

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix - Travail - Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
ECOLE NORMALE SUPERIEUR
D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE
D'EBOLOWA
DEPARTEMENT DE GENIE
MECANIQUE



REPUBLIC OF CAMEROUN

Peace - Work - Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I
HIGHER TECHNICAL TEACHER
TRAINING COLLEGE OF
EBOLOWA
DEPARTMENT OF
MECHANICAL
ENGINEERING

Filière
CONSTRUCTION MECANIQUE

**ETUDE ET REALISATION D'UNE PLATEFORME
DE CARACTERISATION MECANIQUE DE
MATERIAUX ET FIBRES PAR IMAGERIE
NUMERIQUE**

Mémoire de fin d'étude
En vue de l'obtention du Diplôme de Professeur d'Enseignement
Technique et
Professionnel de 2e grade (DIPET II)

Par : **MBENG Mathieu Ulrich**

Sous la direction de
M. NGONGANG Ludovic
PLET
Pr. KANAA Thomas
Maitre de Conférences

Année Académique : 2019 - 2020



DEDICACE

**Aux
Familles
MBENG et MANGELE**

REMERCIEMENTS

L'accomplissement d'un mémoire implique un effort personnel particulier, mais il s'agit d'un travail d'équipe qui implique aussi la participation de divers intervenants. Dans cette page je remercie toutes ces personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens tout d'abord à remercier mon équipe d'encadrement : le superviseur le Professeur KANAA Thomas, pour avoir accepté la supervision de nos travaux et pour son suivi permanent ; Mon encadreur monsieur NGONGANG Ludovic, pour ses conseils et son assistance durant ces longs mois de travaux, il a su m'inculquer la rigueur scientifique.

J'exprime aussi toute ma profonde gratitude à l'endroit de madame le directeur, le Professeur NDJAKOMO ESSIANE Salomé pour le cadre convivial de notre formation et au personnel enseignant et administratif de l'ENSET d'Ebolowa pour leur encadrement.

Je tiens également à remercier messieurs les membres du jury pour leur collaboration durant l'examen de ce travail et leur participation à la soutenance.

A mes parents dont le sens va au-delà de la biologie, MBENG MBENG Pierre et son Epouse, MANGELE Théophile Sébastien et son Epouse enfin OLAMA et son Epouse qu'ils veuillent retrouver ici le témoignage de ma profonde et sincère reconnaissance pour le sacrifice qu'ils consentent à mon égard.

A mes frères, MBENG Laurentine, MBENG Emmanuel, MBENG André, NOUNGUI Pierre, MANGELE Sébastien et MBENG Pierre merci pour votre présence.

Bien entendu, je remercie tous mes camarades de classe qui ont tous contribué, d'une manière ou d'une autre, à la réussite de ce mémoire.

Pour ceux qui n'ont pas trouvé leur nom dans cette liste et qui ont contribué à ce travail, je les en remercie et m'excuse de cet inacceptable oubli.

RESUME

Dans les entreprises du secteur industriel, plus précisément celles qui exercent dans le laminage, l'essai de traction est beaucoup plus pratiqué par les laborantins ce qui entraîne généralement la détérioration des extensomètres. Ceci implique des imprécisions sur les prévisions établies sur la production en cours. Motivation suffisante pour marquer un intérêt sur le gain en temps et la précision constante de ces essais. D'où l'étude et la réalisation d'une plateforme de caractérisation mécaniques des matériaux et de fibres par imagerie numérique. Pour atteindre cet objectif le travail a été organisé suivant trois grandes articulations. Une revue de littérature qui a permis de faire le tour des travaux des différents auteurs sur l'évaluation des propriétés mécaniques des matériaux et fibres et des techniques de mesure des déplacements. L'aspect matériels et méthodes a déployé une présentation exhaustive de tout le matériel mis à contribution afin de réaliser notre plateforme. En ce qui concerne la mesure du module d'Young, nous avons conçu deux algorithmes de calcul : Ncorr+ et ALDIC+ sur lesquels nous avons traité les images et contraintes fournies par le laboratoire SEM et pour pouvoir évaluer leur efficacité. L'articulation relative aux résultats, ressort que les algorithmes de ALDIC+ et de Ncorr+ permettent de déterminer le module d'Young avec des erreurs respectives de **17,84%** et **19,6%**. Ces erreurs sont supérieures au **8,92%** par rapport à ce que Amelie CUYNET et al. décrivent.

Mots clés : caractérisation mécanique de matériaux, module d'Young, corrélation d'images numériques, DIC, Ncorr+, ALDIC+.

ABSTRACT

In the companies of the industrial sector, more precisely those which exercise in the rolling, the tensile test is much more practiced by the laboratory technicians which generally involves the deterioration of the extensometers. This implies inaccuracies in the forecasts made on current production. Sufficient motivation to indicate an interest in the time savings and the constant precision of these tests. From where the study and the realization of a platform of mechanical characterization of materials and fibers by digital imagery. To achieve this objective, the work was organized along three main lines. A literature review which made it possible to review the work of the various authors on the evaluation of the mechanical properties of materials and fibers and displacement measurement techniques. The materials and methods aspect have deployed an exhaustive presentation of all the materials used to build our platform. Regarding the measurement of the Young's modulus, we have designed two calculation algorithms: Ncorr + and ALDIC + on which we have treated the images and constraints provided by the SEM laboratory and to be able to evaluate their efficiency. The articulation relating to the results shows that the algorithms of ALDIC + and Ncorr + make it possible to determine the Young's modulus with respective errors of **17.84%** and **19.6%**. These errors are greater than **8.92%** compared to what Amelie CUYNET et al. describe.

Keywords: mechanical characterization of materials, Young's modulus, correlation of digital images, DIC, Ncorr +, ALDIC +

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME.....	iii
ABSTRACT	iv
TABLE DES MATIERES	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS.....	x
INTRODUCTION GENERALE.....	1
1. CONTEXTE ET INTERET DE L'ÉTUDE	1
2. PROBLÈME DE LA RECHERCHE	1
3. OBJECTIFS GENERAL ET SPECIFIQUES DE L'ÉTUDE	2
4. PLAN DU MÉMOIRE.....	2
Chapitre 1 : GENERALITES SUR LA THEMATIQUE	3
I.1. PRESENTATION GENERALE DES MATERIAUX ET FIBRES	4
I.1.1 - Matériaux : classes et propriétés	4
I.1.2 Fibres : classes et propriétés	8
I.2. EVALUATION DES PROPRIETES MECANQUES DES MATERIAUX ET FIBRES ...	10
I.2.1. Choix de l'essai mécanique pour la caractérisation.....	11
I.2.2. Évaluation des grandeurs caractéristiques en essai de traction	17
I.3. OUTILS DE MESURE DU DEPLACEMENT : EXTENSOMETRE.....	21
I.3.1. Extensomètre avec contact	21
I.3.2. Extensomètre sans contact.....	22
Chapitre 2 : ETAT DE L'ART SUR LA MESURE DU MODULE D'YOUNG PAR CIN24	
II.1. OUTILS DE MESURE CONVENTIONNELS	25
II.1.1 Tahar DHAOUADI (2018) [20]	25
II.1.2 Francis CORRIVEAU (2018) [21].....	27
II.2. OUTILS DE CORRELATION D'IMAGES NUMERIQUES.....	28
II.2.1. Validation de l'outil de corrélation d'images numériques	29
II.2.2. Utilisation de l'outil de corrélation d'images numériques	33
II.3. SYNTHESE.....	38
Chapitre 3 : MATERIELS ET METHODES.....	42
III.1- MATERIELS	43

III.1.1- Matériels pour l'essai de traction au laboratoire SEM.....	43
III.1.2- Matériels d'acquisition et de traitement d'images	44
III.2- METHODOLOGIE DE MESURE DU MODULE D'YOUNG.....	45
III.2.1- Protocole des essais du laboratoire SEM	45
III.2.2- Protocole de traitement d'images.....	48
III.2.2- Protocole de Ncorr+	48
III.2.3- Protocole de ALDIC+	50
III.2.4- Méthodologie d'exploitation de résultats.....	52
Chapitre 4 RESULTATS ET DISCUSSION.....	53
IV.1- RESULTATS.....	54
IV.1.1- Proiciel de traitement d'images	54
IV.1.2- Régression des algorithmes de calcul	59
IV.1.3- Evaluation de la précision des algorithmes de calculs du module d'Young.....	61
IV.2- DISCUSSIONS.....	62
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	64
BIBLIOGRAPHIE	65
ANNEXES	67
ANNEXE 1 : IMAGES DE TRAITEMENT SUR Ncorr+	67
ANNEXE 2 : IMAGES DE TRAITEMENT ALDIC+	67
ANNEXE 3 : COURBES DE REGRESSION DES DEFORMATIONS EXPERIMENTALES ET DE NCORR+	68
ANNEXE 4 : COURBES DE REGRESSION DES DEFORMATIONS EXPERIMENTALES ET DE ALDIC+	69

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1: Evaluation des propriétés des matériaux naturels	5
Tableau 1-2: Types de matrice, types de renfort et leurs différentes structures	6
Tableau 1-3: Principales propriétés de composites usuels	6
Tableau 1-4: Catégories des biomatériaux	7
Tableau 1-5: Classification des fibres végétales	8
Tableau 1-6: Description de fibre naturelles d'origine animale : laine et soie.....	9
Tableau 1-7: Classification des fibres synthétiques	10
Tableau 1-8: Propriétés de quelques fibres	10
Tableau 1-9: Principes des essais de dureté Brinell et Vickers	14
Tableau 1-10: Evaluation de quelques essais mécaniques courants.....	16
Tableau 1-11: Correspondance entre grandeurs caractéristiques et propriétés mécaniques dans le cadre de l'essai de traction	20
Tableau 1-12: Evaluation des techniques d'analyse d'images	23
Tableau 2-1: Composition des trois formulations	26
Tableau 2-2: Les dimensions et les tolérances des échantillons	26
Tableau 2-3: Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux des formulations F1, F2 et F3	27
Tableau 2-4: Module d'Young des alliages étudiés	28
Tableau 2-5: Propriétés du matériau de référence	30
Tableau 2-6: Différentes valeurs du module d'Young obtenues	31
Tableau 2-7: Module d'Young déterminé à partir de la corrélation d'images	32
Tableau 2-8: Valeurs du module d'Young issues des résultats d'essais de traction	34
Tableau 2-9: Les cinq étapes de polissage	36
Tableau 2-10: Valeurs moyennes et écart-types du module de Young des phase ex- β et α (O) mesurés par nano indentation sur les échantillons VIDEO-MECA-ZY-4 N°81 et N°83	37
Tableau 2-11: Prédications du module d'élasticité par l'étude de modèles théorique	38
Tableau 3-1: Composition chimique du DP980.	43
Tableau 3-2 : Contraintes et déformations produites par le laboratoire SEM	45
Tableau 4-1: Contrainte, déformation du laboratoire et déformation de Ncorr+ rangées par test	59
Tableau 4-2: Contrainte, déformation du laboratoire et déformation de ALDIC+ rangées par test	60
Tableau 4-4: Déformations régressées et erreurs relatives.....	62
Tableau 4-5: Déformations régressées et erreurs relatives.....	62

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1: Cristallinité d'une fibre	9
Figure 1-2: Processus de caractérisation d'un matériau ou d'une fibre.....	11
Figure 1-3: Machine de traction de laboratoire	12
Figure 1-4: Type de positionnement de la fibre sur le dispositif expérimental de traction	12
Figure 1-5:Schéma du principe de l'essai de flexion trois points	12
Figure 1-6: Exemple de dispositif d'essai de flexion 4 points	13
Figure 1-7: Illustration de la caractérisation par nano indentation à l'échelle de la paroi de la fibre de lin	13
Figure 1-8: Figure de gauche : dispositif pour essais Charpy en fonctionnement . Figure de droite : schéma de fonctionnement : 1) couteau 2) éprouvette KV 3) appuis	15
Figure 1-9: Schéma principe de flexion rotative et courbe contrainte-temps	15
Figure 1-10: illustration d'un dispositif expérimental pour l'étude du comportement dynamique des fibres	15
Figure 1-11: Diagramme d'évaluation d'essais	16
Figure 1-12: Courbes de traction force-allongement de deux matériaux différents	17
Figure 1-13: Courbes de traction contrainte-déformation de deux différents matériaux	17
Figure 1-14: Relation entre types de ruptures et coefficient de striction	19
Figure 1-15: Schéma d'un matériau soumis à la traction.....	20
Figure1-16: Image de droite : schéma de principe du fonctionnement d'une jauge de déformation. Image de gauche : jauge collée sur une éprouvette	21
Figure 1-17: Fig. A.2: Extensomètres diamétral et longitudinal sur une éprouvette de traction (cliché CdM)	22
Figure 2-1: Machine d'essai	25
Figure 2-2: Éprouvette de type IV (Tirée de ASTM D 638-14, (2014, p.4))	26
Figure 2-3: Disposition des extensomètres pour les essais de traction simple	27
Figure 2-4: Dispositif de traction de l'étude	29
Figure 2-5: Éprouvette tubulaire en alumine après rupture. Positionnement des jauges de déformation : (a) tube face avant, (b) tube face arrière.	30
Figure 2-6: Courbes de comportement : (a) acceptabilité des jauges entre elles, (b) validité des mesures de déformation par jauges en comparaison à la corrélation d'images et aux extensomètres ..	31
Figure 2-7: Montage de l'essai de traction	32
Figure 2-8: Dispositifs expérimentaux : (a) vue ensemble, (b) système de caméra, (c) montage de l'éprouvette sur Dispositifs les mors avec les cales ajoutées, (d) commande de l'acquisition de l'essai	35
Figure 2-9 : Dimension (en mm) de l'éprouvette plane utilisée	36
Figure 2-10 : Eprouvette de traction de forme haltère (taffetas verre/Elium®).	38
Figure 2-11: Eprouvette de traction de forme haltère (taffetas verre/Elium®).....	38
Figure 2-12: Modèle linéaire ajusté sur la plage $\epsilon_{max} = 0,1\% ; 0,6\%$ des courbes de traction $0^\circ/90^\circ$	38
Figure 3-1: Dimension de l'éprouvette	43
Figure 3-2: Machine d'essai de traction	44
Figure 3-3 : Instrument de mesure	44
Figure 3-4: Caméra d'acquisition	44
Figure 3-5: Environnement et plateforme de traitement	45
Figure 3-6: Modem internet	45

Figure 3-7 : Déroulement de l'essai de traction du laboratoire SEM.....	46
Figure 3-8: Courbe de contrainte déformation	46
Figure 3-9 : Détermination du module d'Young expérimental.....	47
Figure 3-10 : Image formatée obtenue du laboratoire SEM.....	47
Figure 3-11 : Processus de détermination du module d'Young par imagerie	48
Figure 3-12 : Algorithme de Ncorr+ ou algorithme modifié de Ncorr.....	49
Figure 3-13: Détermination du Mody.Ncorr+	50
Figure 3-14: Algorithme de ALDIC+ ou algorithme modifié de ALDIC	51
Figure 3-15 : Détermination du Mody.ALDIC+	51
Figure 4-1 : Interface graphique d'accueil.....	54
Figure 4-2: Courbes de régression des déformations expérimentale et ALDIC+ de R^2 maximal.....	60
Figure 4-3: Courbe de régression des déformations expérimentale et ALDIC+ de R^2 maximal	61

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

LISTE DES SYMBOLES		
SYMBOLE	DEFINITION	UNITE
ε	Déformation	%
σ	Contrainte	MPa
E	Module d'Young	GPa
LISTE DES ABREVIATIONS		
SIGLE	DEFINITION	
ENSET	Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique	
CIN	Corrélation d'images numériques	
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>	
SEM	<i>Society for Experimental Mechanics</i>	
Mody.Ncorr+	Module d'Young calculé par Ncorr+	
Mody.ALDIC+	Module d'Young calculé par ALDIC+	
Exp.	Experience	

INTRODUCTION GENERALE

Le but de cette introduction est de présenter le thème qui meublera l'ensemble des travaux de ce mémoire pour cela, il sera question de le situer d'abord dans le contexte de l'étude avant de ressortir le problème de la recherche et les différents objectifs à atteindre.

1. CONTEXTE ET INTERET DE L'ÉTUDE

La science des matériaux concerne de nombreux domaines traitant de la matière constitutive des objets [1]. Cela concerne entre autres la géologie, la métallurgie, les polymères, les céramiques faisant intervenir à la fois la chimie et la physique. Alors que la résistance des structures et des matériaux est un domaine qui nous concerne tous dans notre vie quotidienne, elle est restée pendant des siècles le parent pauvre des « sciences ». Essayer de comprendre pourquoi se produisent des catastrophes telles que l'effondrement d'un pont ou la rupture d'un barrage était le lot des hommes de l'art dont les connaissances étaient surtout affaire d'empirisme et de tradition [...]. Avec les travaux de Griffith et de Taylor qui sont à la base des méthodes d'élaboration de nos matériaux modernes et de la caractérisation de ceux-ci ; Le développement conjoint des nouveaux matériaux et des moyens de calculs par éléments finis. La science des matériaux dispose enfin des outils conceptuels nécessaires à son développement [2].

Le physico-chimiste étudie les propriétés de la matière, métaux, alliages, verres, polymères, tissus, biologiques... mais ne s'occupe que rarement des matériaux correspondants. Les matériaux sont de la matière travaillée par l'homme pour fabriquer des objets. Or le process d'élaboration (qui s'appuie sur la tribologie mise en œuvre- structure- propriétés) procure au matériau une certaine microstructure (disposition des fibres) qui à son tour détermine les propriétés intrinsèques de ce matériau [2].

Confrontés à des questions de choix et d'optimisation de matériaux pour des usages de plus en plus ciblés et des secteurs d'application de plus en plus exigeants, les ingénieurs de tout domaine sont amenés à développer de jour en jour des techniques de mesures plus précises et efficaces pour la caractérisation des matériaux et fibres à des fins de modélisations [3]. Parmi ces techniques, la technique d'imagerie fait peu à peu l'unanimité.

2. PROBLÈME DE LA RECHERCHE

L'étude correcte des paramètres de comportement de certains matériaux comme les élastomères très souples, interdit les moyens de mesure par contact. Il faut recourir à des techniques de calculs à distance [3]. C'est dans cette optique, qu'on se pose la question :

comment réaliser une plateforme pour la caractérisation mécanique des matériaux et fibres par imagerie numérique ?

3. OBJECTIFS GENERAL ET SPECIFIQUES DE L'ÉTUDE

L'objectif général est de mettre sur pieds une plateforme pour la caractérisation mécanique des matériaux et fibres par imagerie numérique. Toutefois, nous avons comme objectifs spécifiques :

- Avoir une station de mesure mixte de certaines propriétés de matériaux fiables ;
- Avoir un progiciel de mesure du déplacement/ déformation numérique.

4. PLAN DU MÉMOIRE

Ce document se subdivise en 4 chapitres qui sont :

- Le chapitre 1 relatif aux Généralités sur la thématique, dont le développement porte sur les notions nécessaires à la compréhension de la problématique traitée dans ce mémoire. Plus concrètement, nous explicitons la notion de matériaux et fibres, l'évaluation de leurs propriétés mécaniques dans laquelle viendra le concept d'essai mécanique et enfin nous présentons les outils de mesure des déplacements liés aux contraintes (extensomètres) dans un essai ;
- Le chapitre 2, « État de l'art sur la mesure du module d'Young par DIC », présente l'étude d'un ensemble d'articles ayant trait à la mesure du module d'Young dans un essai de traction quasi statique. Nous attardons ici sur les conditions de l'essai et sur les prédispositions faites pour l'utilisation des outils de mesure des déplacements ;
- Le chapitre 3, « Matériels et méthodes », présente le matériel et les méthodes nécessaires à l'acquisition et au traitement des données expérimentales afin de déterminer le module d'Young par imagerie ;
- Le chapitre 4, « Résultats et discussions », présente les résultats de la méthodologie présentée ultérieurement et de faire une discussion de ceux-ci.

Chapitre 1 : GENERALITES SUR LA THEMATIQUE

La science des matériaux regroupe les domaines qui étudient la matière qui constitue les objets. Tels que la géologie, le génie civil, la métallurgie, la cristallographie. Cette étude se résume à une expression « caractériser le matériau et ses dérivés ». Dans ce chapitre, il sera question pour nous de faire une brève argumentation sur les mots clés de notre thème. Celle-ci nous permettra d'avancer prudemment afin de comprendre les attentes, de définir et de circonscrire notre étude par une reformulation objective de notre thème.

I.1.	PRESENTATION GENERALE DES MATERIAUX ET FIBRES	4
I.1.1	- Matériaux : classes et propriétés.....	4
I.1.2	Fibres : classes et propriétés	8
I.2.	EVALUATION DES PROPRIETES MECANIQUES DES MATERIAUX ET FIBRES.....	10
I.2.1.	Choix de l'essai mécanique pour la caractérisation	11
I.2.2.	Évaluation des grandeurs caractéristiques en essai de traction	17
I.3.	OUTILS DE MESURE DU DEPLACEMENT : EXTENSOMETRE	21
I.3.1.	Extensomètre avec contact	21
I.3.2.	Extensomètre sans contact	22

I.1. PRESENTATION GENERALE DES MATERIAUX ET FIBRES

I.1.1 - MATERIAUX : CLASSES ET PROPRIETES

Un matériau est tout produit (naturel ou artificiel) qui peut être utilisé pour fabriquer des objets. C'est aussi toute substance, ou matière pouvant être mise en forme. D'un point de vue général, les matériaux se regroupent en plusieurs classes. Selon leur origine on distingue deux catégories ([1], [2], [4]).

a. Les matériaux naturels

Les matériaux naturels sont classifiés en matériaux métalliques, matériaux organiques et matériaux minérales.

➤ Les matériaux métalliques ou métaux

Les matériaux métalliques sont des matériaux dont les éléments chimiques ont la particularité de pouvoir former des liaisons métalliques et de perdre des électrons pour former des cations. Ils peuvent être caractérisés aussi bien de manière physicochimique que de manière électronique. Sur le plan technologique, nous avons les alliages à base de fer (métaux ferreux) et les alliages non ferreux (métaux non ferreux) [1].

Ces matériaux sont reconnus pour leur ductilité ; leur résistance mécanique et leur ténacité ; leur conductivité électrique et leur conductivité thermique élevées.

➤ Les matériaux organiques ou polymères

D'un point de vue chimique, les matériaux organiques sont des substances composées de macromolécules. On divise en deux catégories l'ensemble des polymères :

- ✓ Les polymères d'addition, obtenus par l'enchaînement d'un grand nombre de molécules monomères ; si ces molécules sont identiques on obtient un homopolymère, par contre si les monomères sont différents (en général deux) on obtient un copolymère ;
- ✓ Les polymères de condensation, obtenus par la condensation d'un grand nombre de molécules, cette réaction s'effectuant avec l'élimination d'une petite molécule, en général l'eau.

Les principales propriétés qui conduisent au choix des matériaux organiques, car elles sont élevées chez ses derniers sont : la rigidité, l'élasticité (souplesse), la résistance mécanique, la résistance chimique et la facilité de mise en forme. Toutefois ils possèdent une faible résistance à la torsion.

➤ **Les matériaux minéraux ou inorganiques**

Ce sont les matériaux obtenus à partir de la terre, du sable cuit ou de la roche. On distingue [2] :

- ✓ Les verres qui sont obtenus par fusion du quartz contenu dans le sable ;
- ✓ Les céramiques qui sont obtenues par fusion du quartz contenu dans l'argile.

Ces matériaux sont reconnus pour leur rigidité, leur dureté, leur isolation électriques, leur résistance à la chaleur, leur résistance thermique mais ils sont très fragiles. On les utilise pour fabriquer des bouteilles en verre, des briques, des assiettes...

En résumé, les propriétés des matériaux naturels peuvent être évaluées en fonction des catégories suscitées (tableau 1.1).

Tableau 1-1: évaluation des propriétés des matériaux naturels [1]

	Métaux	Polymères et élastomères	Céramiques et verres
Densité	Elevée	Faible	Faible
Rigidité (module d'Young)	Elevée	Faible	Elevée
Coefficient de dilatation thermique	Moyen	Elevée	Faible
Dureté	Elevée	Faible - élevée (fibres)	Elevée
Ductilité (déformation à la rupture)	Elevée (plasticité)	Elevée sauf à l'état vitreux	Faible et aléatoire
Conductivité électrique, thermique	Elevée	Faible (isolants)	Electrique : faible Thermique : élevée
Résistance à corrosion	Faible	En général élevée	Elevée
Température max. d'utilisation	Elevée	Faible (toujours < 200°C)	Très élevée
Mise en forme	Facile	Très facile (moulage)	Difficile (frittage)

b. Les matériaux artificiels

On distingue comme matériaux artificiels :

➤ **Les matériaux composites**

Un matériau composite est l'assemblage de plusieurs matériaux non miscibles de nature différentes et dont les qualités se complètent afin d'obtenir un matériau hétérogène dont les performances sont supérieures à celles de ces composants. Le matériau composite est constitué de différents de renforts et de matrices (tableau 1.2).

