges. Alors, quel est le nombre de points expérimental optimal pour définir ces courbes  $A_i(\Sigma_R)$  ?

Pour répondre à cette question, un essai de traction avec neuf décharges a été réalisé dans le sens chaîne sur le matériau non confidentiel (9017E25) (Figure 8.6(a)). Chaque décharge a fait l'objet d'une identification des trois paramètres  $A_0$ ,  $A_1$  et  $A_2$ . L'évolution des valeurs respectives de ces paramètres est données sur la 8.6(b),(c) et (d). Avec ces neuf décharges et leurs valeurs de paramètres, on définit trois jeux de données :

- jeu 1 : décharges  $n^\circ 1,4$  et 7 (marqueur rond Figure 8.6)
- jeu 2 : décharges  $n^\circ 2,5$  et 8 (marqueur triangle Figure 8.6)
- jeu 3 : décharges  $n^\circ 3,6$  et 9 (marqueur carré Figure 8.6)

Le jeu 3 sera considéré comme un jeu de contrôle qui donne trois courbes de décharge de référence dans le diagramme  $\{\Sigma, \varepsilon\}$  et trois évolutions de référence des paramètres  $A_i$ , notés  $A_i^3(\Sigma_R)$ .

Les jeux 1 et 2 sont utilisés comme référence pour le calcul des paramètres  $A_i$  correspondant aux points d'inversions du jeu 3 de contrôle. Trois séries de courbes  $A_i(\Sigma_R)$  sont générées à partir des deux jeux 1 et 2. La première série correspond au jeu 1, la deuxième série correspond au jeu 2 et la troisième série correspond aux deux jeux réunis. Ces jeux seront notés respectivement :  $A_i^1(\Sigma_R)$ ,  $A_i^2(\Sigma_R)$  et  $A_i^{1-2}(\Sigma_R)$ .

La comparaison de  $A_i^3(\Sigma_R)$  avec les paramètres calculés à partir de  $A_i^1(\Sigma_R)$  et  $A_i^2(\Sigma_R)$  permet d'étudier l'influence de la position des décharges des jeux de références sur la modélisation finale du jeu de contrôle.

La comparaison de  $A_i^3(\Sigma_R)$  avec les paramètres calculés à partir de  $A_i^{1-2}(\Sigma_R)$  et  $A_i^1(\Sigma_R)$  ou  $A_i^2(\Sigma_R)$  permet d'étudier l'influence du nombre de points des courbes de références sur la modélisation finale du jeu de contrôle.

Les Figures 8.7(a) et (b) montrent le processus de calcul du paramètre  $A_0$ , respectivement à partir des courbes  $A_0^1(\Sigma_R)$  et  $A_0^2(\Sigma_R)$ . Les valeurs des  $A_0$  sont indiquées respectivement avec des ronds vides et des triangles vides. La Figure 8.7(c) compare ces deux prévisions à la valeur de  $A_0$  du jeu 3 de contrôle. Ce résultat montre une bonne correspondance des valeurs du paramètre  $A_0$  entre les valeurs calculées à partir de deux jeux de données différents et les valeurs expérimentales. Nous pouvons faire le même constat pour les paramètres  $A_1$  et  $A_2$  dont les comparaisons prévisions et valeurs issues du jeu 3 de contrôle, sont données respectivement sur les Figures

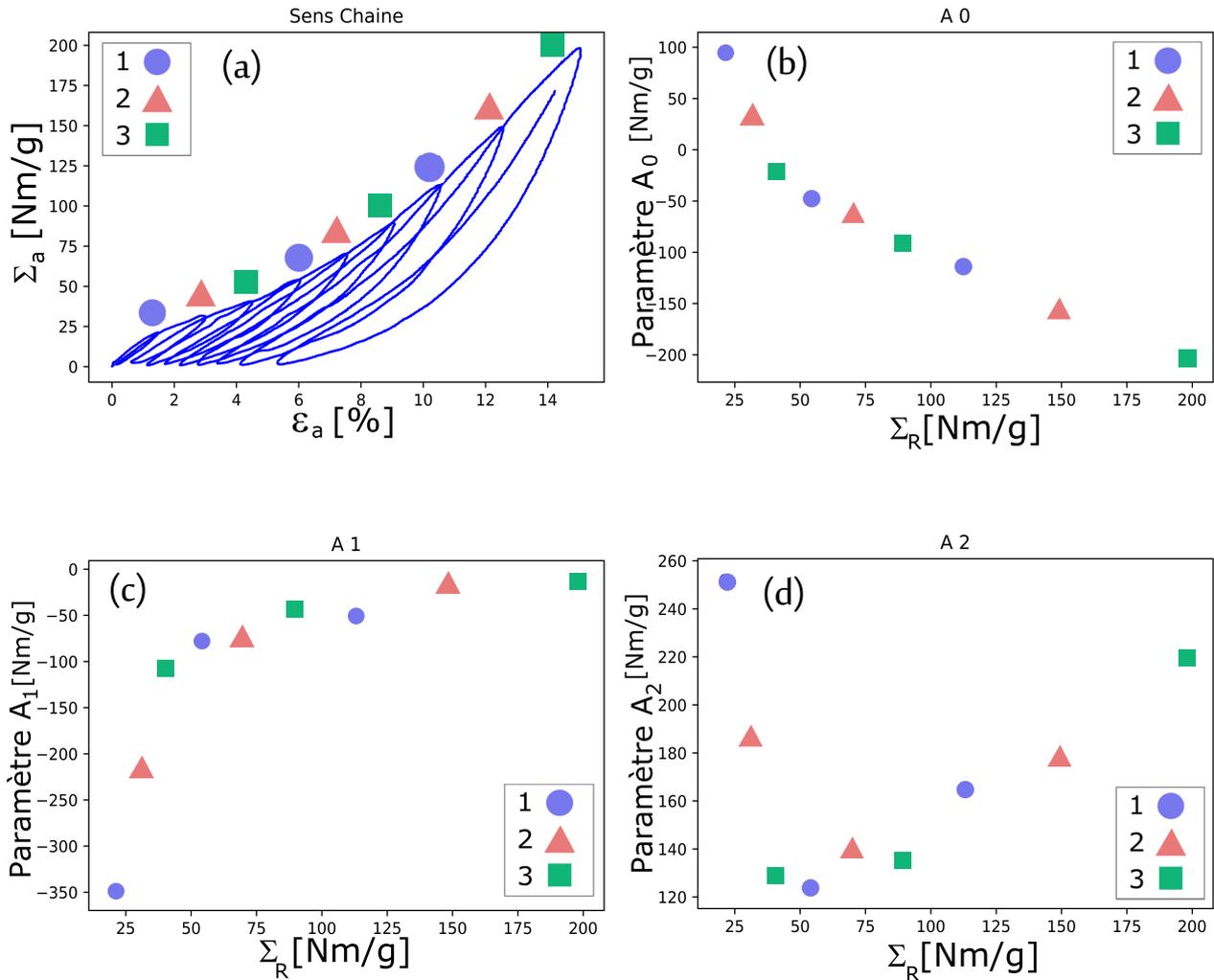


FIGURE 8.6 – Résultat de traction cyclique dans le sens chaîne sur le tissu 9017 E25 : (a) Courbe contrainte/déformation pour le test à 9 décharges, (b) Evolution de  $A_0$  en fonction de la contrainte à l'inversion  $\Sigma_R$ , (c) Evolution de  $A_1$  en fonction de la contrainte à l'inversion  $\Sigma_R$  (d) Evolution de  $A_2$  en fonction de la contrainte à l'inversion  $\Sigma_R$

8.8(a) et (b). Ces résultats indiquent que les positions des décharges adoptées pour définir le jeu de référence ont peu d'influence sur les valeurs finales des paramètres  $A_i$ .

La Figure 8.9 donne pour les trois paramètres  $A_0$ ,  $A_1$  et  $A_2$ , la comparaison des valeurs calculées à partir des courbes  $A_i^{1-2}(\Sigma_R)$  et les valeurs expérimentales issues de  $A_i^3(\Sigma_R)$ . Malgré un jeu de référence défini par six points sur les courbes  $A_i^{1-2}(\Sigma_R)$ , les valeurs des prévisions des paramètres  $A_i$  correspondants au jeu 3 de contrôle, ne présentent pas une amélioration notable par rapport aux résultats précédents, obtenus avec trois points sur les courbes  $A_i^1(\Sigma_R)$  ou  $A_i^2(\Sigma_R)$ .

Ainsi, nous pouvons conclure qu'un nombre optimal de trois points pour définir les courbes de références  $A_i(\Sigma_R)$  est suffisant. Ceci se traduit dans la pratique par une traction avec trois décharges. Aucune règle particulière de répartition des décharges n'est nécessaire. Néanmoins, nous adopterons dans la suite une répartition homogène sur l'ensemble du domaine de déformation.

### 8.3.5 Validation de la méthode

Les Figures 8.10 et 8.11 donnent des comparaisons modélisation-expérience, dans des diagrammes  $\{\Sigma, \varepsilon\}$ , avec des décharges issues du jeu 3 de contrôle et leurs modélisations respectives issues du jeu 1, du jeu 2 et du jeu 1-2. Ces résultats valident notre démarche, car d'une part la comparaison des Figures 8.10 (a) et (b) ne donne pas de différences significatives. D'autre part, la Figure 8.11 montre que l'augmentation du nombre de points des courbes  $A_i^{1-2}(\Sigma_R)$ , n'apporte pas un avantage sensible.

Ainsi nous pouvons conclure qu'un nombre optimal de trois points pour définir les courbes de références  $A_i(\Sigma_R)$  est suffisant. Ce qui se traduit par trois décharges uniformément réparties dans le domaine de déformation. Enfin, nous adopterons les valeurs des constantes  $N = 2$  et  $\alpha = 7$ .

### 8.3.6 Contrainte limite d'utilisation

Les utilisateurs de matériaux tissés et notamment les concepteurs de Kites géants pourront choisir leur propre valeur de déformation résiduelle dans l'intervalle de déformations résiduelles conventionnelles qui a été défini entre 0,4% et 4%. La contrainte limite d'utilisation sera alors définie comme la contrainte correspondante à la déformation résiduelle limite adoptée et qui résulte d'une décharge. Il s'agit, par conséquent, dans ce paragraphe de décrire la méthode qui permet de définir une contrainte limite d'utilisation à partir d'une déformation résiduelle donnée.

Nous notons l'expression de la contrainte en première charge définie par la relation 8.1, comme suit :

$$\Sigma(\varepsilon) = c(\varepsilon) \quad (8.8)$$

La loi de décharge définie en section 8.2.2 peut être vue comme une fonction mathématique  $d(\Delta\varepsilon, \Sigma_R)$  qui permet de relier la contrainte massique de décharge  $\Sigma_2$  à la déformation de décharge  $\Delta\varepsilon$ , à partir du point d'inversion  $(\Sigma_R, \varepsilon_R)$ , soit :

$$\Sigma_2 = d(\Delta\varepsilon, \Sigma_R) + \Sigma_R \quad (8.9)$$

En injectant l'équation (8.8) dans l'équation (8.9), il est possible d'avoir :

$$\Sigma_2 = d(\Delta\varepsilon, c(\varepsilon_R)) + c(\varepsilon_R) \quad (8.10)$$

Pour obtenir la contrainte limite d'utilisation qui correspond à une déformation résiduelle  $\varepsilon_p$ , il faut déterminer la déformation  $\varepsilon_R$  qui permet à l'équation (8.10) de remplir la condition suivante :

$$\Sigma_2 = d(\varepsilon_p - \varepsilon_R, c(\varepsilon_R)) + c(\varepsilon_R) = 0 \quad (8.11)$$

Où  $\varepsilon_R$  est la déformation à l'inversion qui donne, pour une déformation résiduelle limite  $\varepsilon_p$  donnée, une contrainte de décharge  $\Sigma_2$  nulle. Cette recherche de déformation à l'inversion  $\varepsilon_R$  se fera selon l'algorithme visible en figure 8.12. L'algorithme est le suivant : la valeur de  $\varepsilon_R$  est pré-supposée et un périmètre de recherche autour de cette valeur est renseigné  $\Delta\varepsilon_R$ <sup>1</sup>. A chaque itération, le point d'inversion se rapproche de la solution et le périmètre de recherche s'affine. Il est difficile de satisfaire la condition définie à l'équation 8.11; cette dernière admet donc une erreur de recherche  $\delta$ . L'équation devient donc :

---

1. Si aucune valeur ne peut être supposée, une solution est de renseigner l'algorithme avec les valeurs :  $\varepsilon_R = \Delta\varepsilon_R = \frac{\varepsilon_{UTS}}{2}$ . Ainsi l'ensemble des points de la courbe de première charge est candidat pour être la limite d'élasticité recherchée.

$$0 < \Sigma_2 = d(\varepsilon_p - \varepsilon_R, c(\varepsilon_R)) + c(\varepsilon_R) < \delta \quad (8.12)$$

Où  $\delta \in [0; \frac{\Sigma_{UTS}}{20}]$  soit une erreur maximum de 5% de la valeur de la contrainte à la rupture.

Une fois la déformation  $\varepsilon_R$  ainsi calculée, la contrainte limite d'utilisation, à partir d'une déformation résiduelle choisie par le concepteur  $\varepsilon_p$ , sera donnée par :

$$\Sigma_Y(\varepsilon_p) = c(\varepsilon_R) \quad (8.13)$$

## 8.4 Cas de la traction biaxiale

Les matériaux des kites présentent des épaisseurs très faibles par rapport à la taille globale des voiles et par rapport aux rayons de courbure typiques de ces structures. Par ailleurs, la forme de la voile est essentiellement liée à sa rigidité et à sa déformation de surface. En comparaison, sa rigidité en flexion est relativement faible et le cisaillement dans l'épaisseur a des effets négligeables sur la forme globale de la voile. Ainsi, le matériau tissé sera décrit comme une membrane et non comme une coque. Une hypothèse de contrainte plane est adoptée, par rapport à l'axe perpendiculaire au plan de la membrane. Cette hypothèse statique est complétée par une hypothèse cinématique, qui consiste à négliger l'effet de contraction de l'épaisseur, ce qui revient à considérer un coefficient de Poisson nul dans l'épaisseur de la membrane. Ainsi, les tenseurs de contrainte et de déformation sont des tenseurs dans l'espace vectoriel bidimensionnel du plan tangent à la surface de la membrane ; dans le cas de la traction biaxiale, ceci est le plan de la membrane.

Ainsi, dans le cas de la traction biaxiale dans les axes du matériau, les tenseurs de contrainte et de déformation s'expriment à l'aide de leurs composantes respectives dans le sens chaîne et trame  $(\Sigma_C, \Sigma_T)$  et  $(\varepsilon_C, \varepsilon_T)$ , telles que :

$$\begin{aligned} \underline{\underline{\Sigma}} &= \begin{pmatrix} \Sigma_C & 0 \\ 0 & \Sigma_T \end{pmatrix} \\ \underline{\underline{\varepsilon}} &= \begin{pmatrix} \varepsilon_C & 0 \\ 0 & \varepsilon_T \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (8.14)$$

Nous adoptons un invariant de contrainte et un invariant de déformation, notés respectivement  $R_\Sigma$  et  $R_\varepsilon$ , basés sur une norme classique des tenseurs d'ordre deux, tels que :

$$\begin{aligned} R_\Sigma &= \sqrt{\Sigma_C^2 + \Sigma_T^2} = \sqrt{Tr(\underline{\underline{\Sigma}} \cdot \underline{\underline{\Sigma}}^T)} \\ R_\varepsilon &= \sqrt{\varepsilon_C^2 + \varepsilon_T^2} = \sqrt{Tr(\underline{\underline{\varepsilon}} \cdot \underline{\underline{\varepsilon}}^T)} \end{aligned} \quad (8.15)$$

Puisque les chargements bi-axiaux considérés sont radiaux ou proportionnels, le comportement en traction biaxiale peut être caractérisé, de façon similaire au cas de la traction simple, par un diagramme rhéologique contrainte-déformation, défini par :  $(R_\Sigma, R_\varepsilon)$ . Les modèles, définitions et méthodes adoptés précédemment dans le cas de la traction simple seront mis en œuvre dans le diagramme rhéologique  $(R_\Sigma, R_\varepsilon)$ , dans le cas de la traction biaxiale. Ceci concerne la modélisation de la première charge, la modélisation de la décharge ainsi que la méthode de détection d'une contrainte limite d'utilisation.

## 8.5 Conclusion

L'analyse des résultats expérimentaux en traction uniaxiale et biaxiale permet de synthétiser le comportement complexe des tissus au travers des points qualitatifs suivants : un tissu a la capacité de mémoriser la sollicitation maximale subie sous la forme d'une déformation permanente de la maille élémentaire. Globalement le comportement mécanique général des matériaux tissés est irréversible et non linéaire à la charge comme à la décharge. La notion d'élasticité et l'hypothèse de décharge élastique, adoptées dans le cas des matériaux métalliques, ne sont plus pertinentes dans ce cas. Face à cette richesse de comportement des matériaux tissés, des modèles de première charge et de décharge ont été proposés dans un espace contrainte/déformation, qu'il s'agisse de sollicitations 1D ou 2D. Sur cette base, une méthode de détection de la contrainte limite d'utilisation est fournie au concepteur de sorte qu'il puisse exprimer en contrainte maximale, les conditions de service du matériau tissés et les comparer à cette contrainte limite. Cette méthode est basée sur la donnée préalable d'une valeur de déformation résiduelle maximale ciblée par le concepteur.

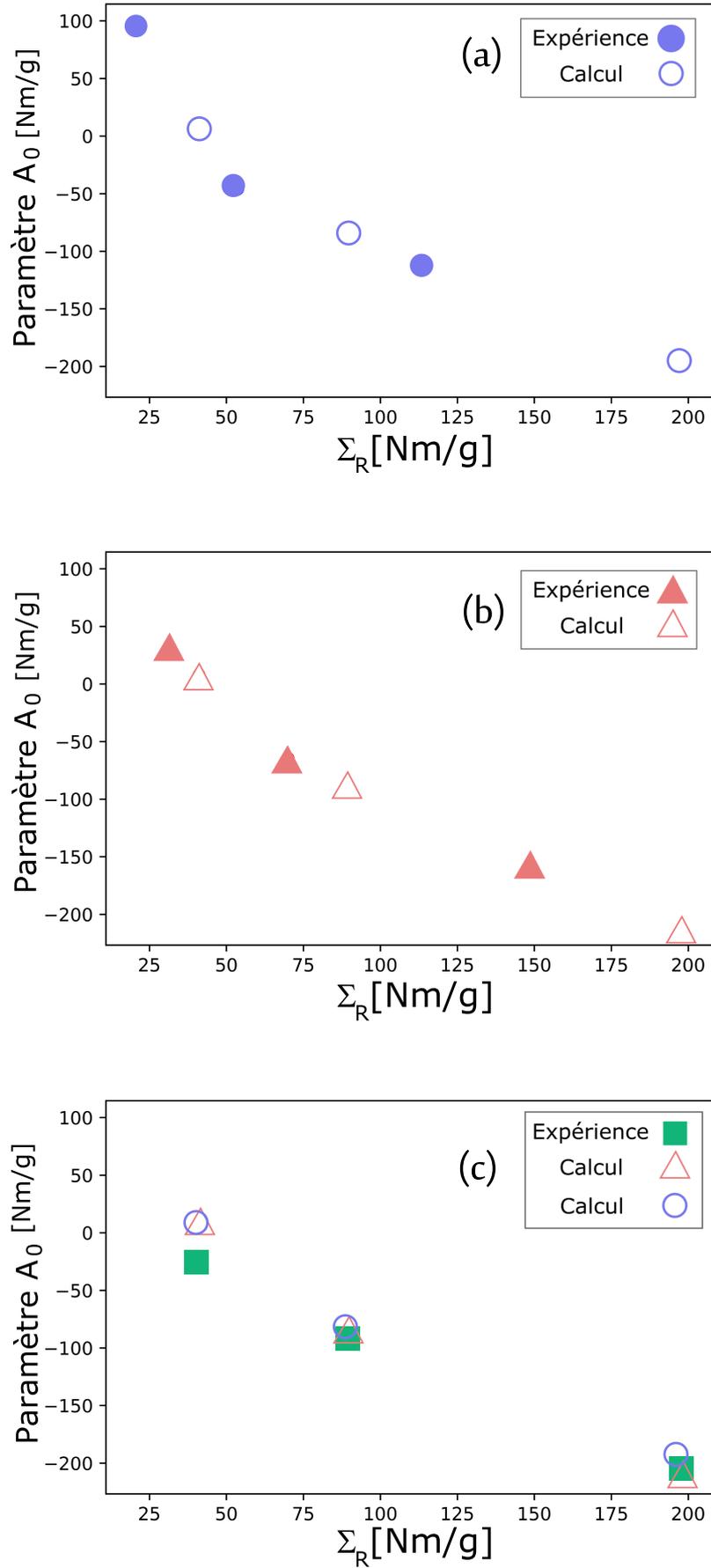


FIGURE 8.7 – 9017 E25 - Pour l'essai à 9 décharges - Calcul de  $A_0$  en fonction de  $\Sigma_R$  (a) A partir du jeu 1, (b) A partir du jeu 2, (c) Comparaison avec le jeu 3 de contrôle

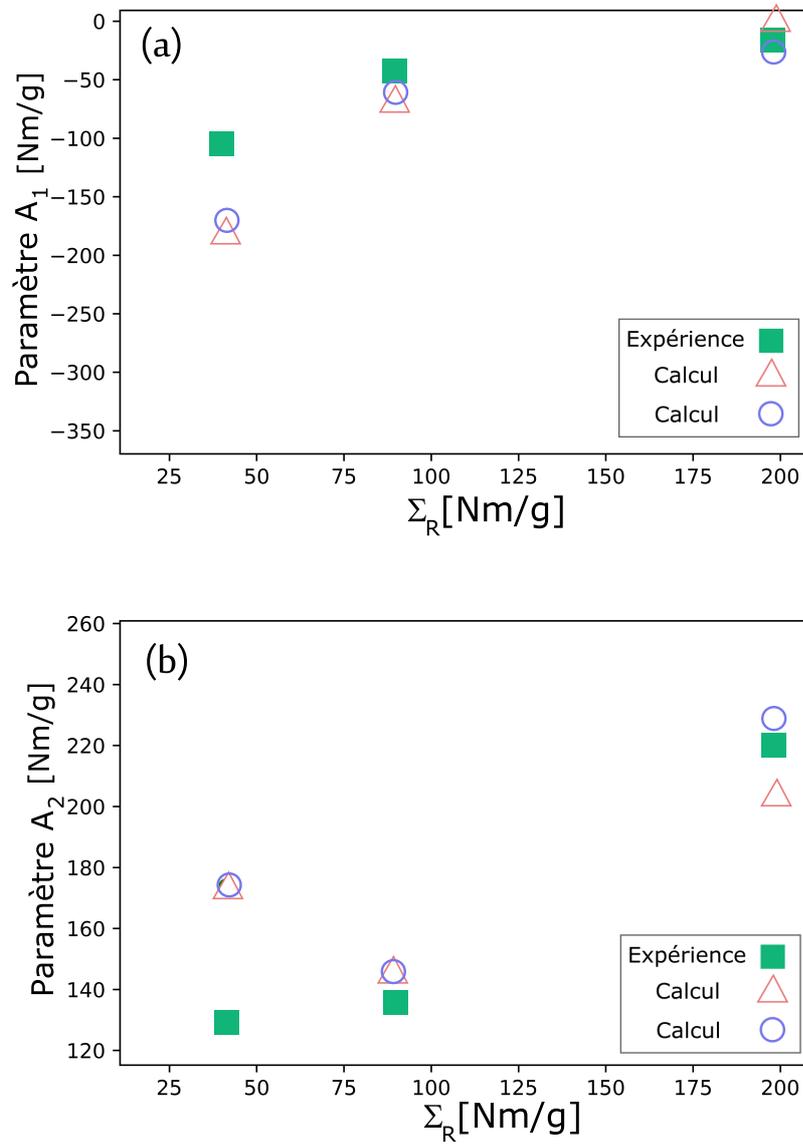


FIGURE 8.8 – 9017 E25 - Pour l'essai à 9 décharges - Calcul des paramètres à partir des jeux 1 et 2 et comparaison avec le jeu 3 de contrôle (a)  $A_1$  en fonction de  $\Sigma_R$ , (b)  $A_2$  en fonction de  $\Sigma_R$

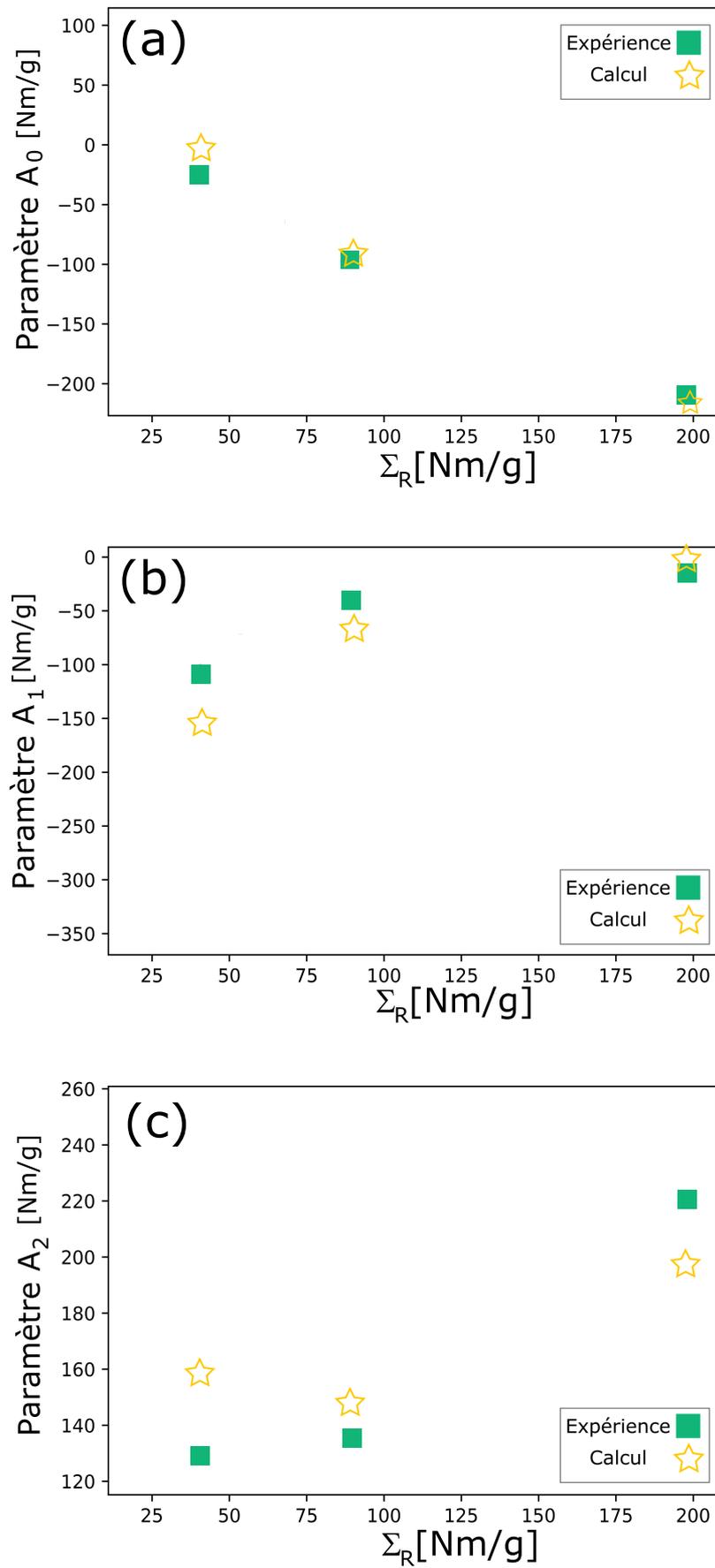


FIGURE 8.9 – 9017 E25 - Calcul des paramètres à partir des jeux 1 et 2 réunis et comparaison avec le jeu 3 de contrôle (a)  $A_0$ , (b)  $A_1$ , (c)  $A_2$

