



**HAL**  
open science

# Etude de la découpe de matériau en feuille souple par lame vibrante

Quentin Cosson-Coche

► **To cite this version:**

Quentin Cosson-Coche. Etude de la découpe de matériau en feuille souple par lame vibrante. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux, 2017. Français. NNT : 2017BORD0020 . tel-01527332

**HAL Id: tel-01527332**

**<https://theses.hal.science/tel-01527332>**

Submitted on 24 May 2017

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

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

THÈSE PRÉSENTÉE  
POUR OBTENIR LE GRADE DE  
**DOCTEUR DE**  
**L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR  
SPÉCIALITÉ MÉCANIQUE ET INGÉNIERIE

Par Quentin COSSON-COCHE

**ETUDE DE LA DECOUPE DE MATERIAU EN FEUILLE  
SOUPLE PAR LAME VIBRANTE**

Sous la direction de : Olivier CAHUC,  
co-directeur : Denis TEISSANDIER.

Soutenue le 06 Mars 2017

Membres du jury :

M. DESSEIN, Gilles	Professeur ENI Tarbes	Président
M. FURET, Benoît	Professeur IUT de Nantes	Rapporteur
M. VILLENEUVE, François	Professeur Université Joseph Fourier	Rapporteur
M. CAHUC, Olivier	Professeur Université de Bordeaux	Examineur
M. TEISSANDIER, Denis	Professeur Université de Bordeaux	Examineur
M. DARNIS, Philippe	Professeur Université de Bordeaux	Examineur
M. LAHEURTE, Raynald	Maître de Conférences Université de Bordeaux	Examineur
M. CHABIRAND, Didier	Responsable R&D Hardware Lectra	Examineur



---

# REMERCIEMENTS

---

*Les travaux de recherches présentés dans ce mémoire ont été le fruit de la collaboration de trois entités : L'institut d'Ingénierie et de Mécanique de Bordeaux (I2M), l'Institut Carnot ARTS via la société AMValor ainsi que la société Lectra à Cestas. Je remercie grandement les directeurs de ces organismes, respectivement : M. Eric Arquis, Jean-Luc Barou et Daniel Harari pour m'avoir permis de réaliser cette étude et pour m'avoir accueilli dans leurs différents établissements.*

*Je tiens à remercier M. Gilles Dessein, Professeur à l'ENI de Tarbes pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury de thèse.*

*Je remercie également Monsieur Benoit Furet, Professeur à l'IUT de Nantes, ainsi que Monsieur François Villeneuve, Professeur à l'Université Joseph Fourier pour avoir accepté d'examiner cette thèse et pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux.*

*Je remercie vivement toutes les personnes qui m'ont encadré tout au long de ces travaux, autant les scientifiques que les hommes formidables qu'ils sont :*

*Messieurs Olivier Cahuc et Denis Teissandier, Professeurs à l'Université de Bordeaux, co-directeurs de thèse.*

*Messieurs Philippe Darnis et Raynald Laheurte, Professeur et Maître de Conférence à l'Université de Bordeaux, encadrants.*

*Je tiens à les remercier tout particulièrement pour la confiance qu'ils ont eue en moi, pour leurs conseils, leur expertise scientifique, leur disponibilité et pour le plaisir que j'ai eu à travailler avec eux.*

*Je remercie vivement Monsieur Didier Chabirand, Responsable étude et recherches avancées à Lectra avec qui j'ai grandement apprécié travailler, merci pour m'avoir confié cette épreuve, pour avoir cru en moi tout au long de sa réalisation, pour son aide et sa grande expertise technique.*

*Un très grand merci à l'ensemble du personnel de Lectra, qui m'ont accueilli à bras ouverts et m'ont offert un cadre de travail exceptionnel, merci à eux, au bureau d'étude, à l'atelier et tout autre services qui m'ont aidé de près ou de loin dans le bon déroulement de ma thèse.*

*Merci également aux doctorants, secrétaires, personnels techniciens, enseignants, enseignants chercheurs, chercheurs... Du laboratoire I2M, du département GMP qui m'ont soutenu et aidé tout au long de cette étude.*

*Toujours en fin de liste mais non moins important, je remercie grandement toute ma famille.*

*J'apporte enfin ma reconnaissance à Laurie pour m'avoir soutenu pendant toute la durée de ces travaux, ainsi que pour la préparation de la soutenance.*



---

# TABLE DES MATIERES

---

INTRODUCTION GENERALE .....	11
I ETAT DE L'ART SUR LA COUPE DES MATERIAUX TEXTILES .....	13
I.1. La découpe textile .....	15
I.1.1. Le textile.....	16
I.1.1.1. Armure .....	16
I.1.1.2. Caractérisation mécanique des tissus .....	18
I.1.1.2.1. Propriétés mécaniques du fil.....	18
I.1.1.2.2. Propriétés de l'amure .....	18
I.1.1.3. Fabrication du <i>denim</i> .....	18
I.1.1.3.1. Teinture .....	19
I.1.1.3.2. Tissage .....	19
I.1.1.3.3. Calandrage .....	20
I.1.1.3.4. Traitements.....	20
I.1.1.4. Propriétés du <i>denim</i> .....	20
I.2. La machine de découpe textile .....	22
I.2.1. Structure cinématique générale.....	22
I.2.2. Architecture d'une tête de coupe Lectra.....	23
I.2.3. Maintien de la pièce pendant la coupe .....	25
I.2.4. L'outil coupant.....	26
I.3. Processus de coupe .....	26
I.3.1. Création des placements .....	27
I.3.2. Le matelassage .....	27
I.3.3. Le convoyage.....	28
I.3.4. La découpe .....	28
I.4. Problématique et pilotage des découpeurs textiles.....	28

Table des Matières

I.4.1.	Usure de lame.....	28
I.4.2.	Flexion .....	31
I.4.2.1.	Flexion frontale.....	31
I.4.2.2.	Flexion latérale.....	32
I.4.3.	Température.....	33
I.5.	Paramètres influant sur la qualité de coupe .....	34
I.6.	Compréhension du processus de coupe .....	35
I.6.1.	Modélisation de la coupe en usinage.....	36
I.6.1.1.	Echelles spatiales de l'étude.....	36
I.6.1.2.	Méthodes de modélisation des efforts.....	36
I.6.1.2.1.	Approche analytique .....	36
I.6.1.2.2.	Approche numérique .....	37
I.6.1.2.3.	Approche expérimentale .....	37
I.6.2.	Application à la coupe textile .....	37
I.7.	Structuration du manuscrit de thèse.....	38
II	INSTRUMENTATION D'UNE TETE DE COUPE.....	41
II.1.	Mesure d'actions mécaniques .....	43
II.1.1.	Mesure indirecte par lecture des courants moteurs.....	43
II.1.2.	Mesure directe .....	43
II.1.2.1.	Dynamomètre à base de jauges de déformation .....	43
II.1.2.1.1.	Structures hexapode .....	44
II.1.2.1.2.	Structures avec corps d'épreuve intégré.....	45
II.1.2.2.	Dynamomètre à base de capteur piézoélectrique.....	45
II.1.2.2.1.	Principales structures de dynamomètre piézoélectriques.....	45
II.1.3.	Conclusion.....	47
II.1.4.	Choix des corps d'épreuve retenus.....	48
II.1.4.1.	Dynamomètre.....	48
II.1.4.2.	Autres mesures d'efforts .....	49
II.2.	Mesure de la température .....	49
II.3.	Instrumentation d'une tête de coupe .....	50
II.3.1.	Paramètres déjà connus et ne nécessitant pas d'instrumentation supplémentaire.....	50
II.3.2.	Points de mesure dans le guide lame.....	50
II.3.3.	Conception d'un dynamomètre à cinq composantes.....	52
II.3.3.1.	Contraintes d'intégration dans le pied presseur .....	52
II.3.3.2.	Intégration globale du dynamomètre .....	52
II.3.3.3.	Etude vibratoire .....	54
II.3.3.4.	Conclusion.....	54
II.3.4.	Mesure de la température de la lame.....	55
II.3.5.	Mesures d'efforts dans le guide lame .....	55
II.3.6.	Conclusion.....	55

II.4.	Etalonnage du dynamomètre à six composantes .....	55
II.4.1.	Matrice d'étalonnage théorique.....	55
II.4.2.	Matrice d'étalonnage réelle.....	57
II.4.2.1.	Procédure expérimentale .....	57
II.4.2.2.	Résultats.....	59
II.4.3.	Incertitudes de mesure.....	59
II.5.	Etalonnage des autres axes de mesure.....	60
II.5.1.	Efforts uni-axiaux.....	60
II.5.2.	Température.....	61
II.6.	Conclusion .....	61
II.7.	Transmission de l'information.....	61
II.8.	Cohérence des résultats.....	62
II.8.1.	Synchronisation .....	62
II.8.2.	Restrictions.....	63
II.8.3.	Traitement des mesures.....	64
II.8.3.1.	Dérive des capteurs piézoélectriques.....	64
II.8.3.2.	Filtrage .....	65
II.8.3.3.	Moyenne .....	66
II.8.4.	Conclusion.....	68
III	PROCEDURE EXPERIMENTALE ET RESULTATS .....	71
III.1.	Validation du dispositif expérimental.....	73
III.1.1.	Effort frontal $F_x$ .....	73
III.1.2.	Effort latéral $F_y$ .....	77
III.1.3.	Effort vertical - Axe Z.....	79
III.1.4.	Moment de coupe $M_y$ .....	80
III.1.5.	Moment de coupe $M_x$ .....	82
III.1.6.	Moment de coupe $M_z$ .....	82
III.1.7.	Mesures dans le guide lame.....	83
III.1.7.1.	Efforts suivant l'axe Y .....	83
III.1.7.2.	Efforts suivant l'axe X .....	85
III.1.8.	Mesure de température .....	85
III.1.9.	Signaux pertinents .....	86
III.1.10.	Conclusion.....	86
III.2.	Plans d'expériences.....	86
III.2.1.	Facteurs .....	86
III.2.2.	Niveaux de chaque facteur .....	87
III.3.	Analyse individuelle des résultats.....	87
III.3.1.	(Données confidentielles supprimées).....	88
III.3.1.1.	Influence sur l'effort frontal .....	88
III.3.1.2.	Influence sur l'effort vertical .....	88

III.3.1.3.	Influence sur la température de la lame.....	89
III.3.2.	(Données confidentielles supprimées).....	89
III.3.2.1.	Influence sur l'effort frontal .....	90
III.3.2.2.	Influence sur l'effort vertical .....	90
III.3.2.3.	Influence sur la température de la lame.....	90
III.3.3.	(Données confidentielles supprimées).....	90
III.3.3.1.	Influence sur l'effort frontal .....	91
III.3.3.1.1.	Influence sur l'effort vertical .....	91
III.3.3.1.2.	Influence sur la température de la lame .....	92
III.3.4.	(Données confidentielles supprimées).....	92
III.3.4.1.	Influence sur l'effort frontal .....	92
III.3.4.2.	Influence sur l'effort vertical .....	94
III.3.4.3.	Influence sur la température de la lame.....	95
III.3.5.	Le type d'affûtage utilisé .....	95
III.3.5.1.	Influence sur l'effort frontal .....	95
III.3.5.2.	Influence sur l'effort vertical .....	96
III.3.5.3.	Influence sur la température de la lame.....	97
III.3.6.	L'épaisseur du matériau découpé.....	97
III.3.6.1.	Influence sur l'effort frontal .....	97
III.3.6.2.	Influence sur l'effort vertical .....	97
III.3.6.3.	Influence sur la température de la lame.....	98
III.3.7.	La dépression appliquée .....	99
III.3.8.	L'utilisation du refroidissement.....	99
III.3.9.	L'utilisation du lubrifiant.....	99
III.3.10.	L'orientation du matériau pendant la coupe .....	100
III.4.	Conclusion .....	100
IV	MODELISATION DE L'ACTE DE COUPE.....	103
IV.1.	Modélisation de l'effort .....	105
IV.1.1.	Modèle existant.....	105
IV.1.2.	Validation du plan d'expériences .....	106
IV.1.2.1.	Vérification de la linéarité.....	106
IV.1.2.2.	Analyse de la variance .....	107
IV.1.2.3.	Résultat du plan.....	108
IV.1.3.	Mise en équation de l'effort frontal.....	108
IV.1.3.1.	(Données confidentielles supprimées).....	108
IV.1.3.2.	(Données confidentielles supprimées).....	109
IV.1.4.	Mise en équation de l'effort vertical.....	109
IV.1.5.	Confrontation avec les essais.....	109
IV.2.	Modélisation de la température .....	111
IV.3.	Modélisation de la déformée .....	111

V	CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES.....	113
VI	BIBLIOGRAPHIE.....	119



---

# INTRODUCTION GENERALE

---

L'industrie textile fédère de nombreux métiers tout au long d'une chaîne de transformation partant de fibres jusqu'à des produits finis dont la production mondiale s'élève à cinq cents milliards de dollars par an. Cette industrie concerne de nombreux secteurs d'activités comme l'habillement, l'automobile et l'ameublement. Chaque application requiert un savoir-faire perpétué de longue date. Initialement tissé à la main et simple de composition, le textile a subi de nombreuses évolutions : il est imperméable, ignifugé, anti coupure et même intelligent avec le développement croissant des « smart textiles » [Shanmugasundaram, 2008]. Il se compose de nombreux fils, de matières différentes, dont la nature et l'agencement répondent à un besoin fonctionnel spécifique.

Les différents secteurs d'application innovent et s'adaptent aux nouvelles lois du marché. Du tissage jusqu'à la confection finale, le tissu passe par de nombreux procédés modifiant ses caractéristiques. Il devient alors un matériau très difficile à prévoir tant par son comportement mécanique que par sa réaction aux différents traitements chimiques ou thermiques.

De tous temps, les avancées technologiques dans ce domaine se sont produites par retours d'expériences et reposent sur des lois empiriques. Il est ardu de mener des recherches sur le comportement du textile tant les différences entre matériaux sont grandes.

Avec la hausse constante de la production, l'importation en masse et la rentabilité économique qui exige de dégager le plus de profits possibles, les entreprises textiles misent sur une gestion au plus juste de leurs procédés de fabrication à tous les niveaux : tissage, traitements, découpe et confection.

Les premières recherches sur le textile remontent à plusieurs dizaines d'années et certains ouvrages restent, encore aujourd'hui, des références dans la compréhension des propriétés mécaniques de nombreux tissus, [Matthews, 1924], [Behre, 1961] et [Morton, 1962]. Elles se sont tout d'abord focalisées sur le tissu lui-même et ses caractéristiques mécaniques : le textile est un matériau hétérogène par excellence et les différentes applications de transformation doivent pouvoir s'appuyer sur des connaissances propres et exhaustives de chaque tissu.

Par la suite, les études ont tenté de démontrer l'usage qui pouvait être fait de ces matériaux aux propriétés si différentes. Certains travaux sur l'utilisation du tissu ont alors émergé pour des applications spécifiques, bien souvent en matière de défense balistique ou de matériaux anti coupure [Adanur, 1995], [Bajaj, 1997] et [Thilagavathi et al, 2010].

Les chercheurs contemporains se sont penchés sur un autre aspect du tissu : simuler au plus près de la réalité le comportement d'un tissu afin de reproduire son drapé, sa texture et sa sensation de toucher appelée aussi « main du tissu ». Ces travaux ont été principalement menés par Kawabata qui a mis en évidence de nombreux paramètres et théories de mesures afin de caractériser le tissu dans un sens

presque esthétique [Kawabata, 1979]. Ces études ont ouvert la voie à l'utilisation de ces divers paramètres dans la conception assistée par ordinateur, notamment dans l'habillement où il est désormais possible de dessiner un tissu aux propriétés modélisées numériquement sur un mannequin et de prévoir son tomber [Ancutiene, 2010], [Jiang, 2012].

L'industrie, quant à elle, s'approprie les recherches sur le tissu pour accroître sa productivité. Cela passe avant tout par une meilleure gestion de ses temps de production en optimisant au mieux le travail sur la matière, par des plannings et des simulations [Wong, 2003], [Wong, 2004], [Tunjo, 2008]. La coupe du tissu est une étape très importante dans la chaîne de production d'un matériau textile. Elle définit la qualité des bords découpés des pièces qui seront alors assemblées ainsi que la rapidité à laquelle le produit fini pourra être fabriqué. C'est là un élément moteur de la productivité. C'est pourquoi, aujourd'hui, les entreprises utilisent des salles de coupes automatisées où les machines travaillent sans relâche découpant des matelas de plusieurs épaisseurs de tissus simultanément. Les études portant sur la coupe de tissu débutent par la coupe d'un fil seul [Shin, et al, 2003] puis le champ de recherche s'élargit [Boz, 2010]. Ces auteurs se heurtent toutefois à un problème important : la diversité des matériaux découpés. Les matériaux tissés, mousseux ou *vinyl*, ont des propriétés très différentes et les paramètres de découpe doivent être adaptés en conséquence.

C'est dans ce contexte de découpe industrielle que se place le travail présenté dans ce mémoire. Les machines de découpe actuelles doivent être renseignées sur les paramètres de coupe à respecter en fonction du matériau. Le savoir-faire de l'opérateur est, à ce stade, un facteur très important de la qualité et de la productivité dans la découpe de ce type de matériau. Dans un contexte industriel voulant améliorer ses performances sans apport extérieur, les machines de coupes doivent pouvoir s'adapter elles-mêmes et réagir en fonction du tissu qu'elles rencontrent. Pour arriver à ce niveau d'automatisation, la connaissance du phénomène dans son intégralité est une nécessité.

Ce travail tente d'appréhender le phénomène d'une coupe de matériau, en feuille souple, en plusieurs épaisseurs, par l'action d'une lame vibrante. Il en découlera un modèle physique qui pourra aider à l'élaboration de certaines lois de pilotages afin d'accroître la productivité des machines de coupe industrielles en « *close door machining* ». Tout d'abord, il sera nécessaire de cerner les limites de l'étude : le champ de travail est large avec une diversité de matériaux aux caractéristiques mécaniques différentes et les paramètres influents multiples. Ensuite, une machine de coupe sera équipée de différents capteurs pour mesurer les paramètres retenus tout au long de différentes coupes, afin d'en extraire leur comportement et leur action sur la qualité de coupe. Enfin, en se basant sur la littérature existante dans le domaine, un modèle de coupe sera enrichi grâce à la connaissance des efforts de coupe mesurés.

# Chapitre I

---

## ETAT DE L'ART SUR LA COUPE DES MATERIAUX TEXTILES

---



Le textile est un matériau omniprésent dans la vie courante, que ce soit pour l'habillement, l'ameublement, l'automobile, l'aéronautique. A titre d'exemple, le textile se classe au troisième rang des échanges commerciaux derrière l'électronique et l'automobile. Cependant, la connaissance scientifique de la découpe textile est très en deçà de celle concernant la découpe métallique, développée dès la seconde guerre mondiale par les travaux de [Merchant, 1945]. Il en résulte un procédé de mise en forme relativement méconnu, paradoxalement à la taille du marché qu'il occupe. Aucun abaque n'est disponible et l'expérience de l'opérateur est bien souvent le facteur déterminant quant au choix des paramètres de découpe (vitesse de coupe, hauteur découpée ...). Certaines sociétés se sont spécialisées dans la fabrication et la commercialisation de machine de découpe de textile. Cependant, les avancées technologiques dans ce domaine ont été bien souvent le fruit de raisonnements empiriques, négligeant les études sur la compréhension des mécanismes de coupe. C'est le cas de l'entreprise française Lectra, partenaire de cette étude, qui a décidé au même titre que l'usinage métallique, de mettre en avant la recherche afin d'améliorer la productivité et la qualité des pièces découpées par ses machines.

Ce chapitre va, dans un premier temps, présenter la matière textile ainsi que sa fabrication afin de mieux appréhender le processus de coupe en lui-même. La description de cet usinage particulier introduira l'optimisation industrielle de ce procédé, en se basant sur les travaux effectués dans l'usinage des matériaux métalliques.

## I.1. La découpe textile

La découpe de textile par lame vibrante est un procédé de mise en forme des pièces tissées directement utilisables en confection. Il s'agit d'un procédé de séparation sans copeau, de formes planes, provenant d'un rouleau de tissu. Afin de garantir une haute productivité, les tissus sont généralement superposés en plusieurs épaisseurs afin de créer des matelas de tissus. C'est pourquoi la pièce finale découpée par ce procédé se présente souvent sous la forme d'une pile de matière multicouche (figure I-1).

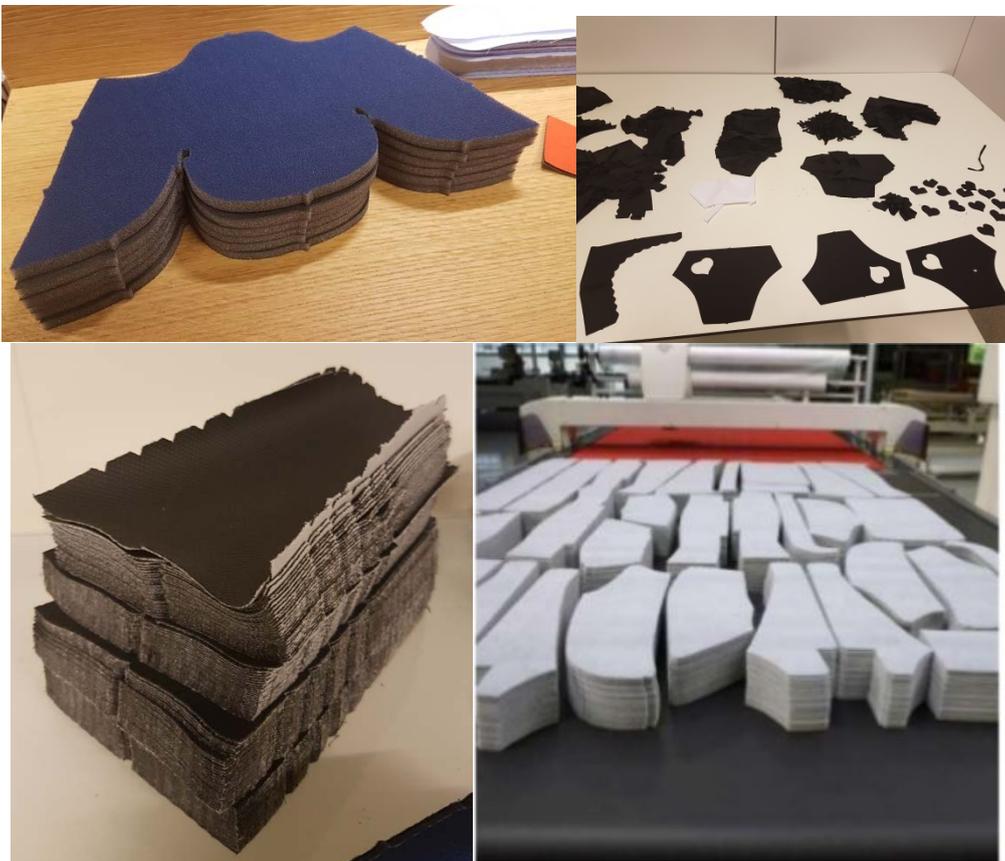


Figure I-1 : Exemples de pièces découpées.

Toutes les formes géométriques planes sont techniquement découpables, y compris certaines, spécifiques aux méthodes d'assemblage prévues pour les pièces. C'est le cas des crans (figure I-2) ou des perçages.

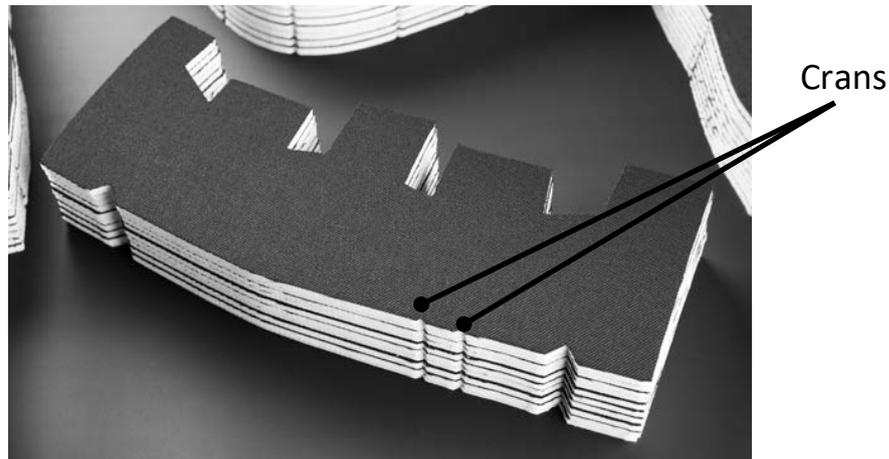


Figure I-2 : Pile de matière avec crans d'assemblage.

Afin de réaliser ces formes, deux outils sont utilisés : une lame longue pour découper les contours et des forets creux pour les perçages de faibles diamètres. Seule la découpe par lame sera traitée dans cette étude.

La coupe est en général très sensible aux propriétés du matériau découpé. Le textile est issu de nombreux procédés de fabrication et de transformation qui impactent ses propriétés mécaniques.

Dans une première partie, les principaux types de matériaux textiles ainsi que leurs caractéristiques physiques seront décrits. Puis, dans une deuxième partie, les étapes de fabrication essentielles (non exhaustives) des matériaux tissés et plus particulièrement, du matériau utilisé dans cette étude, seront présentées. Enfin, le processus de coupe par lame vibrante sera étudié.

### **I.1.1. Le textile**

Le textile est un matériau issu de l'entrelacement de deux séries de fils [Duquesne, 1976]. La nature de ces fils peut être différente du fait du matériau, du traitement, de la teinture... Ces fils sont séparés en deux groupes : les fils de chaîne, parallèles au sens de fabrication du tissu et les fils de trame, perpendiculaires aux fils de chaîne. D'autres textiles, dits tissus non tissés, sont élaborés par agglomération de fibres. Il n'y a donc plus de maillage visible.

Il existe deux catégories de textiles :

- les textiles traditionnels : ce sont des tissus conçus principalement pour leur apparence. Ils sont utilisés dans les domaines tels que l'habillement ou l'ameublement,
- les textiles techniques : ce sont des tissus dont l'usage principal est pensé en fonction de leurs caractéristiques thermomécaniques. Ces matériaux sont généralement utilisés dans les industries médicales, automobiles ou aéronautiques (matériaux composites, renforcés...).

Avec la généralisation des métiers à tisser automatisés, le textile tissé est un matériau fabriqué en quantité importante, à la mesure du marché qui lui est destiné.

Cette étude s'intéresse à la découpe des textiles tissés. Il en existe de nombreuses sortes, dépendant en premier lieu du type de maillage utilisé, aussi appelé armure.

#### **I.1.1.1. Armure**

L'armure est le mode d'entrecroisement des fils de chaînes et de trame. Les différentes armures utilisées sont des dérivés des trois armures principales présentées dans ce paragraphe.

- La toile : il s'agit de l'armure la plus basique qu'il est possible d'imaginer et de confectionner (figure I-3). Elle est composée d'un entrelacement où le fil de chaîne passe alternativement au-dessus et au-dessous du fil de trame.

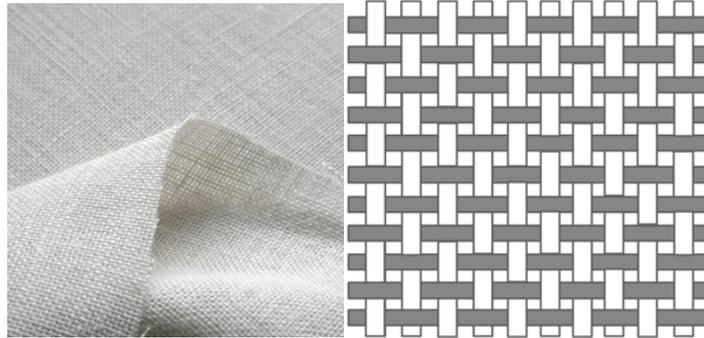


Figure I-3 : Armure de toile.

- Le sergé (figure I-4) est un tissage serré où les fils sont tissés avec un angle de 90° dans un ordre particulier : un fil de trame passant sur un, puis sous trois fils de chaîne en décalant d'un fil à chaque passage. Ce tissage typique crée un motif de diagonales visibles sur le tissu.

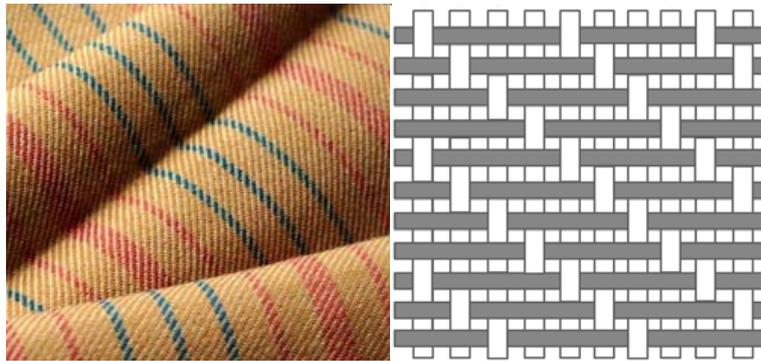


Figure I-4 : Armure de sergé.

- Le satin (figure I-5) donne un aspect uni mais différent entre les deux côtés du tissu : un côté brillant et un mat. Cela est réalisable en faisant passer un fil de chaîne au-dessus de nombreux fils de trame avant de passer dessous, une seule fois. Ce tissage donne un matériau souple dont une majorité de fils de chaîne sont visibles d'un côté contre une majorité de fils de trame de l'autre.

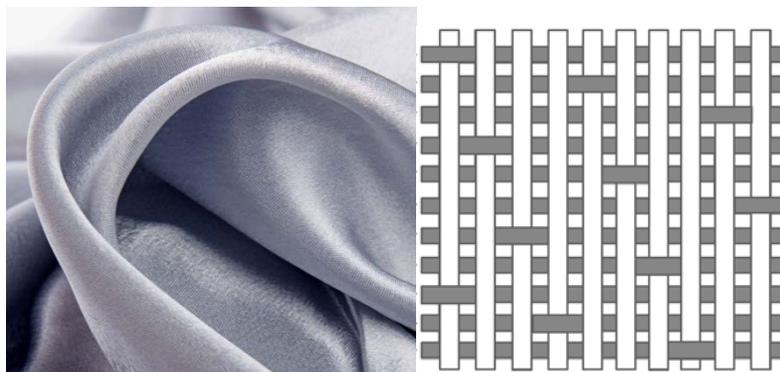


Figure I-5 : Armure de satin.

### I.1.1.2. Caractérisation mécanique des tissus

Afin de pouvoir caractériser les propriétés mécaniques d'un tissu, il est important de comprendre le comportement des fils qui le composent.

#### I.1.1.2.1. Propriétés mécaniques du fil

Le fil peut être caractérisé par trois propriétés spécifiques :

- le titre : sa masse linéique équivalant à la valeur d'un gramme par kilomètre, exprimée en Tex,
- la résistance à la traction et son module d'Young : obtenu par des essais de tractions [AFNOR, 1971], exprimée en MPa,
- sa constante de torsion : obtenue par un test de torsion, sans unité.

#### I.1.1.2.2. Propriétés de l'armure

De la même façon que pour le fil, l'étoffe peut être caractérisée par plusieurs paramètres :

- le compte en chaîne (ou trame) : nombre de fils de chaîne (ou trame) présents par centimètre,
- le comportement en traction selon les deux directions : trame et chaîne par traction uni axiale [AFNOR, 1985],
- le comportement en cisaillement, souvent équivalent à une traction à 45° par rapport à l'armure,
- le comportement en flexion ou drapé,
- sa compressibilité.

Le comportement en cisaillement est un sujet très largement étudié dans la littérature scientifique car il englobe à lui seul de nombreux aspects du matériau, nécessaires à la modélisation de son comportement et de sa mise en forme, [Kawabata et al., 1996], [Zhang et al., 2007].

Les caractéristiques du tissu sont issues des fils qui le composent et du type d'armure tissée. Cependant, tout au long de sa fabrication, il est soumis à des actions mécaniques et chimiques qui modifient également ses propriétés.

Les travaux présentés dans cet ouvrage ont été réalisés en majorité avec un tissu particulier : le *denim*. C'est un matériau disponible en abondance et plutôt bon marché. Ses caractéristiques sont connues et il est résistant à la coupe, ce qui génère suffisamment d'efforts pour être mesurés facilement. De plus, la lame le découpant a tendance à s'échauffer rapidement. La suite de ce chapitre va détailler les étapes de la fabrication du *denim* et tenter de quantifier les paramètres mécaniques de ce matériau.

#### I.1.1.3. Fabrication du denim

Ce matériau est le produit du tissage de deux fils de coton chaîne et trame suivant une armure sergée (figure I-6).

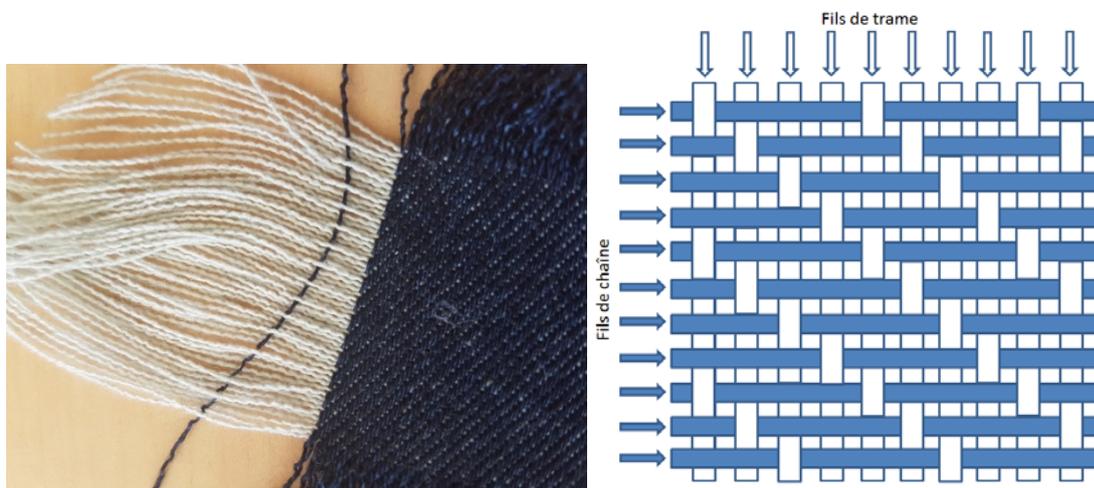
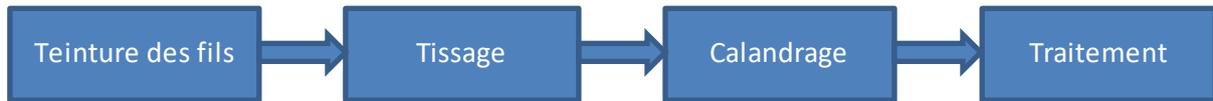


Figure I-6 : Tissage sergé sur du denim.

La fabrication du *denim* est une succession de nombreuses opérations. Chacune de ces étapes aura un impact sur la qualité finale du tissu mais également sur ses caractéristiques mécaniques. Les opérations de fabrications principales du denim sont regroupées dans le schéma suivant :



#### **I.1.1.3.1. Teinture**

La teinture peut être directement appliquée sur les fils ou sur l'ensemble du tissu une fois tissé. Dans le cas du *denim*, les fils de chaînes sont bien souvent teints par bains successifs dans de la teinture indigo (figure I-7). Cette étape modifie déjà la rigidité des fils de chaînes, en comparaison avec les fils de trames, non modifiés, plus souples.



Figure I-7 : Fil de chaîne teinté au-dessus, fil de trame écru au-dessous.

#### **I.1.1.3.2. Tissage**

Lors de la création du tissage sergé, les fils de chaînes sont déroulés progressivement et un fil de trame est introduit à pas maîtrisé (figure I-8). A l'aide de grand peignes, les fils de chaîne sont écartés puis resserrés et subissent de fortes contraintes mécaniques. Les fils de trame sont également fortement contraints : comprimés tout au long du tissage, ils ne restent quasiment jamais rectilignes.



Figure I-8 : Salle de tissage.

#### **I.1.1.3.3. Calandrage**

Après le tissage, certains tissus nécessitent d'être passés entre deux ou plusieurs cylindres chauffés, afin de contrôler leur perméabilité et leur état de surface : il s'agit du calandrage. Les pores du tissu se referment et sa surface se fait plus lisse. Cette contrainte appliquée au matériau n'est pas sans conséquence sur ses capacités mécaniques futures.

#### **I.1.1.3.4. Traitements**

Enfin, le tissu est traité, il peut recevoir différents traitements, ou imprégnations chimiques qui vont modifier ses caractéristiques : déperlant, imperméable, ignifugé... Ces traitements sont bien souvent réalisés par bain ou pulvérisation à l'aide de produits chimiques qui vont modifier les caractéristiques du tissu et surtout, pour ce qui intéresse cette étude, la facilité avec laquelle il pourra être découpé : présence de silice sur les fibres ou de produits attaquant chimiquement la lame de coupe, imperméabilité empêchant le maintien du tissu par aspiration...

#### **I.1.1.4. Propriétés du *denim***

Le *denim* est un matériau hétérogène aux propriétés très différentes entre le sens de la chaîne et le sens de la trame. Cette différence peut être mise en évidence lors d'essais de tractions dans ces deux directions (figure I-9).

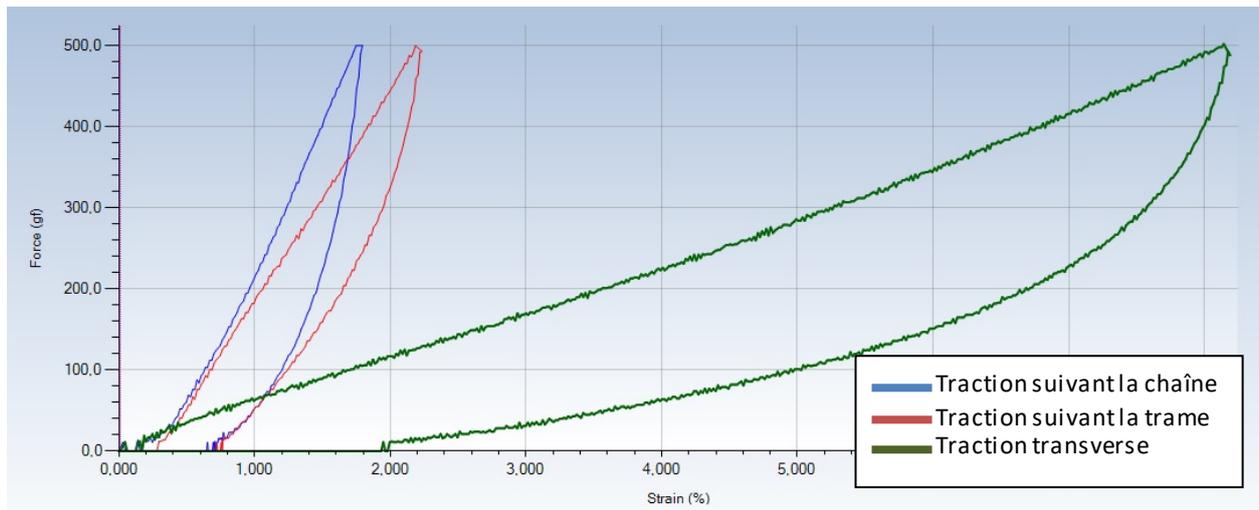


Figure I-9 Courbes de traction de denim (source : Lectra).

Il est possible de remarquer que le tissu ne se comporte pas de la même façon selon que la traction est effectuée dans le sens de la trame ou dans le sens de la chaîne, offrant une plus grande résistance suivant la chaîne. Cela est dû aux propriétés des fils de chaîne, différents de la trame, mais aussi de la concentration inégale entre les deux composants. En effet, pour la majorité des *denims*, les fils de chaîne sont plus nombreux. Le tissu utilisé pour cette étude se compose de 26 fils de chaîne au  $\text{cm}^2$  contre seulement 16 fils de trame.

La traction en cisaillement, soit à  $45^\circ$  par rapport à la chaîne et la trame, montre que le tissu est beaucoup plus flexible dans le sens du cisaillement, ce qui est une constante pour de nombreux tissus : l'armure est davantage mobile, permettant aux fils de trame et de chaîne de glisser légèrement les uns sur les autres.

Il est parfois difficile d'obtenir les caractéristiques mécaniques d'un tissu. Ce type de matériau, sauf pour un usage technique, n'est pas aussi codifié qu'un alliage métallique ou un matériau composite et il n'est pas rare que même le fournisseur soit incapable de renseigner les caractéristiques de son tissu. Cependant, des normes existent, permettant de définir au travers d'essais spécifiques ces caractéristiques. C'est le cas de la norme [ISO 13997] qui mesure la résistance à la coupe des tissus ou de la norme [ISO 13934-1] pour la caractérisation de l'allongement et de la résistance maximale en traction (voir annexe confidentielle A.I.1.). Les principales propriétés (tableau I-1) du tissu employé dans cette étude sont énumérées ci-dessous :

<b>Compte en chaîne</b>	26/ $\text{cm}^2$
<b>Compte en trame</b>	16/ $\text{cm}^2$
<b>Epaisseur</b>	0.8 mm
<b>Titre fils de chaîne</b>	150 tex
<b>Titre fils de trame</b>	100 tex
<b>Force maximale à traction d'un fil de trame</b>	6.5 N
<b>Force maximale à traction d'un fil de chaîne</b>	10 N
<b>Module de cisaillement</b>	1470 Nm
<b>Résistance à la traction dans le sens de la trame</b>	880 N
<b>Résistance à la traction dans le sens de la chaîne</b>	390 N
<b>Résistance à la coupe dans le sens des fils de trame</b>	Niveau 1 (3 N)
<b>Résistance à la coupe dans le sens des fils de chaîne</b>	Niveau 1 (2.5 N)

Tableau I-1 : Caractéristiques mécaniques du denim de l'étude.

Une fois tissé et préparé, le textile est prêt à être découpé. Le tissu est enroulé sur de larges rouleaux et transporté jusqu'aux entreprises spécialisées et leurs salles de coupes. Les paragraphes suivants décrivent la machine de coupe de tissu, son fonctionnement ainsi que le processus de coupe.

## I.2. La machine de découpe textile

### I.2.1. Structure cinématique générale

La structure cinématique des découpeurs textiles industriels est la suivante (figure I-10) :

- un châssis renfermant un dispositif d'aspiration d'air **1**,
- une table de coupe sous forme de convoyeur **2**,
- une poutre mobile se déplaçant au-dessus de la table de coupe suivant X **3**,
- une tête de coupe se déplaçant le long de la poutre suivant Y **4**,
- l'outil coupant : une lame embarquée dans la tête de coupe **5**.

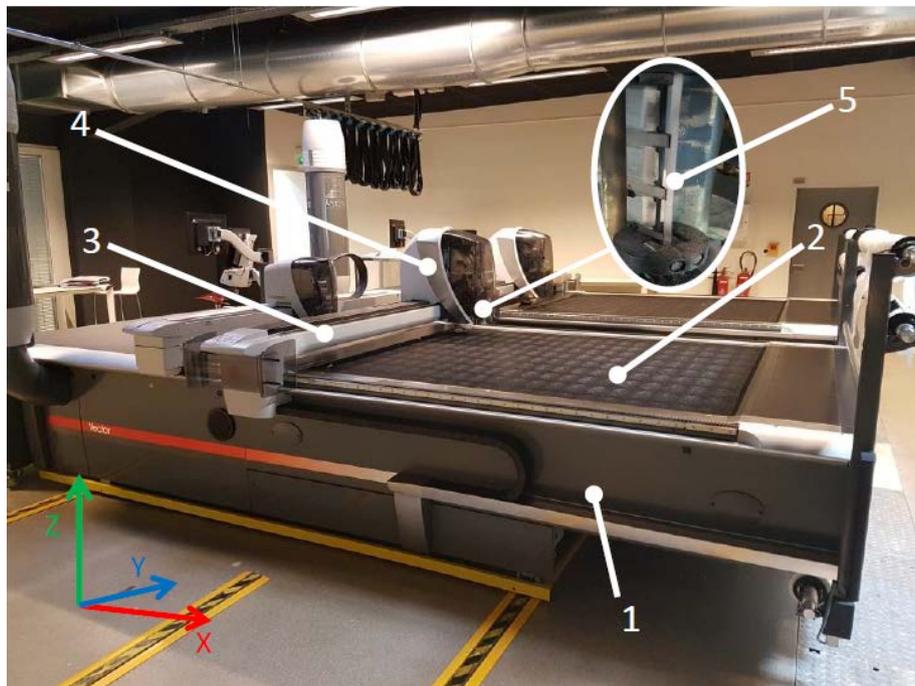


Figure I-10 Détails d'un découpeur textile industriel (Vector© iX9, Lectra).

La découpe est générée par une vibration verticale de la lame combinée à une avance horizontale de la tête de coupe.

La mise en rotation d'un système de bielle-manivelle donne à la lame un mouvement oscillatoire de bas en haut. Ce mouvement spécifique est renseigné sous le terme de fréquence de coupe ( $f$ ). Les machines de coupes actuelles dépassent rarement la fréquence de coupe de 100 Hz. Due à la cinématique particulière de la rotation du vilebrequin, la vitesse de la lame est pseudo-sinusoidale.

Le déplacement horizontal est généré par le déplacement combiné de la poutre suivant l'axe X et de la tête suivant l'axe Y. Ces deux mouvements, animés par l'action de deux crémaillères, génèrent une vitesse d'avance ( $V$ ) linéaire de l'ensemble mobile.

Il existe une dernière partie très importante de la tête de coupe : le pied presseur. Ce pied guide la lame en son centre et sert d'interface entre la matière et la tête de coupe, en restant en contact avec le matelas de tissu, tout au long de la coupe. Ce pied presseur est également pilotable en rotation afin de faire décrire à la lame des trajectoires courbes. Une représentation de la cinématique simplifiée de la tête de coupe est visible sur la figure I-11.