- ✓ **Renfort** : il constitue le squelette du composite et supporte l'essentiel des efforts.
- ✓ **Matrice** : elle assure la liaison de l'ensemble, repartit les efforts et joue un rôle protecteur de renfort.

Les propriétés d'un composite sont fonction de la nature de sa matrice, la nature du renfort et de la géométrie de la structure du renfort (tableau 1.3).

Tableau 1-2: types de matrice, types de renfort et leurs différentes structures [3]

Types de matrices
<ul style="list-style-type: none"> • Organique (plastique EP- UP – PA – POM – PC) ; • Minérale (Carbone- céramique ...) ; • Métallique (aluminium- titane- plomb).
Types de renforts
<ul style="list-style-type: none"> • Organique (fibres de verre, d'aramide, ...) ; • Minérale (fibres de carbone, de céramiques ...) ; • Métallique (fibre de bore, d'alumine, ...).
Différentes structures de renforts
<ul style="list-style-type: none"> • Particules ; • Fibres courtes ; • Fibres longues ; • Tissage multiaxial ; • Tressage ; • Assemblage tridimensionnel...

Tableau 1-3: principales propriétés de composites usuels [2]

Principaux composites usuels						
Matrice	Renfort	Masse volumique Kg/m³	R min. à l'extension MPa	Module d'Young MPa	Allongement %	Température maximale °C
Matrice organique – Renfort particules						
Epoxyde	Verre	1600	70	21280	4	150
Polyester	Verre	1350	175	5600	0.5 - 5	150
Matrice organique – Renfort fibres courtes						
Epoxyde	Verre R	2 000	2 000	53 000	3.5	160
Epoxyde	Carbone HR	1 500	1 300	130 000	1	200
Epoxyde	Carbone HM	1 700	900	200 000	0.5	200
Epoxyde	Kevlar	1 400	1 600	75 000	2	160
Silicone	Verre R	1 680	2 800	-	-	320

➤ **Les biomatériaux**

Un biomatériau est tout matériaux non vivant utilisé dans un dispositif médical destiné à interagir avec les systèmes biologiques [4]. Ils existent plusieurs catégories de biomatériaux de par leurs constitutions (tableau 1.4). En plus des propriétés liées aux autres classes des matériaux qui contribuent à leur fabrication, les biomatériaux doivent être inertes, non toxiques, biocompatibles.

Tableau 1-4: catégories des biomatériaux ([4] adapté par nos soins)

Catégorie de biomatériaux	Avantages	Inconvénients	Quelques applications
Céramiques te verres	-Biocompatible en particulier avec les os ; -Inerte ; -Résistance aux attaques microbiennes et aux contrainte de compression.	-Cassant ; -Désagréable ; -Difficulté de mise en œuvre	-Implants des hanches ; -Implants dentaires ; -Implants orthopédiques -Remplacement cochléaire ; -Revêtement de valve cardiaque
Métaux	-Limite élastiques et résistance à la rupture élevées ; -résiste à la corrosion ;	-La corrosion	-Articulation de remplacement au niveau de la hanche et du genou ; -joint de remplacement ; -électrodes dentaires
Polymères	-Flexibilité ou rigidité ; -Résistance à l'adhésion des protéines ; -biodégradables ou permanents ; -peuvent avoir des formes complexes.	-Moins résistants que les métaux et céramiques ; -Peuvent se déformer avec le temps et se détériorer lors de la stérilisation ; -Peuvent se dégrader dans un corps ou produire des dérivés toxiques.	-Sutures chirurgicales ; -Rubes trachéales ; -Articulation des doigts ; -Implants mammaires ; -fixation des fractures ; -pansements de la peau ; -greffons vasculaires synthétiques.
Matériaux composites	Meilleures performances	-Risques de dispersion ; -Faible interaction ;	-Remplacement complet ; d'articulations ; -Plaque de renfort ;

➤ **Les matières plastiques ou plastiques**

Un plastique est un mélange dont le constituant de base est la résine, ou polymère, à laquelle on associe des adjuvants (anti oxydants, stabilisants, plastifiants, ...) et des additifs (pigments et colorants, lubrifiants, ...). Par utilisation, les plastiques se divisent en deux catégories : les thermoplastiques et les thermodurcissables.

Les plastiques présentent de nombreux avantages notamment : leur faible masse volumique (830 à 2360 kg/m³) ; leur bonne résistance chimique (corrosion, ...) ; leur qualité esthétiques (formes, couleur, ...) ; leur isolation électrique et thermique ; leur coût généralement faible. Mais leurs emplois sont limités dans les cas de la tenue en température, la résistance mécanique, la stabilité dimensionnelle et la conservation des caractéristiques dans le temps.

I.1.2 FIBRES : CLASSES ET PROPRIÉTÉS

a. Classes des fibres

Les fibres sont des matériaux très minces et allongés, tels que des filaments, qui peuvent être continus ou coupés, dont la longueur est au moins trois fois supérieure à la section transversale. Les fibres peuvent être classées en :

➤ **Fibres naturelles d'origines végétales**

Elles sont classées suivant leur provenance sur la plante (*tableau 1.5*). Elles sont constituées majoritairement de la **cellulose**, dont la proportion influence leurs propriétés. La cristallinité (composante de la cellulose) permet d'influence sur les propriétés d'une fibre (figure 1.1). Lorsqu'elle augmente la densité de la fibre augmente de même que l'affinité tinctoriale, la durée de conservation, la résistance mécanique mais elle provoque la diminution de la solubilité dans les solvants.

Le degré de cristallinité dépend de : le type de parois ; l'origine des végétaux et de la voie de synthèse.

Tableau 1-5: : classification des fibres végétales (source [5], adapté par nos soins)

Fibres d'origines végétales	
Provenance	Types de fibres
Tige	Chanvre, Lin, Jute, Ramie, Kénaf, Bambou
Feuille	Sisal, abaca, alfa
Graine	Kapok
Fruit	Coco

➤ **Fibres naturelles d'origines animales**

On distingue deux types de fibres naturelles d'origine animale : la laine et la soie (tableau 1.6).

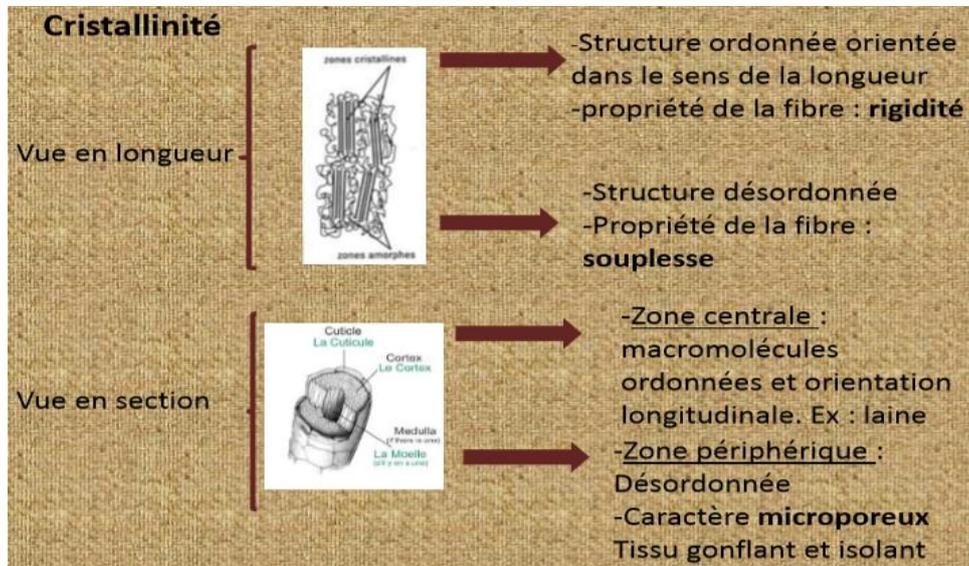


Figure 1-1: la cristallinité d'une fibre [5]

Tableau 1-6: description de fibre naturelles d'origine animale : laine et soie (source [5], adapté par nos soins).

	Laine	Soie
Origine	Animale	Animale
Composition	Kératine, cholestérine, suint	Fibroïne (environ 65%), séricine (environ 12 %), eau et matière minérales (environ 23%).
Longueur	3 et 30 centimètres	700 à 1500 mètres
Diamètre	15 à 40 micromètres	40 micromètres
Structure	Bilame	Deux fils de section triangulaire soudés entre eux par une sorte de vernis
Couleur	Du blanc au noir	Pâle

➤ **Fibres chimiques**

Ces dernières se présentent sous deux types :

✓ **Les fibres synthétiques**

Une fibre synthétique est un polymère cristallin obtenu après passage dans une filière. Elle est obtenue par l'extrusion de granulés de polymères obtenus à partir d'hydrocarbures ou d'amidon. Elles sont classifiées suivant leur origine (tableau 1.7).

✓ **Les fibres artificielles**

Celles-ci sont obtenues par le traitement chimique (dissolution puis précipitation) de matières naturelles (les caséines de lait pour le lanital et la cellulose de divers végétaux pour la

viscosité). Ces traitements chimiques ont pour but d'obtenir un produit filable. Les filaments obtenus à la sortie de la filière sont, soit réunis pour former des fils continus à la manière du fil de soie, soit coupés en fibres discontinues à la manière de la laine [7].

On distingue plusieurs types de fibres artificiels, parmi lesquels l'Acétate de cellulose (Rhodia), l'Alginate, le Cupro, la Vicara, le polynosique, Sil cool...

Tableau 1-7: classification des fibres synthétiques ([6] adapté par nos soins)

Types de fibres synthétiques	Fibres synthétiques organiques	Fibres synthétiques minérales
Exemples	Acide poly lactique ; Polyamide ; polyester ; chlorofibre ; acrylique ; vinylique ; Elasthane ; etc.	Fibre de verre et céramique ; Fibre de métaux ; Fibre de carbone ; Fibre de bore ;

b. Propriétés des fibres

Dans ce cadre nous nous sommes limités aux propriétés de la cellulose, la laine et la soie (tableau 1.8). Les fibres chimiques n'ont pas été prises en considération ici.

Tableau 1-8: propriétés de quelques fibres (source [5] adapté par nos soins)

PROPRIETES	CELLULOSE	LAINES	SOIE
Réaction aux acides	Faible	Grande	Grande
Réaction aux bases	Faible	Faible	Faible
Réaction aux oxydants	Faible	Faible	Grande
Elasticité		Très grande	Grande
Resistance		Grande	Très grande
Rigidité	Grande		Grande
Textile	Grande	Grande	Grande

I.2.EVALUATION DES PROPRIETES MECANIQUES DES MATERIAUX ET FIBRES

La caractérisation mécanique (figure 1.2) d'un élément revient pour le laborantin à faire une évaluation des propriétés mécaniques liées à cet élément. Cette évaluation passe par la mesure des grandeurs caractéristiques de cet élément. Les mesures des grandeurs caractéristiques sont faites sur des machines d'essai, dont la précision dépend du dispositif d'acquisition de données associé. L'ensemble de propriétés en mécanique étant plus dense (pareil pour les grandeurs caractéristiques qui leur sont associées) par rapport aux essais mécaniques, nous commencerons dans cette partie, par faire le choix d'un essai mécanique, puis nous terminerons par l'évaluation des propriétés mécaniques liées à cet essai.

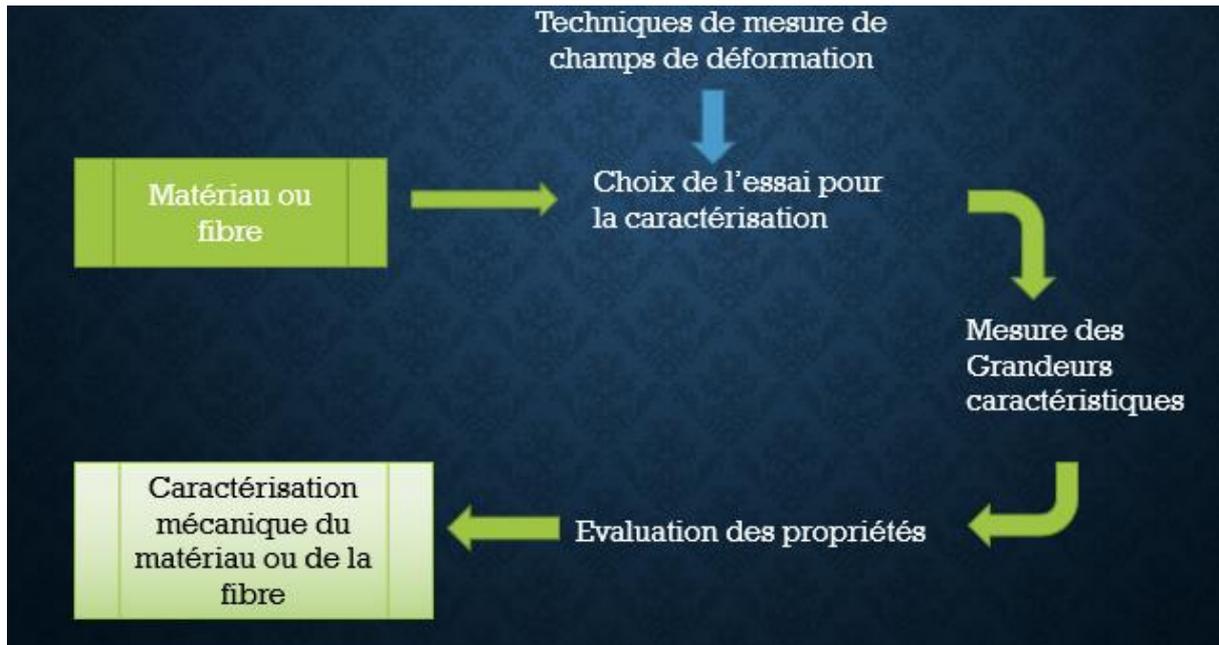


Figure 1-2: processus de caractérisation d'un matériau ou d'une fibre

I.2.1. CHOIX DE L'ESSAI MECANIQUE POUR LA CARACTERISATION

Les essais mécaniques sont les étapes indispensables pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux et fibres dans des conditions d'expérimentation variables (température élevée ou basse, vitesse des sollicitations grande ou faible) [6]. Ils sont des expériences dont le but est de ressortir les lois de comportement des matériaux/fibres (relation entre les contraintes -pression=force/surface- et les déformations -allongement unitaire adimensionnel-). Dans cette section, nous présenterons sommairement certains essais courants et nous ferons une analyse de ceux-ci pour y faire un choix pour notre étude.

a. Essais de traction

L'essai de traction est certainement le plus courant. Il permet de déterminer les principales caractéristiques mécaniques d'un matériau, telles que : la limite élastique, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction. Avec de l'équipement adéquat (utilisation d'extensomètre) il est également possible de mesurer le module d'élasticité ainsi que le coefficient de Poisson [8]. Dans la recherche, il est utilisé pour la caractérisation de nouveaux matériaux alors qu'il est appliqué dans l'industrie pour contrôler la qualité des alliages, polymères ou céramiques produits.

Cet essai consiste à placer une éprouvette normalisée (en forme et en dimensions selon le type de matériau) du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction (Figure 1.3) qui tire sur cette éprouvette jusqu'à sa rupture. On enregistre l'allongement et la force appliquée, que l'on convertit ensuite en déformation et contrainte.

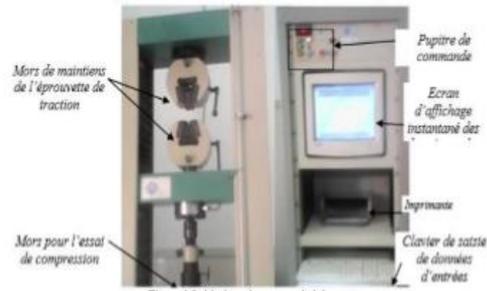


Figure 1-3: Machine de traction de laboratoire [1]

➤ Cas des fibres

Pour des raisons de faisabilité et de facilité de mise en œuvre expérimentale l'essai traction dans la direction longitudinale est la méthode la plus utilisée dans les littératures pour les fibres en général [9].

Protocole : Une fois isolée, la fibre est placée sur un cadre papier fenêtré, avec une goutte de colle à chaque extrémité de la fibre. Ce cadre papier a pour objectif de faciliter la manipulation afin de positionner la fibre sur le dispositif expérimental (Figure 1.4). Cette technique est régie par la norme expérimentale XP-T25-501-2 pour les propriétés mécaniques de renforts.

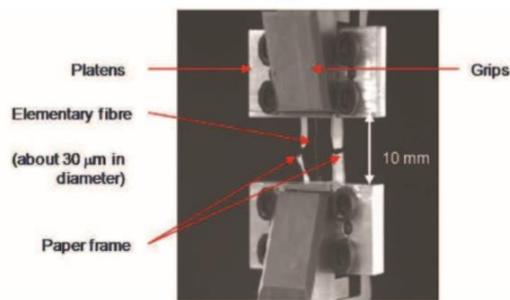


Figure 1-4: type de positionnement de la fibre sur le dispositif expérimental de traction [10]

b. Essai de flexion

En fonction de sa réalisation on distingue deux types.

➤ Essai de Flexion à 3 points

L'essai de flexion 3 points permet de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Ici, Une barrette du matériau à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de la barrette

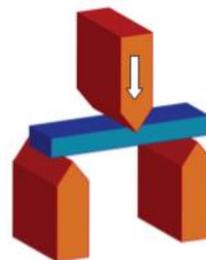


Figure 1-5: schéma du principe de l'essai de flexion trois points [11]

une force croissante jusqu'à rupture (figure 1.5).

➤ **Essai de Flexion à 4 points**

Comme le précédent, l'essai de flexion 4 points permet également de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Il consiste à soumettre une poutre à un chargement tel que, dans une zone de la poutre qu'on remplit les conditions de flexion pure (absence de cisaillement) [12]. La mesure obtenue dans ce cas est plus précise.



Figure 1-6: exemple de dispositif d'essai de flexion 4 points [12]

Cas particulier des fibres

Pour des raisons dimensionnelles, la caractérisation en flexion requiert des développements expérimentaux conséquents.

c. Essai de dureté

L'essai de dureté permet de déterminer la dureté. De symbole H (*Hardness* en anglais). La dureté caractérise la capacité d'un matériau à résister au marquage (empreintes, rayures...), à l'usure et à l'érosion. Cet essai consiste à appliquer une force connue sur la surface d'un élément par un pénétrateur et de mesurer l'empreinte laissée par ce dernier sur cette surface (essai Brinell, Vickers et Rockwell, ...) (tableau 1.9). Mais dans certaines variantes elle consiste à faire rebondir un objet très dur sur la surface d'un élément à tester puis à mesurer la hauteur du rebond (essai Shore pour élastomères et plastiques) [13]. L'essai de dureté tend de nos jours, à mesurer d'autres grandeurs telle que la ténacité (essai d'indentation).

➤ **Cas particulier des fibres**

Ici l'essai de dureté est fait par nano-indentation. Celui permet d'accéder aux propriétés longitudinales et transversales à l'échelle de la paroi cellulaire de fibres. Un comportement anisotropie est souligné dans les travaux de certains auteurs. Il est important de noter que cette méthode ne donne accès qu'à un comportement local de la fibre

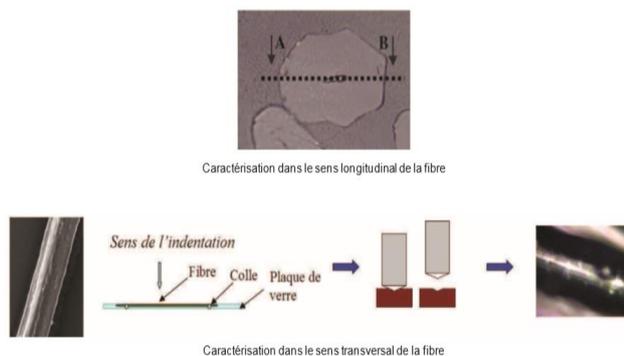
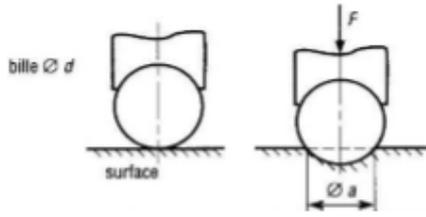
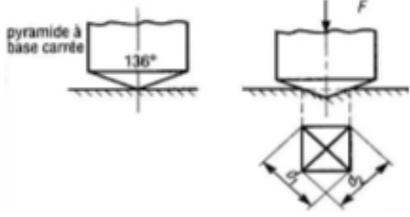
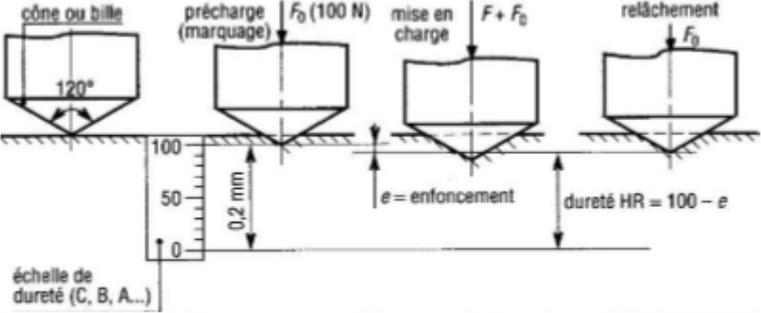


Figure 1-7: illustration de la caractérisation par nano-indentation à l'échelle de la paroi de la fibre de lin [14]

et que l'identification des propriétés mécanique requiert la connaissance et l'utilisation d'un modèle de comportement.

Tableau 1-9: Principes des essais de dureté Brinell et Vickers [1]

Principaux essais de dureté		
Essai	Symbole	Principe et conduite de l'essai
Brinell	HB	 $HB = \frac{0,102 \cdot F}{S}$ $S = \frac{\pi d}{2} (d - \sqrt{d^2 - a^2})$ <p>(F en N, a et d en mm)</p>
Vickers	HV	 $HV = 0,189 \frac{F}{d^2}$ $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ <p>(F en N, d1 et d2 en mm)</p>
Rockwell	HR (HRC, HRB...)	 <p>échelle de dureté (C, B, A...)</p>

d. Essai de résilience

L'essai de résilience permet de caractériser la fragilisation d'un matériau. Il permet également d'accéder au taux de rupture fragile (cristallinité-évalué par l'opérateur ou par analyse d'images) ou à l'expansion latérale des éprouvettes suite à la rupture.

Cet essai consiste à rompre une éprouvette entaillée (l'entaille a pour but de fragiliser le matériau) - éprouvette Charpy - sous l'impact d'un "mouton-pendule". On mesure l'énergie absorbée par la rupture, ce qui permet de remonter à la résilience du matériau (énergie absorbée ramenée à la surface (en J/cm²)) [15] (figure 1.8).

➤ Cas particulier des fibres

Pour des raisons dimensionnelles, l'essai de résilience n'est pas encore effectué au niveau des fibres.

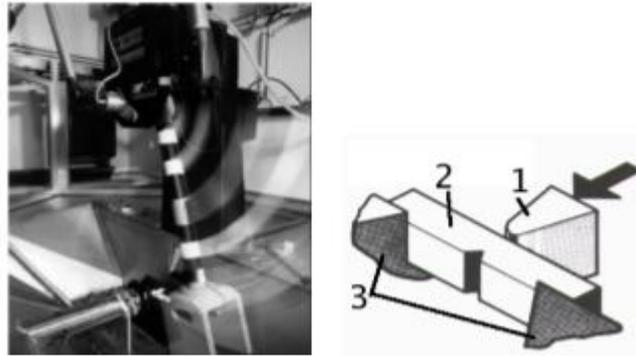


Figure 1-8: **Figure de gauche** : dispositif pour essais Charpy en fonctionnement [15]. **Figure de droite** : schéma de fonctionnement : 1) couteau 2) éprouvette KV 3) appuis [16]

e. Essai de fatigue ou d'endurance

L'essai de fatigue permet d'étudier le changement des caractéristiques dans le temps d'une pièce soumise à un chargement variable. Elle permet ainsi d'estimer la durée de vie de cet élément sous contrainte variable, à travers la mesure de la limite à l'endurance. Cet essai consiste à encastrier un arbre à une extrémité, et à le soumettre simultanément à un effort de flexion à l'autre extrémité et à un mouvement de rotation de fréquence f (figure 1.10). Au temps $t=0$, le moment de flexion engendre pour une section droite une contrainte de traction sur la génératrice supérieure de l'arbre et une contrainte de signe opposé de compression sur la génératrice inférieure.