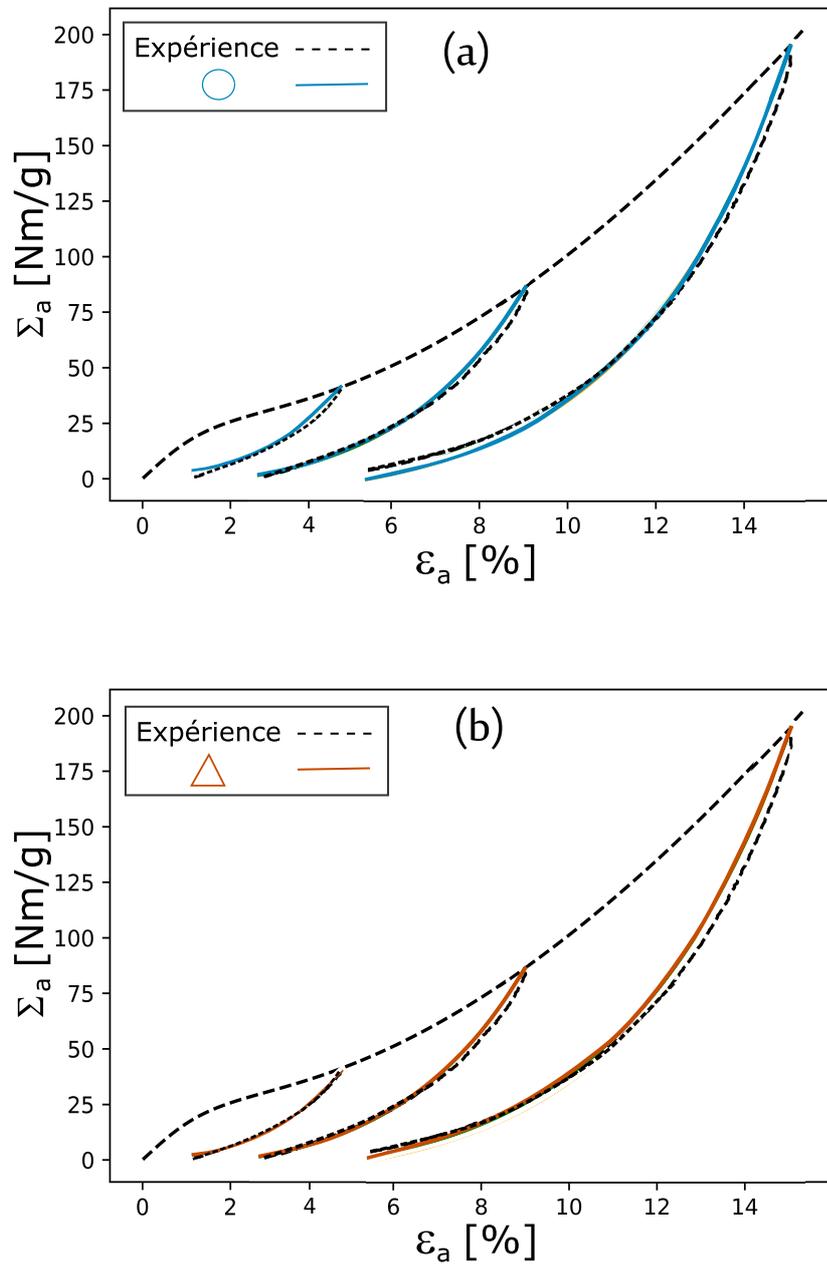


FIGURE 8.10 – 9017 E25 - Comparaison modèle-expérience pour (a) les jeux 1 et 3, (b) les jeux 2 et 3

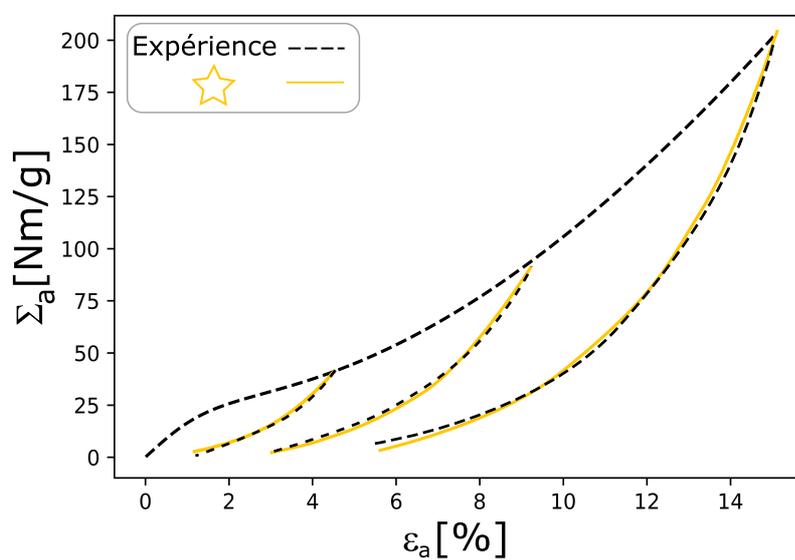
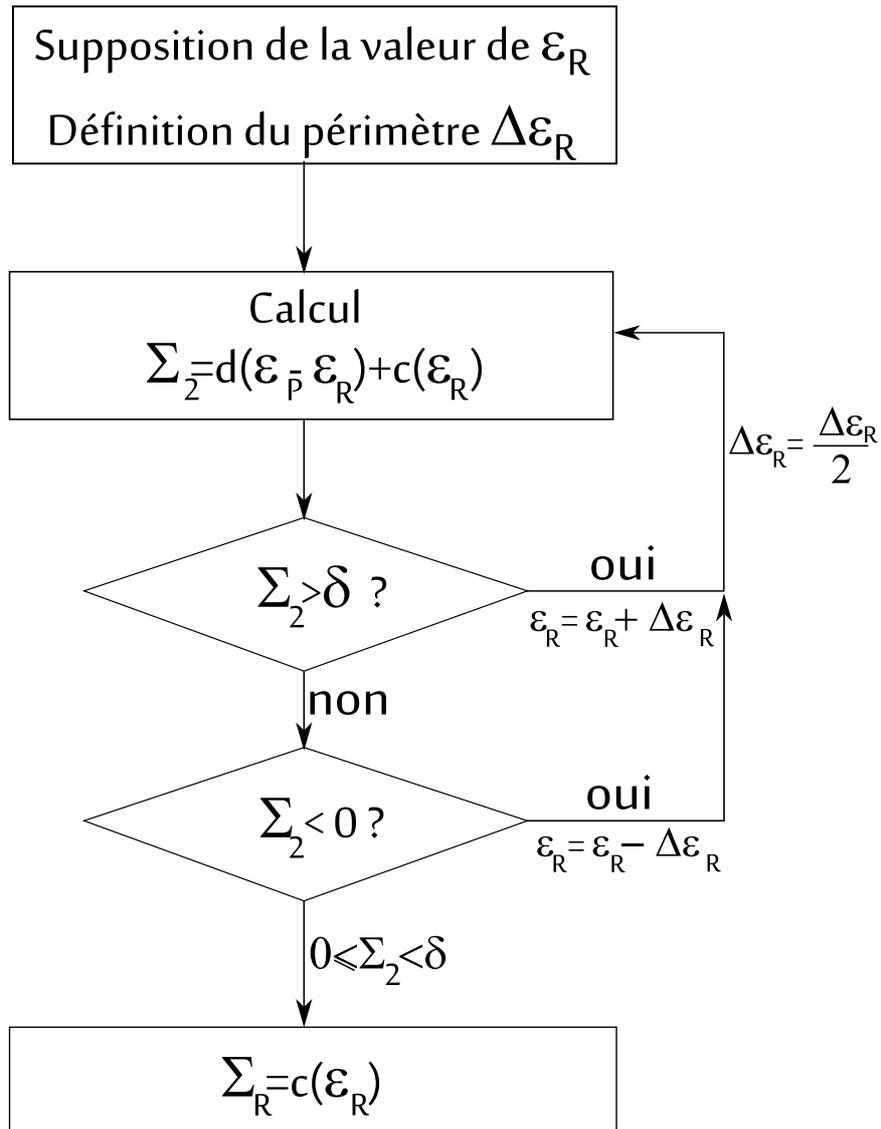


FIGURE 8.11 – 9017 E25 - Comparaison modèle-expérience pour le jeu 1-2 avec 6 décharges et le jeu 3

FIGURE 8.12 – Logigramme de l’algorithme de recherche de la déformation  $\varepsilon_R$  de l’équation 8.11

# Chapitre 9

## Critère de limite d'utilisation

Nous proposons, dans ce chapitre, un critère original de limite d'utilisation d'un matériau tissé, exprimé en contrainte. Ce critère est adapté aux sollicitations de traction simple dans les axes et hors axes, ainsi qu'aux sollicitations biaxiales dans les axes. Dans ce chapitre, les propriétés essentielles de ce critère sont présentées. Dans la suite, ce critère sera adopté pour l'ensemble des matériaux étudiés dans le cadre de ce travail et ses capacités de modélisation seront évaluées en traction simple et en traction biaxiale.

### 9.1 Préambule

Les critères de type Tsai Wu modifiés, présentés dans la section 2.4 du chapitre 2, donnent de bonnes prédictions dans le cas de la traction simple, dans les axes et hors axes. Cependant, leurs prévisions dans le cas de la traction biaxiale sont moins pertinentes. Cet aspect est illustré par les Figures 9.1 et 9.2, dans le cas du critère de Norris et du matériau *9017E25*, pour des contraintes limites correspondantes à différentes valeurs de déformation résiduelle. En effet, la Figure 9.1 montre, dans le cas de la traction simple, que la comparaison des résultats expérimentaux aux prédictions du critère de Norris donne de bons résultats. Par contre, dans le cas de la traction biaxiale, la forme du critère n'est pas adaptée à la réalité expérimentale; ceci quelle que soit la déformation résiduelle considérée. Ainsi, le critère de Norris et les critères du même type ne sont pas adaptés à décrire les limites d'utilisation en contrainte dans le cas biaxial. Il est par conséquent nécessaire d'envisager un critère mieux adapté aux tissus.

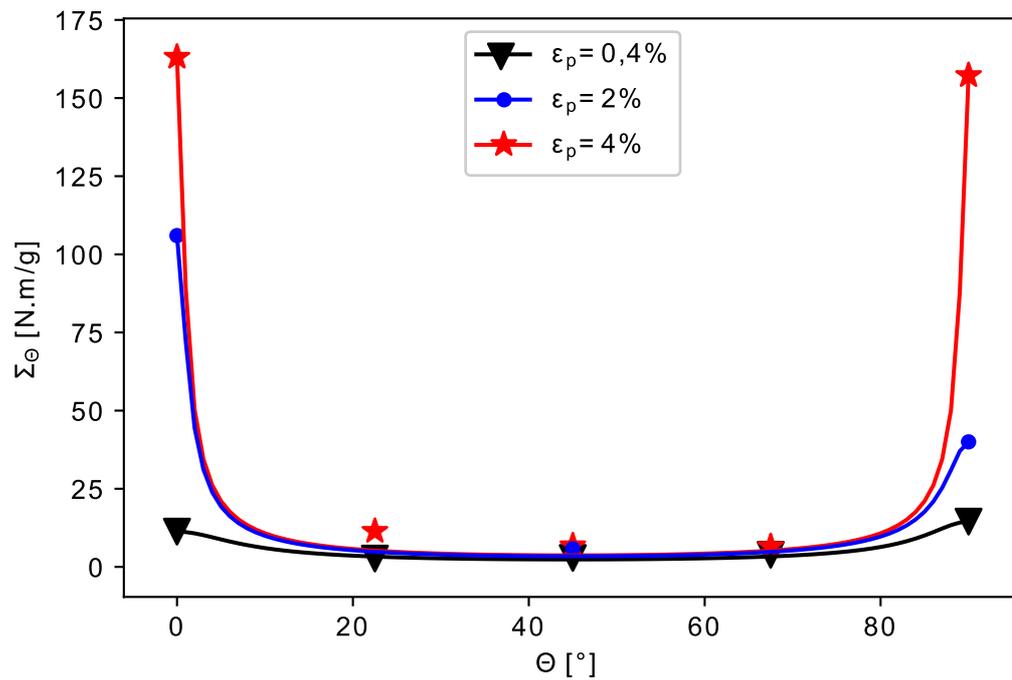


FIGURE 9.1 – Prévisions du critère de Norris dans le cas de la traction simple, en fonction de  $\theta$  l'orientation de la direction de traction par rapport à la direction chaîne; cas du matériau *9017E25* pour différentes valeurs de déformation résiduelle 0,4%, 2% et 4% - Les marqueurs représentent les limites d'utilisation en contrainte issues des données expérimentales et les lignes représentent la prédiction du modèle

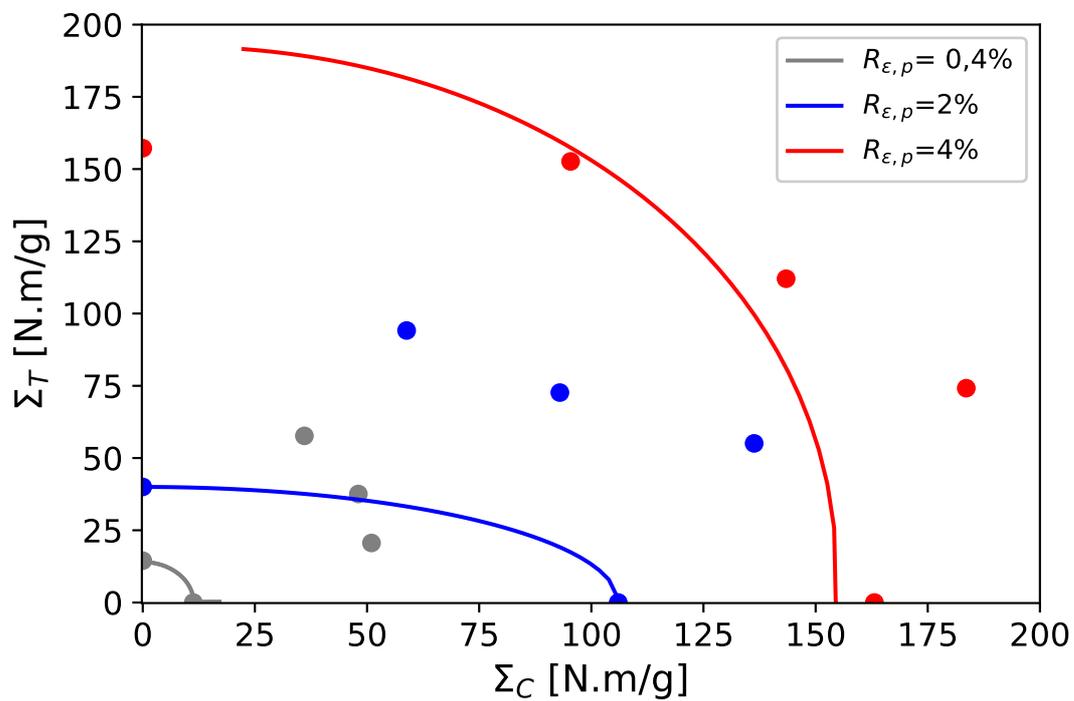


FIGURE 9.2 – Prévisions du critère de Norris dans le cas de la traction biaxiale ; cas du matériau *9017E25* pour différentes valeurs de déformation résiduelle 0,4%, 2% et 4% - Les marqueurs représentent les limites d'utilisation en contrainte issues des données expérimentales et les lignes représentent la prédiction du modèle

## 9.2 Proposition d'un critère original

Nous proposons un critère original de limite d'utilisation du matériau tissé, exprimé en contrainte, sous la forme :

$$A \left( \frac{\Sigma_C}{X} \right)^2 + B \left( \frac{\Sigma_T}{Y} \right)^2 - C \left( \frac{\Sigma_C \Sigma_T}{XY} \right) + \left( \frac{\Sigma_{CT}}{S} \right)^2 = A \left( \frac{\Sigma_C}{X} \right) + B \left( \frac{\Sigma_T}{Y} \right) \quad (9.1)$$

où  $\Sigma_C$ ,  $\Sigma_T$  sont respectivement les contraintes dans les directions chaîne, trame et  $\Sigma_{CT}$  la contrainte de cisaillement dans le plan du matériau tissé.  $A$ ,  $B$  et  $C$  sont des paramètres matériau et  $X$ ,  $Y$  et  $S$  représentent respectivement la contrainte limite d'utilisation dans le sens Chaîne, Trame et en cisaillement.

L'expression (9.1) du critère peut s'écrire aussi sous la forme suivante :

$$(\Sigma_C \ \Sigma_T \ \Sigma_{CT}) \begin{pmatrix} \frac{A}{X^2} & -\frac{C}{2XY} & 0 \\ -\frac{C}{2XY} & \frac{B}{Y^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{S^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Sigma_C \\ \Sigma_T \\ \Sigma_{CT} \end{pmatrix} = \left( \frac{A}{X} \ \frac{B}{Y} \ 0 \right) \begin{pmatrix} \Sigma_C \\ \Sigma_T \\ \Sigma_{CT} \end{pmatrix} \quad (9.2)$$

On pose :

$$\Sigma_1 = \frac{\Sigma_C}{X}; \Sigma_2 = \frac{\Sigma_T}{Y} \text{ et } \Sigma_{12} = \frac{\Sigma_{CT}}{S} \quad (9.3)$$

Avec (9.3) l'expression (9.1) du critère peut se mettre sous la forme adimensionnelle suivante :

$$A\Sigma_1^2 + B\Sigma_2^2 - C\Sigma_1\Sigma_2 + \Sigma_{12}^2 = A\Sigma_1 + B\Sigma_2 \quad (9.4)$$

Dans le cas d'un chargement en traction simple hors axes, orienté d'un angle  $\theta$  par rapport à la direction chaîne et en considérant les relations (2.11) et (2.12), le critère donne la contrainte limite d'utilisation du matériau  $\Sigma_\theta$ , dans le sens de la traction, telle que :

$$\Sigma_\theta = \frac{\frac{A}{X} \cos^2 \theta + \frac{B}{Y} \sin^2 \theta}{\left\{ \frac{A}{X^2} \cos^4 \theta + \frac{B}{Y^2} \sin^4 \theta - \frac{C}{XY} \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{1}{S^2} \cos^2 \theta \sin^2 \theta \right\}} \quad (9.5)$$

Pour  $\theta = 0$  et  $\theta = \pi/2$  la relation (9.5) conduit respectivement aux contraintes limites  $X$  et  $Y$  dans le sens Chaîne et dans le sens Trame. La mesure de la valeur de la contrainte limite  $\Sigma_{45^\circ}$ , dans le sens biais et la relation (9.5) permettent de déterminer la valeur du paramètre  $S$ , telle que :

$$S = \left\{ \frac{2}{\Sigma_{45^\circ}} \left( \frac{A}{X} + \frac{B}{Y} \right) - \left( \frac{A}{X^2} + \frac{B}{Y^2} - \frac{C}{XY} \right) \right\}^{-1/2} \quad (9.6)$$

## 9.3 Méthode d'identification du critère

Pour une déformation résiduelle donnée, comprise dans l'intervalle conventionnel de [0.4%, 4%], on mesure, dans une première étape, les valeurs des contraintes limites d'utilisation du matériau en traction simple dans les axes et hors axes, ainsi que les contraintes limites d'utilisation du matériau en traction biaxiale, dans le plan des contraintes  $(\Sigma_C, \Sigma_T)$ . Nous avons fait le choix d'adopter la même déformation résiduelle dans le cas de la traction simple et dans le cas de la traction biaxiale. Ceci quelle que soit la direction matérielle de sollicitation, dans le cas de la traction simple et quelle que soit la direction du chargement dans le plan des contraintes  $(\Sigma_C, \Sigma_T)$ , en traction biaxiale.

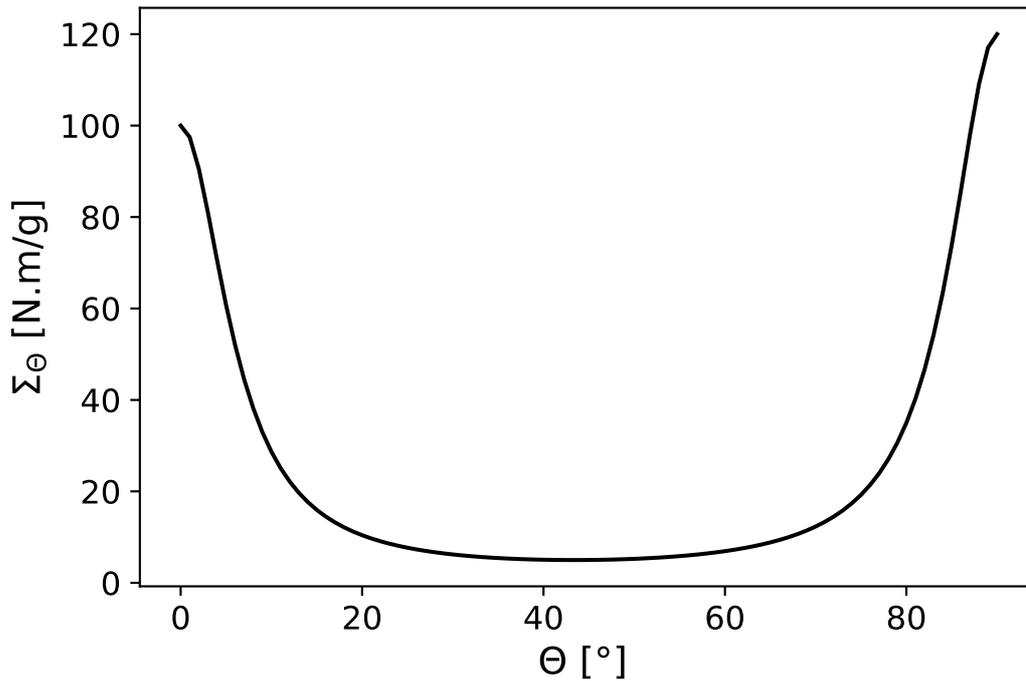


FIGURE 9.3 – Illustration de l'évolution de la contrainte limite  $\Sigma_\theta$ , en fonction de  $\theta$ , l'orientation de la direction de traction par rapport à la direction chaîne, d'après le critère proposé 9.1 ( $A = 1$ ,  $B = 1,5$ ,  $C = 1,75$ ,  $X = 100N.m/g$ ,  $Y = 120N.m/g$ ,  $S = 5N.m/g$ )

Dans le cas de la traction biaxiale  $\Sigma_{CT} = 0$  et compte tenu de la relation (9.3)  $\Sigma_{12} = 0$ . Ainsi, l'expression adimensionnelle 9.4 du critère s'écrit :

$$A\Sigma_1^2 + B\Sigma_2^2 - C\Sigma_1\Sigma_2 = A\Sigma_1 + B\Sigma_2 \quad (9.7)$$

Dans une deuxième étape, l'expression (9.7) du critère permet d'identifier les trois paramètres matériau  $A$ ,  $B$  et  $C$ , en traction biaxiale. Ceci est possible, dans la mesure où les valeurs de  $X$  et  $Y$ , ont été caractérisées dans la première étape de l'identification. Dans une dernière étape, grâce à la mesure de la valeur de  $\Sigma_{45^\circ}$  et à la relation (9.6) il est possible d'identifier  $S$ , le dernier paramètre du critère.

## 9.4 Propriétés du critère en traction simple et biaxiale

### 9.4.1 Cas de la traction simple en hors axes

Dans le cas de la traction simple en hors axes, l'évolution de la contrainte limite de traction en fonction de  $\theta$ , l'orientation de la direction de traction par rapport à la direction chaîne, est définie par la relation (9.5). Cette évolution est illustrée par la Figure 9.3. Elle a une forme classique, semblable à celles obtenues par les critères de type Tsai Wu modifiés (cf. 2.4 du chapitre 2).

### 9.4.2 Cas de la traction biaxiale dans les axes

En traction biaxiale dans les axes, le critère est exprimé par la relation adimensionnelle (9.7), à l'aide des trois paramètres matériaux  $A$ ,  $B$  et  $C$ . Nous proposons d'étudier l'influence de ces

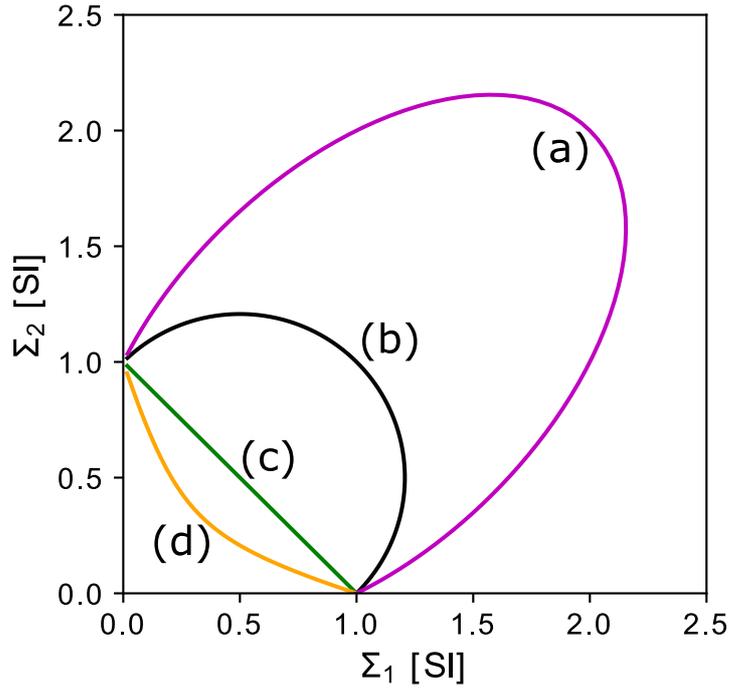


FIGURE 9.4 – Coupe du critère par le plan de la contrainte biaxiale ( $\Sigma_{12} = 0$ ) et illustration de la forme du critère en fonction des valeurs des paramètres  $A$ ,  $B$  et  $C$  : (a) ellipse ( $A = 1, B = 1, C = 1$ ), (b) cercle ( $A = 1, B = 1, C = 0$ ), (c) droite ( $A = 1, B = 1, C = -2$ ), (d) hyperbole d'axe  $\Sigma_1 = \Sigma_2$  ( $A = 1, B = 1, C = -3$ )

trois paramètres sur la forme du critère dans le plan adimensionnel des contraintes de traction biaxiale ( $\Sigma_1, \Sigma_2$ ). Considérons le cas où  $A = 1, B = 1$  et  $C = -2$ , l'expression (9.7) du critère conduit à :

$$\Sigma_1 + \Sigma_2 = 1 \quad (9.8)$$

C'est l'expression d'une droite dans le plan des contraintes de traction biaxiale ( $\Sigma_1, \Sigma_2$ ), de pente  $-1$ , passant par les points  $(1, 0)$  et  $(0, 1)$ . L'expression (9.8) du critère est illustrée par la Figure 9.4-(c) et par la Figure 9.5.

Dans le cas où  $A = 1, B = 1$  et  $C = 0$ , l'expression (9.7) du critère conduit à :

$$\left(\Sigma_1 - \frac{1}{2}\right)^2 + \left(\Sigma_2 - \frac{1}{2}\right)^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 \quad (9.9)$$

C'est un cercle dans le plan des contraintes de traction biaxiale ( $\Sigma_1, \Sigma_2$ ), dont le centre est positionné au point  $(1/2, 1/2)$  et de rayon  $1/\sqrt{2}$ . L'expression (9.9) du critère est illustrée par la Figure 9.4-(b) et par la Figure 9.5.

Considérons maintenant un cas un peu plus général où  $A = 1, B = 1$  et  $C \in ] - 2, 2[$  et introduisons le changement d'axes suivant :

$$\begin{cases} \Sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\sigma_1 - \sigma_2) \\ \Sigma_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\sigma_1 + \sigma_2) \end{cases} \quad (9.10)$$

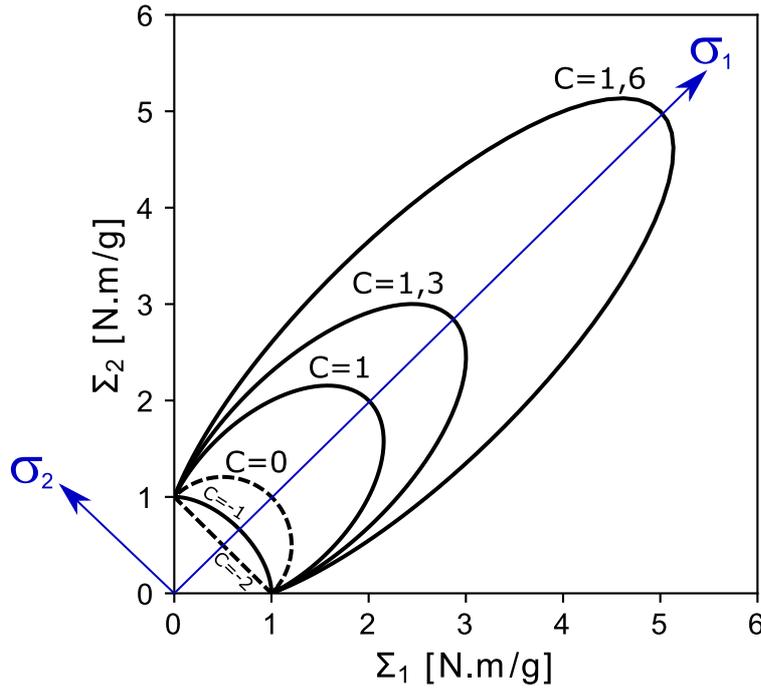


FIGURE 9.5 – Coupe du critère par le plan de la contrainte biaxiale ( $\Sigma_{12} = 0$ ) et illustration de la forme du critère pour  $A = B = 1$  et pour différentes valeurs du paramètre  $C$

où  $(\sigma_1, \sigma_2)$  est le nouveau système d'axes orienté de  $\pi/4$  par rapport à  $(\Sigma_1, \Sigma_2)$ , comme le montre la Figure 9.5. Avec ces nouveaux axes, l'expression (9.7) du critère peut se mettre sous la forme :

$$\left(\frac{\sigma_1 - a}{a}\right)^2 + \frac{\sigma_2^2}{b} = 1 \quad \text{avec} \quad a = \frac{\sqrt{2}}{2 - C} \quad \text{et} \quad b = \frac{2}{4 - C^2} \quad (9.11)$$

Où  $a$  et  $b$  sont deux paramètres positifs compte tenu de l'intervalle de variation de  $C$ . C'est l'expression d'une ellipse centrée au point  $(a, 0)$  dans le système d'axe  $(\sigma_1, \sigma_2)$  et dont les demi-axes  $a$  et  $b$  sont définis par la relation (9.11) en fonction du paramètre  $C$ . L'expression (9.11) du critère est illustrée par la Figure 9.4-(a) et par la Figure 9.5. Comme l'indiquent les relations (9.8) et (9.11), pour  $C = -2$  le critère correspond à une droite (fig. 9.5). Pour  $C = 2$ , les deux demi-axes de l'ellipse tendent vers l'infini et pour  $C > 2$  les deux paramètres  $a$  et  $b$  sont négatifs. Par conséquent la valeur du paramètre  $C$  doit être toujours strictement inférieure à 2. Dans l'intervalle  $] -2, 2[$  l'augmentation de la valeur du paramètre  $C$  conduit à l'augmentation de la taille de l'ellipse. Ceci est illustré par la Figure 9.5.

