



**HAL**  
open science

# Étude de l'affûtage des lames vibrantes et évolution de leur pouvoir coupant dans le cadre de la découpe de matériaux textiles souples

Intissar Farah

► **To cite this version:**

Intissar Farah. Étude de l'affûtage des lames vibrantes et évolution de leur pouvoir coupant dans le cadre de la découpe de matériaux textiles souples. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux, 2022. Français. NNT : 2022BORD0028 . tel-04213491

**HAL Id: tel-04213491**

**<https://theses.hal.science/tel-04213491>**

Submitted on 21 Sep 2023

**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 Intissar FARAH

**ÉTUDE DE L'AFFÛTAGE DES LAMES VIBRANTES ET  
ÉVOLUTION DE LEUR POUVOIR COUPANT DANS LE CADRE DE  
LA DECOUPE DE MATERIAUX TEXTILES SOUPLES**

Directeurs de thèse : Philippe DARNIS, Olivier CAHUC

Encadrant : Raynald LAHEURTE

Soutenance prévue le 2 Février 2022

Membres du jury :

M. LANDON, Yann	Professeur Université Paul Sabatier	Rapporteur
M. FURET, Benoît	Professeur IUT de Nantes	Rapporteur
M. MABROUKI, Tarek	Professeur UTM / ENIT	Examineur
M. FROMENTIN, Guillaume	Professeur ENSAM de Cluny	Examineur
M. CAHUC, Olivier	Professeur Université de Bordeaux	Examineur
M. DARNIS, Philippe	Professeur Université de Bordeaux	Examineur
M. CHABIRAND, Didier	Responsable R&D Hardware Lectra	Examineur
M. LAHEURTE, Raynald	Maitre de Conférences HDR Université de Bordeaux	Invité
M. LALLEMENT, Régis	Chef de projet R&D Hardware Lectra	Invité
M. COSSON-COCHE, Quentin	Responsable d'étude mécanique Lectra	Invité



*« À la mémoire de ma chère grand-mère Saadia Elfetni, que ton âme repose en paix... »*

*À mes parents*



# Remerciements

Les travaux de recherches présentés dans ce mémoire ont été le fruit de la collaboration de l'institut d'ingénierie et de mécanique de Bordeaux (I2M), l'institut Carnot ARTS (AMVALOR) et la société Lectra à Cestas. Je tiens à remercier grandement les directeurs de ces trois organismes, respectivement : M. Eric ARQUIS, Jean-Luc BAROU et Daniel HARARI pour m'avoir accueilli dans leurs établissements et pour m'avoir permis de réaliser ce travail.

Je tiens en premier à remercier les membres du Jury : Monsieur Benoit FURET, Professeur des Universités à l'IUT de NANTES pour avoir fait l'honneur d'accepter de présider ce jury de thèse. J'exprime également ma gratitude à Monsieur Guillaume FROMENTIN, Monsieur Tarek MABROUKI Professeurs à l'Universités ARTS ET METIERS Campus de Cluny et l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis respectivement. Je remercie également Monsieur Yann LANDON, professeur l'Université Paul Sabatier (UPS) pour avoir accepté d'évaluer les travaux présentés dans ce mémoire.

Merci à l'ensemble des membres du jury pour leur expertise et leurs questions aussi pertinentes qu'intéressantes qui ont contribué à un enrichissement conséquent de ce travail.

Je remercie très sincèrement toutes les personnes qui m'ont encadré tout au long de ces travaux, autant les scientifiques que les hommes formidables qu'ils sont : Messieurs Philippe DARNIS et Olivier CAHUC, Professeurs à l'Université de Bordeaux, co-directeurs de thèse. Monsieur 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 particulièrement 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 précieux, sa grande expertise technique et son encouragement infaillible. Je prends toujours un véritable plaisir de discuter avec vous, surtout de votre bonne humeur. En plus des compétences que vous m'avez transmises, vous avez toujours fait preuve d'une grande disponibilité.

Je remercie très sincèrement Messieurs Régis Lallement et Quentin Cosson-Coche pour leurs conseils, leur expertise scientifique, leur disponibilité et pour le plaisir que j'ai eu à travailler avec eux. Je vous exprime mes grandes admirations pour vos qualités humaines et professionnelles.

Je tiens à remercier à l'ensemble du personnel de Lectra : Ghailen, Nicholas, Gérard, Theirry,

Yohan, Sébastien..., qui m'ont accueilli à bras ouverts et m'ont offert un cadre de travail exceptionnel, merci à eux et tout autre services qui ont contribués, de près ou de loin, à la réussite de ce travail de recherche.

Je tiens à remercier l'équipe IMS du laboratoire LaBoMaP : Monsieur Denis LAGADRILLERE pour les essais de microdureté et les mesures au MEB.

Aux doctorants, personnels technicien, enseignants, enseignants chercheurs du laboratoire I2M : merci pour les échanges et la bonne ambiance de travail.

Une grande pensée à mes parents qui ont fait beaucoup de sacrifices pour que j'arrive jusqu'au bout de mes projets et ambitions. Je vous remercie pour votre amour et vos prières.

Je tiens à remercier plus particulièrement mon indéfectible soutien durant cette thèse, mon cher mari « Oussama ». Merci pour ton amour, ta patience et surtout tous les bons moments et même les plus difficiles partagés ensemble, tu étais toujours présent et tu m'as soutenue jusqu'au grand jour de l'épreuve.

Je souhaite remercier vivement ma famille à Gafsa et je pense très fort à tous ceux qui auraient aimé être présents physiquement à ma soutenance mais qui l'ont été avec le cœur.

Enfin de liste mais non moins important, je remercie Fiby pour me tenir compagnie durant les longues nuits de travail.

« Je dédie mon travail de thèse à ma chère grand-mère Saadia, que ton âme repose en paix »







# Table des matières

Liste des Figures.....	v
Liste des Tableaux.....	ix
Introduction générale.....	1
1 Contexte de l'étude : Découpe des matériaux textiles souples .....	3
1.1 Mécanique de la découpe des matériaux textiles .....	7
1.1.1 Notions de base : la découpe des matériaux textiles .....	7
1.1.2 Notions de base : géométrie de coupe .....	8
1.2 Machine de découpe industrielle.....	9
1.2.1 Structure cinématique générale .....	9
1.2.2 Processus de coupe.....	11
1.2.3 Problématique du pilotage des découpeurs textiles.....	12
1.3 Matériaux textiles .....	14
1.3.1 Propriétés des matériaux textiles et fabrication.....	14
1.3.2 Caractéristiques mécaniques des textiles .....	16
1.3.3 Fabrication et propriétés du denim.....	18
1.3.4 Essai de caractérisation mécanique du « denim ».....	19
1.4 Usure abrasive des lames vibrantes.....	20
1.5 Les aciers rapides supérieurs frittés.....	21
1.6 Nuance HSS pour les lames de coupe.....	22
1.6.1 Composition chimique .....	22
1.6.2 Traitements thermiques .....	23
a. Recuit.....	23
b. Austénitisation et trempe.....	24
c. Revenu.....	25
1.6.3 Microstructures typiques des aciers rapides .....	25
1.7 Aptitude à l'affûtage des lames de coupe.....	26
1.7.1 Définition.....	26
1.7.2 Paramètres d'étude de l'affûtage.....	26
1.8 Affûtage des lames de coupe.....	28
1.9 Modélisation de la découpe des textiles et affûtage des lames vibrantes.....	29
1.10 Conclusion.....	31