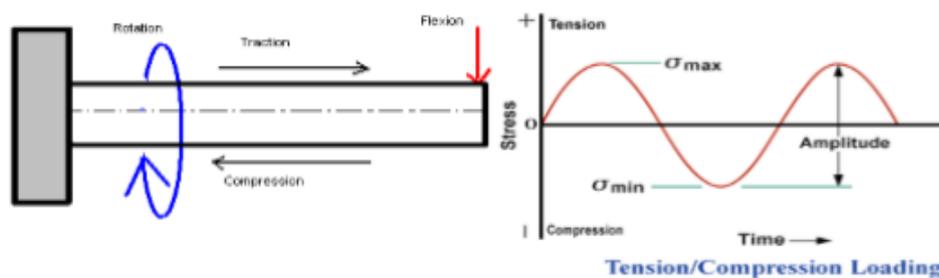


Figure 1-9: schéma principe de flexion rotative et courbe contrainte-temps [17]

➤ Pour le cas des fibres

Compte tenu de la taille des fibres, les méthodes de caractérisation dynamique sont très peu utilisées dans la littérature. Mais les travaux menés par Wiecek [18] ont permis de montrer la possibilité d'évaluer les propriétés dynamiques (figure 1.10).

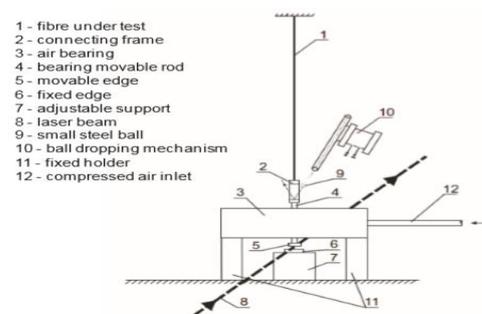


Figure 1-10: illustration d'un dispositif expérimental pour l'étude du comportement dynamique des fibres [18]

f. Autre essai : Essai de Hopkinson

C'est une méthode d'essai approuvée dans les matériaux, permettant de déterminer les propriétés des matériaux dans les conditions dynamiques.

g. Evaluation des essais mécaniques

D'après la présentation ci-dessus, nous pouvons ranger les essais mécaniques précédents selon deux critères : le nombre de grandeurs caractéristiques que nous pouvons déterminer grâce à l'essai et sa flexibilité dans la caractérisation des matériaux et fibres (tableau 1.10).

Dans cette étude, le critère de flexibilité sera considéré comme une variable booléenne (1= « oui » et 0= « non »).

Tableau 1-10: évaluation de quelques essais mécaniques courants

Essais mécaniques	Nombre Grandeurs caractéristiques (NG)	Flexibilité aux fibres et matériaux (F)	Produit corrélatif (P=NG x F)	Fréquences cumulées du produit corrélatif (FCP)
Essai de traction	7	1	7	63,64%
Essai de dureté	2	1	2	81,82%
Essai de flexion	1	1	1	90,91%
Essai de fatigue	1	1	1	100%
Essai de résilience	1	0	0	100%
Total			11	100%

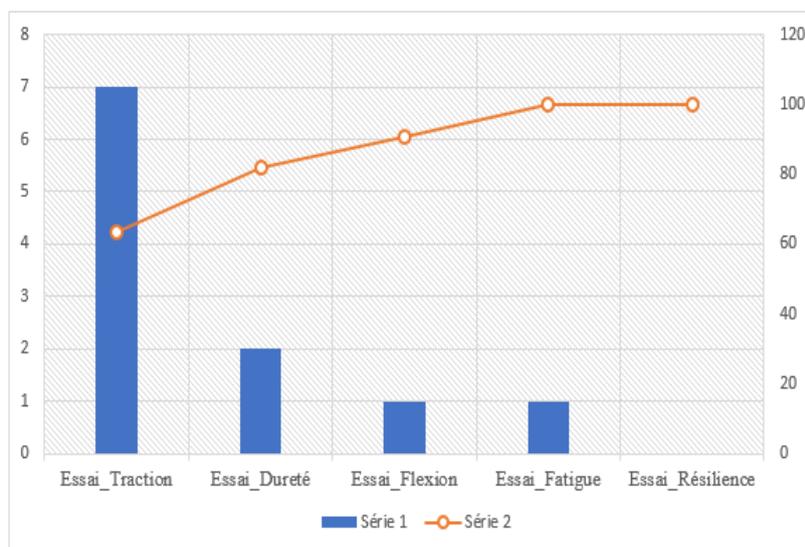


Figure 1-11: diagramme d'évaluation d'essais

On constate que l'essai de traction qui ne représente que 20% des essais étudiés ici, nous permet d'avoir à 63,64% des résultats dans notre étude. Nous retiendrons donc cet essai pour la suite de notre étude.

I.2.2. ÉVALUATION DES GRANDEURS CARACTERISTIQUES EN ESSAI DE TRACTION

a. Caractéristiques mécaniques

Les valeurs directement mesurées lors d'un essai de traction sont la force F et l'allongement ΔL . Elles sont généralement rapportées dans un diagramme force-allongement (figure 1.12).

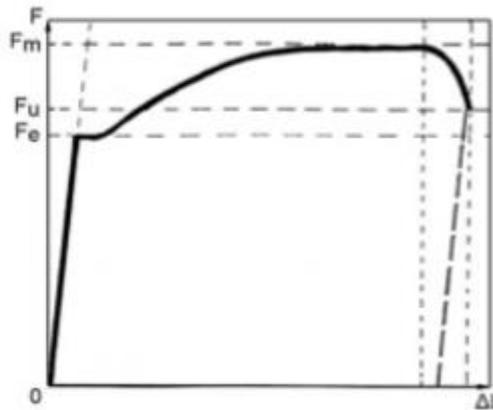


Figure 1-12: Courbes de traction force-allongement de deux matériaux différents [19]

La contrainte σ , rapportée dans un diagramme de traction est la force divisée par la section initiale S_0 de l'éprouvette (contrainte nominale).

$$\sigma = \frac{F_e}{S_0} \quad (1.1)$$

De même la déformation ε , se réfère à la longueur initiale L_0 de la partie délimitée de l'éprouvette (déformation nominale).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1.2)$$

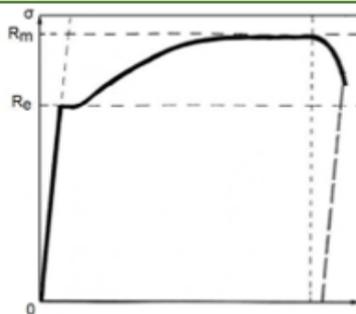


Figure 1-13: Courbes de traction contrainte-déformation de deux différents matériaux [19]

De ce dernier diagramme (figure 1.13) définir les différentes grandeurs liées à cet essai.

b. Définition des grandeurs données par l'essai de traction

➤ **Limite apparente d'élasticité :**

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1.3)$$

C'est la contrainte correspondant à l'ordonnée du premier palier de la courbe, à condition que ce palier ne soit pas le maximum absolu du diagramme.

➤ **Limite conventionnelle d'élasticité :**

$$R_{p0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0}, \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1.4)$$

C'est la contrainte conduisant après décharge à un allongement de 0.2% de L_0 .

➤ **Résistance à la traction :**

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1.5)$$

C'est la contrainte correspondant à l'ordonnée du maximum absolu du diagramme.

➤ **Résistance à la rupture (n'est pas normalisé) :**

$$R_u = \frac{F_u}{S_0}, \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1.6)$$

C'est la contrainte vraie correspondant au dernier point (rupture) du diagramme.

S_u = aire minimale de la section après rupture.

➤ **Allongement après rupture :**

$$A = \frac{l_u - l_0}{l_0} \cdot 100, \quad [\%] \quad (1.7)$$

C'est l'allongement spécifique après rupture mesuré entre repères définissant la longueur initiale L_0 . Dans le cas d'éprouvettes proportionnelles, on en distingue deux principaux types dépendants de la longueur initiale choisie :

- A_5 correspondant à : $L_0 = 5 \cdot D_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$
- A_{10} correspondant à : $L_0 = 10 \cdot D_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}$

L_u = longueur ultime entre repères au moment de la rupture.

➤ **Allongement régulier :**

$$A = \frac{l_{gu} - l_{g0}}{l_{g0}} \cdot 100, \quad [\%] \quad (1.8)$$

C'est l'allongement spécifique après rupture mesuré hors de la zone de striction, correspondant approximativement à l'allongement sous charge maximale F_m . L_{g0} est la même valeur numérique que L_0 .

➤ **Coefficient de striction :**

$$Z = \frac{S_u - S_0}{S_0} \cdot 100, \quad [\%] \quad (1.9)$$

C'est la contraction locale à l'endroit de la rupture (Fig. 1.14).

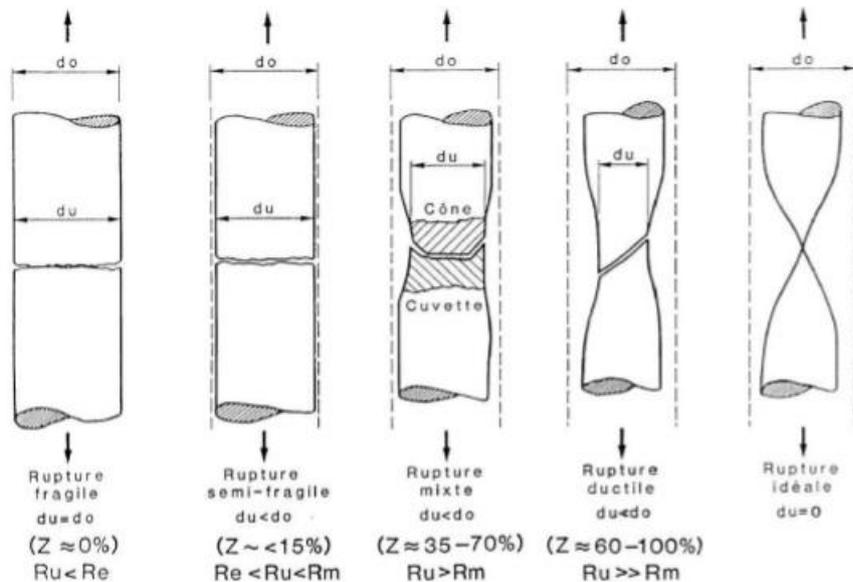


Figure 1-14: Relation entre types de ruptures et coefficient de striction [19]

➤ **Module d'élasticité**

Le module d'élasticité ou module d'Young est défini comme étant la pente de la partie linéaire partant de l'origine du diagramme. Sa détermination par un essai de traction nécessite impérativement un extensomètre de bonne précision.

$$E = \frac{\Delta F l_0}{\Delta L S_0} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon}, \quad [\text{GPa}] \quad (1.10)$$

➤ **Coefficient de Poisson**

Le coefficient de Poisson permet de caractériser la contraction de la matière perpendiculaire à la direction de l'effort. Il est obtenu par le rapport entre la déformation transversale (diminution de la section) et la déformation longitudinale (allongement relatif) de la pièce dans le domaine élastique

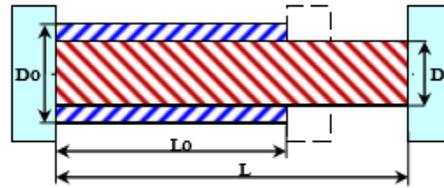


Figure 1-15: schéma d'un matériau soumis à la traction [1]

$$\nu = \frac{\frac{\Delta D}{D_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} \quad (1.11)$$

- ΔD : rétrécissement transversale ;
- D_0 : longueur transversale initiale ;
- ΔL : l'allongement de l'éprouvette ;
- L_0 : la longueur entre repère.

c. Choix de la grandeurs caractéristiques et de la propriété mécanique

D'après C. Dénéreaz [19], deux grandeurs caractéristiques sont fortement influencées par la technique de mesure du déplacement (extensomètre). Il s'agit du module d'Young et du coefficient de Poisson. Or parmi ces deux grandeurs caractéristiques, c'est le module d'Young qui est explicitement lié à une propriété mécanique (tableau 1.11). D'où notre étude sera de déterminer le module d'Young, soit d'étudier la rigidité des matériaux et des fibres.

Tableau 1-11: correspondance entre grandeurs caractéristiques et propriétés mécaniques dans le cadre de l'essai de traction [13]

PROPRIETES MECANIQUES	NOMS	EVALUATION OU CARACTERISATION
Rigidité – souplesse	Module d'Young	Rigide si E est élevé ; Souple si E est faible
Ductilité, malléabilité – fragilité	Allongement (déformation, allongement relatif à rupture)	Ductile ou malléable si A% est élevé ; Fragile si A% est faible
Resistance	Resistance (Contrainte à la rupture)	Résistant si Rm est élevé
Dureté (cadre des aciers)	Limite d'élasticité	Dur si Re est élevé ; Mou si Re est faible

I.3. OUTILS DE MESURE DU DEPLACEMENT : EXTENSOMETRE

Comme nous avons eu à le souligner plus haut, les outils de mesure du déplacement (extensomètre) influencent sur la mesure des grandeurs caractéristiques. L'étude et la conception de ces outils entre dans ce que l'on appelle l'extensométrie. Il existe deux grandes catégories d'extensomètres : les extensomètres avec contact et sans contact [16]. Nous présentons tout d'abord les dispositifs avec contact (jauges de déformation et extensomètre à pinces) puis plus brièvement l'extensomètre sans contact (qui se focalise de plus en plus sur les techniques d'analyse d'images numériques).

I.3.1. EXTENSOMETRE AVEC CONTACT

a. Jauges de déformation

Les Jauges de déformation sont des dispositifs traduisant en variation de résistance électrique leur propre déformation, en principe égale à celle de la structure à l'endroit où elles sont collées. Elles permettent typiquement de mesurer des déformations de $\pm 1 \mu\text{m}/\text{m}$ [16] (figure 1.16). Le conducteur est soit d'origine métallique, souvent des alliages à base de nickel, soit un semi-conducteur. Le nombre de brins de la grille diffère selon le type de conducteur. Il varie entre 10 et 20 pour un conducteur métallique et vaut 1 pour les jauges semi-conductrices. La relation qui lie déformation de l'extensomètre et résistance est :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{K} \frac{\Delta R}{R} \quad (1.12)$$

Où R est la résistance électrique et K le facteur de jauge, qui dépend très fortement du coefficient de Poisson ($K = C(1-2\nu) + 1 + 2\nu$, où C dépend du matériau -il varie d'environ 2 pour les métaux à plus de 100 pour les semiconducteurs)

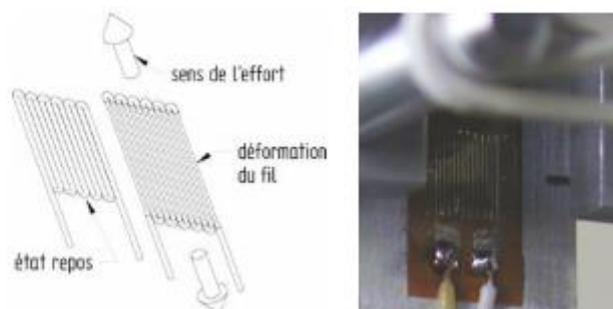


Figure1-16: Image de droite : schéma de principe du fonctionnement d'une jauge de déformation. Image de gauche : jauge collée sur une éprouvette [16]

b. Extensomètres à pinces

Le deuxième type d'extensomètres avec contact sont les extensomètres à pinces. Il en existe deux types :

- Extensomètres à LVDT (Linear variable differential transformer) : ils ont un corps constitué d'un noyau central autour duquel s'enroulent trois bobines. Une de ces bobines-primaire- est alimentée en courant et lorsque le noyau coulisse, cela induit du courant dans les bobines secondaires dont les variations sont proportionnelles au déplacement du noyau. Le courant augmente dans l'une des bobines et diminue dans l'autre, ce qui permet de mesurer la position du noyau. Le noyau est lui-même relié à l'éprouvette via des pinces qui l'enserrent légèrement, et il coulisse librement. Son déplacement autour de la position d'équilibre du pont génère deux tensions représentatives de l'amplitude du déplacement et de son sens. La valeur de ce déplacement est obtenue par comparaison des valeurs crêtes de chaque signal. La résolution est de l'ordre de 0,1 % de la plage de mesure qui peut varier de 1 à 100 mm environ. On peut donc espérer mesurer des déplacements, dans des conditions optimales, de l'ordre de 1 μ m. La résolution en déformation est d'environ 0,5%.
- Le deuxième type d'extensomètre à pince repose sur la mesure de la déflexion d'une barre par des jauges de déformation. Cette barre, située dans le corps de l'extensomètre, fléchit sous le déplacement des couteaux suite à la déformation de l'échantillon.

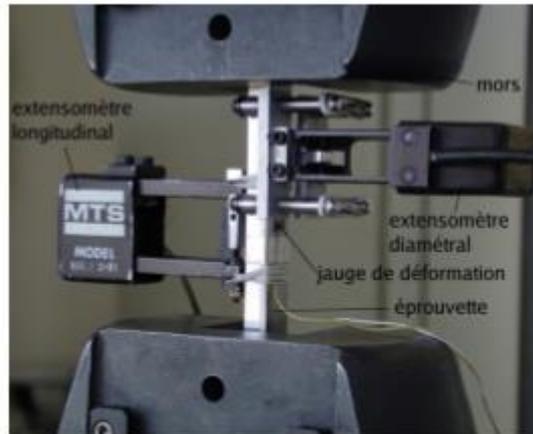


Figure 1-17: Fig. A.2: Extensomètres diamétral et longitudinal sur une éprouvette de traction (cliché CdM) [16]

I.3.2. EXTENSOMETRE SANS CONTACT

Il est également possible de réaliser des mesures de déplacement sans contact avec l'échantillon. Pour cela, il suffit de disposer un système d'observation (caméra) et un marquage adapté au niveau d'observation souhaité sur la surface de l'échantillon dont les déplacements

pourront être suivis par les techniques d'analyse d'images : c'est le principe général des extensomètres sans contact avec analyse d'images [20].

Tableau 1-12: évaluation des techniques d'analyse d'images ([20], adapté à nos soins)

Techniques	Mesure du champ de déformation	Avantages	Inconvénients
Méthode de suivi de marqueur ou grille	Bidirectionnelle	-mesure nanoscopique ; -mesure bidirectionnelle ; -Peu couteuse ;	-peu fiable ; -imprécise ; -préparation de la surface est complexe
Corrélation d'images numériques	Bidirectionnelle	-mesure nanoscopique ; -mesure bidirectionnelle ; -rapide ; -tout type de matériaux	-préparation de la surface.

Les techniques d'analyse d'images sont basées sur la comparaison de deux images successivement enregistrées au cours d'une sollicitation mécanique. Parmi les techniques actuelles, les plus connues sont la méthode de grille et la méthode de corrélation d'images numériques 2D. Une évaluation faite (tableau 1.12), nous conduit à choisir la méthode de corrélation d'images.

CONCLUSION PARTIELLE

Au terme de la généralité sur notre thème, nous avons présentés sommairement les matériaux et fibres, évalués les propriétés mécaniques de ces derniers et enfin vu les outils de mesure du déplacement. De ce bref argumentaire, nous ressortons que, la suite de notre étude portera plus d'intérêt à la mesure du module d'Young par l'essai de traction en investiguant dans la littérature les différentes techniques utilisées.

Chapitre 2 : ETAT DE L'ART SUR LA MESURE DU MODULE D'YOUNG PAR CIN

La caractérisation mécanique est faite de deux manières : par les modèles théoriques des matériaux et par des essais mécaniques. Les modèles théoriques permettent à partir d'une base de données des matériaux de base (métaux, matériaux organiques et inorganiques), de prédire les propriétés des matériaux obtenus par le mélange de ces derniers. Les essais mécaniques quant à eux sont des expériences permettant de déterminer les propriétés des matériaux de base et des mélanges. Les essais sont très souvent utilisés pour vérifier les résultats des modèles théoriques et inversement. La synthèse des différents articles passés en revue nous permettra ainsi de mieux définir les éléments (matériel et méthode) qui nous aiderons à la réalisation de notre plateforme.

II.1. OUTILS DE MESURE CONVENTIONNELS	25
II.1.1 Tahar DHAOUADI (2018) [20].....	25
II.1.2 Francis CORRIVEAU (2018) [21]	27
II.2. OUTILS DE CORRELATION D'IMAGES NUMERIQUES.....	28
II.2.1. Validation de l'outil de corrélation d'images numériques	29
II.2.2. Utilisation de l'outil de corrélation d'images numériques	33
II.3. SYNTHÈSE.....	38

II.1. OUTILS DE MESURE CONVENTIONNELS

II.1.1 Tahar DHAOUADI (2018) [20]

a- Objectif

Dans son article intitulé « caractérisation et modélisation des propriétés mécaniques des biocomposites à fibres courtes aléatoires », Tahar DHAOUADI caractérise les propriétés mécaniques en traction, flexion et résistance au choc de trois matériaux biocomposites afin d'évaluer leur aptitude à remplacer des matériaux composites dans des applications automobiles. Dans la présentation suivante nous nous limiterons à l'étude en traction.

b- Matériels

L'auteur distingue un premier groupe d'appareils à l'instar d'Extrudeuse LEISTRITZ de type MIC27/6L-48D et Machine à injection plastique de type Arburg ALLROUNDER 370 S qui entre dans la fabrication des biocomposites qu'il va caractériser. Un second groupe pour l'essai de traction de ces biocomposites (figure 2.1). Il s'agit ici : d'une machine de traction de la MTS Alliance munie d'une cellule de charge 10kN ; un extensomètre à couteaux mesure l'allongement de chaque échantillon. L'acquisition des données est réalisée par un logiciel de MTS, TW Essential software. Un pied à coulisse et un Thermotron pour la préparation et la conservation des éprouvettes.



Figure 2-1: Machine d'essai [20]

c- Méthode

Les trois matériaux biocomposites à caractériser sont des matériaux proposés et fabriqués par le laboratoire BDDC (Bioproducts Discovery and Development Centre) à l'université de Guelph. Le tableau 2.4 décrit la composition de ces matériaux (les étapes d'obtention de ceux-ci ne seront pas vues dans le cadre de ce mémoire). Il calcule la densité de chaque formulation et la teneur en renfort dans chacune d'elles.

Tableau 2-1: Composition des trois formulations [20]

	PP (wt %)	POE (wt%)	MAPP (wt%)	Biochar (wt%)	Miscanthus (wt%)
Formulation1 (F1)	62	5	3	30	0
Formulation2 (F2)	62	5	3	0	30
Formulation3 (F3)	62	5	3	15	15

Les essais de traction pour les trois formulations sont réalisés selon la Norme ASTM D 638-14. Les éprouvettes de test sont de type IV. Le tableau 2.2 et la figure 2.2 représentent les dimensions et les tolérances des éprouvettes.

Les sections des échantillons de chaque formulation sont mesurées par un pied à coulisse, comme indiqué dans la norme, au milieu et à 5 mm des extrémités de la longueur de la jauge. Pour chaque formulation, cinq échantillons sont testés pour s'assurer de la répétabilité des essais. La vitesse du test est 50 mm/min. Le conditionnement des échantillons avant les tests a été assuré par une chambre environnementale Thermotron sous une température de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité de $50 \pm 5\%$ pendant 40 heures avant les tests.

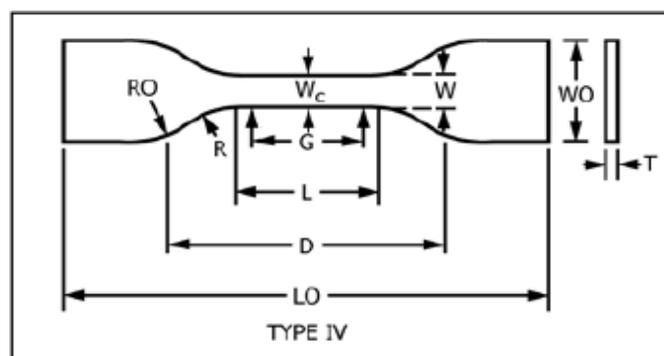


Figure 2-2: Éprouvette de type IV (Tirée de ASTM D 638-14, (2014, p.4))

Tableau 2-2: Les dimensions et les tolérances des échantillons [20]

	W	L	WO	LO	G	D	R	RO	T
Dimension en mm	6	33	19	115	25	65	14	25	3,2
Tolérance	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 6,4$	No max	± 0.13	± 5	± 1	± 1	$\pm 0,4$

d- Résultats

Les résultats obtenus de ces deux méthodes (tableau 2.3), montrent que les valeurs moyennes des modules d'Young calculées (par modélisation) sont très proches des résultats expérimentaux.