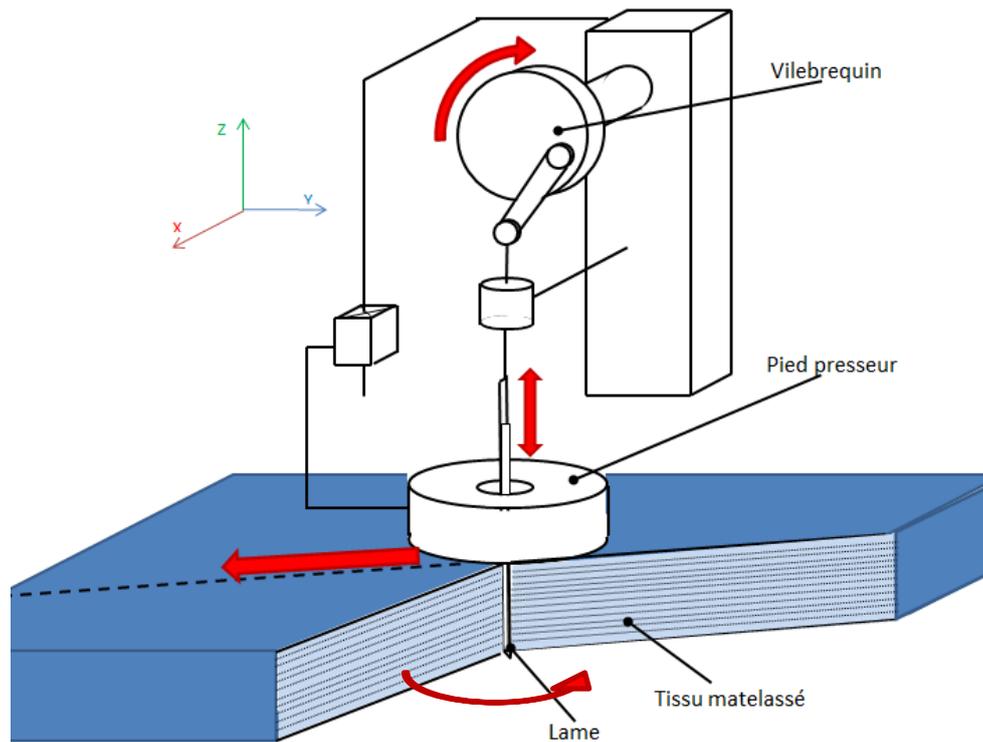


Figure I-11 : Schéma cinématique simplifié d'une tête de coupe textile.

### I.2.2. Architecture d'une tête de coupe Lectra

Pour faciliter la compréhension des travaux présentés, il est important de connaître de façon plus détaillée les différentes parties composant une tête de coupe et le guidage de la lame (figure I-12). Ces informations sont spécifiques aux découpeurs Lectra de la gamme Vector© MH-MX.

La tête de coupe est formée :

- d'un bloc de vibration assurant l'oscillation de la lame nécessaire à la coupe **1**,
- de la lame **2**,
- d'un guide lame tournant servant de glissière à la lame et assurant sa rotation **3**,
- d'un système d'affutage composé de 2 à 3 bandes abrasives **4**,
- d'un pied presseur se plaquant sur le tapis de coupe **5**.

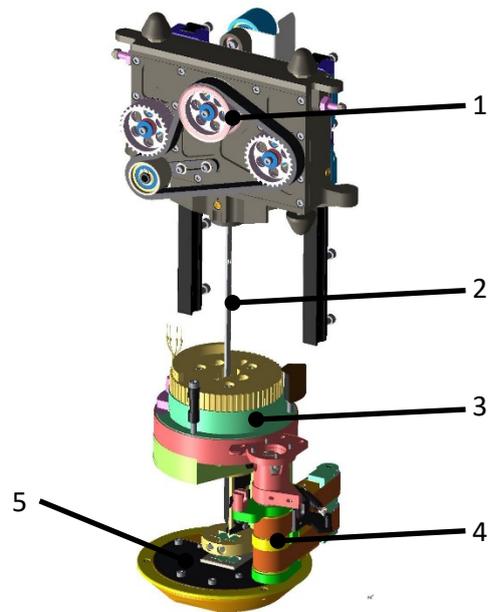


Figure I-12 : Représentation 3D des éléments fonctionnels d'une tête de coupe.

La lame est guidée par un ensemble de galets (figure I-13) : cinq dans le pied presseur dont quatre servant au capteur d'efforts (galets n°2 à 5), huit dans le guide lame supérieur. Ce sont principalement ces galets qui encaissent les efforts dus à la coupe.

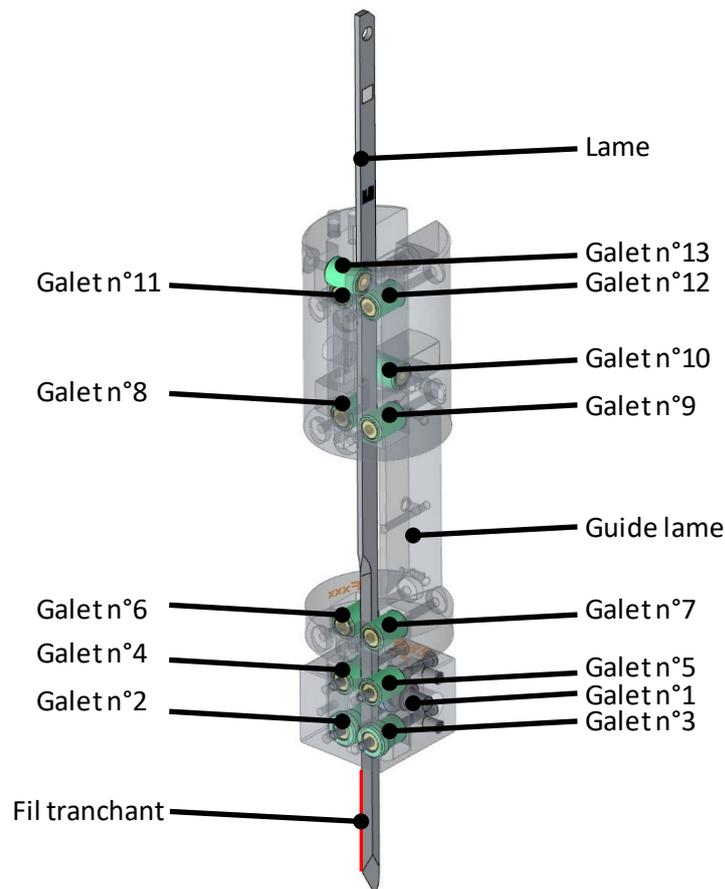


Figure I-13 : Position et numérotation des galets guidant la lame.

Le guide lame est une pièce importante. Sa forme particulière permet de libérer une zone d'accessibilité pour la bande abrasive lors de l'affûtage.

Cette pièce intègre huit galets (n°6 à 13) permettant le guidage de la lame en translation avec un jeu minimal. Ils assurent un guidage fortement hyperstatique de la lame.

### I.2.3. Maintien de la pièce pendant la coupe

Comme pour tout usinage, le maintien de la pièce est un facteur déterminant pour le bon déroulement de la coupe. Cette affirmation se vérifie plus encore dans le cas de la découpe de matériaux en feuilles souples en plusieurs épaisseurs.

Pour assurer le maintien des pièces pendant la coupe, le matelas de tissu à découper est placé entre une feuille de papier perforée, en dessous, et un film polyéthylène, au-dessus.

Par le biais d'une turbine d'aspiration située dans le châssis de la machine de coupe, un vide d'air se crée dans le matelas de coupe ayant pour effet de comprimer le tissu, de le rigidifier et de le maintenir en place (figure I-14).



Figure I-14 : Avance du tissu sur la table de coupe et vide d'air.

Si les plis de tissus n'étaient pas maintenus, ils seraient poussés par le déplacement de la lame sans être coupés. La compressibilité du tissu est un autre critère de classification mécanique des tissus. L'aspiration de la machine doit être adaptée à chaque tissu car ils réagissent différemment. La figure I-15 illustre un essai de compression effectué sur une pile de 10 cm de *denim*. En dépassant la valeur de 1kN, la hauteur du matelas diminue de 20%.

Le denim supporte une grande force de compression car il reste très rigide et ne se déforme pas. Ce n'est pas le cas pour certains matériaux plus malléables comme les mousses qui doivent être maintenues avec le minimum de pression. Une trop grande force appliquée sur un matelas de mousse entraîne un écrasement et une déformation importante des pièces après découpe.



Figure I-15 : Courbe de compressibilité du denim (source : Lectra).

### I.2.4. L'outil coupant

L'outil coupant utilisé pour découper les pièces de textiles est une grande lame lisse de 30 cm de long (figure I-16).



Figure I-16 : Lame et section de lame.

Il s'agit d'une lame en acier rapide. Elle est réaffûtée fréquemment pour conserver son acuité d'arête et possède, en moyenne, une durée de vie d'une dizaine d'heure avant remplacement.

Deux tailles de lames différentes sont utilisées dans cette étude :

- une taille dite standard de 2,4 mm d'épaisseur et 8,5 mm de largeur,
- une taille initialement prévue pour la découpe de lingerie de 2 mm d'épaisseur et 7 mm de largeur.

## I.3. Processus de coupe

La machine ayant été présentée, les différentes opérations de coupe vont désormais être détaillées. Ces opérations se déroulent dans les salles de coupes des entreprises textiles, il s'agit d'endroits spécifiques où le tissu est stocké, traité et découpé [Vilumsone-Nemes, 2012].

### I.3.1. Création des placements

Le travail du placement des pièces à découper sur le tissu est très important. Il procure des gains de productivité et d'économie dans la découpe de tissu. Les principaux paramètres influençant le placement des pièces sont :

- le nombre d'articles de même taille,
- l'utilisation optimale du tissu et la minimisation de la perte de matière,
- les limites technologiques de la technique de matelassage et de découpe utilisées,
- l'utilisation optimale du temps de coupe.

Des logiciels spécifiques sont utilisés pour accroître la productivité et limiter les erreurs (figure I-17). En prenant en compte les différents paramètres énoncés précédemment, le logiciel peut simuler plusieurs plannings de coupe et le plus performant est sélectionné.

Ce placement peut être soit imprimé et placé au-dessus du matelas à découper en vue d'une coupe manuelle soit envoyé à la commande numérique pour les découpeurs automatiques.

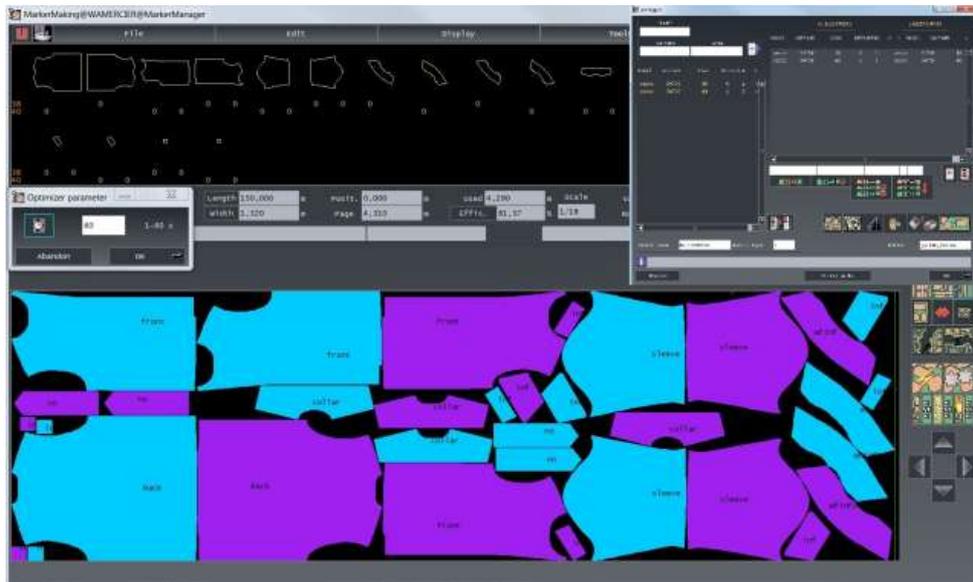


Figure I-17 : Logiciel de création de placements en préparation de la coupe.

### I.3.2. Le matelassage

Le matelassage correspond à la superposition de différents plis de tissus du même type pour préparer une coupe dite « multi-plies ». La longueur du matelas est définie par la forme et le nombre des pièces à découper prévues par le placement. Il s'agit d'un travail long et difficile, c'est pourquoi avec le développement de la production de masse, le matelassage a dû s'améliorer jusqu'à devenir intégralement mécanisé (figure I-18). Le matelassage automatique a grandement augmenté les cadences de production mais ne révolutionne pas le principe même de cette action. L'opération se déroule au-dessus d'une grande table de matelassage, où le matelasseur déroule le rouleau de tissu à préparer, en coupant chaque pli à la taille prédéfinie par le placement.



*Figure I-18 : Matelasseur automatique.*

### **I.3.3. Le convoyage**

La table de matelassage est bien souvent équipée d'un convoyeur qui transporte le matelas ainsi formé vers la table de découpe. Plusieurs matelasseurs peuvent travailler simultanément avec un nombre de découpeurs plus restreint. En général, les découpeurs textiles sont placés sur rails afin d'atteindre les tables de convoyage et récupérer le tissu matelassé en transit.

### **I.3.4. La découpe**

Une fois le tissu sur la zone de coupe, l'aspiration dans le châssis effectue un vide d'air entre la table de coupe et le film plastique, venant comprimer le tissu et le maintenir en place. Lorsque le tissu est correctement soumis à la force de dépression, la tête de coupe se place au-dessus du matelas et la lame plonge dans la matière. Les pièces sont alors découpées suivant les géométries définies par le placement.

Certaines machines de coupe peuvent découper jusqu'à 9 cm de tissu comprimé. L'enjeu industriel est de pouvoir couper efficacement tout type de tissu le plus rapidement possible, en respectant les critères de qualité. Cette qualité se caractérise par un respect des formes et des dimensions des pièces prévues sur toute l'épaisseur du matelas de tissu découpée.

## **I.4. Problématique et pilotage des découpeurs textiles**

Sans compter les erreurs possibles sur le placement qui pourrait faire chevaucher quelques pièces, certains phénomènes peuvent créer des défauts dans la coupe. C'est pourquoi, des règles de pilotage sont appliquées automatiquement.

### **I.4.1. Usure de lame**

La lame perd son pouvoir coupant à mesure que l'opération de découpe se déroule et il est alors nécessaire d'effectuer une opération d'affûtage. Cette action périodique est aujourd'hui répartie linéairement tout au long de la durée de vie de la lame, indépendamment de son état réel. La tête de coupe est équipée d'un système d'affûtage automatique. Quand la commande d'affûtage est actionnée, la lame remonte et des bandes abrasives viennent affûter les deux faces de son tranchant afin d'en reformer le fil (figure I-19).

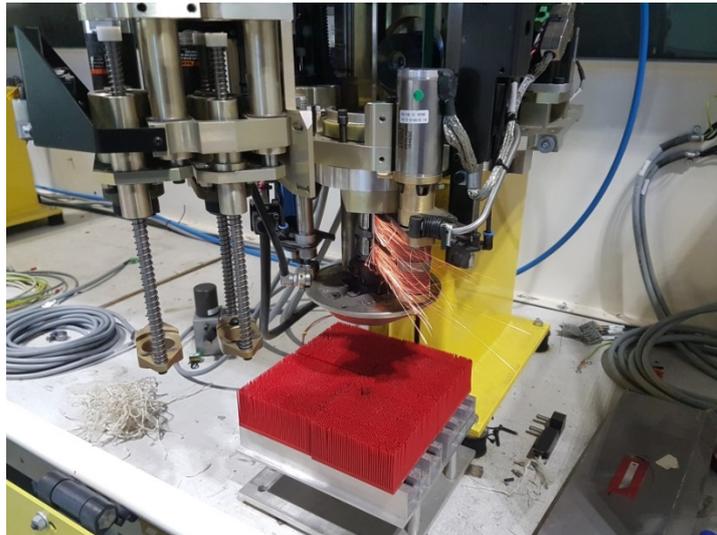


Figure I-19 : Affûtage sur banc de test.

La fréquence d'affûtage est dépendante de la nature du matériau découpé. Le paramétrage est réalisé empiriquement. L'usure de la lame (perte de matière) générée par l'opération d'affûtage est déterminée expérimentalement par une loi d'abrasion en fonction du nombre d'affûtages, de la dimension de la lame et du type de bande utilisée. La position du fil tranchant est calculée en fonction du nombre de cycles d'affûtages réalisés. Une lame peut perdre jusqu'à 2 mm de largeur avant d'être considérée comme inutilisable et échangée contre une neuve (figure I-20).



Figure I-20 : Comparaison d'une lame neuve (en bas) et en fin de vie (en haut).

Ce changement de géométrie entraîne une réduction du moment quadratique autour de l'axe Y (figure I-21) et induit une flexion accrue pour un même effort.

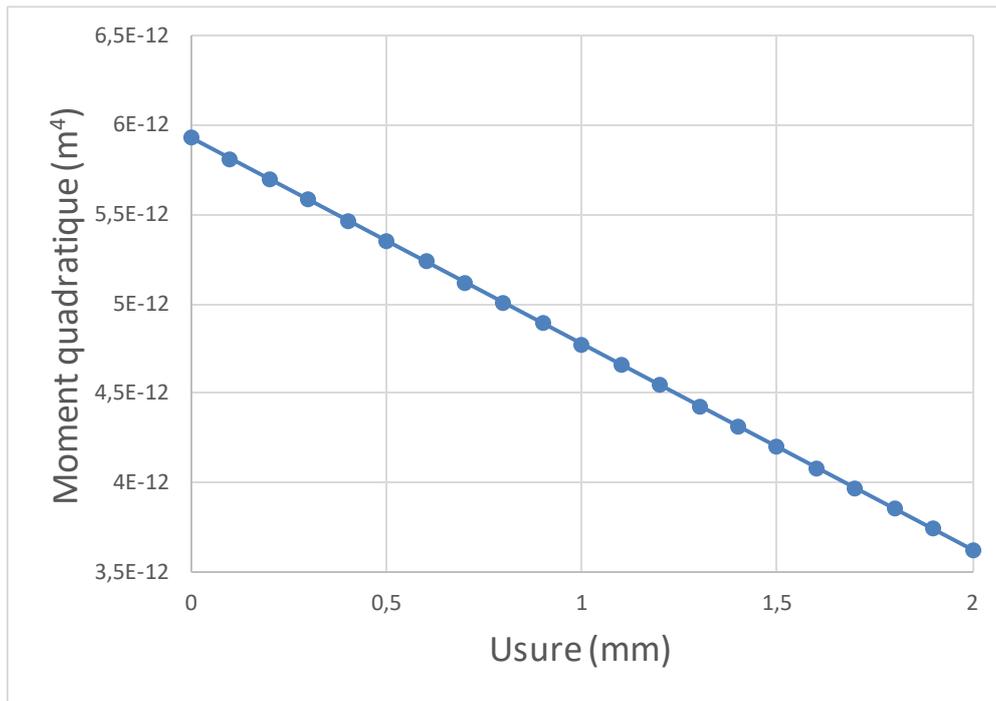


Figure I-21 : Diminution du moment quadratique due à l'usure de la lame.

Cet effet est amplifié avec l'augmentation de l'épaisseur du matelas à découper car la longueur de la lame sollicitée est plus importante (figure I-22).

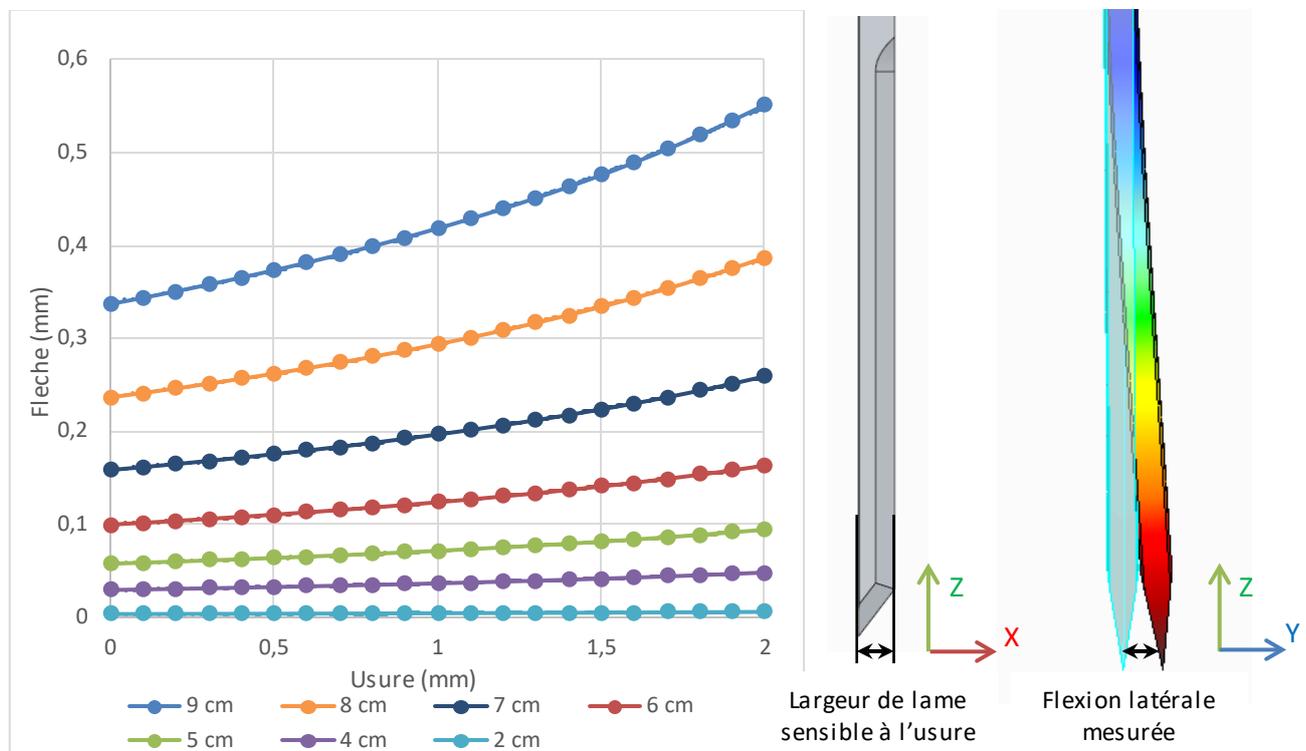


Figure I-22 : Flexion de la lame en fonction de son usure et de l'épaisseur du matériau découpé.

## I.4.2. Flexion

La principale difficulté de la coupe multi-plis est de conserver la qualité géométrique des pièces découpées sur toute l'épaisseur du matelas de coupe. Pendant la découpe, la lame contrainte par l'épaisseur du matériau à couper fléchit. Ce fléchissement entraîne des défauts et il n'est pas rare de constater des différences entre le pli du dessus et le pli du dessous (figure I-23).

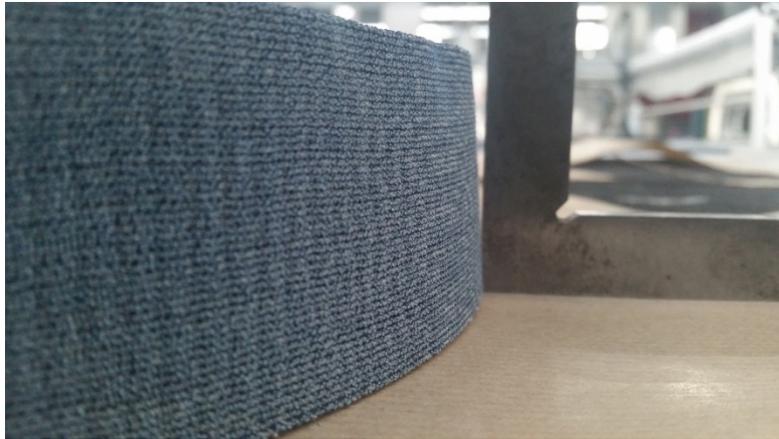


Figure I-23 : Problème de coupe non verticale dû au fléchissement de la lame.

Il existe deux flexions possibles de la lame, une frontale et une autre latérale.

### I.4.2.1. Flexion frontale

Lors d'une coupe droite, dans une épaisseur importante de matelas, la lame fléchit d'une certaine distance suivant la direction d'avance. En effectuant une analyse statique de la lame et en la considérant comme une poutre en appui sur trois liaisons ponctuelles rigides : les galets 1, 10 et 13, (figure I-24) il est possible de calculer la forme de la déformée et de connaître l'action de chaque galet sur les efforts de réaction.

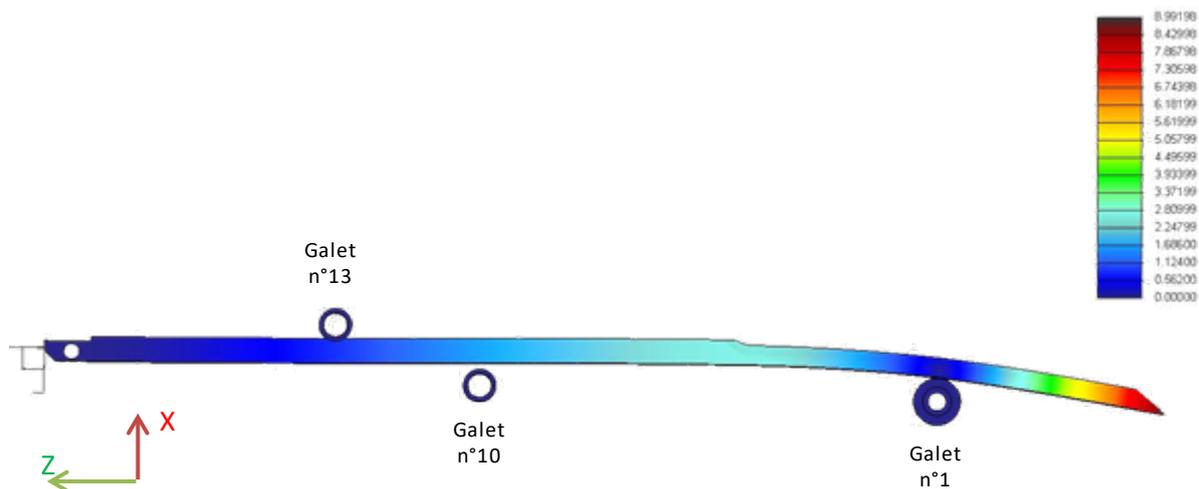


Figure I-24 : Déformation de la lame suite à une flexion frontale (flèche en mm).

En exprimant la reprise d'efforts par les galets en pourcentage de l'effort appliqué sur la lame, le galet n°1 dans le pied presseur encaisse 74% des efforts contre 26% pour le galet n°13, en haut du guide lame. Le galet n°10 n'est pas sollicité car la lame se décolle de celui-ci pendant la coupe. Cette flexion n'est pas contrôlée par le découpeur textile et donc, aucune action corrective n'est appliquée.

### I.4.2.2. Flexion latérale

La lame subit également des efforts latéraux ce qui entraîne une flexion. Cette déformation est surtout visible lors de coupes courbes. Il s'agit de la flexion de lame la plus pénalisante car elle agit directement sur la différence de dimension entre les plis du haut et ceux du bas, créant des pièces non conformes.

Pour régler ce problème, les différents constructeurs de machines de découpe textile ont recouru à un capteur d'efforts implanté sur la tête de coupe afin de compenser ce déplacement de lame en fonction des efforts mesurés.

Pendant une coupe courbe, il y a une différence de pression de contact du tissu sur les deux flancs de la lame.

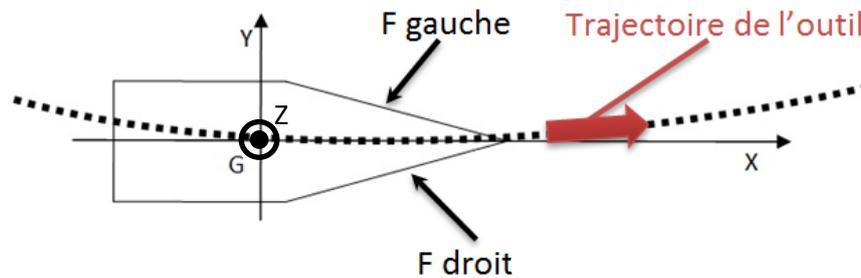


Figure I-25 : Lame en trajectoire courbe.

Sur la figure I-25, la pression augmente sur le flanc gauche et diminue sur le flanc droit. Ces composantes, en projection sur l'axe Y, génèrent une résultante latérale répartie sur toute la hauteur du matelas. Ceci génère alors, par rapport aux galets dans le pied presseur, un moment de flexion qui vient modifier la trajectoire de la lame dans le matelas.

Le capteur de flexion implanté dans le pied presseur permet d'éviter ce phénomène en commandant une rotation de la lame autour de l'axe Z, de manière à augmenter son moment d'inertie suivant la direction Y (Figure I-26). Couplée à cette action, une modification des vitesses d'avance et de vibration permettent d'accroître la précision en coupe courbe.

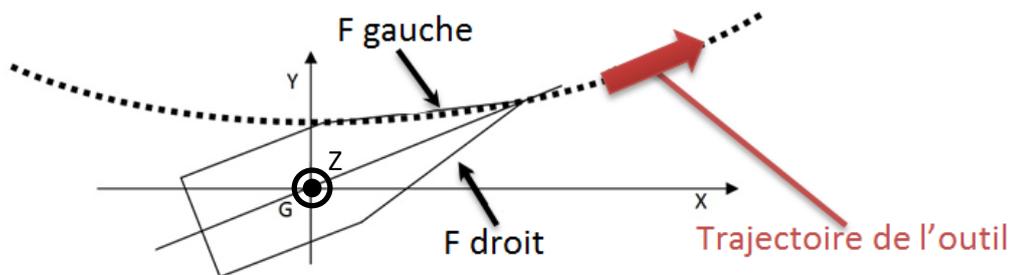


Figure I-26 : Lame en trajectoire courbe modifiée.

A partir d'une analyse statique de déformée de la lame reposant sur les différents galets latéraux 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11 et 12 il est possible de voir la contribution de chacun de ces galets dans la reprise de l'effort appliqué sur les flancs de la lame (figure I-27).

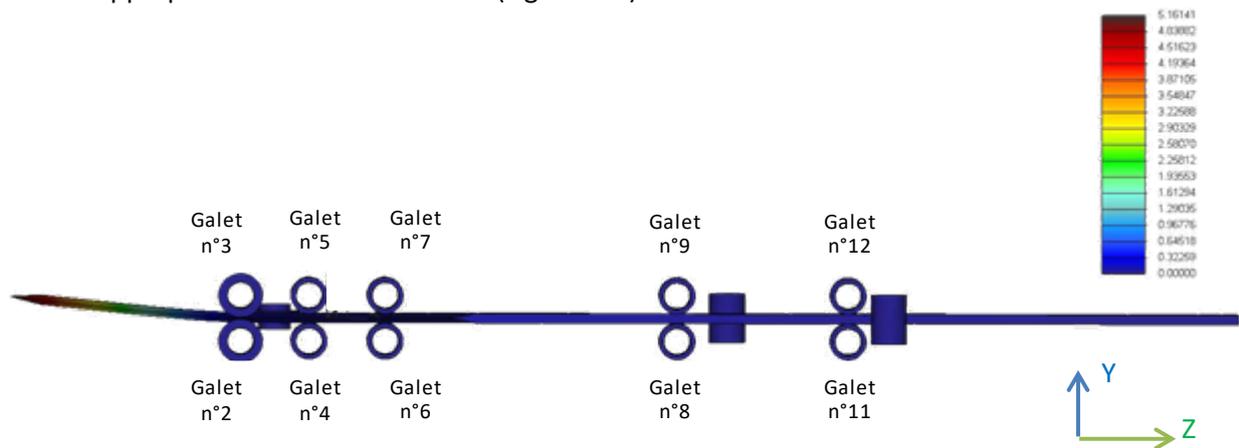


Figure I-27 : Déformation de la lame suite à une flexion latérale (flèche en mm).

Quatre galets au niveau du pied presseur (galets n° 2 à 5) encaissent 88% des efforts dus à la lame en flexion. Les galets en bas du guide lame (n°6 et 7) encaissent 10 % et les autres (n° 8, 9, 11 et 12) se partagent les 2 % d'efforts restants.

Cette analyse va permettre de restreindre le nombre de mesures à effectuer dans la suite de l'étude.

### I.4.3. Température

Pour certains matériaux dont la température de fusion est basse, la combinaison de la fréquence de vibration et de la vitesse de coupe peut entraîner une fusion du matériau au contact avec la lame. Les plis composant le matelas se soudent entre eux dans le sillon de coupe et forment un bloc de matière (figure I-28). Cela nécessite de réduire la vitesse de vibration et la vitesse de coupe quelles que soient les conditions de fonctionnement, afin de ne jamais se situer au-dessus de la température de fusion du matériau à découper. Ce phénomène affecte grandement la productivité.

Certains modèles de machines de coupe sont équipés d'un système de refroidissement de lame par air pulsé. Un tuyau expulse de l'air comprimé directement sur la lame au niveau du pied presseur permettant d'évacuer un peu de chaleur.

Une autre façon de réduire la température de la lame est l'utilisation de lubrifiant. Pendant la coupe, la lame est lubrifiée afin de diminuer son frottement sur la matière. Cette méthode se révèle plus efficace que l'air pulsé et permet de découper des matériaux plastiques très sensibles à la chaleur.



*Figure I-28 : Coupe de vinyl : présence de plis fondus suite à une fréquence de coupe trop élevée.*

## **I.5. Paramètres influant sur la qualité de coupe**

L'analyse du processus de coupe réalisée dans les paragraphes précédents et le retour d'expérience des différents utilisateurs permettent d'établir une liste des paramètres influents (figure I-29) sur la qualité des profils coupés.

Bon nombre de ces paramètres sont directement liés au réglage de la machine comme la vitesse d'avance, la fréquence de coupe, l'amplitude et la dépression utilisées pour maintenir le tissu. D'autres paramètres sont davantage liés à la géométrie de l'outil ainsi qu'à la matière découpée. L'objectif de cette étude est d'établir les relations entre les paramètres d'entrée (réglage de la machine) et des données physiques caractérisant le processus de coupe et la qualité de celle-ci, en vue de l'optimiser et de la modéliser.

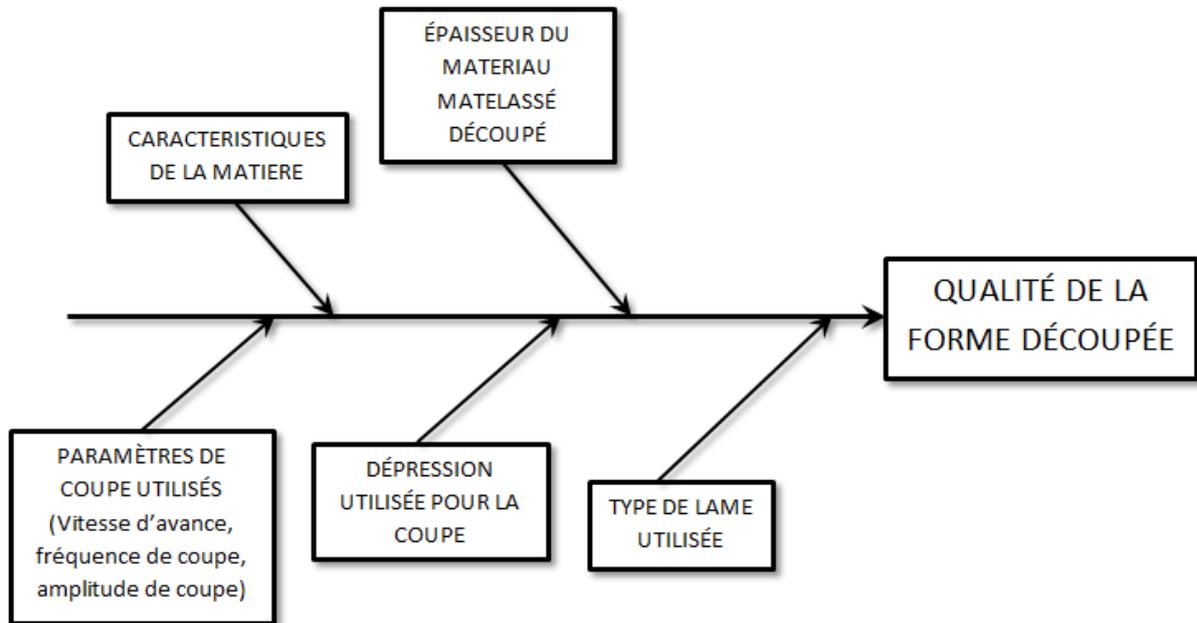


Figure I-29 : Paramètres influents.

## I.6. Compréhension du processus de coupe

Peu de publications s'attardent sur l'étude des mécanismes de coupe d'un matériau tissé [Thi, et al, 2005]. Les phénomènes mis en jeu sont donc mal connus et non maîtrisés sauf par des approches empiriques. Les caractéristiques mécaniques d'un matériau tissé dépendent principalement des fibres qui le composent, de leur nombre et de la manière dont elles sont tissées. Il en résulte un très grand nombre de matériaux aux caractéristiques différentes. C'est sans doute pourquoi l'étude de la coupe de matériaux en feuilles souples ou matériaux tissés, est rendue si complexe.

Les recherches dans le domaine de la découpe textile se sont davantage portées sur l'organisation des salles de coupe et du processus dans son intégralité. Cet aspect de gestion de la coupe afin d'en maximiser la production en est à un stade bien plus avancé que ne l'est la connaissance de la coupe elle-même. L'industrie textile a toujours tenté d'améliorer sa productivité ainsi que la qualité des pièces produites, tout en maîtrisant les coûts. En témoignent les travaux menés sur le « Zero-Waste Design » où le design vestimentaire est orienté pour favoriser la suppression des pertes de matières pendant la coupe [Rissanen, 2013]. Différents travaux ont été menés afin d'optimiser l'utilisation des processus de coupe en gérant au mieux les différentes étapes de fabrication par des planifications et des simulations. En effet, la découpe des pièces textiles pour la confection est une action déterminante sur la qualité des pièces et la productivité [Wong 2003], [Wong 2004] et [Tunjo, 2008].

Pour agir directement sur la coupe, certaines études proposent d'étudier le comportement de différents tissus pendant leurs découpes selon certains paramètres tels la vitesse de coupe, l'angle de coupe et la perméabilité du tissu découpé [Boz, 2010], tandis que d'autres se concentrent sur le phénomène même de la coupe d'un fil en essayant de comprendre le comportement de rupture des fibres textiles [Shin, et al, 2003].

Dans une démarche d'industrialisation, il est important de considérer la mise en œuvre du procédé de découpe d'un point de vue technique et économique pour un tissu donné. La découpe de tissu en multipli par lame vibrante est alors étudiée en se focalisant sur certains paramètres de coupe propres aux machines de découpe industrielle : la pression de maintien des plis de tissus, l'affutage de la lame, la fréquence de coupe et la vitesse d'avance [Blekač, 1998]. Ces recherches ont abouti à l'élaboration d'un premier modèle du travail de l'outil en fonction des efforts verticaux et horizontaux de coupe ainsi que

des paramètres géométriques de la lame. D'autres études s'orientent sur le type de tissu coupé et mettent de nouveau en évidence les différences de résultats d'un matériau à l'autre [Kothari, 2007].

Afin de pouvoir proposer des paramètres de coupe optimaux pour une application donnée, il est nécessaire de comprendre l'impact des paramètres influant sur les indicateurs de la coupe. Selon le retour d'expérience, c'est en contrôlant les efforts appliqués sur la lame et la température de celle-ci qu'il serait possible de modéliser la coupe du tissu par lame vibrante.

De la même façon que les travaux réalisés dans l'usinage métallique où la modélisation du procédé est devenue naturelle, il faudrait appliquer les mêmes codes de recherche à la découpe textile.

Les paragraphes suivant vont rappeler succinctement les méthodes de modélisation utilisées dans le cas de l'usinage métallique qui pourraient être appliquées à la modélisation de la coupe de matériaux en feuilles souples.

## I.6.1. Modélisation de la coupe en usinage

### I.6.1.1. Echelles spatiales de l'étude

Il existe trois approches prépondérantes dans la modélisation de la coupe faisant référence à trois échelles spatiales d'observation [Cherif, 2003]. Selon le point de vue utilisé, les paramètres pris en compte seront différents.

- L'échelle microscopique.

Elle se base sur des connaissances en métallurgie et en cristallographie afin de pouvoir décrire la formation du copeau pendant l'usinage [Poulachon et al., 2002]. Cette échelle se base également sur l'étude de l'état résiduel de la pièce usinée avec des observations par MEB.

- L'échelle mésoscopique.

L'échelle mésoscopique se détache de l'aspect métallurgique pour venir étudier le couple outil-matière ainsi que la création du copeau. Au travers de deux zones de cisaillement [Merchant, 1945] - [Oxley, 1976], puis de quatre [Toulouse, 1998] - [Dargnat, 2006] - [Yousfi, 2015] les grandeurs thermomécaniques (température, contraintes, déformations...) sont étudiées. Ces valeurs difficilement mesurables font souvent l'objet de modélisations analytiques ou numériques [Calamaz, 2008] qui mènent à une meilleure compréhension des phénomènes macroscopiques comme les efforts de coupe.

- L'échelle macroscopique.

Cette échelle se concentre sur le système usinant dans son intégralité et non au niveau des phénomènes localisés sur l'outil. Elle se base davantage sur une modélisation dynamique et vibratoire de l'ensemble usinant. Cette approche est utilisée dans le contrôle de trajectoire et pour le développement de simulation de coupe en prenant en compte les paramètres dynamiques de la machine.

### I.6.1.2. Méthodes de modélisation des efforts

Au vu des différentes approches citées, la modélisation de la coupe apparaît comme une étude très complexe. En effet, c'est au travers d'une longue succession de recherches initiées par [Taylor, 1906] que la modélisation de la coupe en usinage a pu évoluer d'analytique à géométrique [Merchant, 1945]. Puis, toujours par ajout au modèle de base [Laheurte, 2004], [Dargnat, 2006], le modèle a évolué jusqu'à pouvoir développer des modèles numériques [Vazquez et al., 2014]. Aujourd'hui, trois types de modélisations restent les plus utilisées : la modélisation analytique, la modélisation expérimentale et la modélisation numérique.

Dans la suite de ce chapitre, les avantages et inconvénients de ces différents modèles sont présentés.

#### I.6.1.2.1. Approche analytique

Le modèle analytique s'est forgé sur de nombreuses hypothèses et au travers de la géométrie, il définit les principaux angles d'usinage puis l'épaisseur du copeau par des équations d'équilibre [Merchant, 1944]. Par la suite, il intègre les notions d'érouissage et une notion thermomécanique

jusque-là ignorée [Oxley, 1976]. C'est un modèle robuste qui mène directement aux actions de coupe. Il permet également de caractériser les phénomènes internes comme les champs de déformations et la température [Yousfi, 2015]. Cependant, cette modélisation nécessite une bonne connaissance du matériau au travers de nombreux essais complexes à mettre en œuvre ainsi que la connaissance des différentes lois de frottements entre les faces de dépouilles et la matière usinée. Certaines hypothèses peuvent également être source d'erreurs selon les configurations d'usinage.

#### ***I.6.1.2.2. Approche numérique***

Avec le développement des moyens informatiques, l'essor des modèles numériques a été facilité. Ce type de modèle permet d'appréhender les phénomènes de coupe selon différentes discrétisations comme les différences finies [Gilormini, 1982] ou les éléments finis. Cette méthode a l'avantage de permettre la résolution des équations que les approches analytiques ne savent pas résoudre. Cependant elle est souvent freinée par le temps de calcul très long et de même que pour le modèle analytique, elle se base sur la connaissance des différentes lois de comportement adaptées à la coupe, des lois de frottement et des caractéristiques thermiques.

#### ***I.6.1.2.3. Approche expérimentale***

Les modèles expérimentaux sont plus aisés à mettre en œuvre. Ils se focalisent sur l'obtention de valeurs macroscopiques à travers l'étude des efforts de coupe [Laporte, 2005], sans pouvoir réellement rentrer dans la compréhension des phénomènes internes. Les résultats de ces modèles sont tous issus d'essais de coupe et sont fonction d'un paramètre particulier noté « coefficient spécifique de coupe », dépendant de paramètres tels que l'angle de coupe, la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe [Poulachon, 1999]. Les modèles expérimentaux s'affranchissent de la connaissance des phénomènes physiques. Ils mettent en avant les paramètres influents dans l'évolution des actions de coupe et des contraintes résiduelles [Outeiro et al., 2006]. C'est pourquoi ils sont souvent utilisés afin de caractériser un procédé peu connu ou maîtrisé.

### **I.6.2. Application à la coupe textile**

Dans ce chapitre, certaines approches de modélisation ont été énumérées. Le travail présenté dans ce manuscrit cherche à modéliser les actions de coupes dans la découpe du tissu par l'action d'une lame vibrante. C'est un procédé très différent de l'usinage métallique cependant, les règles de modélisation y sont tout à fait applicables. Face à l'inconnue que représente ce procédé de fabrication, une modélisation expérimentale par la mesure des efforts de coupe semble nécessaire. Une approche macroscopique prenant en compte l'ensemble de la machine et sa cinématique permettra de mieux cerner les paramètres machines influençant les efforts de coupe et s'orientera vers une approche plus mésoscopique avec l'analyse de la géométrie de l'outil. De manière analogue à l'usinage métallique, les mesures de la température [Davies et al., 2007] et des efforts [Huang et al., 2007] apporteront des informations déterminantes sur la compréhension du procédé de découpe.

## I.7. Structuration du manuscrit de thèse

La structuration des travaux de cette thèse sont décrits par la figure I-30.