2	Étude de l'affûtage de la lame de découpe.....	33
2.1	État de l'art.....	37
2.1.1	Affûtage : généralités.....	37
2.1.2	Grains abrasifs.....	38
2.1.3	Outils abrasifs : les différentes technologies existantes.....	40
a.	Les abrasifs conventionnels.....	40
b.	Les abrasifs structurés.....	41
2.1.4	Géométrie des lames coupantes.....	43
2.2	Préambule : conditions industrielles.....	44
2.2.1	Définition du système d'affûtage.....	45
2.2.2	Paramètres caractéristiques de l'affûtage des lames de coupe à tranchant unique.....	47
2.3	Protocole expérimental.....	47
2.3.1	Pièces d'essais.....	47
2.3.2	Conditions d'essais.....	49
2.3.3	Planification de la campagne d'essais : choix du plan d'expériences.....	49
a.	Approche expérimentale.....	49
b.	Choix de la méthodologie expérimentale.....	49
2.3.4	Mesures de la géométrie des lames de coupe.....	51
2.4	Analyses et interprétations de la topographie de la surface affûtée.....	52
2.4.1	Défauts macroscopiques et microscopiques de l'affûtage.....	52
2.4.2	Étude de l'influence des paramètres d'affûtage et de leurs interactions.....	53
a.	Étude des effets des paramètres.....	53
b.	Étude de l'effet de la microstructure.....	54
c.	Étude des interactions.....	57
d.	Pouvoir coupant des lames affûtées.....	57
2.5	Étude de l'effort d'affûtage.....	58
2.5.1	Dispositif expérimental.....	58
2.5.2	Cycle d'affûtage et principe de mesure.....	60
2.5.3	Détermination des facteurs influents.....	61
2.6	Analyses de la corrélation.....	62
2.6.1	Démarche statistique.....	62
2.6.2	Résultats des analyses statistiques.....	65
2.7	Étude de l'influence du temps d'affûtage.....	66
2.7.1	Détermination des facteurs influents.....	66
2.7.2	Microdureté de la lame de coupe.....	66
2.8	Étude de l'influence de l'usure des bandes abrasives.....	67
2.8.1	Étude de l'influence des effets purs.....	68
2.8.2	Apparition du fil retourné.....	68
2.9	Conclusion.....	70

3	Étude de la découpe des matériaux textiles.....	71
3.1	Introduction .....	75
3.2	Montage expérimental.....	77
3.2.1	Dynamomètre à cinq composantes.....	77
3.2.2	Mesure de l'effort vertical.....	79
3.3	Conditions d'essais.....	82
3.4	Mesure du torseur des actions mécaniques .....	84
3.5	Évolution des composantes du torseur mécanique.....	87
3.5.1	Évolution de l'effort vertical de coupe <b>Fz</b> .....	89
3.5.2	Évolution du moment de coupe <b>My</b> .....	89
3.6	L'axe central.....	89
3.6.1	Définition.....	89
3.6.2	Évolution de l'axe central.....	90
3.7	Conclusion.....	91
	Conclusion générale .....	92
	Perspectives.....	96
	Bibliographie.....	98
	Annexe.....	107



# Liste des Figures

Figure 1.1- Étapes d'un cycle de découpe de tissu : (a) pénétration de la lame ; (b) lame dans le matelas ; (c) dégagement de la lame. ....	7
Figure 1.2-(a) Lame lisse de coupe ; (b) profil de coupe (section de lame).....	8
Figure 1.3-(a) Représentation de la géométrie de lame coupante (Blekač 1998) ; (b) rayon d'acuité et angle de coupe de la lame. ....	9
Figure 1.4-Découpeur textile industriel (Vector iX9, Lectra).....	10
Figure 1.5-Placement de découpe textile en utilisant le logiciel « Modaris Lectra ». ....	11
Figure 1.6-Matelasseur automatique : (a) Découpeur textile équipé d'un matelasseur ; (b) mécanisme de matelassage.....	12
Figure 1.7-Plis de tissu poussé par la lame durant la coupe.....	13
Figure 1.8-(a) Défaut de coupe non verticale dû au fléchissement de la lame ; (b) Flexion 3D de la lame (Cosson-Coche 2017). ....	14
Figure 1.9-Machine de tissage industrielle. ....	15
Figure 1.10-Armure toile. ....	15
Figure 1.11-Armure de satin. ....	16
Figure 1.12-Armure de sergé. ....	16
Figure 1.13-Déformation dans le plan du tissu en fonction de l'effort de cisaillement (Dumont 2007). ....	17
Figure 1.14-Armure sergée du denim. ....	18
Figure 1.15-Machine de tissage pour le denim. ....	18
Figure 1.16-Courbes de traction de denim. ....	19
Figure 1.17-(a) Fil tranchant d'une lame affûtée ; (b) Fil tranchant d'une lame usée (données confidentielles supprimées). ....	21
Figure 1.18-Cycle type de température pour un trempé en four sous vide de la nuance d'acier rapide M2 (HS 6-5-2) (Erasteel).....	24
Figure 1.19-(a et b) Microstructure d'un acier rapide supérieur fritté T15 après un revenu à 550°C; (c et d) Microstructure de l'acier rapide conventionnel M2 après un revenu à 530°C (Shaikh 2013). ....	25
Figure 1.20-Morphologie des copeaux d'un acier HSS affûté (Shetty et al. 1982). ....	26
Figure 1.21-Illustration de la topographie d'une surface rectifiée : (a) topographie 3D ; (b,c) profils de rugosité (Sallem 2014). ....	27
Figure 1.22-Défauts d'affûtage sur des lames en acier rapide fritté (données confidentielles supprimées). ....	28
Figure 1.23-Défaut de coupe sur un tissu (cas d'un défaut d'affûtage de bas de lame). ....	29
Figure 1.24-Paramètres influents. ....	29
Figure 1.25-Démarche globale du projet (données confidentielles supprimées). ....	30
Figure 2.1-Machines universelles d'affûtage pour des outils de coupe. ....	37
Figure 2.2-Différentes étapes d'évolution du tranchant d'une lame de coupe: (1) tranchant initial ; (2) tranchant émoussé et usé ; (3) tranchant après affûtage en trait pointillé (données confidentielles supprimées). ....	37
Figure 2.3-Outils abrasifs et leur utilisation (source Norton, 3M, VSM). ....	38
Figure 2.4-Organisation structurelle d'un abrasif appliqué (Source VSM). ....	41
Figure 2.5-Organisation des abrasifs structurés : (a) structure pyramidale ; (b) structure tri-hélicoïdale ; (c) structure tri-hélicoïdale fine ; (d) structure parallélépipédique. ....	41
Figure 2.6-Concept d'auto-affûtage des grappes de grains (Source VSM). ....	42
Figure 2.7-Synthèse des applications d'affûtage des lames de coupe. ....	43
Figure 2.8-Géométrie de la lame de coupe. ....	44
Figure 2.9-Structure des bandes abrasives : (a) abrasif structuré « U464 » ; (b) abrasif conventionnel « CK712 » (données confidentielles supprimées).....	44
Figure 2.10- Dispositif d'affûtage des lames de coupe : (a) montage sur la machine de coupe; (b) affuteur industriel LECTRA (données confidentielles supprimées). ....	45