Tableau 2-3: Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux des formulations F1, F2 et F3 [20]

FORMULATION		Résultats numériques (MPa)	Résultats expérimentaux (MPa)	Erreurs en %
Formulation F1	E1	2479,44	2509,92	1,21
	E2	2480,03	2509,92	1,19
	E3	2494,44	2509,92	0,61
Formulation F2	E1	3619	3872	6,35
	E2	3628	3872	6,3
Formulation F3	E1	3033	3175	4,47
	E2	3022	3175	4,82

II.1.2 Francis CORRIVEAU (2018) [21]

a- Objectif

Dans ce mémoire dénommé « modélisation numérique de la formabilité des Alliages d'aluminium AA5052 et AA5083 », Francis CORRIVEAU développe des outils de calculs numériques qui permettent d'évaluer la faisabilité d'une pièce en tôles minces d'aluminium lors de la mise en forme de celle-ci. Il en découle bien entendu plusieurs objectifs spécifiques, parmi lesquels la *caractérisation mécanique des alliages à l'étude*. Les résultats des essais de traction simple ont permis à l'auteur de faire une première analyse sur la détermination de la loi d'écroutissage la mieux adaptée pour chaque alliage étudié et une deuxième étude sur l'identification de l'anisotropie des alliages étudiés. Notre étude sur cet article se limitera à ces essais de traction.

b- Matériels

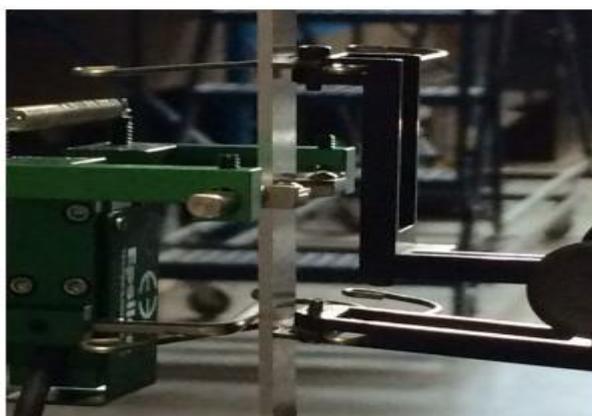


Figure 2-3: Disposition des extensomètres pour les essais de traction simple [21]

Un four est utilisé pour atteindre les états de recuits des différents échantillons. Les essais de traction sont effectués sur une machine de traction de modèle 5582 couplée au logiciel

BlueHill 2. Pour mesurer les déformations subies par les échantillons, deux extensomètres sont utilisés. La figure 2.3 illustre la position des extensomètres sur un échantillon typique. Pour mesurer les déformations longitudinales des échantillons, un extensomètre de modèle GL2IN de la marque Instron a été utilisé. Pour les dimensions transverses, on a plutôt recours à un extensomètre de modèle 3575-250M-ST de la marque Epsilon.

c- Méthode

Afin d'obtenir des résultats expérimentaux pertinents, l'auteur dresse un plan expérimental convenable dont les points importants de la démarche suivie sont : l'usinage des échantillons suivant la norme ASTM B557M ; l'enlèvement de tous types de bavures sur l'échantillon avant les essais ; les tests réalisés à une vitesse de 5 mm/s ; les essais réalisés à température ambiante (25 °C) ; le positionnement des extensomètres sur la partie centrale de l'échantillon. Si le bris de l'échantillon est situé en dehors des pinces de l'extensomètre longitudinal, le test est considéré comme étant un échec ; Au moins trois essais non échoués doivent être effectués pour chaque orientation et chaque alliage.

d- Résultats

L'essai de traction uni axiale permet d'évaluer plusieurs paramètres utiles à la modélisation numérique d'un alliage d'aluminium. En effet, cet essai, en utilisant des instruments de mesure adéquats, offre la possibilité de déterminer certaines propriétés mécaniques d'un alliage. C'est ainsi que l'on obtient les mesures du module d'Young pour chacun des alliages suscités suivant la direction de confession de l'éprouvette (tableau 2.4).

Tableau 2-4: Module d'Young des alliages étudiés ([21] adapté par nos soins)

Alliages	5052-H36			5052-O			5083-O		
Orientations	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°
Module d'Young (MPa)	70,7	70,0	68,5	69,7	69,5	70,2	70,5	70,9	71,8

II.2. OUTILS DE CORRELATION D'IMAGES NUMERIQUES

Dans cette partie nous retrouvons deux groupes d'articles. Le premier groupe a pour objectif la validation de l'outil de corrélation d'images numérique par comparaison aux autres outils de mesure du déplacement. Le deuxième groupe présente l'outil de corrélation d'images comme outil principal de mesure de déplacement.

II.2.1. VALIDATION DE L'OUTIL DE CORRELATION D'IMAGES NUMERIQUES

A. Éric ROHMER (2013) [22]

a- Objectif

Dans cet article dénommé « caractérisation et modélisation mécanique de tubes composites sic f /sic », il s'y relève un objectif de caractérisation et de modélisation. Éric ROHMER, pour l'instrumentation et la validation des essais de traction, fait une étude comparative d'outils de mesure du déplacement. Ces outils sont les extensomètres de contact, la corrélation d'images et les jauges de déformations. Notre présentation portera sur cette partie de cet article.

b- Matériels

Le dispositif employé pour les essais de traction sur tube est présenté sur la figure 2.4. Ce système qui est implémenté sur un bâti INSTRON 4505 possédant une capacité maximale de chargement de 100 kN, un asservissement en déplacement, une cellule de force de 50 kN, deux mors hydrauliques permettant une meilleure gestion des efforts au niveau des fixations.

Il utilise également dans cette expérience deux extensomètres longitudinaux, une caméra numérique CCD (Hamamatsu C4742-95) et quatre jauges de marque Vishay.

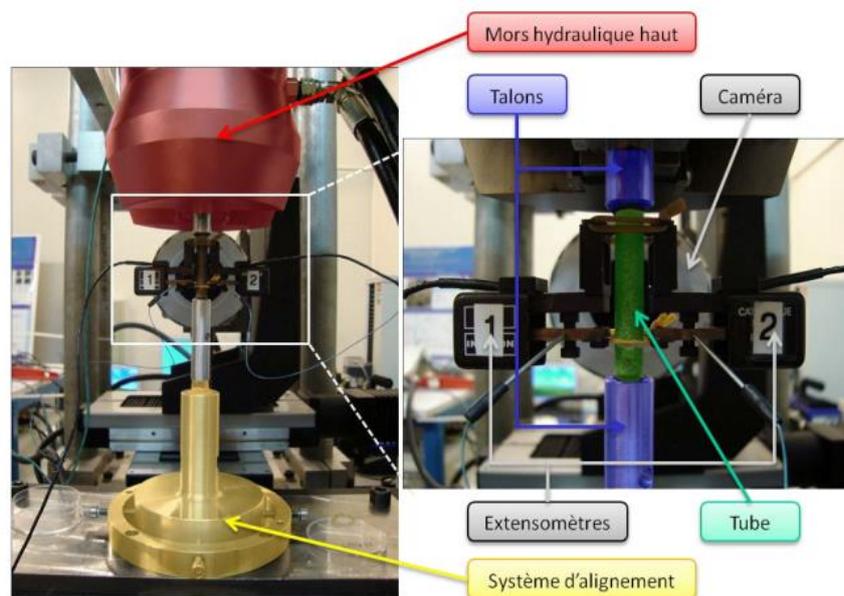


Figure 2-4: Dispositif de traction de l'étude [22]

c- Méthode

Les essais de traction pour la validation des outils de mesure sont réalisés sur des tubes d'alumine (Al_2O_3) de nature isotrope (tableau 2.5). Les différents essais de traction effectués sont :

- A l'extensométrie de contact : Deux extensomètres longitudinaux sont placés en vis-à-vis sur l'éprouvette. Ils possèdent une longueur de jauge de 25 mm avec une précision de 4% en pleine échelle. Seule la déformation longitudinale est enregistrée. Nous considérons la déformation obtenue par la moyenne des deux extensomètres.

Tableau 2-5: Propriétés du matériau de référence [22].

Microstructure			Propriétés mécaniques (à 20°C)			
Composition chimique	Densité	Taille de grains	Résistance en compression	Résistance en flexion	Module d'élasticité	Coefficient de Poisson
% mass.	$g.cm^{-3}$	μm	MPa	MPa	GPa	-
99,7 Al ₂ O ₃	3,7 - 3,95	10	3500	300 - 350	380	0,22

- Ajout de la corrélation d'images : pour cet essai, les observations sont faites à l'aide d'une caméra numérique CCD (Hamamatsu C4742-95) équipée d'un objectif macro NIKON avec un éclairage annulaire. Les images sont acquises en 12 bits avec une résolution de 1280 x 1024 pixels de manière synchrone avec la force appliquée. La fréquence d'acquisition est de 1 Hz. Un mouchetis a été réalisé sur l'alumine à l'aide de peinture noire pulvérisée. Enfin, le logiciel de corrélation employé ici est CORRELI (LMT-Cachan).
- Ajout des jauges de déformation : cet essai a été réalisé en collant quatre jauges de marque Vishay : deux (référence CEA-06-125UW-350) sont placées dans la direction longitudinale du tube en vis-à-vis et deux (référence CEA-06-250UN-350) sont placées selon la circonférence, l'une au-dessus des jauges axiales, et l'autre au-dessous. La procédure suivie pour le collage des jauges est celle préconisée par le fournisseur.

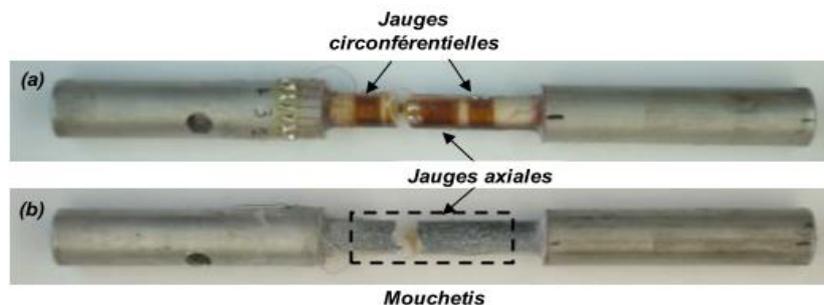


Figure 2-5: Epreuve tubulaire en alumine après rupture. Positionnement des jauges de déformation : (a) tube face avant, (b) tube face arrière. [22]

d- Résultats

Les résultats obtenus sur la figure 2.6 des différentes expérimentations sont résumés pour le cas du module d'Young dans le tableau 2.6. On note les écarts relatifs par rapport à la mesure

du fabricant de : 0,26% pour la technique d'extensomètre de contact ; 0,6% pour la technique de corrélation d'images ; de 1,31% pour la technique de jauge de déformation.

Tableau 2-6: différentes valeurs du module d'Young obtenues ([22] adapté par nos soins)

	Notice de vente	Corrélation numérique			Extensomètres de contact (02)	Jauges (04)
		16	32	64		
Modules d'Young (GPa)	380	398,0	377,7	382,2	381	375

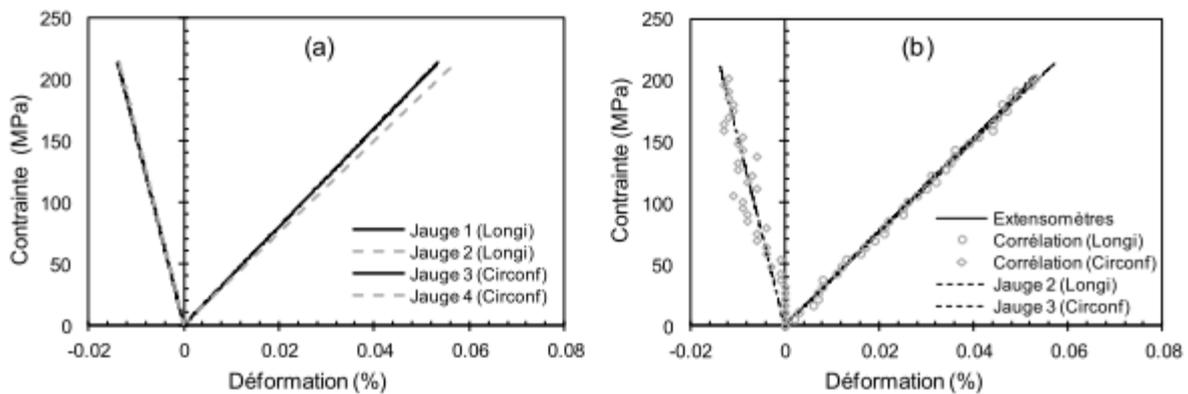


Figure 2-6: Courbes de comportement : (a) acceptabilité des jauges entre elles, (b) validité des mesures de déformation par jauges en comparaison à la corrélation d'images et aux extensomètres [22]

B. AMELIE CUYNET, FRANCK TOUSSAINT1, EMILE ROUX, DANIEL SCIDA ET REZAK AYAD (2016) [23]

a- Objectif

Dans cet article dénommé « Apport des mesures de champ dans l'étude de composites renforcés en fibres de lin au cours d'essais de traction quasi-statiques », Amelie Cuynet, Franck Toussaint1, Emile Roux, Daniel Scida et Rezak Ayad font l'étude du comportement de matériaux composites constitués d'une résine époxyde et de tissus à fibres de lin à renfort sergé. Le but de cette étude est de déterminer les modules d'élasticité (sur laquelle nous limiterons notre étude), coefficients de Poisson et contrainte à la rupture, de ce type de matériau par corrélation d'images. Afin de vérifier la validité des résultats de l'analyse, ces mesures sont comparées à celles obtenues par extensométrie classique.

b- Matériels

Les essais de traction sont réalisés sur une machine de traction INSTRON 5569 équipée d'une cellule de charge de 50 kN (précision : 0,5% de la charge) permettant d'enregistrer l'effort exercé sur l'éprouvette avec une fréquence d'acquisition de 5Hz (figure 2.7). Les trois grandeurs

force, temps et déplacement de la traverse sont enregistrées par la machine au cours de l'essai de traction par le biais du logiciel Bluehill. Un extensomètre axial INSTRON 2620-604 a été utilisé pour mesurer les déformations longitudinales et confronter les mesures à celles obtenues par corrélation d'images (sur logiciel 7D).



Figure 2-7: Montage de l'essai de traction [23]

c- Méthodes

Pour chaque essai, une vitesse de traction $v = 0,6 \text{ mm/min}$ correspondant à une vitesse de déformation $\dot{\epsilon} = 1,67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ a été retenue. On réalise cet essai sur quatre (04) éprouvettes désignées par #1, #2, #3 et #4.

L'essai réalisé ici utilise la corrélation d'image numérique et l'extensomètre, ce qui permettra par la suite d'avoir la même référence pour les comparer. Un échantillon de forme rectangulaire est utilisé pour cet essai. L'extensomètre est fixé au moyen de deux élastiques sur la face arrière de l'échantillon et l'axe de l'objectif d'un appareil-photo est placé perpendiculairement à la face avant de l'échantillon.

d- Résultats

A l'aide d'une régression linéaire, ils obtiennent les valeurs de module d'Young suivantes avec les résultats de la corrélation d'images pour les éprouvettes #1 à #3 (tableau 2.7).

Tableau 2-7: Module d'Young déterminé à partir de la corrélation d'images [23]

Eprouvette	#1		#2		#3		Moyenne
	Face	Tranche	Face	Tranche	Face	Tranche	
Module d'Young (MPa)	8881	9425	9258	10127	12250	8580	9747

En comparaison, les résultats obtenus par l'extensomètre avec l'éprouvette #4 sont les suivants : 11191 MPa pour le premier essai et 10212 MPa avec le second essai.

II.2.2. UTILISATION DE L'OUTIL DE CORRELATION D'IMAGES NUMERIQUES

A. Christophe DUPIN (2013) [24]

a- Objectif

Dans sa thèse intitulé « Etude du comportement mécanique des matériaux composites à matrice céramique de faible épaisseur », Christophe DUPIN se fixe de développer des techniques de calculs et de lois de comportement. Pour cela, il expose le protocole expérimental de caractérisation des propriétés mécaniques de cinq matériaux. Nous nous restreindrons à la mesure du module d'Young par essai de traction.

b- Matériels

Les essais ont été réalisés sur une machine INSTRON 4505 avec : des capteurs d'émission acoustique (PICO, Physical Acoustics Corporation) connectés à un préamplificateur (gain de 40dB) ; d'une caméra haute résolution (Hamamatsu C4742-95), pour l'acquisition des images au cours du chargement ; trois platines motorisées sur lesquelles repose un microscope optique (Keyence VHX-1000). Ce montage est fixé au bâti de la machine d'essai mécanique pour suivre, au cours d'un chargement donné, les différentes surfaces de l'éprouvette.

c- Méthode

Dans le cadre de cette étude, cinq matériaux d'épaisseurs différentes sont étudiés. Tous ces matériaux possèdent la même architecture de base, certains ont été usinés puis réinfiltrés par CVI pour y déposer une couche de seal-coat. Les dénominations (A, B, C, D, E) ont été choisies pour les distinguer.

Les essais ont été réalisés à température ambiante sur une machine INSTRON 4505 dans des conditions de sollicitation quasi-statique, avec une vitesse de déplacement de 0,05mm/min. Les données de la force et du déplacement sont enregistrées avec une période de 1s. Les éprouvettes de traction sens 0° ont pour dimensions 100mmx16mm, celles de traction sens 90° ont pour dimensions 68mmx25mm.

Ce montage est fixé au bâti de la machine d'essai mécanique pour suivre, au cours d'un chargement donné, les différentes surfaces de l'éprouvette. Pour chaque chargement, 85 images sont prises pour couvrir une surface de l'échantillon, préalablement poli, d'environ 11x3,6mm². Cette procédure a été complètement automatisée via un programme développé en Visual Basic pour le pilotage des platines et l'acquisition des images par le microscope. Un programme développé en Matlab permet d'assembler automatiquement les différents clichés obtenus.

d- Résultats

Le tableau 2.8 récapitule les valeurs du module d'Young déduites des résultats d'essais de traction dans le plan pour les cinq matériaux de l'étude. Le résultat auquel on pouvait s'attendre, est que l'épaisseur n'a au final que peu d'influence sur le comportement global en traction. L'analyse des propriétés mécaniques des matériaux C (avec seal-coat) et D (sans seal-coat) du tableau 2.1, permet de mettre en évidence l'influence du seal-coat sur les propriétés mécaniques du matériau. D'après les résultats, le seal-coat semble rigidifier légèrement le matériau (module d'Young supérieur de l'ordre de 12% pour le matériau C possédant une couche de seal-coat en comparaison avec le matériau D).

Tableau 2-8: valeurs du module d'Young issues des résultats d'essais de traction ([24] adapté par nos soins)

Matériaux	Type	Largeur de l'éprouvette b (mm)	Epaisseur de l'éprouvette h (mm)	Module initial d'élasticité relatifs
A	0°	16	3.61	100 ± 5,9
	90°	25	3.55	85
B	0°	16	3	89,5 ± 2
	90°	25	3	79,5
C	0°	16	2,08	100,5 ± 1,1
	90°	25	2,02	97
D	0°	16	1,9	88,8 ± 0,4
	90°	25	1,9	83,4
E	0°	16	0,6	93,6 ± 11,7
	90°	25	0,6	108,3

B. QUOC-THANG VO (2013) [25]

a- Objectif

Dans sa thèse intitulée « Imagerie d'essais mécaniques sur des composites à matrice métallique », l'auteur ressort un double objectif qui est d'une part de pouvoir évaluer des champs cinématiques de bonne qualité à l'échelle micrométrique des éprouvettes Zy-4 RxA oxydées, et d'autre part d'utiliser ces champs pour qualifier la méthode d'homogénéisation inverse. Pour ce faire, l'auteur, dans le chapitre II examine la méthode de mesure de champs par corrélation d'images numériques sur un essai de traction uni axial.

b- Matériels

Le matériel utilisé par l'auteur se subdivise à un premier groupe composé des dispositifs d'usinage pour la production des éprouvettes ; un deuxième groupe composé de Papiers SiC

200, SiC 500, SiC 1200, un MD Plan 6 μ m avec de la suspension diamantée 6 μ m et du lubrifiant, MD/OP Chem avec une suspension de silice colloïdale et des solutions d'acide pour la création des mouchetis; un dernier groupe pour la réalisation de l'essai de traction uniaxial (figure 2.8). Il s'agit : d'une Machine de traction-compression INSTRON 5566 à double colonne (1) ; un système d'acquisition et de pilotage de la machine permettant un asservissement en force ou en déplacement (2) ; un microscope optique longue distance LEICA à grandissement variable (3) ; une caméra CCD (Coupled-Charge-Device) de haute résolution BAUMER (4) ; un ensemble de platines de translations (trois degrés de liberté) et de rotations (deux degrés de liberté) micrométriques sur lequel sont montés le microscope et la caméra (5) ; un système d'acquisition et de pilotage de la caméra CCD (6) ; un Illuminateur de lumière blanche accompagné de son guide de lumière flexible (7); une table de banc optique (8); et enfin des mors à goupille (9).

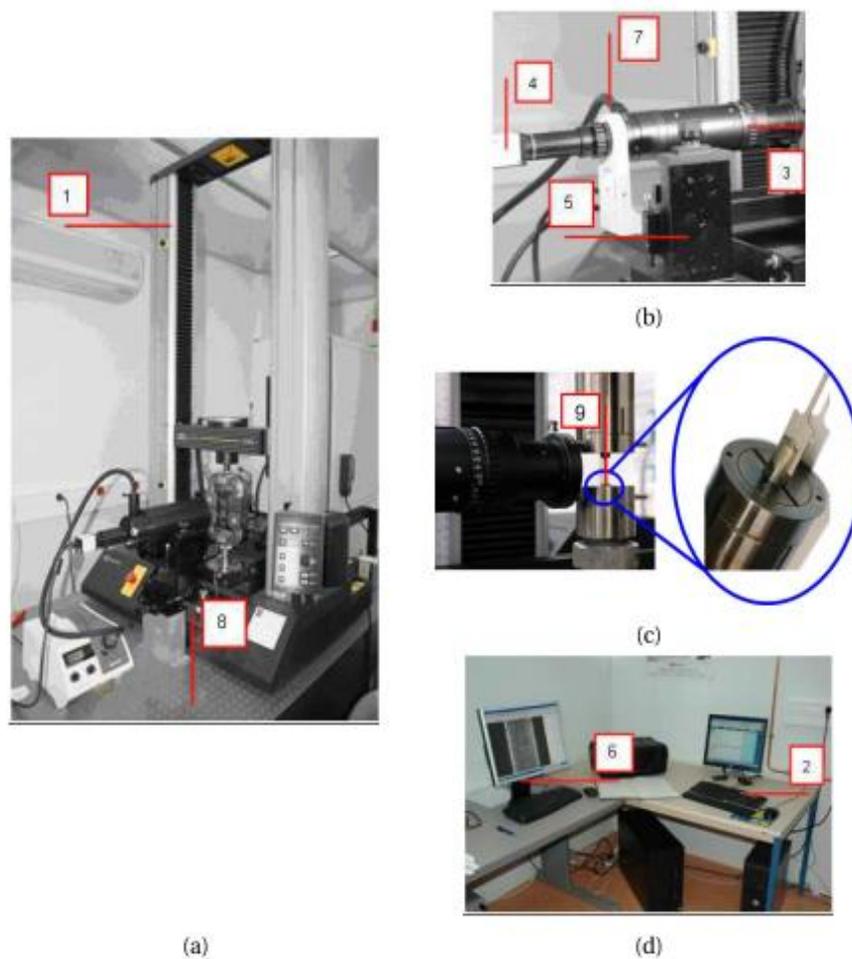


Figure 2-8: Dispositifs expérimentaux : (a) vue ensemble, (b) système de caméra, (c) montage de l'éprouvette sur Dispositifs les mors avec les cales ajoutées, (d) commande de l'acquisition de l'essai [25]

c- Methodes

L'auteur fait le choix de travailler sur des plaques planes en Zy-4 recristallisé (ou Zy-4 RXA), fournies par CEZUS (filiale du groupe AREVA). Les éprouvettes de traction ont une géométrie en os de chien (figure 2.9) et sont usinées par électroérosion, ce qui offre l'avantage de ne pas modifier de manière significative les propriétés mécaniques et métallurgiques du métal.