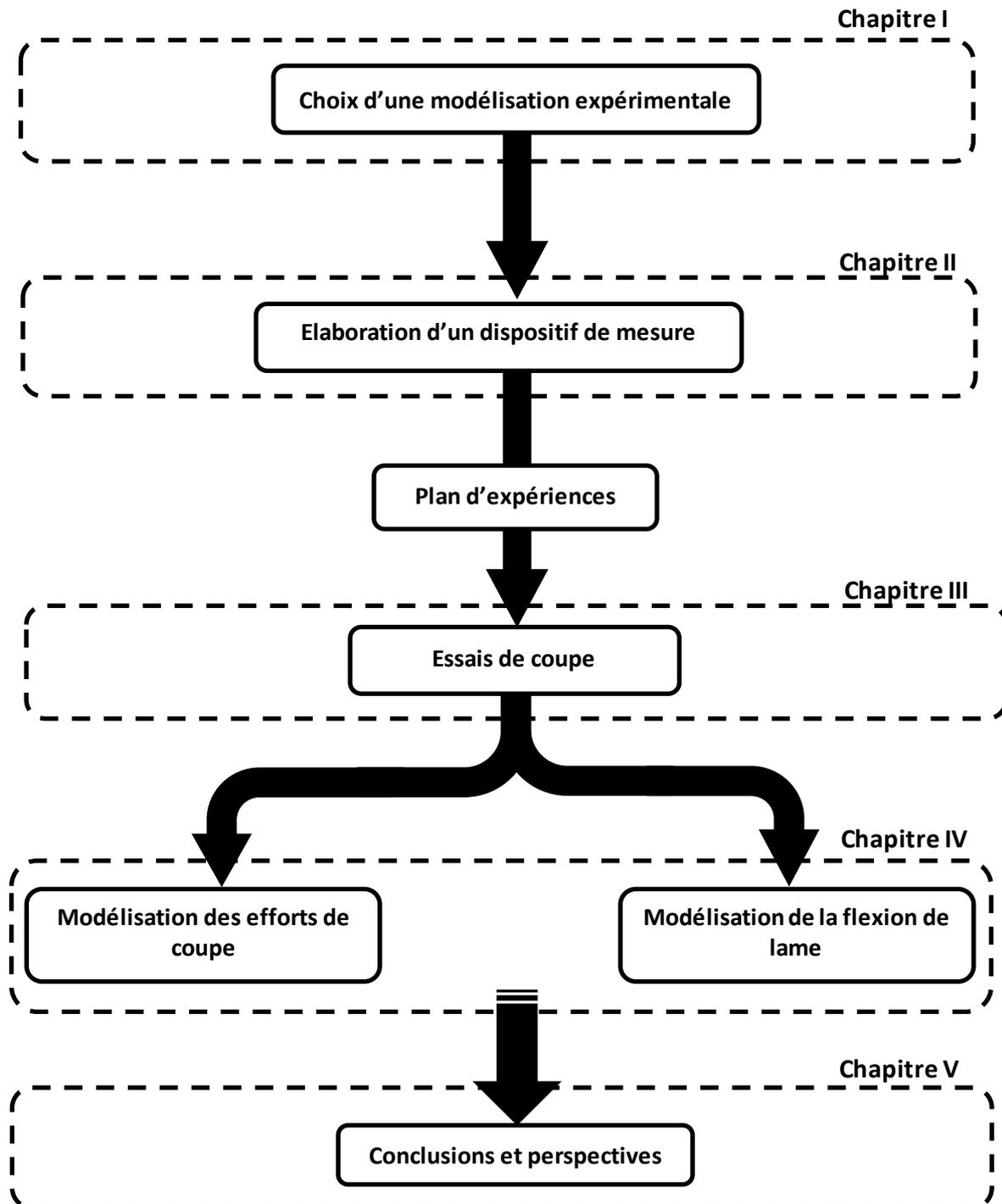


Figure I-30 : Cheminement de l'étude.

Le chapitre II présentera l'instrumentation conséquente qu'il a été nécessaire de mettre en place sur une machine de découpe textile afin de pouvoir mesurer les actions de coupe. Il décrit la conception d'un dynamomètre embarqué à cinq composantes et la mise en place d'un capteur de température. Par la suite les étapes d'étalonnage et de conditionnement du signal sont précisées.

Dans le chapitre III, la démarche expérimentale par plans d'expériences sera détaillée permettant d'identifier les facteurs de coupe influant sur les efforts et la température de la lame.

Le chapitre IV proposera une première modélisation des actions de coupe en se basant sur les résultats de la démarche expérimentale.

Enfin, dans un dernier chapitre, les conclusions de ce travail et les perspectives de travaux futurs seront proposées.



# Chapitre II

---

## INSTRUMENTATION D'UNE TETE DE COUPE

---



Un état de l'art sur les différentes approches de modélisations de coupe dans l'usinage métallique, a été présenté dans le chapitre précédent. Afin de pouvoir développer un modèle expérimental des actions de coupe, leurs mesures physiques par différents capteurs sont nécessaires. Elles permettraient de proposer un pilotage de la machine à partir de la modélisation du procédé de découpe.

Ce chapitre montre la démarche de choix de l'instrumentation requise afin de mesurer les efforts et la température de coupe.

De façon à pouvoir choisir un dispositif de mesure adapté, il est important de rappeler l'état de l'art de la mesure d'effort dans le domaine de l'usinage ou de la robotique.

Ensuite, après avoir choisi une technologie et une architecture de mesure adaptée à l'étude, l'instrumentation d'une tête de coupe industrielle sera détaillée. Elle comporte la conception d'un dynamomètre à cinq composantes installé dans le pied presseur. Contrairement aux dynamomètres à six composantes usuellement utilisés dans la mesure des efforts de coupe en usinage des métaux, la mesure des efforts dans le cadre de la découpe de textile se heurte à un problème de mesure de l'axe vertical. C'est pourquoi, cet axe doit être mesuré par un dispositif supplémentaire tout comme d'autres mesures qui seront présentées par la suite.

## II.1. Mesure d'actions mécaniques

Dans ce chapitre, un aperçu non exhaustif des moyens utilisables dans la mesure des actions mécaniques applicables dans la coupe du tissu est présenté. Ils sont classés sous deux catégories : les mesures indirectes et les mesures directes.

### II.1.1. Mesure indirecte par lecture des courants moteurs

A l'instar des machines numériques modernes, le découpeur textile industriel surveille et adapte constamment le courant des moteurs d'avance des différents axes. L'intensité du courant moteur est obtenue grâce à une modélisation par blocs des axes [Kim, 1996]. Cette méthode, limitée par son modèle, est améliorée grâce à un filtre linéaire minimisant la variance de la mesure qui estime le couple moteur dans un environnement bruyé [Kim, 1999b]. Les efforts de coupe obtenus sont proches de la réalité cependant, la modélisation de coupe obtenue n'est valable que pour une configuration de machine type. Enfin, des études similaires sont réalisées dans le cas du tournage [Li, et al, 2000] faisant état d'une très bonne corrélation avec des mesures expérimentales (5% d'erreur).

La mesure indirecte des efforts par lecture de courants moteurs est utilisée dans l'industrie textile sans pour autant faire l'objet d'une recherche particulière. Cependant, le niveau de bruit de l'environnement de coupe, dû aux nombreux moteurs et vibrations, ainsi que les liaisons mécaniques favorables aux pertes énergétiques (courroie lisse) font que la précision de cette mesure est très en deçà des objectifs industriels actuels.

### II.1.2. Mesure directe

Dans ce cas de mesure, un élément intermédiaire comme un dynamomètre est intégré dans la chaîne machine-matière afin de mesurer directement les efforts de coupe. Il est, soit placé entre l'outil et la machine, soit entre la matière et la machine. Les différents dynamomètres peuvent être classés suivant la nature et le nombre de corps d'épreuve qui le composent. Concernant leur nature, deux technologies principales sont utilisées : les jauges résistives et les capteurs piézoélectriques. Le choix de la technologie conditionne l'architecture du dynamomètre.

#### II.1.2.1. Dynamomètre à base de jauges de déformation

Les jauges de déformation résistives fonctionnent par le fait que la résistance d'un fil à section constante est de la forme  $R = \rho \cdot \frac{L}{S}$  à température fixée.

- R, résistance [ $\Omega$ ],

- $\rho$ , résistivité du conducteur [ $\Omega \cdot m$ ],
- L, longueur du fil [m],
- S, section du fil [ $m^2$ ].

Si on allonge le fil de  $\Delta L$ , sa section diminue de  $\Delta s$  selon l'effet de Poisson. Cela va entraîner une augmentation de la résistance de  $\Delta R$  selon la relation :

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta L}{L} \tag{Eq. 1}$$

Le facteur « k », appelé facteur de jauge, est un coefficient de proportionnalité entre la déformation et la modification de résistance.

Cette relation est à la base de l'extensométrie qui se pratique en montant quatre jauges collées sur un support en pont de Wheatstone permettant d'obtenir un signal électrique dès que d'infimes déformations se produisent. Les dynamomètres à base de jauges de déformations sont bien souvent organisés selon deux types de structures.

### II.1.2.1.1. Structures hexapode

Historiquement appelées plateforme de Stewart [Stewart, 1965], les structures hexapodes sont des systèmes à six degrés de liberté obtenues en reliant deux plaques par six barres sur rotules (figure II-1). Des jauges de déformation résistives placées sur chaque bras mesurent les déformations et flexions de celles-ci pour en déterminer les contraintes mécaniques.

Par la suite, le modèle est optimisé en travaillant sur le positionnement des jauges et la fabrication du dynamomètre : le pourcentage d'erreur descend en-dessous des 10 % [Dwarakanath, et al., 2001]. La structure devient encore plus précise du fait de l'action d'une vis de précontrainte venant limiter le jeu interne [Hou, et al., 2009]. D'autres architectures utilisent des mécanismes parallèles flexibles qui allient sensibilité et robustesse [Liang, 2013].

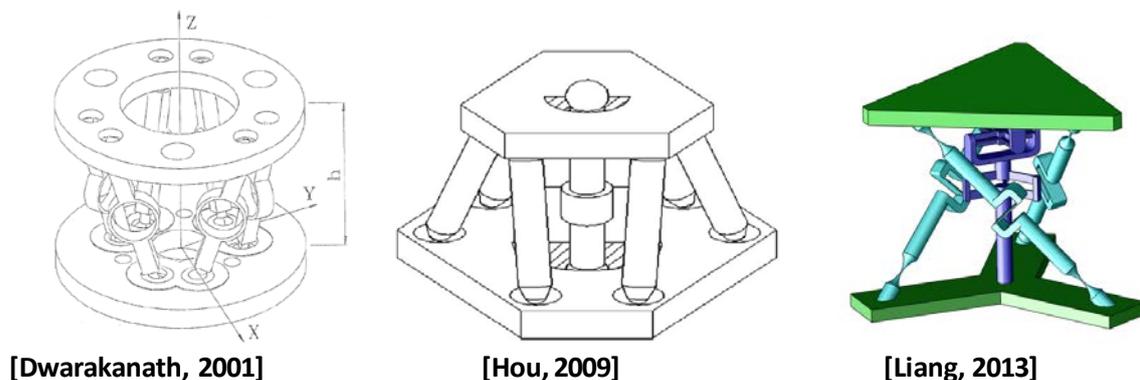
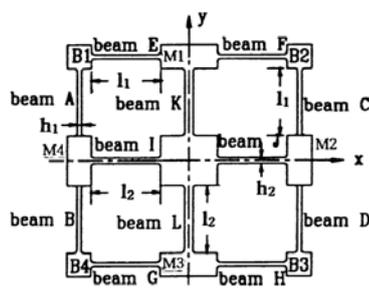


Figure II-1 : Plateformes de Stewart.

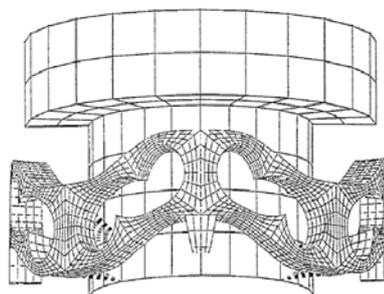
### II.1.2.1.2. Structures avec corps d'épreuve intégré

Dans ce cas de figure, il s'agit de structures assemblées où les jauges de déformations sont placées sur des éléments minces positionnés dans le système mécanique pour pouvoir mesurer les déformations dans les différentes directions [Couéard, 1993].

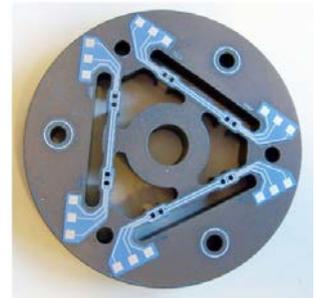
Ces structures ont des formes et des dimensions qui permettent de satisfaire des exigences d'intégration sévères. Toutefois, certaines architectures sont souvent utilisées (figure II-2) : par exemple, un bloc central relié à un bâti rectangulaire par des éléments minces instrumentés [Kim, 1999]. Le placement symétrique des jauges assure une bonne lecture des efforts. Dans une étude ultérieure, des calculs par éléments finis définissent les zones de déformations maximales des portions minces afin d'indiquer l'emplacement idéal des jauges de déformation. D'autres géométries, plus petites, permettent la mesure d'efforts autour d'un axe comme à l'intérieur d'un stylo [Diddens, 1995]. Dans une autre approche, il est possible de présenter le capteur développé par [Jacq, et al., 2010] pour la rééducation du poignet où l'effort appliqué par un levier central sera mesuré par un dispositif à trois branches et trois poches, permettant l'application aisée de jauges sur un même plan au-dessus du corps d'épreuve.



[Kim, 1999]



[Didden, 1995]



[Jacq, et al., 2009]

Figure II-2 : Dynamomètres à 6 composantes à jauges.

### II.1.2.2. Dynamomètre à base de capteur piézoélectrique

De nombreux cristaux comme le quartz génèrent une charge électrique lorsqu'on les soumet à une charge mécanique. Cette charge électrique est exactement proportionnelle à la force qui s'exerce sur le cristal. Ce phénomène physique est connu sous le nom d'effet piézoélectrique. La technique de mesure piézoélectrique est prédestinée aux tâches de mesure présentant des exigences extrêmes concernant la géométrie du système, les plages de températures et le comportement dynamique des efforts.

Industriellement, les cristaux sont taillés de sorte à pouvoir capter un effort selon un axe bien précis.

Les capteurs piézoélectriques correspondent à un besoin de réactivité de plus en plus élevées et sont souvent utilisés dans l'usinage à grande vitesse ou la robotique. Les platines de mesure à jauges de déformation n'offrant pas une raideur suffisante, on leur préfère de plus en plus le capteur piézoélectrique, beaucoup plus compact et rigide. Cependant, son coût reste élevé et son utilisation est souvent réduite à des activités de recherche.

#### II.1.2.2.1. Principales structures de dynamomètre piézoélectriques

L'architecture des dynamomètres piézoélectriques reste assez similaire d'une application à l'autre. Elle se caractérise par l'emprisonnement de plusieurs cellules piézoélectriques entre deux éléments rigides, l'une fixe et l'autre subissant les efforts. On les trouve dans la robotique pour la manipulation de masses importantes où des architectures en « carré » sont utilisées [Li, 2009] (figure II-3), prenant en compte les couplages tout en les minimisant.

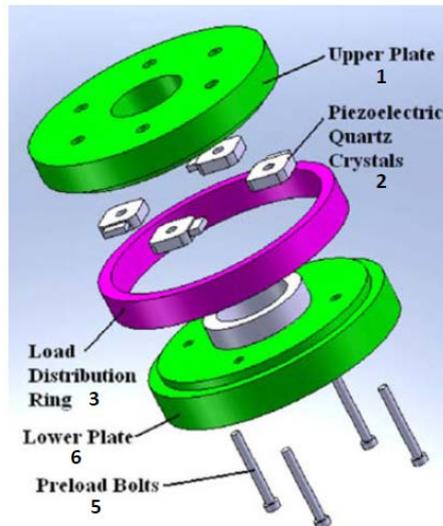


Figure II-3 : Dynamomètre à 6 composantes piézoélectriques, [Li, 2009].

La mesure d'effort en usinage requiert des platines dynamométriques possédant une forte dynamique. C'est pourquoi les capteurs piézoélectriques remplacent les capteurs à jauges dans ces applications. Il est possible de trouver sur catalogue de nombreuses platines dynamométriques de tailles différentes allant de 250 N à 30 kN [Kistler, 2009], [TSR, 2010].

Il existe deux solutions pour la mesure d'efforts en usinage : le dynamomètre fixe mesurant les efforts de réactions de la pièce, et le dynamomètre rotatif, intégré dans la broche. Cependant, la majorité de ces capteurs ne mesurent pas les moments de coupe. Suite aux travaux de [Couétard, 1993, 2000], des dynamomètres à six composantes utilisant des capteurs uni-axiaux sont de plus en plus fréquents et deviennent plus aboutis avec l'usage de capteurs piézoélectriques triaxiaux [Albert, 2010] (figure II-4).

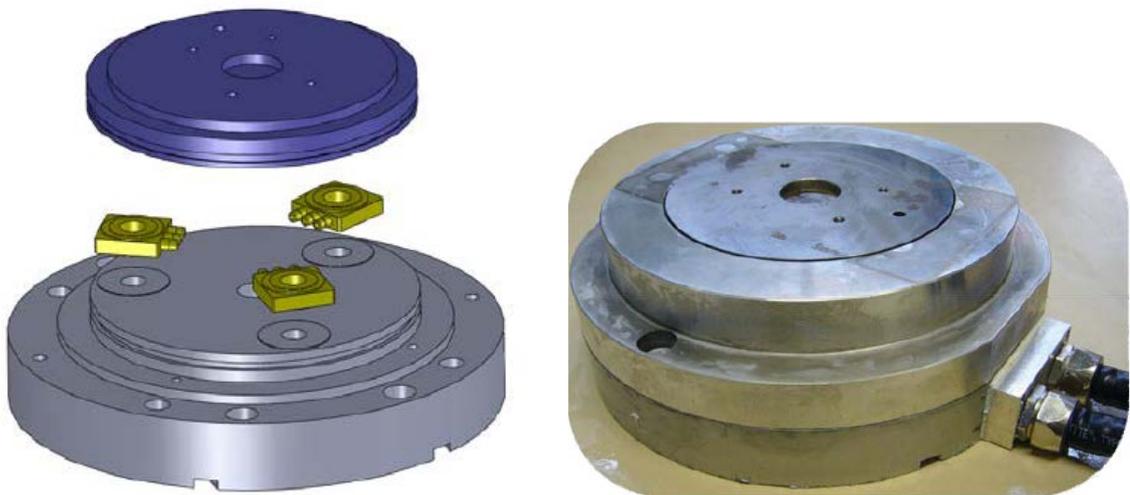


Figure II-4 : Dynamomètre à 6 composantes avec capteurs piézoélectriques triaxiaux, [Albert, 2010].

### II.1.3. Conclusion

Le but de cette étude est de caractériser les efforts de coupe pendant la découpe d'une certaine épaisseur de *denim*. Le moyen de mesure à développer doit être capable de mesurer cinq composantes du torseur des actions mécaniques. La mesure de la sixième composante (l'effort vertical) est rendue difficile par le mouvement de translation sans frottement opéré par la lame à travers le pied presseur.

La figure II-5 représente la lame maintenue par les cinq galets présents dans le pied presseur. Ces galets font office d'appuis et par leur intermédiaire, l'effort sera transmis au dynamomètre. La translation suivant Z se faisant sans contrainte, cet axe ne peut pas être mesuré par le dynamomètre.

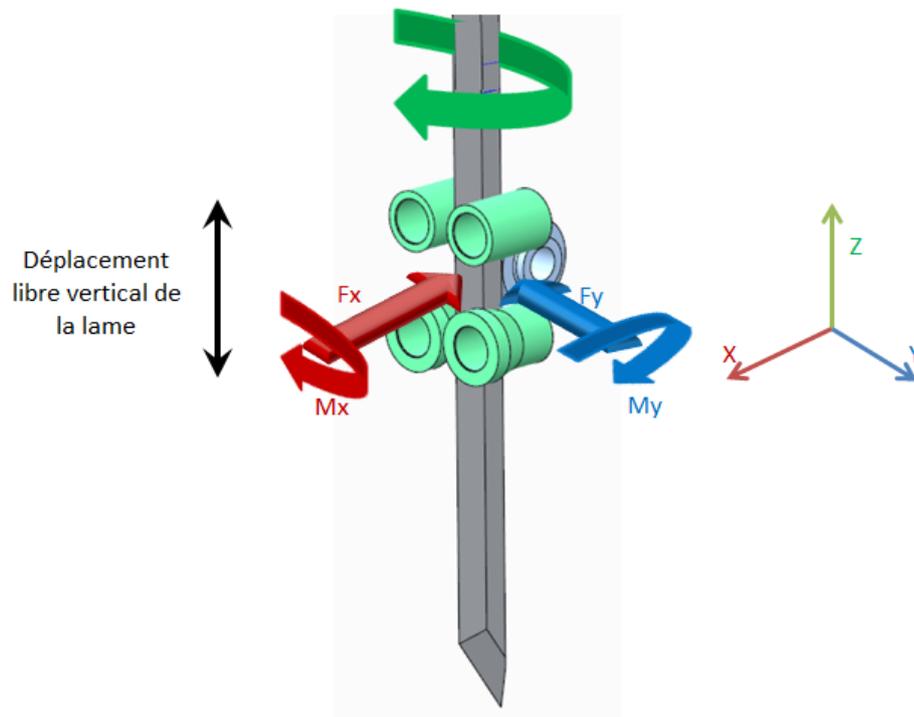


Figure II-5 : Axes de mesures du dynamomètre.

Le développement du dynamomètre est une étape soumise à de nombreuses exigences. Les platines de Stewart ne correspondent pas au besoin car leur raideur n'est pas suffisante et la qualité de coupe risque d'en pâtir. Les capteurs à jauges extensométriques forment un dynamomètre précis mais la grande fréquence des actions mécaniques appliquées à la lame risque de ne pas être parfaitement retranscrite par cette technologie, à cause d'un temps de réponse trop important. La solution qui paraît répondre aux besoins de cette étude semble être l'usage de capteurs piézoélectriques. En effet, leur grande rigidité n'aura aucune influence sur la qualité de coupe et leur précision dynamique assurera la retranscription de phénomènes non perçus par des capteurs à jauges. Le point négatif de ces capteurs est sans doute la non linéarité du signal de sortie sur des efforts maintenus. Mais dans un contexte de recherche, l'étude portera principalement sur des mouvements très courts et rapides. Le moyen de mesure se rapprochant le plus des besoins spécifiques de l'étude est le dynamomètre conçu par [Albert, 2010] (figure II-4). Il devra être adapté afin de pouvoir être contenu dans le pied presseur actuel de la machine de découpe. Les spécifications fonctionnelles de ce capteur dédié à la mesure d'actions mécaniques en fraisage étant trop élevées, elles devront être remises aux dimensions de l'étude. Contrairement à l'usinage métallique, l'ordre de grandeur des actions de coupe à mesurer reste inconnu. Cependant, il est possible de délimiter les grandeurs à mesurer grâce à la limite à la rupture de la lame de coupe estimée à moins de 400 N pour l'axe le plus favorable. Les spécifications fonctionnelles du dynamomètre à développer peuvent se décliner de la façon suivante :

- étendue de mesure
  - o force :  $F_{x,y,z} \pm 500 \text{ N}$ ,
  - o moment :  $M_{x,y,z} / O \pm 50 \text{ Nm}$ ,

- fréquence propre  $\geq 2000$  Hz,
- ne doit pas gêner le fonctionnement de la machine ni par sa position ni par ses connectiques et câblage,
- doit pouvoir intégrer le pied presseur et laisser passer la lame en son centre.

Le dynamomètre n'est pas le seul équipement à s'intégrer dans la tête de coupe. Il a été précisé (cf. I.2.2.) que la lame était maintenue par plusieurs galets présents dans le guide lame au-dessus du pied presseur. Afin de ne négliger aucune information susceptible d'apporter une connaissance supplémentaire, ces galets sont également équipés d'un capteur d'effort afin de mesurer l'effort que la lame applique sur chacun d'eux.

Enfin, pour mesurer l'axe vertical Z, axe manquant du dynamomètre, les deux vérins actionnant la descente du boîtier vibration et donc de la lame sont également équipés de capteurs d'efforts.

Afin de faciliter la compréhension du dispositif complet, le placement des différentes mesures d'effort sur la tête de coupe est présenté sur la figure II-6.

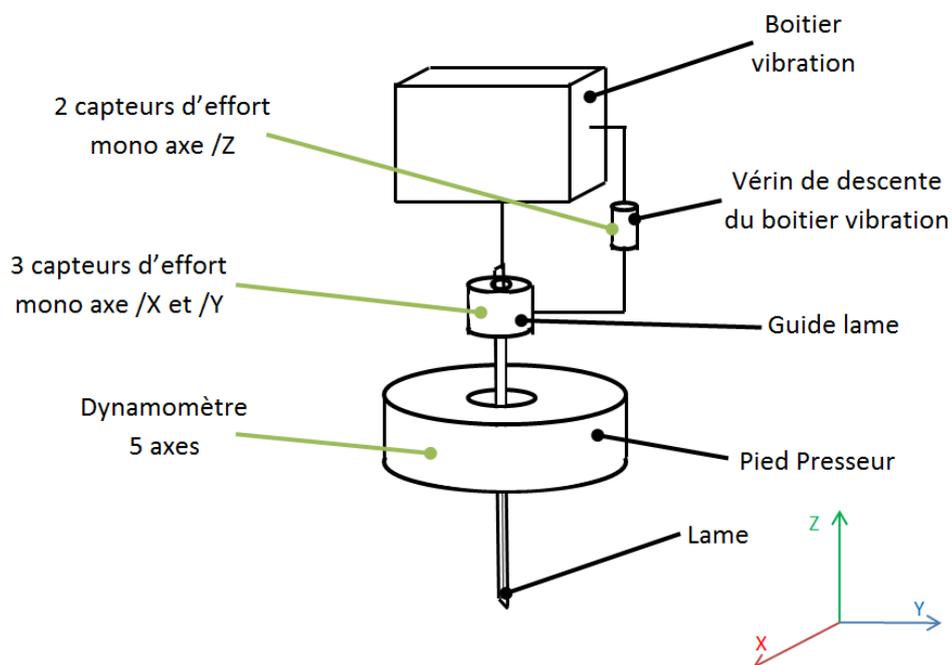


Figure II-6 : Placement des différentes mesures sur la tête de coupe.

La suite de ce chapitre va détailler l'instrumentation de la tête de coupe et motiver le choix des corps d'épreuve lors de l'intégration finale.

## II.1.4. Choix des corps d'épreuve retenus

### II.1.4.1. Dynamomètre

Suite à l'étude bibliographique, le corps d'épreuve retenu pour la conception du dynamomètre à cinq composantes est un capteur piézoélectrique. Sa compacité facilite son intégration et il permet la mesure des efforts suivant trois directions (X, Y et Z), ce qui limitera le nombre de corps d'épreuve à utiliser. Le capteur ainsi présenté est produit par PCB piezotronics sous la dénomination [PCB 260A01].

Les caractéristiques spécifiées par le constructeur sont données dans le tableau II-1.

Sensibilité /Z	0.56 mV/N
Sensibilité /X, Y	2.25 mV/N
Etendue de mesure /Z	4.45 kN
Etendue de mesure /X, Y	2.22 kN
Force maximale admissible /Z	5.87 kN
Force maximale admissible /X, Y	2.94 kN
Précharge	22.5 kN

Tableau II-1 : Caractéristiques techniques des capteurs piézoélectriques tri axes retenus.

### II.1.4.2. Autres mesures d'efforts

Le choix de la technologie reste identique pour les autres mesures d'efforts : les galets guidant la lame et les vérins de descente du boîtier vibration. Elle privilégie l'usage de corps d'épreuve piézoélectrique pour faciliter l'intégration dans la machine existante. Les capteurs retenus pour cet usage proviennent du même fabricant sous le code produit [PCB 208C03].

Ils peuvent se visser directement entre deux composants et travaillent aussi bien en compression qu'en traction sans précharge.

Les caractéristiques spécifiées par le constructeur sont données dans le tableau suivant II-2.

Sensibilité	2.25 mV/N
Etendue de mesure	2.224 kN
Force maximale admissible (compression)	13.5 kN
Force maximale admissible (traction)	2.224 kN

Tableau II-2 : Caractéristiques techniques des capteurs piézoélectriques mono axes retenus.

## II.2. Mesure de la température

La température de la lame est, au même titre que les efforts de coupe, un indicateur de la qualité des pièces découpées. La connaissance de cette température, pendant la coupe, permettrait de palier les problèmes de fonte de matière sur les bords découpés de certains tissus (cf I.4.3.). Il s'agit d'une mesure délicate qui n'a pas pour vocation immédiate une réelle compréhension de tous les phénomènes mis en jeu (conditions de contact et de frottements). L'intégration de la mesure de la température sert davantage à vérifier la faisabilité technique de cette installation et permettra une étude qualitative de l'évolution de la température de la lame en fonction des différents paramètres machines (*données confidentielles supprimées*).

Les caractéristiques du capteur sont données dans le tableau II-3.

-	-
-	-
-	-

Tableau II-3 : Caractéristiques techniques du capteur de température (*données confidentielles supprimées*).

## **II.3. Instrumentation d'une tête de coupe**

La tête de coupe à instrumenter est un système déjà très optimisé : libérer de l'espace est un souci majeur. Il a cependant été nécessaire de concevoir un dynamomètre dédié à cinq composantes pour garantir son intégration, sans restreindre les fonctions initiales du découpeur.

De plus, les autres galets composant la chaîne cinématique de la lame sont instrumentés avec des capteurs d'efforts. Dans ce chapitre, la conception des différents points de mesure et leur intégration sont présentées pour ensuite décrire leurs procédés d'étalonnage et les chaînes de traitement de l'information associées.

### **II.3.1. Paramètres déjà connus et ne nécessitant pas d'instrumentation supplémentaire**

Le découpeur textile est une machine déjà équipée de nombreux capteurs. Il est possible de connaître toutes les informations telles que les consommations électriques des moteurs, la dépression générée par l'aspiration dans le châssis, la position de la lame dans le plan (XY) et la hauteur du matelas découpé.

Il est également équipé d'un capteur de flexion en série. Ce capteur ne peut pas être conservé car il doit céder sa place au dynamomètre.

### **II.3.2. Points de mesure dans le guide lame**

Pendant la coupe, la lame est en appui sur différents galets. Afin de ne perdre aucune information, il conviendrait de pouvoir équiper chaque galet d'un moyen de mesure d'effort. Cependant, il apparaît que tous les galets ne contribuent pas de la même façon à la reprise de l'effort. Il faut donc s'intéresser aux composants les plus sollicités.

Du point de vue de la déformée, lors d'une coupe courbe, la lame vient tout d'abord en contact avec les galets inférieurs (dans le pied presseur) puis elle va fléchir pour s'appuyer successivement sur les galets supérieurs. Ainsi, la majorité des efforts sont encaissés par les galets inférieurs (figure II-7).

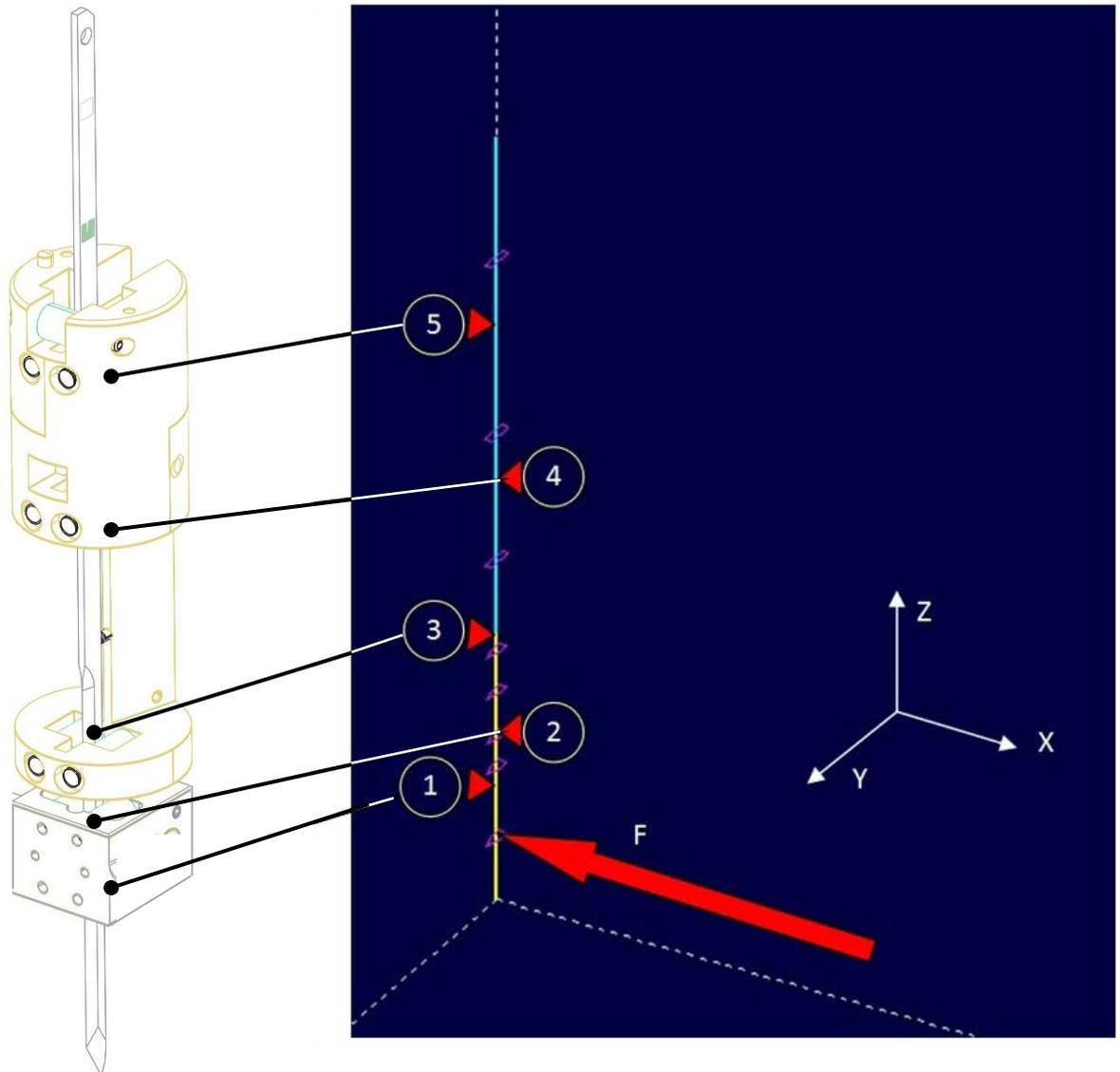


Figure II-7 : Galets en contact lors d'un effort latéral (cas d'une coupe d'un matelas de 50 mm).

Une analyse est faite avec le logiciel **[RDM Version 6]** où une déformée de 5 mm est appliquée à la lame en flexion. Le calcul permet de définir la contribution des galets dans la reprise de l'effort. Ces résultats ont montré (cf I.4.2.2) que la contribution des galets 4 et 5 est négligeable par rapport aux galets inférieurs : cet écart s'accroît avec de faibles efforts.

La maintenance effectuée sur un grand nombre de machines ne fait pas état d'usure de ces galets contrairement aux galets 3. Cette absence d'usure renforce l'hypothèse concernant leur faible impact sur la coupe.

Par contre, le couple de galets n°3 (en bas du guide lame) peut apporter des informations supplémentaires à la mesure. Il convient donc de l'équiper d'un capteur d'effort.

Si la même étude est faite pour un effort frontal, la lame est alors en appui sur 3 galets (cf I.4.2.1).

Lors d'un effort frontal, la lame s'écarte du galet central qui ne contribue pratiquement pas à la reprise de l'effort.

Le galet inférieur contribue aux efforts lus par le pied presseur. Il n'est donc pas nécessaire de mesurer les efforts encaissés par le galet central. Par contre, le galet supérieur peut apporter des informations non

négligeables même si son intégration est rendue difficile à cause du manque de place et de sa position interne au mécanisme.

### II.3.3. Conception d'un dynamomètre à cinq composantes

La conception d'un dynamomètre à cinq composantes nécessite l'utilisation de plusieurs capteurs triaxiaux. Les travaux de [Albert, 2010] montrent l'architecture d'un dynamomètre utilisant 3 capteurs piézoélectriques de même facture. Cet agencement des capteurs répartis à 120° assure une bonne répartition des charges et est utilisé dans le dynamomètre dédié à cette étude. Cependant, certaines contraintes d'intégration inhérentes aux machines de découpe complexifient sa conception.

#### II.3.3.1. Contraintes d'intégration dans le pied presseur

La première contrainte dans l'intégration des trois capteurs piézoélectriques retenus est d'ordre géométrique. Le pied presseur doit obligatoirement comporter un espace central destiné au passage de la lame et de ses cinq galets. Idéalement, l'équipement intégrant les galets doit être démontable pour pouvoir assurer la maintenance : changement de galets usés, casses de lames...

L'emplacement des deux colonnes de guidage vertical doit aussi être conservé.

Le pied presseur actuel ne peut pas accueillir les trois capteurs piézoélectriques et le capteur de température. Pour répondre au cahier des charges fixé, un nouveau pied presseur a dû être conçu (figure II-8).

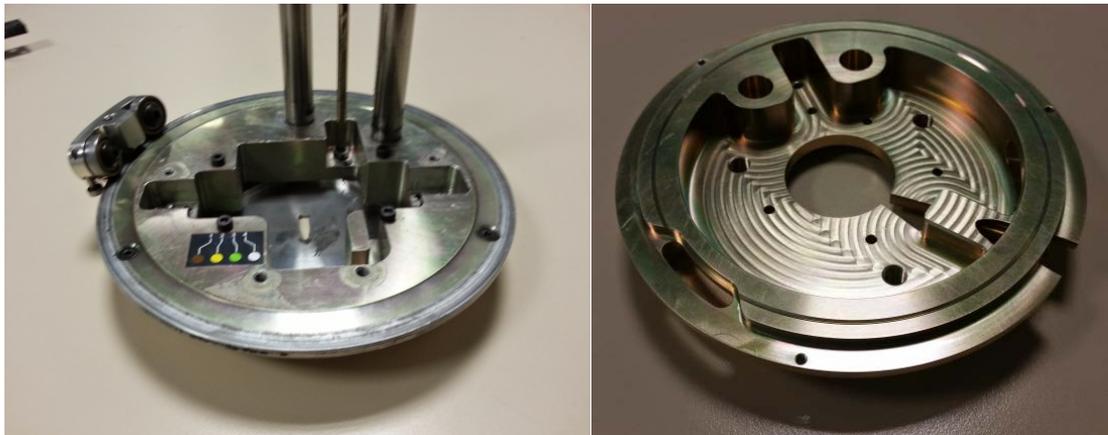


Figure II-8 : Modification du pied presseur.

#### II.3.3.2. Intégration globale du dynamomètre

Les trois capteurs triaxiaux ont été répartis à 120°, équidistants du centre du dynamomètre. Les axes Z sont dirigés vers le bas, les axes Y sont dans le prolongement des connecteurs et sont dirigés vers l'extérieur pour faciliter le passage des câbles et les axes X sont parallèles aux rayons du dynamomètre (figure II-9).

Cette disposition permet une bonne intégration des capteurs dans l'environnement du pied presseur tout en garantissant une bonne raideur de celui-ci. Elle privilégie également la sensibilité dans le sens de la flexion latérale de la lame. Enfin, ce placement de capteur possède un avantage : il permet l'installation du capteur de température entre les capteurs 1 et 2.

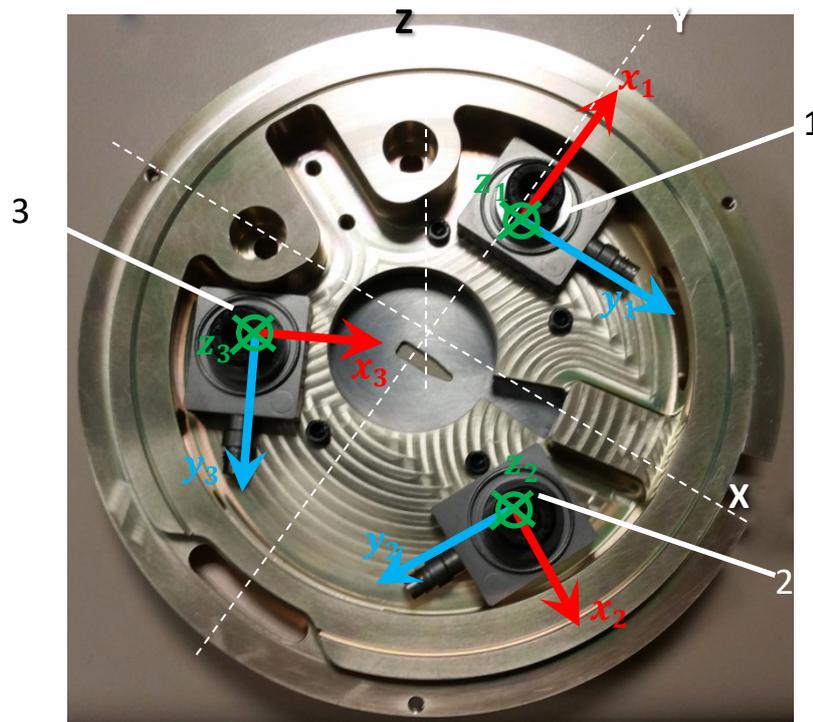


Figure II-9 : Intégration des capteurs tri-axes dans le pied presseur.

Une plaque supérieure vient fermer le dynamomètre intégré dans le pied presseur (figure II-10). Elle laisse passer trois vis pour pré-charger les capteurs en les comprimant entre la plaque supérieure et le fond du pied presseur. Cette plaque définit aussi l'emplacement des galets et assure leur démontage. Le porte galet reprend la configuration des machines existantes à la différence qu'il est cylindrique.



Figure II-10 : Dynamomètre fermé et porte galet intégré.

L'ajustement entre la plaque supérieure et le porte galet assure la bonne transmission des efforts de la lame sur les capteurs (Figure II-11).

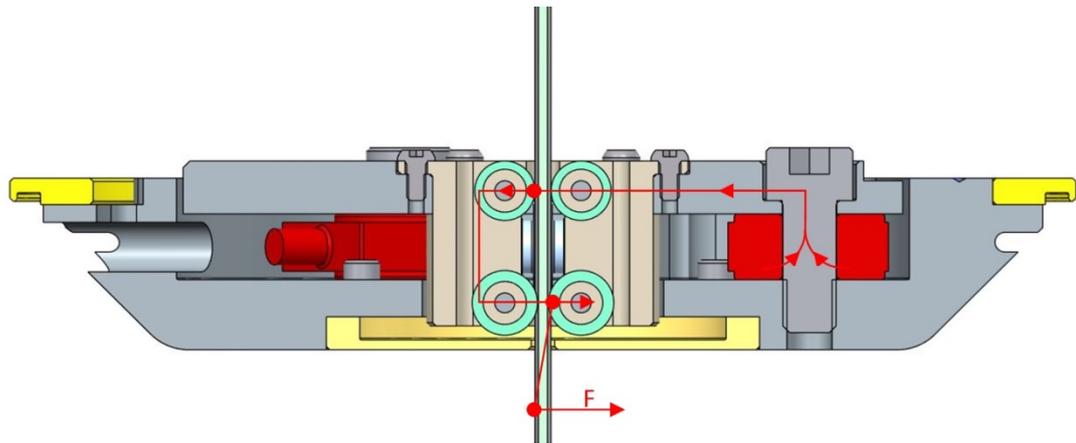


Figure II-11 : Vue en coupe du dynamomètre et transmission d'un effort  $F$ .

Ce montage possède un avantage : outre le démontage simplifié du porte galet pour une maintenance facilitée, il permet de changer celui-ci pour étudier différents profils de lames.

### II.3.3.3. Etude vibratoire

La tête de coupe est un environnement soumis à de très nombreuses vibrations, dont la principale étant celle de la lame. Bien qu'elles possèdent toutes de basses fréquences, malgré les contraintes géométriques, le pied presseur a été conçu en essayant de maximiser sa fréquence propre afin de ne pas perturber la mesure des efforts ou de la température.

Le logiciel de calcul [**Creo Simulate | PTC**] a permis de déterminer cette fréquence propre. Afin de simplifier le calcul, le dynamomètre est considéré fixé sur sa partie inférieure et ses liaisons internes infiniment rigides. Cette hypothèse est acceptable aux vues des fortes précharges appliquées sur le capteur. Après une analyse modale par éléments finis, les premières fréquences propres sont déterminées (figure II-12). Les premières déformations correspondent à des flexions de la plaque supérieure, alternées à 5008Hz [a] puis combinées à 5380 [b]. Ces valeurs, assez élevées, témoignent de la bonne raideur du dispositif. Ainsi, la structure du dynamomètre aura une influence négligeable sur les mesures au niveau de la zone de coupe ainsi que sur les pièces découpées.

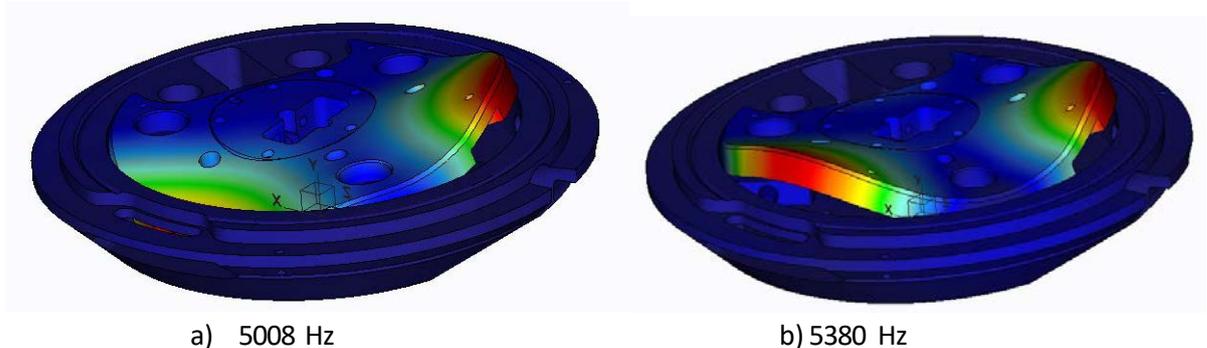


Figure II-12 : Déformées du dynamomètre à ses fréquences propres.