Figure 2.11-Cycle d'affûtage d'une lame de coupe (données confidentielles supprimées).....	45
Figure 2.12-Banc d'affûtage (données confidentielles supprimées).....	46
Figure 2.13-Vue d'ensemble du nouvel affuteur avec multiplicateur de vitesse (données confidentielles supprimées). .....	46
Figure 2.14-Mesure de l'effort de commande : (a) CAO de l'affuteur instrumenté ; (b) Capteur de force en traction/compression (données confidentielles supprimées). .....	46
Figure 2.15-Microstructures des aciers HSS : (a) acier M2 ; (b) acier ASP2053 ; (c) acier ASP2055 (données confidentielles supprimées).....	48
Figure 2.16-Chemin de mesure de la microdureté des lames de coupe. ....	48
Figure 2.17-Profiles de microdureté en coupe. ....	49
Figure 2.18-Microscope numérique Keyence VHX-7000. ....	51
Figure 2.19-Lignes d'avances des grains abrasifs sur les surfaces de la lame.....	52
Figure 2.20-Défauts d'affûtage au niveau du fil tranchant « Fil retourné» : (matériau M2; $V_b = 10 \text{ m.s} - 1$ ; $F_l = 50 \text{ Hz}$ ; $P_z = 5 \cdot 105 \text{ Pa}$ ) (données confidentielles supprimées). .....	52
Figure 2.21-Evaluation visuelle du fil tranchant après affûtage (données confidentielles supprimées). .....	53
Figure 2.22-Diagrammes des effets moyens correspondant aux paramètres liés au fil tranchant : (a) <b>Re</b> , (b) <b>Rc</b> (données confidentielles supprimées).....	53
Figure 2.23-Formation de défaut du fil tranchant "fil retourné" durant l'affûtage (données confidentielles supprimées). .....	54
Figure 2.24-Plastification de la matière au niveau du fil tranchant "fil retourné" : (matériau M2; $V_b = 10 \text{ m.s} - 1$ ; $F_l = 100 \text{ Hz}$ ; $P_z = 4 \cdot 105 \text{ Pa}$ ) (données confidentielles supprimées). .....	54
Figure 2.25-Micrographie MEB de la microstructure des trois aciers de lame : (a) M2 ; (b) ASP2055 ; (c) ASP2053.....	55
Figure 2.26-Arrachement de carbures durant l'affûtage : (a) Microstructure d'un acier rapide conventionnel ; (b) Microstructure d'un acier rapide fritté (données confidentielles supprimées). .....	56
Figure 2.27-Arrachement des carbures au niveau de l'arête tranchante de la lame (données confidentielles supprimées). .....	56
Figure 2.28-Diagrammes d'interactions correspondants aux : <b>Re</b> et <b>Rc</b> (données confidentielles supprimées). .	57
Figure 2.29-Évolution de l'effort frontal de coupe en fonction de l'état du fil tranchant de la lame : (a) fil tranchant fin ; (b) présence du fil retourné après affuttage (données confidentielles supprimées). .....	57
Figure 2.30- Évolution de l'effort frontal en fonction du rayon d'acuité et de la rugosité du fil tranchant après affûtage (données confidentielles supprimées). .....	58
Figure 2.31-Montage de mesure de l'effort d'affûtage : (a) plaquette d'affûtage ; (b) jauges de déformation en pont complet.....	58
Figure 2.32-Deformation en flexion pure des plaquettes d'affûtage. ....	59
Figure 2.33-Efforts en affûtage.....	60
Figure 2.34-Cycle d'affûtage (Lame en ASP2053 ; $\theta = 30^\circ$ ; Abrasif structuré P150 ; $V_b = 21 \text{ m.s} - 1$ ; $F_l = 100 \text{ Hz}$ ; $P_z = 4 \cdot 105 \text{ Pa}$ ) (données confidentielles supprimées).....	61
Figure 2.35-Analyse spectrale du signal de l'effort normal d'affûtage (Lame en ASP2053 ; $\theta = 30^\circ$ ; Abrasif structuré P150 ; $V_b = 21 \text{ m.s} - 1$ ; $F_l = 100 \text{ Hz}$ ; $P_z = 4 \cdot 105 \text{ Pa}$ ) (données confidentielles supprimées). .....	61
Figure 2.36- Diagrammes des effets purs correspondant à l'effort d'affûtage (données confidentielles supprimées). .....	61
Figure 2.37-Graphe des interactions sur l'effort d'affûtage <b>Faffutage</b> (données confidentielles supprimées). .	62
Figure 2.38-Démarche de l'analyse statistique. ....	62
Figure 2.39-Coefficients de corrélation de Pearson concernant les paramètres d'entrée du plan d'expériences (données confidentielles supprimées).....	65
Figure 2.40-Probabilité p de dissociation calculée (2 ways ANOVA) (données confidentielles supprimées). ....	65
Figure 2.41-Indices de Fisher résultants de l'analyse de la variance de la relation entre les paramètres d'entrée et de sortie du plan d'expériences (données confidentielles supprimées).....	66

Figure 2.42-Chemin de mesurage pour la microdureté Knoop HK (données confidentielles supprimées).....	67
Figure 2.43-(a) Empreinte de l'indenteur sur la surface latérale de la lame ; (b) Schéma de principe de l'essai de dureté Knoop. ....	67
Figure 2.44-Evaluation visuelle du « fil retourné » après affûtage (données confidentielles supprimées).....	69
Figure 3.1-Localisation des contraintes de cisaillement durant la découpe des textiles par la méthode de simulation numérique (Lectra) (données confidentielles supprimées). ....	76
Figure 3.2- Structure du dynamomètre à jauges de déformation (Cosson-Coche 2017) (données confidentielles supprimées). ....	78
Figure 3.3-Axes de mesures du dynamomètre. ....	78
<b>Figure 3.4</b> -Emplacement du dynamomètre et la carte électronique dans le pied de biche (données confidentielles supprimées). ....	79
Figure 3.5-Cheminement de l'information (données confidentielles supprimées). ....	79
Figure 3.6-Sixième composante du torseur mécanique. ....	80
Figure 3.7-Dispositif de mesure de l'effort vertical appliqué sur la lame durant la découpe <b>Fz</b> (données confidentielles supprimées). ....	80
Figure 3.8- Évolution de l'effort vertical pour un essai de coupe à vide et une découpe d'un matelas de denim. 81	
Figure 3.9-Mesure des six composantes du torseur des actions mécaniques (données confidentielles supprimées). ....	82
Figure 3.10-Paramètres de coupe. ....	83
Figure 3.11-Tracés des efforts et des moments de coupe. ....	85
Figure 3.12-Signaux des moments de coupe pour une opération de découpe ....	85
Figure 3.13-Signaux des efforts de coupe vertical <b>Fz</b> et frontal <b>Fx</b> pour une opération de découpe (données confidentielles supprimées). ....	86
Figure 3.14-Évolution de l'amplitude de l'effort vertical <b>Fz</b> en fonction de la longueur de coupe parcourue par la lame (données confidentielles supprimées). ....	86
Figure 3.15- Évolution des efforts de coupe appliqués sur une lame de coupe en ASP2053 ( <b>Vc = 40 m. min – 1; F1 = 50 Hz</b> ) (données confidentielles supprimées). ....	87
Figure 3.16- Évolution des moments de coupe appliqués sur une lame de coupe en ASP2053 ( <b>Vc = 40 m. min – 1; F1 = 50 Hz</b> ) (données confidentielles supprimées). ....	87
Figure 3.17-Zone de mesure des paramètres topographiques de la lame. ....	88
Figure 3.18-Représentation de l'axe central. ....	89
Figure 3.19-Efforts de coupe tournants ( <b>Fx</b> et <b>Fy</b> ) (données confidentielles supprimées). ....	90
Figure 3.20-Schéma de la distribution des axes centraux suivant un hyperboloïde de révolution pour un cycle de montée et descente de la lame (données confidentielles supprimées). ....	90
Figure 3.21-Repère de l'étude (données confidentielles supprimées). ....	91
Figure A.1-Emplacement du matelas sur la machine de coupe ....	108