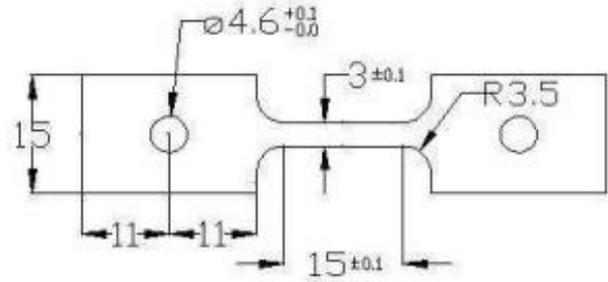


Figure 2-9 : Dimension (en mm) de l'éprouvette plane utilisée [25].

La mise en œuvre d'une analyse par CIN-2D requiert l'existence de motifs aléatoires observables à la surface de l'échantillon. Pour le faire l'auteur débute par un polissage manuel, en cinq étapes, adapté à la dureté du matériau après oxydation (tableau 2.9).

Tableau 2-9: les cinq étapes de polissage ([25] adapté à nos soins)

ETAPES	ACTIONS
1	Polissage au Papier SiC 200 avec de l'eau
2	Polissage au Papier SiC 500 avec de l'eau
3	Polissage au Papier SiC 1200 avec de l'eau
4	Polissage au MD Plan 6 μ m avec de la suspension diamantée 6 μ m et du lubrifiant
5	Polissage au MD/OP Chem avec une suspension de silice colloïdale

Après le polissage métallographique, les éprouvettes sont trempées dans une solution acide (procédure chimique) ou frottées de coton imbibé sur sa surface (procédure mécano-chimique).

Les essais mécaniques ont été amenés à réaliser par paliers et pilotés en déplacement. En prenant en compte de la limite d'élasticité du matériau, le pas de chaque palier de l'essai de traction uniaxiale a été défini pour avoir environ une dizaine de paliers dans ce domaine, avec un temps d'arrêt entre chaque palier choisi pour permettre les opérations de réajustement de l'optique. Les conditions d'essais sont donc les suivantes : la température ambiante : 20°C, la vitesse de la traverse : 1 mm/min, la traction par paliers de 10 μ m, le temps d'arrêt entre chaque palier est de 30s.

d- Resultats

Les résultats obtenus de la méthode d'homogénéisation inverse, du module de Young E (tableau 2.10) ont une précision d'environ 5% par rapport aux résultats expérimentaux.

Tableau 2-10: Valeurs moyennes et écart-types du module de Young des phase ex-β et α(O) mesurés par nano indentation sur les échantillons VIDEO-MECA-ZY-4 N°81 et N°83 [25]

		VIDEO-MECA-ZY4 N°81		VIDEO-MECA-ZY4 N°83	
		α(O)	ex-β	α(O)	ex-β
Module de Young (GPa)	Moyenne	130,15	108,94	117,07	100,58
	Écart-type	9,12	2,46	4,07	3,75

C. ZAKARIYA BOUFAIDA (2015) [26]

a- Objectif

Cet article dénommé « Analyse des propriétés mécaniques de composites taffetas verre/matrice acrylique en relation avec les propriétés d'adhésion des fibres sur la matrice », fait partie d'un projet dont l'objectif est de développer des résines thermoplastiques (TP) innovantes destinées à remplacer les résines TD. Il se limite, dans ce projet, à l'analyse des propriétés mécaniques des composites obtenus. Pour le faire, ZAKARIYA BOUFAIDA développe une métrologie fine adaptée à ces matériaux, notamment pour obtenir des informations sur les mécanismes de déformation et d'endommagement aux échelles locales. Dans cette démarche, il compare les valeurs du module d'Young obtenues par calcul théorique avec celles mesurée par essai de traction avec corrélation d'images numériques.

b- Matériels

Pour ses essais de traction, l'auteur se sert d'une machine de traction MTS avec des cellules de chargement de $\pm 100\text{kN}$; des éprouvettes en composites taffetas verre/Elium avec des ensimages MC (Multi Compatible) et Ac (Acrylique) ; un dispositif ARAMIS pour la corrélation d'image (DIC).

c- Méthode

Les éprouvettes ont une forme haltère (figure 2.10). L'axe de traction (x) est parallèle à la chaîne. La largeur de la partie utile de l'éprouvette vaut : $l=12\text{mm}$ et son épaisseur $e=4\text{mm}$. La mesure de la force F a été obtenue avec un capteur de 50 kN. La contrainte de traction macroscopique σ_x^{ma} est calculée de la façon suivante : $\sigma_x^{ma} = F/(e \times l)$. La déformation longitudinale macroscopique ε_x^{ma} a été obtenue par corrélation d'images 3D (DIC-3D) en mesurant la différence de déplacement entre deux sections horizontales (Section 1 et Section 2 sur la figure 2.11). La distance initiale entre ces deux sections ($\approx 20\text{mm}$) a également été évaluée de façon précise par DIC-3D. La corrélation d'images sert ici de simple alternative à l'utilisation d'un extensomètre « classique ».

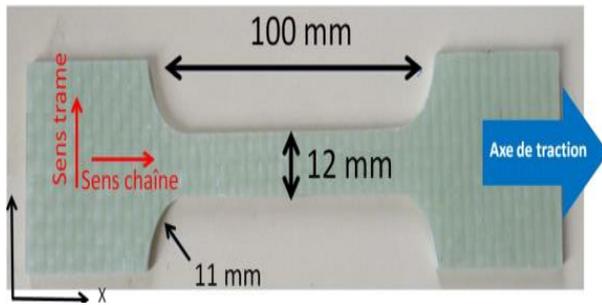


Figure 2-10 : Epreuve de traction de forme haltère (taffetas verre/Elium®). [26]

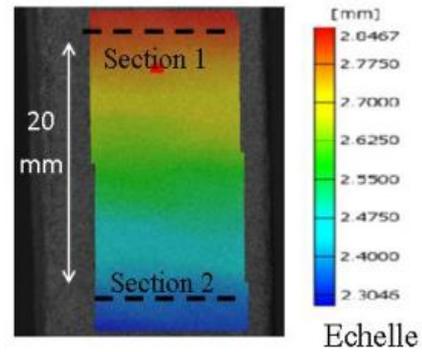


Figure 2-11 : Epreuve de traction de forme haltère (taffetas verre/Elium®) [26]

d- Résultats

- ✓ Théoriques : dans le cadre du module d'Young, ils sont regroupés selon les différents modèles théoriques sur le tableau 2.11.

Tableau 2-11: Prédictions du module d'élasticité par l'étude de modèles théorique [26]

E_x pour $\frac{h}{a} = 0.11$	
Modèle à plis UD croisés équivalent	23.6 GPa
Modèle OTFU	23.0 GPa
Modèle OTFNU	24.7 GPa
Valeurs moyennes	23,77 GPa

- ✓ Expérimentaux : Les modules d'élasticité longitudinaux E_x ont été calculés en ajustant les courbes avec un modèle linéaire sur une plage de déformation comprise entre $\varepsilon_x^{ma} = 0,1\%$ et $\varepsilon_x^{ma} = 0,6\%$ (figure 2.12). On obtient les valeurs suivantes pour le module de Young longitudinal des deux composites : Matériau Ac : $E_x = 22.3 \text{ GPa}$; Matériau MC : $E_x = 22.6 \text{ GPa}$.

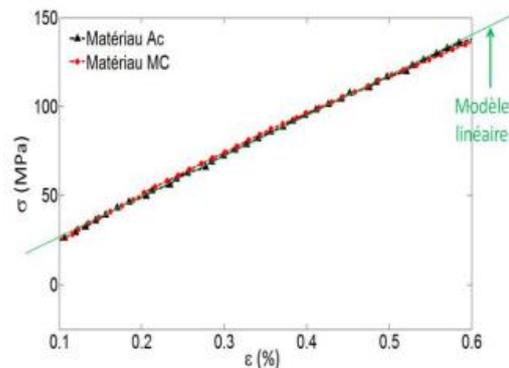


Figure 2-12: Modèle linéaire ajusté sur la plage $\varepsilon_x^{ma} = [0,1\% ; 0,6\%]$ des courbes de traction $0^\circ/90^\circ$ [26].

Les écarts relatifs entre les mesures du module d'Young déduites des modèles théoriques par rapport aux essais sont de 6,6% pour le matériau Ac et de 5,18% pour le matériau en MC.

II.3. SYNTHÈSE

AUTEURS	PARAMETRES MACHINES	OUTILS / TECHNIQUES DE MESURE DU DEPLACEMENT		OBSERVATIONS
		MATERIELS	METHODES	
Tahar DHAOUADI	Norme ASTM D 638-14 (forme de l'éprouvette et vitesse de déroulement de l'essai)	Extensomètre à couteaux	-L'extensomètre à couteaux mesure l'allongement de chaque échantillon. -L'acquisition des données est réalisée par un logiciel de MTS, TW Essential software	Les écarts maximaux obtenus entre les valeurs de la modélisation et celle par essai sont de : 1,21% pour F1 ; 6,35% F2 ; 4,82% pour F3.
Francis CORRIVEAU	-Norme ASTM B557M (forme et dimension de l'éprouvette) ; -Découpés des éprouvettes selon des orientations de 0°, 45° et 90° en fonction du laminage de la tôle ; - Tests réalisés à une vitesse de 5 mm/s - Essais réalisés à température ambiante (25 °C) - Au moins trois essais réussis doivent être effectués pour chaque orientation et chaque alliage.	-Extensomètre de modèle GL2IN de la marque Instron -Extensomètre de modèle 3575-250M-ST de la marque Epsilon	-L'extensomètre de modèle GL2IN de la marque Instron est utilisé pour la mesure des déformations longitudinales -L'extensomètre de modèle GL2IN de la marque Instron est utilisé pour la mesure des déformations transversales - Positionnement des extensomètres sur la partie centrale de l'échantillon - Si le bris de l'échantillon est situé en dehors des pinces de l'extensomètre longitudinal, le test est considéré comme étant un échec	Après expérimentation l'auteur obtient l'ensemble des valeurs de module d'Young, comme entrées pour sa modélisation
Éric ROHMER	Eprouvette en forme de tube	Extensomètres longitudinaux avec des longueurs de jauge de 25 mm avec des précisions de 4%.	-Deux extensomètres placés en vis-à-vis permet, de s'affranchir, dans les mesures, de sollicitation parasite telle que la flexion.	Les écarts relatifs par rapport à la mesure du fabricant de : 0,26% pour la technique d'extensomètre de contact ; 0,6% pour la technique de corrélation d'images ; de 1,31% pour la technique de jauge de déformation.
		-Deux jauges (référence CEA-06-125UW-350) -Deux jauges (référence CEA-06-250UN-350)	-Deux (référence CEA-06-125UW-350) sont placées dans la direction longitudinale du tube en vis-à-vis -Deux (référence CEA-06-250UN-350) sont placées selon la circonférence, l'une au-dessus des jauges axiales, et l'autre au-dessous - La procédure suivie pour le collage des jauges est celle préconisée par le fournisseur.	
		Caméra numérique CCD (Hamamatsu C4742-95) équipée d'un objectif macro NIKON avec un éclairage annulaire	-Les images sont acquises en 12 bits avec une résolution de 1280 x 1024 pixels de manière synchrone avec la force appliquée - La fréquence d'acquisition est de 1 Hz -Un mouchetis a été réalisé sur l'alumine à l'aide de peinture noire pulvérisée -ZOI utilisé : 16x16 pixels ; 32x32 pixels ; 64x64 pixels ;	

			<ul style="list-style-type: none"> - le logiciel de corrélation employé ici est CORRELI (LMT-Cachan) ; -résolution : 7,36 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ -ROI : 9,4 x 7,5 mm^2. 	
Amelie CUYNET, Franck TOUSSAINT,	<ul style="list-style-type: none"> -Eprouvettes en forme d'haltère et rectangulaire [5] ; -Vitesse de traction $v = 0,6 \text{ mm}/\text{min}$ 	<p>Extensomètre</p> <ul style="list-style-type: none"> -Deux appareil-photos Nikon D500 ; -Barre de lampes LED ; - logiciel 7D 	<ul style="list-style-type: none"> -fréquence d'acquisition de 5 Hz - Les images sont prises à un intervalle de temps de 2s ; -ZOI : 36x36 pixels ; 64x64 pixels ; 128x128 pixels ; -ROI : Zone 1 et Zone 2 	L'écart relatif sur la moyenne de la mesure du module d'Young obtenue par la corrélation d'images par rapport à celle de l'extensomètre est de 8,92%.
Christophe DUPIN	<ul style="list-style-type: none"> -Température ambiante -Vitesse de déplacement de 0.05mm/min, -Données de la force et du déplacement sont enregistrées avec une période de 1s, -Eprouvettes de traction sens 0° ont pour dimensions 100mmx16mm, celles de traction sens 90° 68mmx25mm. 	<ul style="list-style-type: none"> -Deux extensomètres -Caméra haute résolution (Hamamatsu C4742-95) -Jauges de déformations 	<ul style="list-style-type: none"> -Pour chaque chargement, 85 images sont prises pour couvrir une surface de l'échantillon, préalablement poli, d'environ 11x3.6mm², -Un programme développé en Visual Basic pour le pilotage des platines et l'acquisition des images par le microscope -Un programme développé en Matlab permet d'assembler automatiquement les différents clichés obtenus. 	D'après les résultats, le seal-coat semble rigidifier légèrement le matériau (module d'Young supérieur de l'ordre de 12% pour le matériau C possédant une couche de seal-coat en comparaison avec le matériau D).
QUOC-THANG VO	<ul style="list-style-type: none"> - Eprouvette : plaques planes en Zy-4 recristallisé avec des mouchetis; - la température ambiante : 20°C, - la vitesse de la traverse : 1 mm/min, - la traction par paliers de 10 μm, -le temps d'arrêt entre chaque palier est de 30s. 	<ul style="list-style-type: none"> -Microscope optique, - Caméra CCD (Coupled-Charge-Device) de haute résolution BAUMER, -Ensemble de platines de translations et de rotations, - Illuminateur de lumière blanche 	<ul style="list-style-type: none"> -Les images sont acquises en 8 ou 16 bits avec une résolution de 2050 x 2448 pixels de manière synchrone avec la force appliquée, -Un mouchetis a été réalisé par polissage et attaque chimique de la surface, -temps d'exposition : 32000 μs, -ZOI utilisé : 41 x 41 et 81 x 81 pixels - le logiciel de corrélation employé ici est le logiciel Kelkins, -résolution : 0,241 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, -ROI : 540 x 450 μm^2, 190 x 190 μm^2. 	Les résultats obtenus de la méthode d'homogénéisation inverse, du module de Young E (tableau 2.3) ont une précision d'environ 5% par rapport aux résultats expérimentaux.
ZAKARIYA BOUFAIDA	<ul style="list-style-type: none"> - Eprouvettes en forme haltère largeur $l=12\text{mm}$ et épaisseur $e=4\text{mm}$. -NF ISO 527 	Dispositif de DIC 3D	<ul style="list-style-type: none"> -étude de deux sections horizontales -distance entre les deux sections sensiblement 20 mm 	Les écarts relatifs entre les mesures du module d'Young déduites des modèles théoriques par rapport aux essais sont de 6,6% pour le matériau Ac et de 5,18% pour le matériau en MC.

Au terme de ce parcours de la littérature sur la mesure du module d'Young par essai de traction (uni axial et quasi statique), nous retenons les trois phases suivantes :

- La 1^{ère} phase portant sur l'essai de traction en lui-même. Celle-ci porte sur les prédispositions qu'il faut prendre pour cet essai. De notre lecture, nous avons retenu : la réalisation de l'éprouvette (forme, dimension et matériau), la vitesse d'exécution de l'essai, la température et le nombre de tests (réussis) à réaliser pour véridicité des résultats ;
- La 2^{ème} phase porte sur l'outil de mesure du déplacement. Cette phase se fait par comparaison de données : soit en confirmant les résultats d'une analyse théorique faite par un essai, dans ce cas on réalise l'essai avec un outil de mesure ; soit en disposant de deux outils de mesure différents pour ainsi définir la justesse des résultats en fonction des écarts obtenus entre eux.
- La 3^{ème} phase porte sur l'obtention du module d'Young. Le module d'Young n'étant pas directement obtenu par les efforts et les déformations, il faut obtenir la pente de la partie linéaire de la courbe contrainte/ déformation.

CONCLUSION PARTIELLE

Des articles recensés dans notre étude de la littérature, notre intérêt s'est porté sur les travaux d'Éric ROHMER [6]. Il en ressort que la caractérisation mécanique par extensomètre de contact donne les meilleurs résultats (écart de 0,26%) suivis de celle par corrélation d'image (écart de 0,6%). Toutefois, nous constatons que la corrélation d'images numériques, qui est un nouvel instrument dans la mesure du déplacement, devient de plus en plus prisée. Nous optons ainsi pour la corrélation d'image comme outil de mesure du déplacement qui conduira à la réalisation d'un progiciel.

Chapitre 3 : MATERIELS ET METHODES

Dans ce chapitre, il sera question pour nous de présenter le matériel et les méthodes nécessaires à l'acquisition et au traitement des données expérimentales afin de déterminer le module d'Young par imagerie.

III.1- MATERIELS	43
III.1.1- Matériels pour l'essai de traction au laboratoire SEM	43
III.1.2- Matériels d'acquisition et de traitement d'images.....	44
III.2- METHODOLOGIE DE MESURE DU MODULE D'YOUNG.....	45
III.2.1- Protocole des essais du laboratoire SEM.....	45
III.2.2- Protocole de traitement d'images	48
III.2.2- Protocole de Ncorr+.....	48
III.2.3- Protocole de ALDIC+.....	50
III.2.4- Méthodologie d'exploitation de résultats	52

Nous nous sommes butés aux difficultés à avoir accès à des plateformes d'essai de traction pour nous permettre la détermination du module d'Young pour matériau, en raison de l'inaccessibilité dans les entreprises les possédant ; de plus compte tenu de la précision requise dans les cas des fibres (précision nanométrique) pour le mouchetage. Notre option de mesure conventionnelle s'est faite par la mise à exploitation de la base de données fournie par le laboratoire SEM [1]. Le matériel, la méthode et les résultats sont présentés ci-dessous.

III.1- MATERIELS

III.1.1- Matériels pour l'essai de traction au laboratoire SEM

a. Epreuve

Le matériau testé est le DP980 dont la composition chimique complète est donnée par le tableau 3.1.

Tableau 3-1: Composition chimique du DP980[27].

Elément Chimique	Al	C	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	P
Wt%	0,05	0.12	0,25	0.01	2,47	0,36	<0.01	0,014
Elément Chimique	S	Si	Ti	B	N	Nb	V	Zn
Wt%	0.004	0.03	<0.01	0.01	0.009	0.02	<0.01	<0.01

L'éprouvette utilisée pour l'expérimentation est illustrée par la figure 3.1

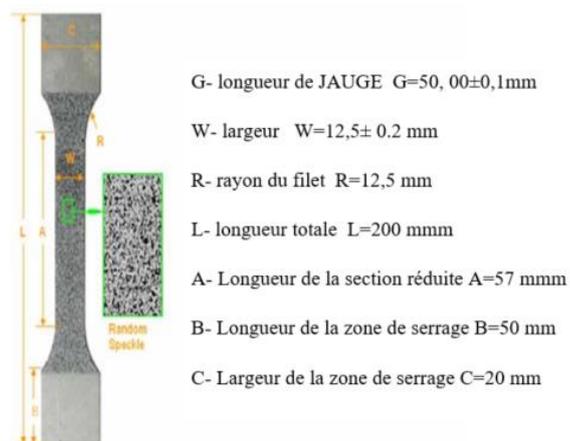


Figure 3-1: dimension de l'éprouvette [27]

b. Machine d'essai

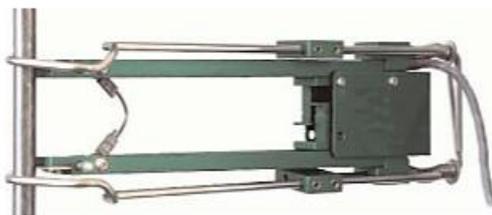
Il s'agit d'une Machine d'essai de traction universelle électromécanique 50kN - Z50-X700 présenté par la figure 3.2 de même que ses caractéristiques.



Figure 3-2: machine d'essai de traction [27]

c. Instrument de mesure

Il s'agit d'un extensomètre de contact à jauge (figure 3.3).



Nom : extensomètre par Jauge de contrainte STGA

Type : Extensomètre de contact

Epaisseur maximale de l'échantillon : 25mm

Figure 3-3 : Instrument de mesure [27]

III.1.2- Matériels d'acquisition et de traitement d'images

a. Capteur d'images

Il s'agit d'une caméra haute résolution Redlake Motion Pro X3 (figure 3.4).



- Résolution: jusqu'à 1280 x 1024 (couleur or mono)
- Réseau de capteur: réseau matriciel de 12 μ m x 12 μ m pixels, couleur or monochrome
- Fréquence d'image rapide: de 1000 fps à 64000 fps à résolution réduite.
- Résolution dynamique: 59 dB au capteur

Figure 3-4: caméra d'acquisition [27]

b. Environnement et Plateforme de traitement

La réalisation du progiciel entier mobilisera :

- Un ordinateur portable (figure 3.5) et la plateforme de traitement MATLAB 2017b : ils ont été déployés par nos soins pour le traitement d'images capturées lors de la méthode conventionnelle :

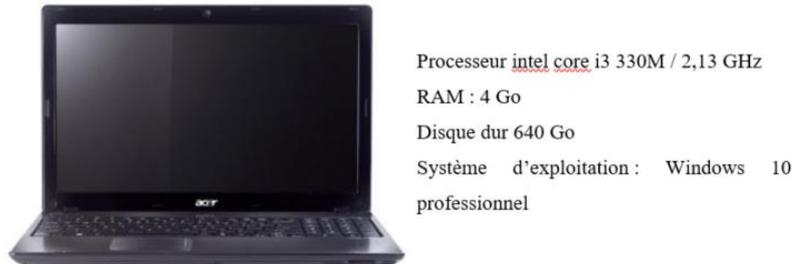


Figure 3-5: environnement et plateforme de traitement

- Un modem internet.

Il s'agit ici d'une clé internet (figure 3.6)

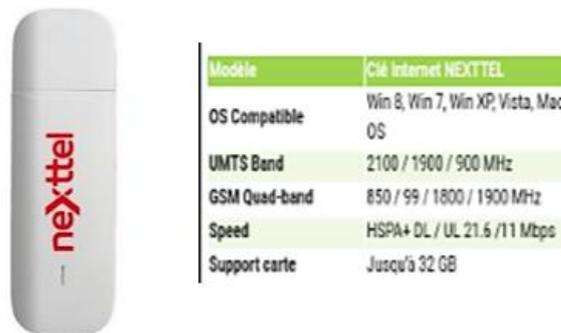


Figure 3-6: modem internet

III.2- METHODOLOGIE DE MESURE DU MODULE D'YOUNG

III.2.1- Protocole des essais du laboratoire SEM

Le déroulement de l'essai de traction au laboratoire SEM est fait suivant le processus illustré sur la figure 3.7. Une image de l'éprouvette est prise avant et après la déformation, puis le système de corrélation d'images numériques applique l'algorithme de corrélation pour évaluer quantitativement les données de contour, de déformation et de contrainte (Tableau 3.2).