### II.3.3.4. Conclusion

La conception du dynamomètre a été réalisée en suivant le cahier des charges fixé initialement. La géométrie globale a principalement été guidée par des exigences d'intégration. Pour autant, l'assemblage final fait état d'une très grande raideur et est prêt à mesurer les efforts de coupes pendant la coupe de textile.

### II.3.4. Mesure de la température de la lame

*(Données confidentielles supprimées).*

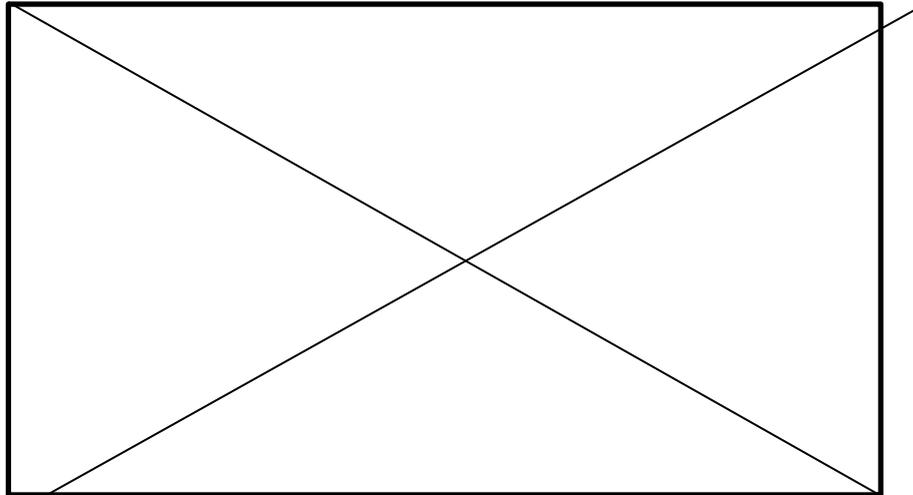


Figure II-13 : Intégration du capteur de température (*données confidentielles supprimées*).

### II.3.5. Mesures d'efforts dans le guide lame

Afin d'équiper les galets maintenant la lame au-dessus du pied presseur, plusieurs pièces ont également subi d'importantes modifications. Elles ont permis de mesurer les efforts radiaux encaissés par les deux galets inférieurs et le galet supérieur.

L'effort vertical est également récupéré en mesurant l'effort de descente du boîtier vibration animé par deux vérins. Les précisions de ces instrumentations sont données en annexe confidentielles A.II.1.

### II.3.6. Conclusion

Chaque paramètre retenu dans l'étude de sensibilité de la machine a pu être déterminé grâce à un moyen de mesure adéquat. Cependant, l'information délivrée par ces capteurs doit pouvoir être récupérée sans perte sur un système d'acquisition satellite alors que la tête de coupe, pendant son utilisation, est en mouvement constant : le pied presseur a une possibilité de rotation sans limitation angulaire.

Un système de transmission particulier a dû être mis en place pour traiter un maximum d'informations sur place et renvoyer le traitement le plus rapidement et le plus fidèlement possible.

## II.4. Etalonnage du dynamomètre à six composantes

L'étalonnage est une opération cruciale dans le développement d'un dynamomètre. Il va donner du sens au positionnement des différents axes de mesure des trois capteurs triaxiaux et garantir la fiabilité des mesures réalisées. L'étalonnage d'un tel dispositif consiste à établir une matrice d'étalonnage qui permet d'interpréter les différentes tensions de mesure renvoyées par les capteurs piézoélectriques en efforts mécaniques.

Dans un premier temps, il convient de réaliser la matrice de calibration théorique sensible à la géométrie et l'orientation des capteurs.

Puis dans un second temps, la démarche expérimentale permettra d'affiner cette matrice vers la matrice d'étalonnage réelle.

### II.4.1. Matrice d'étalonnage théorique

La réflexion concernant la matrice d'étalonnage théorique se situe dans un contexte où toutes les géométries sont supposées parfaites et le positionnement idéal des axes. Il convient de représenter dans l'espace (X,Y,Z) le positionnement des trois capteurs triaxiaux afin d'exprimer le tenseur des actions mécaniques qui leur est rattaché.

A chaque capteur  $i$  est rattaché un repère orthonormé  $(\vec{x}_i, \vec{y}_i, \vec{z}_i)$  en son centre  $O_i$ . Le torseur des actions en  $O_i$  peut alors s'écrire :

$$\tau_{O_i} = \left\{ \begin{array}{l} F_{x_i} \\ F_{y_i} \\ F_{z_i} \end{array} \right\}_{(\vec{x}_i, \vec{y}_i, \vec{z}_i)} \quad \text{Eq. 2}$$

En effectuant le transport des torseurs élémentaires de chaque capteur à l'origine du repère du dynamomètre  $O$ , il est possible de déterminer la contribution de chaque direction de mesure de chacun des capteurs dans la lecture des efforts globaux.

La matrice d'étalonnage théorique est calculée à partir de ces différentes équations.

La position du centre  $O_i$  de chaque capteur est définie dans un système de coordonnées cylindriques par un rayon  $R$  correspondant à la distance  $OO_i$  et un angle  $\beta_i$ . Chaque capteur possède un repère propre direct  $(O_i, \vec{x}_i, \vec{y}_i, \vec{z}_i)$  et leurs axes  $x_i$  sont colinéaires à la droite  $(OO_i)$  (figure II-14).

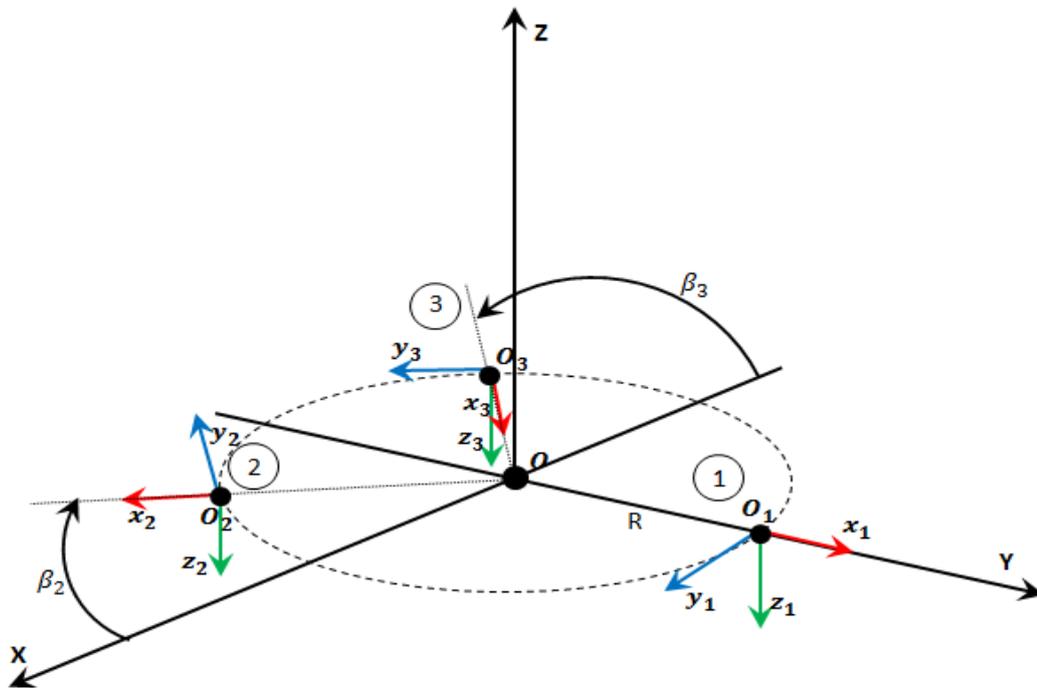


Figure II-14 : Repère de l'étude.

Le transport des torseurs de chaque capteur à l'origine et dans le repère du dynamomètre est donné par l'équation suivante :

$${}_{O_i} \{ \tau_i \}_{(\vec{x}_i, \vec{y}_i, \vec{z}_i)} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_i = F_i x \cdot \vec{x}_i + F_i y \cdot \vec{y}_i + F_i z \cdot \vec{z}_i \\ \vec{M}_{iO} = \vec{OO}_i \wedge \vec{R}_i \end{array} \right\} \quad \text{Eq.3}$$

Les différents changements de repères sont les suivants :

$$\begin{bmatrix} \vec{x}_1 \\ \vec{y}_1 \\ \vec{z}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{bmatrix} \quad \text{Eq.4}$$

$$\begin{bmatrix} \vec{x}_2 \\ \vec{y}_2 \\ \vec{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_2 & -\sin \beta_2 & 0 \\ -\sin \beta_2 & -\cos \beta_2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{bmatrix}. \quad \text{Eq.5}$$

$$\begin{bmatrix} \vec{x}_3 \\ \vec{y}_3 \\ \vec{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \beta_3 & \cos \beta_3 & 0 \\ \cos \beta_3 & -\sin \beta_3 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{X} \\ \vec{Y} \\ \vec{Z} \end{bmatrix}. \quad \text{Eq.6}$$

Après simplification, l'expression des torseurs de chaque capteur à l'origine et dans le repère du dynamomètre peut alors s'écrire :

$$M = \left\{ \begin{array}{cccccc} 0 & KF_{1x_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ KF_{1y_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & -RKF_{1y_1} \\ 0 & 0 & KF_{1z_1} & -RKF_{1z_1} & 0 & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2}KF_{2x_2} & -\frac{1}{2}KF_{2x_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2}KF_{2y_2} & -\frac{\sqrt{3}}{2}KF_{2y_2} & 0 & 0 & 0 & -RKF_{2y_2} \\ 0 & 0 & -KF_{2z_2} & \frac{R}{2}KF_{2z_2} & \frac{R\sqrt{3}}{2}KF_{2z_2} & 0 \\ \frac{1}{2}KF_{3x_3} & \frac{\sqrt{3}}{2}KF_{3x_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2}KF_{3y_3} & -\frac{1}{2}KF_{3y_3} & 0 & 0 & 0 & RKF_{3y_3} \\ 0 & 0 & -KF_{3z_3} & \frac{R}{2}KF_{3z_3} & -\frac{R}{2}KF_{3z_3} & 0 \end{array} \right\} \quad \text{Eq.7}$$

Cette matrice est théorique. Elle représente la contribution des différents axes des capteurs dans la mesure des efforts du dynamomètre. Ces mesures dépendent de la sensibilité K des capteurs piézoélectriques utilisés. Dans la réalité, aucun terme de la matrice n'est nul car, malgré le soin apporté à la réalisation du dynamomètre, des défauts géométriques apparaissent. Cependant, les termes prépondérants doivent pouvoir être identifiés.

## II.4.2. Matrice d'étalonnage réelle

Une fois la matrice d'étalonnage théorique écrite, l'étalonnage peut être effectué. Il consiste à faire corrélérer des chargements unitaires maîtrisés appliqués au dynamomètre avec les différents signaux électriques délivrés par les capteurs triaxiaux.

Il convient d'appliquer des chargements identifiés en des endroits stratégiques où la réponse théorique du dynamomètre est connue. Par une régression multilinéaire des moindres carrés, il est possible de faire corrélérer les valeurs des capteurs aux valeurs attendues. Grâce à une campagne d'essais conséquente, la matrice d'étalonnage réelle est déterminée [Couétard, 2000].

### II.4.2.1. Procédure expérimentale

Afin de pouvoir appliquer les efforts et moments nécessaires à l'étalonnage, un assemblage spécifique a été développé. Il s'agit d'une pièce venant prendre la place du porte-galet en s'appuyant sur les mêmes interfaces. La partie basse est équipée d'un bras de chargement déplaçable en deux positions afin de pouvoir charger le dynamomètre suivant différents axes (Figure II-15). Des masselottes de différentes masses connues seront placées dans les gorges (dont la position est connue) prévues à cet effet par l'action d'un doigt d'indexage, créant ainsi l'effort souhaité.



Figure II-15 : Bras d'étalonnage avec masselotte et installé sur le pied presseur.

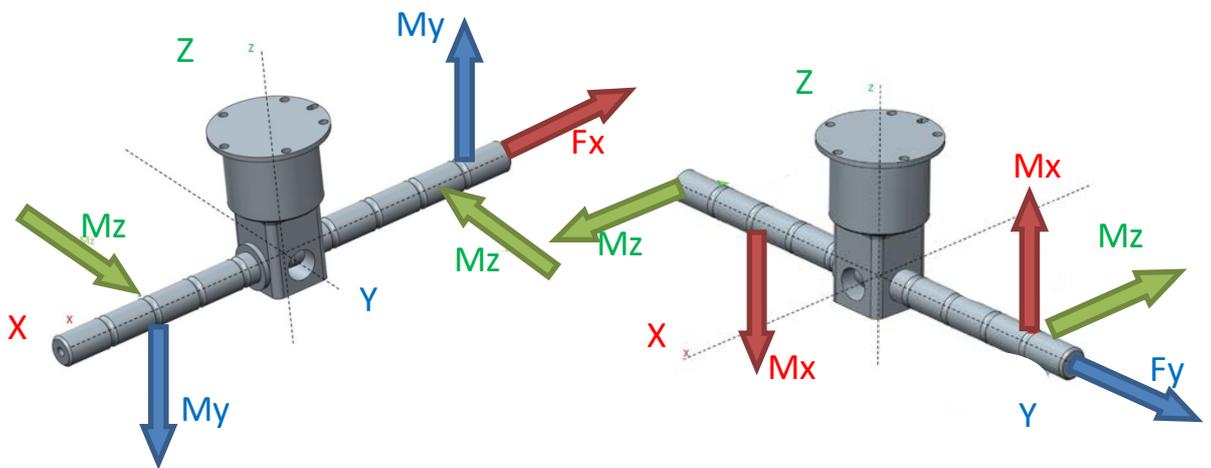


Figure II-16 : Axes d'étalonnage.

Les masselottes permettent de mesurer les moments suivant les axes X et Y.

Les efforts X et Y sont obtenus en tirant la tige retenue par un épaulement avec une force précise à l'aide d'un capteur uni-axial (figure II-16).

Le moment suivant l'axe Z est obtenu par une rotation de la tête de coupe, faisant buter le bras de chargement contre un capteur fixe sur la table d'étalonnage.

### II.4.2.2. Résultats

Les résultats de la régression des moindres carrés donnent la matrice d'étalonnage réelle suivante :

$$M = \begin{pmatrix} 29.9 & 211.82 & 51 & 2.064 & 0.92 & -1.24 \\ 239.16 & -31.5 & 7.46 & -2.89 & -2.09 & -10.89 \\ -14.09 & 20.76 & 218.68 & 27.03 & 7.38 & -1.3 \\ 153.75 & -105.99 & -92.16 & -9.75 & -4.54 & 0.22 \\ -115.35 & -197.9 & 22.5 & -10.08 & -1.98 & -8.064 \\ 12.18 & -25.82 & 609.9 & -31.03 & -37.23 & -0.48 \\ 176.30 & 126.33 & -11.7 & 7.78 & -1.42 & -0.44 \\ 111.90 & -200 & 19.18 & -1.6 & -9.83 & 10.31 \\ -19.43 & -1.13 & 651.04 & 17.58 & -15.51 & 3.41 \end{pmatrix} \quad \text{Eq.8}$$

De nombreux écarts sont constatés avec la matrice théorique. Comme expliqué précédemment, les défauts géométriques des pièces usinées et des défauts d'orientation des capteurs expliquent les différences qui restent toutefois compatibles avec les mesures à réaliser. Cette incertitude est vérifiée dans le paragraphe suivant.

### II.4.3. Incertitudes de mesure

Une fois étalonné, il convient de calculer les incertitudes de mesure du dispositif conçu. Pour ce faire, la méthode des moindres carrés est utilisée. Elle permet de comparer les écarts entre la charge supposée et celle calculée [Couétard, 2000].

La figure II-17 montre les résidus de la régression dans le système attaché au dynamomètre. Il s'agit des écarts entre la mesure du capteur et la valeur estimée suite à l'application d'un effort, ou moment, sur les bras d'étalonnage. Les incertitudes semblent constantes quelle que soit l'intensité de l'effort appliqué.

En procédant à une moyenne des écarts relevés pendant les essais, les différentes incertitudes de chaque axe sont calculées. Le tableau II-4 regroupe ces incertitudes retenues pour chaque axe de mesure.

Composantes	Fx	Fy	Mx	My	Mz
Incertitude de mesure	12.3 %	12.3 %	9.4 %	13.8 %	7.27 %

Tableau II-4 : Incertitudes de mesure de chaque axe du dynamomètre.

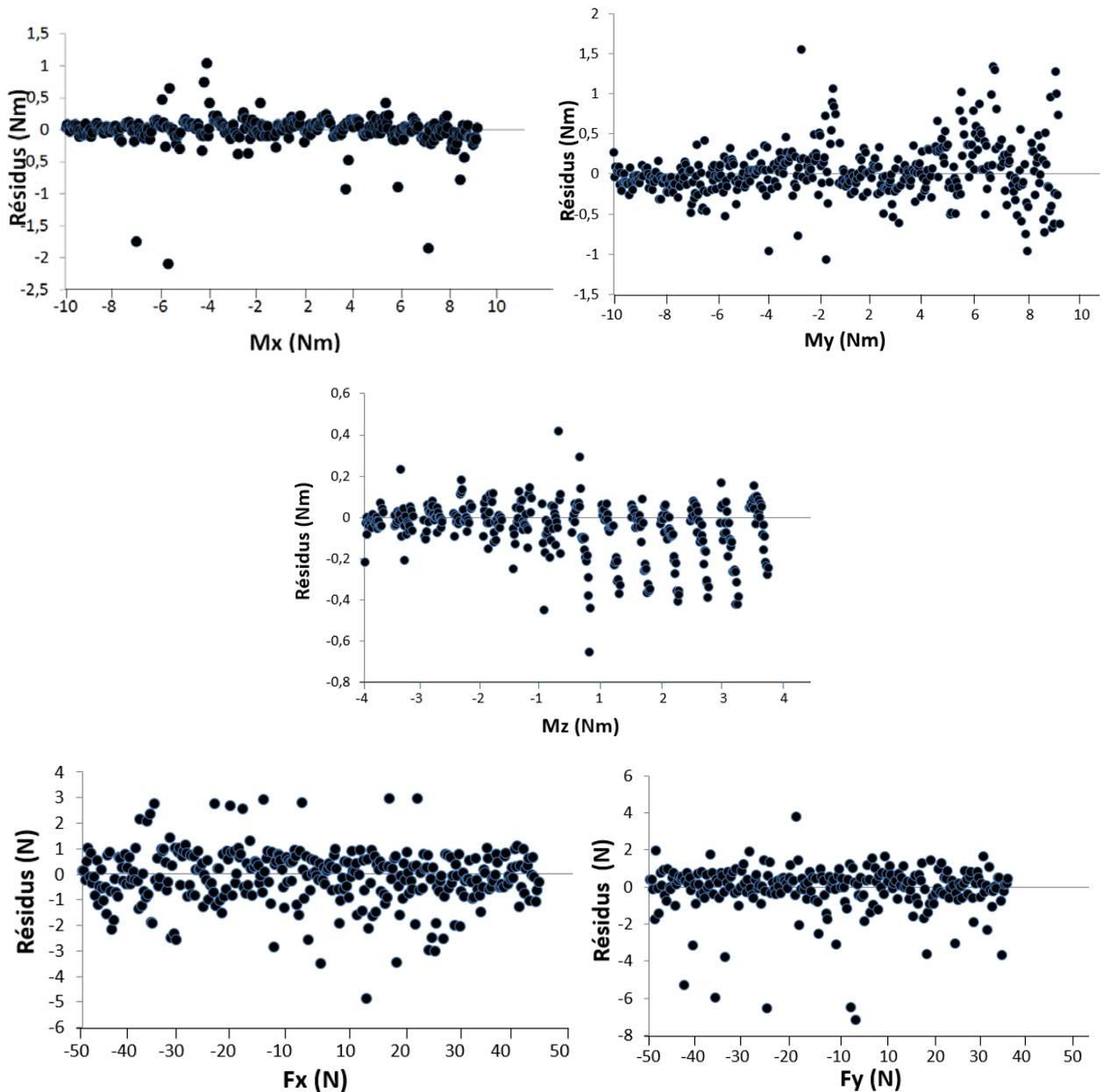


Figure II-17 : Résidus d'étalonnage.

## II.5. Etalonnage des autres axes de mesure

### II.5.1. Efforts uni-axiaux

L'étalonnage des capteurs uni-axiaux est garanti par le fabricant (erreur  $\leq 1\%$ ). Cependant, des essais ont été réalisés afin de vérifier leur bonne réaction aux efforts.

Ainsi, pour la mesure des galets, la lame a été poussée contre ceux-ci avec un capteur de mesure pour vérifier leur réponse.

En ce qui concerne les capteurs sur les vérins verticaux de la tête, le boîtier de vibration est baissé à l'aide d'un effort croissant et maîtrisé, puis la réponse des capteurs montés sur les vérins a été vérifiée.

Après vérifications, chacun de ces capteurs s'est révélé conforme aux fiches techniques et apte à la mesure.

## II.5.2. Température

Le capteur de température étant étalonné en usine, une vérification de sa précision a été malgré tout effectuée en vue d'une éventuelle correction.

Un thermocouple est fixé à la lame, à proximité du point de mesure, puis elle est chauffée. Après comparaison des deux mesures, l'écart relevé est conforme aux valeurs données par le constructeur :  $\pm 3\%$ .

## II.6. Conclusion

L'analyse bibliographique de la mesure des actions de coupe a permis de choisir les corps d'épreuve adaptés, de concevoir un dynamomètre dédié à la coupe du tissu et faisant partie intégrante de la machine sans en gêner le fonctionnement. En plus de ce dynamomètre, une mesure de la température a été intégrée dans le pied presseur et cinq points de mesures supplémentaires ont été équipés de capteurs d'efforts: trois sur les galets guidant la lame en translation et deux sur les vérins maintenant le boîtier de vibration en position basse. Toute cette instrumentation a nécessité un très long travail de conception et de mise au point mais a permis d'équiper entièrement une tête de coupe de tissu afin d'en tirer le maximum d'informations. La suite de ce chapitre va décrire comment les différentes mesures sont récupérées et traitées en vue de leur exploitation.

## II.7. Transmission de l'information

Le pied presseur accueille trois capteurs triaxiaux comportant trois voies de mesures chacun et un capteur de température. Le guide lame embarque également trois capteurs d'efforts uni-axial. Ces deux pièces sont animées, en fonction de la coupe, d'un mouvement de rotation rendant difficile leur câblage. Il a été décidé de procéder à un multiplexage et d'utiliser le collecteur tournant déjà en place sur la machine pour pouvoir transmettre les informations mesurées. Une carte électronique dédiée a été développée à cet effet par Lectra (figure II-18). Elle est capable de récupérer les 13 voies de mesures (12 forces et 1 température), de les multiplexer et de les convertir en données numériques afin de les transmettre via le collecteur tournant.



*Figure II-18 : Aperçu de la carte embarquée sur le pied presseur.*

A la sortie du collecteur tournant, les informations sont récupérées par une carte réceptrice placée dans la baie électronique de la machine. De là, les mesures sont reconverties en données analogiques et chaque voie de mesure est transportée vers la chaîne d'acquisition.

Les autres capteurs placés sur des éléments fixes comme les vérins du boîtier vibration sont rattachées directement au système d'acquisition.

Un récapitulatif du cheminement de l'information est explicité sur la figure II-19.

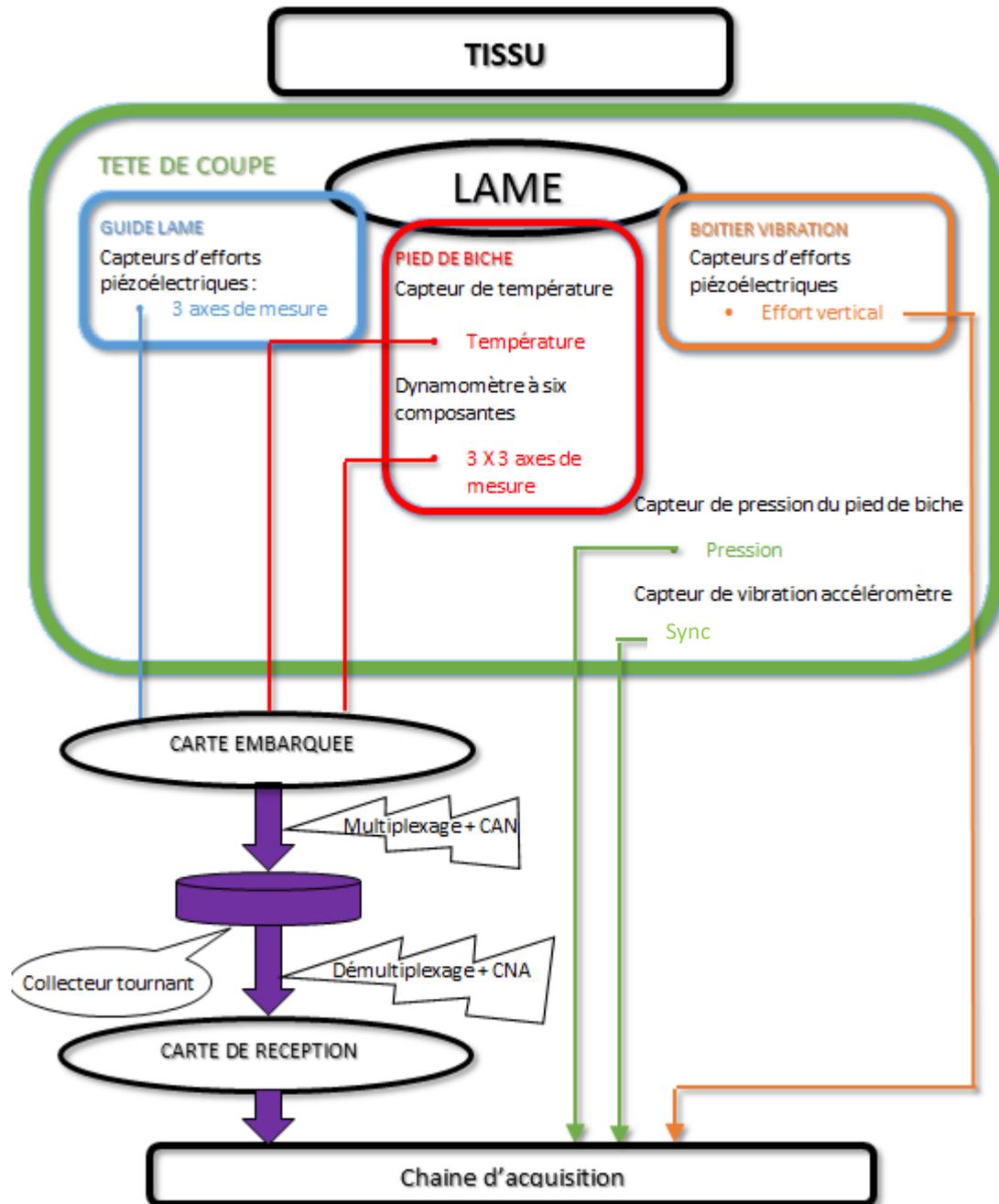


Figure II-19 : Cheminement de l'information.

## II.8. Cohérence des résultats

### II.8.1. Synchronisation

Afin d'analyser les phénomènes de coupe au plus proche de la lame, les différentes voies doivent être synchronisées. Cette synchronisation est assurée par un accéléromètre fixé sur le bâti de la tête de coupe. En effectuant un filtre passe bande entourant la fréquence de vibration de la lame, il est possible de récupérer son profil d'accélération et d'en déduire sa position. Ces mesures ont été vérifiées avec l'utilisation d'un capteur inductif de proximité, placé de telle sorte qu'il puisse être actif quand la lame est en position basse et non en position haute. Après comparaison des deux résultats, l'utilisation de l'accéléromètre a pu être validée.

## II.8.2. Restrictions

Malgré tout le soin apporté à la conception du dynamomètre, il est inévitable que certaines restrictions viennent entacher le bon fonctionnement de la machine.

Lors d'une coupe courbe, la lame fléchit. Pour éviter ce fléchissement, les découpeurs sont équipés de capteurs de flexions transmettant l'information de déplacement de lame par un signal analogique directement transmis à la commande numérique. C'est à cet endroit que l'information est analysée et que la décision de faire pivoter la lame pour renforcer son moment quadratique est prise (Figure I-25 et I-26).

Sur une machine standard, le passage de l'information depuis la flexion de la lame jusqu'à son contrôle se fait avec un minimum d'étapes : Figure II-20.

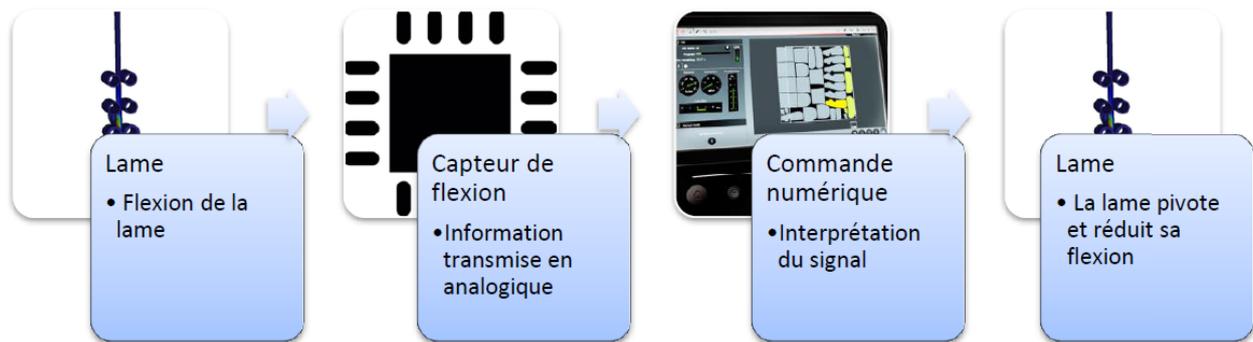


Figure II-20 : Pilotage de la lame en coupe courbe – Découpeur standard.

Sur le prototype instrumenté, le capteur de flexion n'existe plus. A sa place, un dynamomètre à cinq composantes est installé. Afin de retrouver cette information de fléchissement nécessaire à couper la matière en coupes courbes, les neuf signaux issus des trois capteurs tri-axiaux doivent être traités et calculés afin d'isoler l'information de fléchissement au travers du logiciel d'acquisition de données. Une fois connue, l'information doit être réintégrée dans la commande numérique pour le pilotage : Figure II-21.

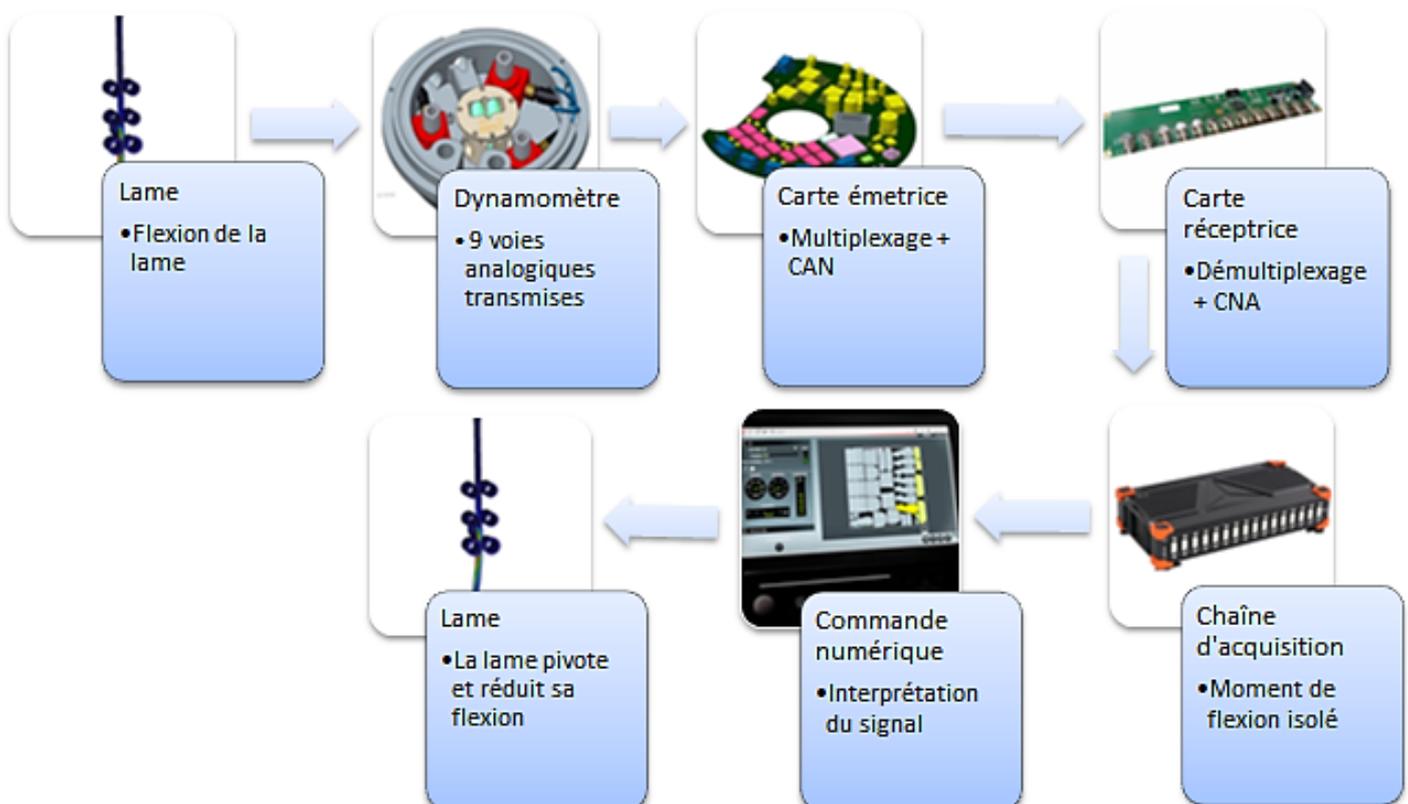


Figure II-21 : Pilotage de la lame en coupe courbe – Découpeur prototype.

Cette succession d'étapes dans le calcul de la flexion latérale est réalisée au détriment de la réactivité de la machine qui ne peut plus assurer une coupe courbe nette ou bien de petites variations de trajectoire. La réactivité du pilotage de la machine en fonction de la mesure est cruciale pour compenser les nombreuses flexions de lame. C'est pourquoi, sur le découpeur utilisé dans cette étude, la fonction de pilotage de lame a été inhibée pour laisser la lame réagir à son environnement et aux sollicitations de la coupe sans atténuation provenant de la tête de coupe.

### II.8.3. Traitement des mesures

Chaque voie de mesure est enregistrée et la reproductibilité des résultats est confirmée expérimentalement. Après plusieurs coupes avec les mêmes paramètres, la répétabilité des différents axes de mesure est confirmée avec une marge d'erreur de 3% en moyenne, notamment concernant l'effort frontal qui fluctue de  $\pm 5$  N pour une moyenne de 90 N. Cette valeur sert de référence pour vérifier que les mesures ne dérivent pas à chaque début ou fin de périodes de travail.

L'environnement de mesure utilisé permet un enregistrement et un visionnage en temps réel. Il prévient directement en cas de dysfonctionnement de l'un des capteurs ou de la carte de traitement embarquée. Il est également possible de suivre directement l'effort mesuré et de pouvoir intervenir, par exemple, en cas de présomption de casse de lame.

En ce qui concerne l'enregistrement, chacune des voies est enregistrée en brut, filtrée et moyennée afin de faciliter les calculs ultérieurs.

Les différentes voies de mesures enregistrées sont assez bruitées et il est nécessaire de procéder à un traitement. Certains artefacts, problèmes connus ou prévisibles, apparaissent telle la dérive des capteurs piézoélectriques. Les paragraphes suivant vont détailler les opérations appliquées sur les voies de mesure afin de les rendre exploitables.

#### II.8.3.1. Dérive des capteurs piézoélectriques

Les capteurs piézoélectriques à quartz sont des capteurs d'efforts dynamiques. Sous un effort maintenu, la charge du cristal de quartz va peu à peu diminuer : le capteur se décharge progressivement.

Ce problème crée une dérive sur les signaux enregistrés, un écart  $\epsilon$  entre la valeur finale et le zéro de référence initial. Pour pallier ce problème, lors du traitement des données, une fonction affine représentant la dérive est soustraite à la courbe. L'effet de la formule est visible sur la Figure II-22.

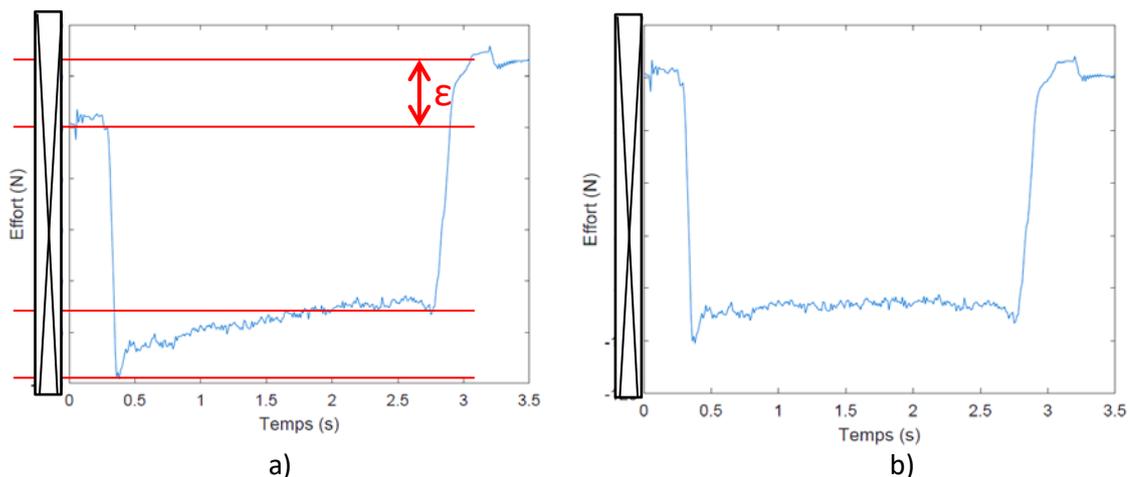


Figure II-22: a) Effort frontal  $F_x$ , dérive du signal. b) Effort frontal  $F_x$ , signal corrigé (*données confidentielles supprimées*).

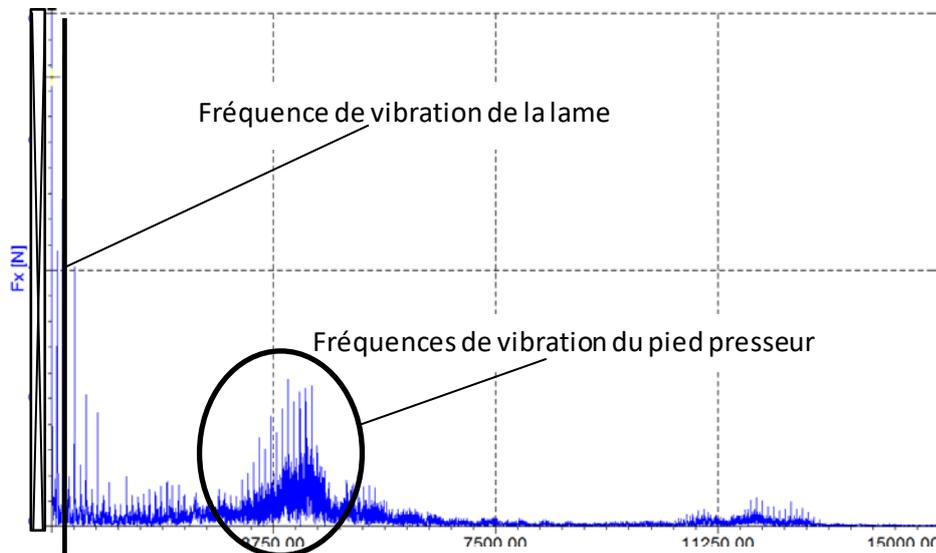
### II.8.3.2. Filtrage

Les signaux bruts enregistrés sont bruités. Ces perturbations sont issues de la réponse dynamique de l'ensemble du dispositif (montage, machine, environnement...) pendant la coupe. Afin d'obtenir un signal plus exploitable, un filtrage des signaux est effectué.

Une transformée de Fourier (FFT) est réalisée afin de choisir le filtrage adéquat pour chaque signal. Le résultat est similaire pour les différentes mesures d'efforts internes au pied presseur (Figure II-23).

La machine de découpe textile est soumise à une multitude de vibrations : aspiration dans le châssis, ventilateurs de refroidissement des cartes électroniques, courroies crantées... Toutes ces perturbations laissent leurs empreintes sur les signaux mesurés. Il faut également prendre en compte la particularité inhérente à la tête de coupe utilisée qui n'est pas neuve. Beaucoup de ses pièces sont déjà usées : par exemple, les roulements à l'intérieur du boîtier vibration sont à l'origine de nombreuses perturbations.

La figure II-23 montre que le signal est très bruité jusqu'à des fréquences de 12000 Hz. La fréquence propre du pied presseur est située aux alentours de 5008 Hz. Cela correspond aux fréquences observables sur la transformée de Fourier. En comparaison, la fréquence de coupe maximale est, quant à elle, de l'ordre de 100 Hz.



100 Hz  
Figure II-23 : FFT de l'effort Fx (données confidentielles supprimées).

Un filtre passe bas est choisi : toutes les fréquences au-dessus de 600 Hz sont éliminées. Au vu des différentes FFT et après plusieurs essais, 600 Hz paraît être un bon compromis pour ne pas perdre d'informations en étant trop sévère sur le filtrage. Une comparaison entre le signal brut et filtré est représentée sur la Figure II-24.

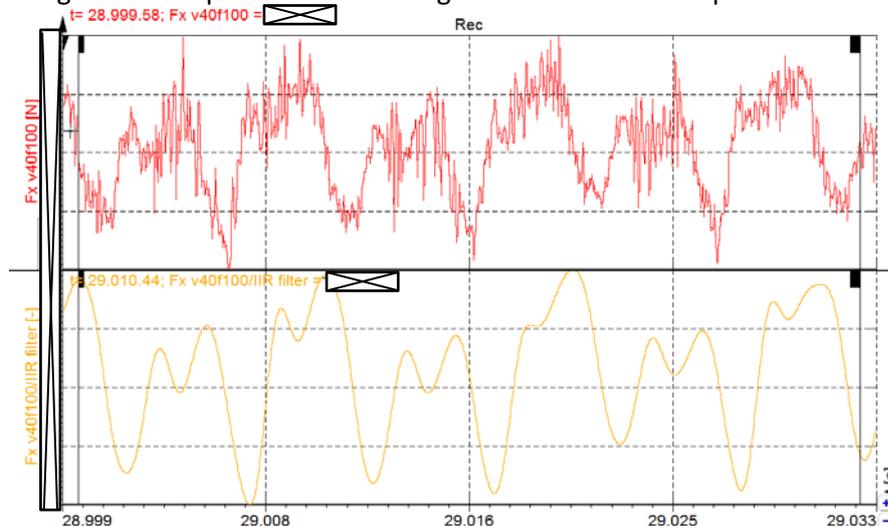


Figure II-24 : Filtrage de la voie Fx (brut en rouge, filtré en jaune) (données confidentielles supprimées).

Afin de s’assurer que les valeurs mesurées restent pertinentes, les valeurs moyennes sont comparées (Figure II-25).

L’écart mesuré entre le signal brut moyenné et le signal filtré moyenné est très faible (0.07%) : les données ne sont pas altérées par ce choix.