# Liste des Tableaux

Tableau 1.1-Caractéristiques mécaniques du denim utilisé durant l'étude.....	20
Tableau 1.2-Compositions chimiques des nuances d'aciers ASP2053, ASP2055 et M2. ....	23
Tableau 2.1-Classement des minéraux établi par Friedrich MOHS.....	39
Tableau 2.2-Classification par taille des grains (FEPA). ....	39
Tableau 2.3-Dimensions des lames utilisées dans cette étude. ....	43
Tableau 2.4-Propriétés physiques des trois nuances d'acier utilisées.....	47
Tableau 2.5-Caractéristiques mécaniques des aciers rapides utilisés.....	47
Tableau 2.6-Paramètres de coupe. ....	57
Tableau 2.7-Corrélations de Pearson entre les paramètres d'entrée et les paramètres de sortie( données confidentielles supprimées). ....	63
Tableau 2.8-Probabilités de l'hypothèse nulle p (données confidentielles supprimées).....	64
Tableau 2.9-Indices de Fisher (données confidentielles supprimées). ....	64
Tableau 2.10-Facteurs du plan d'expériences et leurs niveaux (données confidentielles supprimées). ....	68
Tableau 2.11-Configurations optimales des paramètres d'affûtage (données confidentielles supprimées). ....	69
Tableau 3.1-Configurations de coupe (données confidentielles supprimées). ....	82
Tableau 3.2-Paramètres d'affûtage des lames de coupe et topographie obtenue (données confidentielles supprimées). ....	83



# Nomenclature

---

$\alpha_i$ : Pondération liée au paramètre d'entrée [sans unité]	$F_{\text{bras affutage}}^{\text{bras}}$ : Effort d'affûtage pas bras [N]
$\beta_i$ : Pondération liée à l'interaction entre deux paramètres d'entrée différents [sans unité]	$F_{\text{Fisher}}$ : Indice de Fisher
$\theta$ : Angle de coupe [°]	$F_1$ : Fréquence de vibration de la lame [Hz]
$\rho$ : Résistivité des jauges de déformation [ $\Omega\text{m}$ ]	$F_{\text{min}}$ : Précharge requise minimale [N]
$\partial_1$ : Paramètre topographique de la lame affûtée calculé.	$F_{\text{resultant}}$ : Effort de coupe résultant [N]
$\gamma_z$ : Inclinaison de l'axe central par rapport à l'axe de la lame [°]	$F_x$ : Effort de coupe frontal [N]
$\sigma(\mathbf{X})$ : Écart type du variable X	$F_y$ : Effort de coupe latéral [N]
$\text{cov}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ : covariance des variable X et Y	$F_z$ : Effort de coupe vertical [N]
$\epsilon_{\text{corr}}$ : Coefficient de corrélation	k : Rapport de multiplication
$a_i$ : Paramètre de sortie du plan d'expériences	$l_{\text{bavure}}$ : Longueur du fil retourné observée [mm]
$b_i$ : Paramètre d'entrée du plan d'expériences	$l_m$ : Épaisseur du matelas [mm]
$C_i$ : Coefficient de corrélation [sans unité]	$l_{\text{max}}$ : Longueur totale de la lame observée [mm]
$c_i$ : Constante [sans unité]	$M_x$ : Moment de coupe latéral théorique [N.m]
$d_2$ : Diamètre à flanc de filet de la vis [mm]	$M_y$ : Moment de coupe frontal théorique [N.m]
$D_b$ : Diamètre du tombeur [mm]	$M_y^{\text{estimé}}$ : Moment de coupe frontal estimé [N.m]
$e$ : Épaisseur de la lame [mm]	$M_y^{\text{mesuré}}$ : Moment de coupe frontal mesuré [N.m]
$e_b$ : Largeur des bandes abrasives [mm]	$M_y^{\text{théorique}}$ : Moment de coupe frontal théorique [N.m]
$E_{\text{moyen}}^{\text{estimé}}$ : Écart moyen entre les valeurs du moments de coupe mesurées et estimées [%]	$M_z$ : Moment de coupe vertical [N.m]
$E_{\text{moyen}}^{\text{théorique}}$ : Écart moyen entre les valeurs du moments de coupe mesurées et théoriques [%]	n : Nombre de bras par affuteur

---

---

**F<sub>affutage</sub>** : Effort d'affûtage [N]

**N<sub>b</sub>** : Vitesse de rotation du moteur [tr. min<sup>-1</sup>]

**P** : Pas de filetage [mm]

**p** : Probabilité de l'hypothèse nulle p

**PM** : Métallurgie des poudres

**PMH** : Point mort haut

**PMB** : Point mort bas

**Pt<sub>xi</sub>** : Projection du point d'application de l'axe central sur l'axe x

**Pt<sub>yi</sub>** : Projection du point d'application de l'axe central sur l'axe y

**Pt<sub>zi</sub>** : Projection du point d'application de l'axe central sur l'axe z

**P<sub>z</sub>** : Pression d'affûtage [**10<sup>5</sup>. Pa**]

**R** : Résistance des jauges de déformation [ $\Omega m$ ]

**R<sub>a</sub>** : Rugosité arithmétique [ $\mu m$ ]

**R<sub>c</sub>** : Hauteur moyenne des éléments du profil [ $\mu m$ ]

**R<sub>e</sub>** : Rayon d'acuité [ $\mu m$ ]

**r<sub>m</sub>** : Diamètre d'appui de l'écrou [mm]

**RS<sub>m</sub>** : Pas moyen de rugosité au niveau de la ligne moyenne [ $\mu m$ ]

**S<sub>a</sub>** : Rugosité surfacique des surfaces latérales de coupe [ $\mu m$ ]

**S<sub>a</sub>** : Rugosité surfacique des surfaces [ $\mu m$ ]

**s<sub>l</sub>** : Largeur de la surface affûtée [mm]

**T<sub>aff</sub>** : Temps d'affûtage [ms]

**T<sub>b</sub>** : Taille des grains d'abrasifs

**Tex** : Masse linéique des fibres textiles [**g. Km<sup>-1</sup>**]

---

# Introduction générale

L'industrie textile regroupe plusieurs métiers tout au long de la fabrication des fibres textiles jusqu'à la confection des produits finis. Il existe près de 2200 entreprises textiles en France dont le chiffre d'affaire de production s'élève à 13.3 milliards d'euros par an.