Pour les valeurs du paramètre  $C < -2$ , la relation (9.11) indique que le paramètre  $a$  est positif et le paramètre  $b$  est négatif. Ainsi le critère présente la forme d'une hyperbole d'axe  $\Sigma_1 = \Sigma_2$ .

Dans ce cas, le critère est illustrée par la Figure 9.4 courbe (d). Du point de vue physique, cette possibilité offerte par le critère pourrait convenir à un matériau qui présenterait une limite en contrainte plus faible pour les chargements en traction équi-biaxiale, tels que :  $\Sigma_1 = \Sigma_2$ . Un tel comportement pourrait être réaliste si les interactions entre les fils de chaîne et les fils de trame deviennent prépondérantes par l'intervention de mécanismes de frottement important ou de fragilité des fils.

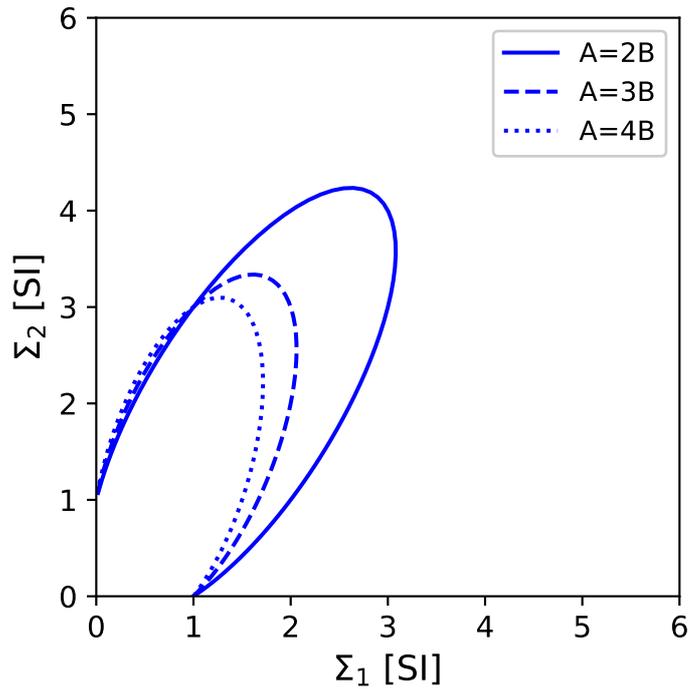


FIGURE 9.6 – Influence des paramètres d'orientation  $A$  et  $B$ , dans le cas  $A > B$  et  $C = 1$

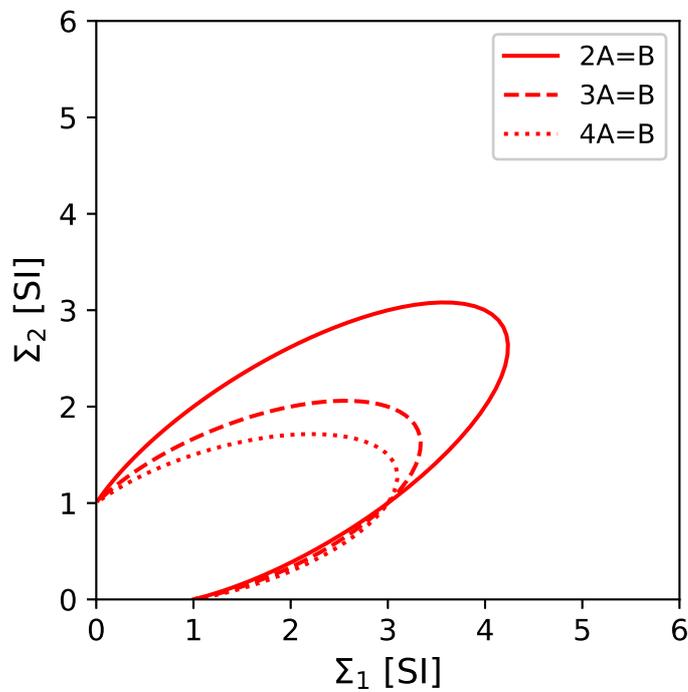


FIGURE 9.7 – Influence des paramètres d'orientation  $A$  et  $B$ , dans le cas  $A < B$  et  $C = 1$

Les paramètres  $A$  et  $B$  interviennent sur l'orientation de l'ellipse dans le plan  $(\Sigma_1, \Sigma_2)$ . Dans

le cas où  $A = B$ , les variables du critère  $\Sigma_1$  et  $\Sigma_2$  ont la même importance, ce qui se traduit par un axe principal de l'ellipse orienté selon la bissectrice du plan des contraintes de traction biaxiale ( $\Sigma_1, \Sigma_2$ ). Si  $A > B$ , la variable  $\Sigma_1$  est favorisée et l'axe de l'ellipse s'écarte de la bissectrice pour se rapprocher de l'axe  $\Sigma_2$ . Ceci est illustré par la Figure 9.6. Si  $A < B$ , la variable  $\Sigma_2$  est favorisée et l'axe de l'ellipse s'écarte de la bissectrice pour se rapprocher de l'axe  $\Sigma_1$ . Ceci est illustré par la Figure 9.7. Notons par ailleurs, sur les Figures 9.6 et 9.7, que l'effet du rapport  $A/B$  sur l'orientation de la surface seuil est accompagné d'une modification de sa taille.

## 9.5 Forme du critère dans l'espace 3D des contraintes

Les expressions générales (9.1) et (9.4) du critère peuvent être considérées comme des formes implicites d'équations de quadriques dans les espaces respectifs ( $\Sigma_C, \Sigma_T, \Sigma_{CT}$ ) et ( $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_{12}$ ) [20]. Les paramètres  $A, B, C$  déterminent alors la forme de la surface seuil [43] :

- si  $A = 1, B = 1$  et  $C = 0$ , la forme de la surface seuil est une sphère (fig. 9.8-a)
- si  $A = 1, B = 1, C > 0$ , la forme de la surface seuil est une ellipsoïde (fig. 9.8-b)
- si  $A = 1, B = 1, C = -2$ , la forme de la surface seuil est un cylindre (fig. 9.8-c)
- si  $A = 1, B = 1, C < -2$ , la forme de la surface seuil est un hyperboloïde (fig. 9.8-d)

Les intersections du plan de traction biaxiale ( $\Sigma_{CT} = 0$ ) avec les surfaces seuil de la Figure 9.8 donnent les courbes présentées sur la Figure 9.4. Ainsi, le cercle de la Figure 9.4-(b) correspond à la surface seuil sphérique (fig. 9.8-a) ; l'ellipse de la Figure 9.4-(a) correspond à l'ellipsoïde (fig. 9.8-b) ; la droite de la Figure 9.4-(c) correspond au cylindre (fig. 9.8-c) et l'hyperbole de la Figure 9.4-(d) correspond à l'hyperboloïde (fig. 9.8-d).

## 9.6 Conclusion

La connaissance des limites d'utilisation des matériaux tissés, suivant des trajets de chargement variés, ne constitue pas un outil de conception suffisant. Afin de prendre en considération l'ensemble de l'espace de sollicitation en contrainte, il convient d'introduire un critère anisotrope, adapté à l'utilisation des matériaux tissés. Ainsi, un critère a donc été proposé et sa formulation conduit à une surface seuil définie dans l'espace des contraintes. Les propriétés de ce critère original ont été développées et sa méthode d'identification a été précisée.

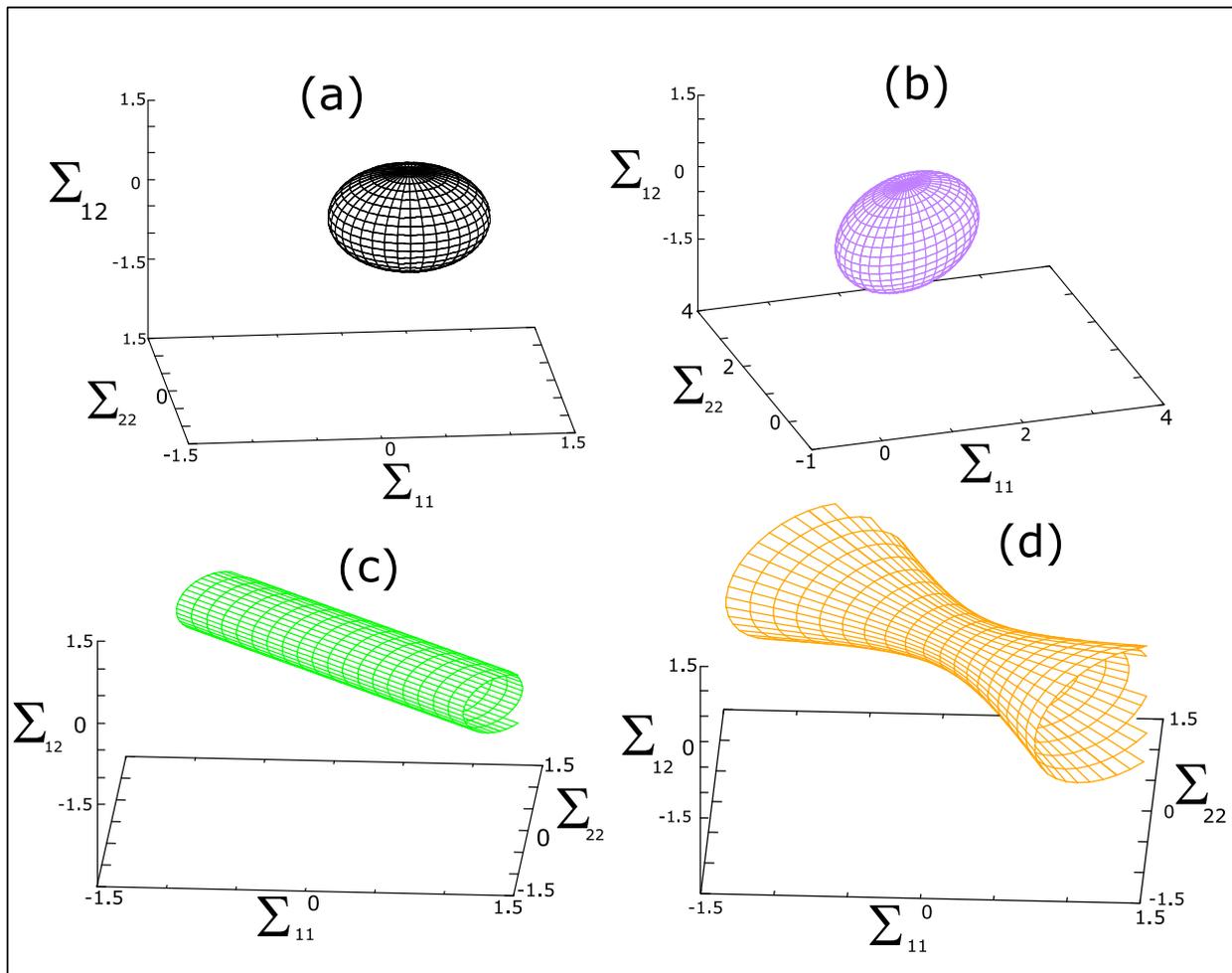


FIGURE 9.8 – Forme du critère dans l'espace  $(\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_{12})$  pour différents jeux de paramètres  $(A, B, C)$  - (a) La sphère  $(A = 1, B = 1, C = 0)$ - (b) L'ellipsoïde  $(A = 1, B = 1, C = 1)$ - (c) Le cylindre  $(A = 1, B = 1, C = -2)$ - (d) L'hyperboloïde  $(A = 1, B = 1, C = -3)$

## Cinquième partie

### Analyse des résultats expérimentaux



# Chapitre 10

## Analyse des résultats de traction uniaxiale

Ce chapitre présente une analyse des résultats de traction uniaxiale, à partir des résultats bruts obtenus au chapitre 5, et la stratégie de post-traitement liée à la recherche de limite d'utilisation détaillée dans le chapitre 8.

### 10.1 Comportement moyen en première charge

#### 10.1.1 Directions Chaîne, Trame et Biais

Dans le chapitre 5, plusieurs essais de chargements monotones ont été réalisés pour chaque direction. Afin de pouvoir appliquer le protocole de recherche de limite d'utilisation, il faut extraire un comportement moyen du textile en première charge. Pour obtenir ce comportement – c'est-à-dire une courbe moyenne – les essais réalisés sont vus comme un ensemble de points dans un diagramme  $(\varepsilon_a, \Sigma_a)$ . Le modèle de première charge est décrit en section 8.2.1. Les paramètres sont optimaux, lorsqu'ils minimisent les écarts entre la courbe théorique moyenne et le nuage de points. Pour cela, la méthode des moindres carrés, disponible dans une bibliothèque en langage *Python*, est utilisée. Le résultat de la recherche de la courbe moyenne est visible à la Figure 10.1.

Sur la Figure 10.1, la courbe noire correspond à la courbe moyenne de première charge du tissu *9017 E25* dans la direction considérée et l'ensemble des autres courbes correspond au nuage de points utilisé pour le calcul. La méthode est appliquée pour chaque direction et les courbes  $\Sigma - \varepsilon$  du *9017E25* correspondantes sont synthétisées à la Figure 10.2.

Pour ce tissu *9017 E25*, nous notons que les comportements en Chaîne et Trame sont très proches. Seule la valeur moyenne de la déformation à la rupture intervient légèrement plus tard dans la direction de la Chaîne. En Biais, le comportement du matériau est différent et montre une très faible rigidité jusqu'à une déformation de 30% puis la contrainte augmente jusqu'à une valeur à la rupture ( $\Sigma_{UTS}$ ) inférieure à celles dans les directions Chaîne et Trame.

#### 10.1.2 Autres directions hors axes

La Figure 10.3 présente les deux courbes moyennes de première charge pour les directions  $22,5^\circ$  et  $67,5^\circ$ . Ces courbes ont été obtenues par la même méthode, que celle exposée au paragraphe précédent. Ces deux courbes sont très proches. Ceci n'est pas surprenant car le matériau est équilibré entre la Chaîne et la Trame ; les titres des fils de chaîne et de trame sont les mêmes et, également, la densité, i.e. le nombre de fil par mètre, est la même en chaîne et trame. Les directions  $22,5^\circ$  et  $67,5^\circ$  étant respectivement équidistantes des directions chaîne et trame, il

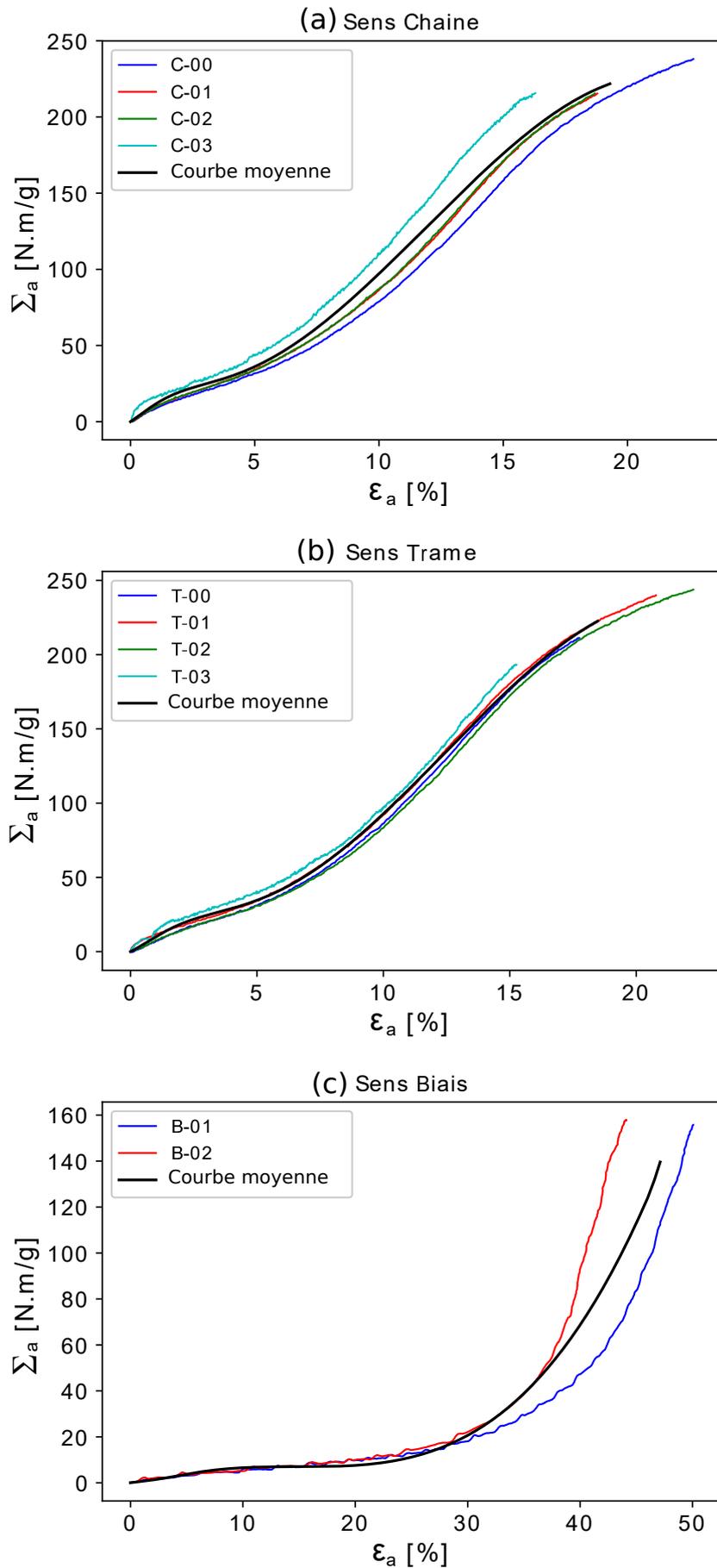


FIGURE 10.1 – Tissu 9017 E25 – Courbe moyenne de première charge (a) dans la direction Chaîne, (b) dans la direction Trame et (c) dans la direction Biais

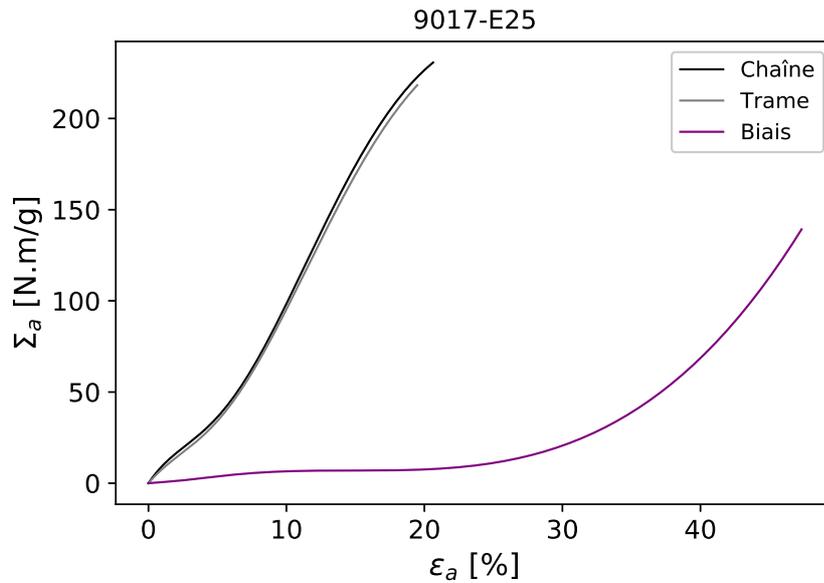


FIGURE 10.2 – Tissu 9017 E25 – Courbes moyennes de première charge dans les directions chaîne, trame et biais

Direction	$G$ $Nm/g$	$L$ $Nm/g$	$H$ $Nm/g$	$K$ $Nm/g$	$\varepsilon^*$ %
Chaîne	1122	7175	-215	2	8.48
Trame	958	6201	-161	1, 2	8.84
Biais	71	249	-17	0.4	3, 0
22, 5°	351	73	-2, 1	0, 13	9, 3
67, 5°	837	122	-5, 5	0, 2	0, 2

TABLE 10.1 – Tissu 9017 E25 – Paramètres de la courbe moyenne de première charge selon la direction de traction

n'y a donc pas de raison qu'une direction soit plus résistante qu'une autre.

### 10.1.3 Mise en commun de l'ensemble des résultats

La mise en commun de l'ensemble des courbes de première charge pour le tissu 9017E25 est présentée en Figure 10.4. Cette figure montre que les comportements dans les directions chaîne et trame du tissu sont très différents des comportements hors axe qui présentent beaucoup moins de rigidité. Les courbes à 45°, 67.5° et 22.5° sont d'ailleurs similaires.

Grâce à ces résultats, plusieurs caractéristiques mécaniques du tissu peuvent être identifiées comme, la déformation à la rupture ( $\varepsilon_{UTS}$ ) et la contrainte à la rupture ( $\Sigma_{UTS}$ ). Ces caractéristiques, ainsi que les paramètres des courbes moyennes de première charge, sont présentés dans les tableaux 10.1 et 10.2.

Ces deux tableaux montrent que les valeurs des paramètres caractéristiques des directions Chaîne et Trame sont proches et se démarquent des autres directions. Le biais est la direction qui présente le module initial  $G$  le plus faible et les directions Chaîne et Trame les modules les plus forts. Les directions 22.5° et 67.5° ont des modules intermédiaires. Le Tableau 10.1 peut

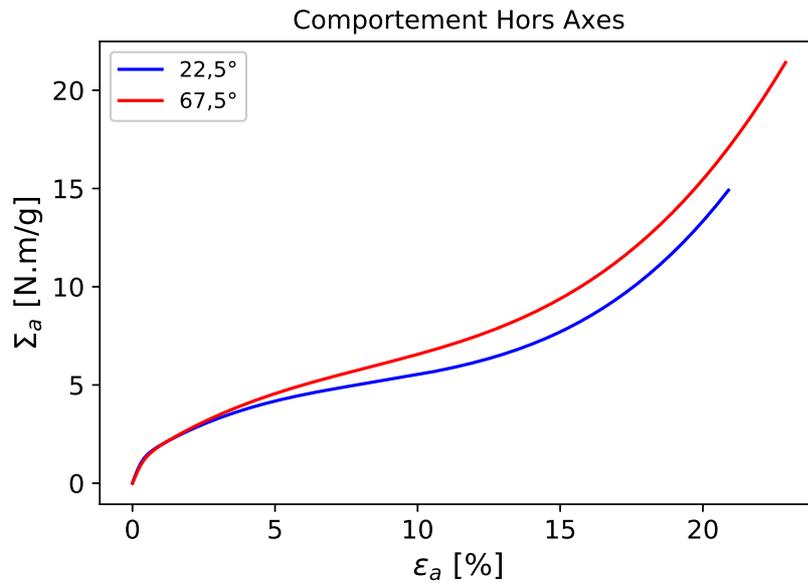


FIGURE 10.3 – Tissu 9017 E25 – Courbes moyennes de première charge dans les directions hors axes  $22,5^\circ$  et  $67,5^\circ$

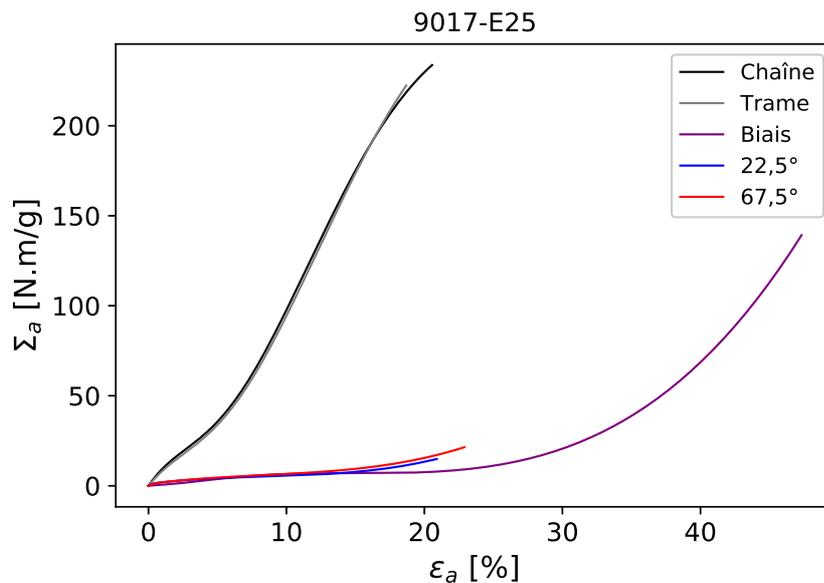


FIGURE 10.4 – Tissu 9017 E25 – Résultats des essais de traction simple dans toutes les directions

être mis sous la forme d'un graphique où les paramètres des courbes de première charge varient en fonction de l'angle de sollicitation du tissu (Figure 10.5). Ces paramètres de courbe de première charge, en fonction de l'angle de sollicitation, peuvent être interpolés. Une interpolation linéaire entre deux points successifs a été utilisée. L'application de cette interpolation donne les prédictions des courbes de première charge pour différentes directions de sollicitation ; cela est présenté à la Figure 10.6, pour des angles allant de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  avec un pas de  $10^\circ$ .

En ce qui concerne les évolutions des déformations transversales, la Figure 10.7 donne le comportement moyen en contraction des cinq directions, dont les résultats bruts ont été présentés

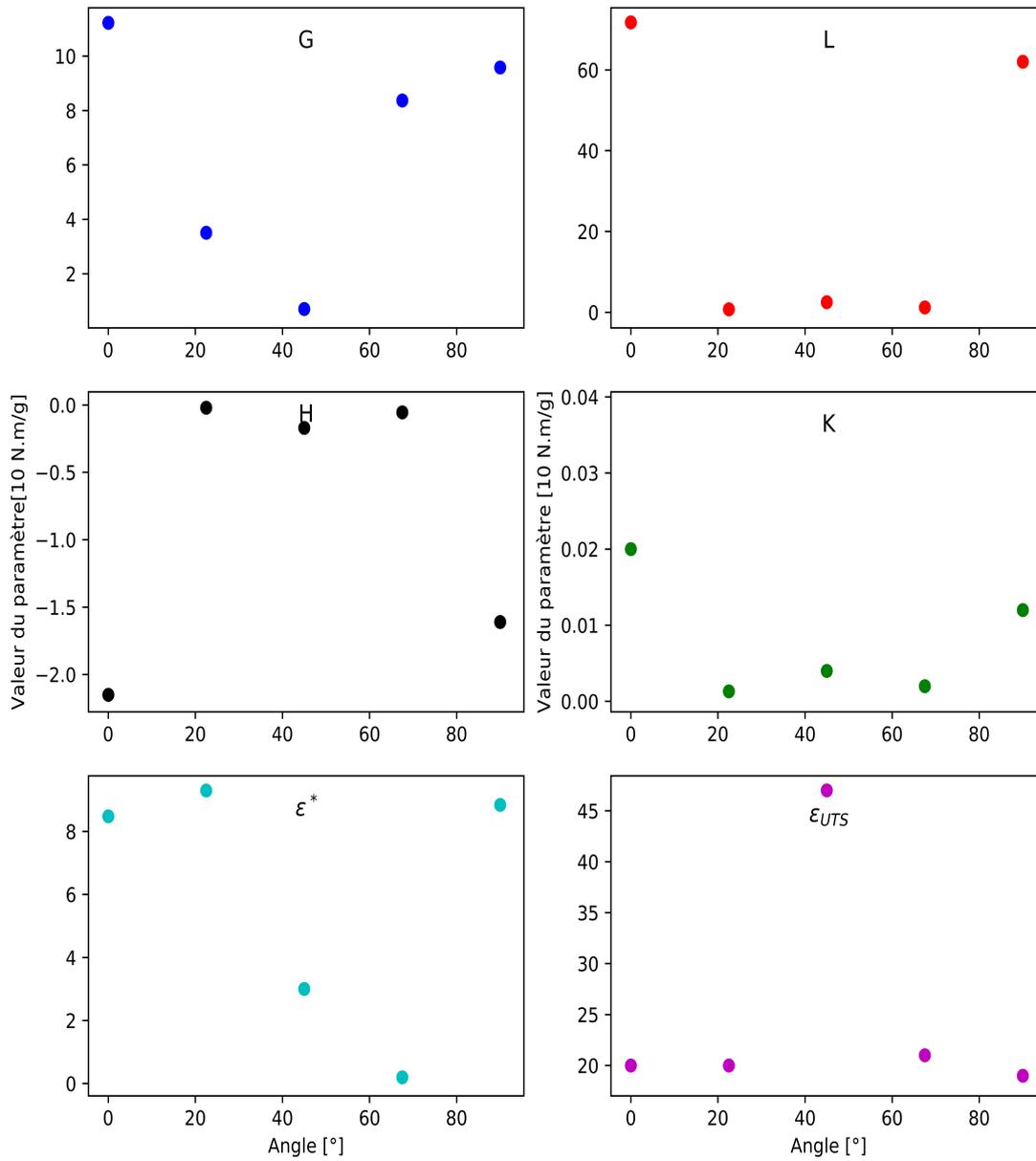


FIGURE 10.5 – Tissu 9017 E25 – Evolution des paramètres des courbes de première charge ( $G, L, H, K, \varepsilon^*$ ) et de la déformation à rupture ( $\varepsilon_{UTS}$ ) en fonction de l'angle d'application de l'effort de traction

Direction	$\Sigma_{UTS}$ [Nm/g]	$\varepsilon_{UTS}$ [%]
0° (Chaîne)	234	20
22,5°	15	20
45° (Biais)	139	47
67,5°	20	21
90° (Trame)	224	19

TABLE 10.2 – Tissu 9017 E25 – Contrainte et déformation à la rupture selon la direction de traction

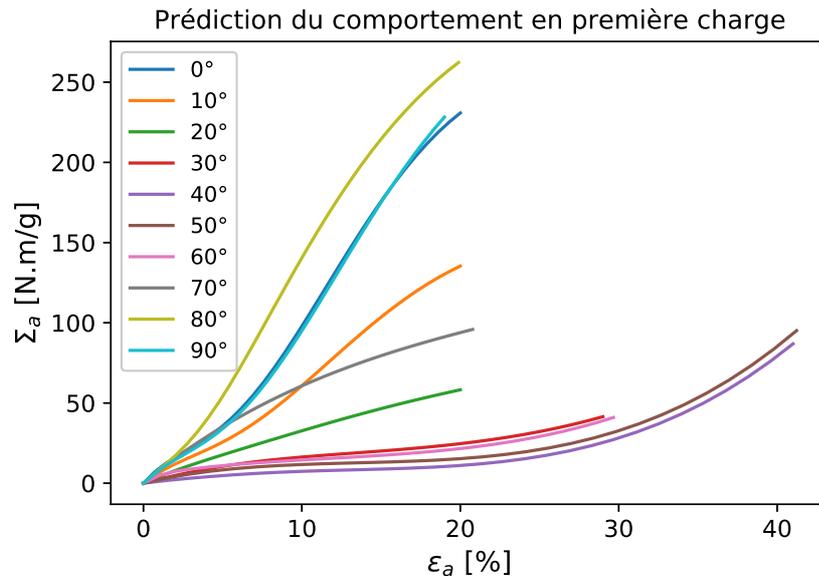


FIGURE 10.6 – Tissu 9017 E25 – Prédiction du modèle de première charge pour différents angles d'application de l'effort de traction uniaxiale

au chapitre 5. Les courbes des directions chaîne, trame et biais, présentées sur la Figure 10.7, correspondent aux courbes moyennes des résultats présentés, respectivement, dans les figures 5.2, 5.4 et 5.6 du chapitre 5. Concernant les directions 22,5° et 67,5°, les deux courbes de la Figure 5.8 ont été jointes à la Figure 10.7.