Tableau 3-2 : contraintes et déformations produites par le laboratoire SEM [27]

Exp. N°	1	2	3	4	5
σ (MPa)	100	200	300	400	500
ϵ expérimental (%)	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3

Exp. N°	6	7	8	9	10
σ (MPa)	600	700	800	900	1000
$\epsilon_{\text{expérimental}}$ (%)	0,45	0,7	1	1,9	4,3

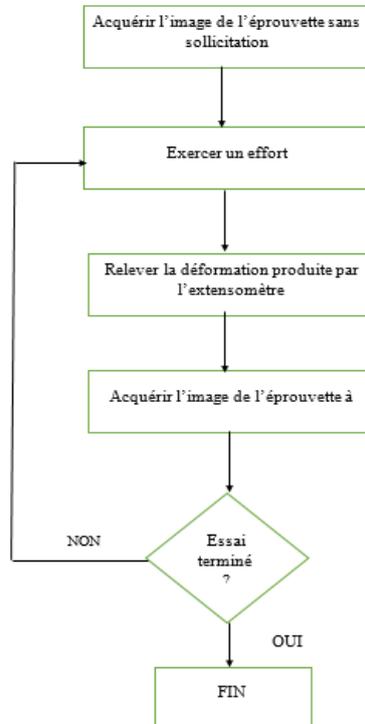


Figure 3-7 : déroulement de l'essai de traction du laboratoire SEM (adapté par nos soins)

Ainsi la courbe de contraintes/déformations est produite des valeurs listées dans le Tableau 3.2

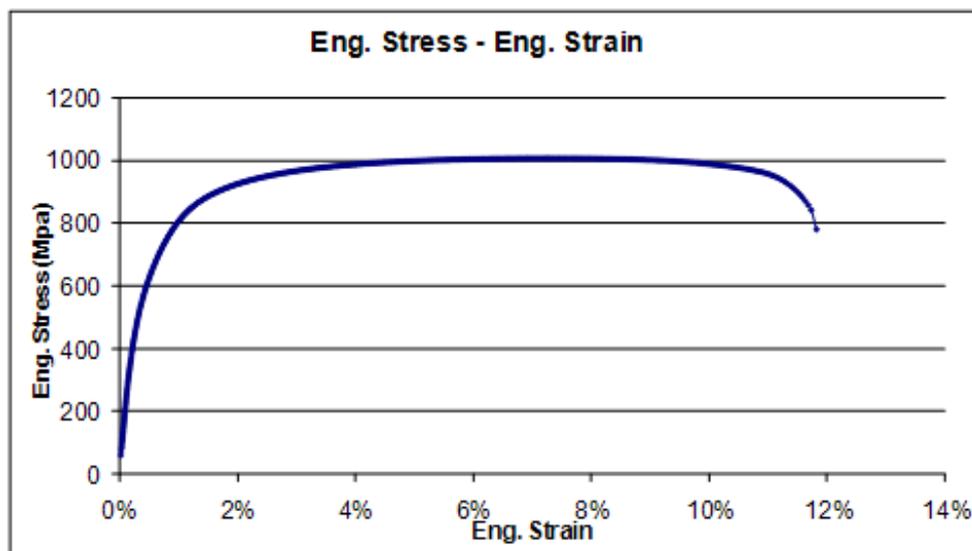


Figure 3-8: courbe de contrainte déformation [1]

Sur la plateforme Excel, nous déterminons sur la partie linéaire de la courbe contraintes/déformations (figure 3.9). Le module d'Young expérimentale $E_{\text{expérimental}}$ est déduit de la pente est donnée par :

$$E_{\text{expérimental}} = 162160 \text{ MPa}$$

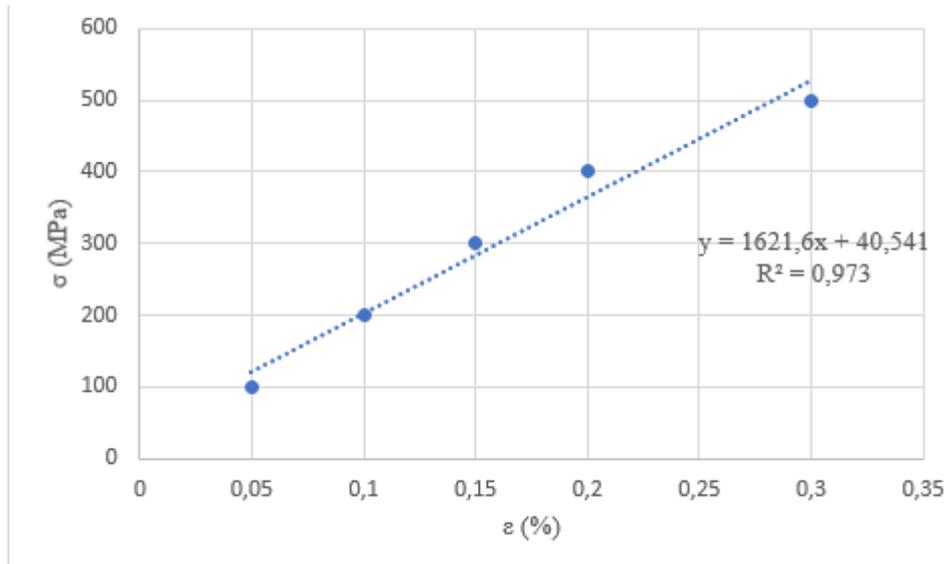


Figure 3-9 : Détermination du module d'Young expérimental

A la fin de l'essai, un prétraitement est effectué sur les images acquises pour obtenir dix (10) images dites formatées dont une est représentée sur la figure 3.10.

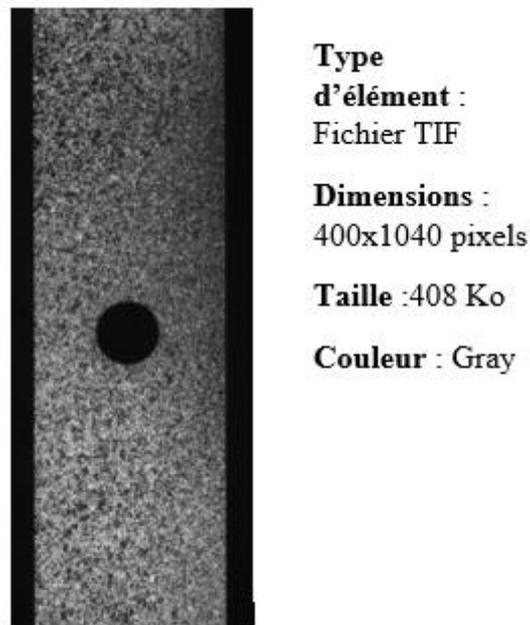


Figure 3-10 : Image formatée obtenue du laboratoire SEM

III.2.2- Protocole de traitement d'images

Afin de déterminer le module d'Young par imagerie, nous partirons des données du laboratoire SEM (contraintes, déformations et images) dont nous ressortirons la valeur conventionnelle de celui-ci. Par la suite nous traiterons les images fournies par le laboratoire SEM, sur deux algorithmes de corrélation d'images (Ncorr et ALDIC) sur lesquels nous grefferons notre algorithme de calcul de module d'Young pour obtenir ce dernier par imagerie (figure 3.11).

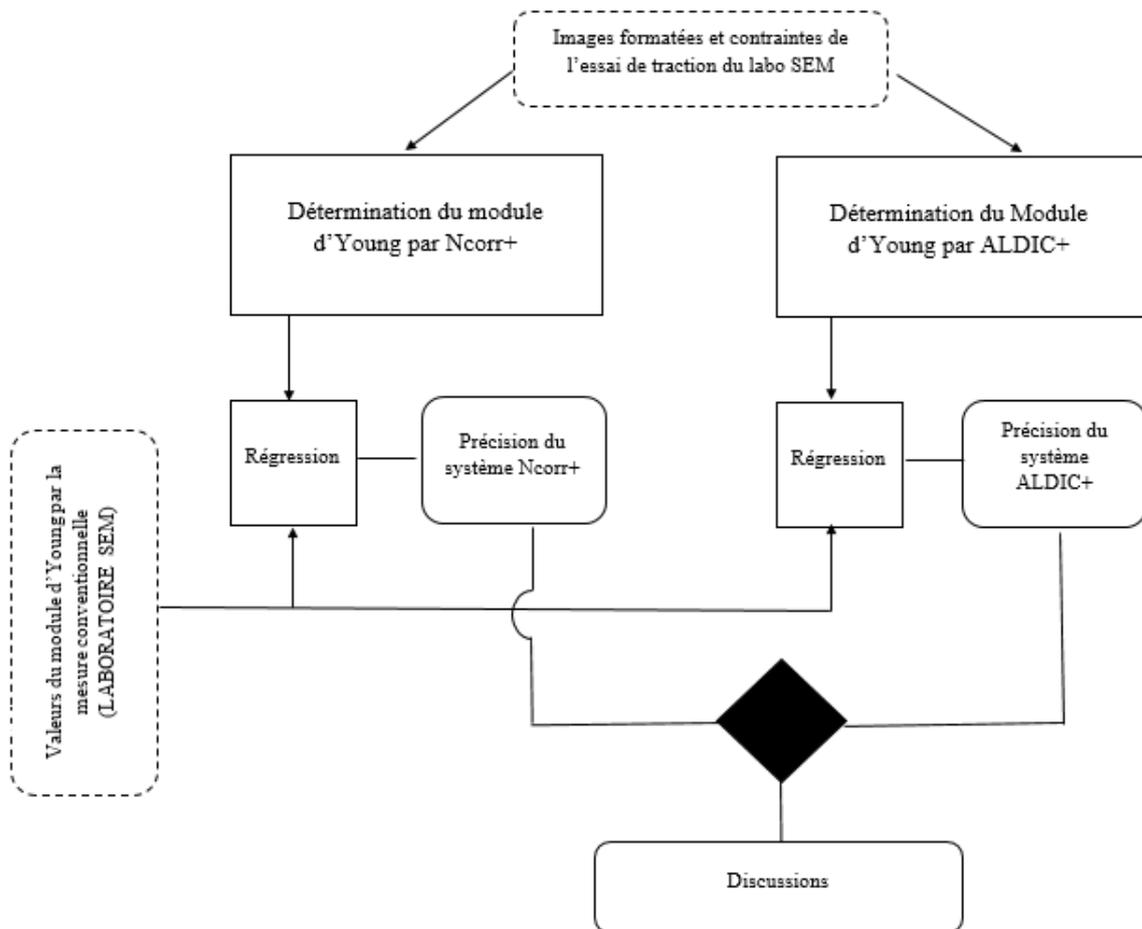


Figure 3-11 : Processus de détermination du module d'Young par imagerie

III.2.2- Protocole de Ncorr+

a. Présentation de l'algorithme de Ncorr de Justin BLABER [2]

Le progiciel Ncorr développé par Justin BLABER s'appuie sur un algorithme basé sur :

- La méthode de composition inverse ;
- La méthode RGDIC (Reliability Guided) ;
- L'algorithme de fenêtre de déformation.

b. Modification de l'algorithme de Ncorr de Justin BLABER

Le but de notre progiciel étant de calculer le module d'Young et de donner les déformations liées à chaque contrainte appliquée. Nous avons modifié l'algorithme de Ncorr suivant le processus illustré sur la figure 3.12.

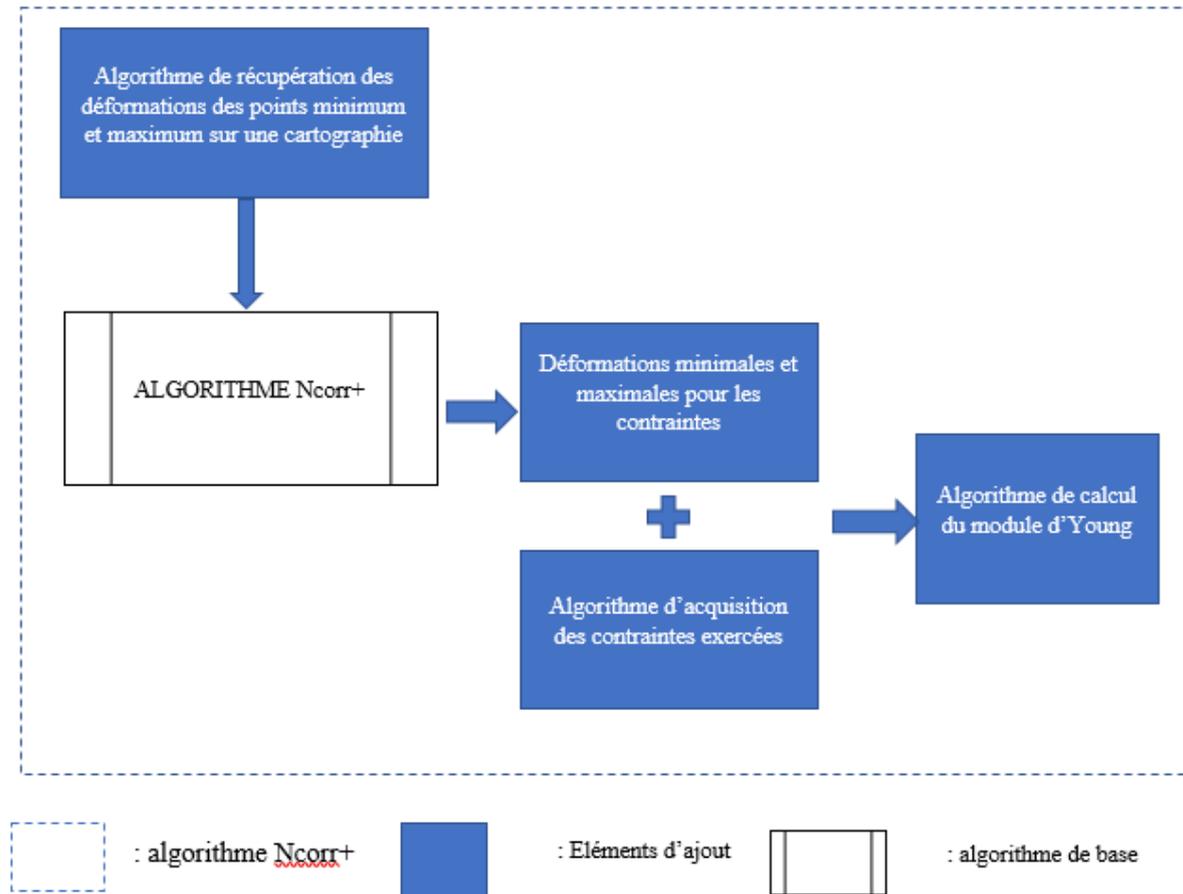


Figure 3-12 : Algorithme de Ncorr+ ou algorithme modifié de Ncorr

c. Traitement des images et détermination du module d'Young

Pour la simulation, nous partons des images et des contraintes fournies par le laboratoire SEM en les insérant dans le nouvel algorithme Ncorr+ comme illustré sur la figure 3.13. A la fin de la simulation nous obtenons le module d'Young par imagerie.

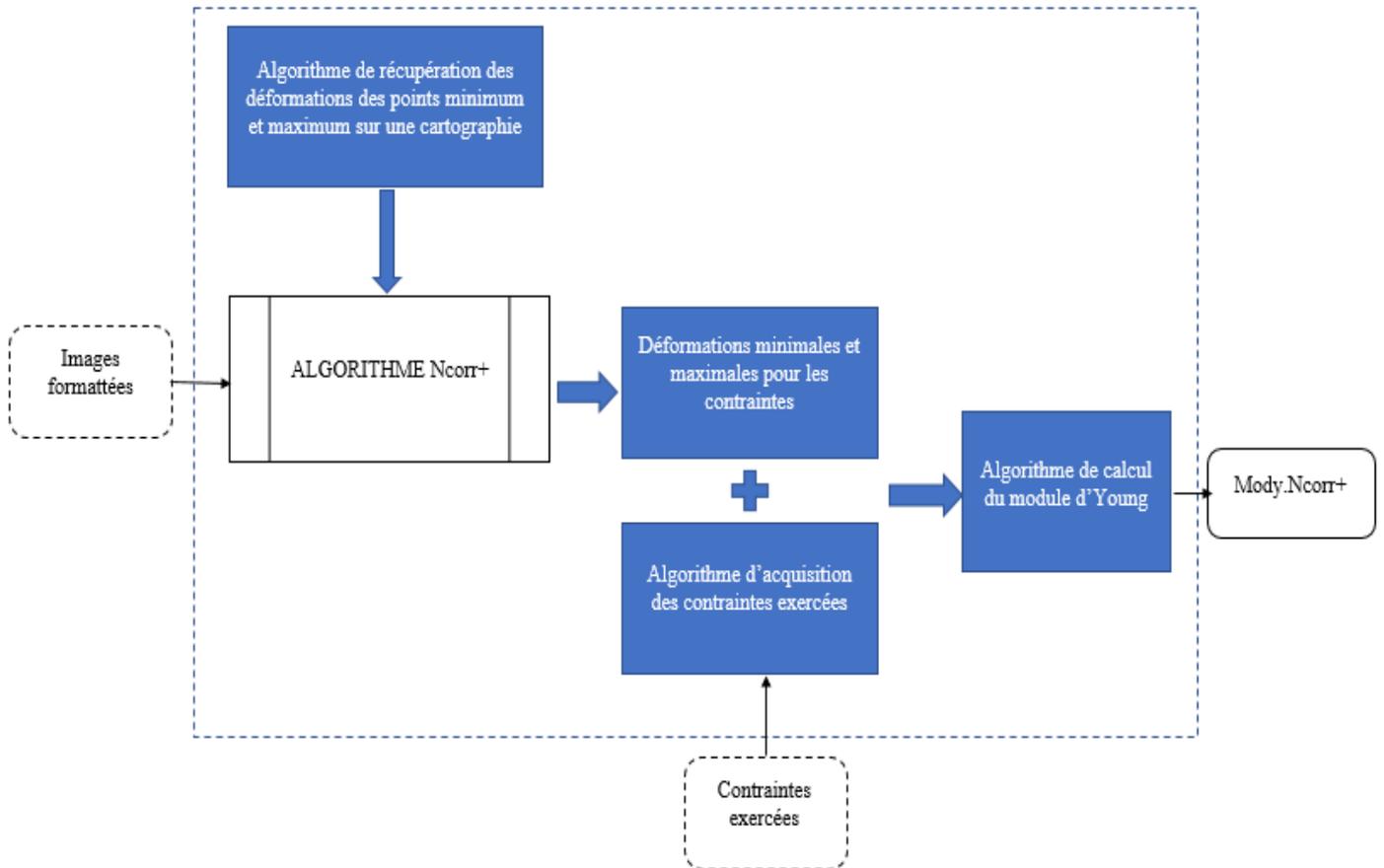


Figure 3-13: Détermination du Mody.Ncorr+

III.2.3- Protocole de ALDIC+

a. Présentation de l'algorithme de AL-DIC de Jin YANG et Kaushik BHATTACHARYA [3]

AL-DIC est un algorithme DIC hybride à calcul parallèle rapide, qui combine la méthode DIC de sous ensemble locale et la méthode DIC globale à éléments finis.

b. Modification de l'algorithme

Le but de notre progiciel étant de calculer le module d'Young et de donner les déformations liées à chaque contrainte appliquée. Nous avons modifié l'algorithme de ALDIC suivant le processus illustré sur la figure 3.14.

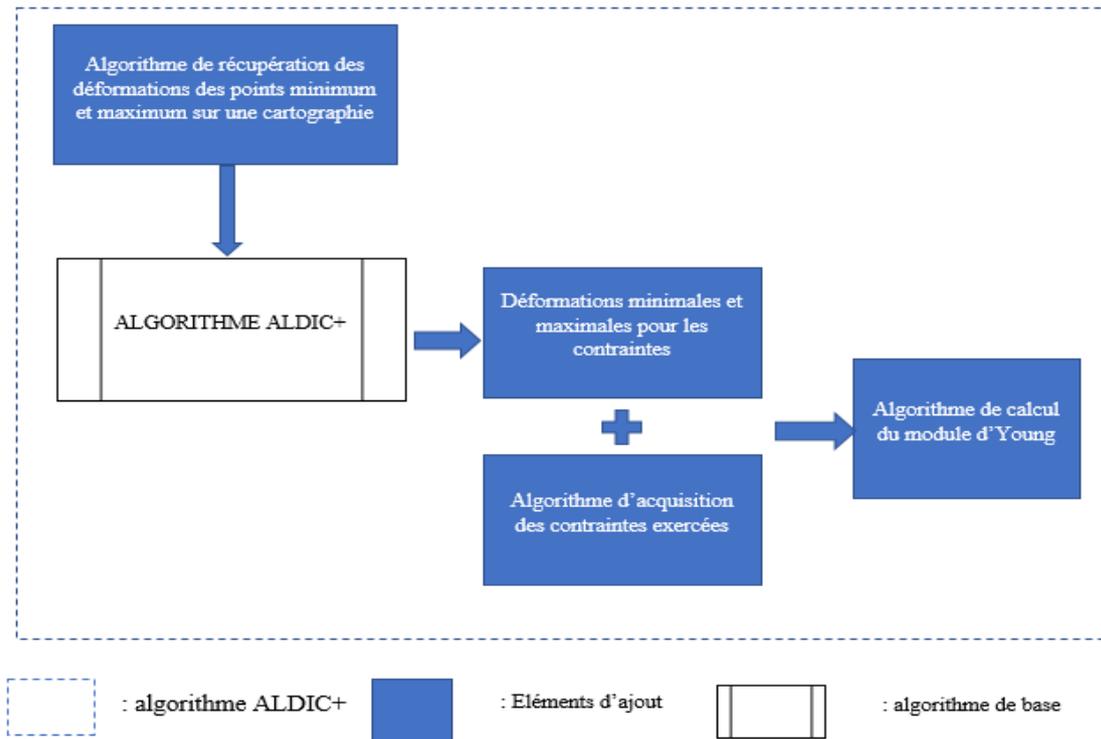


Figure 3-14: Algorithme de ALDIC+ ou algorithme modifié de ALDIC

c. Traitement des images et détermination du module d'Young

Pour la simulation, nous partons des images et des contraintes fournies par le laboratoire SEM en les insérant dans le nouvel algorithme ALDIC+ comme illustré sur la figure 3.12. A la fin de la simulation nous obtenons le module d'Young par imagerie.

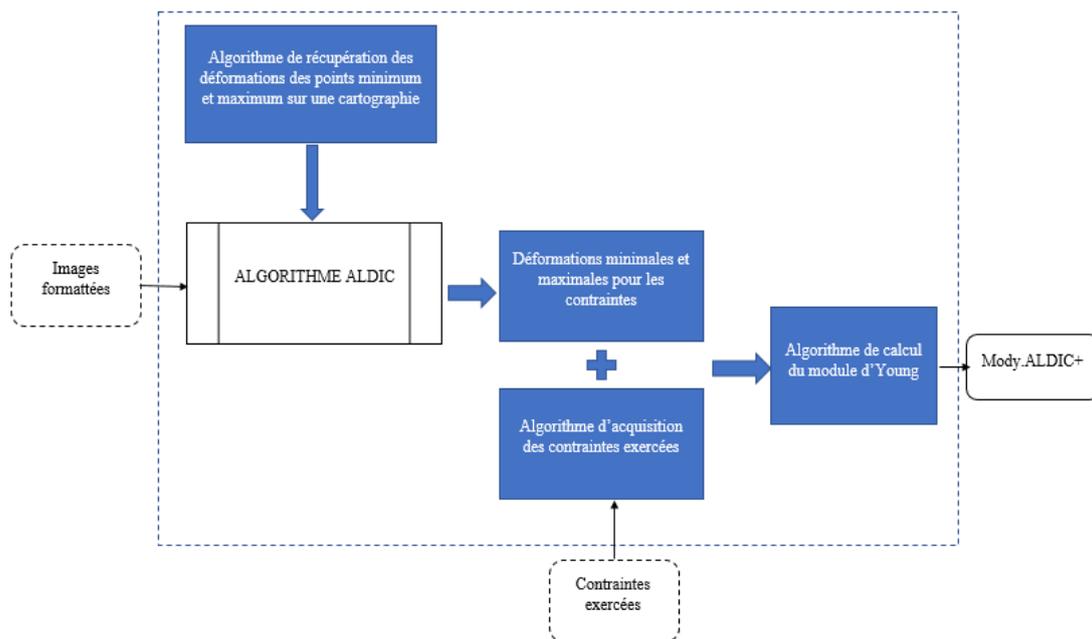


Figure 3-15 : Détermination du Mody.ALDIC+

III.2.4- Méthodologie d'exploitation de résultats

Le module d'Young étant étroitement lié aux déformations à contraintes constantes. Sur les dix (10) mesures de déformations que nous avons, nous exécuterons l'étude de régression de Ncorr+ et ALDIC+ par rapport à celles expérimentales sur sept (07) mesures. Nous utiliserons les trois mesures restantes pour tester la précision nos méthodes (équation 3.1).

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \Rightarrow \frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{|\varepsilon_{sim} - \varepsilon_{laboSEM}|}{\varepsilon_{laboSEM}} \times 100 \quad (3.1)$$

Où ε_{sim} : la déformation donnée par Ncorr+ ou ALDIC+

CONCLUSION PARTIELLE

La mise sur pieds d'un algorithme de détermination du module d'Young nécessite d'effectuer au préalable une expérience ; d'où découlera un ensemble de données à utiliser pour évaluer l'algorithme. Pour cela il est nécessaire de décrire en détails les paramètres qui entrent dans la détermination du module d'Young par corrélation d'images numériques. Nous avons présenté les différentes phases d'acquisition de ces données par le laboratoire SEM et ensuite leur traitement par les protocoles Ncorr+ et ALDIC+. Les résultats obtenus de ces différents traitements de ces données feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 4 RESULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, il sera question pour nous de présenter les résultats de la méthodologie présentée ultérieurement et faire une discussion de ceux-ci.

IV.1- RESULTATS	54
IV.1.1- Proiciel de traitement d'images	54
IV.1.2- Régression des algorithmes de calcul.....	59
IV.1.3- Evaluation de la précision des algorithmes de calculs du module d'Young	61
IV.2- DISCUSSIONS	62

IV.1- RESULTATS

IV.1.1- Progiciel de traitement d'images

a. Interface d'accueil

Lorsque le package de l'application est lancé, après le démarrage, une interface graphique (figure 4.2) s'ouvre. Celle-ci présente l'ensemble de menus que le progiciel offre à l'utilisateur pour l'obtention du module d'Young (voir le coefficient de poisson).