Cette industrie concerne de nombreux domaines comme l'automobile, l'habillement et l'ameublement grâce à une grande variété de matériaux textiles. Les matériaux textiles se composent de nombreuses fibres dont la nature et le tissage répondent à une utilisation spécifique. Ainsi, le tissu passe par plusieurs étapes de fabrication qui modifient ses caractéristiques et ses propriétés. Il est un matériau hétérogène dont le comportement mécanique est très difficile à caractériser. De fait, les avancées technologiques dans ce domaine reposent très souvent sur des lois empiriques. Les premières recherches sur le textile remontent à plusieurs dizaines d'années (*Morton 1926; Behre 1961*). Elles se sont focalisées sur l'étude des tissus et leurs caractéristiques mécaniques. Ensuite, les recherches se sont développées afin d'étudier les différentes applications spécifiques comme l'utilisation des matériaux anti-coupure et de protection de la chaleur (*Bajaj 1997; Thilagavathi 2010*). D'autres recherches (*Kawabata 1979*) se sont intéressées à la simulation du comportement du tissu afin de reproduire son tombé et sa texture.

De son côté, l'industrie s'approprie les recherches sur les matériaux textiles pour optimiser au mieux le travail de la matière avec ses machines. La découpe d'un tissu est une étape importante dans la chaîne de production. Les entreprises utilisent des machines automatiques pour découper des matelas composés de plusieurs plis simultanément. La qualité des bords des pièces découpées ainsi que la rapidité à laquelle le produit fini est fabriqué sont les deux critères essentiels d'amélioration des machines de coupe.

Les matériaux textiles subissent différents traitements et transformations avant la découpe. Pendant ces étapes, les matériaux sont pollués par des impuretés et des particules comme la silice dans la structure des fibres textiles. Par conséquent, le tissu devient un milieu très abrasif pour l'outil coupant. Il devient donc nécessaire d'améliorer les performances de l'outil pour conserver au mieux son pouvoir coupant durant la phase de coupe et garantir une durée de vie satisfaisante. Pour gérer la partie active de l'outil coupant, les machines de coupe sont équipées d'un affuteur pour rectifier les surfaces de l'outil et régénérer le pouvoir coupant lorsque son usure devient trop importante.

C'est dans ce contexte que se placent les travaux présentés dans cette thèse. L'étude traite de l'affûtage des lames de coupe lors de la découpe des textiles. Ce travail vise la caractérisation expérimentale de l'intégrité de la surface de l'outil coupant induite par l'affûtage et l'optimisation de

l'opération de coupe. Il s'intéresse à l'identification des différents paramètres topographiques qui définissent le pouvoir coupant de l'outil. Dans un contexte industriel d'amélioration des performances de la découpe textile, la machine de coupe doit pouvoir s'auto-adapter à l'état de la lame et aux difficultés de coupe qu'elle rencontre. Pour arriver à ce niveau de performance et d'automatisation, des connaissances suffisantes sur la procédure d'affûtage, sur les phénomènes d'usure de la lame et son comportement durant la découpe sont nécessaires.

En définitive, l'apport de ce travail peut se résumer à :

- L'étude comparative des configurations d'affûtage des lames de coupe et la définition de leur pouvoir coupant.
- Une analyse spécifique de la mesure des efforts et moments de coupe en tenant compte des conditions opératoires, des propriétés du tissu, des caractéristiques topographiques de la lame après affûtage dans le but d'optimiser le processus de coupe et la dégradation de son pouvoir coupant durant la phase de coupe.

Le plan du mémoire de la thèse s'articule ainsi autour de trois chapitres :

- Le premier chapitre réalise l'état de l'art de la mécanique de la découpe textile et l'affûtage de l'outil coupant, son impact sur la topographie et l'intégrité de surface de la lame.
- Le second chapitre développe la méthode expérimentale utilisée pour effectuer les essais d'affûtage et les analyses pendant et après rectification de la lame. Il présente l'analyse des résultats expérimentaux de l'affûtage et l'identification des paramètres topographiques qui définissent le pouvoir coupant de la lame.
- Enfin, le troisième chapitre présente les essais de coupe pour le matériau *denim*, les méthodes développées pour mesurer les efforts et moments de coupe. L'étude du comportement torsoriel de la lame durant la phase de coupe est traitée, dans la perspective d'établir des liens entre l'usure de la lame, la qualité d'affûtage réalisée, les conditions de coupe et les composantes du torseur d'actions mécaniques mesurées.

# 1

## **Contexte de l'étude : Découpe des matériaux textiles souples**

— “Nul ne peut atteindre l'aube sans passer par le chemin de la nuit.”

-Khalil Gibran

Ce chapitre définit le cadre industriel qui a conduit la société Lectra à s'intéresser à l'étude de l'aptitude à la rectification de nouvelles nuances d'acier fritté et de l'évolution du pouvoir coupant des lames. Dans ce chapitre, on présentera les matériaux utilisés, leurs spécificités et leur utilisation dans le domaine de la découpe de textiles. Les notions de l'aptitude à la rectification et à la création du fil tranchant par affûtage seront également introduites. Les difficultés rencontrées par les industriels lors de l'affûtage de nouvelles nuances d'acier seront également présentées.





# SOMMAIRE

1.1	Mécanique de la découpe des matériaux textiles .....	7
1.1.1	Notions de base : la découpe des matériaux textiles .....	7
1.1.2	Notions de base : géométrie de coupe .....	8
1.2	Machine de découpe industrielle .....	9
1.2.1	Structure cinématique générale .....	9
1.2.2	Processus de coupe .....	11
1.2.3	Problématique du pilotage des découpeurs textiles .....	12
1.3	Matériaux textiles .....	14
1.3.1	Propriétés des matériaux textiles et fabrication .....	14
1.3.2	Caractéristiques mécaniques des textiles .....	16
1.3.3	Fabrication et propriétés du denim .....	18
1.3.4	Essai de caractérisation mécanique du « denim » .....	19
1.4	Usure abrasive des lames vibrantes .....	20
1.5	Les aciers rapides supérieurs frittés .....	21
1.6	Nuance HSS pour les lames de coupe .....	22
1.6.1	Composition chimique .....	22
1.6.2	Traitements thermiques .....	23
1.6.3	Microstructures typiques des aciers rapides .....	25
1.7	Aptitude à l'affûtage des lames de coupe .....	26
1.7.1	Définition .....	26
1.7.2	Paramètres d'étude de l'affûtage .....	26
1.8	Affûtage des lames de coupe .....	28
1.9	Modélisation de la découpe des textiles et affûtage des lames vibrantes .....	29
1.10	Conclusion .....	31



## 1.1 Mécanique de la découpe des matériaux textiles

Cette section est dédiée aux notions de découpe mécanique des matériaux textiles, leurs propriétés mécaniques ainsi que physiques et les caractéristiques des outils de coupe utilisés.