Pour les directions chaîne, trame et biais, comme plusieurs essais ont été réalisés, une moyenne de ces résultats a été opérée. Pour cela, la valeur respective moyenne de la déformation à la rupture  $\varepsilon_{UTS}$ , donnée par le tableau 10.2, définit un intervalle de déformation  $[0, \varepsilon_{UTS}]$  pour l'essai, dans chacune de ces directions. Cet intervalle est découpé en 100 parties égales et pour chaque point de découpage une moyenne est calculée à partir des courbes expérimentales obtenues au chapitre 5. Pour une courbe expérimentale donnée du chapitre 5, lorsque le point de découpage ne correspond pas exactement à un point de mesure, une interpolation linéaire entre deux points de mesure voisins est réalisée.

La Figure 10.7 montre que le comportement en contraction du biais se distingue de celui des autres directions et présente la plus forte valeur de contraction. Les directions chaîne et trame présentent, quant à elles, les plus faibles valeurs de contraction et par conséquent la meilleure rigidité en contraction. Les directions 22,5° et 67,5° présentent des comportements en contraction

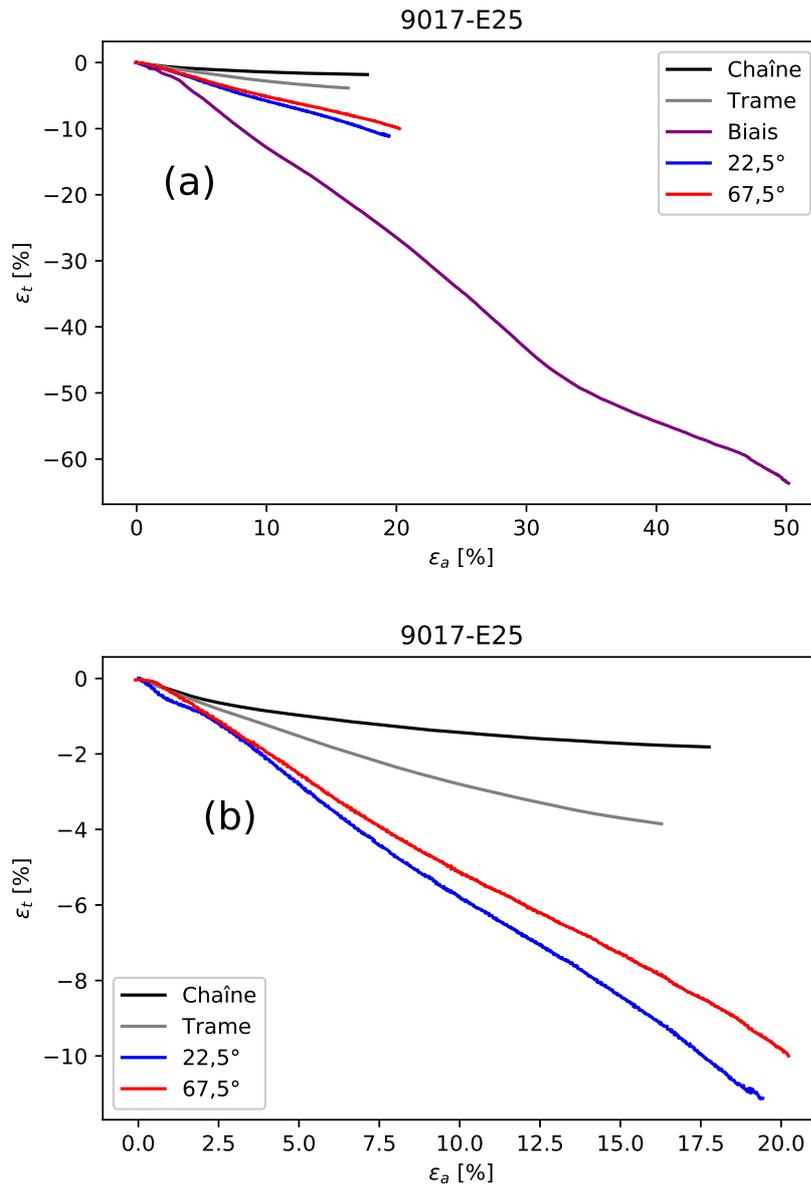


FIGURE 10.7 – Tissu 9017 E25 – Comportement moyen en contraction  $\varepsilon_t - \varepsilon_a$  : (a) dans les cinq directions et (b) dans les directions Chaîne, Trame, 22,5°, 67,5°

très proches et se situent dans une position intermédiaire entre ceux des directions privilégiées du matériau et la direction biais.

**Qualité et dispersion des données :** Avec les données disponibles, il est possible de calculer un écart type glissant  $s_i$  sur le jeu de données. Cet écart-type est calculé de la manière suivante :

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{i-n/2}^{i+n/2} (\Sigma_i - c(\varepsilon_i))^2}{n}} \quad (10.1)$$

Avec  $n$  le nombre de points utilisés pour le calcul de l'écart type,  $\Sigma_i$  la valeur de contrainte mesurée et associée à la déformation  $\varepsilon_i$  et  $c$  correspondant au modèle théorique de la première charge.

Paramètre [Nm/g]	0° (Chaîne)		22,5°		45° (Biais)		67,5°		90° (Trame)	
	$\Sigma_R$	$A_i$	$\Sigma_R$	$A_i$	$\Sigma_R$	$A_i$	$\Sigma_R$	$A_i$	$\Sigma_R$	$A_i$
$A_0(\Sigma_{R1})$		-2068		-437		-1275		-80		-4503
$A_1(\Sigma_{R1})$	49.90	-13412	4.64	866	5.03	1756	5.04	152	38.81	-4042
$A_2(\Sigma_{R1})$		-15481		-429		-481		-72		8544
$A_0(\Sigma_{R2})$		-11460		8		586		-74		-9547
$A_1(\Sigma_{R2})$	113.42	-4451	8.05	-51	9.37	-4366	8.36	-74	95.18	-4837
$A_2(\Sigma_{R2})$		15910		43		3781		55		14385
$A_0(\Sigma_{R3})$		-21320		-4		-1920		-4		-19567
$A_1(\Sigma_{R3})$	207.73	-210	10.60	-31	19.80	-709	10.82	-26	189.33	-1762
$A_2(\Sigma_{R3})$		23330		34		26		30		-21329

TABLE 10.3 – Paramètres de modélisation des décharges en fonction de la valeur de la contrainte à l'inversion pour les décharges étudiées - tous les paramètres  $A_i$  et les  $\Sigma_R$  en [Nm/g]

Il est donc possible d'afficher la variation de l'écart en fonction de la déformation mesurée et de résumer cette information en donnant l'aire d'erreur statistique autour de la courbe moyenne  $\pm s_i$ . Ces résultats sont visibles en Figure 10.8.

## 10.2 Comportement à la décharge

Dans cette section, les méthodes explicitées en section 8.2.2 sont directement appliquées aux résultats des essais de type B présentés en section 5.2 pour le matériau *9017E25*.

Pour décrire le comportement en décharge nous adoptons la relation (8.3), avec  $N = 2$  et  $\alpha = 7$ . Par conséquent, la modélisation de la courbe de décharge met en jeu trois paramètres  $A_0, A_1, A_2$  et nécessite trois points de mesures sur la courbe de décharge :

$$(\Delta\varepsilon_i, \Delta\Sigma_i) \text{ avec } i = 1, 3 \quad (10.2)$$

où

$$\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{Ri}, \Delta\Sigma_i = \Sigma_i - \Sigma_{Ri} \text{ avec } i = 1, 3 \quad (10.3)$$

où  $(\varepsilon_{Ri}, \Sigma_{Ri})$  représentent les couples déformation et contrainte au point d'inversion sur la courbe de première charge, au départ de la décharge considérée. Selon le protocole défini au chapitre 8, trois décharges uniformément réparties sur la première charge sont nécessaires. Ainsi, pour un essai de type B, trois paramètres par décharge sont nécessaires soit neuf paramètres en tout qui dépendent de la valeur de contrainte à l'inversion. Cette opération est effectuée pour les cinq directions de sollicitation. Ces valeurs sont classées dans le tableau 10.3.

Afin de vérifier que les modèles de décharge correspondent aux résultats expérimentaux, le modèle (en trait rouge) est superposé aux résultats expérimentaux (trait bleu) dans le même graphe. Les résultats pour chaque direction de sollicitation sont donnés dans la Figure 10.9.

Pour chacune des directions de chargement, il est possible de tracer l'évolution de ces paramètres  $A_i$  en fonction de la contrainte à l'inversion  $\Sigma_R$ . Pour le cas du tissu *9017E25* dans la direction Trame, un résultat typique est donné sur la Figure 10.10. A partir de ces évolutions, de nouveaux paramètres  $A_i$  peuvent être extrapolés ou interpolés pour d'autres valeurs de  $\Sigma_R$ . Ces nouveaux paramètres seront injectés dans le modèle de décharge défini par l'équation 8.7 et permettront ainsi d'obtenir la courbe de décharge à n'importe quelle contrainte à l'inversion  $\Sigma_R$ .

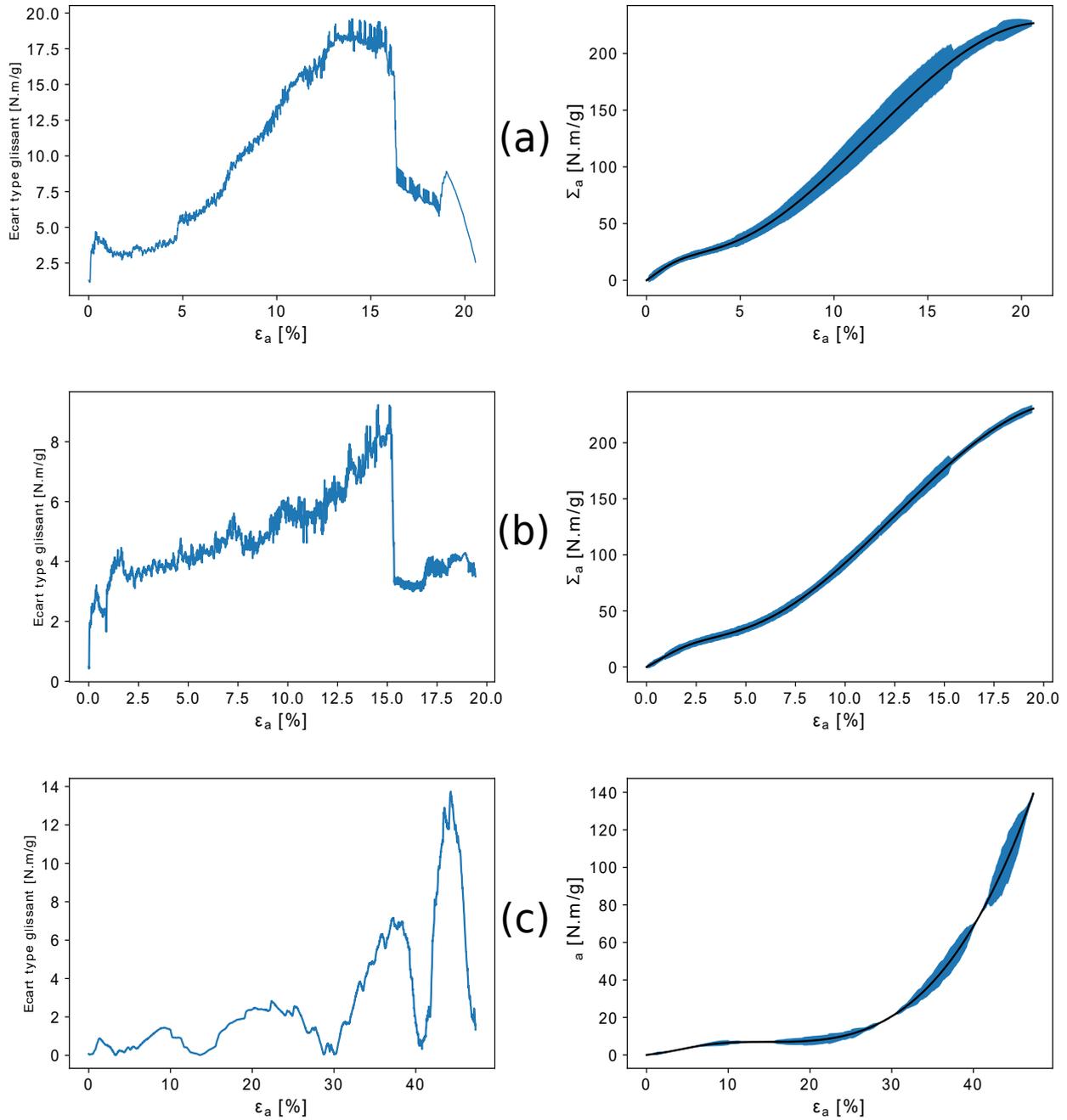


FIGURE 10.8 – Tissu 9017 E25 – Evolution de l'écart type glissant sur la contrainte ( $s_i$ ) en fonction de la déformation : (a) sens Chaîne, (b) sens Trame, (c) sens Biais

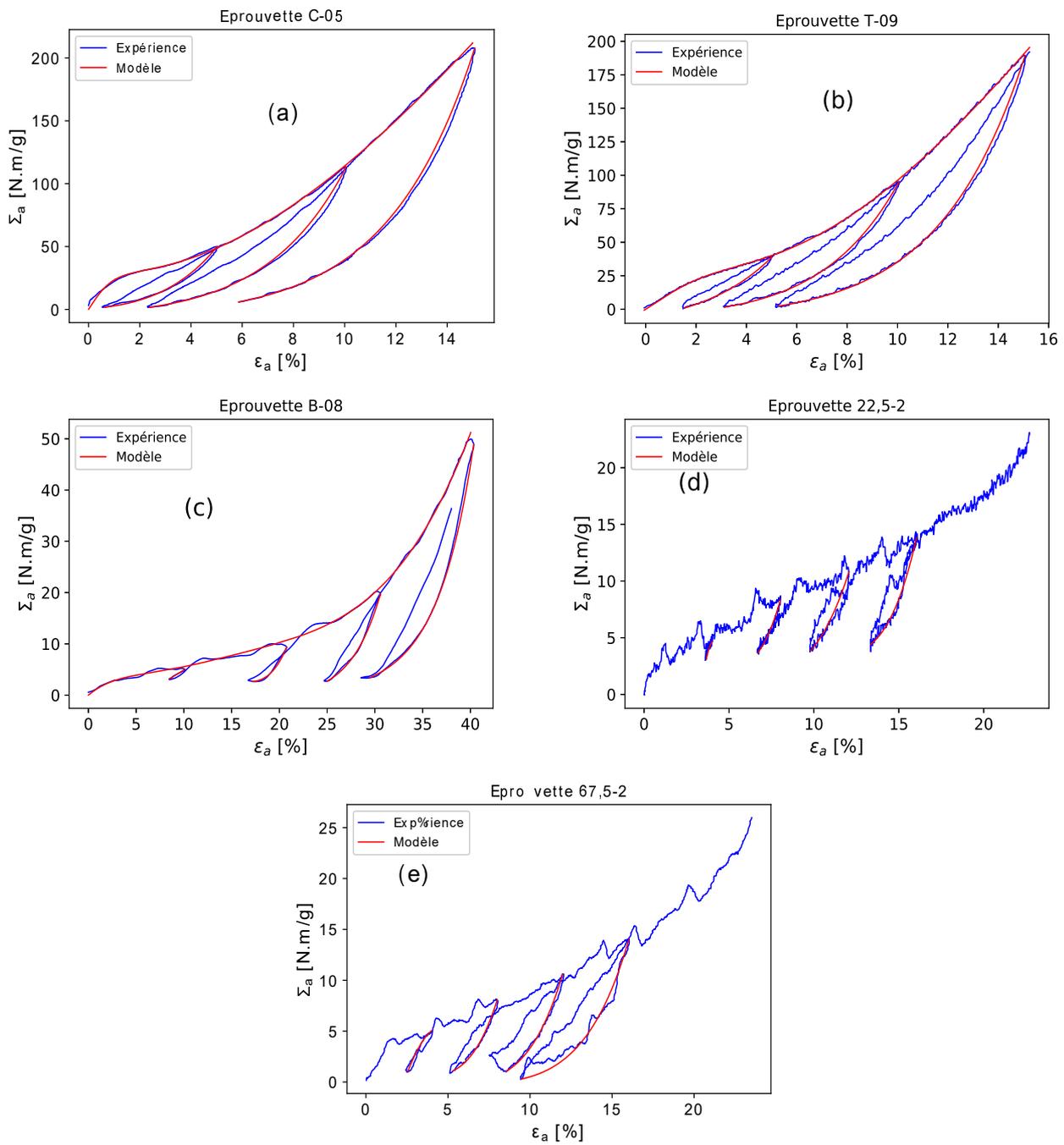


FIGURE 10.9 – Comparaison expérience/modèle de décharge pour les essais de type B sur le tissu 9017E25 dans 5 directions : (a) 0° Chaîne, (b) 90° Trame, (c) 45° Biais, (d) 22,5°, (e) 67,5°

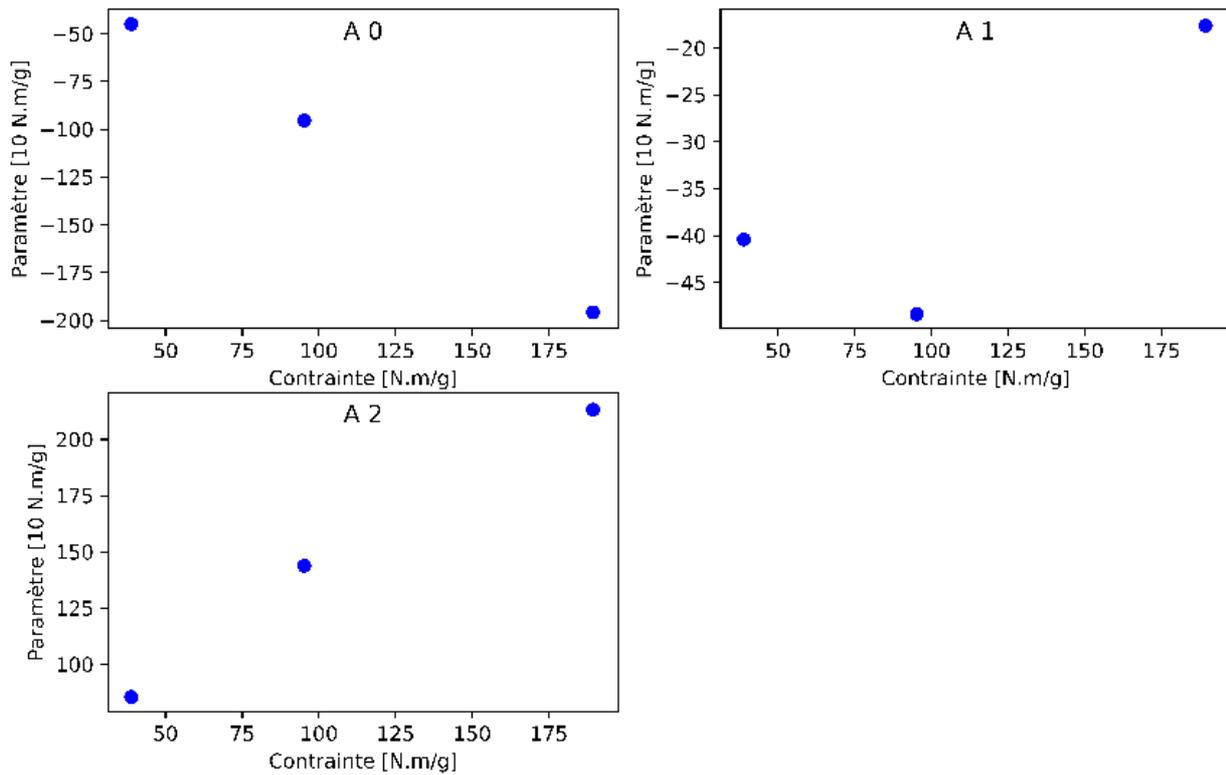


FIGURE 10.10 – Tissu 9017E25 – Evolution des trois paramètres  $A_i$  en fonction de la contrainte à l'inversion  $\Sigma_R$  dans la direction de la Trame

### 10.3 Prédiction des limites d'utilisation

Une fois les paramètres des modèles de première charge et de décharge établis, il est possible de faire une recherche de limite d'utilisation. Pour une direction considérée, les paramètres d'entrée de cette recherche sont les paramètres du modèle de première charge, Tableau 10.1, les paramètres du modèle de décharge, Tableau 10.3, et la déformation résiduelle ciblée  $\varepsilon_p$ .

Le protocole de recherche est défini au paragraphe 8.3.6. Il s'agit de chercher le point d'inversion  $(\varepsilon_R, \Sigma_R)$  appartenant à la courbe de première charge qui donne lors de la décharge en ce point, la déformation résiduelle ciblée  $\varepsilon_p$ .

Notons que lors du protocole de recherche et pour un point d'inversion donné et défini par sa contrainte  $\Sigma_R$ , les trois valeurs de paramètres  $A_0$ ,  $A_1$  et  $A_2$  sont à renseigner. Ces valeurs sont déterminées en fonctions de  $\Sigma_R$ , par extrapolation ou interpolation linéaires dans les trois diagrammes  $A_i(\Sigma_R)$ . L'interpolation est réalisée entre deux points ; dans le cas d'une extrapolation, les deux derniers points extrêmes sont utilisés.

La recherche de limite d'utilisation est menée pour les valeurs définies dans la section 3.4, c'est-à-dire pour :

$$\varepsilon_p = 0.4\% \text{ et } \varepsilon_p = 4\%$$

Les résultats sous la forme de graphique sont donnés en Figure 10.11 et sous forme de tableau dans la Table 10.4, pour toutes les directions étudiées en traction uniaxiale.

La Figure 10.11 caractérise pour chaque direction le comportement en première charge et

Direction	$\Sigma_{0,4\%}$ [Nm/g]	$\varepsilon_{0,4\%}$ [%]	$\Sigma_{4\%}$ [Nm/g]	$\varepsilon_{4\%}$ [%]
0° (Chaîne)	11	1,3	163	14,2
22,5°	3	0,9	7	5,0
45° (Biais)	3	4,3	7	12,0
67,5°	4	1,9	7	6,1
90° (Trame)	14	2	157	13,9

TABLE 10.4 – Tissu 9017E25 – Valeurs des limites d'utilisation pour  $\varepsilon_p = 0,4\%$  et  $\varepsilon_p = 4\%$  dans toutes les directions

en décharge pour les deux déformations résiduelles aux bornes de l'intervalle conventionnel  $[0,4\%,4\%]$ , défini dans la section 3.4. Notons que, pour toute autre déformation résiduelle ciblée  $\varepsilon_p$  telle que  $\varepsilon_p \in [0,4\%,4\%]$ , la méthode proposée permet de déterminer les limites d'utilisation correspondantes en contrainte et en déformation.

## 10.4 Conclusion

Grâce aux méthodes proposées dans le chapitre 8, les données brutes des essais de traction uniaxiale du chapitre 5 ont été post-traitées afin d'obtenir les paramètres des modèles de première charge et de décharge. Ces modèles complets ont permis la recherche et l'obtention des limites d'utilisation en contrainte correspondant aux bornes de l'intervalle conventionnel d'utilisation en déformation défini dans le chapitre 3. Ces limites serviront à la mise en place du critère mécanique dont l'application finale sera développée au chapitre 12.

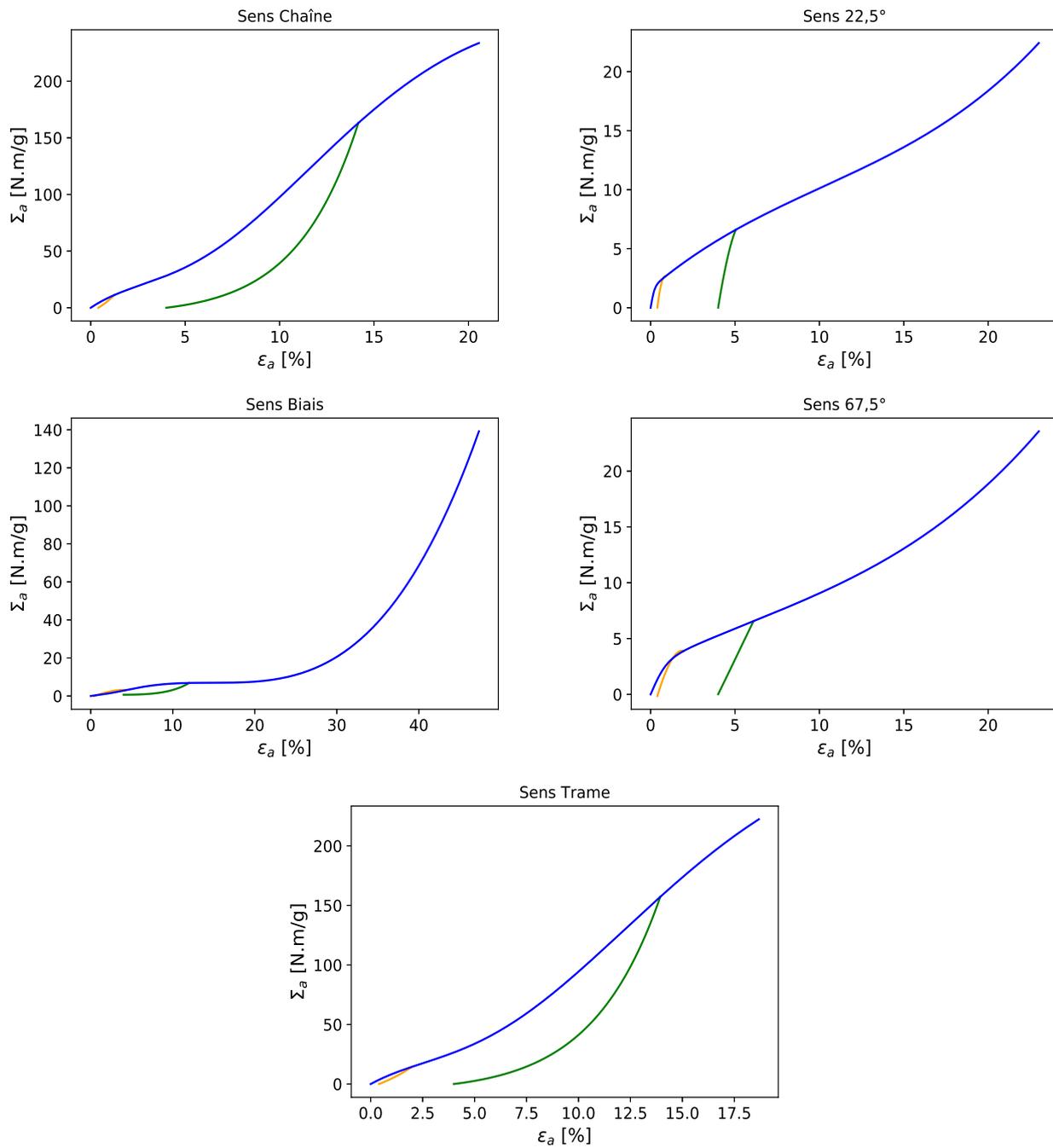


FIGURE 10.11 – Tissu 9017E25 – Détermination des limites d'utilisation pour  $\epsilon_p = 0,4\%$  (Orange) et  $\epsilon_p = 4\%$  (Vert) dans toutes les directions



# Chapitre 11

## Analyse des résultats de Traction biaxiale

Ce chapitre présente une analyse des résultats obtenus en traction biaxiale, à partir des résultats bruts du chapitre 7, et la stratégie de post-traitement et de recherche de limite d'utilisation détaillée dans le chapitre 8.