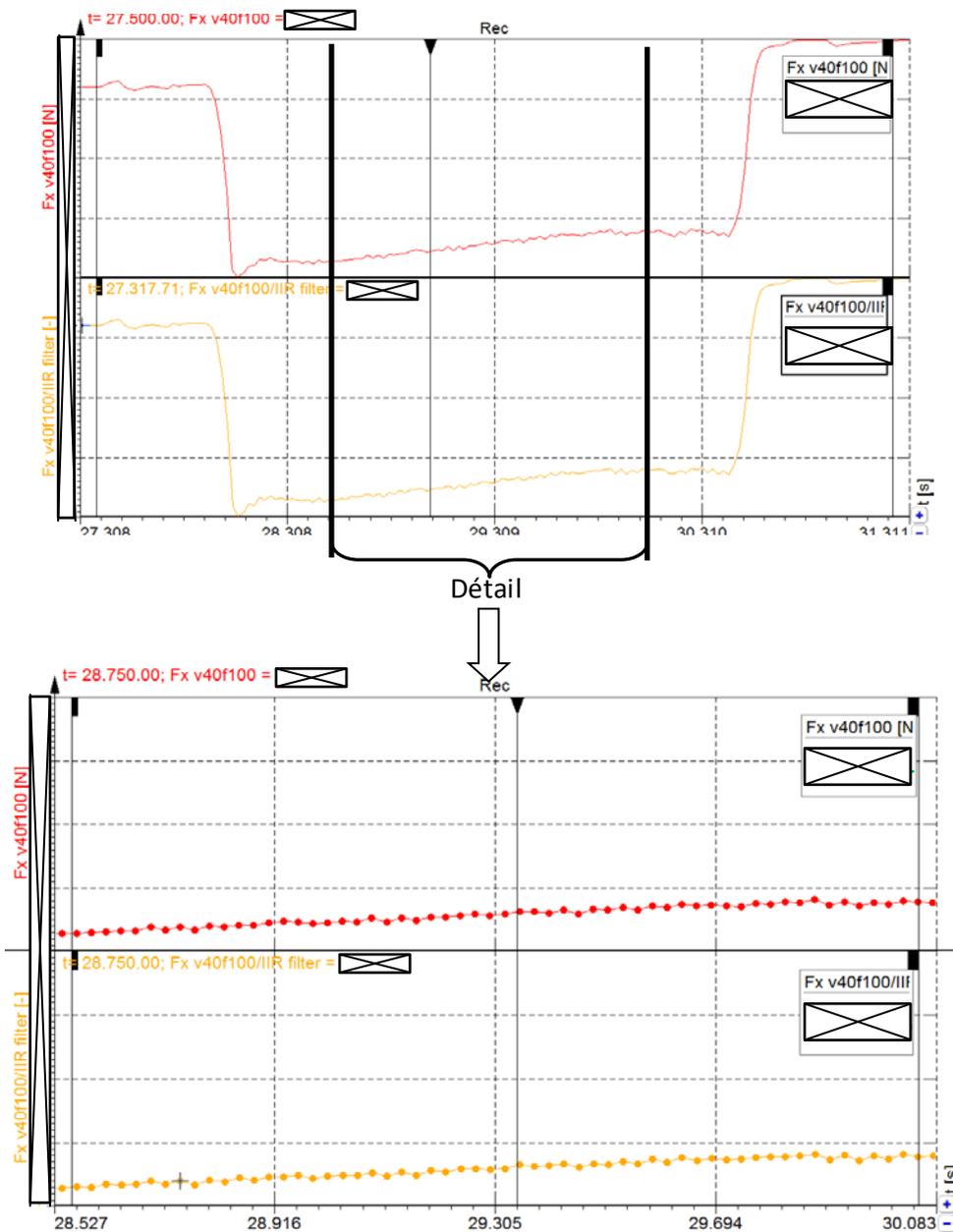


Figure II-25 : Comparaison des moyennes sur données brutes (rouge) et filtrées (jaune) (*données confidentielles supprimées*).

### II.8.3.3. Moyenne

Les mesures filtrées sont riches en informations et il est possible de distinguer des fluctuations à chaque montée et descente de lame. Pour faciliter la comparaison entre chaque mesure, un indicateur moyen s’avère nécessaire.

La moyenne arithmétique est adaptée à la fréquence de coupe. Elle est calculée sur un tour de vilebrequin, c’est-à-dire pour un aller-retour de lame.

Cette moyenne est nécessaire pour pouvoir comparer des phénomènes similaires.

Les fréquences de coupe variant de 50 Hz à 100 Hz, une moyenne sur une base de temps de 0.02 s pour 50 Hz se fera sur 1 tour de vilebrequin alors qu'elle se fera sur 2 tours pour 100 Hz (figure II-26).

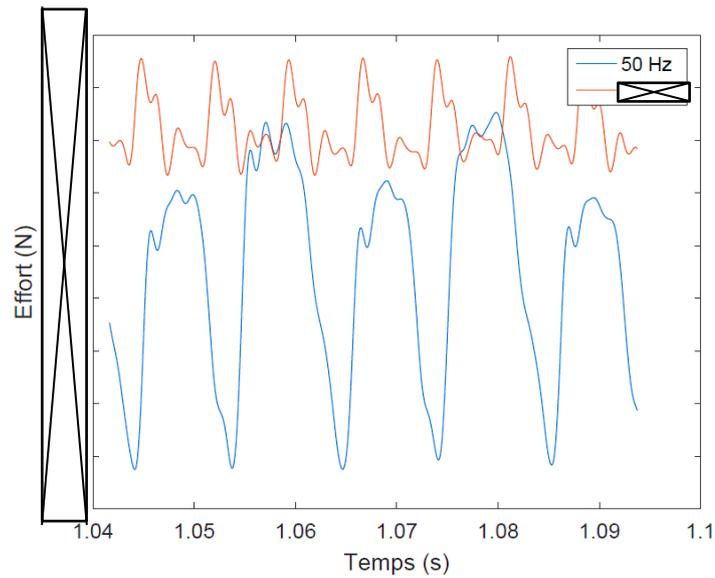


Figure II-26 : Comparaison de l'effort frontal  $F_x$  pour une coupe à 50Hz (bleu) et une coupe à 100Hz (rouge) (données confidentielles supprimées).

Une moyenne non adaptée à la fréquence de vibration faussera les valeurs.

Sur la figure II-27, trois moyennes différentes sont appliquées à un même signal (l'effort frontal  $F_x$ ) :

- une moyenne sur une base de temps de 0.01s,
- une moyenne sur une base de temps de 0.02s,
- une moyenne sur une base de temps de 0.03s.

On constate une différence entre les valeurs moyennes pour chacun des paramètres.

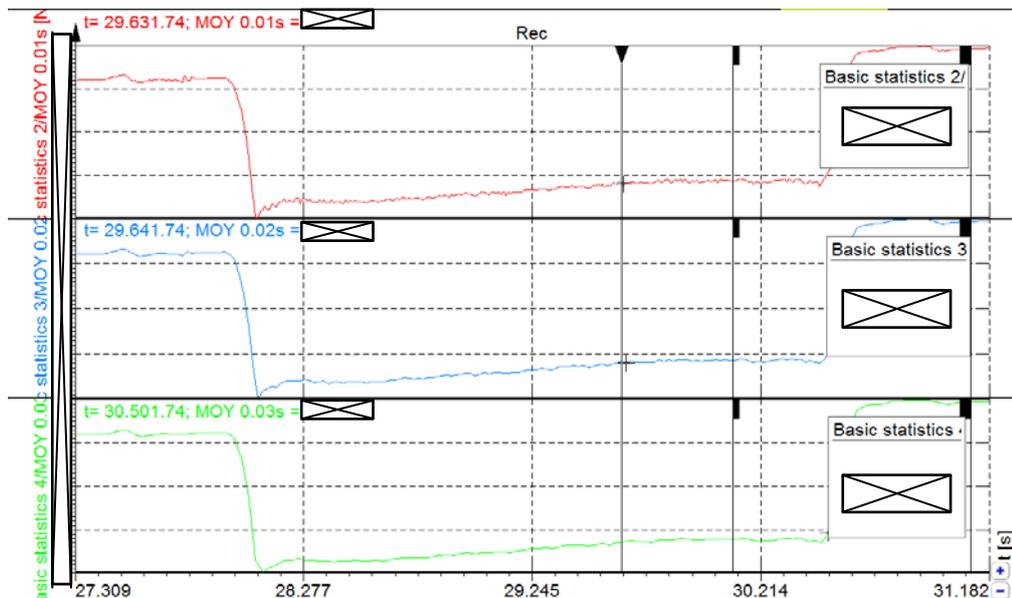


Figure II-27 : Comparaison de différentes moyennes, rouge : 0.01s, bleu : 0.02s, vert : 0.03s (données confidentielles supprimées).

Pour s’assurer que les données soient comparables entre elles, il a été choisi de faire la moyenne des voies sur une base de temps égale à la valeur d’un aller-retour de lame. Ainsi, les paramètres utilisés sont disponibles dans le tableau II-5.

Fréquence de coupe	Base de temps utilisée pour la moyenne
50Hz	0.02s
75Hz	0.013s
100Hz	0.01s

Tableau II-5 : Paramètres utilisés pour la moyenne des signaux en fonction de la fréquence de coupe (données confidentielles supprimées).

Ces paramètres sont appliqués à l’effort Fx sur la figure II-28.

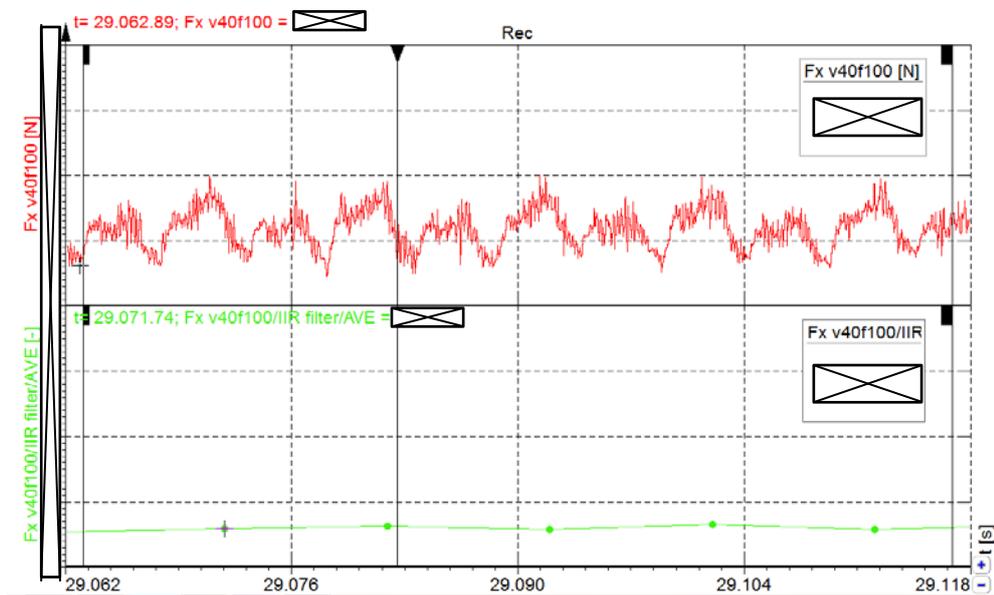


Figure II-28 : Moyenne de la voie Fx lors d’une coupe à 100Hz (rouge : brut, vert : moyenné) (données confidentielles supprimées).

### II.8.4. Conclusion

Au travers des analyses bibliographiques et d’un cahier des charges complet, un dynamomètre à cinq composantes, capable de mesurer les efforts de coupes d’une lame vibrante dans du *denim* selon une trajectoire rectiligne a été développé. Un capteur de température mesurant la température de lame dès la sortie de la matière a également été installé. Enfin, trois galets guidant la lame en translation sont instrumentés par des capteurs d’efforts, ainsi que les vérins de descente du boîtier de vibration, afin de mesurer l’effort de coupe vertical.

Un étalonnage complet du dynamomètre et une vérification des autres axes de mesure ont été mis en place afin de pouvoir valider le dispositif dans son intégralité. Pour conduire cette étape d’instrumentation, le conditionnement du signal de sortie a été présenté afin de rendre les mesures des différents capteurs exploitables.

Dans le chapitre suivant, un plan d’expériences sera élaboré afin de planifier au mieux les nombreux essais à réaliser. Enfin, les résultats seront analysés.





# Chapitre III

---

## PROCEDURE EXPERIMENTALE ET RESULTATS

---



L'objectif de cette étude est d'établir une modélisation des actions de coupe. Cette partie présente la mise en œuvre d'une méthode expérimentale au travers d'un plan d'expériences pour quantifier et hiérarchiser les différents paramètres influant sur le procédé de coupe. Après avoir validé le dispositif de mesures, les résultats de deux plans d'expériences seront présentés et analysés.

### III.1. Validation du dispositif expérimental

L'instrumentation lourde d'une machine de coupe de textile est une opération novatrice dans le domaine. Les attentes en terme de réponses sont parfaitement inconnues tout comme le comportement général de la machine dotée de cette installation.

C'est pourquoi, il est impératif de réaliser quelques coupes de vérification pour appréhender au mieux la typologie des efforts mesurés et de pouvoir établir la pertinence des résultats obtenus en les comparant avec l'expertise et les données issues des connaissances et de l'expérience dans la société Lectra.

A partir d'essais préliminaires de validation (voir annexe confidentielle A.3.1.1.), différentes mesures sont étudiées afin de détailler la méthodologie d'analyse mise en place. Sauf mention contraire, les résultats présentés ont été réalisés avec les paramètres de coupe détaillés dans le tableau III-1.

Orientation	Fréquence (Hz)	Amplitude (mm)	Avance (m/min)	Hauteur (nb plis)	Dépression (%)	Lame (mm)	Affutage (grain)	Froid	Lubrifiant
Sens trame	100	25	40	25	100	2,4X8,5	150	SANS	SANS

Tableau III-1 : Paramètres de coupe standards.

#### III.1.1. Effort frontal $F_x$

Sur la figure III-1, l'effort frontal  $F_x$  est isolé.

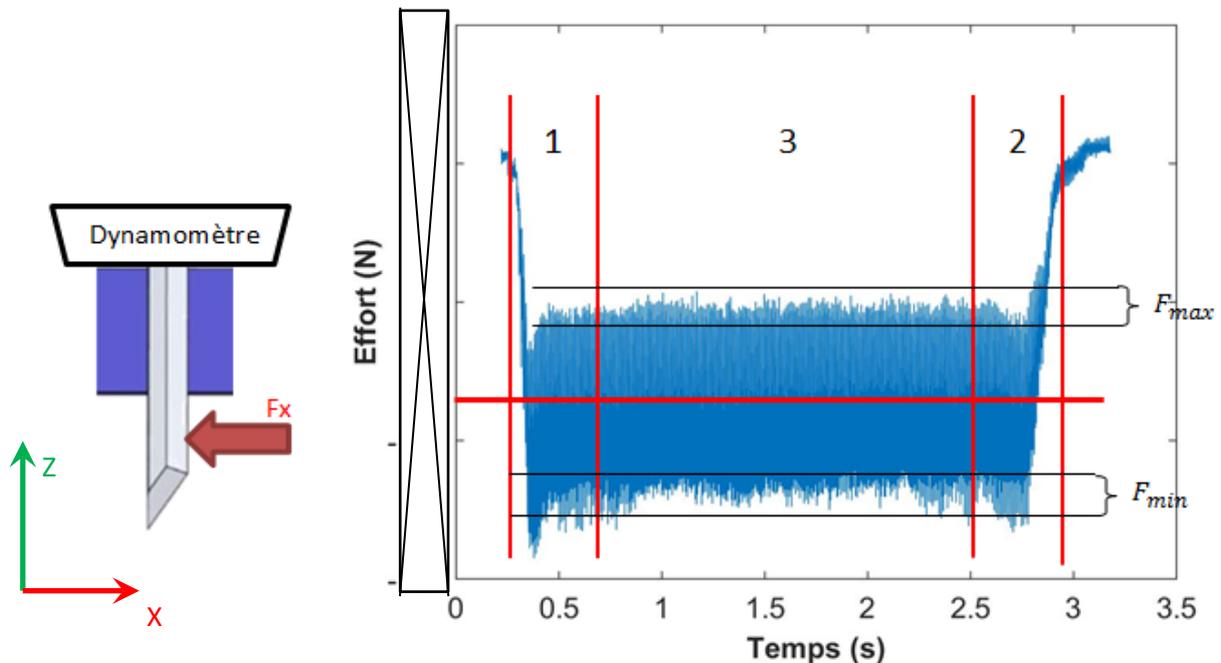


Figure III-1 Effort frontal  $F_x$  pendant une coupe rectiligne (données confidentielles supprimées).

Il est possible de distinguer trois zones sur la mesure :

- pendant les phases d'entrée 1 et de sortie 2, la vitesse d'avance n'est pas constante, ce qui explique les variations de l'effort frontal,
- pendant la phase de coupe 3, la vitesse est constante.

L'effort frontal oscille autour d'une valeur moyenne (*données confidentielles supprimées*).

Aussi, pour faciliter la comparaison entre plusieurs coupes, il est possible d'analyser simplement les moyennes arithmétiques des différents efforts mesurés de la manière qui a été présentée dans le paragraphe II.8.3.3. Cette opération est représentée, pour le même signal, sur la figure III-2.

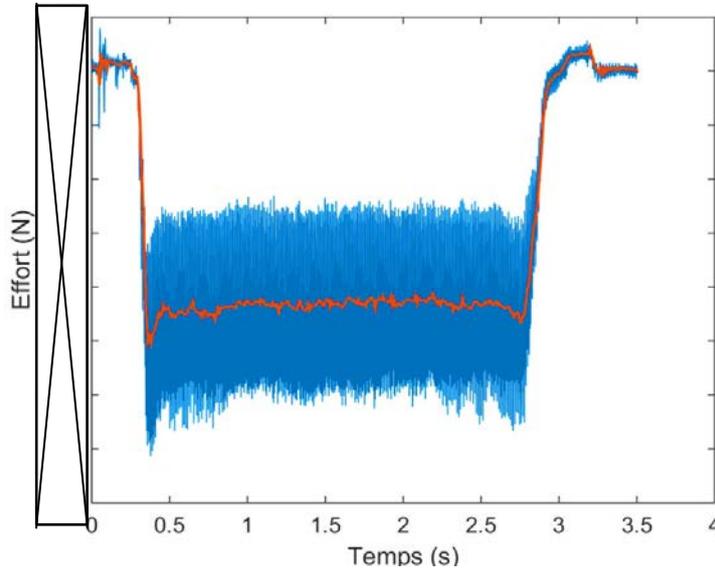


Figure III-2 : Effort frontal  $F_x$  moyenné en rouge (*données confidentielles supprimées*).

Le signal filtré, sans être moyenné, offre également de nombreuses informations sur la cinématique de la coupe. En s'intéressant à quelques oscillations seulement, il est possible de suivre l'évolution de l'effort en fonction de la position réelle de la lame.

Grâce à la synchronisation des mesures effectuées par l'accéléromètre, la position de la lame est connue. Cela permet de remarquer un pic de valeur de l'effort frontal  $F_x$  quand la lame est au point mort haut (PMH) et au point mort bas (PMB) (figure III-3). Ceci est directement lié à la cinématique de la lame. La vitesse verticale, pilotée par la rotation d'un vilebrequin adopte un profil pseudo-sinusoïdal tandis que la vitesse horizontale est constante. Ainsi, quand la vitesse verticale de la lame est nulle aux PMH et PMB, l'effort horizontal  $F_x$  est maximal.

Le reste des études concernant l'effort frontal de coupe exposées dans les paragraphes suivant font référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi, ils ont été supprimés.

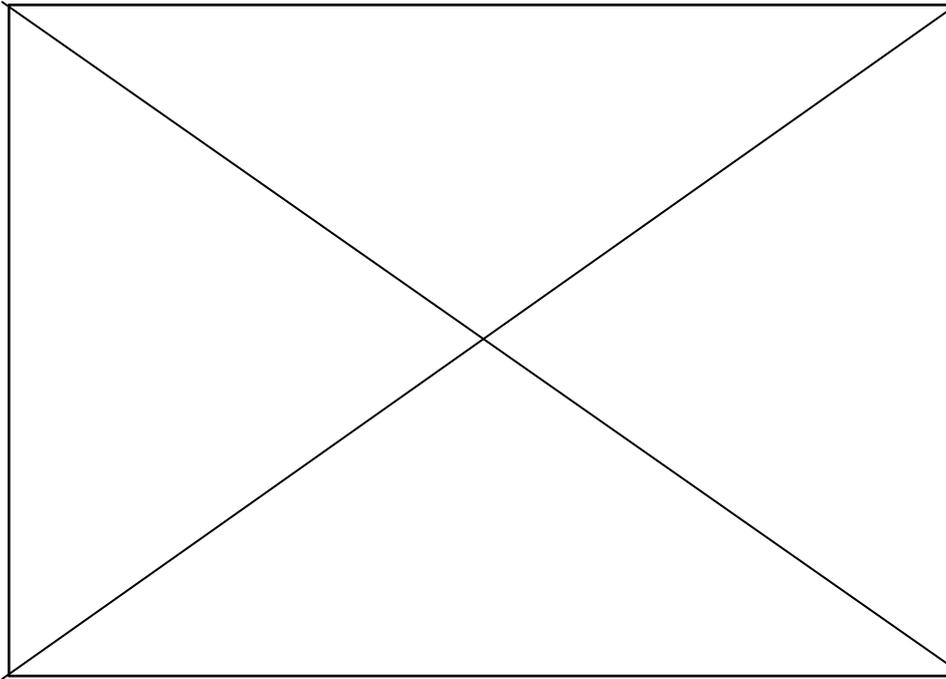


Figure III-3 : Effort frontal  $F_x$  (données confidentielles supprimées).

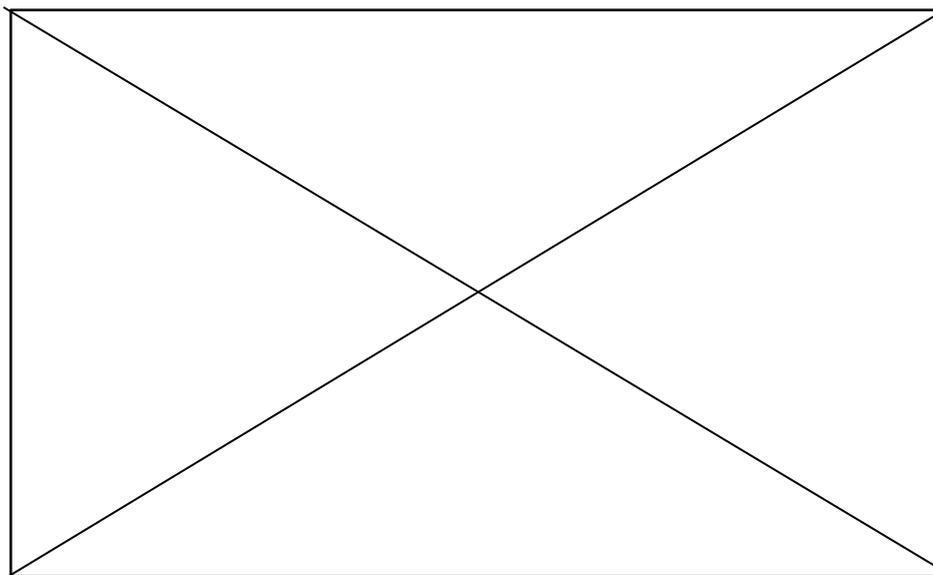


Figure III-4 : Comparatif de coupe à 100 Hz (bleu) et 50 Hz (rouge) (données confidentielles supprimées).

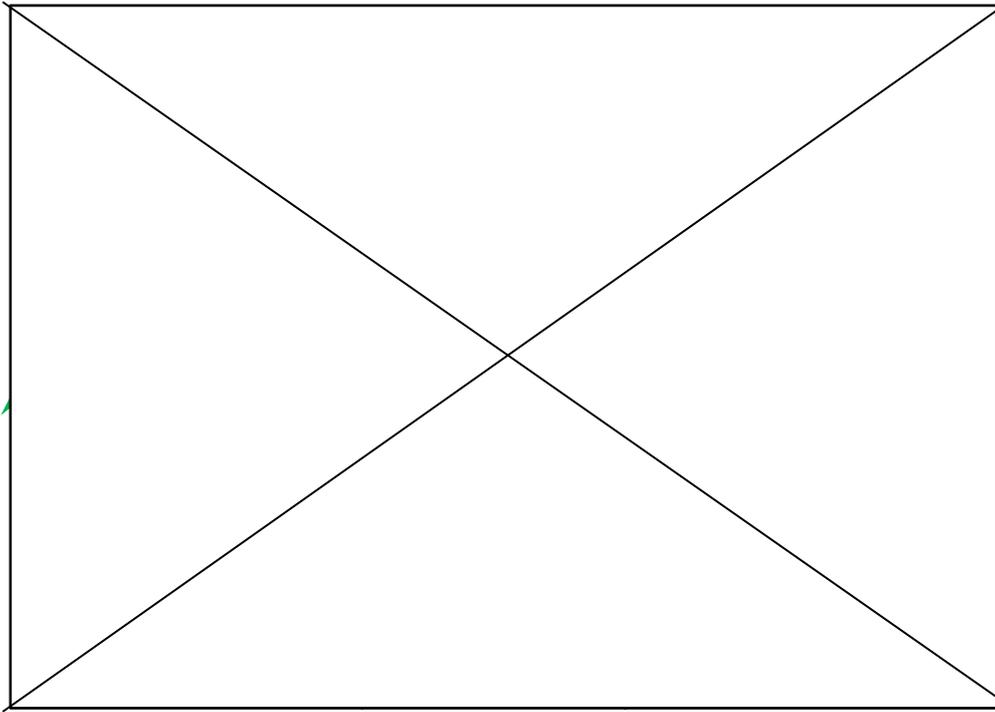


Figure III-5 : a) Lame droite sans effort frontal, b) Lame fléchie sous un effort frontal (données confidentielles supprimées).

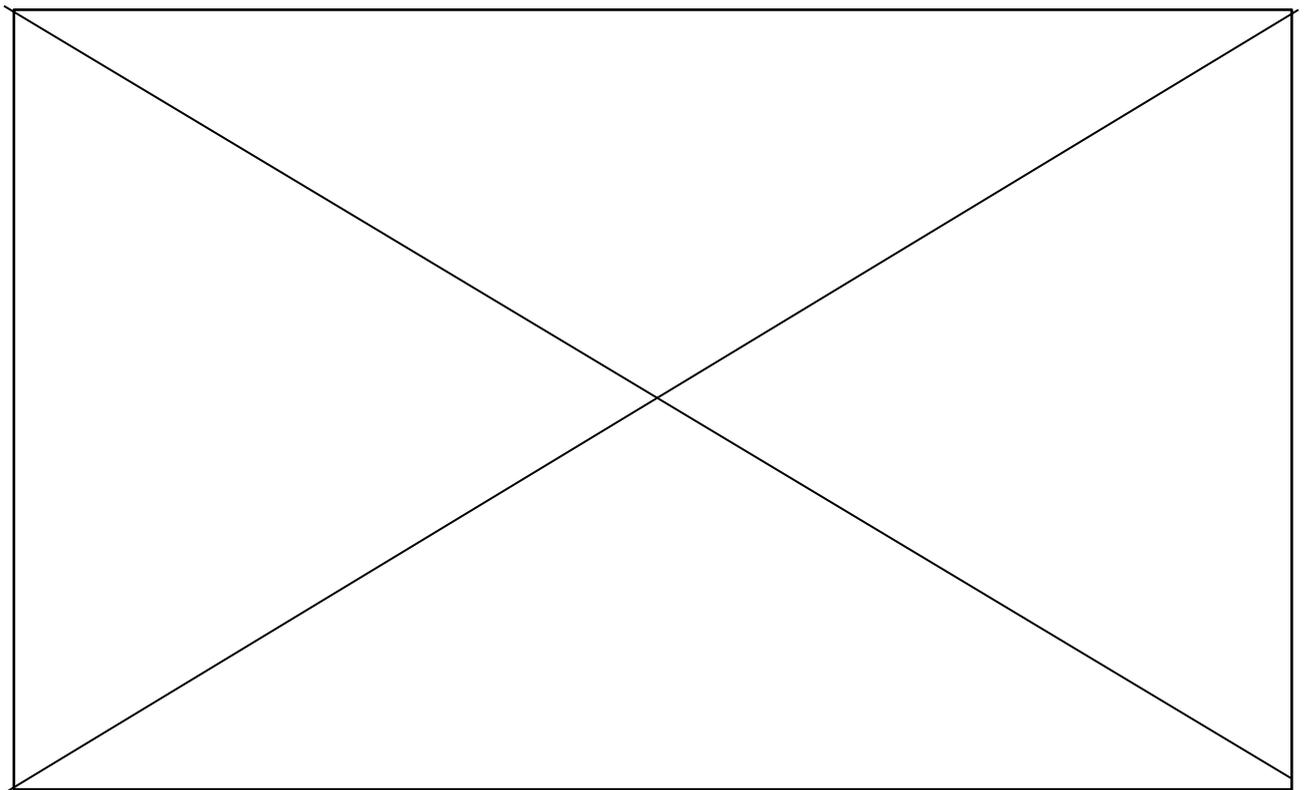


Figure III-6 : a) : Descente de lame. b) : Montée de lame, à  $f=100\text{Hz}$  et  $V=40\text{m/min}$  (données confidentielles supprimées).

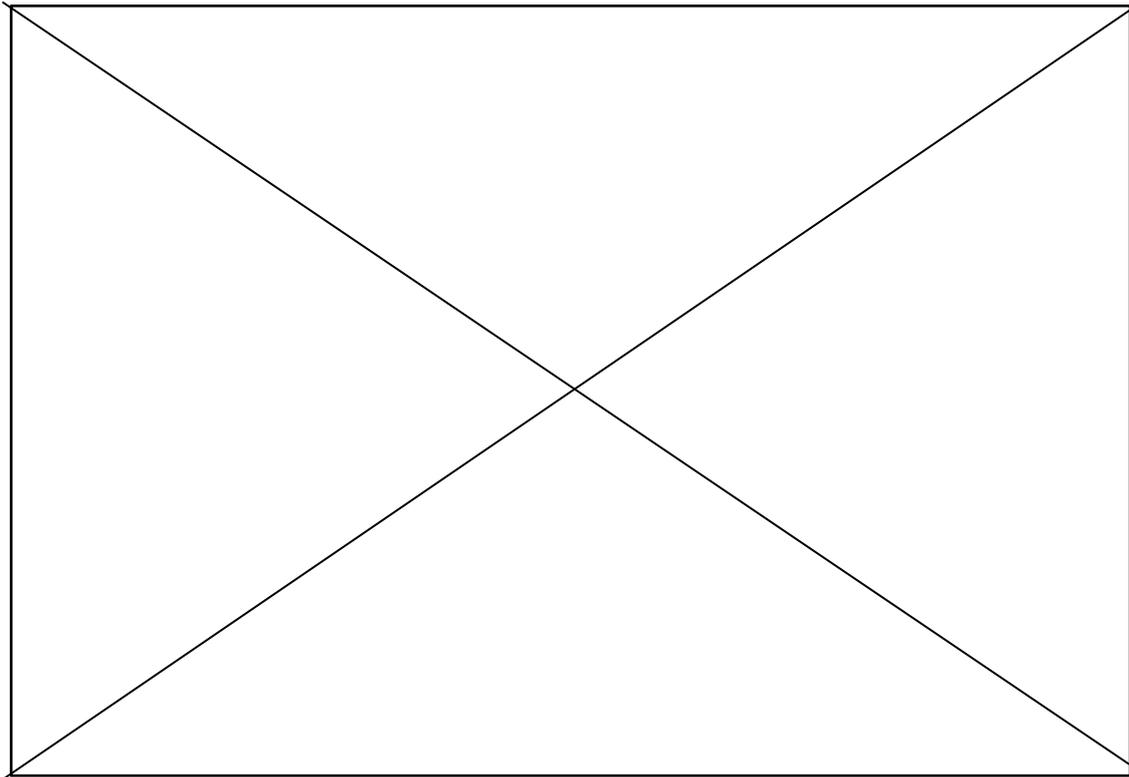


Figure III-7 : a) : Descente de lame. B) : Montée de lame, à  $f=50\text{Hz}$  et  $V=40\text{m/min}$  (données confidentielles supprimées).

### III.1.2. Effort latéral $F_y$

Même si la coupe est rectiligne, des efforts latéraux suivant  $F_y$  sont présents (figure III-8). Cela se remarque sur le tissu coupé, car la coupe n'est pas parfaitement droite, mais légèrement incurvée. Cette particularité peut venir du tissu en lui-même comme décrit ci-après.

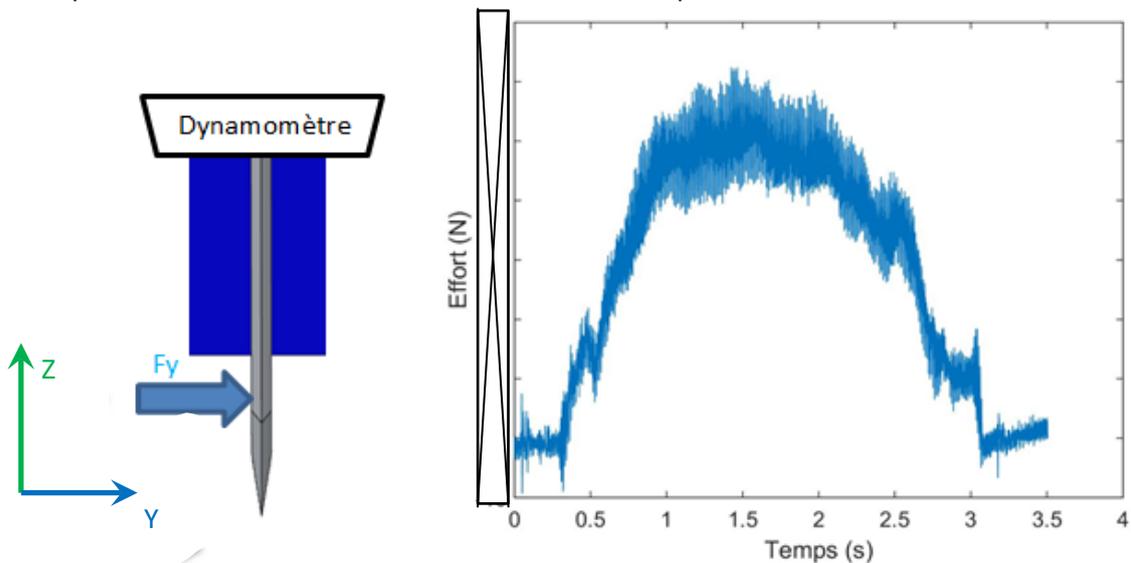


Figure III-8 : Effort latéral  $F_y$  (données confidentielles supprimées).

La coupe est effectuée suivant la trame. En examinant le sillon laissé par la lame dans la matière, il est possible d'apercevoir des fils de trame coupés dont l'espacement n'est pas constant, se rapprochant au centre de la coupe et s'écartant aux extrémités. La figure III-9 illustre cette coupe.

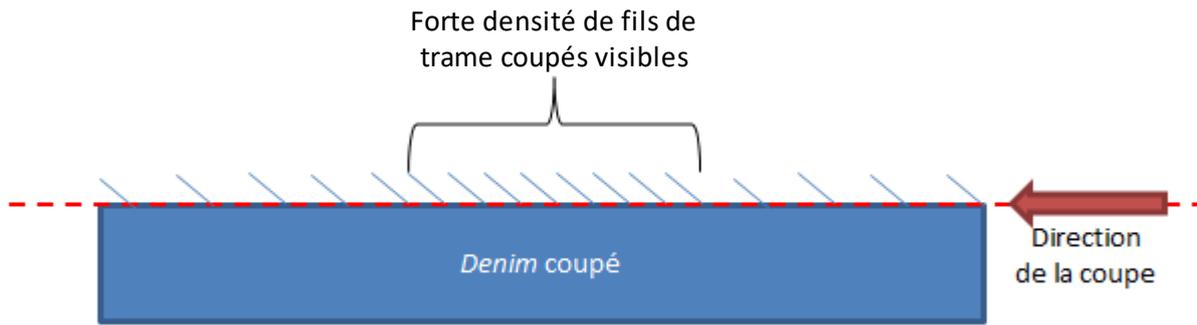


Figure III-9 : Schématisation d'une coupe rectiligne dans le sens de la trame.

Ceci montre que l'orientation des fils de trame ne suit pas une ligne droite parfaite. Au contraire, ils sont courbés. Lors de la fabrication du matériau, les fils de trame sont insérés un à un entre les fils de chaînes puis se trouvent poussés par les suivants. Cette action mécanique a pour effet de modifier leur orientation et ils se retrouvent très souvent courbés (figure III-10).

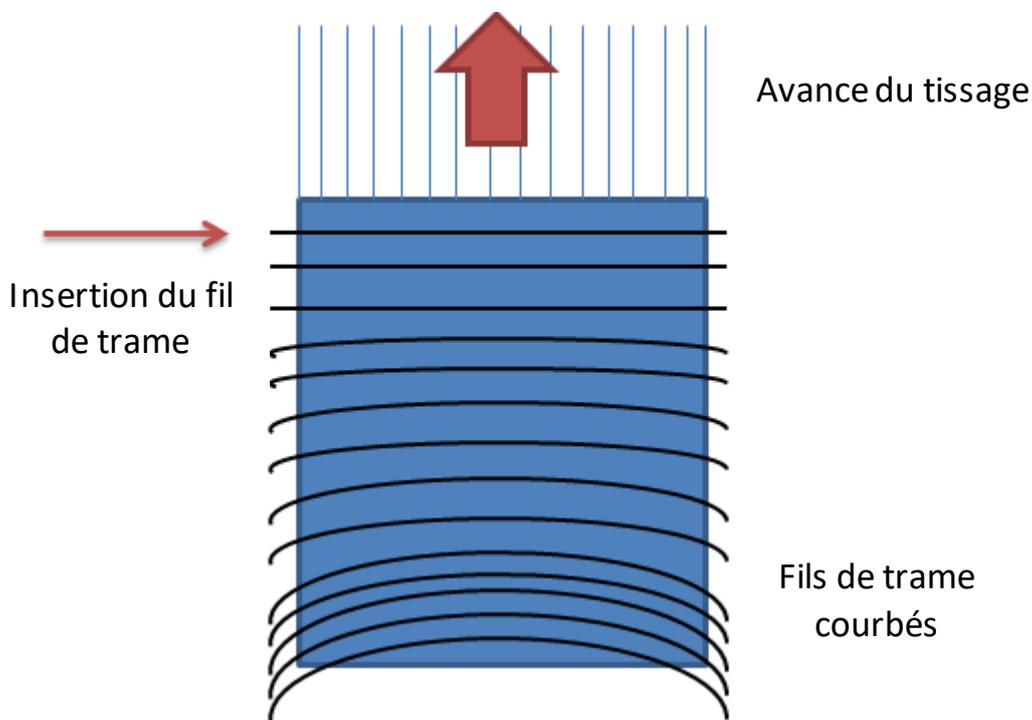


Figure III-10 : Représentation simplifiée du tissage et des défauts d'orientation des fils de trame .

Cet effet du tissage est connu : une norme permet de mesurer et de classer les tissus en fonction de leur taux de déflexion et de cintrage [ISO13015 : 2013].

Pendant la coupe, la lame est pratiquement amenée à suivre l'orientation naturelle du tissu imposée par les fils de trame. Cela peut justifier la présence de capteurs de flexions sur les machines industrielles. En détectant cet effort latéral, la tête de coupe tourne dans le sens opposé à la flexion pour garder le fil tranchant systématiquement sur une direction bien rectiligne. Ici, la trajectoire de la machine n'étant pas modifiée par la lecture des efforts de coupe, la lame fléchit latéralement.

Cet effet peut alors être diminué si la coupe s'effectue dans le sens de la chaîne. Dans ce sens, les fils de chaîne sont bien plus rectilignes car constamment maintenus pendant le tissage. Pratiquement aucun effort latéral n'est perçu et la lame ne fléchit quasiment pas, garantissant une coupe nette (figure III-11).

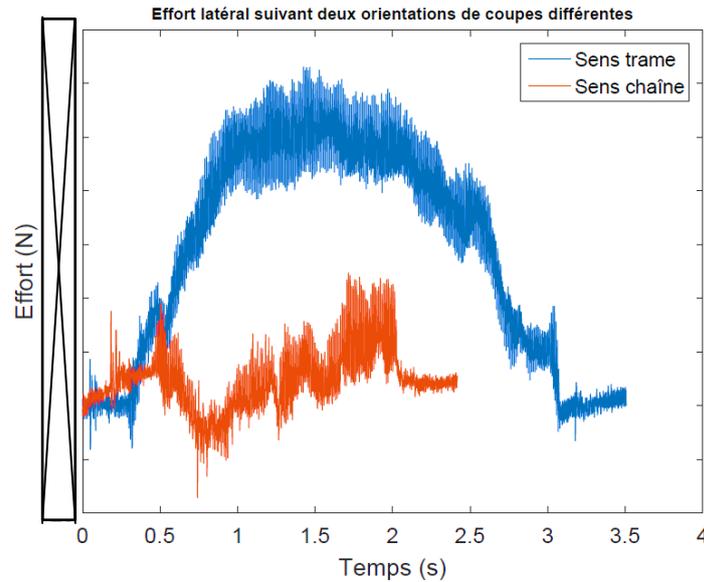


Figure III-11 : Effort latéral suivant deux orientations de coupes différentes (données confidentielles supprimées).

### III.1.3. Effort vertical - Axe Z

Le dynamomètre ne pouvant pas mesurer l'axe Z, celui-ci est mesuré par les deux capteurs fixés au niveau des vérins de descente du boîtier vibration. L'effort lu correspond à son maintien en position basse, majoré des efforts de coupe verticaux. Afin de pouvoir isoler ces efforts de coupe, il convient de faire la soustraction d'une coupe dans du *denim* et d'une autre sans matière. Celles-ci sont visibles sur la figure III-12.

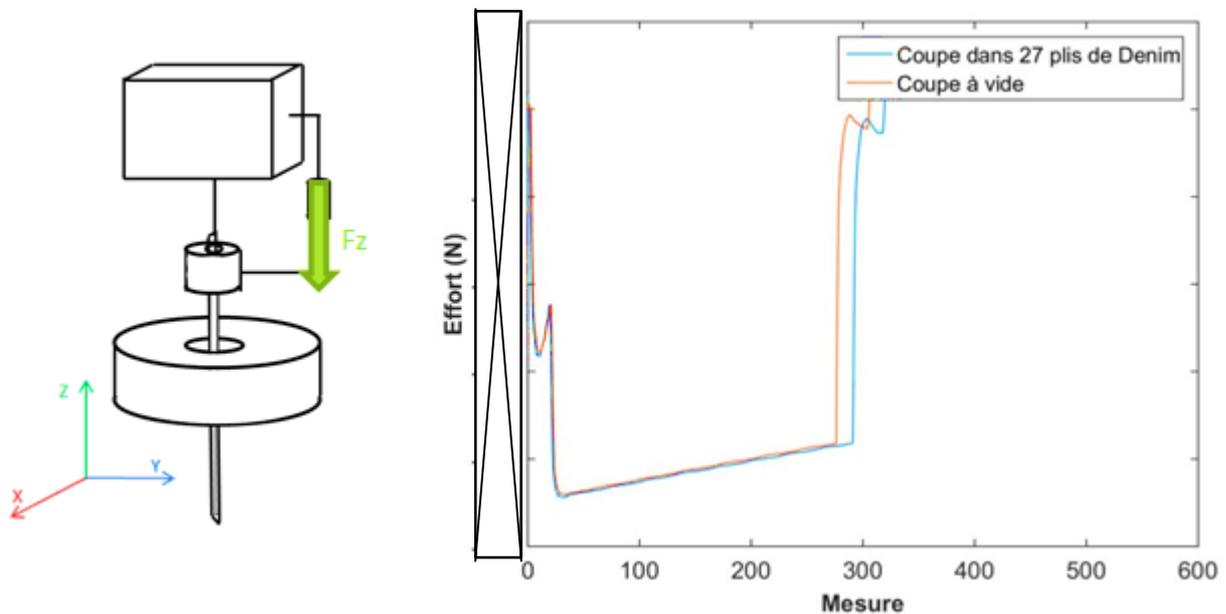


Figure III-12 : Comparaison de l'effort vertical entre une coupe sur 27 plis de tissu et une coupe à vide (données confidentielles supprimées).

La différence entre les deux courbes est minimale car les actions de coupe verticales sont très faibles en comparaison des efforts horizontaux.

L'effort vertical est généré par le frottement de la lame sur le matériau découpé. Bien que mesurable, sa valeur est très faible. En effet, en comparant une coupe dans 27 plis de *denim* et une coupe « à vide », il apparaît que les moyennes des efforts mesurés sont très similaires.

En effectuant la soustraction de ces deux courbes, il est possible de tracer l'évolution de l'effort vertical en ne prenant en compte que l'effet du frottement de la matière sur la lame (figure III-13).

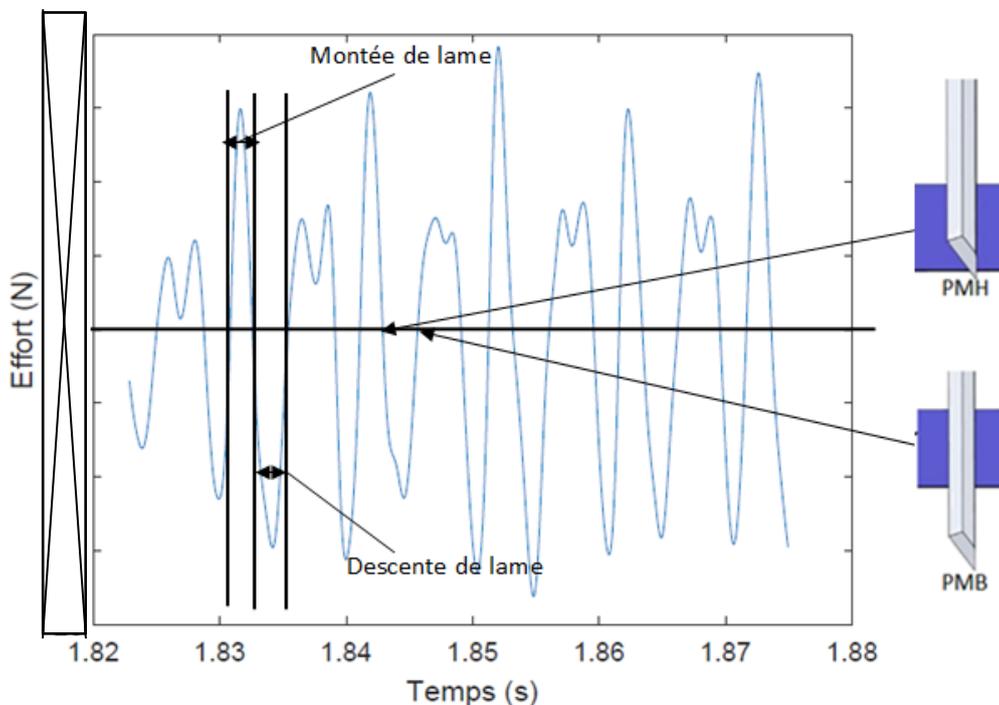


Figure III-13 : Effort vertical réel - frottement lame/matière (*données confidentielles supprimées*).