### 1.1.1 Notions de base : la découpe des matériaux textiles

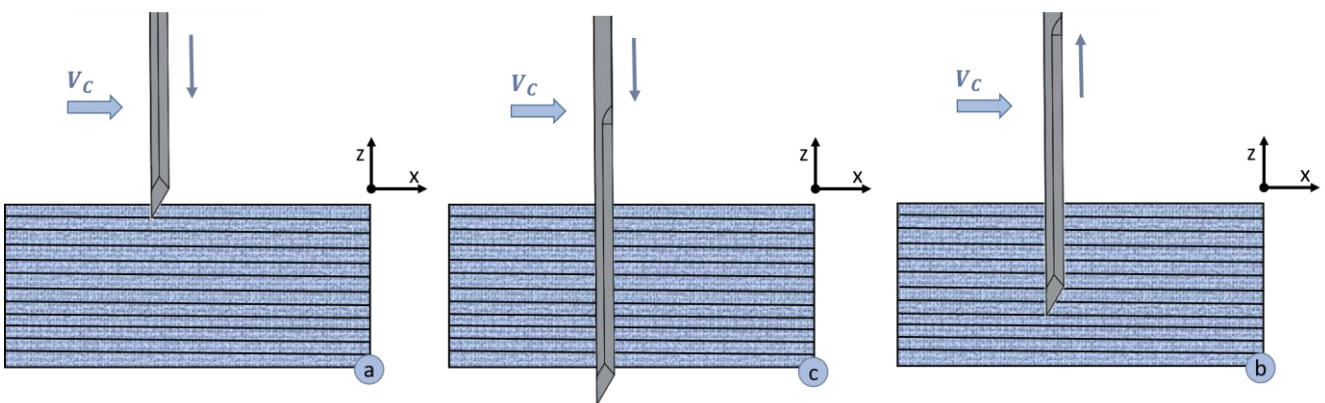
Le textile est un matériau composite omniprésent dans de nombreux domaines comme l'habillement, l'automobile et le médical. À l'échelle mondiale, le chiffre d'affaire de la production de textile s'élève à environ 500 milliards de dollars. Elle se classe au troisième rang des échanges commerciaux, en 2003, derrière l'automobile et l'électronique.

Néanmoins, les recherches scientifiques portant sur la modélisation et l'étude du comportement des matériaux souples et la découpe textile sont très rares comparativement à celles concernant la modélisation de la coupe métallique (*Merchant 1945*).

De nos jours, certaines entreprises spécialisées dans la fabrication des machines de coupe textile, décident de mettre en avant la recherche et le développement de nouveaux outils pour améliorer les performances de leurs produits.

La découpe de textile est un procédé qui présente un environnement thermique et mécanique spécifique. Le matériau à découper est composé de plusieurs couches pour créer un matelas de tissus. Le résultat final est généralement sous forme d'une pile de matière textile multicouche.

Au cours de cette opération, la lame avance dans un matelas de tissu avec une vitesse de coupe  $V_c$  et elle est soumise à des oscillations cycliques, appelées dans le domaine « vibration de coupe », afin de couper les fibres textiles et créer la pièce finale (**Figure 1.1**).



**Figure 1.1-** Étapes d'un cycle de découpe de tissu : (a) pénétration de la lame ; (b) lame dans le matelas ; (c) dégagement de la lame.

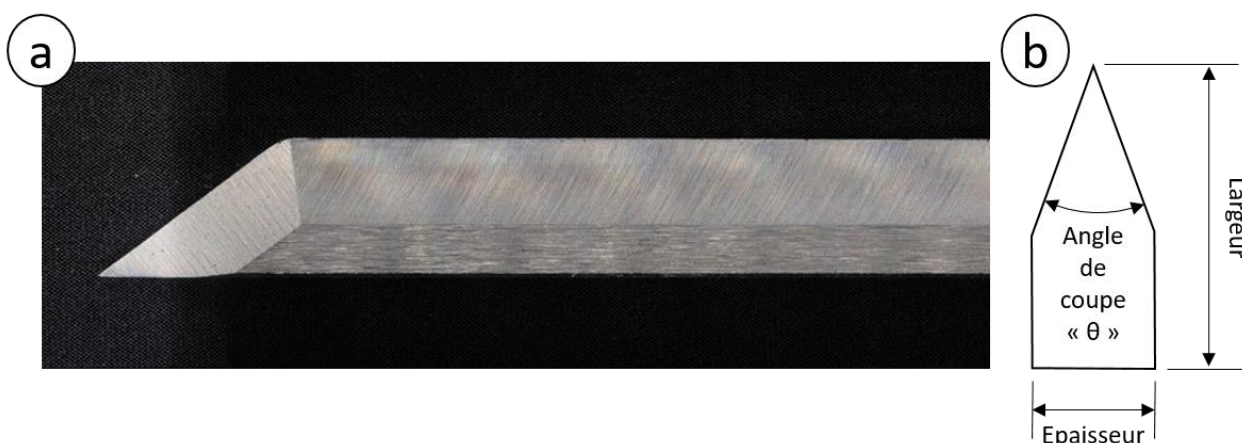
Ces sollicitations conduisent à de nombreux modes de dégradation de l'outil de coupe incluant l'abrasion, l'usure du fil tranchant et la rupture par fatigue.

Les phénomènes d'usure par abrasion sont généralement le résultat de la présence de particules abrasives, comme le silicium dans le *denim*, dans la face de contact entre la lame et les pièces coupées. D'ailleurs, la génération des contraintes cycliques importantes en compression et en cisaillement, appliquées sur l'outil coupant, peut conduire à l'apparition de fissures et à la rupture de l'outil.

Des valeurs élevées de la limite élastique et de la ténacité sont primordiales pour assurer une bonne résistance mécanique. Ces caractéristiques doivent être associées à une bonne résistance à l'usure pour résister au phénomène d'abrasion dû au frottement avec les fibres textiles. La lame doit présenter également une compatibilité avec l'affûtage : elle doit permettre une bonne usinabilité en rectification et le matériau constitutif doit posséder une dureté globale inférieure à la dureté des grains abrasifs. Pour lutter contre l'usure abrasive, une microdureté de surface élevée est recherchée avec une bonne stabilité microstructurale (température de revenu élevée et refroidissement rapide) pour résister aux chargements cycliques et aux températures d'affûtage.