### 11.1 Modélisation de la courbe de première charge

Trois essais de traction biaxiale ont été réalisés avec des chargements radiaux caractérisés par les trois rapports  $\frac{\Sigma_c}{\Sigma_T} = \left\{ \frac{1}{2}, \frac{1}{1}, \frac{2}{1} \right\}$ . Pour chaque essai, la courbe de première charge  $R_\Sigma - R_\epsilon$  est identifiée en utilisant le modèle de première charge décrit en section 8.2.1. Les paramètres identifiés sont présentés dans le Tableau 11.1 et la Figure 11.1 montre la superposition entre le modèle de première charge en rouge et les mesures expérimentales en bleu. Le modèle de première charge reproduit fidèlement les données expérimentales. A ce stade de l'étude, il est possible de comparer les données issues des essais uni-axiaux avec les données des essais biaxiaux. La Figure 11.2 révèle ainsi le comportement du tissu *9017E25* soumis à une sollicitation 1D ou 2D en première charge. On remarque qu'au début de la courbe, pour  $R_\epsilon < 8\%$ , le tissu est plus raide lorsqu'il est soumis à un chargement biaxial. Au delà de 8% de rayon de déformation, les comportements se rejoignent et évoluent dans les mêmes proportions. Enfin la rupture a lieu précocement au cours des essais biaxiaux avec un rayon de contrainte moyen  $R_\Sigma = 200 N.m/g$  soit 16% de moins que le niveau de contrainte à rupture pour les essais uniaxiaux.

### 11.2 Modélisation des décharges

Dans cette section, les méthodes développées en section 8.2.2 sont appliquées aux décharges des essais cycliques de traction biaxiale présentés au chapitre 7. Pour décrire le comportement en décharge nous adoptons la relation (8.6), avec  $N = 2$  et  $\alpha = 7$ . Trois décharges uniformément réparties sur la première charge et trois paramètres par décharge sont nécessaires, soit neuf

$\frac{\Sigma_T}{\Sigma_C}$	$G$ $Nm/g$	$L$ $Nm/g$	$H$ $Nm/g$	$K$ $Nm/g$	$\epsilon^*$ %
$\frac{1}{1}$	1554	-490	107	-1.2	2.2
$\frac{1}{2}$	1871	759	-5	1.5	0.6
$\frac{2}{1}$	2138	421	18	1	1.1

TABLE 11.1 – Tissu *9017E25* – Paramètres de première charge identifiés selon la direction de traction pour les essais biaxiaux

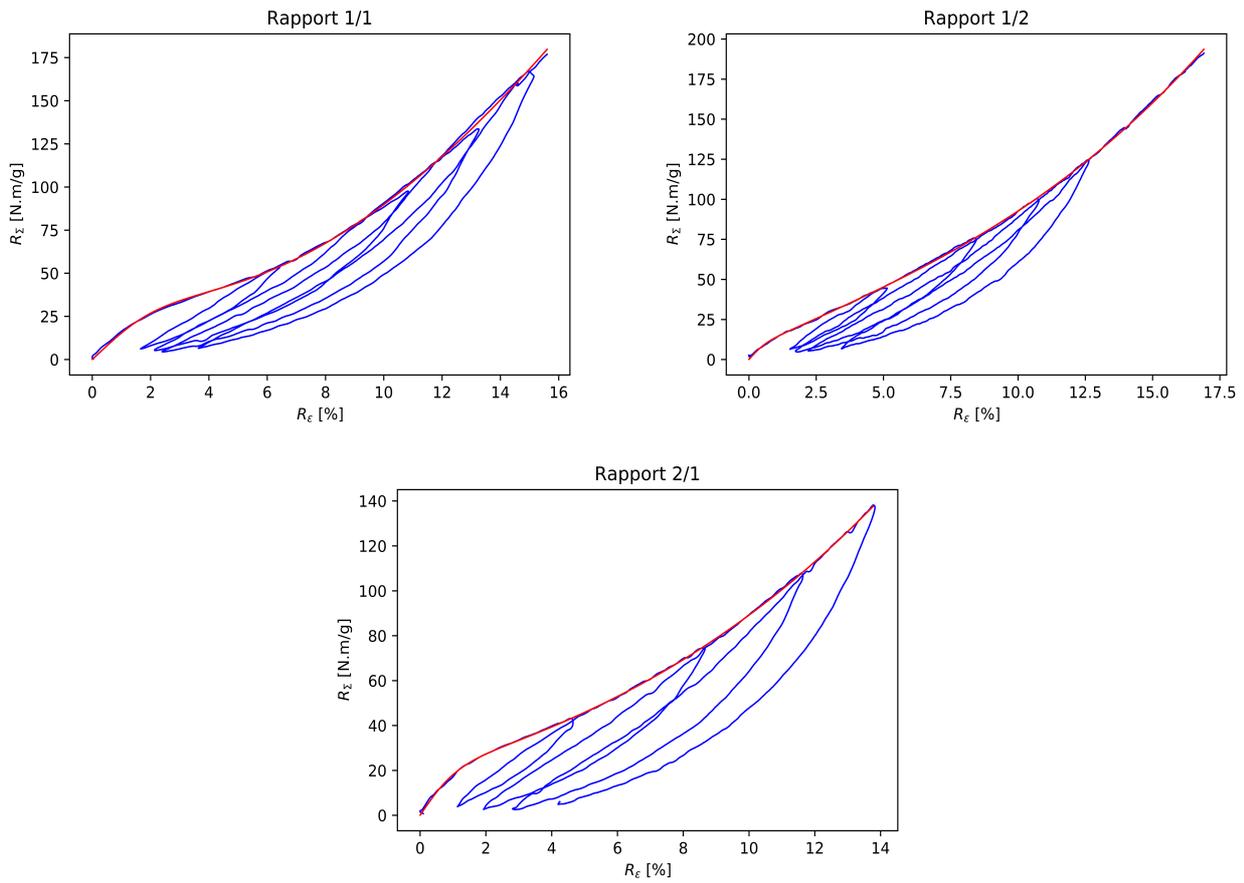


FIGURE 11.1 – Tissu 9017 E25 – Comparaison entre le modèle de première charge et les données expérimentales pour trois essais biaxiaux

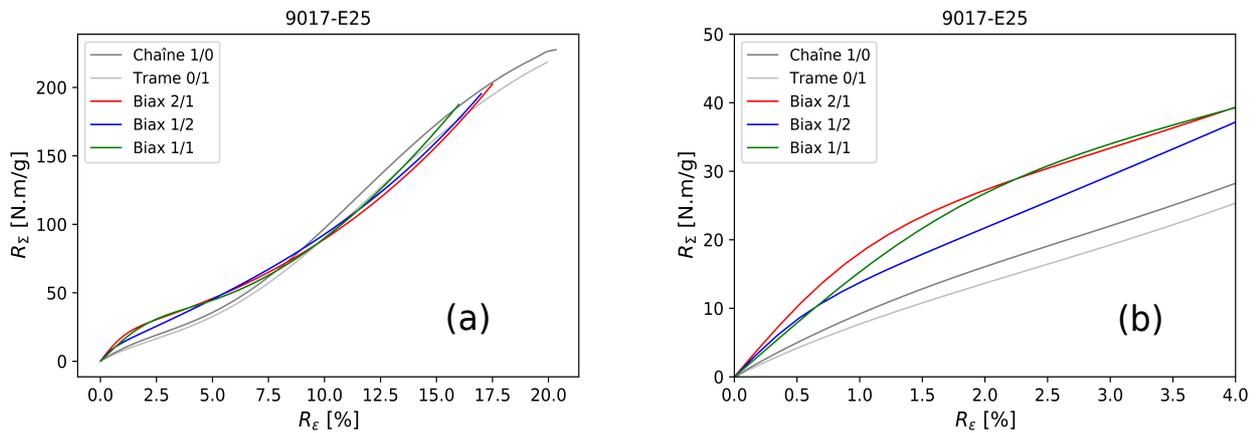


FIGURE 11.2 – Tissu 9017 E25 – Comparaison du comportement du tissu sous sollicitation 1D et 2D de première charge (a) et détail du début des courbes (b)

paramètres au total, qui dépendent de la valeur de contrainte à l'inversion. Cette opération est effectuée pour les trois rapports  $\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T}$ . Ces valeurs sont classées dans le Tableau 11.2. La Figure 11.3 montre le résultat de la modélisation (trait rouge) superposé aux résultats expérimentaux (trait bleu).

Paramètre	$\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T} = \frac{1}{1}$		$\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T} = \frac{1}{2}$		$\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T} = \frac{2}{1}$	
	$\Sigma_R$ [Nm/g]	$A_i$ [daNm/g]	$\Sigma_R$ [Nm/g]	$A_i$ [daNm/g]	$\Sigma_R$ [Nm/g]	$A_i$ [daNm/g]
$A_0(\Sigma_{R1})$		-7030		-3521		-5156
$A_1(\Sigma_{R1})$	53.58	1916	44.50	-6427	41.72	-2178
$A_2(\Sigma_{R1})$		5114		9948		7334
$A_0(\Sigma_{R2})$		-11035		-8409		-8846
$A_1(\Sigma_{R2})$	97.45	4270	75.0	501	74.14	1701
$A_2(\Sigma_{R2})$		6765		7909		7145
$A_0(\Sigma_{R3})$		-14636		-11321		-12293
$A_1(\Sigma_{R3})$	133.46	6317	99.27	4517	106.95	4105
$A_2(\Sigma_{R3})$		8318		6805		8188

TABLE 11.2 – Paramètres de modélisation des décharges en fonction de la valeur de la contrainte à l'inversion

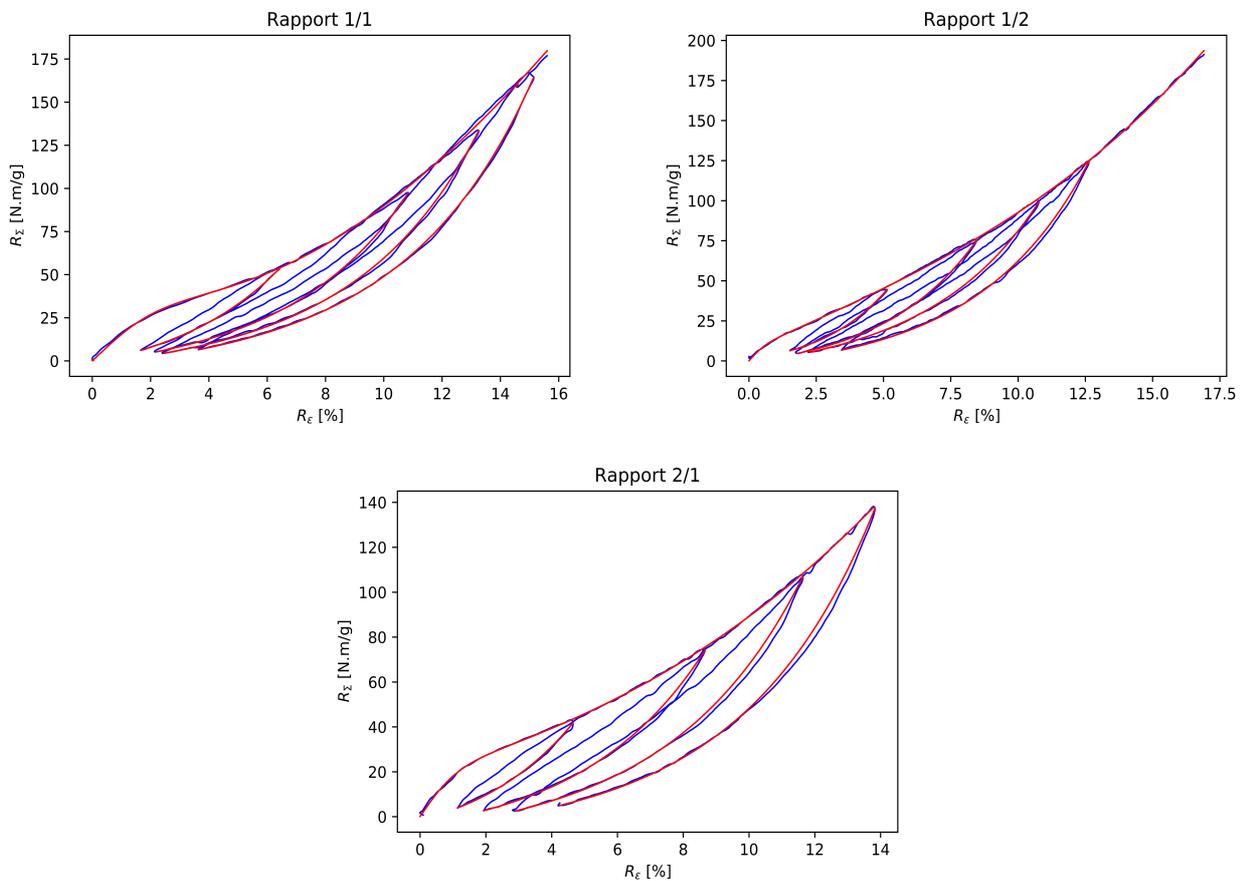


FIGURE 11.3 – Tissu 9017 E25 – Comparaison des résultats de modélisation de la première charge et des décharges avec les données expérimentales pour trois essais biaxiaux avec un rapport  $\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T}$  différent

### 11.3 Détermination des limites d'utilisation

Grâce aux éléments ci-dessus et au protocole de recherche des limites d'utilisation exposé en paragraphe 8.3.6, une recherche des limites d'utilisation, pour les valeurs résiduelles des rayons de déformation notées  $R_{\epsilon,P}$  telles que  $R_{\epsilon,P} = 0,4\%$ ,  $2\%$  et  $4\%$ , est réalisée. Les résultats sont

Direction	$R_{\varepsilon,P} = 0,4\%$		$R_{\varepsilon,P} = 2\%$		$R_{\varepsilon,P} = 4\%$	
	$R_{\Sigma}$	$R_{\varepsilon}$	$R_{\Sigma}$	$R_{\varepsilon}$	$R_{\Sigma}$	$R_{\varepsilon}$
	[Nm/g]	[%]	[Nm/g]	[%]	[Nm/g]	[%]
1/1	61	7.3	118	12.0	187	16
1/2	68	7.6	111	11.5	181	16.2
2/1	55	6.3	147	14.4	198	17.3

TABLE 11.3 – Tissu 9017E25 – Valeurs limites d’utilisation en rayon de contrainte ( $R_{\Sigma}$ ) et rayon de déformation ( $R_{\varepsilon}$ ) pour  $R_{\varepsilon,P} = 0,4\%$ ,  $R_{\varepsilon,P} = 2\%$  et  $R_{\varepsilon,P} = 4\%$  dans toutes les directions

donnés dans la Table 11.3.

Les valeurs résiduelles des rayons de déformation de 0,4% et 4% correspondent aux bornes de l’intervalle conventionnel défini dans la section 3.4. La valeur intermédiaire de 2% a été choisie à titre d’exemple pour souligner les capacités de prédiction de la méthode proposée.

La Figure 11.4 donne une illustration des résultats du protocole de recherche des limites d’utilisation, dont les valeurs en contrainte et en déformation sont indiquées au Tableau 11.3. Cette figure caractérise, pour les trois rapports  $\frac{\Sigma_c}{\Sigma_T}$ , le comportement en première charge et en décharge pour les deux déformations résiduelles aux bornes de l’intervalle conventionnel et pour la valeur intermédiaire de 2%.

Les valeurs limites d’utilisation en contrainte obtenues en traction biaxiale (tab. 11.3) et celles obtenues en traction simple dans les sens chaîne et trame (tab. 10.4) peuvent être présentées dans un espace  $\Sigma_T - \Sigma_C$ , comme le montre la Figure 11.5. Sur cette figure, chaque point est positionné par sa valeur de contrainte limite d’utilisation et par l’orientation de la réponse du matériau en contrainte. Sur chacun de ces points, deux barres d’erreurs sont associées. La première barre est circonférentielle ; elle correspond à l’écart type calculé sur l’orientation de la réponse du matériau en contrainte (cf. Chapitre 7). La deuxième barre est radiale ; elle correspond à une erreur constante de 5% de la valeur de contrainte limite d’utilisation. La valeur de 5% de l’erreur adoptée correspond au maximum de la valeur de l’écart-type glissant obtenu sur les essais uniaxiaux présentés en section 10.1.3.

Les résultats rassemblés sur la Figure 11.5 vont alimenter le critère de limite d’utilisation proposé au chapitre 9, pour les matériaux tissés. Ces données seront donc reprises sous l’angle de la mise en œuvre de ce critère et son identification, au chapitre suivant.

## 11.4 Conclusion

Grâce aux méthodes proposées dans le chapitre 8, les données brutes des essais de traction biaxiale du chapitre 7 ont été post-traitées afin d’obtenir les paramètres des modèles de première charge et de décharge. Ces modèles complets ont permis la recherche et l’obtention des limites d’utilisation en rayon de contrainte correspondant aux bornes de l’intervalle conventionnel d’utilisation en déformation défini dans le chapitre 3. Ces limites serviront à la mise en place du critère mécanique dont l’application finale sera développée au chapitre 12.

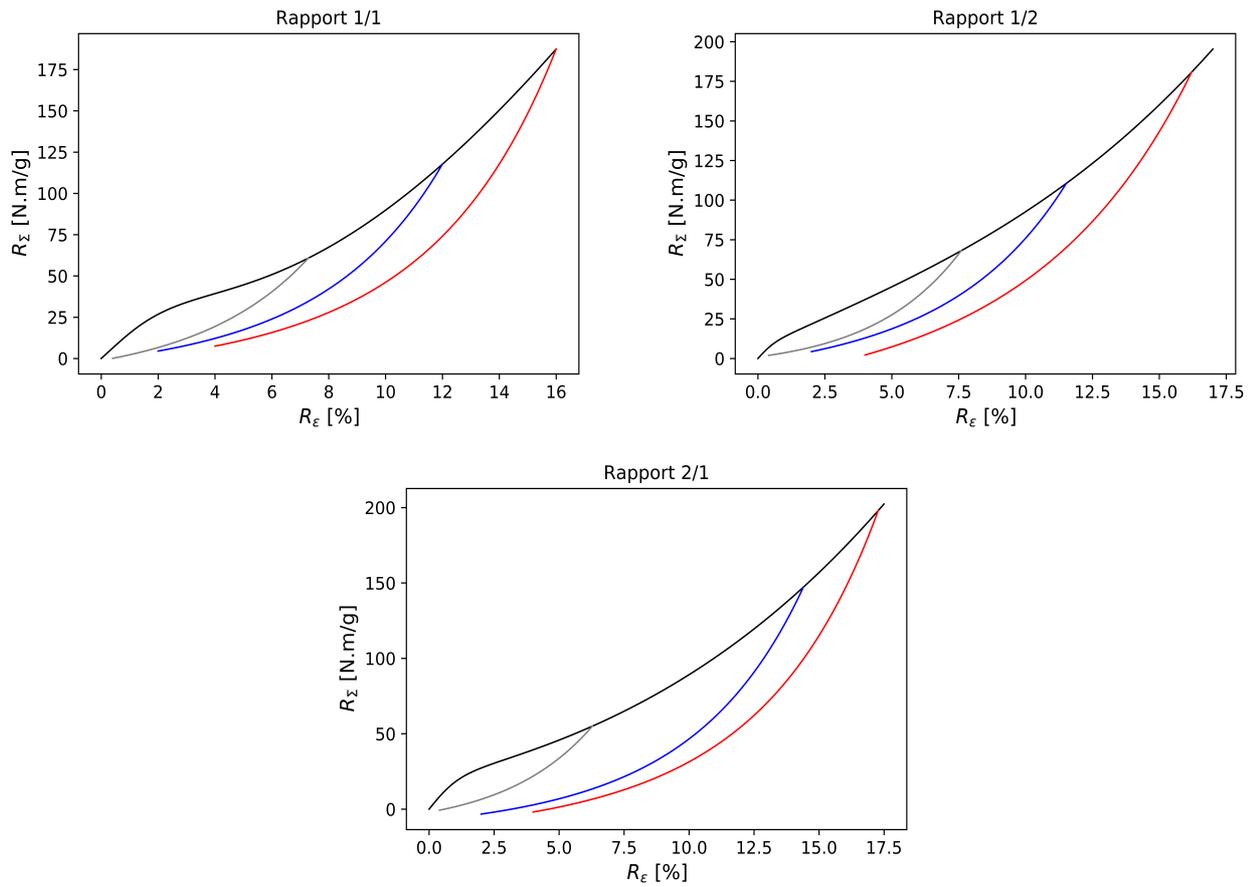


FIGURE 11.4 – Tissu 9017 E25 – Résultat du protocole de recherche des limites d'utilisation pour trois valeurs résiduelles des rayons de déformation  $R_{\epsilon,P}$  et pour les trois rapports de chargement biaxiaux  $\frac{\Sigma_C}{\Sigma_T}$

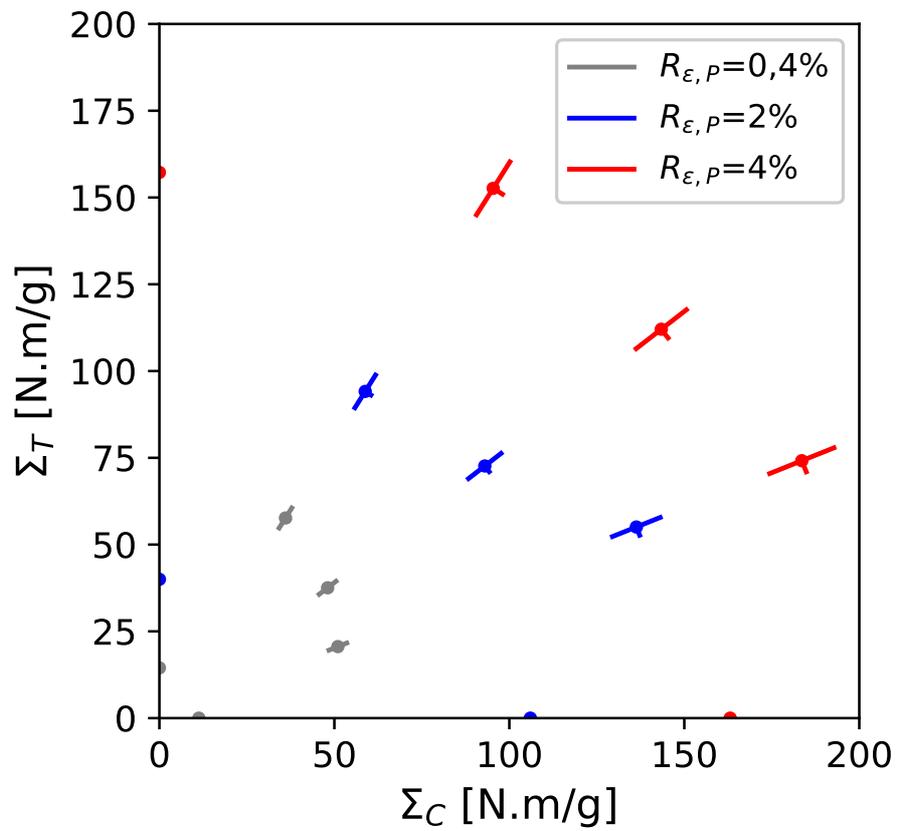


FIGURE 11.5 – Tissu 9017 E25 – Valeurs limites d'utilisation en contrainte obtenues en traction biaxiale et en traction simple dans les sens Chaîne et Trame représentées dans un espace  $\Sigma_T - \Sigma_C$

# Chapitre 12

## Application du critère mécanique

Dans ce chapitre, le critère de limite d'utilisation, proposé au chapitre 9, est identifié grâce aux résultats expérimentaux du tissu *9017E25*, rassemblés aux chapitres précédents, correspondant aux limites d'utilisation en contrainte, obtenus en traction simple et en traction biaxiale. Pour cela nous appliquons la méthode d'identification décrite au paragraphe 9.3.

### 12.1 Cas de la sollicitation biaxiale et identification des paramètres $A$ , $B$ et $C$

Commençons par les données issues des essais biaxiaux. Il convient de reprendre les données de la Figures 11.5 dans le plan  $(\Sigma_C, \Sigma_T)$  et d'identifier les valeurs des paramètres  $A$ ,  $B$  et  $C$ , qui caractérisent le critère sous sa forme adimensionnelle (9.7), dans le cas de la traction biaxiale.

A chaque valeur résiduelle de rayon de déformation  $R_{\epsilon, P}$ , appartenant à l'intervalle conventionnel d'utilisation en déformation  $[0, 4\%, 4\%]$ , correspond un critère donné de limite d'utilisation en contrainte et un triplet de paramètres  $(A, B, C)$ .

La méthode d'identification consiste à obtenir la courbe du critère dans le plan adimensionnel  $\Sigma_1 - \Sigma_2$  (cf. relation 9.3), qui passe, de façon optimale, le plus proche possible des points de mesure, isovaleur de  $R_{\epsilon, P}$ . Par définition cette courbe passe par les points  $(1, 0)$  sur l'axe des abscisses et  $(0, 1)$  sur l'axe des ordonnées. Il s'agit alors d'ajuster les paramètres  $(A, B, C)$  afin d'obtenir la courbe optimale en utilisant les trois points de mesure de traction biaxiale. Ceci est illustré par la Figure 12.1 (b). Cette opération est réalisée manuellement, sans algorithme numérique d'optimisation. Cette méthode est rapide et relativement simple à mettre en œuvre. Les résultats de ces optimisations sont donnés à la figure 12.1. Le Tableau 12.1 donne les résultats de la recherche des paramètres  $(A, B, C)$  pour chacune des isovaleurs de  $R_{\epsilon, P}$ .