L'effort vertical est très sensible à la cinématique de coupe : quand la lame est au point mort haut ou bas, sa vitesse est nulle. Il n'y a donc pas de frottement sur la matière et l'effort  $F_z$  est également nul. Autour de cette valeur, l'effort vertical oscille en suivant les mouvements de la lame : en  $+Z$  quand elle monte, en  $-Z$  quand elle descend.

Le frottement de la lame sur la matière est sensible aux propriétés du matériau, à la surface de contact avec celui-ci et à la nature du contact (présence de lubrifiant, état du matériau, type d'affutage).

Il faut noter également qu'il existe une différence de forme du signal, mesuré entre une montée de lame et une descente. Cette différence peut s'expliquer de la même façon que pour la dissymétrie de l'effort frontal. La quantité de matière découpée en montant est plus faible qu'en descendant, donc les frottements sur la lame en sont diminués.

### III.1.4. Moment de coupe $M_y$

Le moment de coupe  $M_y$  exprimé au centre du dynamomètre représente le moment à l'origine de la flexion frontale de la lame et se comporte de la même façon que l'effort frontal  $F_x$  (figure III-14).

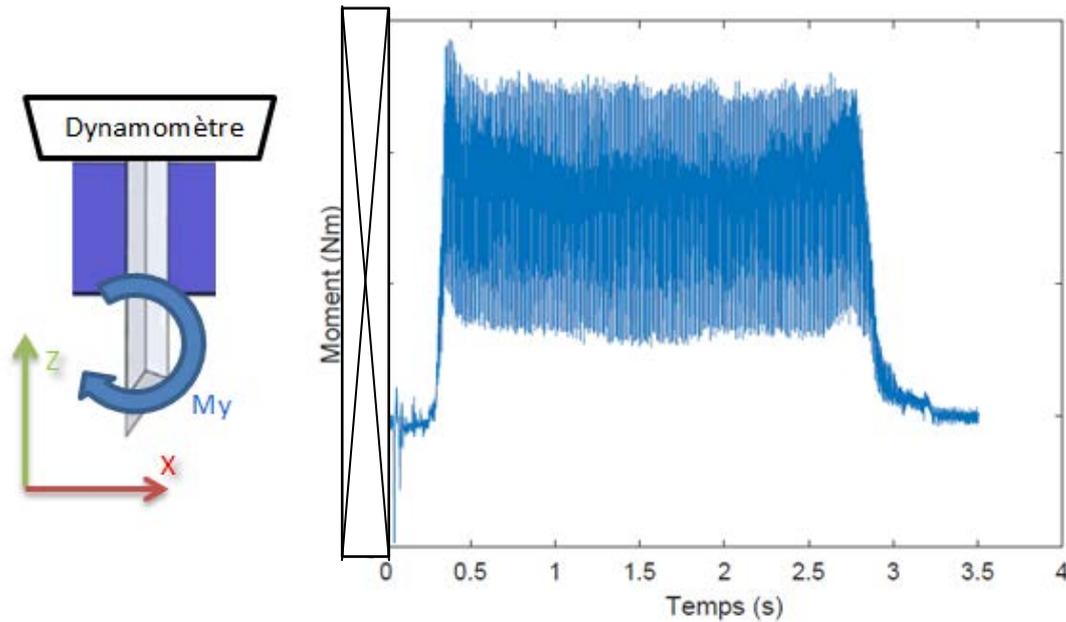


Figure III-14 : Moment de coupe  $M_y$  (données confidentielles supprimées).

De même que pour l'effort frontal, le moment oscille autour d'une valeur moyenne. Le mouvement de la lame est à l'origine de cette oscillation et il est également possible de remarquer une dissymétrie entre montée et descente de lame (figure III-15).

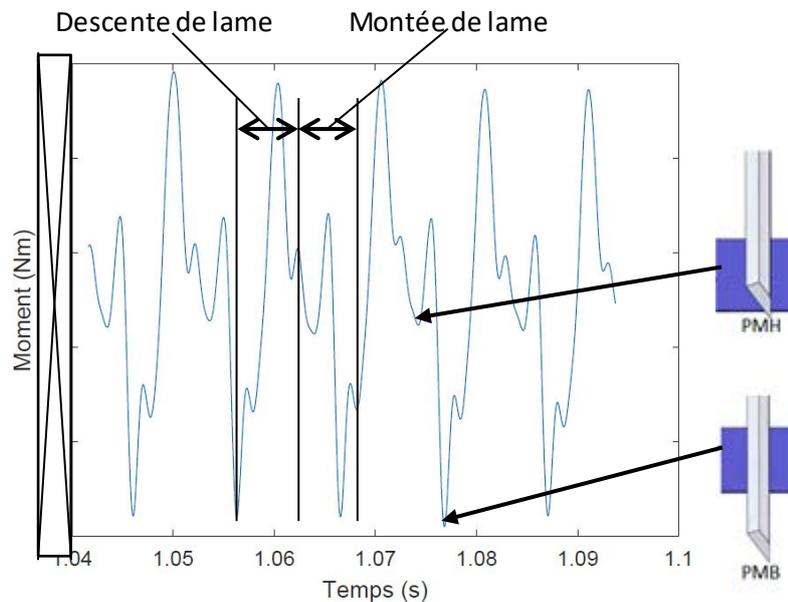


Figure III-15 : Moment de coupe  $M_y$  et position de lame (données confidentielles supprimées).

La lame se comporte comme une poutre de longueur  $L$ , encastée en flexion au niveau du pied presseur. En considérant que l'effort de coupe  $F_x$  mesuré par le dynamomètre est appliqué au milieu de la lame soit à  $L/2=125$  mm du bas du pied presseur (figure III-16), le moment  $M_y$  peut être recalculé :

$$M_y = F_x \cdot \frac{L}{2} \quad \text{Eq.1}$$

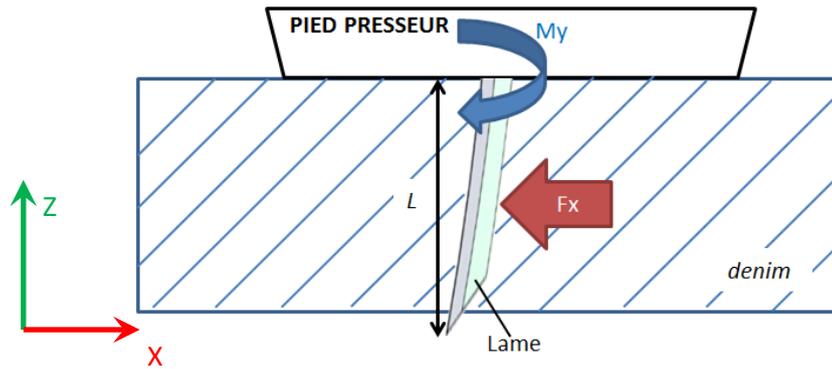


Figure III-16 : Schématisation d'une lame pendant la coupe et mesure du moment  $M_y$ .

L'information donnée par la mesure du moment de flexion est donc similaire à l'effort frontal  $F_x$ .

### III.1.5. Moment de coupe $M_x$

La présence d'un effort latéral a été constatée. De fait, la lame fléchit et un moment  $M_x$  est également mesurable (figure III-17).

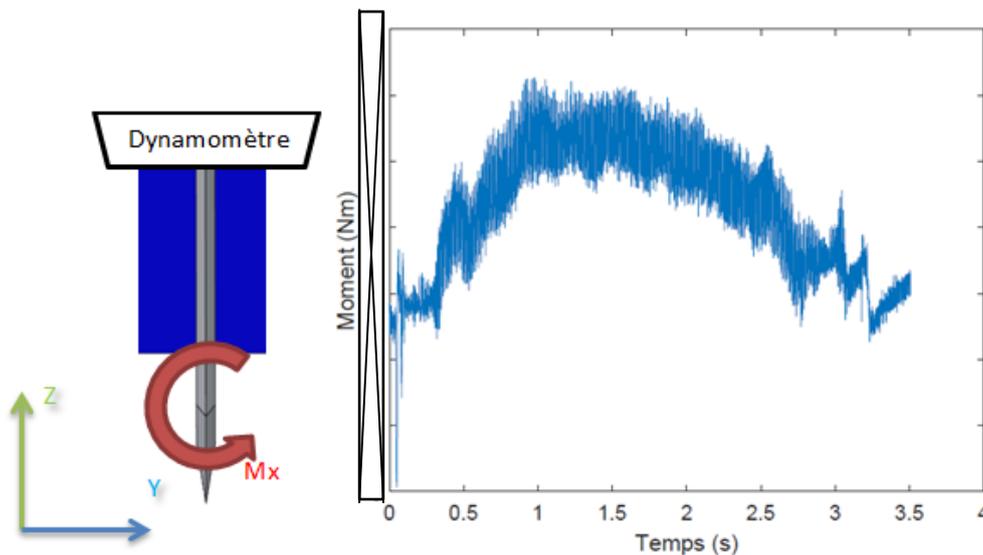


Figure III-17 : Moment de coupe  $M_x$  (données confidentielles supprimées).

Tout comme le moment  $M_y$ , le moment de flexion latérale de la lame  $M_x$  peut être recalculé par rapport à l'effort  $F_y$  et la longueur de lame engagée  $L$  comme étant :

$$M_x = F_y \cdot \frac{L}{2} \quad \text{Eq.2}$$

Le moment  $M_x$  n'apporte donc pas plus d'information que la lecture de l'effort  $F_y$  seul.

### III.1.6. Moment de coupe $M_z$

Le moment de torsion  $M_z$  témoigne d'une rotation forcée de la lame pendant la coupe, écartant le fil de coupe de sa trajectoire initiale (figure III-18). Sa présence est probablement due à l'hétérogénéité du matériau découpé mais peut également être expliquée par la dissymétrie entre les deux faces de la lame de coupe qui peut apparaître, malgré tout le soin apporté au réglage de l'affûtage.

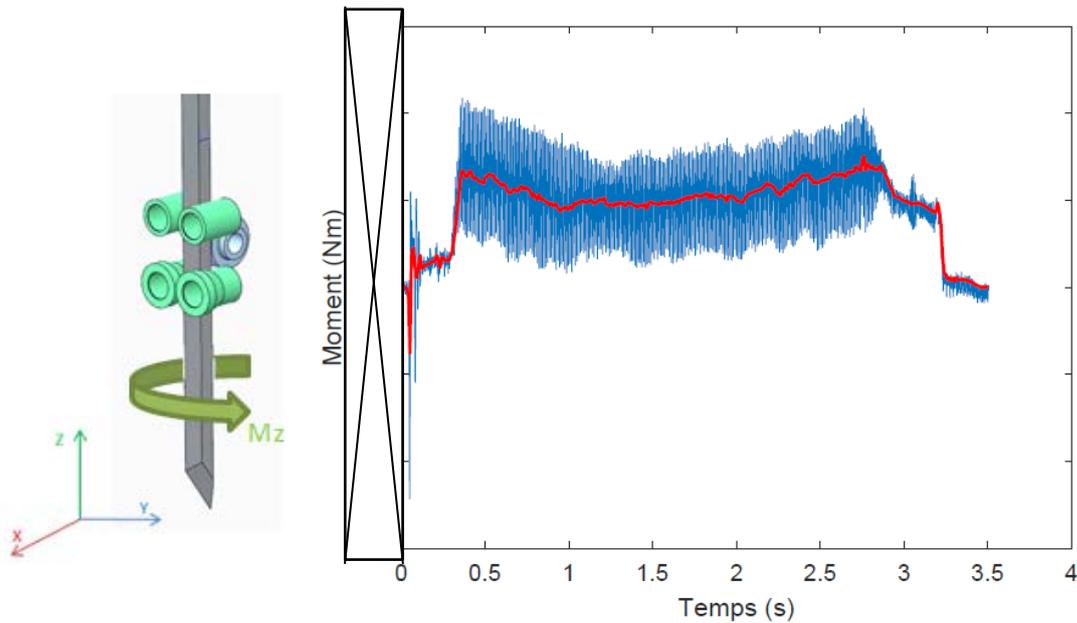


Figure III-18 : Moment de torsion  $M_z$  (données confidentielles supprimées).

Ce moment est également soumis à une oscillation autour d'une valeur moyenne (en rouge sur la figure). La longueur de la lame n'étant pas fixe lors de sa montée et sa descente dans la matière, sa rotation est plus ou moins importante.

### III.1.7. Mesures dans le guide lame

Les paragraphes suivants vont montrer que, pour la plupart des capteurs installés dans le guide lame, les mesures ne sont pas aussi fiables qu'escomptées.

#### III.1.7.1. Efforts suivant l'axe Y

En bas du guide lame, les capteurs Y1 et Y2 renvoient exactement le même signal (figure III-19), ce qui peut laisser penser que la lame appuie de façon égale sur les deux galets. La valeur de cet effort est démesurément importante en comparaison avec les efforts dans le pied presseur et ne correspond pas à la réalité des efforts à cet emplacement (cf. 1.4.2.2.).

Cela peut s'expliquer par la présence de grandes vibrations de la lame sur ces galets où le jeu entre ces différents éléments est quasiment nul. La lame aurait tendance à se tordre et à appuyer de façon égale sur les deux galets opposés (figure III-20), créant ainsi ce signal erroné.

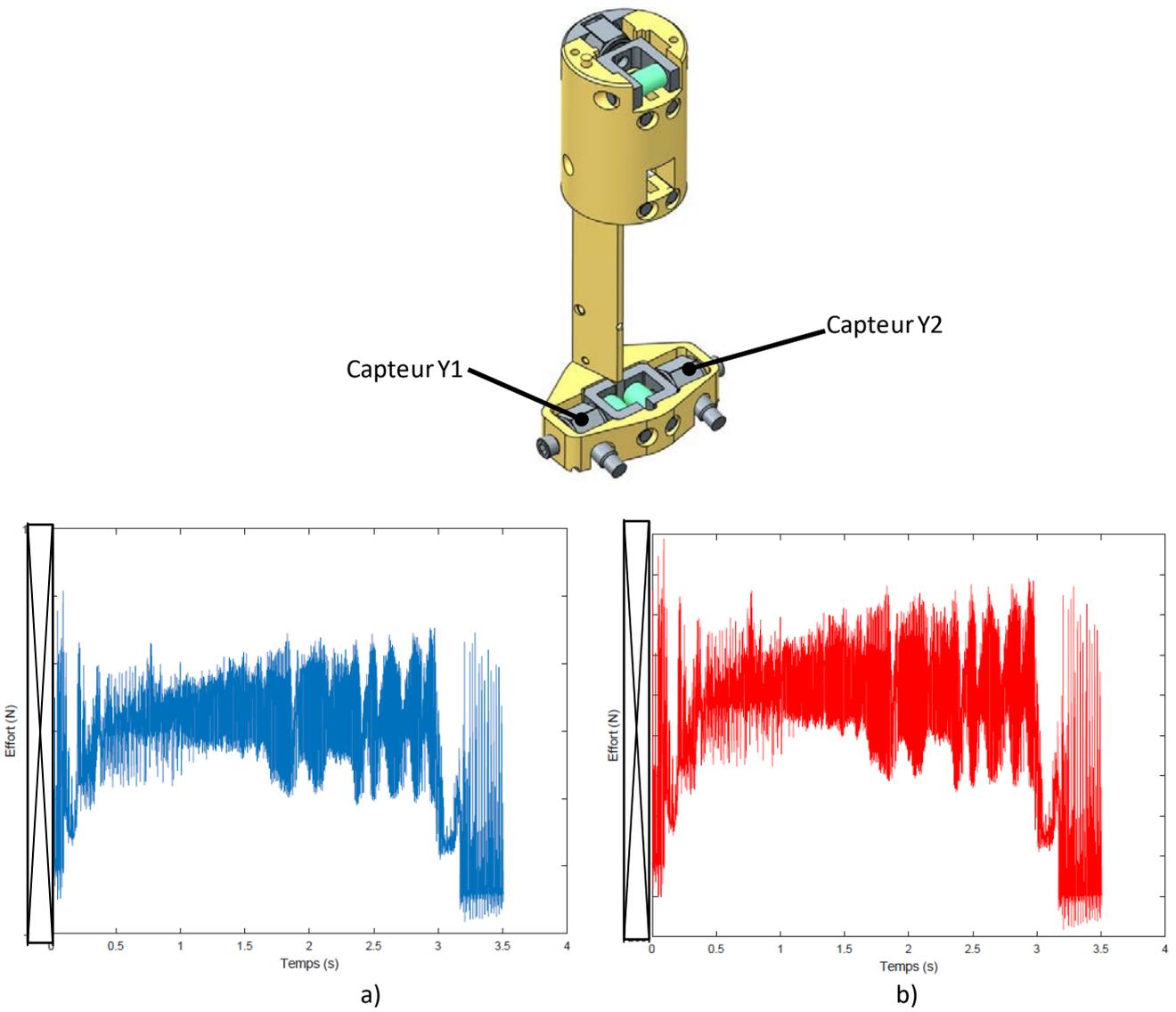


Figure III-19 : Mesures des efforts sur les galets a) effort Y1, b) effort Y2 (données confidentielles supprimées).

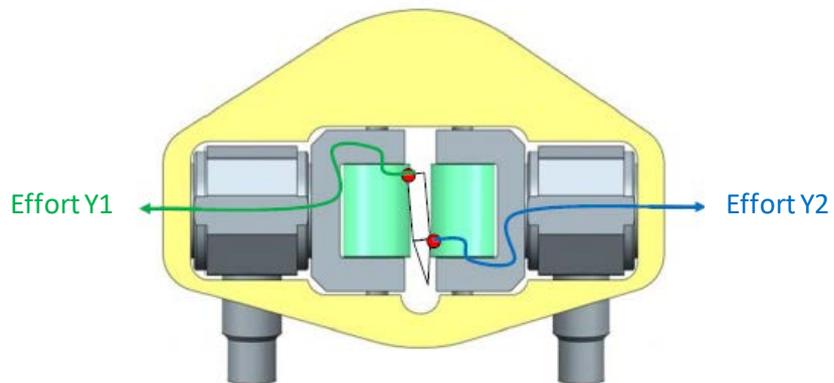


Figure III-20 : Lame en torsion entre les galets latéraux du guide lame.

### III.1.7.2. Efforts suivant l'axe X

Contrairement aux mesures enregistrées en bas du guide lame, le capteur supérieur renvoie une information fiable et similaire à l'effort de coupe frontal mesuré par le dynamomètre dans le pied presseur. Sa valeur correspond parfaitement aux estimations faites par analyses statiques : à savoir 18% de l'effort de coupe frontal.

### III.1.8. Mesure de température

Le capteur de température renvoie une information semblant correspondre aux mesures effectuées par caméra thermique lors d'études ultérieures par Lectra.

*(Données confidentielles supprimées)*

Après analyse d'une coupe, Il apparaît que la température augmente très rapidement jusqu'à atteindre une valeur stationnaire (figure III-21).

En effectuant des coupes de plus en plus longues, cette tendance est confirmée et semble sensible à la fréquence de coupe accentuant le frottement sur la matière. Cette analyse sera confirmée par l'exploitation complète de la campagne expérimentale, *infra*. La lame atteint des températures allant jusqu'à  sans conséquence pour le tissu, ni pour la lame. La température du tissu n'est pas mesurable par ce procédé mais elle semble être similaire à celle de la lame à l'interface entre les deux matériaux *(données confidentielles supprimées)*.

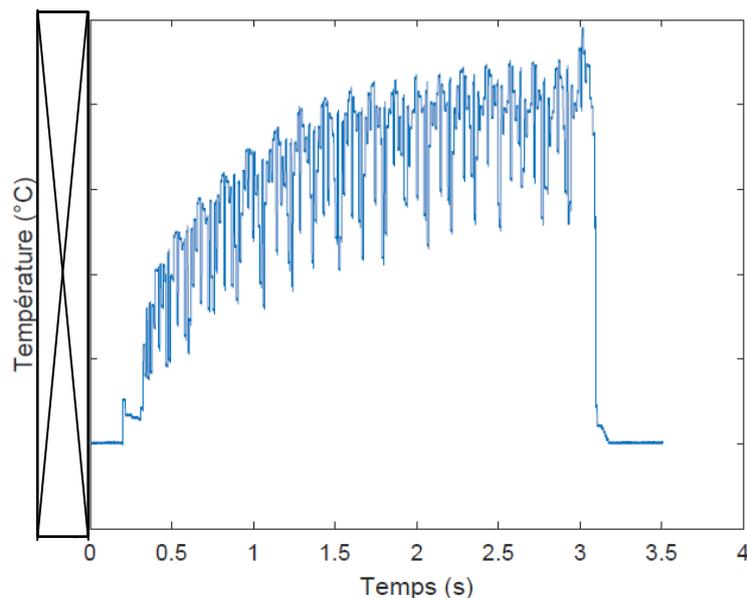


Figure III-21 : Mesure de la température de la lame pendant une coupe *(données confidentielles supprimées)*

Pour faciliter l'analyse de la température, les mesures subiront un léger traitement. La mesure est sensible aux mouvements de lame et perd en précision quand celle-ci est en position haute montrant une baisse de température brutale qui ne devrait pas avoir lieu. Seules les valeurs maximales de la température seront ainsi conservées afin d'obtenir des courbes de température beaucoup plus exploitables en supprimant ces erreurs de mesures.

### III.1.9. Signaux pertinents

A l'étude des différents relevés enregistrés par les capteurs, certaines mesures ont été écartées de l'analyse car elles n'étaient pas jugées assez représentatives. Elles proviennent toutes du guide lame instrumenté de trois capteurs mono axes.

Les capteurs en bas du guide lame donnent des signaux perturbés, ne permettant pas de définir un réel appui pendant la coupe à cause des vibrations et des torsions de la lame. Le déplacement de la lame dans la matière est surtout mesurable au plus près de la coupe, dans le pied presseur.

Le capteur en haut du guide lame a lui aussi été écarté de l'analyse. Bien que sa mesure soit juste et précise, il n'ajoute aucune plus-value à la compréhension de l'effort frontal, sa contribution étant proportionnelle à l'effort de coupe. Sa valeur est donc tout à fait calculable à partir des valeurs mesurées dans le pied presseur.

### III.1.10. Conclusion

Cette première campagne d'essais a permis de mettre en évidence le comportement de certaines réponses et notamment, l'évolution de l'effort frontal en fonction de la fréquence de coupe.

Cela confirme la tendance répandue dans l'industrie, à savoir que l'augmentation de la fréquence de coupe a une conséquence directe sur la diminution de l'effort de coupe frontal. Lectra avait déjà obtenu ces résultats en contrôlant les courants moteurs et avait donné une vision qualitative de cet effort de coupe. La valeur de l'effort frontal a montré une tendance à diminuer jusqu'à atteindre une limite avec l'augmentation de la fréquence de coupe.

La même conclusion est faite en comparant les mesures réalisées avec l'instrumentation de la machine.

La réalisation d'essais préliminaires a également montré que certaines mesures n'étaient pas pertinentes et seront donc écartées de l'analyse par plan d'expériences. Les mesures faites dans le guide lame ne seront donc pas prises en compte.

## III.2. Plans d'expériences

Le dispositif validé, il est maintenant nécessaire de procéder à une mise en place de la démarche expérimentale.

En examinant les résultats obtenus par les coupes des essais préliminaires, il apparaît que certains facteurs inhérents au mouvement même de la lame, ont un impact direct sur les réponses de l'effort frontal ou de la température. De ce fait, deux groupes de facteurs sont créés :

- un premier, prenant en compte les paramètres cinématiques et géométriques,
- un deuxième, rajoutant les autres paramètres.

*(Données confidentielles supprimées)*

Dans un premier temps, un plan factoriel complet ne prenant en compte que les premiers paramètres est mis en place.

Dans un second temps, un plan de Taguchi est conduit afin d'inclure l'intégralité des facteurs du premier et du second groupe. Il est certain que les deux plans mettent en évidence des résultats similaires, mais la juxtaposition des deux apporte davantage de précisions.

### III.2.1. Facteurs

Comme précisé dans le paragraphe I.5, l'identification des paramètres influents est basée sur l'analyse de la coupe et le retour des utilisateurs sur les machines de découpe. Il s'agit des facteurs d'entrée retenus pour le plan d'expériences. Ils sont au nombre de dix (tableau III-1) :

Type	Commentaires
-	-
<b>Le dimensionnement des grains de l'affutage</b>	Deux types de bandes affuteuses sont utilisées : une disposant d'un grain de 36 et une d'un grain de 150.
<b>L'utilisation d'un lubrifiant de la lame</b>	Pour certains matériaux, un lubrifiant peut être utilisé pour réduire le frottement et donc la température de la lame pendant la coupe.
<b>L'utilisation d'un refroidissement</b>	La tête de découpe est équipée d'un dispositif de refroidissement par air pulsé.
-	-
-	-
-	-
<b>La dépression appliquée pour le maintien du tissu</b>	Elle peut varier de 25% à 100% de la puissance totale de la turbine d'aspiration. Soit environ de 50 mbar à 200 mbar.
<b>L'épaisseur du matériau à découper</b>	Elle pourra varier de la moitié de l'amplitude de coupe jusqu'au maximum admissible (60mm).
<b>L'orientation du tissage du matériau à découper</b>	Le tissu n'étant pas homogène, son orientation est importante. Il sera intéressant de tester les orientations dans le sens de la trame puis de 25°, de 45° et de 90° par rapport à la trame.

Tableau III-2 : Liste des facteurs (données confidentielles supprimées).

### III.2.2. Niveaux de chaque facteur

Dans l'élaboration d'un plan d'expériences, il est impossible de faire évoluer chaque paramètre de façon continue. Il faut donc chercher à discrétiser chaque valeur de facteurs en un nombre fini de niveaux. Le tableau III-2 répertorie les différents niveaux de chaque facteur.

FACTEUR	NIVEAUX				NOMBRE DE NIVEAUX
-	-	-	-	-	2
<b>Dimensionnement des grains d'affutage</b>	36		150		2
<b>Utilisation du refroidissement</b>	oui		Non		2
<b>Utilisation d'un lubrifiant</b>	oui		Non		2
-	-	-	-	-	4
-	-	-	-	-	4
-	-	-	-	-	4
<b>Dépression du maintien de tissu (%)</b>	25	50	75	100	4
<b>Epaisseur du matériau à découper (mm)</b>	1/2A	A	2A	Max	4
<b>Orientation du tissage du matériau (°)</b>	0	25	45	90	4

Tableau III-3 : Niveaux des facteurs (données confidentielles supprimées).

La construction des différents plans d'expériences à partir de ce tableau est donnée en annexe confidentielles A.III.1.

### III.3. Analyse individuelle des résultats

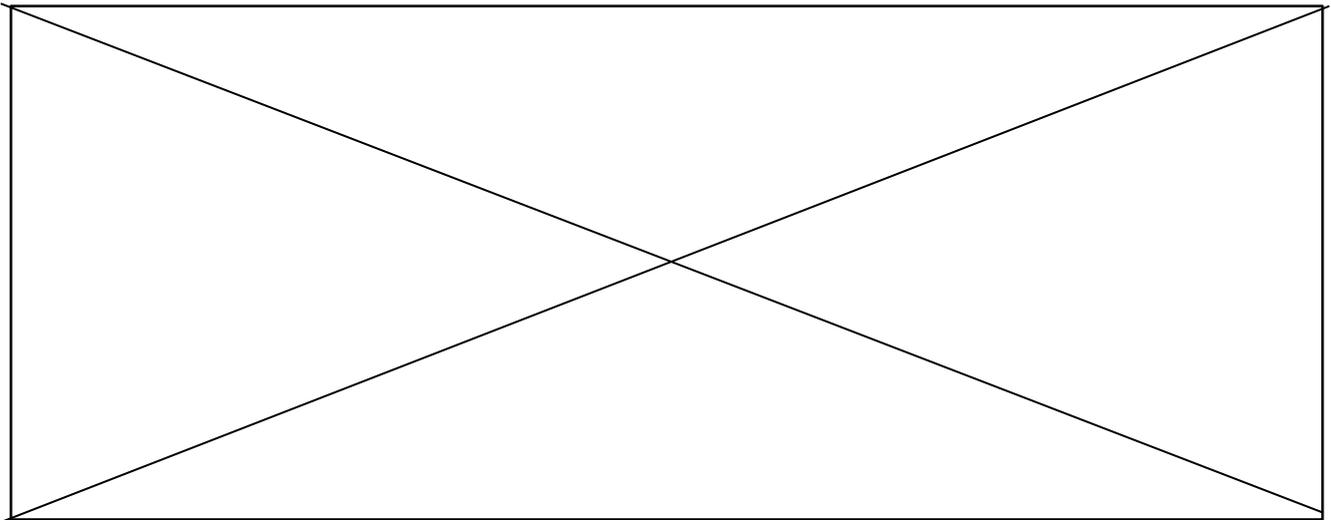
A partir des résultats obtenus à l'aide des différents plans d'expériences, il est possible de hiérarchiser les facteurs en fonction de leur influence sur les différentes réponses importantes. Ce sont les actions qui déterminent véritablement la qualité de la coupe rectiligne, à savoir, la flexion frontale représentée par l'effort  $F_x$  ou le moment  $M_y$ , les efforts verticaux représentés par les efforts  $F_z$  sur les vérins et la température de la lame, mesurée dans le pied presseur.

Ce chapitre s'attachera à définir l'impact des différents paramètres de coupe sur ces réponses. L'exploitation des plans d'expériences afin d'établir une modélisation des réponses sera présentée au chapitre IV.  
Le moment  $M_y$  étant calculable à partir de l'effort  $F_x$ , seule l'analyse de cet effort sera présentée.

### **III.3.1. (Données confidentielles supprimées)**

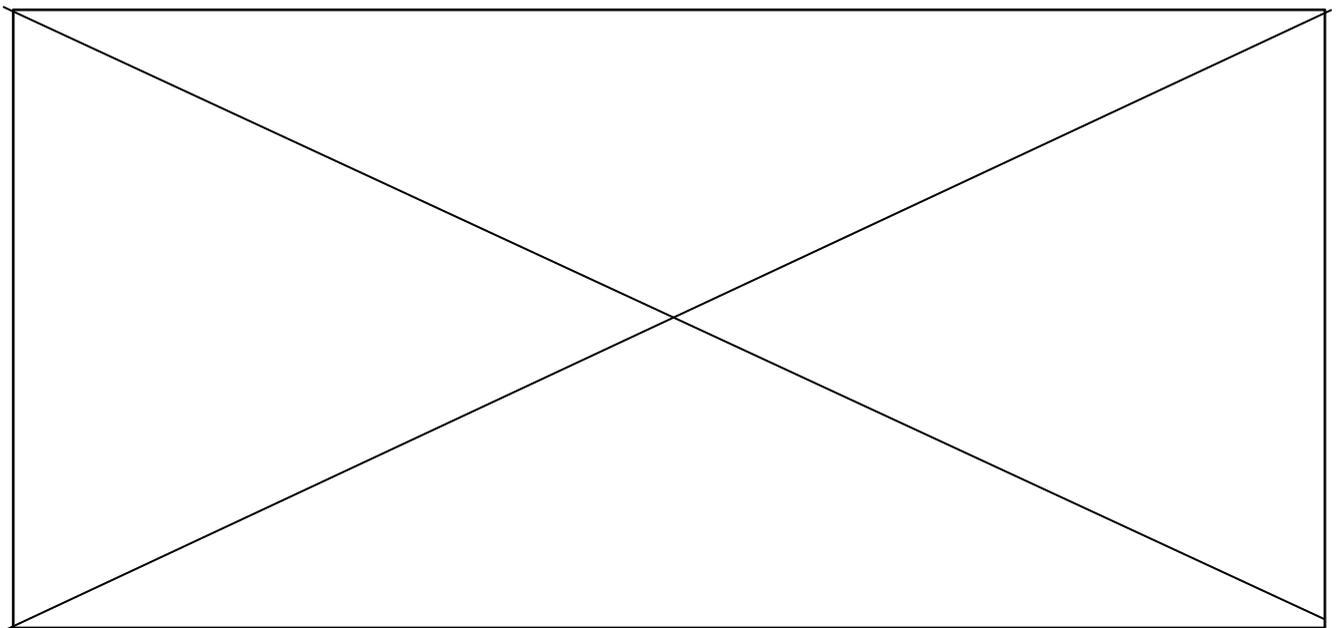
Ces différentes parties font référence à des données ou des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

#### **III.3.1.1. Influence sur l'effort frontal**



*Figure III-22 : (Données confidentielles supprimées).*

#### **III.3.1.2. Influence sur l'effort vertical**



*Figure III-23 : (Données confidentielles supprimées).*

### III.3.1.3. Influence sur la température de la lame

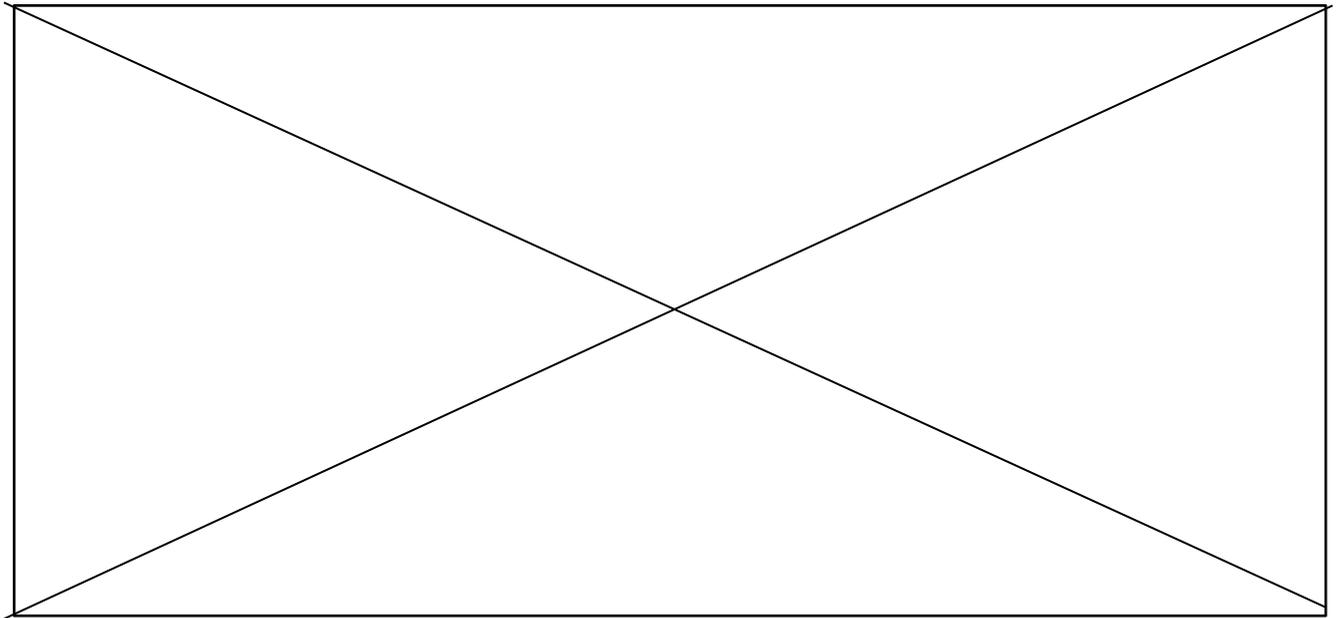


Figure III-24 : (Données confidentielles supprimées).

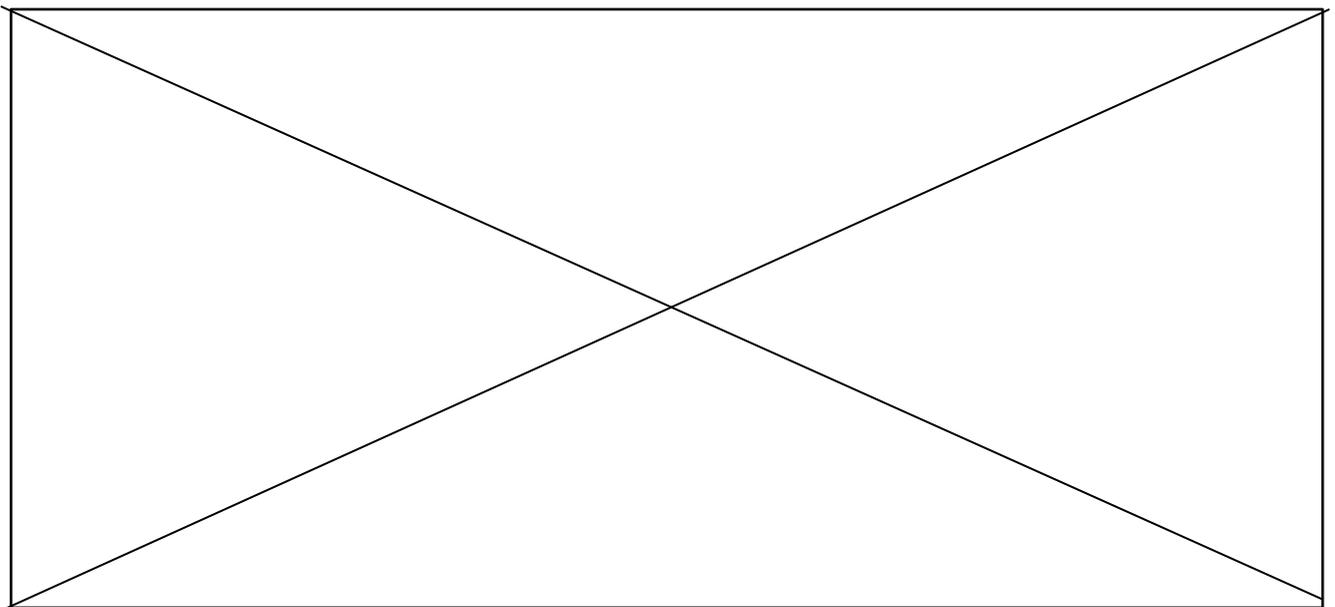


Figure III-25 : (Données confidentielles supprimées).

### III.3.2. (Données confidentielles supprimées)

Ces différentes parties font référence à des données ou des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

### III.3.2.1. Influence sur l'effort frontal

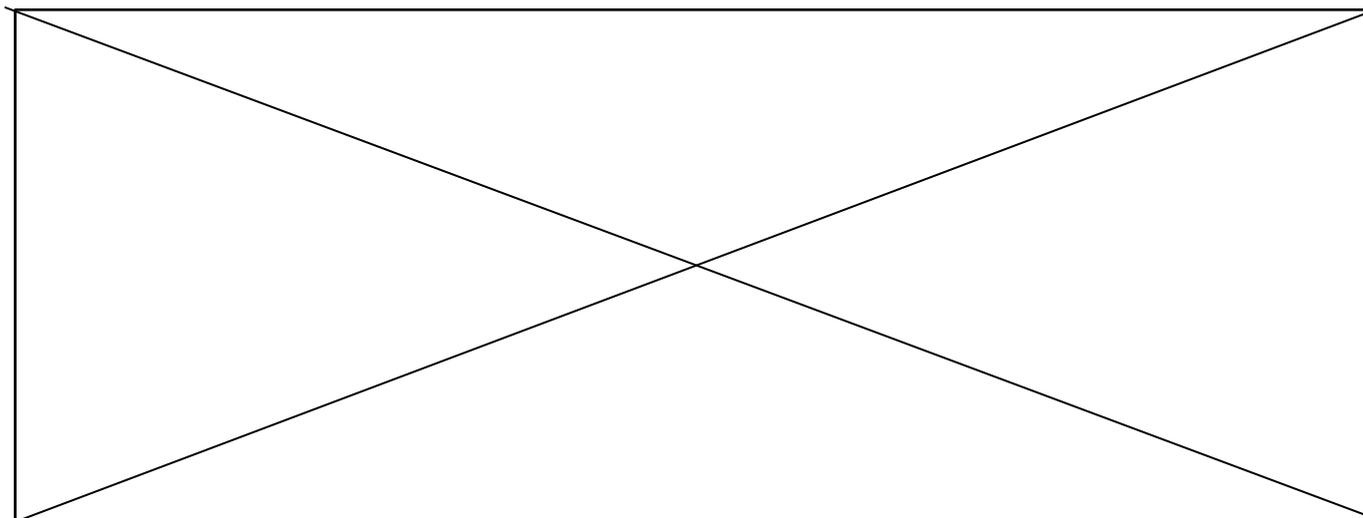


Figure III-26 : (Données confidentielles supprimées).

### III.3.2.2. Influence sur l'effort vertical

(Données confidentielles supprimées).

### III.3.2.3. Influence sur la température de la lame

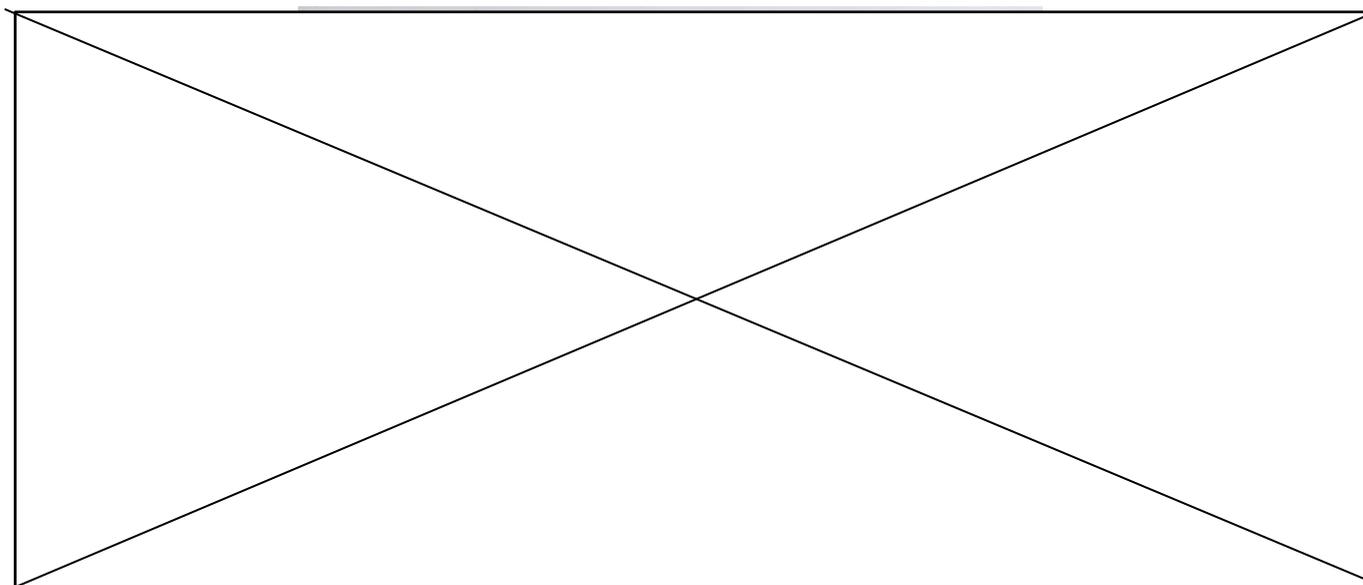


Figure III-27 : (Données confidentielles supprimées).

### III.3.3. (Données confidentielles supprimées)

Ces différentes parties font référence à des données ou des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

### III.3.3.1. Influence sur l'effort frontal

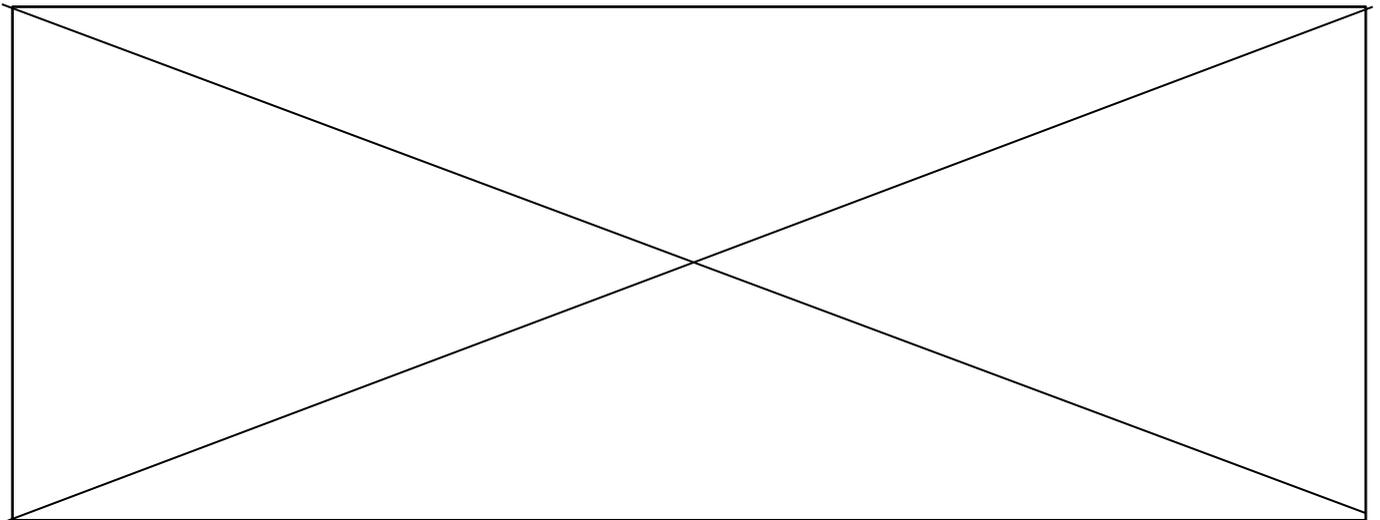
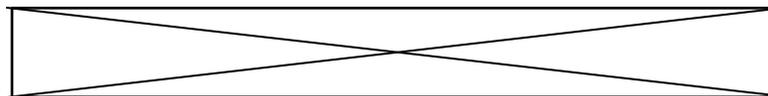


Figure III-28 : (Données confidentielles supprimées).