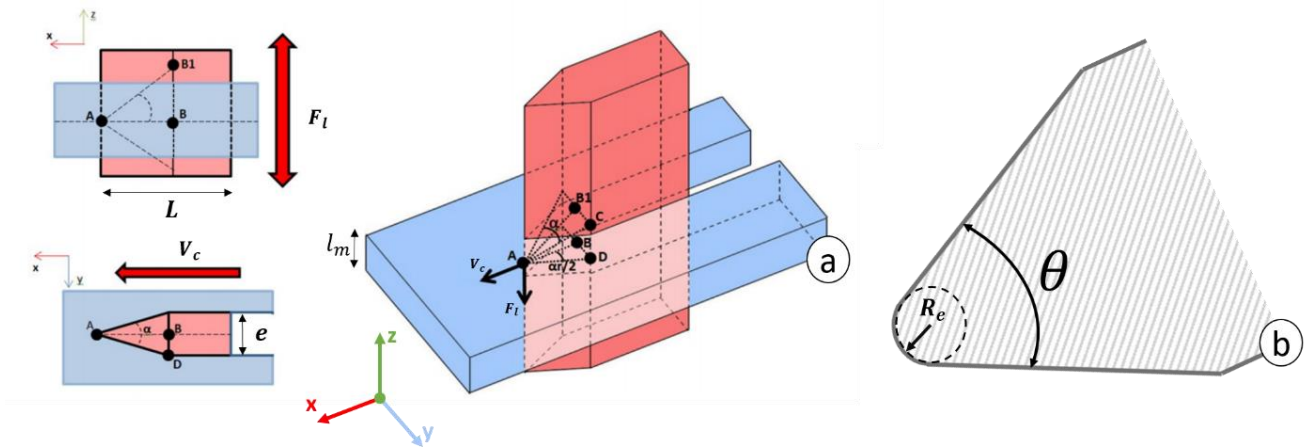
### 1.1.2 Notions de base : géométrie de coupe

Il existe différentes géométries d'outils pour découper les pièces en textile. Néanmoins, la lame lisse est souvent utilisée pour la découpe des multicouches de tissu. Il s'agit d'une lame coupante en acier rapide supérieur, régulièrement affûtée. Une lame ne dépasse pas une dizaine d'heures de travail avant son remplacement. La **Figure 1.2** montre la géométrie de la lame de coupe à tranchant unique.



**Figure 1.2-(a)** Lame lisse de coupe ; **(b)** profil de coupe (section de lame).

La zone et la géométrie de coupe utilisée dans cette étude sont définies par les paramètres suivants (**Figure 1.3**) :



**Figure 1.3-(a)** Représentation de la géométrie de lame coupante (Blekač 1998) ; **(b)** rayon d'acuité et angle de coupe de la lame.

- L'épaisseur de coupe  $l_m$  correspond à l'épaisseur du matelas de tissu.
- L'angle de coupe  $\theta$  est l'angle entre les deux surfaces de coupe de la lame.
- Le rayon d'acuité  $R_e$ .
- L'épaisseur de la lame  $e$  et la largeur  $L$ .

Le mouvement de la lame est caractérisé par :

- L'avance horizontale avec une vitesse de coupe  $V_c$ .
- Le mouvement d'oscillation cyclique avec une fréquence  $F_l$ .

## 1.2 Machine de découpe industrielle

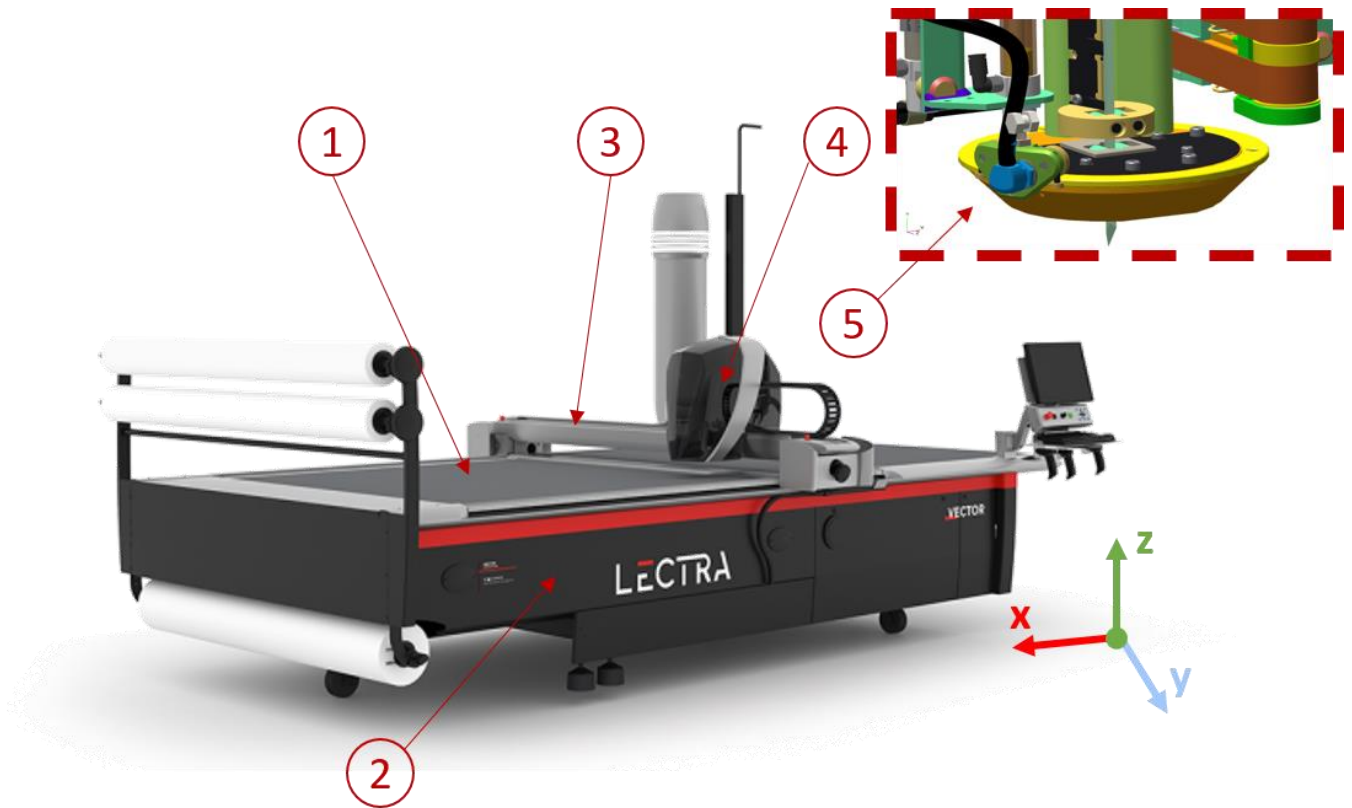
### 1.2.1 Structure cinématique générale

Le découpeur textile utilisé pour cette étude est présenté dans la **Figure 1.4**. La découpe du textile est généralement réalisée par un mouvement de vibration verticale de l'outil de coupe (la lame) combiné à l'avance de la tête de coupe suivant l'axe X. Le mouvement oscillatoire de la lame est obtenu à l'aide d'un système de bielle-manivelle. La fréquence d'oscillation des lames de machines de coupe textile ne dépasse pas les 100 Hz. La structure cinématique du découpeur industriel est la suivante :

- Une table de travail sous forme de convoyeur (1) avec un châssis (2) contenant le dispositif d'aspiration d'air pour le maintien du tissu.