Isovaleur de déformation $R_{\epsilon, P}[\%]$	$A$ [SU]	$B$ [SU]	$C$ [SU]
0,4	0,9	1,5	1,75
2	1,9	0,4	0,45
4	0,4	0,7	-0,25

TABLE 12.1 – Tissu *9017E25* – Valeurs des paramètres  $(A, B, C)$  du critère pour différentes valeurs de déformation résiduelle  $R_{\epsilon, P} = 0, 4\%, 2\%$  et  $4\%$

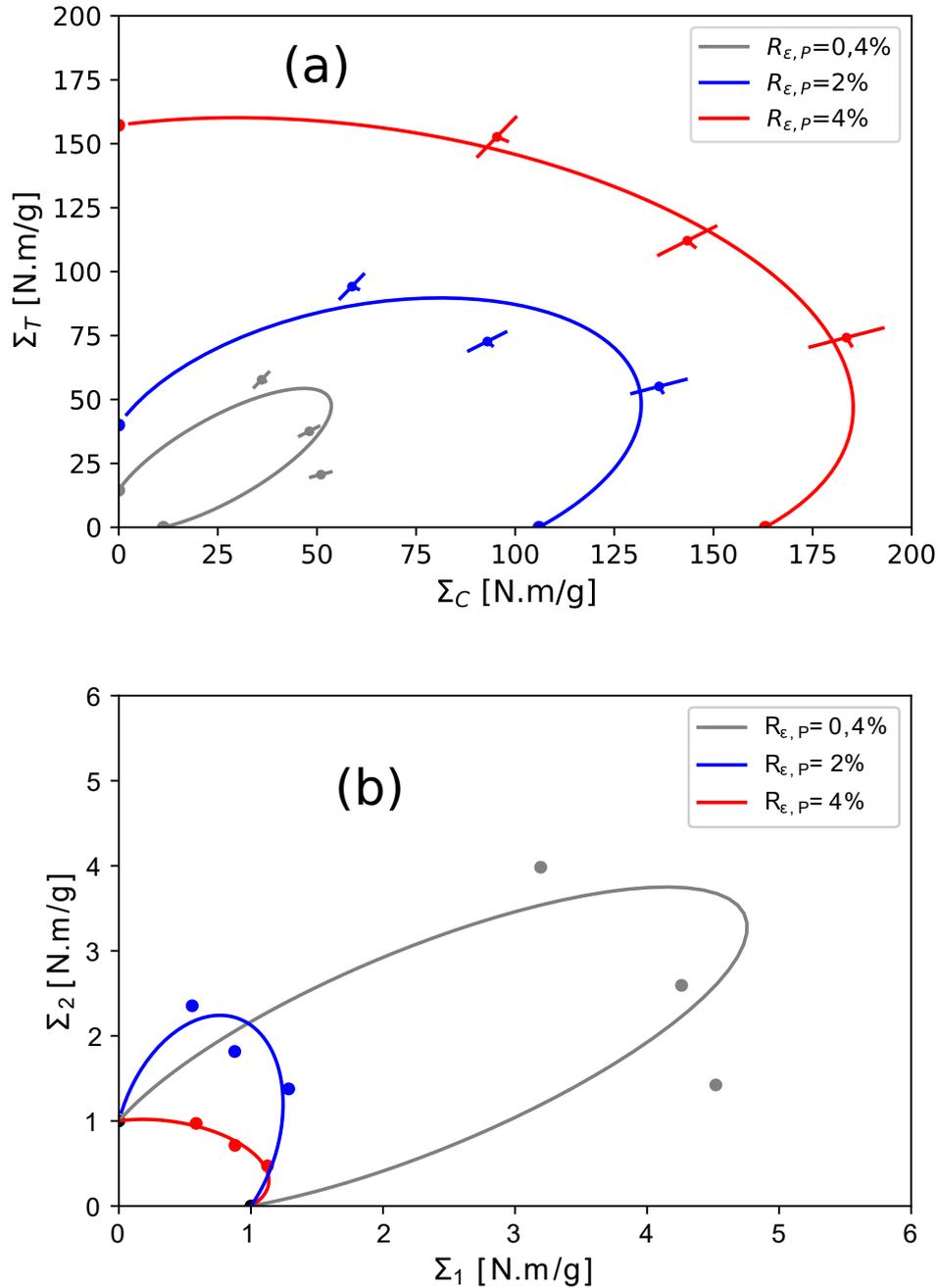


FIGURE 12.1 – Résultat d'identification des paramètres  $A$ ,  $B$  et  $C$  du critère pour les déformations résiduelles  $R_{\epsilon, \rho} = 0,4\%$ ,  $2\%$  et  $4\%$  dans le plan des contraintes  $(\Sigma_T - \Sigma_C)$  (a) et dans le plan adimensionnel  $(\frac{\Sigma_T}{Y} - \frac{\Sigma_C}{X})$  (b) (cf. relation 9.3)

Isovaleur de déformation $R_{\varepsilon,P}[\%]$	$S$ [SU]
0,4	2,8
2	10,4
4	22,4

TABLE 12.2 – Tissu 9017E25 – Valeur du paramètre  $S$  du critère pour différentes valeurs de déformation résiduelle  $R_{\varepsilon,P} = 0, 4\%, 2\%$  et  $4\%$

## 12.2 Cas de la sollicitation uniaxiale

### 12.2.1 Identification du paramètre $S$

L'identification du paramètre  $S$  est obtenue grâce à la relation 9.6 et la valeur mesurée de la contrainte limite  $\Sigma_{45^\circ}$  dans le sens biais. Pour les déformations résiduelles correspondant aux bornes de l'intervalle conventionnel d'utilisation en déformation, les valeurs de  $\Sigma_{45^\circ}$  sont données dans le Tableau 10.4. Pour la valeur intermédiaire de  $2\%$  de déformation résiduelle  $\Sigma_{45^\circ} = 6Nm/g$  et correspond à une limite en déformation  $\varepsilon_{2\%} = 7,8\%$ . Le Tableau 12.2 donne les valeurs identifiées du paramètre  $S$  pour chacune des isovaleurs de  $R_{\varepsilon,P}$ .

### 12.2.2 Cas des chargements hors axes

Dans le cas d'un chargement en traction simple hors axes, orienté d'un angle  $\theta$  par rapport à la direction chaîne, le critère conduit à la relation 9.5, qui donne l'expression de la contrainte limite d'utilisation du matériau  $\Sigma_\theta$ , en fonction de l'ensemble des paramètres du critère  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $S$  ainsi que des limites d'utilisation uniaxiale  $X$  et  $Y$ . L'évolution de  $\Sigma_\theta$  en fonction de  $\theta$  est tracé en Figure 12.2. Les points représentent les limites d'utilisation mesurées en traction simple pour les directions de la chaîne, de la trame et du biais. Les directions  $22,5^\circ$  et  $67,5^\circ$  sont rajoutées comme points de contrôle afin de vérifier la validité du critère. On remarque d'ailleurs que le critère obtenu est proche de ces points de contrôle. La direction de la chaîne et de la trame sont les plus résistantes et la limite admissible s'effondre dès que l'on ne sollicite plus le tissu dans ses axes principaux. Cette chute montre que la résistance du tissu est surtout liée aux fibres et que le changement d'angle de maille et l'enduction n'apportent que peu de résistance.

## 12.3 Forme 3D du critère et son utilisation

### 12.3.1 Visualisation 3D du critère

Comme nous avons pu le voir au chapitre 9, le critère décrit un volume dans l'espace  $(\Sigma_C, \Sigma_T, \Sigma_{CT})$ . Pour  $R_{\varepsilon,P} = 0, 4\%, 2\%$  et  $4\%$  respectivement, les figures 12.3, 12.4 et 12.5 donnent des visualisations 3D des critères correspondant au tissu 9017E25. Ces volumes sont générés à partir de l'équation du critère (9.1) et les valeurs des paramètres  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $S$  déterminées dans les paragraphes précédents ainsi que des limites d'utilisation  $X$  et  $Y$ .

Dans les trois cas présentés, il s'agit d'un ellipsoïde. Le volume est de plus en plus grand à mesure que le niveau de déformation résiduelle acceptable augmente. Par exemple, la hauteur suivant  $\Sigma_{CT}$  est de plus en plus grande. Elle passe de  $4Nm/g$  environ à l'apex de l'ellipsoïde pour  $R_{\varepsilon,P} = 0, 4\%$  à près de  $10Nm/g$  pour  $R_{\varepsilon,P} = 4\%$ . Cette augmentation est aussi visible dans les projections dans les plans (B) et (C) respectivement  $(\Sigma_C, \Sigma_{CT})$  et  $(\Sigma_T, \Sigma_{CT})$ .

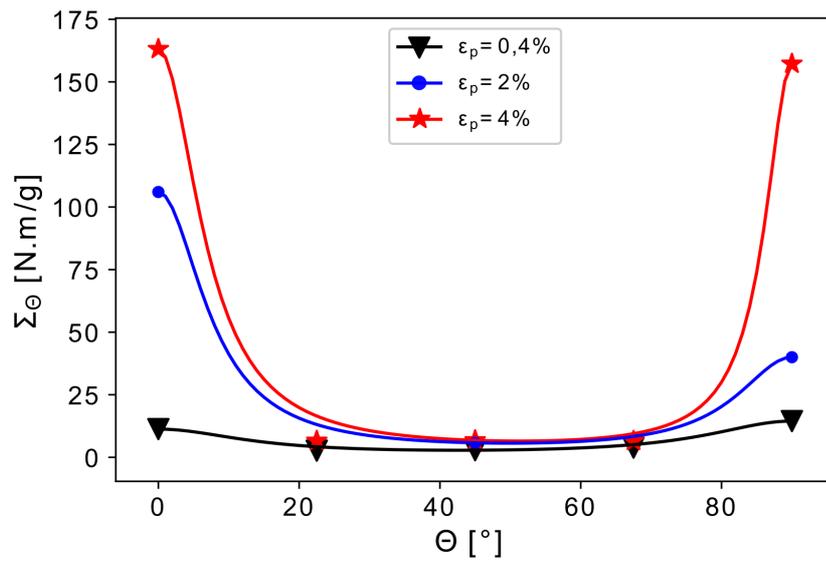


FIGURE 12.2 – Forme du critère pour  $\varepsilon_P = 0,4\%$ ,  $2\%$  et  $4\%$  dans le diagramme  $(\theta, \Sigma_\theta)$

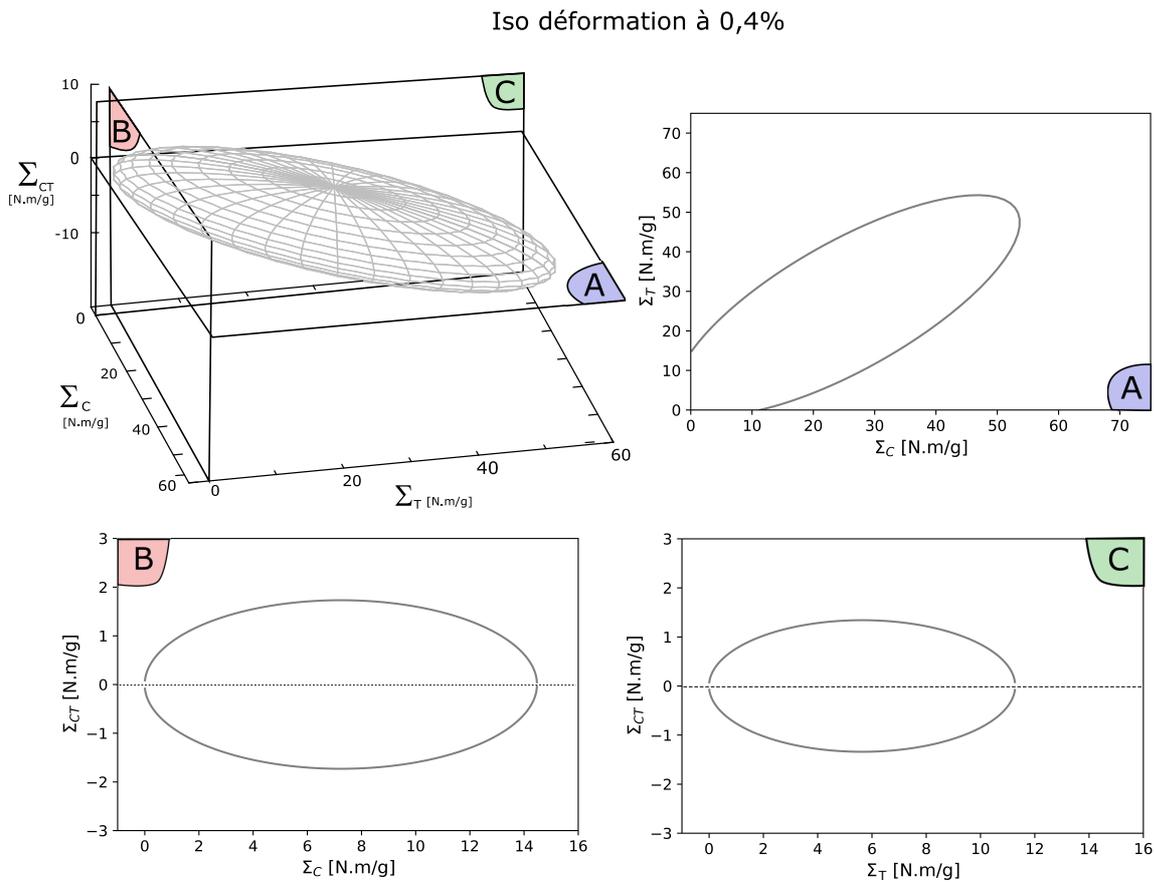


FIGURE 12.3 – Prédiction de la forme du critère 3D pour  $R_{\varepsilon,P} = 0,4\%$  dans l'espace  $(\Sigma_C, \Sigma_T, \Sigma_{CT})$

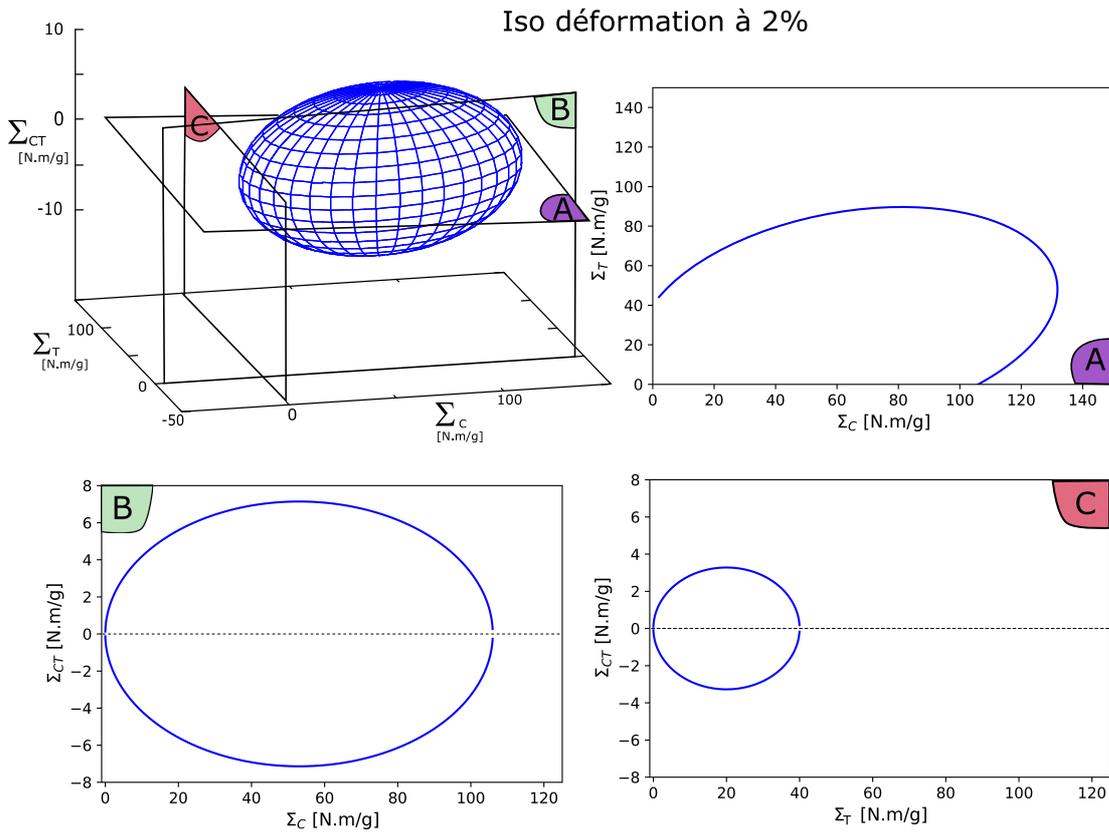


FIGURE 12.4 – Prédiction de la forme du critère 3D pour  $R_{\epsilon,P} = 2\%$  dans l'espace  $(\Sigma_C, \Sigma_T, \Sigma_{CT})$

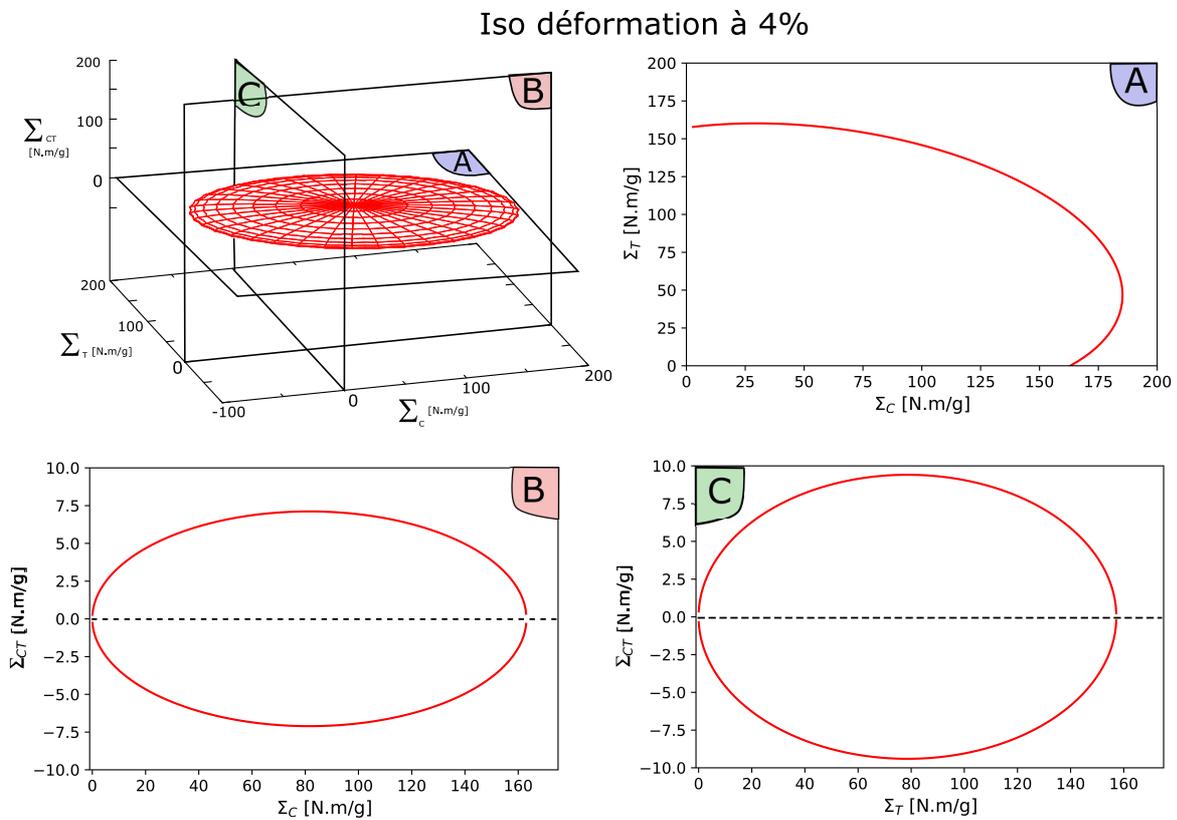


FIGURE 12.5 – Prédiction de la forme du critère 3D pour  $R_{\epsilon,P} = 4\%$  dans l'espace  $(\Sigma_C, \Sigma_T, \Sigma_{CT})$

Par ailleurs, les volumes ont une existence mathématique dans l'espace représentant le domaine de compression ( $\Sigma_C < 0$  et  $\Sigma_T < 0$ ). Cet espace est peu pertinent d'un point de vue mécanique car les matériaux tissés n'ont pas ou très peu de rigidité en compression et ne sont que très rarement et peu sollicités en compression; cela pourrait être le cas lors de plis ou ondulations du tissu, qui pourrait apporter une faible compression avant flambement. Mais cela reste très marginal. C'est pour cette raison que le plan (A) ( $\Sigma_C, \Sigma_T$ ) ne présente pas de valeurs négatives. La zone  $\Sigma_{CT} < 0$  est, quant à elle, physique et représente un cisaillement de signe négatif possible sur le tissu.

### 12.3.2 Utilisation du critère pour le dimensionnement mécanique

Dans le cas d'un dimensionnement mécanique, le concepteur doit sélectionner un matériau adéquat pour l'application visée. Ce dimensionnement s'effectue en plusieurs étapes :

- Choix du niveau de déformation résiduelle acceptable pour son utilisation  $R_{\epsilon, P}$ .
- Caractérisation expérimentale du domaine de sollicitation acceptable, i.e. le domaine d'utilisation, pour les matériaux candidats; il s'agit du critère et de son volume défini dans l'espace ( $\Sigma_C, \Sigma_T, \Sigma_{CT}$ ) pour l'isovaleur  $R_{\epsilon, P}$  choisie.
- Confrontation du niveau de sollicitation calculé pour l'application ciblée par rapport au domaine d'utilisation des matériaux candidats.
- Les matériaux dont le domaine d'utilisation englobe totalement les sollicitations, imposées par l'application ciblée, sont retenus car suffisamment résistants.

Pour le domaine des kites et parapentes, en général, le concepteur, s'intéresse à la fois à la résistance mécanique des tissus mais aussi à la capacité de l'engin à voler. Les matériaux capables de supporter les efforts mécaniques sont donc classés en fonction de leur masse surfacique afin de révéler le meilleur compromis entre résistance et légèreté.

## 12.4 Conclusion

Les contraintes limite d'utilisation obtenues expérimentalement, en traction uniaxiale au chapitre 10 et en traction biaxiale au chapitre 11, servent de données initiales à l'obtention des paramètres du critère mécanique anisotrope du matériau tissé. Grâce à la définition du critère et sa méthode d'identification, données au chapitre 9, les paramètres de ce dernier ont été obtenus au regard des résultats expérimentaux. Le critère, ainsi formalisé, propose donc la prédiction de la surface seuil en contrainte, dans le cas 1D et dans le cas 2D. Les limites d'utilisation en contrainte à  $22,5^\circ$  et  $67,5^\circ$  ont servi de points de contrôle du critère qui se révèle efficace. L'obtention d'un critère anisotrope mécanique était un objectif important de l'étude menée, afin de proposer au concepteur de structure un outil de dimensionnement fiable basé sur la réalité du comportement des matériaux tissés.

## Sixième partie

# Résultats et analyse concernant les matériaux industriels



# Résultats confidentiels

Dans le cadre de ce travail, cinq matériaux ont été étudiés en traction uniaxiale et en traction biaxiale. Ces matériaux ont été fournis par la société *PORCHER Industries*. Quatre matériaux industriels, parmi les cinq, présentent un caractère confidentiel et un seul matériau présente un caractère non confidentiel.

Le matériau non confidentiel est le tissu *9017E25*, qui a servi de matériau modèle pour les développements réalisés dans les cinq premières parties de ce mémoire. La sixième partie du mémoire est consacrée aux quatre matériaux industriels à caractère confidentiel. Dans cette sixième partie et pour les quatre matériaux concernés, sont présentés les résultats bruts de traction uniaxiale et biaxiale, les résultats de modélisation des premières charges et des décharges, les résultats de détection des contraintes limites d'utilisation aux bornes de l'intervalle conventionnel d'utilisation en déformation et l'identification du critère anisotrope.

Cette sixième partie confidentielle a donc été retirée du mémoire afin de protéger les intérêts de la société *PORCHER Industries*.



# Conclusion



# Conclusion générale de la thèse

L'étude du comportement mécanique des matériaux tissés, utilisés pour la confection des kites, a conduit à mener une démarche globale intégrant à la fois un dialogue avec les concepteurs et une analyse quantitative pour des kites ayant subi un usage intensif, ainsi que des analyses numériques par interaction fluide-structure. Au cours de cette démarche, la notion essentielle de limite d'usage en déformation est apparue comme une preuve de l'amplitude des sollicitations en service. Cette démarche a permis de conclure que des déformations rémanentes de plusieurs pourcents étaient mémorisées au sein des mailles du matériau tissé. La notion de contrainte limite d'élasticité, couramment utilisée pour les matériaux métalliques, devait être remplacée par une notion de limite d'usage ou limite d'utilisation, puisqu'un tissu en fibre polymère ne présente pas réellement de domaine d'élasticité. Finalement, l'ensemble de la démarche a conduit à la définition d'un intervalle conventionnel d'utilisation en déformation.

Les développements techniques propres à la traction uniaxiale ont été l'occasion de définir les méthodes de confection et de marquage des éprouvettes. Plus généralement, les mises au point expérimentales ont concerné la conception d'une ergonomie face à la mise en place d'une éprouvette dans les mors à pincement hydraulique à haute pression. L'ambition initiale des développements techniques de la presse uniaxiale a été de disposer d'un dispositif expérimental permettant des modes de pilotage originaux, qu'il s'agisse d'un pilotage en déformation ou en mode mixte déformation/force. Ces développements techniques ont impliqué un fort investissement notamment dans le développement du logiciel et de l'extensomètre optique en collaboration avec la société *MTS Provisys Eng.*

La réalisation des essais de traction uniaxiale a permis de valider le protocole complet de l'essai de traction uniaxiale. Ce protocole s'étend de la découpe de l'éprouvette jusqu'au mode de pilotage en déformation ou en pilotage mixte déformation/force. Ce protocole aboutit à fournir l'ensemble des informations nécessaires à l'application de la méthode de recherche de limite d'utilisation, dans le cas restreint de la sollicitation 1D. Ce protocole a permis de prospecter les comportements dans les directions Chaîne, Trame et en hors axes avec le sens Biaise,  $22,5^\circ$  et  $67,5^\circ$ . Les résultats expérimentaux bruts obtenus permettent d'analyser toute la complexité du comportement du matériau.

Dans le cadre de cette thèse, dédiée au comportement mécanique des matériaux tissés, la disponibilité d'un dispositif de traction biaxiale des matériaux tissés était un des objectifs majeurs. Suite à une adaptation de la presse, les nombreuses modifications apportées ont permis, dans le temps imparti, de développer un système de mors adapté aux matériaux tissés et à un mode de pilotage en déplacement. La définition d'une géométrie d'éprouvette, qui permet de garantir des champs homogènes dans la zone utile, était un aspect crucial à l'intérêt du dispositif. Après de multiples essais préliminaires, incluant des échecs, la fabrication et l'ergonomie de mise en place des éprouvettes cruciformes a abouti. Des résultats génériques originaux en traction biaxiale ont été obtenus.

La réalisation des essais de traction biaxiale a permis de valider le protocole complet de l'essai de traction biaxiale. Ce protocole s'étend de la découpe de l'éprouvette jusqu'au mode de pilotage en déplacement et la mesure des contraintes et des déformations dans la zone utile de l'éprouvette. Ce protocole aboutit à fournir l'ensemble des informations nécessaires à l'application de la méthode de recherche de limite d'utilisation, dans un espace 2D exprimé en contrainte. Le protocole consiste en des tractions biaxiales suivant les directions Chaîne et Trame. Ce choix est lié essentiellement à un aspect en relation avec la conception et la confection des voiles, qui consiste à orienter les fils du tissu dans les directions principales des contraintes subies par la structure.

L'analyse des résultats expérimentaux en traction uniaxiale et biaxiale permet de synthétiser le comportement complexe des tissus au travers des points qualitatifs suivants : un tissu a la capacité de mémoriser la sollicitation maximale subie sous la forme d'une déformation permanente de la maille élémentaire. Globalement le comportement mécanique général des matériaux tissés est irréversible et non linéaire à la charge comme à la décharge. La notion d'élasticité et l'hypothèse de décharge élastique, adoptées dans le cas des matériaux métalliques, ne sont plus pertinentes dans ce cas. Face à cette richesse de comportement des matériaux tissés, des modèles de première charge et de décharge ont été proposés dans un espace contrainte/déformation, qu'il s'agisse de sollicitations 1D ou 2D. Sur cette base, une méthode de détection de la contrainte limite d'utilisation est fournie au concepteur de sorte qu'il puisse exprimer en contrainte maximale, les conditions de services du matériau tissés, et les comparer à cette limite. Cette méthode est basée sur la donnée préalable d'une valeur de déformation résiduelle maximale ciblée par le concepteur.

La connaissance des limites d'utilisation des matériaux tissés, suivant des trajets de chargement variés, ne constitue pas un outil de conception suffisant. Afin de prendre en considération l'ensemble de l'espace de sollicitation en contrainte, il convient d'introduire un critère anisotrope, adapté à l'utilisation des matériaux tissés. Ainsi, un critère a donc été proposé et sa formulation conduit à une surface seuil définie dans l'espace des contraintes. Les propriétés de ce critère original ont été développées et sa méthode d'identification a été précisée.

Les données brutes des essais de traction uniaxiale et biaxiale ont été post-traitées afin d'obtenir les paramètres des modèles de première charge et de décharge. Ces modèles complets ont permis la recherche et l'obtention des limites d'utilisation en contrainte correspondant aux bornes de l'intervalle conventionnel d'utilisation en déformation résiduelle. Ces limites alimentent le critère mécanique du matériau tissé et permettent d'identifier ses paramètres. Les limites d'utilisation en contrainte à  $22,5^\circ$  et  $67,5^\circ$  ont servi de points de contrôle du critère qui se révèle efficace. L'obtention d'un critère mécanique était un objectif important de l'étude menée, afin de proposer au concepteur de structure un outil de dimensionnement fiable basé sur la réalité du comportement des matériaux tissés.

# Septième partie

## Annexes



# Annexe A

## Analyse des déformations sur kites post-mortem

### A.1 Analyse des déformations résiduelles

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats de mesures de la maille élémentaire et des déformation correspondantes, des matériaux A, B et C, qui constituent les kite 1 et kite 2. Différents points de mesures ont été choisis pour chacun des deux kites.

Pour l'ensemble des résultats, les barres d'erreur représentent l'écart type sur l'échantillon de cinq mesures effectuées au même point. Notons que pour les faibles valeurs de déformations l'erreur de mesure devient importante.

#### A.1.1 Kite 1

Pour le kite 1, les résultats des mesures de la maille élémentaire, à l'état initial, pour le matériau neuf et les valeurs  $(f, w, \alpha)$  dans les différentes zones, pour le matériau usagé, sont donnés par la Figure A.1. Les résultats correspondants en déformation sont visibles sur la Figure A.2, pour le matériau A.