Eq. 3

-	-
-	-
-	-
-	-
-	-

Tableau III-4 : (Données confidentielles supprimées)

#### III.3.3.1.1. Influence sur l'effort vertical

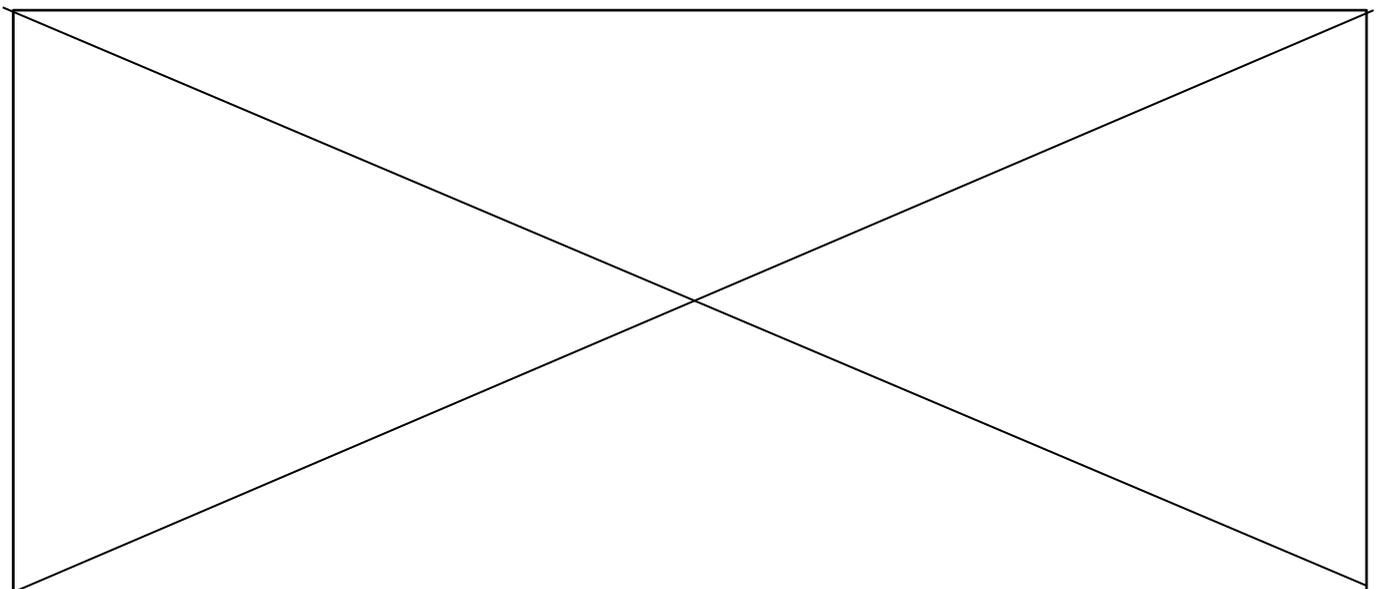


Figure III-29 : (Données confidentielles supprimées).

### **III.3.3.1.2. Influence sur la température de la lame**

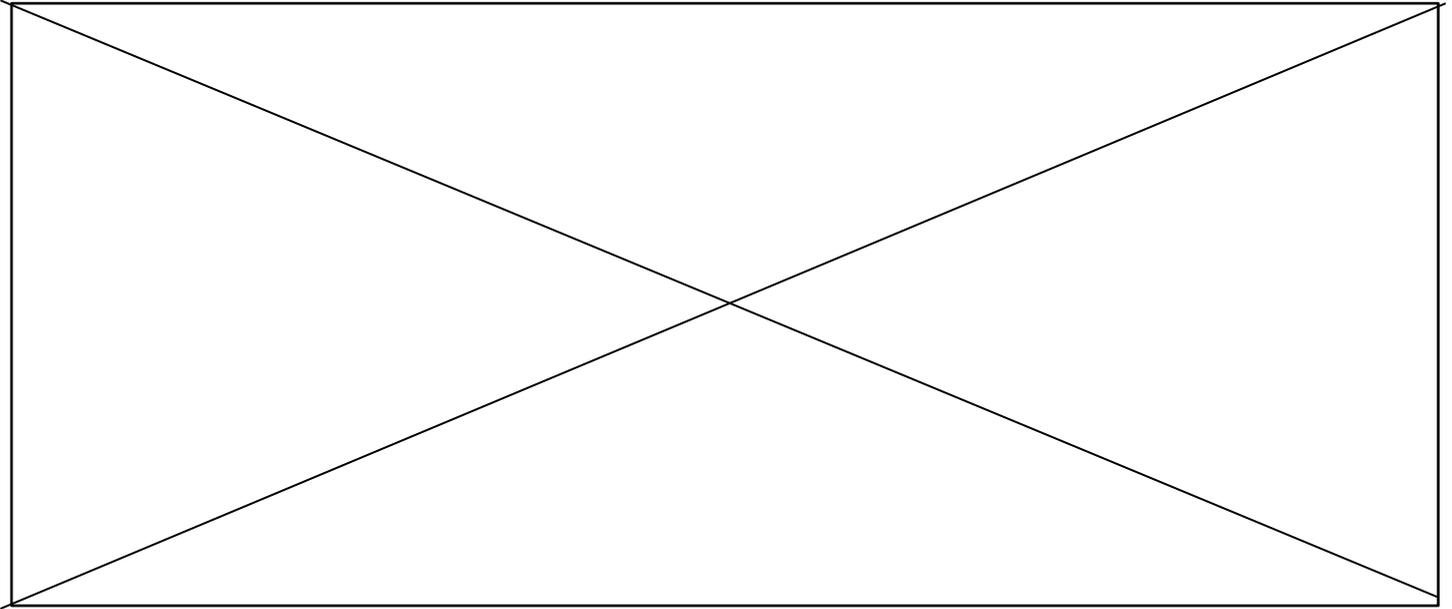


Figure III-30 : (Données confidentielles supprimées).

### **III.3.4. (Données confidentielles supprimées)**

Ces différentes parties font référence à des données ou des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

### **III.3.4.1. Influence sur l'effort frontal**

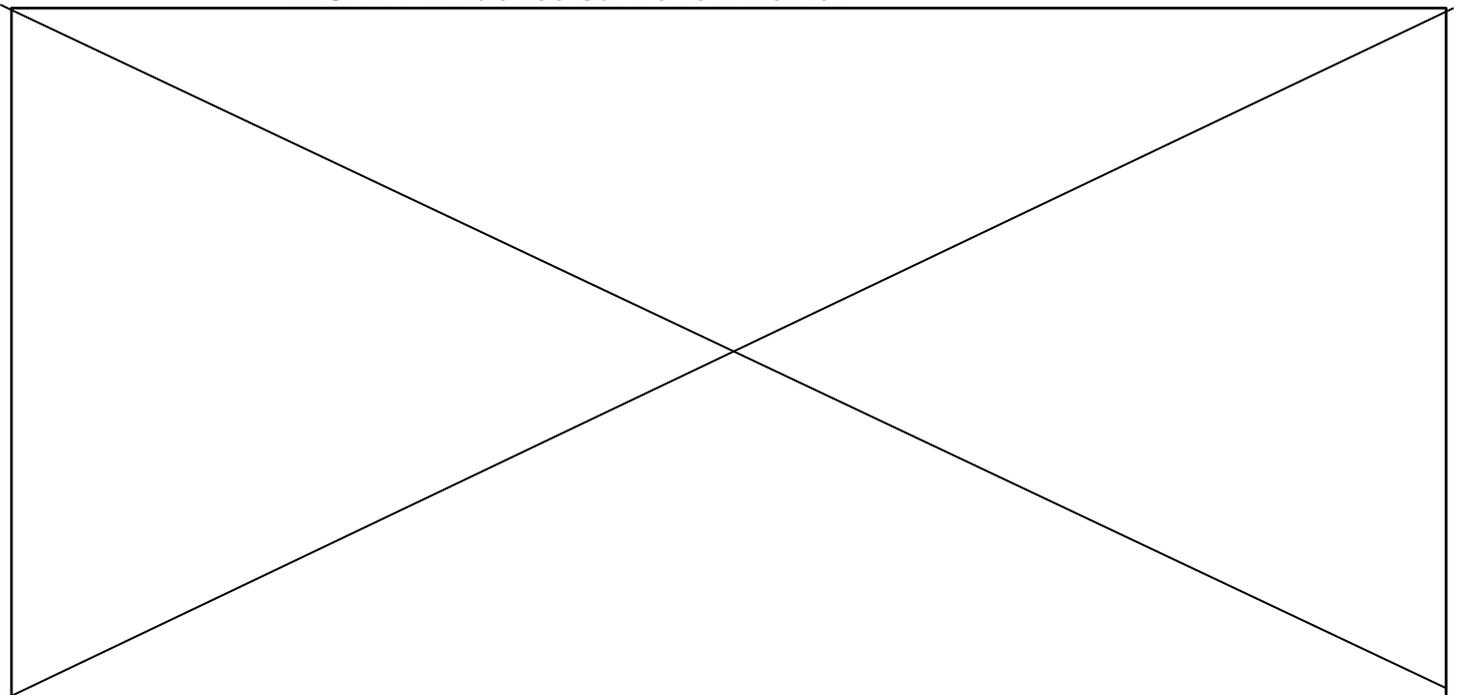


Figure III-31 : (Données confidentielles supprimées).

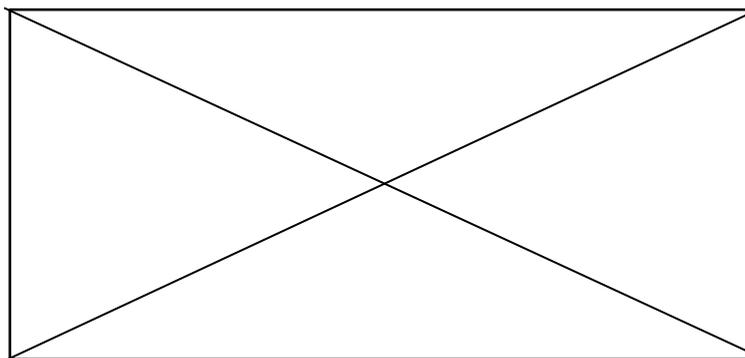


Figure III-32 : (Données confidentielles supprimées).

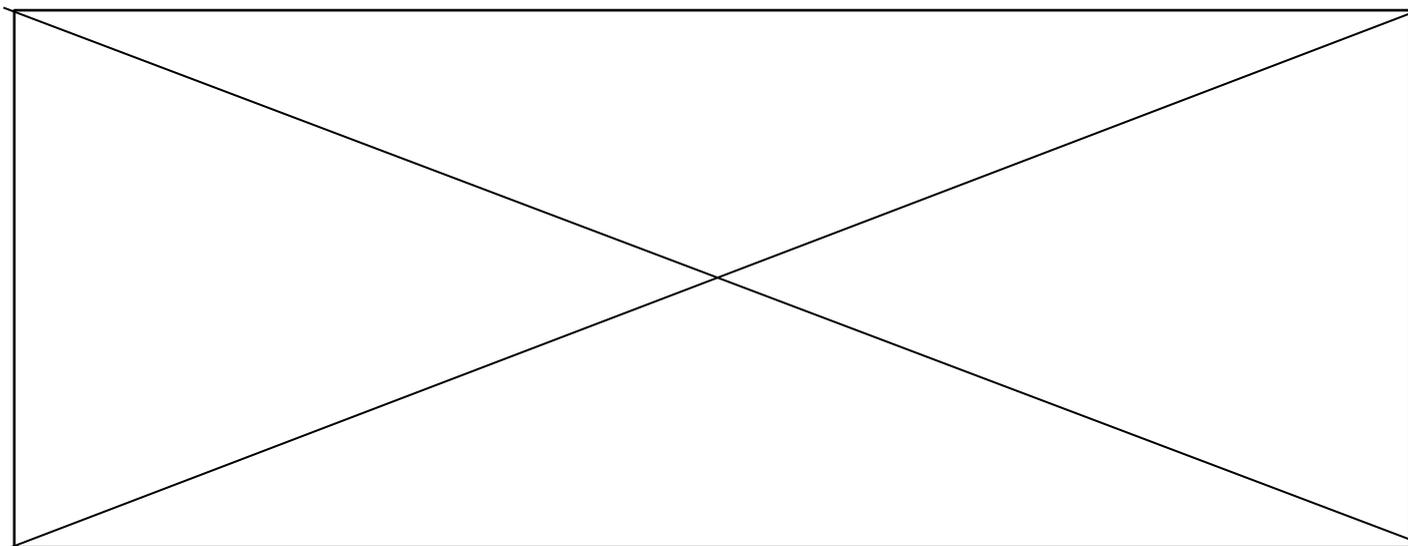


Figure III-33 : (Données confidentielles supprimées).

### III.3.4.2. Influence sur l'effort vertical

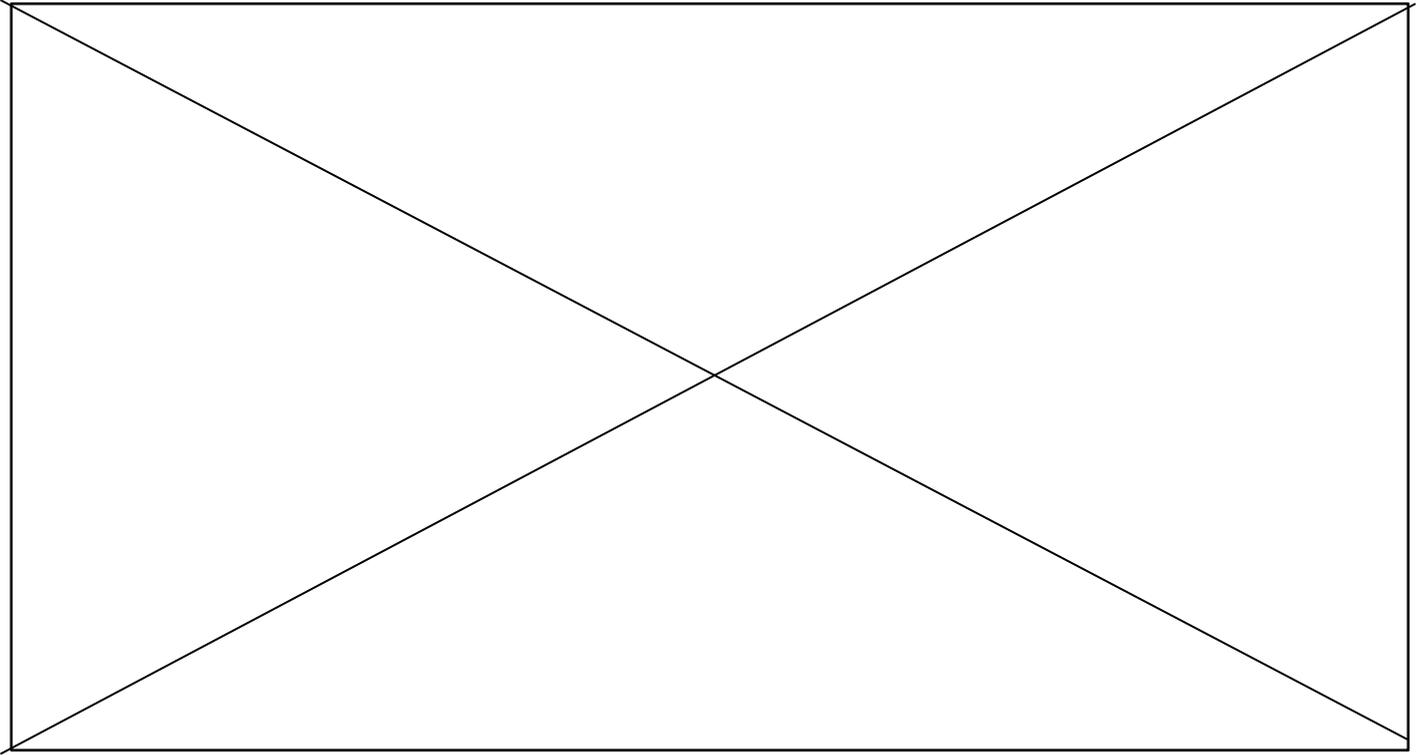


Figure III-34 : (Données confidentielles supprimées).

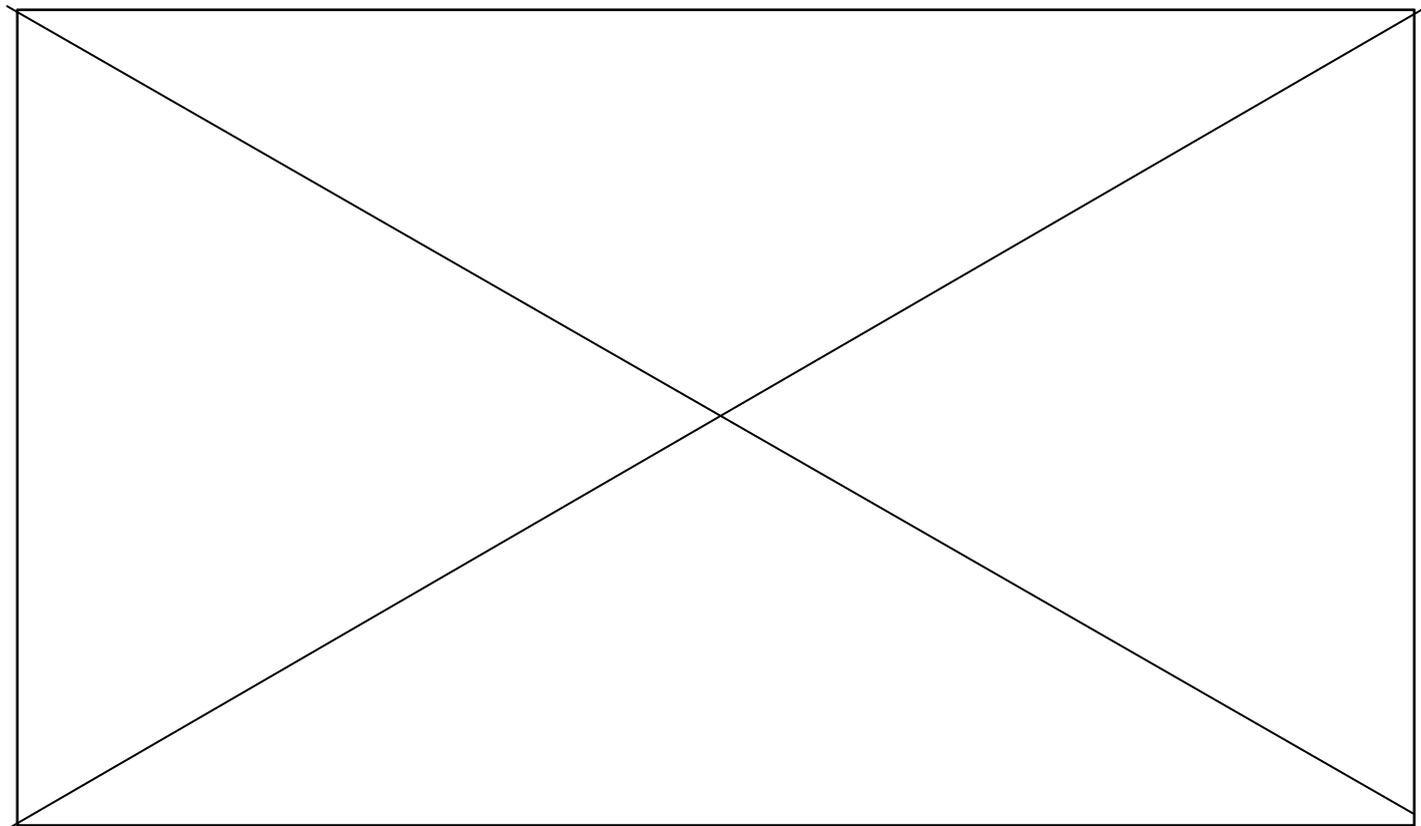


Figure III-35 (Données confidentielles supprimées).

### III.3.4.3. Influence sur la température de la lame

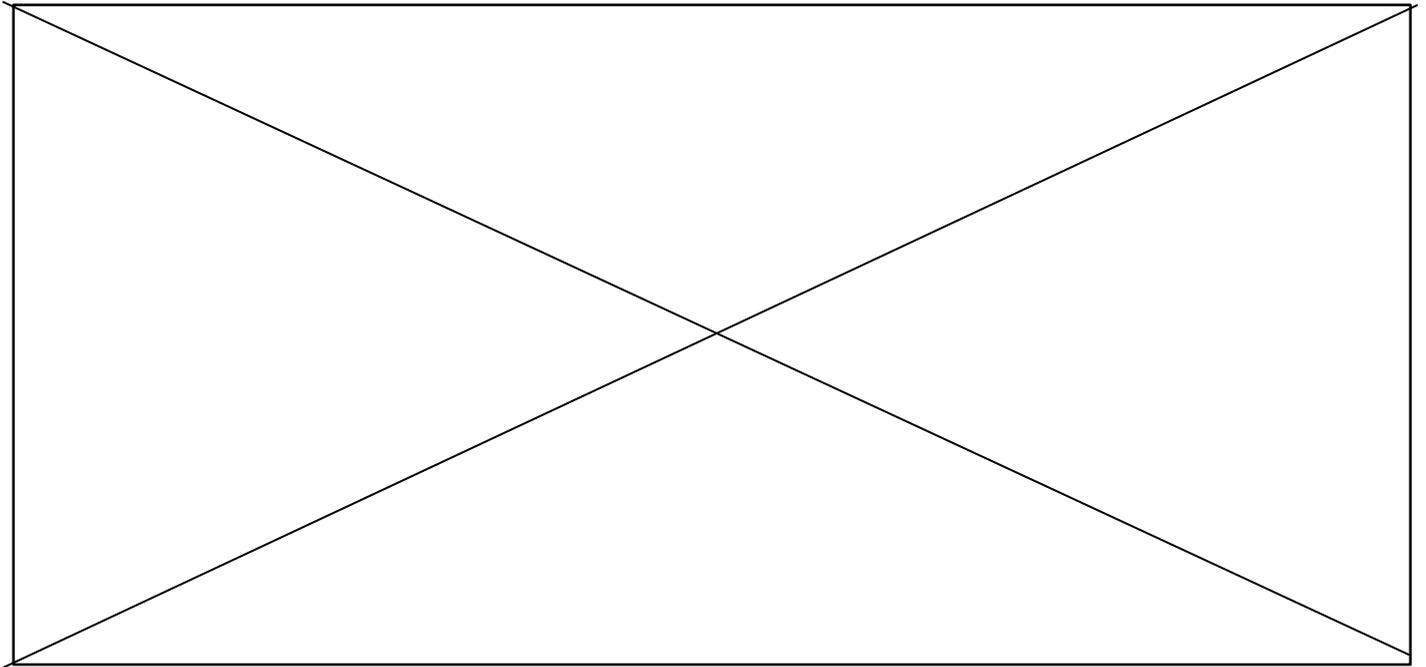


Figure III-36 : (Données confidentielles supprimées).

### III.3.5. Le type d'affûtage utilisé

#### III.3.5.1. Influence sur l'effort frontal

Le type d'affûtage utilisé (grain 150 ou 36) ne modifie pas l'effort frontal enregistré par le pied presseur. Du moment que le fil de coupe est présent, l'état de surface de la lame ne semble pas être un paramètre très influent de l'effort de coupe frontal. Les résultats sont visibles sur la figure III-37, où deux coupes sont présentées, une avec un affûtage avec un grain 150 en bleu et une avec un grain 36 en rouge.

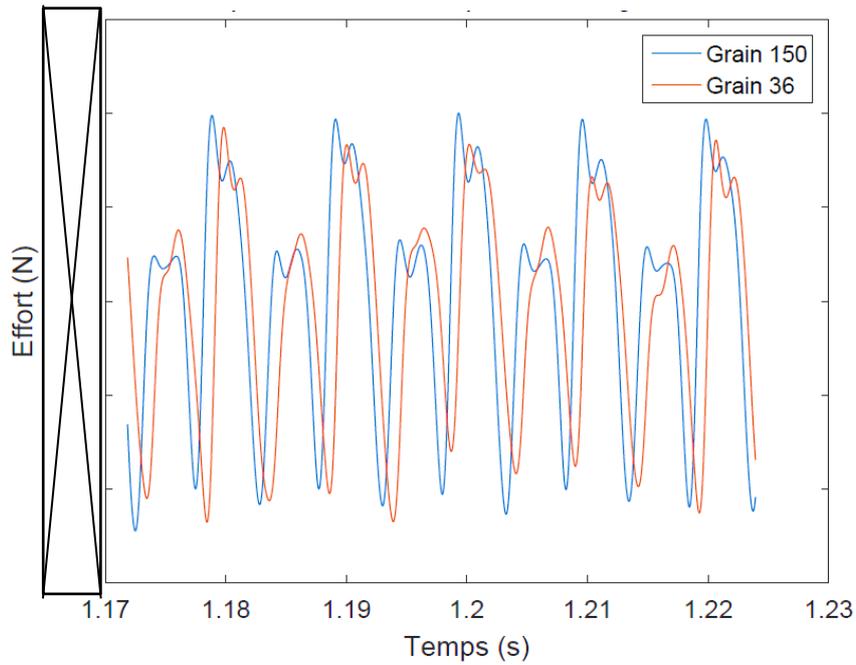


Figure III-37 : Comparaison d'efforts frontaux pour deux affûtages différents (données confidentielles supprimées).

De ce fait, l'état de surface de la lame, bien qu'il soit très différent entre un affûtage fin à grain 150 et un affûtage grossier à grain 36, n'influe pas sur la capacité à couper la matière.

### III.3.5.2. Influence sur l'effort vertical

L'utilisation d'un grain d'affûtage 36 a pour résultat de créer un état de surface irrégulier sur la lame. Celle-ci accroche davantage la matière, créant un effort vertical légèrement plus important que pour une lame affûtée avec un grain plus fin. Cependant, la différence n'est pas réellement significative (figure III-38) :

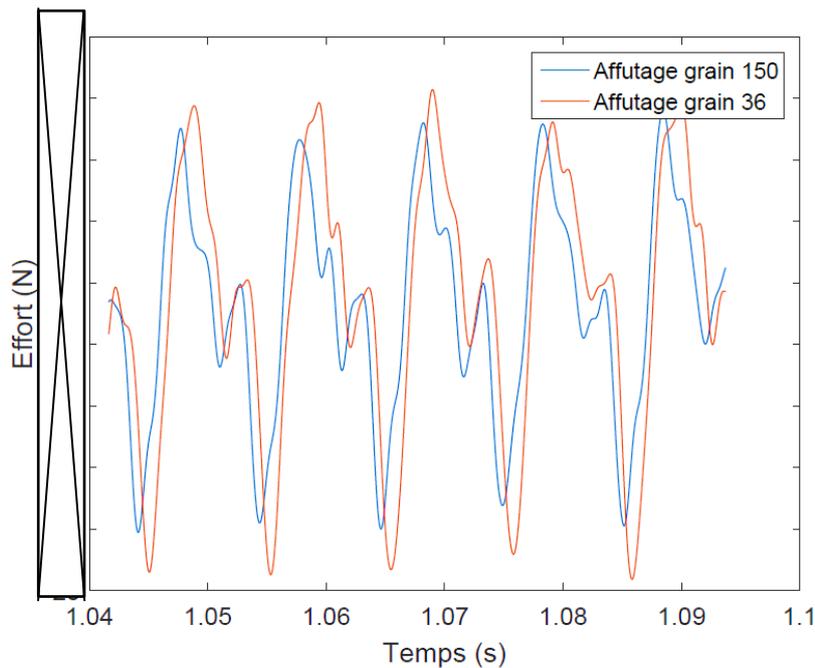


Figure III-38 : Comparaison d'efforts verticaux avec deux affûtages différents (données confidentielles supprimées).

### III.3.5.3. Influence sur la température de la lame

Le grain d'affûtage grossier (grain 36) est utilisé pour pallier certains problèmes de température de lame en emprisonnant un peu d'air entre la lame et le tissu découpé afin de refroidir légèrement la lame. Pourtant, le dispositif mis en place dans le pied presseur n'a pas permis de vérifier cet effet (*données confidentielles supprimées*).

## III.3.6. L'épaisseur du matériau découpé

### III.3.6.1. Influence sur l'effort frontal

L'épaisseur du matériau découpé correspond en réalité à la longueur de la lame engagée dans la matière offrant une résistance à la coupe.

La figure III-39 représente la valeur de l'effort frontal en fonction du nombre de plis de tissus coupés. Cette évolution peut être considérée comme linéaire au vu des essais effectués sur quatre épaisseurs différentes.

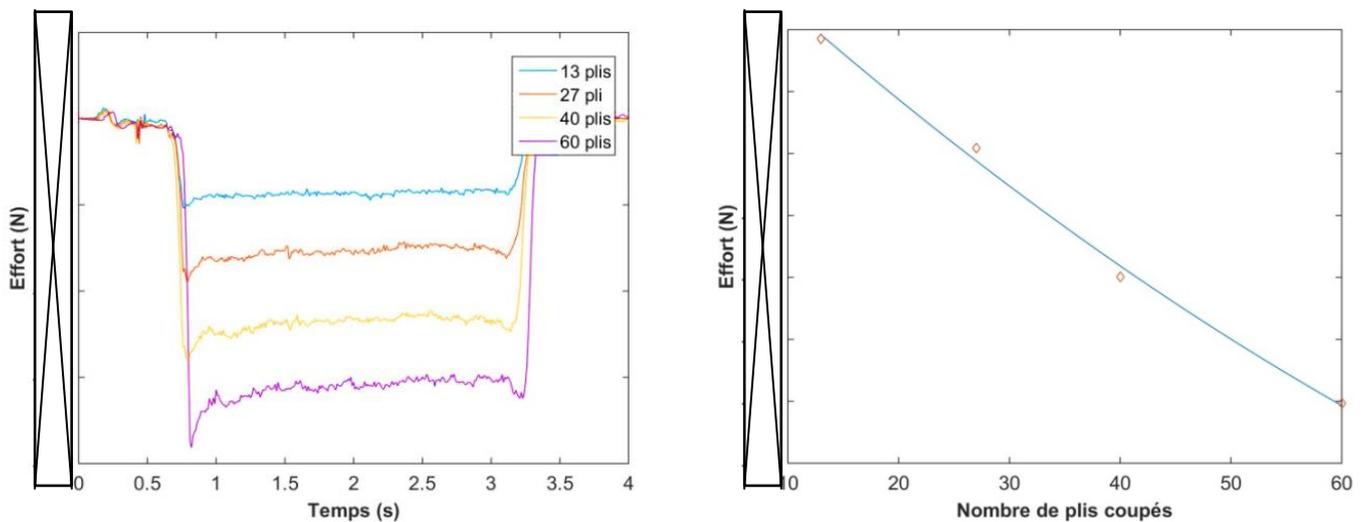


Figure III-39 : Evolution de l'effort de coupe moyen en fonction du nombre de plis découpés (*données confidentielles supprimées*).

Dans ce cas, la différence d'effort entre une coupe de faible épaisseur et une coupe de grande épaisseur est très importante.

### III.3.6.2. Influence sur l'effort vertical

Contrairement aux efforts frontaux, il apparaît que l'épaisseur du matériau découpé n'influe pas sur la valeur des efforts verticaux. La comparaison est établie sur la figure III-40 où l'on remarque très peu de différence entre une coupe dans une épaisseur de 25 mm de *denim* et une de 50 mm.

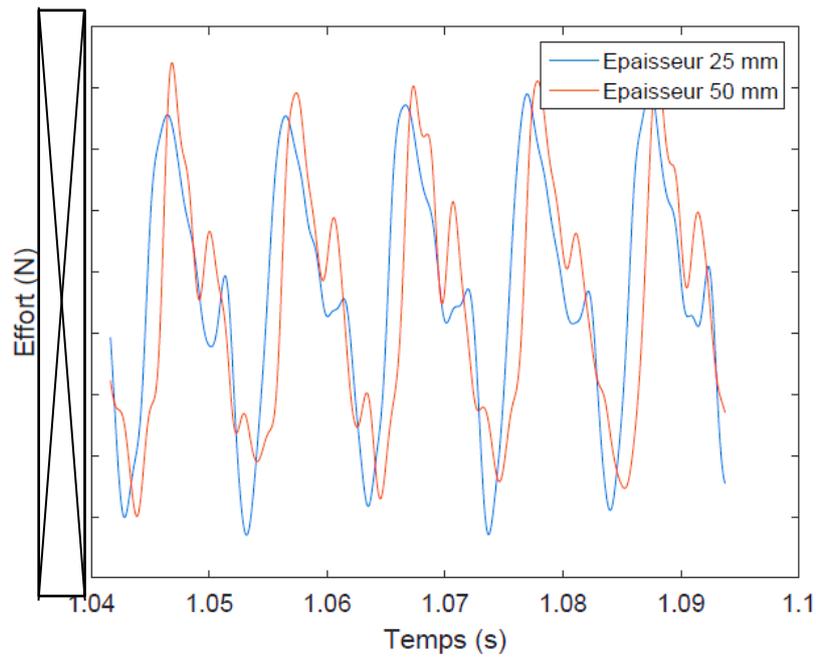


Figure III-40 : Comparaison des efforts verticaux dans deux épaisseurs de tissus différentes (données confidentielles supprimées).

### III.3.6.3. Influence sur la température de la lame

Plus l'épaisseur du matériau augmente et plus la température de la lame a tendance à diminuer (figure III-41). Comme l'effort vertical enregistré sur une épaisseur importante est le même que sur une épaisseur plus faible, cela pourrait expliquer pourquoi la température de la lame diminue car l'énergie à dissiper reste la même pour une surface d'échange plus grande.

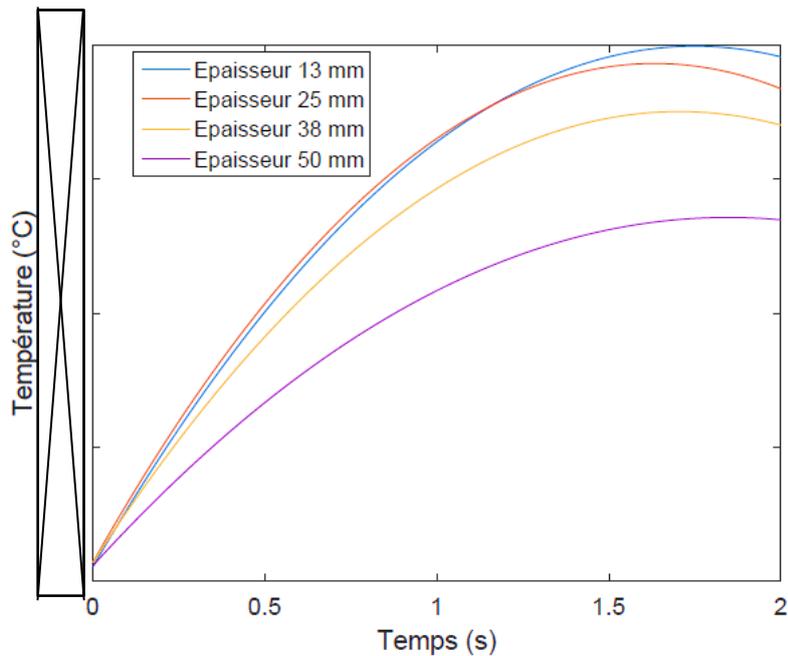


Figure III-41 : Evolution de la moyenne de la température selon plusieurs épaisseurs de tissu découpées (données confidentielles supprimées).

### III.3.7. La dépression appliquée

La variation de la dépression utilisée, nécessaire au maintien en place du tissu, n'a aucun impact sur la valeur de l'effort vertical ni sur la température de la lame. Par contre, elle a un effet direct sur l'effort frontal où un optimum reste à définir. En effet, si la présence de la dépression interne facilite la coupe en favorisant la cohésion de la matière, elle peut également rigidifier de façon excessive le tissu, rendant la coupe plus difficile. L'équilibre entre le maintien suffisant de la pièce et l'effort frontal minimum est à déterminer pour chaque matériau. (données confidentielles supprimées).

### III.3.8. L'utilisation du refroidissement

L'utilisation du refroidissement de la lame par air pulsé ne semble avoir aucun effet sur les valeurs des efforts frontaux ou verticaux. Cependant, il est possible d'enregistrer une baisse de température de la lame d'une vingtaine de degrés par son action.

### III.3.9. L'utilisation du lubrifiant

Pour faciliter la coupe sur les matériaux fusibles, le pied presseur peut être équipé de tampons imbibés de lubrifiant de couture, huilant la lame à chaque montée et descente. Ne tachant pas le tissu, ce liquide a été pensé afin de limiter les frottements entre la lame et la matière à découper.

Les essais de coupe mettent en évidence que l'usage de lubrifiant a un léger impact sur l'effort frontal. Cependant, cette évolution n'est pas significative. Au vu des incertitudes de mesures du dispositif, il est impossible d'affirmer clairement une réelle contribution sur la diminution des efforts de coupe dans les conditions de l'étude.

De la même façon, il aurait tendance à permettre une légère des efforts verticaux mais encore une fois, la diminution est trop faible pour pouvoir être prouvée.

Par contre, la lubrification de la lame induit un réel changement quant à la température de celle-ci : le lubrifiant limite grandement le frottement entre la lame et la matière, entraînant un échauffement moindre. Le résultat est visible sur la figure III-42 où la température d'une lame lubrifiée est plus de deux fois inférieure à celle d'une lame sèche.

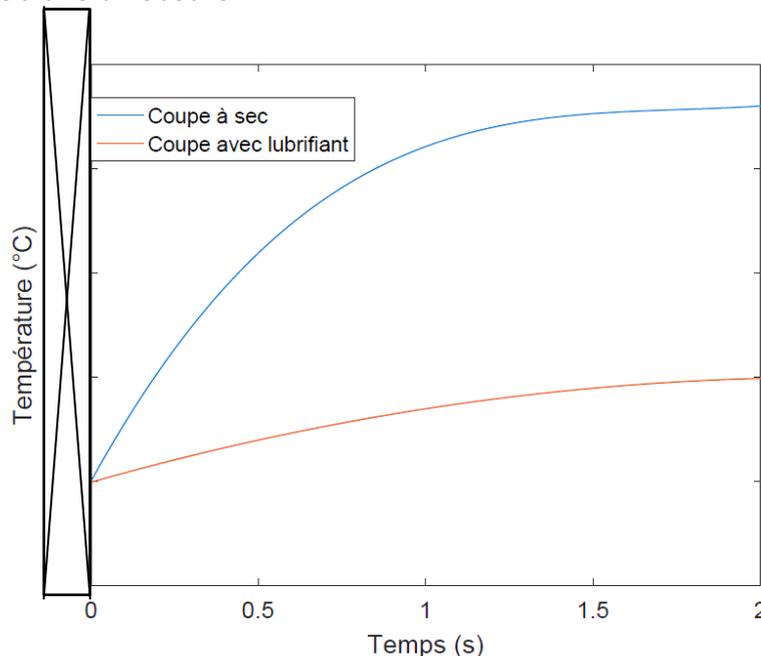


Figure III-42 : Moyenne de la température pour une coupe sans et avec lubrifiant (données confidentielles supprimées).

### III.3.10. L'orientation du matériau pendant la coupe

L'orientation des fibres pendant la coupe agit principalement sur l'effort frontal. Trois orientations de coupes sont réalisées dans du *denim* : une dans le sens de la trame, une autre dans le sens de la chaîne et une dernière à 45° de la trame et de la chaîne. Leurs résultats sont observables sur la figure III-43.

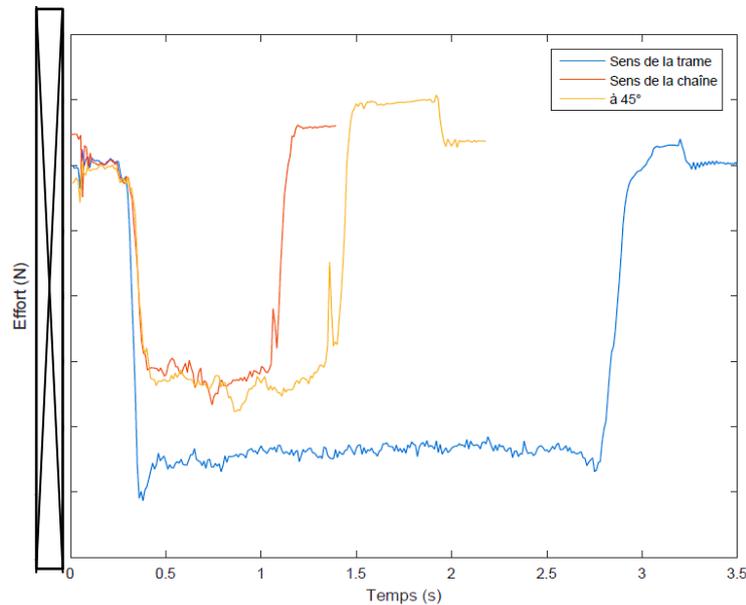


Figure III-43 : Evolution de l'effort frontal suivant différentes orientations de coupe (données confidentielles supprimées).

Comme cela a été vu précédemment, les fils de chaînes possèdent une résistance à la coupe bien plus importante que les fils de trame. De plus, ils sont plus nombreux dans le tissu ce qui explique l'effort plus conséquent lors d'une coupe qui leur est perpendiculaire.

Pour une coupe à 45 ° le résultat n'est pas très différent d'une coupe dans le sens de la chaîne. Les essais de traction en cisaillement du *denim* ont révélé qu'il était bien plus apte à se déformer dans cette direction. Cela pourrait expliquer pourquoi l'effort de coupe frontal est aussi faible alors même que des fils de chaîne sont sectionnés.

## III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats des nombreux essais de coupe ont été exposés et l'influence des différents facteurs sur les indicateurs de la coupe ont été déterminés. Cette masse d'informations permet de comprendre avec davantage de précision les phénomènes physiques et cinématiques mis en jeu.

Les mesures concernant l'effort frontal et le moment  $M_y$  sont particulièrement représentatives du travail de la lame en coupe rectiligne. Elles sont fortement sensibles à la fréquence de coupe, la vitesse d'avance, la géométrie de la lame, l'amplitude de coupe, l'épaisseur, l'orientation et la rigidité du matériau.

Les mesures de l'effort vertical ne sont pas aussi significatives que pour l'effort frontal. Il est très faible et le niveau de précision du dispositif de mesure, pour de telles valeurs, atteint parfois ses limites.

La mesure de la température de coupe, quant à elle, est tout à fait réalisable. Son évolution est principalement fonction de la taille de la lame, de son contact avec la matière, de la fréquence, de l'amplitude de vibration ainsi que de la vitesse d'avance.

Dans le chapitre suivant, les résultats développés lors de ces essais expérimentaux seront utilisés afin de définir une loi de comportement des efforts frontaux et verticaux ainsi que de la température de coupe représentative de la coupe du *denim*.



# Chapitre IV

---

## MODELISATION DE L'ACTE DE COUPE

---



Il est possible avec les résultats des plans d'expériences, de quantifier l'impact des différents paramètres influant sur les efforts de coupe et la température lors d'une coupe rectiligne. Ces informations sont à la base de la modélisation expérimentale qui est détaillée dans la première partie de ce chapitre.

A partir des informations relevées par les capteurs, la modélisation de la flexion de la lame peut également apporter une expertise pertinente et directement applicable en milieu industriel. Cet aspect est détaillé dans la deuxième partie.

## IV.1. Modélisation de l'effort

### IV.1.1. Modèle existant

Dans la littérature, les modèles de coupe du tissu ne sont pas nombreux. Blekač [Blekač, 1998] a travaillé sur un sujet proche de la présente étude : la coupe d'une certaine épaisseur de tissu par l'action d'une lame vibrante.

Le travail  $W$  de la lame  $y$  est défini comme étant la force résultante  $Ft$  générée par le tissu sur la lame, en avançant en ligne droite dans une certaine épaisseur de matière. Ce travail équivaut à la somme des deux mouvements : horizontaux ( $Vh$ ) et verticaux ( $Vv$ ) et à la prise en compte des efforts respectifs  $Fh$  et  $Fv$  dans le plan ( $XZ$ ).

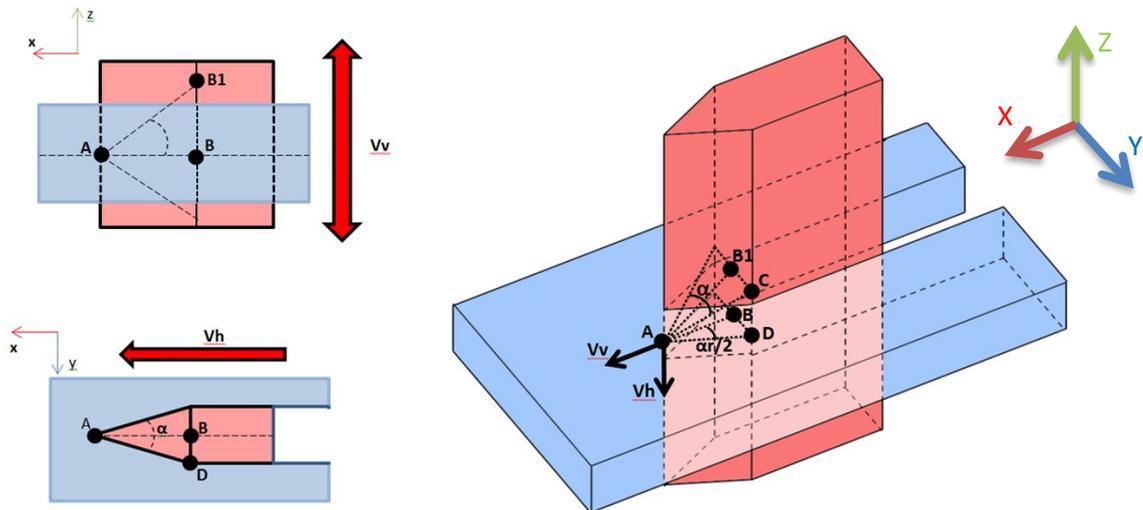


Figure IV-1 : Représentation d'une lame coupant une épaisseur de tissu selon [Blekač, 1998].