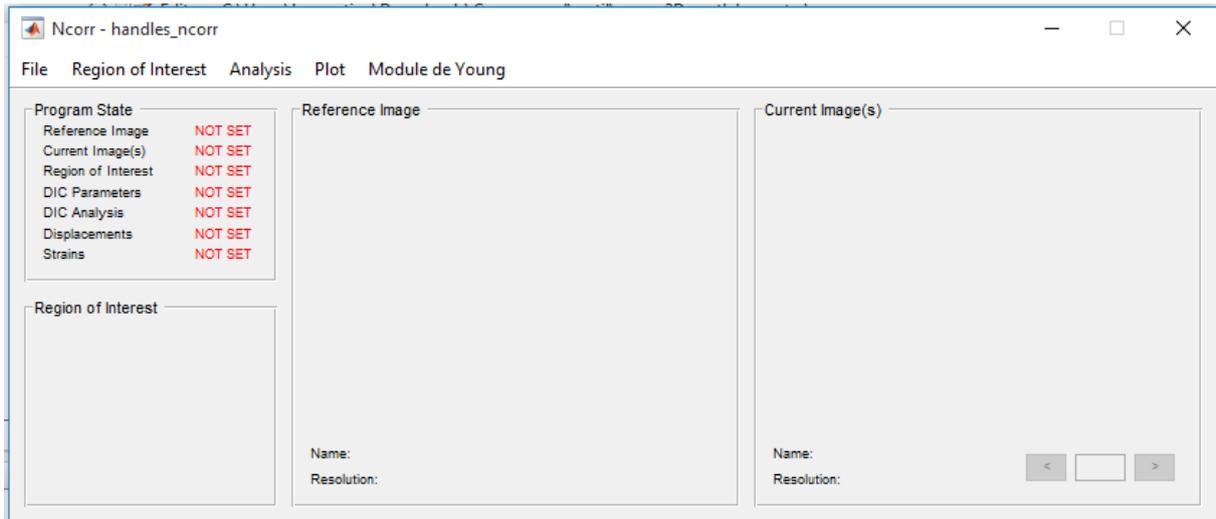
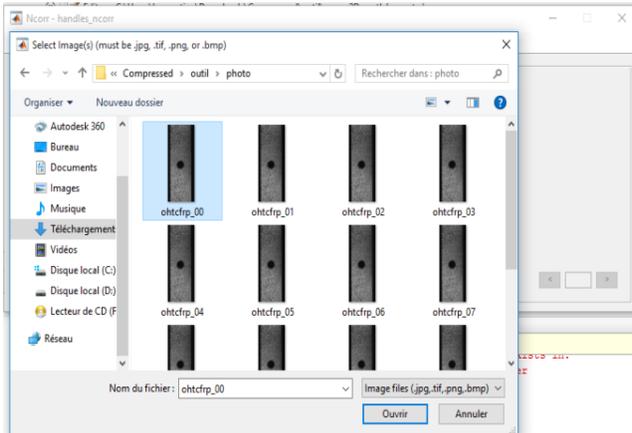
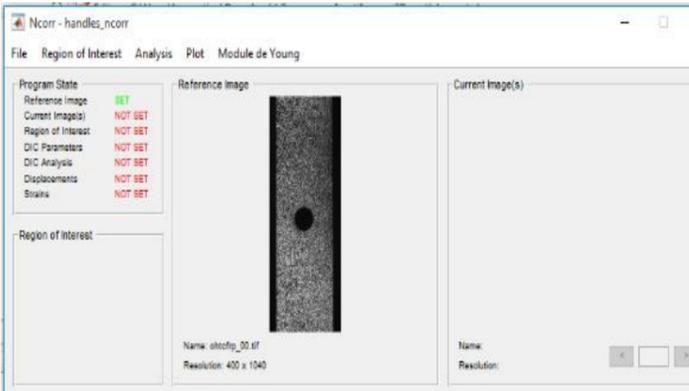
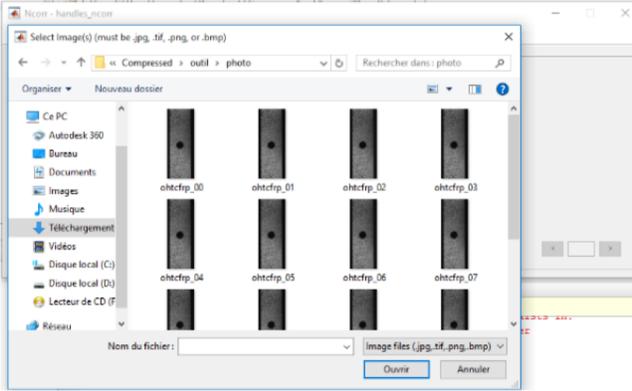
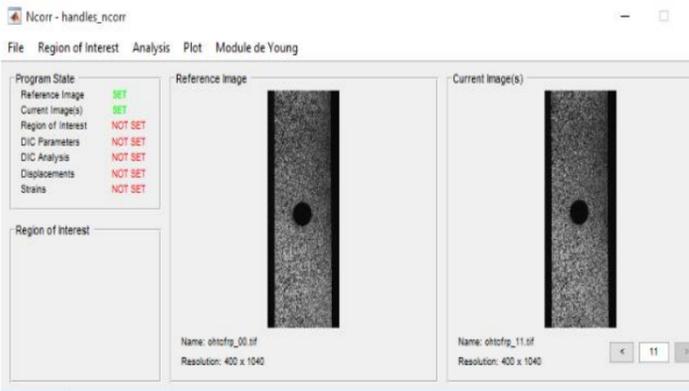
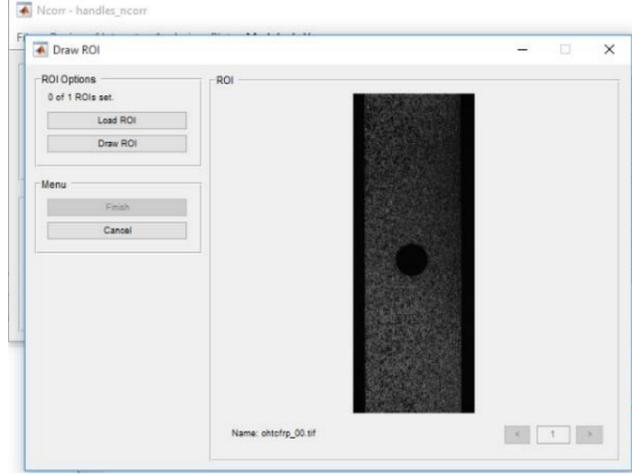


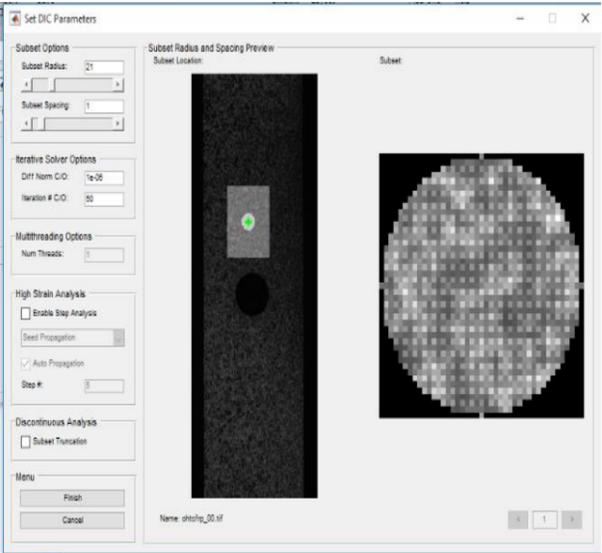
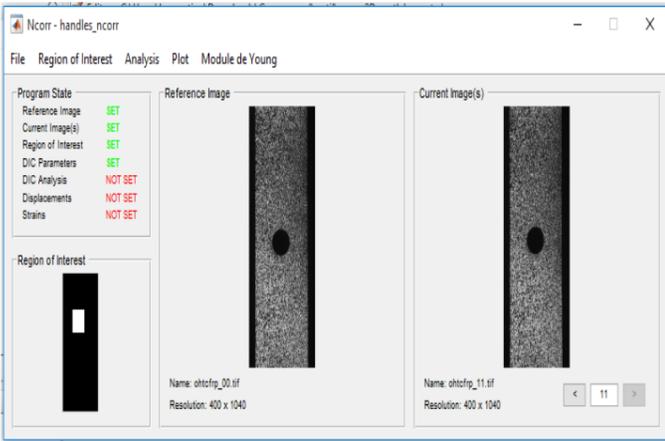
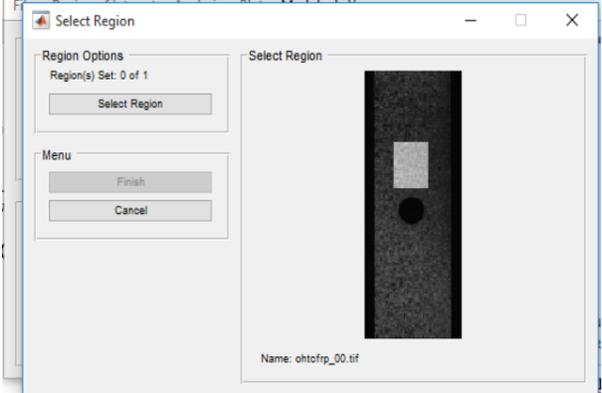
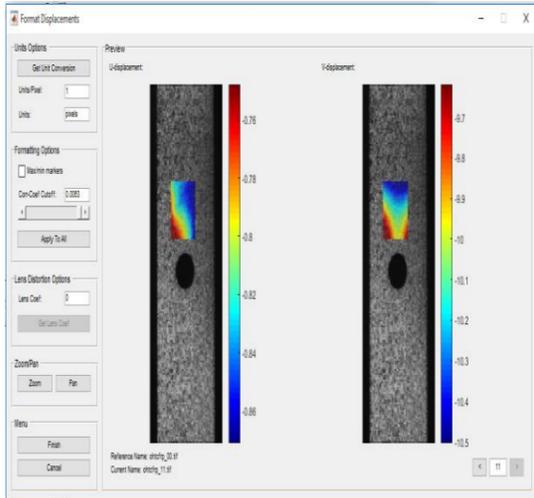
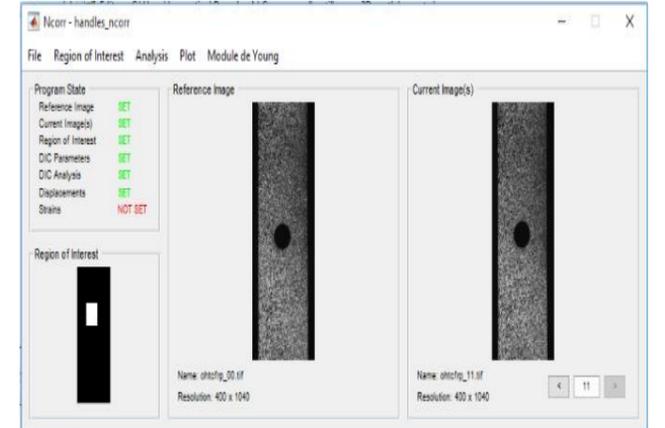
Figure 4-1 : interface graphique d'accueil

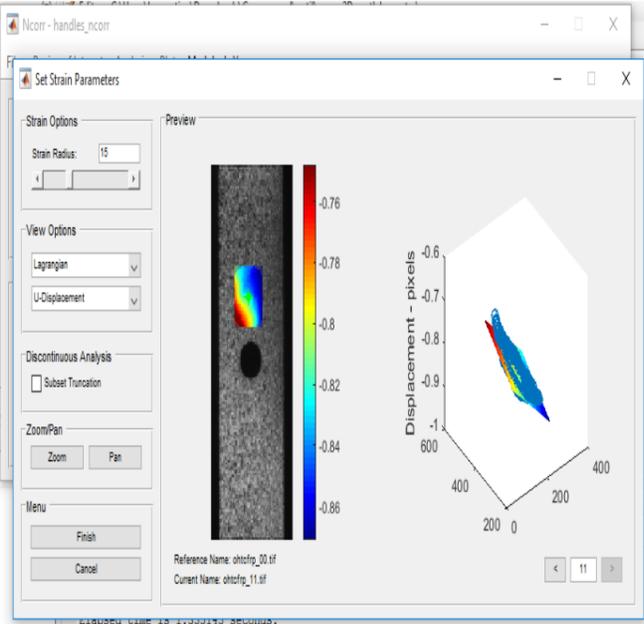
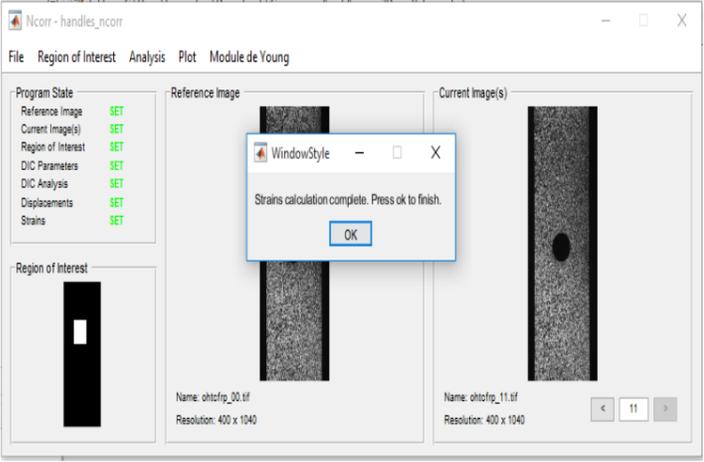
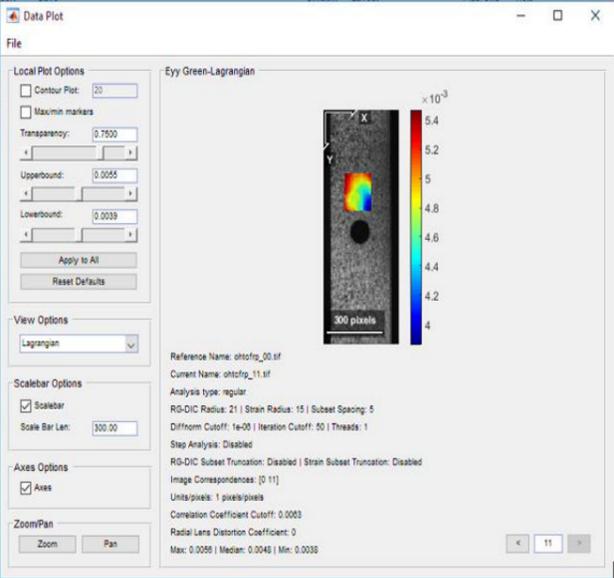
NB : le package nécessite l'installation de Matlab dans l'ordinateur utilisé.

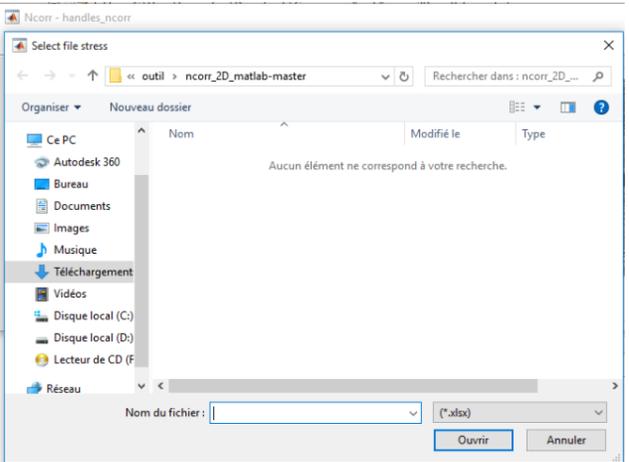
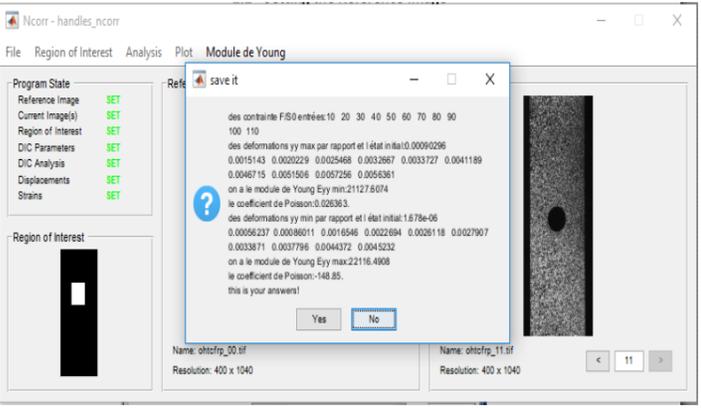
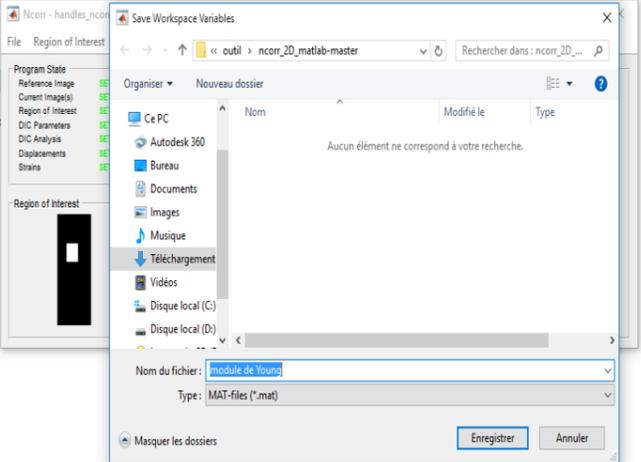
b. Déroulement du programme

Le flux de travail de notre progiciel prend en compte celui de Ncorr auquel y est ajouté le menu de calcul du module d'Young (voir coefficient de poisson). Un résumé des différentes fonctions de notre progiciel qui présente la dépendance de celles-ci, les commandes pour y avoir accès et les images des interfaces graphiques correspondent est présenté par le tableau suivant.

N°	Fonctions	Dépendances	Commandes et explications	Images	
1	Définir l'image de référence (« Set Reference Image »)		<p>File>load reference image.</p> <p>Ici, une interface graphique s'ouvre (figure ci-contre) où le progiciel demande à l'utilisateur de définir l'image de référence. L'image de référence est la première image obtenue sans déformation. Lorsque l'image de référence est chargée, « NOT SET » devient « SET » en vert (figure ci-contre).</p>		
2	Définir les images actuelles ou déformées (« Set Current Image(s) »)		<p>File > Load Current Image(s).</p> <p>Ici, l'utilisateur a le choix entre deux modes de chargement « load All » qui demande un grand espace dans la RAM (plus rapide dans l'exécution) et « load Lazy » qui demande moins d'espace de traitement. Quel que soit le mode choisi, une interface graphique s'ouvre (figures ci-contre) où il est question pour l'utilisateur de charger le ou les images déformées.</p>		
3	Définir la région d'intérêt (« Set Region of Interest (ROI) »)	Nécessite que l'image de référence ou les images actuelles soient définies en premier	<p>Region of interest > set region of interest.</p> <p>Ici, l'utilisateur a deux façons pour définir sa zone d'étude (voir figure ci-contre), soit par chargement d'une image (Load ROI), soit par dessin (Draw ROI). Dans le premier cas une interface graphique s'ouvre comme dans les cas précédents. Dans le deuxième cas, une interface d'outils de forme s'ouvre pour qu'il dessine la ROI.</p>		

<p>4</p>	<p>Définir les paramètres DIC (« Set DIC Parameters »)</p>	<p>Nécessite que l'image de référence, la ou les images actuelles et le retour sur investissement soient définis en premier</p>	<p>• Analysis > Set DIC Parameters. Une interface graphique, s'ouvre où l'utilisateur doit définir les paramètres DIC qui sont : « Subset Options » ; « Iterative Solver Options » ; « Multithreading Options » ; « High Strain Analysis » ; « Discontinuous Analysis » définis pour le cadre RG-DIC de Bing Pan.</p>		
<p>5</p>	<p>Analyse DIC (« DIC Analysis »)</p>	<p>Nécessite que les paramètres DIC soient définis en premier</p>	<p>Analysis > Perform DIC Analysis. L'analyse DIC s'effectue en deux étapes. La première étape consiste à sélectionner une région (définie comme une région contiguë) « Region Options ». La deuxième étape est de définir le placement de(s) la semence (s) pour l'initialisation de l'analyse RG-DIC.</p>		
<p>6</p>	<p>Déplacements de format (« Format Displacements »)</p>	<p>Exige que l'analyse DIC soit faite</p>	<p>Analysis > Format Displacements. Le formatage des déplacements propose : Units Options : elles permettent de convertir les déplacements des pixels en unités réelles. Formatting Options : elles permettent de filtrer les « mauvais » points de données (valeur du coefficient de corrélation au-dessus de la valeur seuil entrée). Lens Distorsion Options : elles permettent de corriger les erreurs liées à une distorsion radiale de l'objectif.</p>		

<p>7</p>	<p>Calculer les souches ou déformations (« Calculate Strains »)</p>	<p>Exige que les Déplacements de format soient calculés</p>	<p>Analysis > Calculate Strains. L'analyse des déformations propose : Strain Options : elles permettent l'utilisateur de modifier le « rayon de déformation » pour avoir de données de déformations moins bruyantes. Cette modification se fait en déplaçant le point vert vers les zones élevée et à voir l'ajustement de la courbe est toujours raisonnable (si elle demeure dans un plan). View Options : elles permettent de passer des U-déplacements aux V-déplacements d'une part, de la perspective lagrangienne à la perspective eulérienne. Discontinuous Analysis : elle empêche les sous ensemble de s'enrouler autour d'un fond de fissure pour éviter les distorsions près de ces drenière.</p>		
<p>8</p>	<p>Tracé ou cartographie des déformations sur la ROI (« Plot »)</p>		<p>Plot > View Displacement Plots ou Plot > View Strain Plots Il s'agit de la dernière étape de l'analyse. Il propose plusieurs options assez explicites.</p>		

<p>9</p>	<p>Calcul du module de Young</p>	<p>Exige que les Déformations soient calculées</p>	<p>Module de Young > Calcul du module de Young Cette nouvelle option demande à l'utilisateur un fichier Excel contenant les contraintes exercées sur chaque image déformée (F/S0) sur la première ligne. A la fin de l'exécution il renvoie à l'utilisateur le module d'Young et le coefficient de Poisson.</p>		
<p>10</p>	<p>Enregistrer les valeurs du module et du coefficient Poisson calculés</p>	<p>Exige que le Calcul du module de Young</p>	<p>Ici l'utilisateur doit indiquer l'emplacement et le nom pour l'enregistrement de ces variables pour une utilisation ultérieure</p>		

IV.1.2- Régression des algorithmes de calcul

a. L'algorithme de calcul Ncorr+

Les sept (07) données (contraintes et déformations) utilisées pour la corrélation des résultats obtenus par l'algorithme de calcul Ncorr+ par rapport aux résultats expérimentaux sont présentées dans le tableau 4.1.

Tableau 4-1: contrainte, déformation du laboratoire et déformation de Ncorr+ rangées par test

Expériences N°	Contraintes (Mpa)	Déformations obtenues du laboratoire SEM (%)	Déformations obtenues de Ncorr+ (%)
1	100	0,05	0,096618
2	200	0,1	0,286901
4	400	0,2	0,58464
5	500	0,3	0,737365
6	600	0,45	1,049315
8	800	1	2,773465
10	1000	4,3	3,498035

L'étude de régression des déformations du laboratoire par rapport à celles de Ncorr+ suivant les différentes courbes de tendances (puissance, linéaire, polynomiale, exponentielle et logarithme) a été faite. On constate que la meilleure régression est obtenue de la courbe de tendance **puissance** avec $R^2 = 0,9202$.