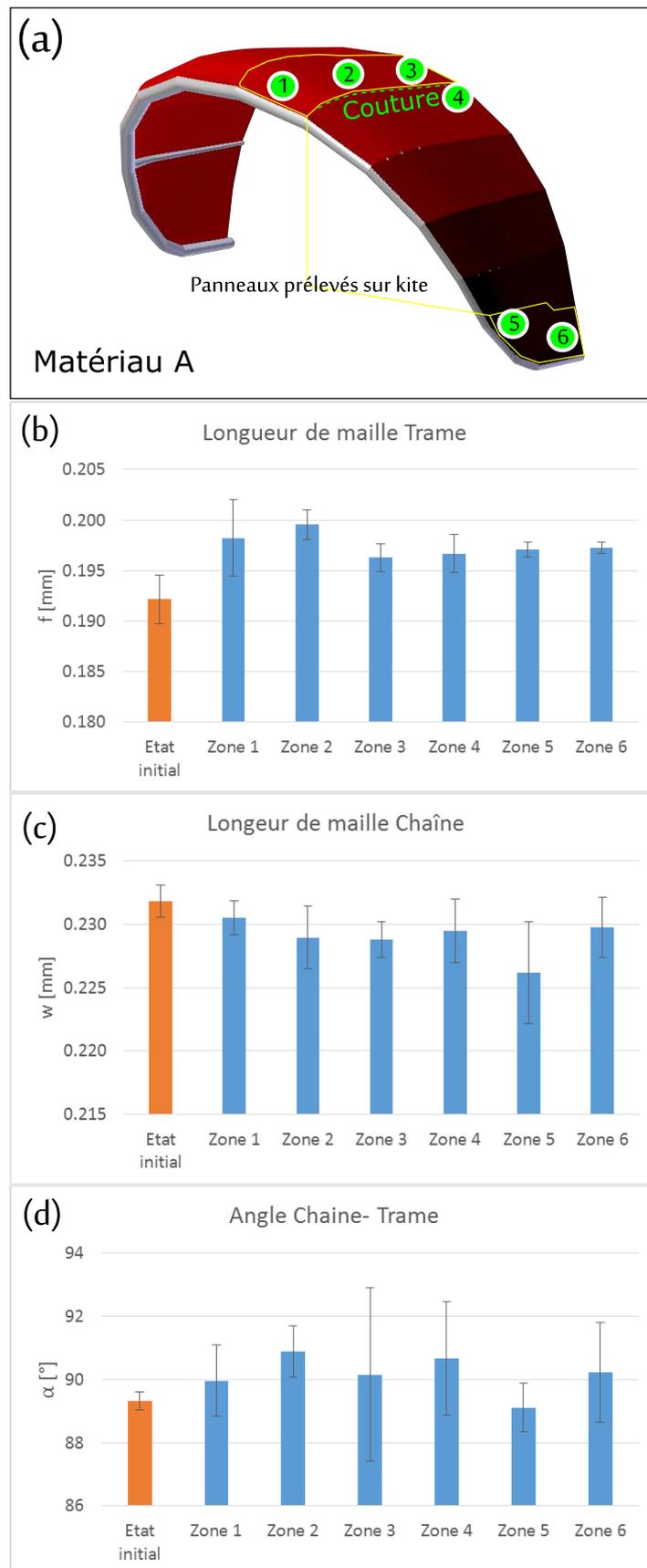


FIGURE A.1 – Kite n° 1 : (a) Points de mesure sur le kite 1 ; (b) Mesure dans le sens Trame ; (c) Mesure dans le sens Chaîne ; (d) Mesures de l'angle de maille

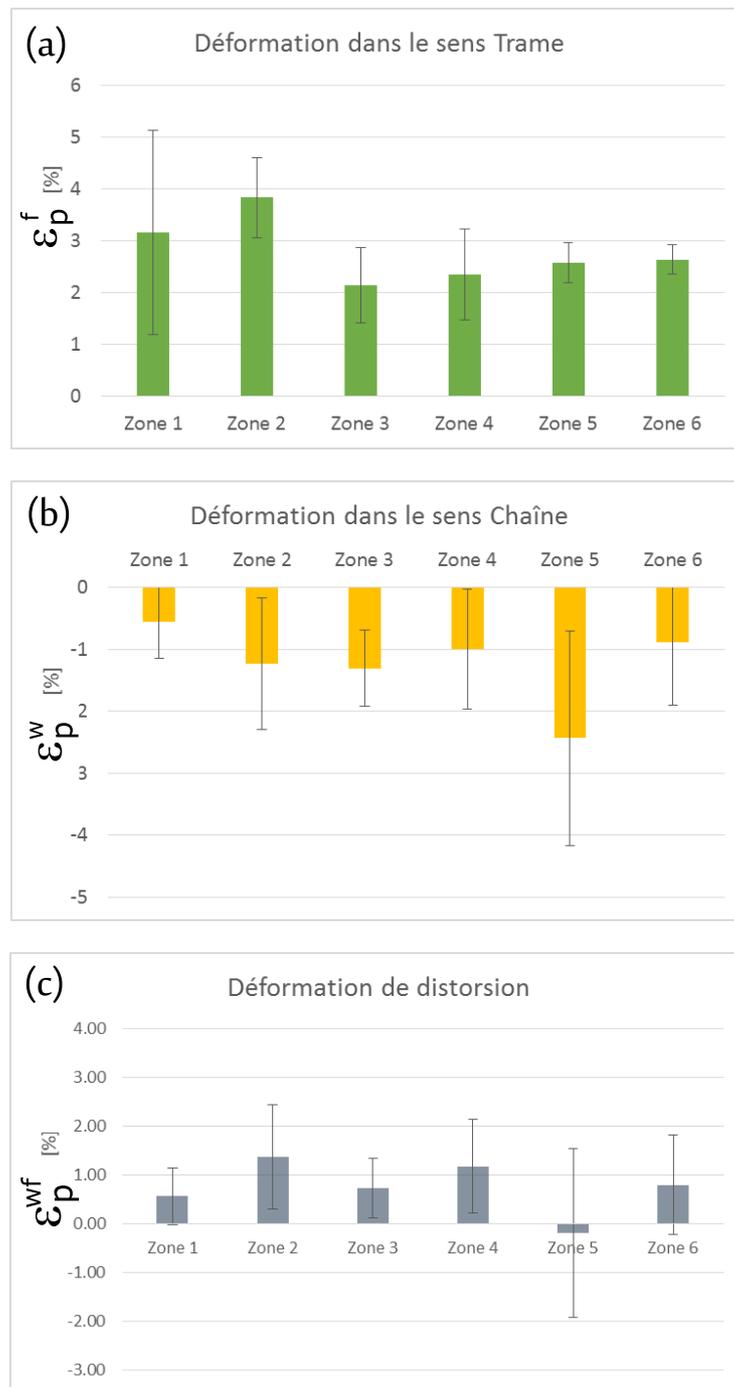


FIGURE A.2 – Kite n° 1 - matériau A : Calculs des déformations (a) dans le sens Trame ; (b) dans le sens chaîne ; (c) en distorsion

### A.1.2 Kite 2

Les résultats des mesures de la maille élémentaire et des déformations correspondantes sur le Kite n°2 sont visibles en Figure A.3 et A.4 pour le matériau B et en Figure A.5 et A.6 pour le matériau C.

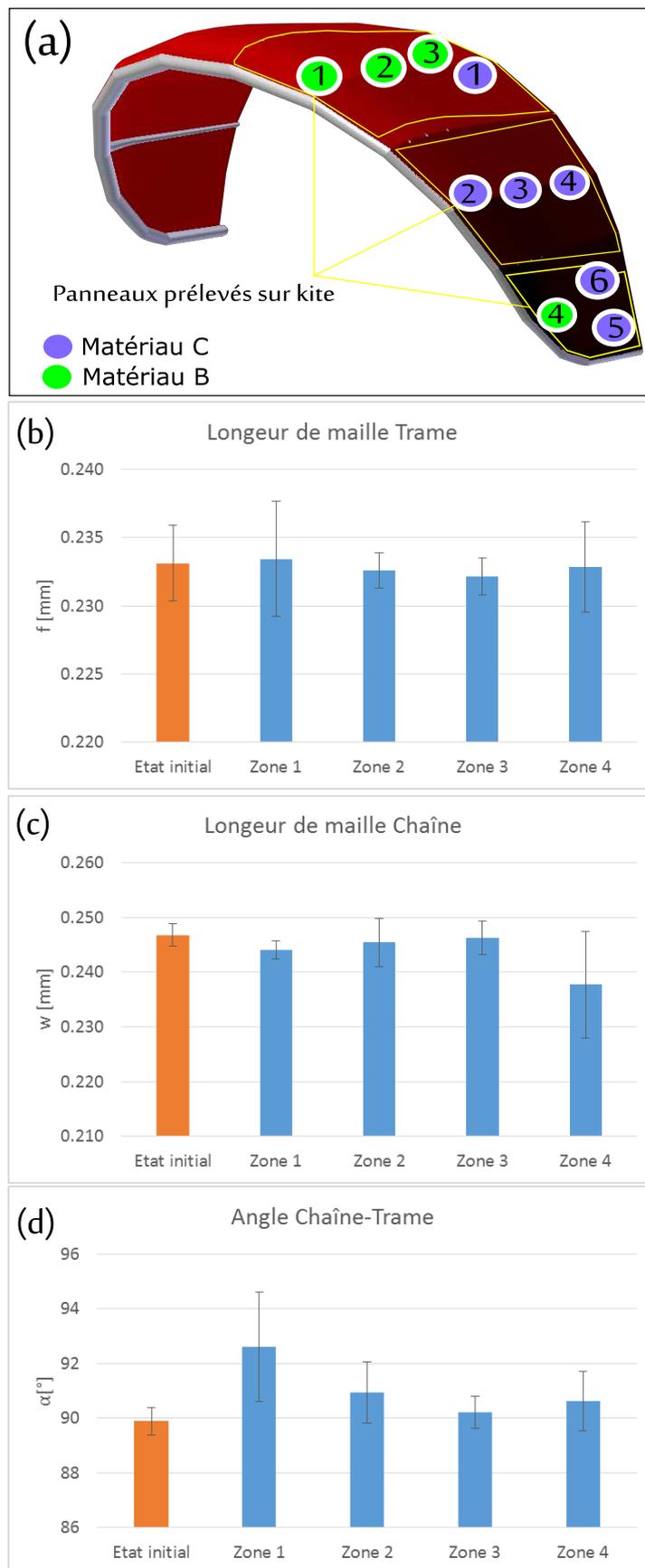


FIGURE A.3 – Kite n° 2 - matériau B : (a) Points de mesure sur le kite 2 ; (b) Mesure dans le sens Trame ; (c) Mesure dans le sens Chaîne ; (d) Mesures de l'angle de maille

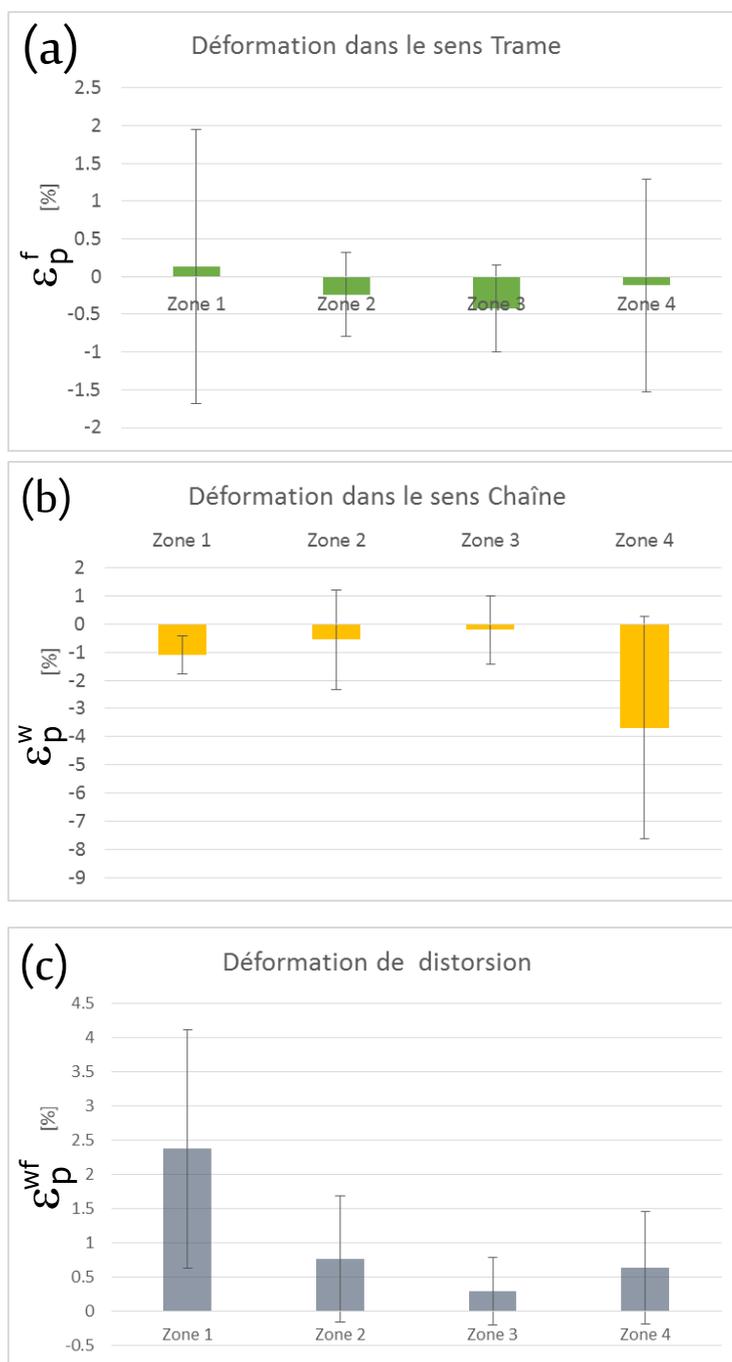


FIGURE A.4 – Kite n° 2 - matériau B : Calculs des déformations ; (a) dans le sens Trame ; (b) dans le sens chaîne ; (c) en distorsion

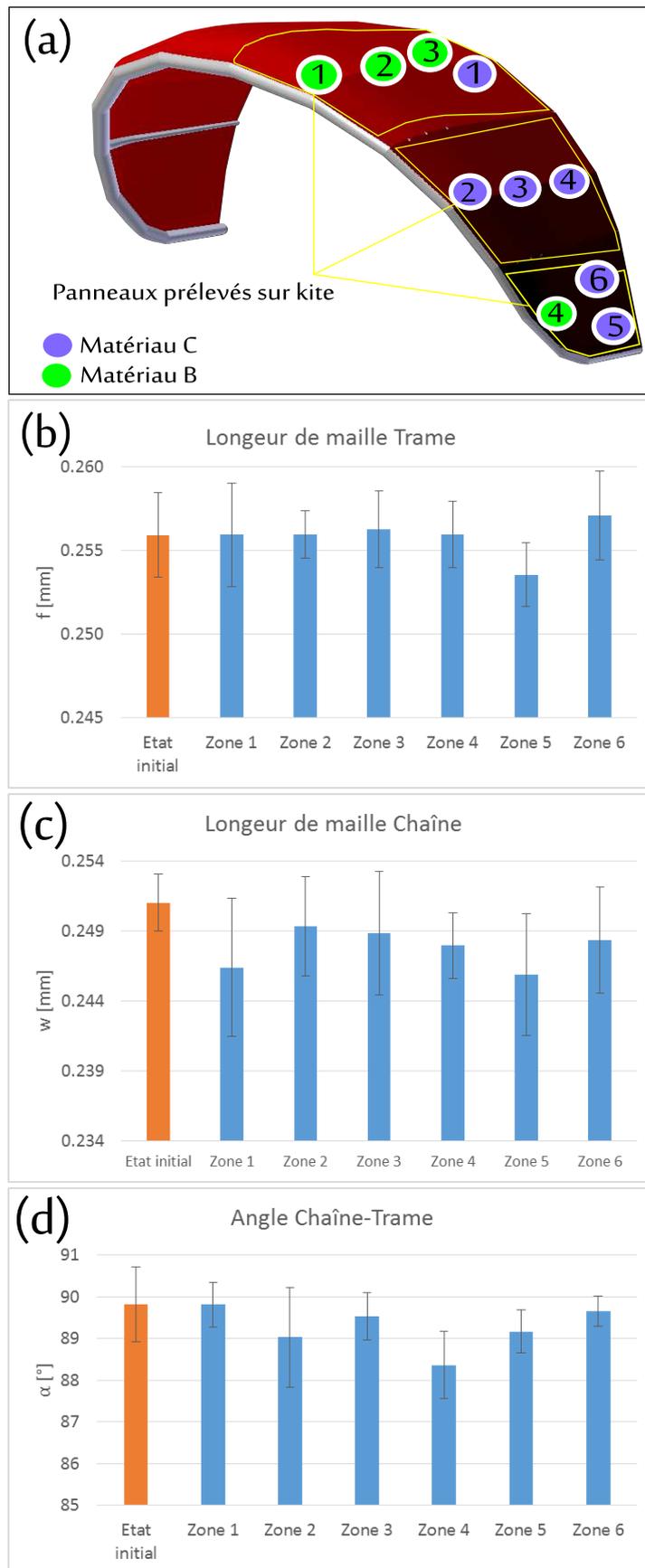


FIGURE A.5 – Kite n° 2 - matériau C : (a) Points de mesure sur le kite 2 ; (b) Mesure dans le sens Trame ; (c) Mesure dans le sens Chaîne ; (d) Mesures de l'angle de maille

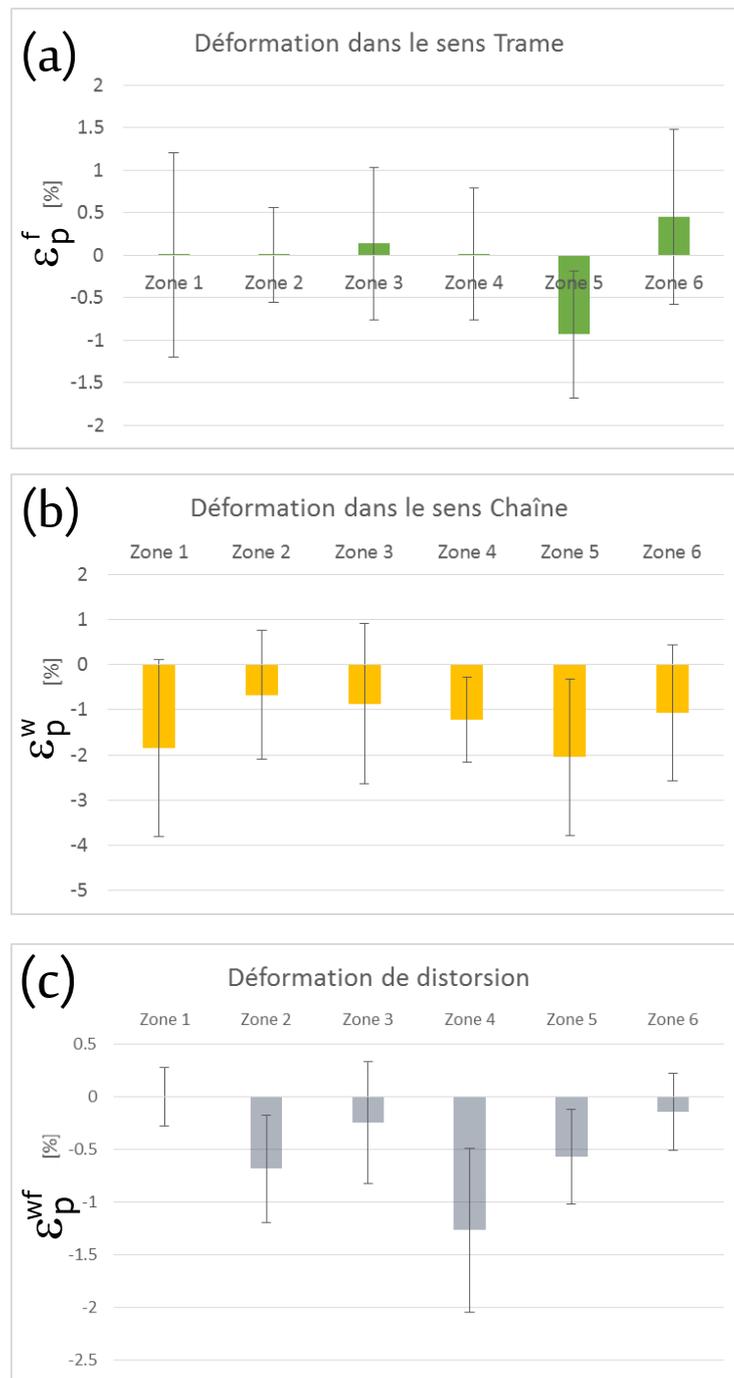


FIGURE A.6 – Kite n° 2 - matériau C : Calculs des déformations (a) dans le sens Trame ; (b) dans le sens chaîne ; (c) en distorsion

## A.2 Analyse des espace inter-mailles

Une autre analyse est possible sur les images des tissus : l'évolution de l'espace inter-maille. D'un point de vue de l'analyse d'image, l'étude de la densité de cet espace est équivalente à l'étude d'un taux de porosité. Cependant cet espace n'est pas un vide, il est rempli d'enduction déposée sur le textile, c'est pourquoi il sera nommé "espace inter-maille". Pour obtenir cette information, la méthode présentée en Figure A.7 sera utilisée :

- L'image couleur est tout d'abord transformée en niveau de gris. L'image couleur codée avec trois informations (Rouge Vert Bleu) est réduite à une information (échelle du blanc

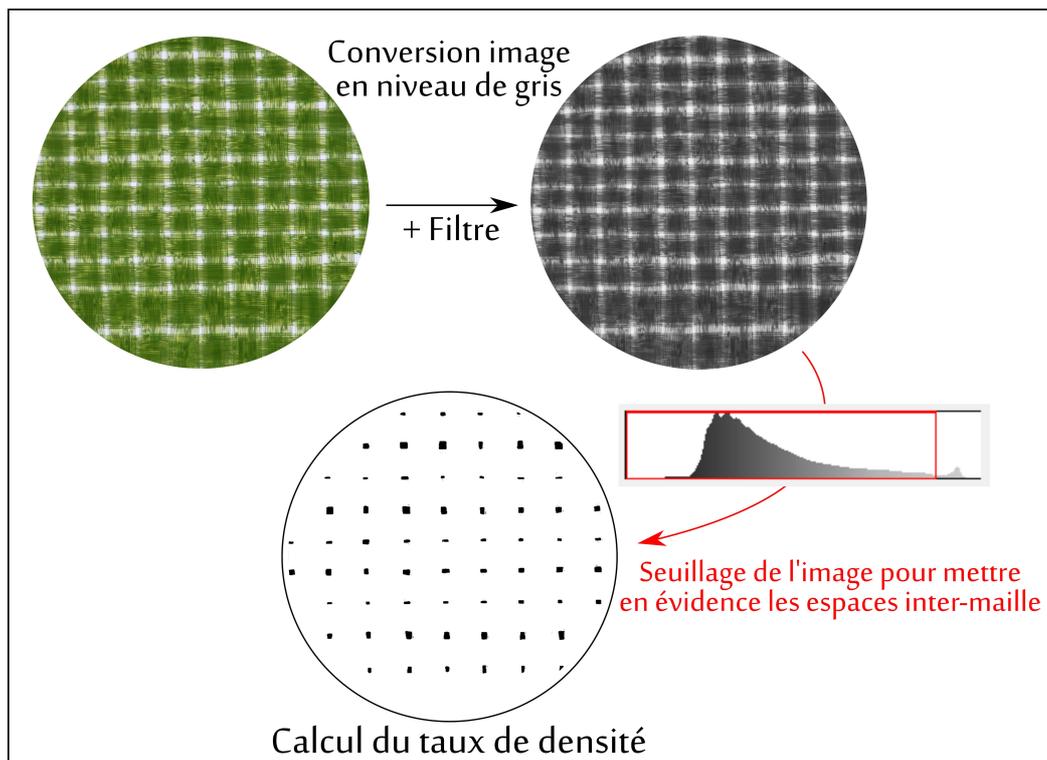


FIGURE A.7 – Méthode de calcul du taux d'espace inter-maille

au noir). Les pixels qui composent l'image ont donc une valeur comprise entre 0 (pour le blanc) et 255 (pour le noir).

- L'image est ensuite filtrée. Afin de faciliter la reconnaissance entre les fibres et l'enduction dans les espaces sans fibres, l'image devient légèrement floue pour uniformiser les zones de fibres et sans fibre.
- L'image est seuillée. Grâce à l'histogramme de la valeur de gris des pixels qui composent l'image, une limite entre fibre et enduction est définie. Au-dessus de cette limite les pixels prennent la valeur 0 (=blanc), en dessous ils prennent la valeur 255(=noir). Cette limite est la valeur de niveau de gris qui correspond au minimum entre les deux pics de l'histogramme. L'image est donc binaire avec deux phases. Pour discriminer l'enduction nous adoptons une image avec l'espace inter-maille en noir et les fibres en blanc.
- Le calcul du taux de densité  $TD$  peut être calculé en équation (A.1).

$$TD = \frac{NPN}{NPT} \quad (\text{A.1})$$

Avec  $NPN$  et  $NPT$  respectivement le Nombre de Pixel Noir (espace inter-maille) et le Nombre de Pixel Total de l'image.

Les résultats sont présentés en Figure A.8. Comme précédemment, il s'agit d'une valeur moyenne calculée à partir de cinq photographies à l'état initial, et sur les zone des oreilles et de la canopée.

Figure A.8 montre la réduction de l'espace inter-maille peut être interprété par l'étalement des fibres de tissu en cours du temps. Sous l'effet des charges-décharges successives, les fils se tendent, se détendent et se déplacent. La géométrie du fil change et ce dernier occupe plus d'espace réduisant ainsi l'espace au centre de la maille.

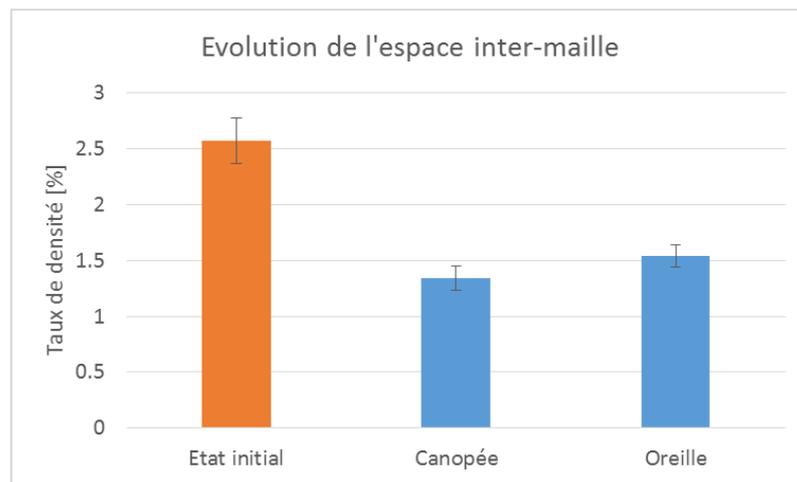


FIGURE A.8 – Evolution du taux de densité du matériau A du kite 1 pour les zones de la canopée et des oreilles

### A.3 Analyse de la coloration

L'observation du tissu neuf par rapport au tissu vieilli révèle d'autres différences : un changement de couleur du tissu.

En effet, le tissu utilisé a perdu l'intensité de sa couleur par rapport à la couleur d'origine. Cette perte d'éclat se traduit par la suppression des pixels de couleur à forte luminance dans l'histogramme des couleurs du tissu utilisé (Figure A.9).

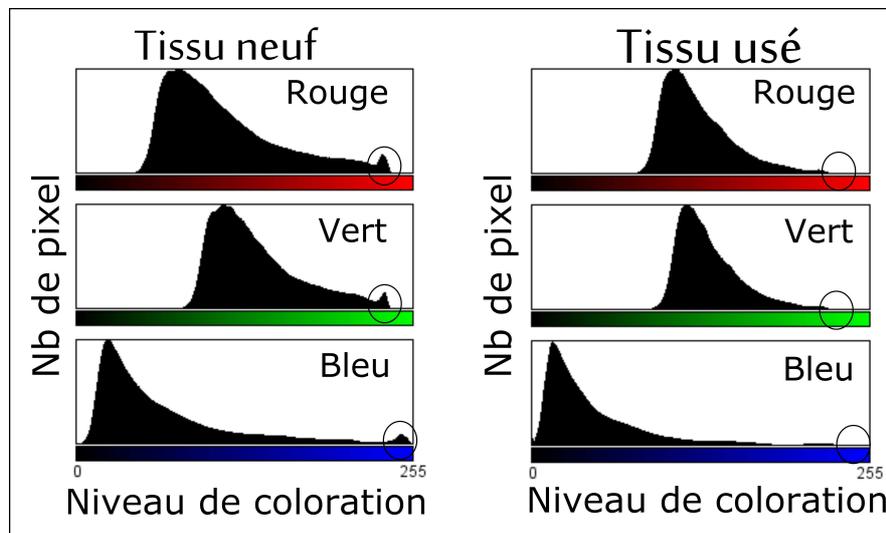


FIGURE A.9 – Histogramme des couleurs pour un tissu neuf (gauche) et utilisé (droite) - Kite n° 1



## Annexe B

# Impact de l'angle d'incidence du vent sur les performances de l'aile

Il existe des facteurs de variation du coefficient de Loyd qui ne sont pas liés aux déformations du kite. Le réglage de l'aile par exemple : pour le calcul du Coefficient de portance et du coefficient de trainé, le flux d'aire est modélisé sur le profil de l'aile de kite. Le champ de vitesse autour du profil est dépendant du réglage de l'aile et notamment de son inclinaison  $\alpha_{gom}$  par rapport à l'horizontale définie par l'utilisateur du kite, voir Figure B.1.

Un autre facteur de variation du coefficient de Loyd est l'angle d'incidence du vent sur l'aile  $\alpha$ . Les facteurs de réglage de l'aile semblent avoir un impact pour des vents faibles et la différence s'estompe pour des vents plus fort (au delà de  $12m.s^{-1}$ ). C'est ce qui est visible en Figure B.1-(b) pour différents réglages de l'aile.