Cette relation peut s'écrire :

$$W = W_{horizontal} + W_{vertical} = AB \cdot Fh + B1B \cdot Fv, \quad \text{Eq. 1}$$

Soit :

$$W = AB1 \cdot Ft = \frac{B1C}{\tan \frac{\alpha}{2}} \cdot Ft, \quad \text{Eq. 2}$$

avec  $Ft$ , l'effort total généré par la lame pendant la coupe et  $\alpha$  l'angle de coupe.

Ces équations ont permis aux auteurs de mettre en évidence que le travail de la lame dépend de la vitesse verticale  $Vv$ , de l'angle de coupe  $\alpha$  et de la résistance de la matière.

A partir des travaux expérimentaux réalisés, l'étude développée dans cet ouvrage propose de compléter cette modélisation et de définir un modèle d'effort de la coupe du *denim* selon une trajectoire de coupe rectiligne.

## IV.1.2. Validation du plan d'expériences

L'effort total de coupe  $F_t$  est composé des deux efforts nécessaires à la coupe rectiligne : l'effort horizontal  $F_h$  et l'effort vertical  $F_v$ .

$$\vec{F}_t = \vec{F}_h + \vec{F}_v, \quad \text{Eq. 3}$$

La démarche expérimentale par plan d'expériences permet d'obtenir des valeurs réelles de ces deux efforts ; les critères les faisant évoluer ont été identifiés dans le chapitre précédent. Ce sont tous des facteurs du plan d'expériences complet se concentrant sur les modifications de la taille de lame, la vitesse, la fréquence et l'amplitude de coupe. C'est à travers l'analyse de ce plan que la contribution de chacun de ces facteurs est quantifiée.

L'effort  $F_h$  étant très largement prépondérant par rapport à  $F_v$ , il est possible d'émettre l'hypothèse que l'effort de coupe total  $F_t$  n'est représenté que par l'effort horizontal.

La méthode des plans d'expériences permet d'exprimer, pour une zone d'étude donnée, la réponse en fonction des différents facteurs par l'équation multilinéaire suivante :

$$[F_h] = [M] + [P] \cdot \text{[Diagramme d'un rectangle avec des lignes diagonales se croisant au centre, symbolisant une matrice ou un plan d'expériences]} \quad \text{Eq. 4}$$

avec  $[M]$  la valeur moyenne des efforts mesurés et  $[P]$  la matrice des coefficients (données confidentielles supprimées).

Les coefficients de ces deux matrices varient en fonction du matériau découpé ainsi que des conditions de coupe.

A partir du plan d'expériences, il est également possible de définir le degré d'influence de chaque facteur sur la réponse.

### IV.1.2.1. Vérification de la linéarité

Afin de valider la méthode d'analyse par plan d'expériences, il est nécessaire de procéder à une vérification de linéarité de la réponse du modèle. Cette linéarité, tout comme le défaut de fidélité exprimé ou le pourcentage d'erreur, sont répertoriés dans le tableau IV-1. La droite de Henry est également visible en figure IV-2.

	$F_h$
% Erreur	2.53 %
$r^2$	0.96

Tableau IV-1: Vérification de la linéarité de la réponse.

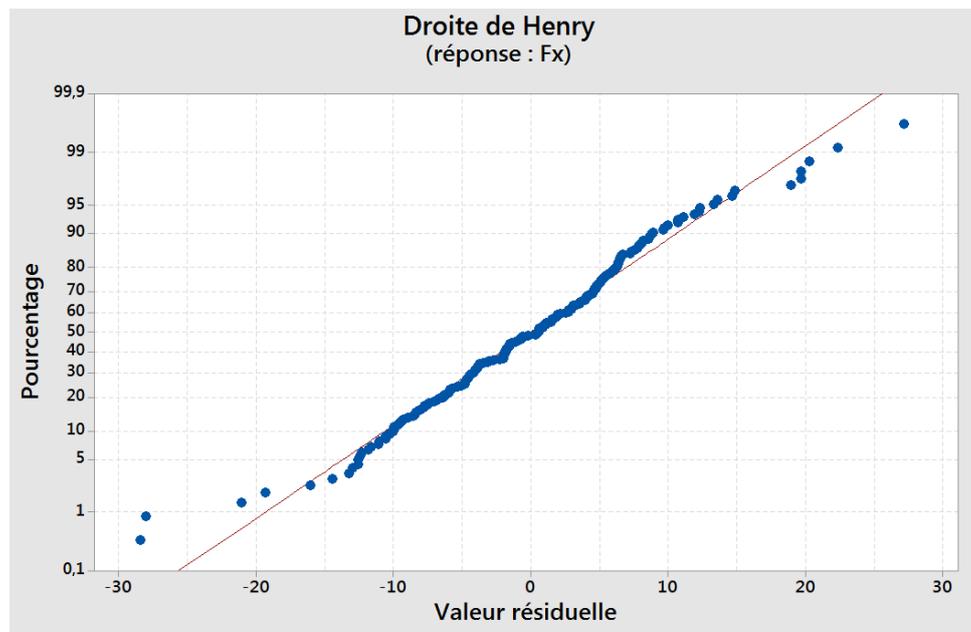


Figure IV-2 : Vérification de la linéarité par droite de Henry.

L'erreur maximale admissible étant de 2.53 %, la fidélité de la réponse sur l'effort frontal peut alors être considérée comme acceptable. De ce fait, l'effort de coupe peut être modélisé avec précision et fidélité par l'intermédiaire des paramètres de l'étude.

#### IV.1.2.2. Analyse de la variance

Une fois la linéarité vérifiée, l'analyse de la variance est une étape obligatoire dans l'interprétation du plan d'expériences, car elle permet d'évaluer l'influence des paramètres choisis sur la sortie étudiée [Poirier, 1993]. Le tableau ci-dessous représente l'analyse de la variance pour les différents facteurs et leurs interactions.

Facteurs et interactions	$F_h$
-	13.1
-	20.2
-	85.2
-	16
-	1
-	0.3
-	2.8
-	0.1
-	0.8
-	0.7

Tableau IV-2 : Résultats de l'analyse de la variance (données confidentielles supprimées).

Le seuil de probabilité d'erreur admissible à 5% obtenu par la loi de Fisher-Snedecor est établi à 8.62 pour cette étude. Toutes ces informations permettent de conclure que quatre facteurs peuvent être pris en compte pour exprimer la valeur de  $F_h$ . Cependant, les interactions n'apportent pas une information assez précise pour pouvoir intégrer le modèle.

### IV.1.2.3. Résultat du plan

Enfin, le plan d'expériences permet d'établir le taux d'influence de chacun des paramètres influents identifiés. Le résultat est visible dans le tableau ci-après :

Facteurs	$F_h$
-	2.45 %
-	63.5 %
-	15.12 %
-	8.94 %

Tableau IV-3 : Degrés d'influence des différents facteurs sur l'effort frontal (données confidentielles supprimées).

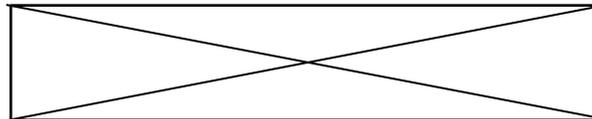
Ces résultats montrent que la vitesse d'avance de la lame est le paramètre prépondérant pour la caractérisation de l'effort frontal. En comparaison avec les autres facteurs, la taille de la lame est l'élément le moins impactant.

Cette analyse a été effectuée en mesurant l'effort moyen pendant la coupe, il est donc possible d'en déduire une expression de la valeur de cet effort.

### IV.1.3. Mise en équation de l'effort frontal

Ces différentes parties font référence à des données ou des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

#### IV.1.3.1. (Données confidentielles supprimées)



Eq. 5

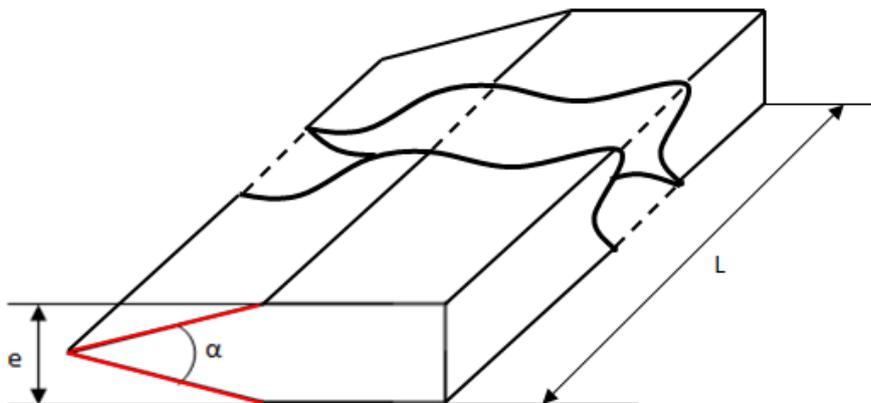
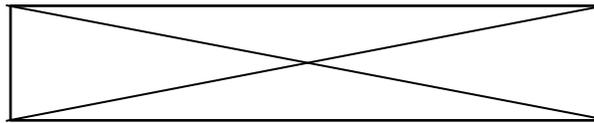


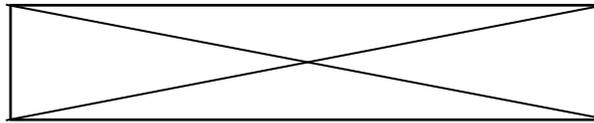
Figure IV-3 : Schématisation d'une lame.

En prenant en compte ces différents paramètres, il est possible d'écrire l'équation caractérisant la valeur de l'effort horizontal pendant la coupe :



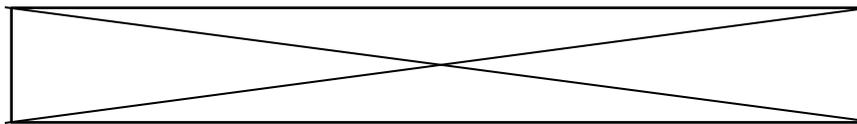
Eq. 6

#### IV.1.3.2. (*Données confidentielles supprimées*)



Eq. 7

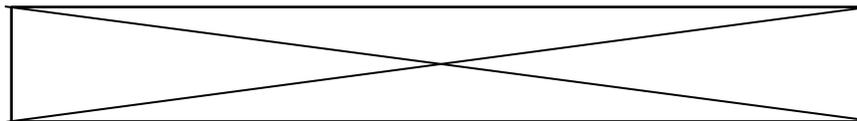
Il est alors possible d'écrire une équation sur l'évolution de l'effort frontal total :



Eq. 8

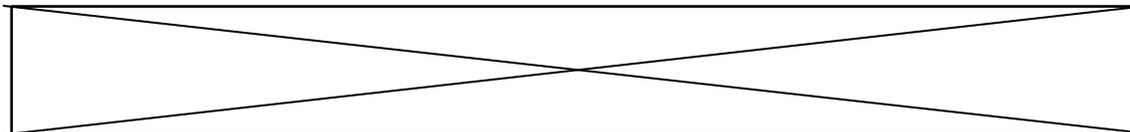
#### IV.1.4. Mise en équation de l'effort vertical

Ces différentes parties font référence à des données ou des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.



Eq. 9

En tenant compte des valeurs des efforts horizontaux et verticaux, l'équation du travail d'une lame vibrante coupant une certaine épaisseur de tissu s'écrit :



Eq. 10

#### IV.1.5. Confrontation avec les essais

Les résultats donnés par les équations 8 et 9 et les mesures effectuées sont illustrés sur les figures IV-4 à IV-6.

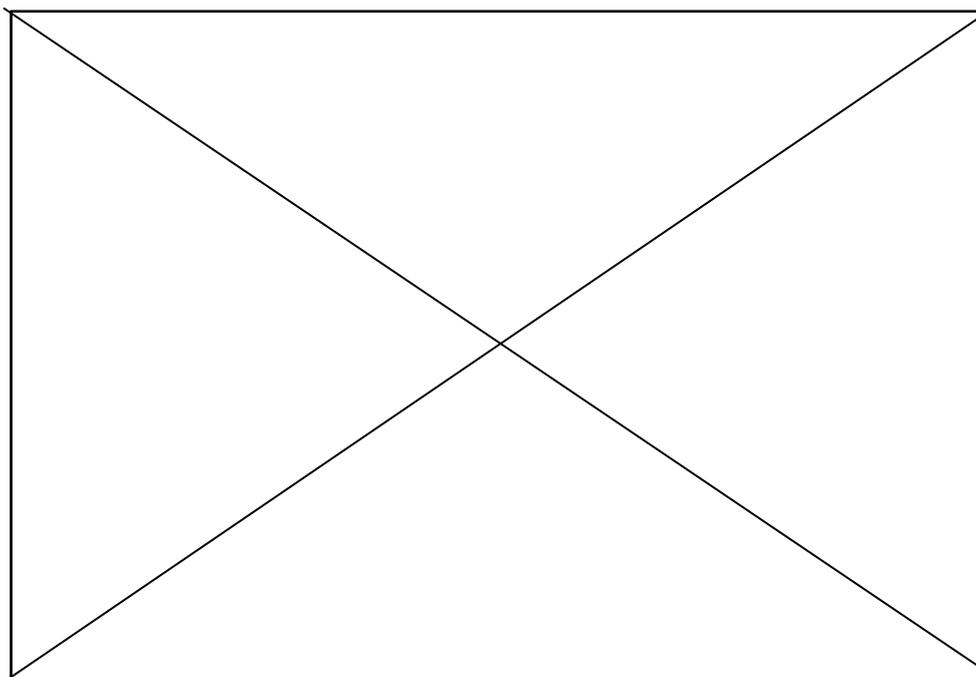


Figure IV-4: Comparaison de l'effort frontal (données confidentielles supprimées).

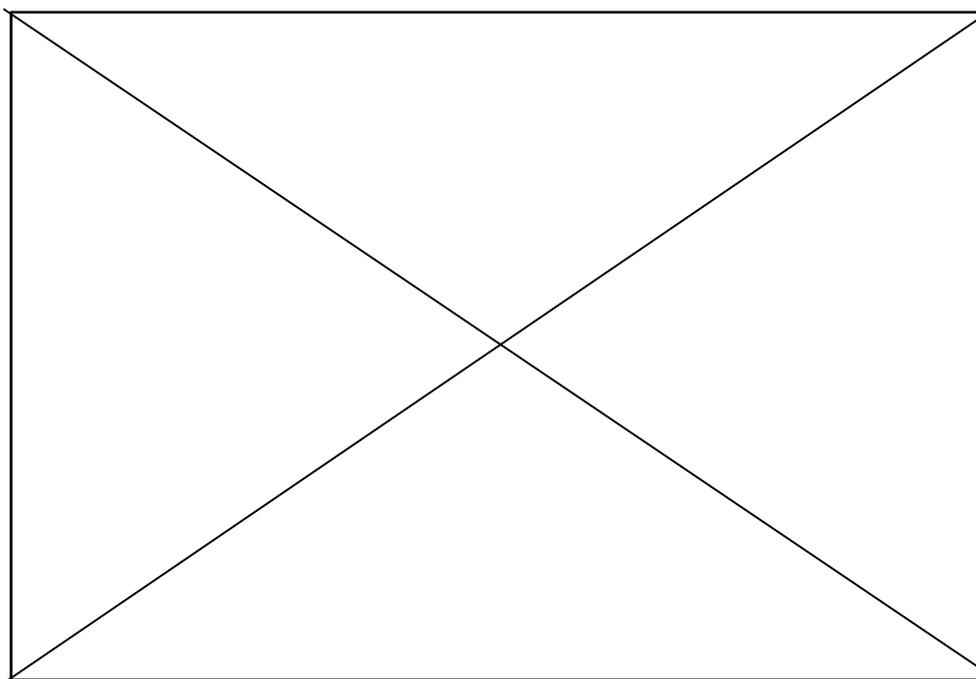


Figure IV-5 : Comparaison de l'effort frontal (données confidentielles supprimées).

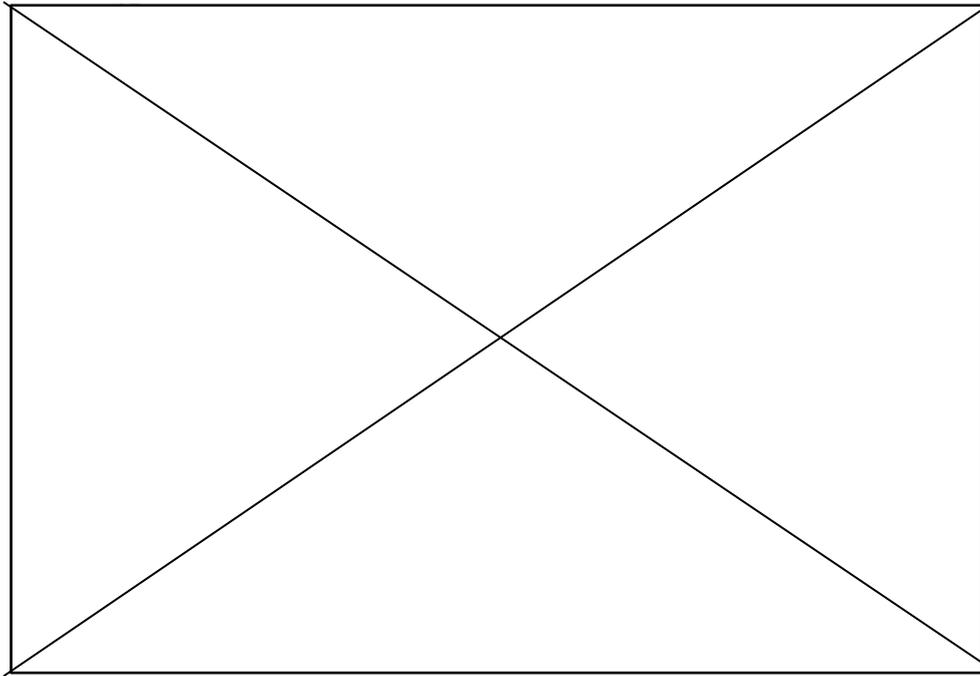


Figure IV-6 : Comparaison entre l'effort (données confidentielles supprimées).

## IV.2. Modélisation de la température

Ces différentes parties font référence à des données ou des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

## IV.3. Modélisation de la déformée

Les éléments de ce chapitre font référence à des données ou des résultats confidentiels. Aussi ils ont été entièrement supprimés.

Ce chapitre a utilisé les résultats mis en avant par le plan d'expériences afin de pouvoir modéliser l'effort de coupe. L'effort total, somme des efforts horizontaux et verticaux, pourrait se réduire à la simple expression de l'effort horizontal dans le cas d'une coupe rectiligne dans du *denim*.

Après avoir exprimé l'effort frontal moyen puis réel en fonction des différents paramètres de coupe et de leurs contributions découvertes par le plan d'expériences, l'effort total peut être mis en équation. La confrontation de cette première modélisation avec les essais expérimentaux est encourageante.

La modélisation de la flexion de la lame a ensuite été effectuée. Elle utilise les cinq composantes du dynamomètre pour calculer les sollicitations appliquées sur la lame et en déduire sa déformée. Les résultats sont très prometteurs car très peu d'écarts sont constatés entre la flexion de lame simulée et son comportement réel déduit à partir des formes découpées.



## CHAPITRE V

---

# CONCLUSIONS      GENERALES      ET PERSPECTIVES

---



Les travaux réalisés s'inscrivent dans une démarche liée à la compréhension des phénomènes de coupe de tissu par lame vibrante pour apporter une amélioration à la gestion et au fonctionnement des machines de coupe. Le faible nombre de recherches et publications sur le sujet [Thi et al, 2005], a rendu la démarche documentaire difficile. De fait, il a été convenu de centrer cette recherche sur la coupe d'un tissu et d'en modéliser ses phénomènes physiques.

Ceci a donc nécessité une instrumentation originale et conséquente d'une machine industrielle. Cette démarche a permis de caractériser et de modéliser des pratiques industrielles de type empirique et d'améliorer la connaissance de l'acte de coupe et de ses premiers modèles [Blekač, 1998].

Dans le premier chapitre, les bases de l'étude ont été définies en décrivant le procédé spécifique de la découpe textile et en établissant, en préambule, certaines limitations.

Le tissu est un matériau hétérogène, aux propriétés mécaniques bien souvent inconnues et dépendantes de ses nombreuses opérations de fabrication. Le nombre de matériaux pouvant être découpés par ce procédé est important et leurs caractéristiques mécaniques très différentes.

Il a donc été décidé de découper un matériau commun et peu onéreux : le *denim*.

Le processus complet de la découpe d'un tissu est alors décrit : du matelassage, en passant par le maintien en position par aspiration et compression, jusqu'à la découpe par l'action simultanée de la vibration de la lame et de son avance.

Les problématiques sont nombreuses : l'usure de la lame obligeant la machine à interrompre son travail pour affûter le tranchant de son outil coupant, sa flexion nécessitant un pilotage particulier afin de garantir des coupes nettes et conformes au cahier des charges et l'élévation de sa température qui peut entraîner la fusion des plis de matière, sensibles à la chaleur.

L'analyse du processus de coupe et le retour d'expérience des utilisateurs de ces machines ont permis de mettre en évidence les paramètres influant sur la qualité de coupe. Un bon nombre sont des paramètres de configuration machine tels que la fréquence de coupe ou la vitesse d'avance.

Une analyse bibliographique a été menée sur l'ensemble des travaux concernant la modélisation de la coupe tous matériaux confondus. Les principales recherches concernent l'usinage métallique tandis que la coupe du tissu reste peu étudiée par la communauté scientifique. Aussi, pour atteindre les objectifs fixés par cette étude, il a été nécessaire de se référer aux travaux réalisés dans l'usinage métallique, sur la modélisation des efforts de coupe [Merchant, 1945]. Les modèles expérimentaux mettant en avant les paramètres influant dans l'évolution des actions de coupe [Outeiro et al., 2006] ont tout particulièrement servi de référence. En effet, les actions physiques relatives à la découpe de tissu par lame vibrante sont peu connues. Il est donc nécessaire de mettre en place une modélisation expérimentale par la mesure des efforts de coupe, selon une approche macroscopique, afin de mieux cerner les paramètres machines influents.

Le développement d'un modèle expérimental nécessite la mesure de certaines grandeurs propres à la coupe.

Le deuxième chapitre fait état, dans un premier temps, des différents moyens utilisés dans la mesure des actions de coupe. Les dynamomètres à base de jauges résistives comme les plateformes de Stewart ou les structures intégrant des corps d'épreuve, offrent la possibilité de mesurer des efforts suivant six axes, avec une grande précision. Cependant, la faible réponse dynamique de la mesure par extensométrie, liée au corps d'épreuve, fait que cette technologie n'a pas été retenue pour l'instrumentation de la tête de coupe.

Les platines de mesures piézoélectriques possèdent pour leur part, une plus grande rigidité qui ne perturbe pas la qualité de coupe de la machine. De plus, leur précision dynamique permet de retranscrire au mieux les phénomènes recherchés dans l'analyse des actions mécaniques de coupe. Cependant, ce type de capteurs possède un désavantage : la mesure dérive au bout d'un certain temps si un effort statique est appliqué. Pour autant, comme l'analyse des efforts se concentre sur quelques oscillations de lame, ce problème n'est pas impactant. Aucun dispositif n'étant disponible sur catalogue pour répondre aux besoins de l'étude, un nouveau dynamomètre à six composantes, fortement inspiré des travaux bordelais, a été conçu [Couétard, 1993], [Albert, 2010]. Il est intégré dans une pièce maîtresse de la machine, le pied presseur, et suit chaque mouvement de la lame. Viennent s'y rajouter, d'autres capteurs

d'efforts, installés sur la machine ; certains pour mesurer l'effort vertical de coupe, d'autres pour connaître l'effort appliqué sur certains galets en appui sur la lame. Enfin, un capteur a été placé pour mesurer la température de la lame à la sortie de la matière.

Cette instrumentation importante et inédite sur un découpeur textile a été validée par un étalonnage des capteurs garantissant ainsi une qualité de mesure en adéquation avec les objectifs de l'étude. Enfin, une dernière étape de transmission de l'information ainsi que de conditionnement du signal a été développée pour rendre les mesures exploitables.

Le troisième chapitre décrit une première phase expérimentale conduite pour se familiariser avec le comportement de la machine et pour caractériser le domaine de validité de l'installation.

Certains résultats connus confirment le bon fonctionnement de l'instrumentation, tandis que de nouvelles connaissances permettent d'améliorer la compréhension du comportement mécanique du système, lors d'une coupe rectiligne.

Les mesures effectuées sur les différents axes du dynamomètre sont présentées. Leur analyse permet de comprendre l'action du déplacement de la lame sur les efforts de coupe et de dégager les paramètres influents.

L'instrumentation du dispositif de découpe dans un espace confiné et réduit, a constitué la difficulté majeure de cette étape. Certaines mesures restent incertaines du fait de la réponse dynamique de l'ensemble mécanique. C'est le cas des capteurs d'efforts, intégrés dans le guide lame, dont la mesure est perturbée par de nombreuses vibrations. Ces données ont dû être écartées de l'analyse.

C'est par l'intermédiaire de différents plans d'expériences que la caractérisation de l'influence des facteurs de coupe est établie. Certains paramètres sont prédominants par rapport aux autres, notamment les facteurs dépendant de la dynamique de la coupe tels que la fréquence de coupe, la vitesse d'avance ou l'amplitude de coupe. La taille de la lame, tout comme l'épaisseur du matériau découpé joue également un rôle important dans la caractérisation des efforts. Enfin, les caractéristiques mécaniques du matériau rentrent en ligne de compte bien qu'ils soient souvent inconnus. La température de coupe, quant à elle, est due aux frottements répétés de la lame sur la matière et atteint rapidement un maximum pour une fréquence de coupe donnée.

Il est, dès lors, possible de caractériser les efforts inhérents à la coupe : efforts frontaux et verticaux, en fonction des différents paramètres de coupe. Les moments mesurés dépendent directement des efforts et du bras de levier créé par la longueur de lame, leur connaissance n'est pas jugée déterminante.

La mesure de la température a donné des résultats satisfaisants et dépend de la fréquence de coupe, de la surface et de la nature du contact entre la lame et la matière découpée.

Le quatrième chapitre est basé sur les résultats mis en évidence par les plans d'expériences pour développer un modèle de comportement des actions de coupe.

Après validation et analyse des plans, les paramètres influents sont hiérarchisés et leur impact sur les efforts de coupe mis en équation. L'effort total de coupe, perçu comme étant la combinaison des actions horizontales et verticales, est décrit comme étant dépendant de la vitesse d'avance, de la surface de contact entre la lame et la matière, de l'amplitude et de la fréquence de coupe, ainsi que des caractéristiques mécaniques du matériau. A partir de cette équation, il a été possible de retracer l'évolution des efforts frontaux et verticaux pour différents paramètres de coupe. Après comparaison avec les mesures expérimentales, il a été confirmé que le modèle mathématique était proche de l'évolution générale de l'effort.

Cette première modélisation des actions de coupe de tissu par lame vibrante est une avancée significative qui permet de mieux appréhender ce procédé de mise en forme et servira de base à de futurs développements.

La mise en place d'un capteur de température dans le pied presseur a permis de vérifier la faisabilité de la mesure de la température de la lame pendant la coupe. L'évolution générale de cette température en fonction de différents paramètres a pu être présentée. Elle dépend de la fréquence de coupe, de la vitesse d'avance, de la taille de la lame, de l'amplitude de coupe et de la présence ou non de lubrifiant sur la lame donc, du coefficient de frottement de celle-ci sur la matière découpée. Le dispositif reste encore à améliorer, afin de pouvoir mettre en place une loi d'évolution de la température pendant la coupe.

L'intégration de nombreuses possibilités de mesures dans le pied presseur de la machine de coupe apporte une connaissance plus fine des déplacements de la lame à l'intérieur de la matière. En effet, il est possible, au travers d'un modèle de flexion de lame, de modéliser sa déformée en fonction des différents paramètres de coupe, dont certains peuvent varier, telle la taille de lame soumise à l'usure. Cette simulation de flexion de lame a été vérifiée au travers de différents essais de coupes tant sur la flexion frontale que latérale. Les résultats sont très satisfaisants et sont encourageants pour un développement industriel futur.

L'ensemble de ce travail de thèse a pleinement répondu aux besoins de l'industriel à l'origine de la problématique. Il s'agissait d'instrumenter une machine de coupe, afin de capitaliser le maximum de connaissances, de caractériser le plus finement possible les différents phénomènes rencontrés lors de la coupe d'un tissu et d'être en mesure de représenter la flexion de la lame dans une simulation en trois dimensions. Il a aussi permis de poser les premières bases d'une modélisation de type analytique nouvelle, dans la démarche industrielle. Certains des résultats présentés dans cette étude, comme la connaissance de la flexion de la lame, peuvent faire l'objet d'une application directe dans l'industrie pour améliorer les conditions de coupe et le pilotage des machines de découpe.

L'élaboration du système de mesure embarqué sur la tête de coupe a nécessité de nombreuses actions successives (conception, fabrication, contrôle métrologique et montage), qui ont impacté dans le temps le déroulement de ces travaux. Les recherches ont cependant abouti, laissant émerger diverses perspectives et améliorations à apporter à cette étude.

(Données confidentielles supprimées)

La modélisation des efforts de coupe, quant à elle, peut bénéficier de certaines améliorations. Son point faible demeure dans son domaine de validation, trop restreint : il ne concerne que la coupe du *denim* selon une coupe rectiligne. Il faudrait s'intéresser maintenant à la coupe de trajectoires non rectilignes.

Il serait possible, en intégrant les connaissances de la flexion de lame, d'analyser les efforts de coupe lors de trajectoires différentes. Cependant, cette modélisation ne serait pas représentative d'une coupe en condition industrielle où la qualité des pièces découpées est essentielle car la technologie actuelle du capteur n'est pas suffisamment réactive pour pouvoir piloter efficacement la lame.

Cette nouvelle analyse des efforts de coupe pourrait bénéficier, au même titre que la modélisation de la flexion de la lame, d'une amélioration du dynamomètre.

La découpe de *denim* n'est pas identique à la coupe de la toile ou du satin, encore moins des mousses ou des matières plastiques. Les conditions de coupes optimales de ces matières tout comme l'influence des paramètres de coupe ne seront vraisemblablement pas les mêmes que pour le *denim*.

Le modèle proposé dans cette étude a été élaboré dans un environnement macroscopique. Une nouvelle approche multi-échelle permettra de comprendre davantage les phénomènes en jeu, notamment les actions thermomécaniques des matériaux pouvant modifier le comportement de la coupe.

La connaissance de l'effort de coupe ouvre des possibilités supplémentaires. En connaissant la valeur limite de sollicitation admissible par une lame pendant la coupe, il serait possible d'anticiper sa rupture. Ce mécanisme pourrait faire en sorte que la machine stoppe son activité au moment où la lame est sur le point de casser, pour la préserver. Eviter une casse de lame protégerait ainsi certains composants internes au pied presseur, notamment le capteur de flexion, très sensible aux déformations plastiques. Cela permettrait également un gain de temps, supprimant une maintenance parfois complexe.

La connaissance de l'effort frontal trouve une autre application dans la gestion de l'affûtage de la lame. Aujourd'hui proposé empiriquement par une loi d'affûtage figée, propre au matériau découpé, celui-ci pourrait être personnalisé en fonction de l'effort lu par le pied presseur en définissant une valeur seuil, déclenchant l'affûtage dès que l'effort frontal mesuré est trop important.

L'effort vertical reste une inconnue dans la modélisation de l'effort total de coupe. L'instrumentation n'a pas permis de caractériser précisément l'influence des différents paramètres de coupe sur son évolution. Il conviendrait de pouvoir mesurer cet effort de façon plus précise, en se rapprochant au plus près de la lame. Cela permettrait également de faire un meilleur rapprochement entre la température de la lame et l'effort vertical qui doivent être liés car dépendant principalement du frottement de celle-ci sur la matière.

La faisabilité de la mesure de la température ayant été vérifiée, il faudra par la suite prévoir un système de nettoyage de la lentille de mesure pour éviter tout encrassement.

Il conviendra alors de prendre en compte les interfaces entre lames et matériaux découpés et leurs coefficients de frottements, afin de pouvoir écrire une réelle équation de comportement en fonction des différents paramètres de coupe. Au même titre que pour le contrôle de l'effort frontal, il serait judicieux de pouvoir contrôler la température de la lame pendant la coupe de certains matériaux fusibles. Cela permettrait de ne jamais dépasser une certaine température pour éviter la fusion des plis, en diminuant la fréquence de coupe ou augmentant la vitesse d'avance selon le cas.

*In fine*, une analyse énergétique pourrait être envisagée en mesurant les courants moteurs de vibration et d'avance de la lame pendant la coupe et en les comparant avec les valeurs que renvoient le modèle d'effort.

Pour autant, toute amélioration et utilisation de ce modèle de coupe induira forcément un important travail de caractérisation des textiles découpés.

Le modèle de coupe repose sur l'usage du paramètre  $\lambda$ , représentant la résistance du matériau. Ce paramètre est inconnu, fonction du matériau et de certains paramètres de coupe comme la dépression de maintien utilisée. Ce paramètre doit pouvoir être identifié et modélisé.

Ce travail offre de nombreux champs d'investigations :

- d'un point de vue scientifique, grâce à l'amélioration du modèle de coupe et de sa généralisation,
- d'un point de vue industriel, où l'exploitation des résultats demande un travail de re-conception du dynamomètre et la maîtrise de la flexion de la lame.

En y intégrant la connaissance des caractéristiques du matériau découpé, les machines de découpes industrielles se rapprocheront ainsi du concept de « close door machining ».

---

# BIBLIOGRAPHIE

---



---

# A

---

- [Adanur, 1995] *Wellington Sears Handbook of Industrial Textiles*. CRC Press, 1995.
- [Albert, 2010] *Identification et modélisation du torseur des actions de coupe en fraisage*, Thèse de doctorat, École doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, 2010.
- [Ancutiene, 2010] *The Relationship between Fabrics Bending Rigidity Parameters Defined by KES-F and FAST Equipment*, Materials Science, vol. 16, n° 4, janv. 2010.
- [AFNOR, 1971] *Méthode de détermination de la force de rupture et de l'allongement de rupture d'un fil*. 1971.
- [AFNOR, 1985] *Détermination de la force de rupture et d'allongement de rupture par traction*. 1985.

# B

---

- [Bajaj, 1997] *Ballistic protective clothing: An overview*, Indian Journal of Fibre and Textile Research, vol. 22, n° 4, p. 274-291, déc. 1997.
- [Behre, 1961] *Mechanical Properties of Textile Fabrics Part I: Shearing*, Textile Research Journal, vol. 31, n° 2, p. 87-93, févr. 1961.
- [Blekač, 1998] *Influence of Mechanical and Physics properties of fabrics on cutting process*, International Journal of Clothing Science and Technology, vol. 10, n° 3/4, p. 293-304, 1998.
- [Boz, 2010] *An investigation on the Cutting parameters for various types of fabrics*, Tekstil ve Konfeksiyon, vol. 22, n° 1, p. 52-57, janv. 2012.

# C

---

- [Calamaz, 2008] *Approche expérimentale et numérique de l'usinage à sec de l'alliage aéronautique TA6V*. Thèse de doctorat, École doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, 2008.
- [Cherif, 2003] *Modélisation générique des efforts de coupe en fraisage pour la CFAO et la surveillance de l'usinage*. Thèse de doctorat, École doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, 2003.
- [Couétard, 1993] *Capteur de force à deux voies et application notamment à la mesure d'un torseur de forces*, Brevet, 1993.
- [Couétard, 2000] *Caractérisation et étalonnage des dynamomètres à six composantes pour torseur associé à un système de forces*, Thèse de doctorat, Université Sciences et Technologies Bordeaux I, 2000.
- [Creo Simulate] PTC, [www.ptc.com/cad/creo/simulate](http://www.ptc.com/cad/creo/simulate).

## D

---

- [Dagnat, 2006] *Modélisation semi-analytique par approche énergétique du procédé de perçage de matériaux monolithiques*. Thèse de doctorat, École doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, 2006.
- [Davies et al., 2007] *On The Measurement of Temperature in Material Removal Processes*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 56, n° 2, p. 581-604, janv. 2007.
- [Diddens, 1995] *Design of a ring-shaped three-axis micro force/torque sensor*, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 46, n° 1-3, p. 225-232, janv. 1995.
- [Duquesne, 1976] *Le tissage et ses armures*, Éditions de l'Institut textile de France, 1976.
- [Dwarakanath, 2001] *Design and development of a Stewart platform based force-torque sensor*, Mechatronics, vol. 11, n° 7, p. 793-809, oct. 2001.

## G

---

- [Gilormini, 1982] *Contribution à la modélisation de la formation du copeau en usinage des métaux*. L'école nationale supérieure des mines de Paris, 1982.

## H

---

- [Huang et al., 2007] *Tool wear detection and fault diagnosis based on cutting force monitoring*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 47, n° 3-4, p. 444-451, mars 2007.
- [Hou et al., 2009] *Optimal design of a hyperstatic Stewart platform-based force/torque sensor with genetic algorithms*, Mechatronics, vol. 19, n° 2, p. 199-204, mars 2009.

## I

---

- [ISO 13997] *Vêtements de protection — Propriétés mécaniques — Détermination de la résistance à la coupure par des objets tranchants*.
- [ISO 13934-1] *Textiles - Propriétés des étoffes en traction - Partie 1 : détermination de la force maximale et de l'allongement à la force maximale par la méthode sur bande*.
- [ISO 13015 : 2013] *Étoffes tissées -- Déformation -- Détermination de l'écart angulaire et du cintrage*.

## J

---

- [Jacq et al., 2009] *Thick-film multi-DOF force/torque sensor for wrist rehabilitation*, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 162, n° 2, p. 361-366, août 2010.
- [Jiang, 2012] *Computer Generation of 3D Textile Draping Simulation*, AASRI Procedia, vol. 3, p. 661-666, 2012.

---

# K

---

- [Kawabata, 1979] *Effect of Mechanical and Physical Properties on Fabric Hand*, Elsevier, 1979.
- [Kawabata et al., 1996] *Theoretical analysis of the non-linear deformation properties of a triaxial weave under biaxial stress fields*, Composites Science and Technology, vol. 56, n° 3, p. 261-271, janv. 1996.
- [Kim, 1996] *Adaptive cutting force control for a machining center by using indirect cutting force measurements*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 36, n° 8, p. 925-937, août 1996.
- [Kim, 1999b] *Indirect cutting force measurement in multi-axis simultaneous NC milling processes*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 39, n° 11, p. 1717-1731, nov. 1996.
- [Kim, 1999] *Design and fabrication of a six-component force/moment sensor*, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 77, n° 3, p. 209-220, nov. 1999.
- [Kothari, 2007] *Cut resistance of textile fabrics - A theoretical and an experimental approach*, Indian Journal of Fibre & Textile Research, vol. 32, sept-2007.

# L

---

- [Laheurte, 2004] *Application de la théorie du second gradient à la coupe des matériaux*. Thèse de doctorat, École doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, 2004.
- [Laporte, 2005] *Comportement et endommagement de l'outil en perçage à sec : applications aux assemblages aéronautiques*, Thèse de doctorat, École doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, 2005.
- [Li et al., 2000] *Feed Cutting Force Estimation from the Current Measurement with Hybrid Learning*, Int J Adv Manuf Technol, vol. 16, n° 12, p. 859-862, 2000.
- [Li, 2009] *A novel parallel piezoelectric six-axis heavy force/torque sensor*, Measurement, vol. 42, p. 730-736, oct. 2009.
- [Liang, 2013] *Design and Analysis of a Novel Six-Component F/T Sensor based on CPM for Passive Compliant Assembly*, Measurement Science Review, vol. 13, n° 5, p. 253-264, 2013.

# M

---

- [Matthews, 1924] *The textile fibres, their physical, microscopical and chemical properties*. New York, J. Wiley & sons, 1924.
- [Merchant, 1944] *Basic mechanics of the cutting process*, ResearchGate, vol. 11, p. 168-175, janv. 1944.
- [Merchant, 1945] *Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip*, Journal of Applied Physics, vol. 16, n° 5, p. 267-275, mai 1945.
- [Morton, 1962] *Physical Properties of Textile Fibres*, 4<sup>e</sup> éd. Woodhead Publishing, 2008.

## O

---

- [Outeiro *et al.*, 2006] *Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 46, n° 14, p. 1786-1794, nov. 2006.
- [Oxley, 1976] *Minimum Work as a Possible Criterion for Determining the Frictional Conditions at the Tool/Chip Interface in Machining*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, vol. 282, n° 1310, p. 565-584, 1976.

## P

---

- [PCB, 260A01] [www.pcb.com/products.aspx?m=260A01](http://www.pcb.com/products.aspx?m=260A01).
- [PCB, 208C03] [www.pcb.com/products.aspx?m=208C03](http://www.pcb.com/products.aspx?m=208C03).
- [Poirier, 1993] *Analyse de la variance et de la régression. Plans d'expérience*, Techniques de l'ingénieur, R260, p. 1-21, 1993.
- [Poulachon, 1999] *Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage c-bn des aciers durcis. Application : usinabilité de l'acier 100cr6*, Thèse de doctorat, ENSAM, 1999.
- [Poulachon *et al.*, 2002] *Contribution à l'étude des mécanismes de coupe en tournage dur*, Mécanique & Industries, vol. 3, n° 4, p. 291-299, janv. 2002.

## R

---

- [RDM Version 6] [iut.univ-lemans.fr/ydlogi/rdm\\_version\\_6.html](http://iut.univ-lemans.fr/ydlogi/rdm_version_6.html).
- [Rissanen, 2013] *Zero-waste fashion design : a study at the intersection of cloth, fashion design and pattern cutting*, Phd Thesis, 2013.

## S

---

- [Shanmugasundaram, 2008] *Smart & intelligent textiles | General | Features | The ITJ*, The Indian textile journal, 2008.
- [Shin *et al.*, 2003] *Test for measuring cut resistance of yarns*, Journal of Materials Science, vol. 38, n° 17, p. 3603-3610, sept. 2003.
- [Stewart, 1965] *A Platform with Six Degrees of Freedom: A new form of mechanical linkage which enables a platform to move simultaneously in all six degrees of freedom developed by Elliott-Automation*, Aircraft Eng & Aerospace Tech, vol. 38, n° 4, p. 30-35, avril 1966.

---

# T

- [Taylor, 1906] *On the art of cutting metal*, The American society of mechanical engineers, 1906.
- [Thi *et al.*, 2005] *Effect of Friction on Cut Resistance of Polymers*, Journal of Thermoplastic Composite Materials, vol. 18, n° 1, p. 23-35, janv. 2005.
- [Thilagavathi *et al.*, 2010] *Development of Textile Laminates for Improved Cut Resistance*, Journal of Engineered Fibers and Fabrics, vol. 5, n° 2, p. 40-44, juin 2010.
- [Toulouse, 1998] *Contribution à la modélisation et à la métrologie de la coupe dans le cas d'un usinage tridimensionnel*, Thèse de doctorat, École doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, 1998.
- [Tunjo, 2008] *Determining Optimal Plan of Fabric Cutting with the Multiple Criteria Programming Methods*, Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, vol. 2, janv. 2008.

# V

- [Vazquez *et al.*, 2014] *Cutting Force Modeling*, CIRP Encyclopedia of Production Engineering, Éd. Springer Berlin Heidelberg, 2014, p. 315-329.
- [Vilumsone-Nemes, 2012] *Industrial Cutting of Textile Materials*, 1 edition. Oxford; Philadelphia: Woodhead Publishing, 2012.

# W

- [Wong, 2003] *A selection of a fabric-cutting system configuration in different types of apparel manufacturing environments*, International Journal of Advance Manufacturing and Technology, vol. 22, n° 9-10, p. 641-648, juin 2003.
- [Wong, 2004] *Genetic Optimization of JIT Operation Schedules for Fabric-cutting Process in Apparel Manufacture*, Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 17, n° 3, p. 341-354, juin 2006.

# Y

- [Yousfi, 2015] *Modélisation Thermomécanique 3D en fraisage*, Thèse de doctorat, École doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, 2015.

# Z

- [Zhang *et al.*, 2007] *Buckling analysis of plain knitted fabric sheets under simple shear in an arbitrary direction*, International Journal of Solids and Structures, vol. 44, n° 21, p. 7049-7060, oct. 2007.



---

---

**Titre :** Etude de la découpe de matériau en feuille souple par lame vibrante.

**Résumé :** De par la grande diversité de tissus existants, tous avec des caractéristiques mécaniques différentes, il n'y a que peu d'études portant sur la découpe de tissus textiles.

Cette thèse s'intéresse à la découpe de textile en multi-plis par l'action d'une lame oscillante dans un contexte industriel.

Dans cette étude, une machine de découpe industrielle est équipée de différents capteurs afin de pouvoir mesurer l'influence des efforts de coupe sur la qualité des pièces découpées. En utilisant cet équipement, il a été possible de contrôler les efforts de coupe pendant toute la durée d'une coupe rectiligne.

Enfin, un modèle physique de ces efforts est proposé en prenant en compte différents paramètres comme la géométrie de la lame, les propriétés du matériau découpé et les différents paramètres de coupe.

**Mots clés :** Coupe, Textile, Lame vibrante, Dynamomètre, Modèle de coupe.

---

**Title :** Experimental study on cutting flexible sheet material using an oscillating knife.

**Abstract :** Due to the wide variety of fabrics, all with different mechanical characteristics, there are few studies dealing with the question of cutting fabrics.

In this thesis, we model the multi-ply cutting process using a reciprocating knife in an industrial context.

In this study, a textile cutting machine is instrumented with different sensors, to measure the influence of cutting forces on the quality of the resulting profiles. Using this equipment, cutting forces can be analyzed experimentally while the fabric is being cut along a straight line.

Next, a model of the physical phenomena of these forces is proposed, taking different parameters into account such as the geometry of the knife, the properties of the material being cut and the parameters of the cut.

**Key words :** Cutting, Fabric, Oscillating knife, Dynamometer, Cutting model.

---

## Unité de recherche

Univ. Bordeaux, I2M UMR 5295, 351 cours de la Libération, F-33400 Talence, France.