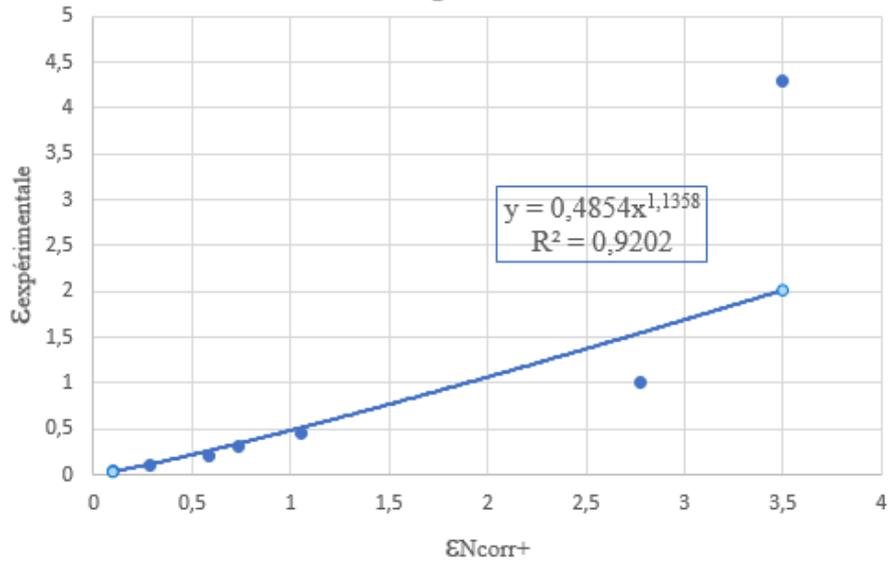


Figure 4-2: courbes de régression des déformations expérimentale et ALDIC+ de R² maximal

Ainsi notre fonction d'obtention des déformations du laboratoire SEM ($\epsilon_{\text{expérimentale}}$) par rapport à celles de l'algorithme de calcul Ncorr+ ($\epsilon_{\text{Ncorr+}}$) est donnée par l'équation 4.1.

$$\epsilon_{\text{expérimentale}} = 0,4854(\epsilon_{\text{Ncorr+}})^{1,1358} \quad (4.1)$$

b. Algorithme de calcul ALLDIC+

Les sept (07) données (contraintes et déformations) utilisées pour évaluer la corrélation des résultats obtenus par l'algorithme de calcul ALDIC+ par rapport aux résultats expérimentaux sont présentées dans le tableau 4.3.

Tableau 4-2: contrainte, déformation du laboratoire et déformation de ALDIC+ rangées par test

Expérience N°	Contraintes (Mpa)	Déformations obtenues du laboratoire SEM (%)	Déformations obtenues de ALDIC+ (%)
1	100	0,05	0,198199
2	200	0,1	0,358426
4	400	0,2	0,559491
5	500	0,3	0,816718
6	600	0,45	0,964806
8	800	1	1,312796
10	1000	4,3	1,724343

L'étude de régression des déformations du laboratoire par rapport à celles de ALDIC+ suivant les différentes courbes de tendances (puissance, linéaire, polynomiale, exponentielle et logarithme) a été faite. On constate que la meilleure régression est obtenue de la courbe de tendance **exponentielle** avec $R^2 = 0,988$ (figure 4-2).

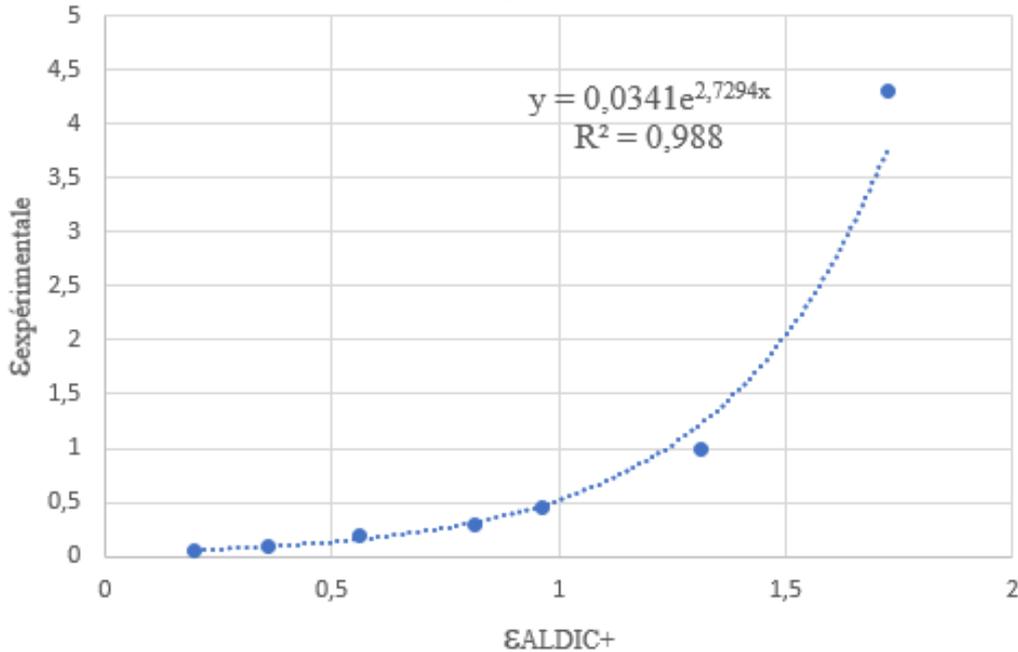


Figure 4-3: courbe de régression des déformations expérimentale et ALDIC+ de R^2 maximal

Ainsi notre fonction d'obtention des déformations du laboratoire SEM ($\epsilon_{\text{expérimentale}}$) par rapport à celles de l'algorithme de calcul ALDIC+ ($\epsilon_{\text{ALDIC+}}$) est donnée par l'équation 4.2.

$$\epsilon_{\text{expérimentale}} = 0.0341e^{2,7294\epsilon_{\text{ALDIC+}}} \quad (4.2)$$

IV.1.3- Evaluation de la précision des algorithmes de calculs du module d'Young

a. Précision de Ncorr+

Les trois (03) valeurs rognées sur le tableau 4.3, nous permettent d'avoir les déformations expérimentales prédites à partir de celles calculées de l'algorithme Ncorr+ par l'équation 4.1 et les erreurs (Tableau 4.5). De là, nous obtenons que la précision de l'algorithme de Ncorr+ est de **80,4%**.

Tableau 4-3: déformations régressées et erreurs relatives

Exp. N°	Déformations obtenues de Ncorr+ (%)	Déformations obtenues du laboratoire SEM (%)	Déformations expérimentales obtenues par régression	Erreur relative (%)	Erreur relative moyenne (%)
3	0,48934	0,15	0,21556	43,71	19,60
7	1,270095	0,7	0,63685	9,02	
9	3,502405	1,9	2,01555	6,08	

b. Précision de ALDIC+

Les trois (03) valeurs rognées sur le tableau 4.1, nous permettent d’avoir les déformations expérimentales prédites à partir de celles calculées de l’algorithme ALDIC+ par l’équation 4.2 et les erreurs (Tableau 4.6). De là, nous obtenons que la précision de l’algorithme de ALDIC+ est de **82,14%**.

Tableau 4-4: déformations régressées et erreurs relatives

Exp. N°	Déformations obtenues de ALDIC+ (%)	Déformations obtenues du laboratoire SEM (%)	Déformations expérimentales obtenues par régression	Erreur relative (%)	Erreur relative moyenne (%)
3	0,491389	0,15	0,13038	13,08	17,86
7	1,157085	0,7	0,80227	14,61	
9	1,363171	1,9	1,40801	25,89	

IV.2- DISCUSSIONS

Des résultats ci-dessus, il en ressort que :

- L’algorithme de calcul ALDIC+ donne de meilleurs résultats que Ncorr+ pour la détermination du module d’Young au vu des précisions. Ce résultat pourrait être dû au fait que l’algorithme ALDIC+ combine la méthode locale et la méthode globale de DIC pour la détermination des déformations or l’algorithme de Ncorr+ ne se base que sur la méthode locale ;

- . L'algorithme de calcul de ALDIC+ donne une erreur relative de 17,86% soit une précision de 82,14%. Cette erreur pourrait-être due aux bruits issus des paramètres d'acquisition tels que la distance focale, la distorsion de l'image, au prétraitement voir à la dégradation des images lors du téléchargement.
- Les travaux de Amelie CUYNET et Franck TOUSSAINT [23] utilisent de même la corrélation d'image et obtienne une précision de 91,08% qui est meilleure que celle obtenue dans ces travaux. Ceci pourrait être dû à la véracité des données utilisées dans travaux. La précision obtenue par notre méthode ne saurait par conséquent être un élément d'évaluation fiable. Il faudrait pour cela effectuer réellement, des expérimentations afin d'acquérir des données réelles du terrain.

CONCLUSION PARTIELLE

Parvenu au terme de ce chapitre, nous avons eu à présenter les résultats des algorithmes de calcul Ncorr+ et ALDIC+. Il s'avère que ALDIC+ est plus approprié pour l'obtention du module d'Young. Toutefois, la fiabilité des données obtenues du laboratoire SEM n'étant pas garantie, nous nous sommes limités à présenter les méthodes de traitement de données.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Ce mémoire a été élaboré face aux difficultés rencontrées par nos laborantins dans le cadre des essais mécaniques. Plus précisément dans l'essai de traction avec la perte des extensomètres ou leur défaillance. Ce qui nous a conduit à mettre sur pieds un outil qui facilitera l'essai de traction : l'étude et la réalisation d'une plateforme de caractérisation mécanique de matériaux et fibres par imagerie numérique. Pour le mener à bien, le travail a été organisé en quatre chapitres : d'abord dans le premier il a été question d'introduire les notions nécessaires à la compréhension de la problématique traitée. Dans ce chapitre, nous avons présenté les généralités des matériaux et fibres, ensuite nous avons évalué les propriétés mécaniques des matériaux et fibres et nous avons terminé par des techniques de mesure de déplacements (extensomètre). Dans le deuxième chapitre est présentée les techniques de mesure conventionnelles et les techniques de corrélation d'images numériques (DIC) auquel nous avons effectué par la suite une synthèse générale qui nous a permis d'introduire le chapitre trois. Le troisième chapitre consacré aux matériels et méthodes, renvoi à la conception et la présentation de l'ensemble du matériel nécessaire à la réalisation de notre plateforme ainsi que les méthodes utilisées pour sa mise en œuvre effective ; l'établissement de deux algorithmes de calcul du module d'Young, la présentation du protocole d'acquisition et traitements de données images, déformation et contraintes par le laboratoire SEM, l'évaluation des deux algorithmes à partir de ces données. Enfin dans le quatrième chapitre, il a été question de présenter les résultats obtenus du traitement par Ncorr+ et ALDIC+ des données du laboratoire SEM, puis nous avons effectué une étude comparative par rapport à l'existant et enfin nous avons effectué des discussions face à ces résultats obtenus.

La discussion a été faite sur la base des résultats présentés dans l'Etat de l'art, il en ressort que les algorithmes de ALDIC+ et de Ncorr+ permettent de déterminer le module d'Young avec des erreurs respectives de 17,86% et 19,6%.

Ce mémoire a été fait dans l'optique de renforcer la recherche scientifique et de résoudre une situation réelle que l'on rencontre dans nos différents laboratoires concernant la mesure du module d'Young. Toutefois les erreurs suscitées entraînent quelques questions de fonds :

- Comment pourrions-nous lier le dispositif d'acquisition et la plateforme de traitement d'images en une unité ?
- Serait-il possible d'avoir des paramètres de réglages dans l'algorithme pour corriger les perturbations subvenues lors de l'acquisition ?

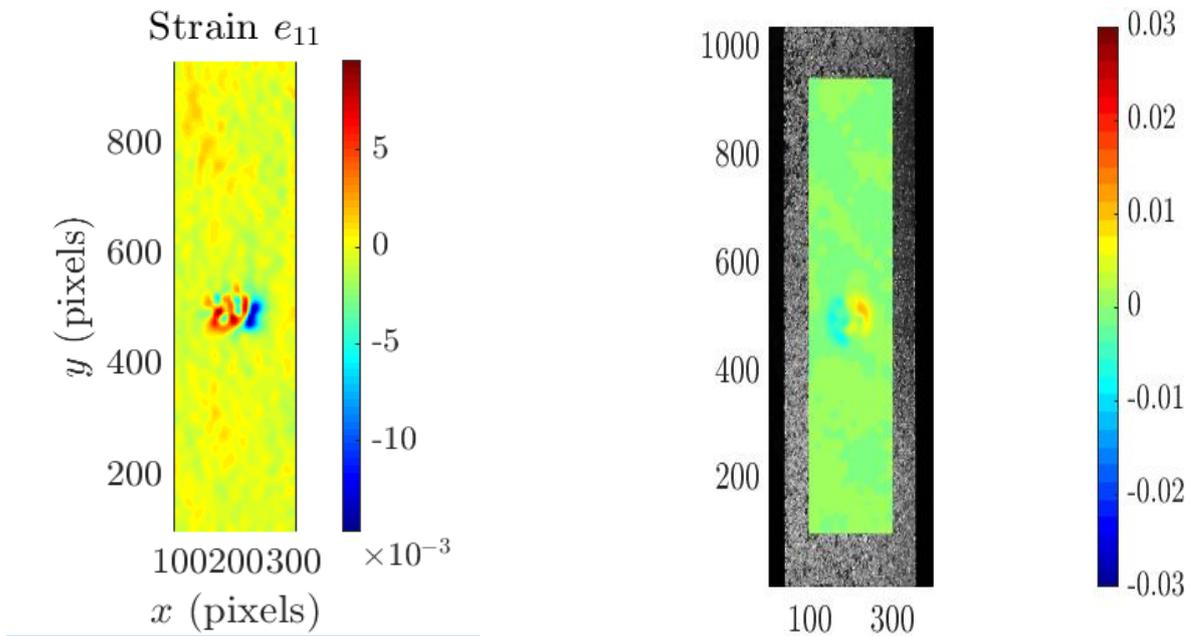
BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. Abdelmoumen, Cours de Caractérisation des Matériaux- Licence appliquée en Génie Mécanique, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Gafsa, 2013-2014.
- [2] Stéphane ROUX, Cours sur les matériaux, Ecole nationale Supérieure De Céramique Industrielle, Université de Limoges.
- [3] André Chevalier, guide du dessinateur industrielle, Hachette technique édition 2004.
- [4] Mokadden Allet & Routaous Ahmed, Structures et propriétés des biomatériaux, USTO-MB 2014/2015.
- [5] https://www.google.com/evolution_ressource_tissage_universite_lyon.pdf ,24 octobre 2019, 18h.
- [6] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/fibre_synthétique 24 octobre 2019, 19h.
- [7] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/fibre_textile, 30 octobre 2019, 18h.
- [8] L. Weber, J.-M. Drezet, Travaux pratiques – Matériaux TPI (MX2) et Métaux et alliages (GM2), Polycopié EPFL, édition 2010.
- [9] Placet, V, contribution à la caractérisation de matériaux composites : des fibres élémentaires de chanvre aux moins aux modes de défaillance des structures, HDR (Besançon) 2013.
- [10] Placet, V, Characterization of the thermos-mechanical behaviour of Hemp fibres intended for the manufacturing of high-performance composites. Composites Part A : applied Science and Manufacturing 40, 1111-1118, 2009.
- [11] B. JACQUOT, Propriétés mécaniques des Biomateriaux utilisés en Odontologie, Société Francophone de Biomateriaux Dentaires, 2010.
- [12] [https:// www.campus.mines-douai.fr/flexion4points](https://www.campus.mines-douai.fr/flexion4points) 30 octobre 2019, 20h.
- [13] Jean-Louis Fanchon, Guide des sciences et technologies industrielles, 3ème édition, Nathan Afnor.
- [14] Bourmaud, A. et al., approche du comportement viscoélastique d'une fibre de lin par analyse du recouvrement d'empreintes de nano indentation comptes Rendus Des 17^{ème} journées nationales sur les composites (JNC17), 2011.
- [15] B. Tanguy, Quelle(s) modélisation(s) de l'essai Charpy pour une meilleure prédiction de la courbe de résilience. Séminaire, LMT, octobre2005.
- [16] Marc Blétry, Cours sur les méthodes de caractérisation mécanique des matériaux, Université de Bordeaux II, 2006-2007.
- [17] Belilita Kamel, caractérisation optique des biomatériaux soumis à la fatigue, l'obtention du Diplôme de Magister, 2012, Université Ferhat Abbas - Sétif.
- [18] Wiecek, T., a new method for the measurement of static and dynamic young's moduli of long fibres. Composites Part A : Applied Science and Manufacturing 60, 1-7, 2014.
- [19] C. Dénéreaz, Matériaux II – travaux pratiques : Essai de traction sur barres d'armature. Laboratoire de Métallurgie Mécanique, Ecole Polytechnique Fédérale de LAUSANNE, 02/2015.

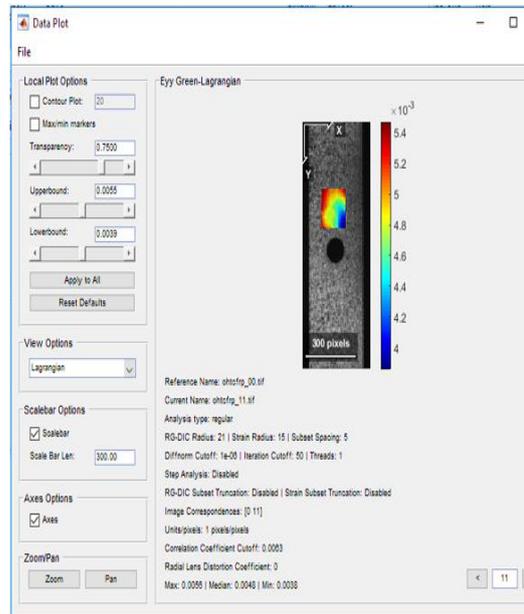
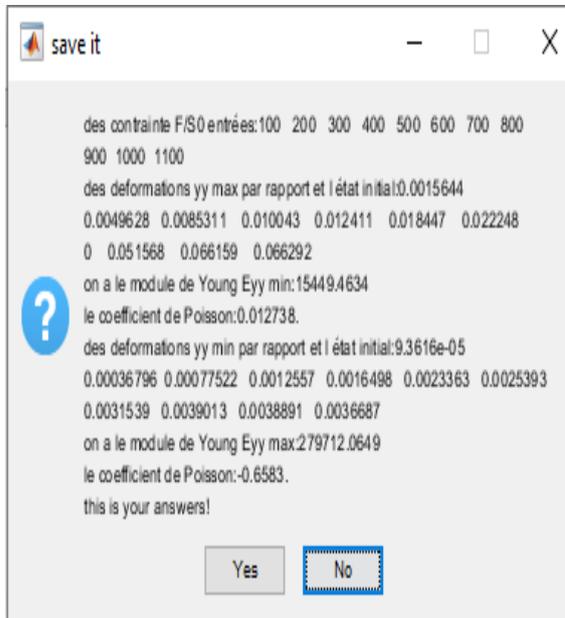
- [20] Tahar DHAOUADI, Caractérisation et modélisation des propriétés mécaniques des biocomposites à fibres courtes aléatoires, Mémoire de maîtrise, École De Technologie Supérieure, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, octobre 2018.
- [21] Francis CORRIVEAU, modélisation numérique de la formabilité des Alliages d'aluminium AA5052 et AA5083, Mémoire de maîtrise, Faculté de génie, Département de génie mécanique, UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE Faculté de génie Département de génie mécanique, Décembre 2018.
- [22] Éric ROHMER, caractérisation et modélisation mécanique de tubes composites sic f /sic, thèse de doctorat, UNIVERSITÉ BORDEAUX 1, 2013.
- [23] Amélie Cuynet et al., Apport des mesures de champ dans l'étude de composites renforcés en fibres de lin au cours d'essais de traction quasi-statiques, Laboratoire Systèmes et Matériaux pour la Mécatronique (SYMME) Université Savoie Mont Blanc, France et Laboratoire d'Ingénierie et Science des Matériaux (LISM) Université de Reims Champagne-Ardenne, France, mars 2016.
- [24] Christophe DUPIN, Etude du comportement mécanique des matériaux composites à matrice céramique de faible épaisseur, UNIVERSITÉ BORDEAUX 1, novembre 2013.
- [25] Quoc TCHANG VO, Imagerie d'essais mécaniques sur des composites à matrice métallique, thèse pour obtenir le grade de Docteur, Université de MONPELLIER, décembre 2013.
- [26] Zakariya BOUFAIDA, Analyse des propriétés mécaniques de composites taffetas verre/matrice acrylique en relation avec les propriétés d'adhésion des fibres sur la matrice, thèse de doctorat, UNIVERSITE DE LORRAINE, juillet 2015.
- [27] Lianxiang YANG and al., Measure Strain Distribution Using Digital Image Correlation (DIC) for Tensile Tests, The Advanced High Strength Steel Stamping Team of the Auto/Steel Patnership (A/SP), January 30, 2010.
- [28]: J. Blaber and al., Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software, Society for Experimental Mechanics, 9 March 2015.
- [29]: Jin Yang and al., Augmented Lagrangian DIC (AL-DIC) Code Manual, Division of Engineering and Applied Science, California Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, 2019-05-13.

ANNEXES

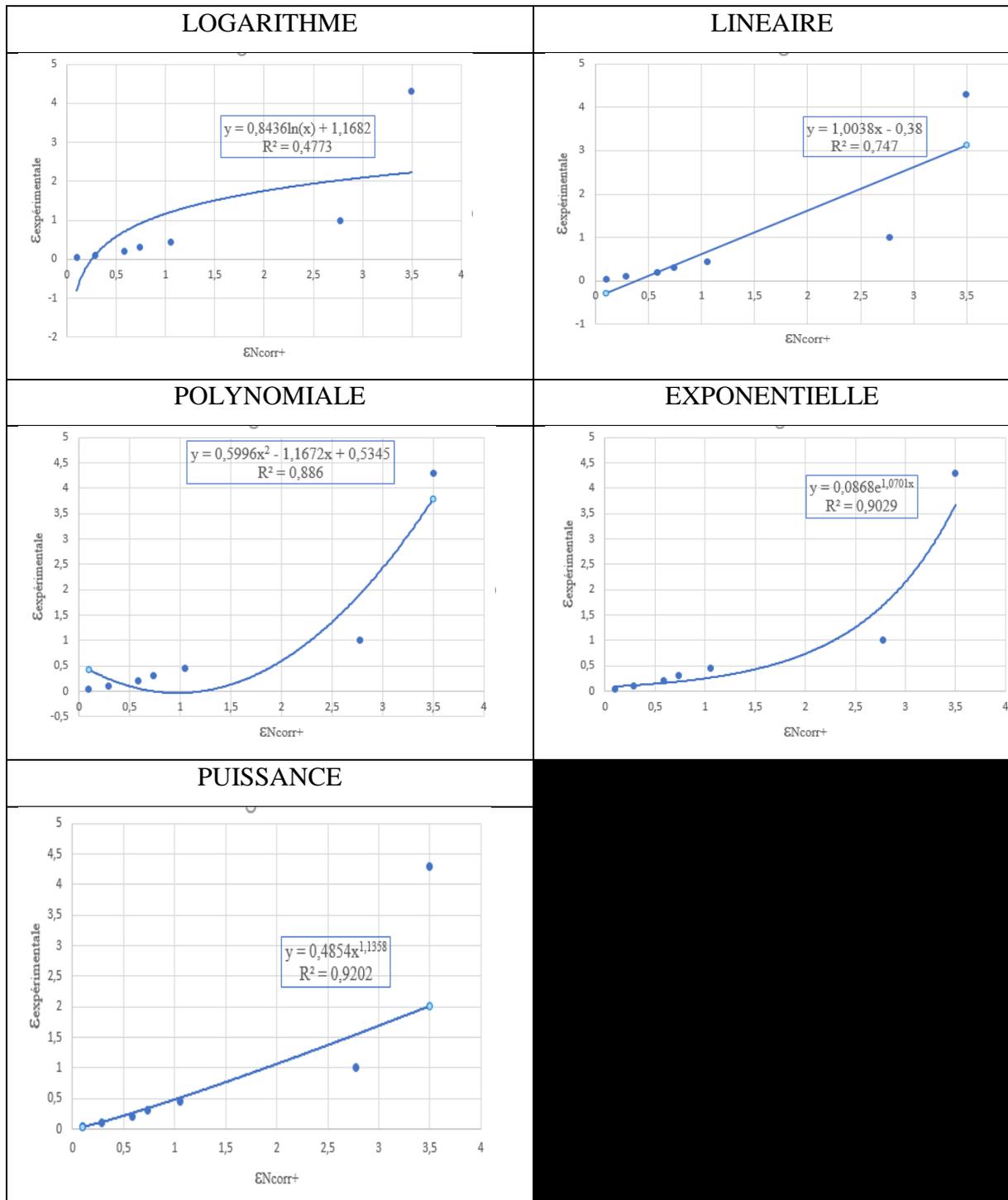
ANNEXE 1 : IMAGES DE TRAITEMENT SUR Ncorr+



ANNEXE 2 : IMAGES DE TRAITEMENT ALDIC+



ANNEXE 3 : COURBES DE REGRESSION DES DEFORMATIONS EXPERIMENTALES ET DE NCORR+



ANNEXE 4 : COURBES DE REGRESSION DES DEFORMATIONS EXPERIMENTALES ET DE ALDIC+