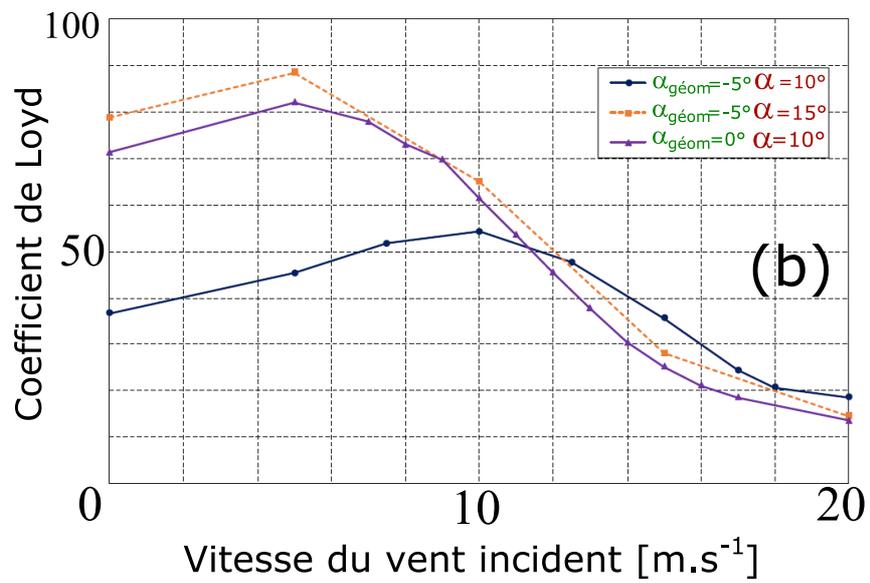
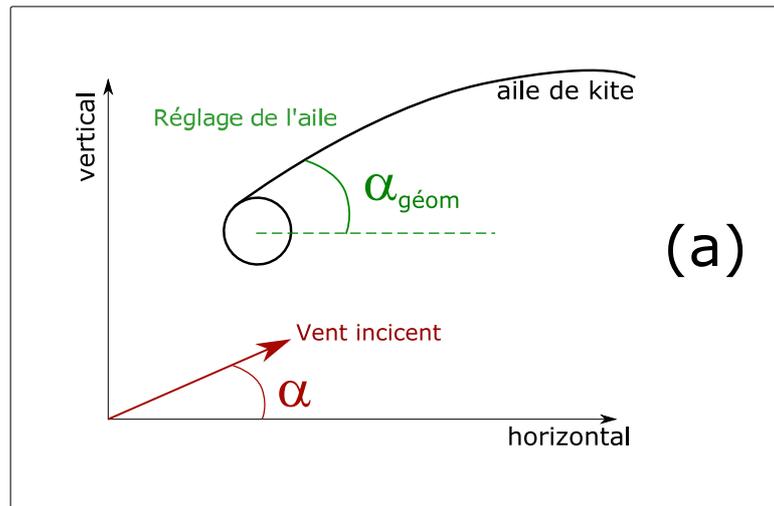


FIGURE B.1 – Impact du réglage de l'aile sur le coefficient de Loyd[38]

## Annexe C

# Influence du paramètre $N$ sur les paramètres de Prony

Une fois les investigations menés dans le sens Chaîne avec 3 paramètres ( $N = 3$ ), le même exercice est effectué avec 5 paramètres ( $N = 5$ ). Les résultats sont visibles en Figure C.1 . Les paramètres  $A_i$  varient sur une plage de valeurs plus grande avec  $N = 5$  qu'avec  $N = 3$  ce qui a pour conséquences des variations de paramètres interpolés plus importantes et donc un modèle instable est moins efficace pour reproduire les décharges tests comme le montre la Figure C.1 (f)

Comme pour le sens Chaîne, un test est effectué : un essai avec neuf décharges est effectué dans le sens Trame du *9017 E25*. Sur ces neuf décharges, un jeu de 6 et deux jeux de 3 décharges sont choisis :

- jeu 0 : décharges n° 1,2,3,4,5,6,7,8,9
- jeu 1 : décharges n° 1,2,4,5,7,8
- jeu 2 : décharges n° 1,4,7
- jeu 3 : décharges n° 2,5,8

Le protocole de recherche des paramètres de Prony est appliqué à chacun des jeux. Il est donc possible d'observer l'évolution des paramètres  $A_i$  en Figure C.2. Les mêmes observations que pour le sens Chapine peuvent être faites avec ces données : un nombre de trois décharges est suffisant pour prédire d'autres décharges.

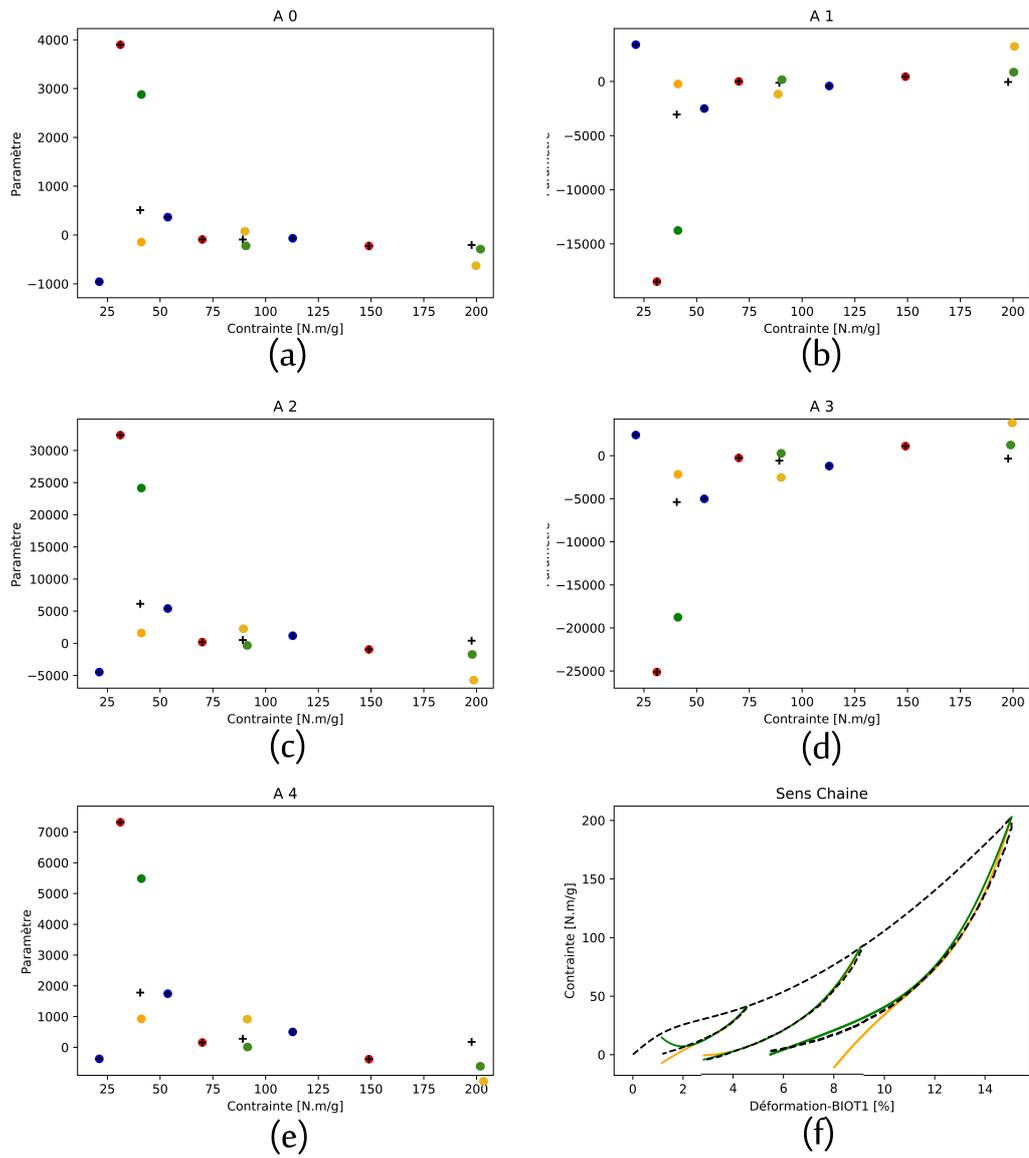


FIGURE C.1 – Impact du nombre de paramètre  $N(=5)$  sur les prédictions du modèle de Prony - sens Chaîne

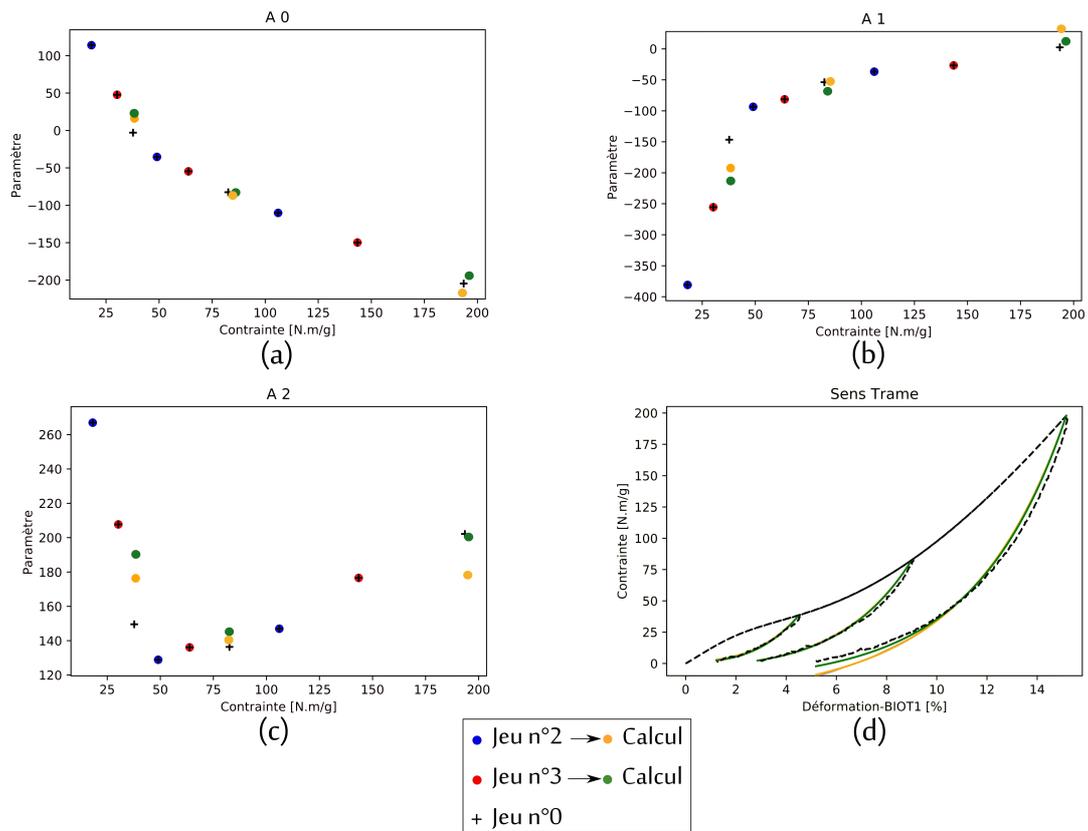


FIGURE C.2 – Etude des paramètres du modèle de Prony - sens Trame



# Annexe D

## Invariance du Rayon

Etant donnée, une matrice symétrique  $\mathbf{A}$  de dimension  $2 \times 2$  :

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{12} & A_{22} \end{pmatrix}$$

nous montrons, dans cette annexe, que le rayon,

$$R_{\mathbf{A}} = \sqrt{A_{11}^2 + 2A_{12}^2 + A_{22}^2} \quad (\text{D.1})$$

est un invariant.

Rappelons les deux invariants classiques :

$$\text{tr}\mathbf{A} = A_{11} + A_{22}$$

$$\det\mathbf{A} = A_{11}A_{22} - A_{12}^2$$

Alors on peut montrer que :

$$R_{\mathbf{A}} = \sqrt{(\text{tr}\mathbf{A})^2 - 2\det\mathbf{A}} \quad (\text{D.2})$$

Or le résultat de toute fonction d'invariants est un invariant, donc  $R_{\mathbf{A}}$  est un invariant.

Dans notre cas,  $R_{\mathbf{A}} = R_{\Sigma}$  pour le tenseur des contraintes et  $R_{\mathbf{A}} = R_{\varepsilon}$  pour le tenseur des déformations. Ainsi, dans le cas de la traction simple le long de l'axe 1,  $R_{\mathbf{A}} = R_{\Sigma} = |\Sigma_{11}|$ .



# Miscellanées

J'ai fait des études et puis j'ai passé des diplômes  
Et puis j'ai passé des concours, je suis un homme, déjà plus même  
J'ai grimpé doucement les échelons de l'entreprise  
Et pis j'ai monté ma structure, je vois enfin ma terre promise  
Il a fallu que j'aïlle vers plus de productivité  
Aller chercher d'autres marchés pour ma petite activité  
Je ne compte plus mes heures, je retrousse mes manches  
Je suis même contre l'ouverture des églises le dimanche  
Mais victime de dumping, concurrence made in Chine  
Ci-gît (ci-gît) ma petite fabrique de trampoline  
Maintenant je me rend compte que j'aurais pu ouvrir les yeux  
Trouver du temps, de la lumière, comme sainte Thérèse à Lisieux

Donne, d'autant de temps de ta vie pour toi, pour tes amis n'oublie pas de le faire tête haute  
Libère-toi du dogme une seconde et que ça saute  
D'autant de temps de ta vie pour toi, pour tes amis n'oublie pas de le faire tête haute  
Et libère-toi du dogme une seconde et qu'ça saute!

...

MC Solaar  
EKSASSAUTE  
Géopoétique, 2017



# Bibliographie

- [1] Aaron Aboshio, Sarah Green, and Jianqiao Ye. Experimental investigation of the mechanical properties of neoprene coated nylon woven reinforced composites. *Composite Structures*, 120 :386–393, February 2015.
- [2] Andrzej Ambroziak. Mechanical properties of Preconstraint 1202S coated fabric under biaxial tensile test with different load ratios. *Construction and Building Materials*, 80 :210–224, April 2015.
- [3] Florian Bauer, Ralph M. Kennel, Christoph M. Hackl, Filippo Campagnolo, Michael Patt, and Roland Schmehl. Drag power kite with very high lift coefficient. *Renewable Energy*, 118 :290–305, April 2018.
- [4] Guilhem BLES. High tensile stress on fabrics of giant kites : "Beyond the sea" project. January 2012.
- [5] Jeroen Breukels. An engineering methodology for kite design. 2010. OCLC : 840441688.
- [6] B. Bridgens and M. Birchall. Form and function : The significance of material properties in the design of tensile fabric structures. *Engineering Structures*, 44 :1–12, November 2012.
- [7] K. Buet-Gautier and P. Boisse. Experimental analysis and modeling of biaxial mechanical behavior of woven composite reinforcements. *Experimental Mechanics*, 41(3) :260–269, September 2001.
- [8] Laurence Caramaro. Fibres et fils à usage technique. *Techniques de l'ingénieur*, (AM5118 V1) :18, 2005.
- [9] Laurence Caramaro. Textiles à usage technique. *Techniques de l'ingénieur*, (N2511 V1) :11, 2006.
- [10] Shouhui Chen, Xin Ding, Raul Figueiro, Honglei Yi, and Jing Ni. Tensile behavior of PVC-coated woven membrane materials under uni- and bi-axial loads. *Journal of Applied Polymer Science*, 107(3) :2038–2044, February 2008.
- [11] Shouhui Chen, Xin Ding, and Honglei Yi. On the Anisotropic Tensile Behaviors of Flexible Polyvinyl Chloride-coated Fabrics. *Textile Research Journal*, 77(6) :369–374, June 2007.
- [12] Tzikang Chen. Determining a Prony Series for a Viscoelastic Material From Time Varying Strain Data. (20000052499), May 2000.
- [13] A.G. Colman, B.N. Bridgens, P.D. Gosling, G.-T. Jou, and X.-Y. Hsu. Shear behaviour of architectural fabrics subjected to biaxial tensile loads. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 66 :163–174, November 2014.
- [14] A. Curnier. Mécanique des solides déformables : cinématique, dynamique, énergétique (mechanics of deformable solids : kinematics, dynamics, energetics). 2005.
- [15] Stefan DEMMERLE. Optimisation des essais biaxiaux directs sur les métaux laminés. March 1993.
- [16] W. Dib, G. Bles, A. Blaise, and A. Tourabi. Modelling of cyclic visco-elasto-plastic behaviour of coated woven fabrics under biaxial loading and finite strain. *International Journal of Solids and Structures*, 154 :147–167, December 2018.

- [17] Wassim DIB. Comportement mécanique de tissus à voiles, en fibres synthétiques, sous sollicitations biaxiales et déformation finie. 2014.
- [18] Dantec Dynamics. Dantec Dynamics-DIC Standard 3D - site commercial - <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/stress-strain-espidic/digital-image-correlation-dic/dic-standard-3d/>. *Dantec Dynamics*, mise à jour 2019-11-20.
- [19] Elitec. Elitec - <https://www.elitec-tl.com/> - site commercial. *Elitec-tl*.
- [20] Larousse Encyclopédie. Quadriques - <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/quadrique/84638>. *Larousse*, (84638), 2020.
- [21] Ozan Erol, Brian M. Powers, and Michael Keefe. Effects of weave architecture and mesoscale material properties on the macroscale mechanical response of advanced woven fabrics. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 101 :554–566, October 2017.
- [22] Amir Fathi, Jan-Hendrik Keller, and Volker Altstaedt. Full-field shear analyses of sandwich core materials using Digital Image Correlation (DIC). *Composites Part B : Engineering*, 70 :156–166, March 2015.
- [23] Dominique François. Lois de comportement des métaux - Élasticité. Viscoélasticité. *Techniques de l'ingénieur*, (M4151 V1) :13, 2004.
- [24] C. Galliot and R.H. Luchsinger. A simple model describing the non-linear biaxial tensile behaviour of PVC-coated polyester fabrics for use in finite element analysis. *Composite Structures*, 90(4) :438–447, October 2009.
- [25] Mir Hamid Reza Ghoreishy. Determination of the parameters of the Prony series in hyper-viscoelastic material models using the finite element method. *Materials & Design*, 35 :791–797, March 2012.
- [26] A. Gueddim, N. Bouarissa, and A. Villesuzanne. Pressure dependence of elastic constants and related parameters for rocksalt MgO. *Computational Materials Science*, 48(3) :490–494, May 2010.
- [27] M. Haghi Kashani, A. Hosseini, F. Sassani, F. K. Ko, and A. S. Milani. The Role of Intra-Yarn Shear in Integrated Multi-Scale Deformation Analyses of Woven Fabrics : A Critical Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 43(3) :213–232, May 2018.
- [28] A. Hosseini, M.H. Kashani, F. Sassani, A.S. Milani, and F.K. Ko. Identifying the distinct shear wrinkling behavior of woven composite preforms under bias extension and picture frame tests. *Composite Structures*, 185 :764–773, February 2018.
- [29] Abbas Hosseini, Masoud Kashani, Farrokh Sassani, Abbas Milani, and Frank Ko. A Mesoscopic Analytical Model to Predict the Onset of Wrinkling in Plain Woven Preforms under Bias Extension Shear Deformation. *Materials*, 10(10) :1184, October 2017.
- [30] J Hulatt, L Hollaway, and A Thorne. Preliminary investigations on the environmental effects on new heavyweight fabrics for use in civil engineering. *Composites Part B : Engineering*, 33(6) :407–414, September 2002.
- [31] Xiaohui Ji, Ziqing Hao, Lijun Su, Tiren He, and Liu Liu. Characterizing the constitutive response of plain-woven fibre reinforced aerogel matrix composites using digital image correlation. *Composite Structures*, 234 :111652, February 2020.
- [32] Xu Junhao, Zhang Yingying, and Xue Jigang. Off-axial failure analysis of polytetrafluoroethylene-coated woven glass fibers under different loading rates. *Journal of Industrial Textiles*, 47(3) :310–330, September 2017.
- [33] Provisys-eng LEDRA, Kamel. PROVISYS - Vidéo traction - <http://www.provisys-eng.com/fr/produits/videotraction>. *Provisys-eng*, mise à jour 2021-05-18.

- [34] R. Leloup, K. Roncin, M. Behrel, G. Bles, J.-B. Leroux, C. Jochum, and Y. Parlier. A continuous and analytical modeling for kites as auxiliary propulsion devoted to merchant ships, including fuel saving estimation. *Renewable Energy*, 86 :483–496, February 2016.
- [35] R. Leloup, K. Roncin, G. Bles, J.-B. Leroux, C. Jochum, and Y. Parlier. Kite and classical rig sailing performance comparison on a one design keel boat. *Ocean Engineering*, 90 :39–48, November 2014.
- [36] Richard LELOUP. Elaboration d’un outil d’aide à la prédiction du comportement et de la tenue mécanique d’un cerf-volant auxiliaire de propulsion pour bâtiments de soutien de la flotte. 2014.
- [37] Richard Leloup. Modelling approach and numerical tool developments for kite performance assessment and mechanical design ; application to vessels auxiliary propulsion. October 2014.
- [38] Richard LELOUP. Modélisation et Dimensionnement de structures souples- Wolfgang R&D. (1) :77, 2018.
- [39] Lionel Leotoing, Dominique Guines, Ibrahim Zidane, and Eric Ragneau. Cruciform shape benefits for experimental and numerical evaluation of sheet metal formability. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(6) :856–863, June 2013.
- [40] Kuo-Shih Liu and Stephen W Tsai. A progressive quadratic failure criterion for a laminate. *Composites Science and Technology*, (58) :10, September 1993.
- [41] F. Loix, P. Badel, L. Orgéas, C. Geindreau, and P. Boisse. Woven fabric permeability : From textile deformation to fluid flow mesoscale simulations. *Composites Science and Technology*, 68(7-8) :1624–1630, June 2008.
- [42] Miles L Loyd. Crosswind Kite Power. *Journal of ENERGY*, 4(80-4075) :6, 1980.
- [43] Mourad Mabouzai. Coniques, quadriques et formes quadratiques - <http://mabouzai.perso.univ-pau.fr/coniquesisa2.pdf> - documents d’enseignement. August mise à jour 2020-03-10.
- [44] Marc Malinowsky and Christian Lyonnet. Structures textiles. *Techniques de l’ingénieur*, (C2470 V1) :41, 1993.
- [45] Junhui Meng, Mingyun Lv, Zhipeng Qu, and Penghui Li. Mechanical Properties and Strength Criteria of Fabric Membrane for the Stratospheric Airship Envelope. *Applied Composite Materials*, 24(1) :77–95, February 2017.
- [46] Georges MOLLARD. Polyamide 6-6. *Techniques de l’ingénieur*, (J6515 V1), June 1997.
- [47] Witold Ogierman and Grzegorz Kokot. Determination of Local Strain Distribution at the Level of the Constituents of Particle Reinforced Composite : An Experimental and Numerical Study. *Materials*, 13(17) :3889, September 2020.
- [48] Luís Paiva and Fernando Fontes. Optimal Control Algorithms with Adaptive Time-Mesh Refinement for Kite Power Systems. *Energies*, 11(3) :475, February 2018.
- [49] S. W. Park and Y. R. Kim. Fitting Prony-Series Viscoelastic Models with Power-Law Presmoothing. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13(1) :26–32, February 2001.
- [50] Yves PARLIER. Beyond the sea - <http://beyond-the-sea.com/>. June 2019.
- [51] Federico París. A Study of Failure Criteria of Fibrous Composite Materials. (NASA/CR-2001-210661) :76, 2001.
- [52] Kevin Potter. Bias extension measurements on cross-plyed unidirectional prepreg. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 33(1) :63–73, January 2002.

- [53] A.G. Prodromou and J. Chen. On the relationship between shear angle and wrinkling of textile composite preforms. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 28(5) :491–503, January 1997.
- [54] Zhenyu Qiu, Wujun Chen, Chengjun Gao, and Yu Hu. Experimental and numerical study on nonlinear mechanical properties of laminated woven fabrics. *Construction and Building Materials*, 164 :672–681, March 2018.
- [55] Hans W. Reinhardt. On the biaxial testing and strength of coated fabrics : Paper demonstrates that improved specimens allow the measurement of the true biaxial breaking strength. *Experimental Mechanics*, 16(2) :71–74, February 1976.
- [56] Mathias Rotach and Karmen Babic. Basic studies in biaxial tensile tests. *GAMM mitteilungen*, 14(1) :14, February 2018.
- [57] DRIDI Samia. Essais de caractérisation des structures tissées. June 2010.
- [58] Roland Schmehl. Kite Power - www.kitepower.eu - delft University of Technology. *Kite Power*, 2012 , mise à jour 2019-03-20.
- [59] Peter Schwartz. Structure and mechanics of textile fibre assemblies. (80), 2008. OCLC : 637365683.
- [60] Taibai Shi, Wujun Chen, Chengjun Gao, Jianhui Hu, Bing Zhao, Ping'an Wang, and Mei Wang. Biaxial strength determination of woven fabric composite for airship structural envelope based on novel specimens. *Composite Structures*, 184 :1126–1136, January 2018.
- [61] Dassault systemes. Critère de défaillance de Tsai-Wu - online help. *help.solidworks.com*, 2017 mise à jour 2021-04-06.
- [62] Ali Tourabi. Rapport d'essais de traction sur huit matériaux. page 50, June 2015.
- [63] Ennouri TRIKI. Mécanique et mécanisme de la déchirure des matériaux textiles. May 2012.
- [64] Stephen W Tsai and EDWARD M Wu. A General Theory of Strength for Anisotropic Materials. *Journ. of Composite Materials*, 5 :23, November 1970.
- [65] Gerard P.T.M. Van Sanvoort. Geotextiles and geomembranes in civil engineering. 1994.
- [66] A. Vandenbroucke, H. Laurent, N. Aït Hocine, and G. Rio. A Hyperelasto-Visco-Hysteresis model for an elastomeric behaviour : Experimental and numerical investigations. *Computational Materials Science*, 48(3) :495–503, May 2010.
- [67] Daniel Weidmann. Textiles techniques. 2010.
- [68] Wikipédia. Profil NACA - encyclopédie en ligne - Wikipédia , l'encyclopédie libre. *Wikipedia*, February 2021.
- [69] A. Willems. Optical strain fields in shear and tensile testing of textile reinforcements. *Composites Science and Technology*, (68) :13, 2008.
- [70] Junhao Xu, Yingying Zhang, Meng Wu, and Yushuai Zhao. Experimental analysis of off-axis mechanical behaviors of PVC coated fabrics subjected to cyclic loading. *Polymer Testing*, 80 :106090, December 2019.
- [71] Yabin Yang, Pan Zeng, and Marek-Jerzy Pindera. Capturing the multiscale effects in the response of coated woven fabrics. *Composite Structures*, 136 :566–581, February 2016.
- [72] Zhang Yingying, Zhang Qilin, Lei Ke, and Kuai Bei-lei. Experimental analysis of tensile behaviors of polytetrafluoroethylene-coated fabrics subjected to monotonous and cyclic loading. *Textile Research Journal*, 84(3) :231–245, February 2014.
- [73] Zhang Yingying, Song Xiaoguang, Zhang Qilin, and Lv Henglin. Fracture failure analysis and strength criterion for PTFE-coated woven fabrics. *Journal of Composite Materials*, 49(12) :1409–1421, May 2015.

- [74] Lanlan Zhang. Off-Axial Tensile Properties of Preconstraint PVDF Coated Polyester Fabrics under Different Tensile Rates. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016 :1–12, 2016.





# Résumé

Le dimensionnement des structures réalisées en matériaux tissés est un enjeu majeur pour les concepteurs dans de nombreux domaines comme l'architecture, le sport ou la voilerie. De par leur nature, les structures souples en matériau tissé subissent des contraintes biaxiales et des trajets de chargement complexes. Ainsi, le dimensionnement et l'optimisation de la conception, ainsi que le choix d'un matériau adapté, requièrent une bonne connaissance du comportement mécanique et une analyse fine de ses propriétés. L'objectif essentiel est de définir un domaine et des limites d'utilisation du matériau, dans le cas biaxial.

Dans ce contexte, le projet de thèse présente deux aspects importants : un aspect théorique et un aspect expérimental. Du point de vue théorique, il s'agit de fournir une définition rigoureuse d'une limite d'usage en contrainte pour un matériau tissé dans le cas uniaxial et d'étendre cette notion au cas biaxial. Ceci se traduit par la définition d'un critère biaxial anisotrope, qui tient compte de l'intensité du chargement dans le plan du tissu et qui correspond à un domaine de sécurité pour l'utilisation du matériau.

Du point de vue expérimental et pour les besoins d'identification du critère, deux types d'essais sont développés et mis en œuvre : des essais de traction simple dans les axes et en hors axes, ainsi que des essais de traction biaxiale dans les axes. Ce travail a nécessité la mise au point et la mise en œuvre de systèmes de mesure par extensométrie optique et des modes de pilotage originaux, adaptés aux matériaux tissés.

Ainsi, une méthode originale de caractérisation et de modélisation du domaine d'utilisation d'un matériau tissé est proposée à partir de l'étude du comportement d'un textile technique issu des références de Porcher Industries. Le résultat du travail de thèse permettra, à l'avenir, la mise en place d'une méthodologie industrielle opérationnelle pour le dimensionnement des structures en matériaux tissés, notamment dans le domaine des voiles, des parapentes et des applications de kites géants.

La méthode de caractérisation et de modélisation du domaine d'utilisation d'un matériau tissé a été ensuite appliquée à quatre matériaux industriels qui présentent un caractère confidentiel.

*Mots clefs* : Matériaux tissés, Traction simple, Traction biaxiale, Limite d'usage, Comportement non linéaire, Déformation résiduelle, Décharge non linéaire, Critère mécanique anisotrope, comportement cyclique, Hystérésis