- Une poutre mobile (3) au-dessus de la table de coupe permettant le déplacement de la lame suivant l'axe horizontal X.
- La tête de découpe (4) située sur la poutre mobile qui se déplace suivant l'axe Y. Le mouvement de coupe dans le plan horizontal est généré par la combinaison entre le déplacement de la poutre suivant l'axe X et la tête de coupe suivant l'axe Y. La lame admet donc deux vitesses : une vitesse d'avance linéaire de l'ensemble mobile et une vitesse pseudo-sinusoïdale d'oscillation verticale.
- Une lame de coupe embarquée dans la tête de découpe (4).

Le pied presseur constitue un élément important du dispositif de découpe (5). Il est à la fois un élément de guidage pour la lame et sert d'interface de contact entre la tête de découpe et le matelas de tissu.

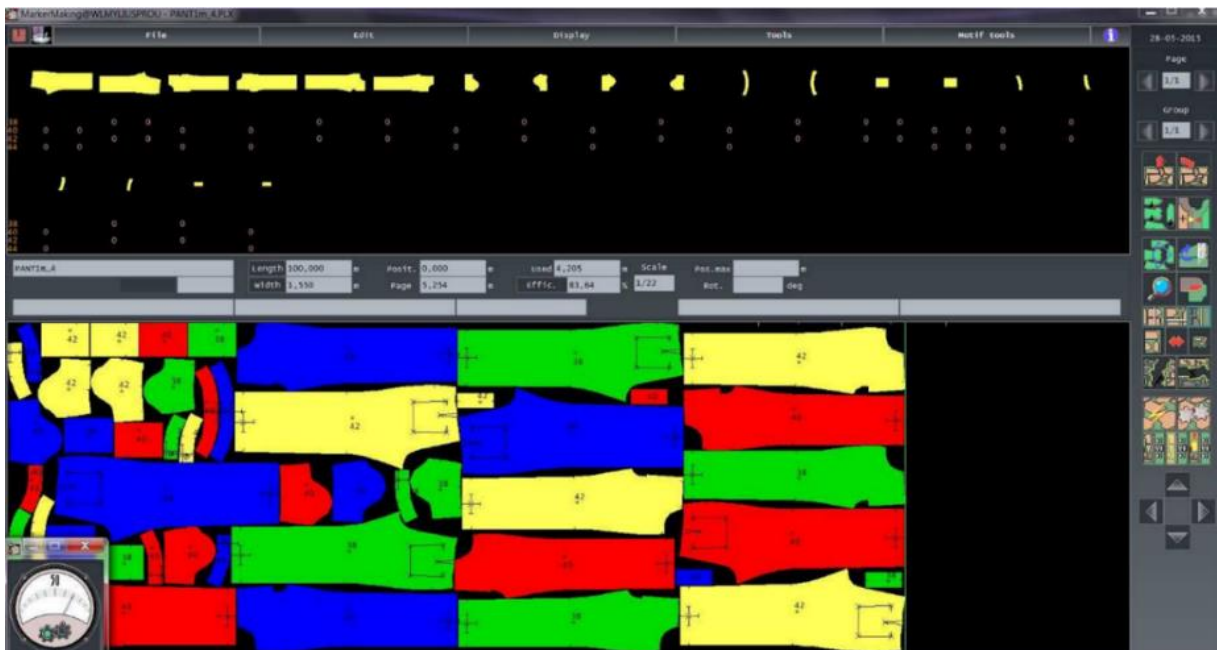


*Figure 1.4-Découpeur textile industriel (Vector iX9, Lectra).*

### 1.2.2 Processus de coupe

La trajectoire de coupe est définie par un placement de formes planes des pièces à découper. Ceci procure un gain de productivité et une optimisation du temps de travail. Ainsi, un placement de découpe est souvent conditionné par le nombre d'articles de même taille, la consommation optimale du tissu et la gestion efficace du temps de coupe.

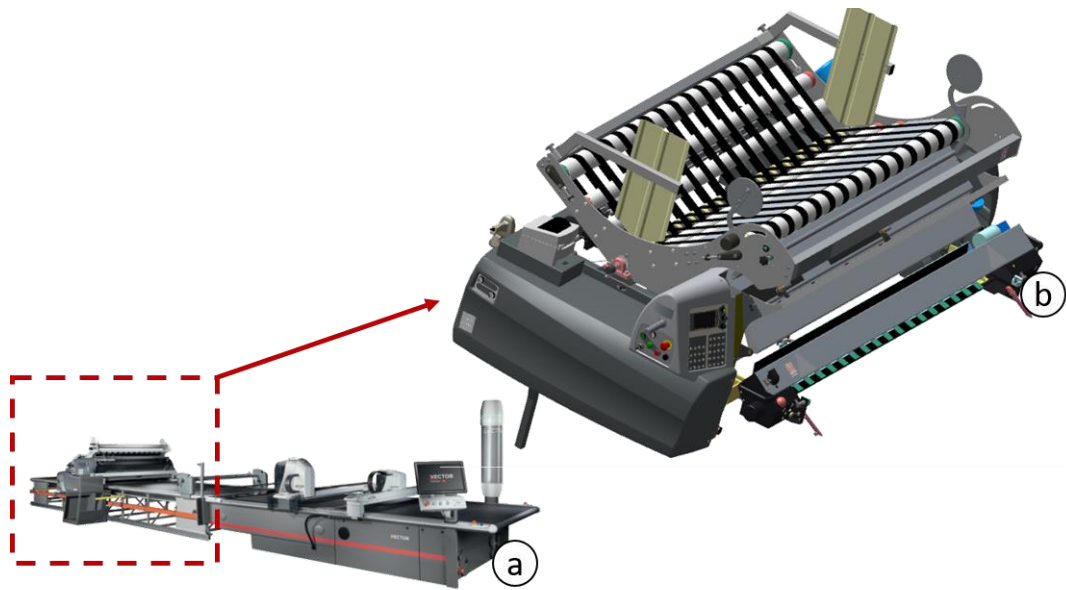
Par ailleurs, il existe des logiciels spécifiques, par exemple « *Modaris Lectra* », pour créer un placement optimal de découpe. Ce placement est envoyé à la commande numérique de la machine industrielle automatique de découpe (**Figure 1.5**).



*Figure 1.5-Placement de découpe textile en utilisant le logiciel « Modaris Lectra ».*

Les découpeurs textiles sont équipés, en général, d'un matelasseur (**Figure 1.6**) afin de superposer plusieurs plis (matelassage) d'un même matériau textile. Le matelassage est un travail long et difficile car chaque matelas est défini par la forme et le nombre de pièces à découper. Ainsi, la plupart des matelasseurs automatiques sont intégrés à la machine de coupe afin d'augmenter les cadences de production. Le matelasseur déroule le rouleau de tissu au-dessus d'une grande table, en coupant plusieurs plis superposés et identiques. La table de travail du matelasseur est équipée d'un convoyeur qui transporte le matelas vers la table de découpe.





**Figure 1.6-Matelas seur automatique : (a) Découpeur textile équipé d'un matelas seur ; (b) mécanisme de matelas seur.**

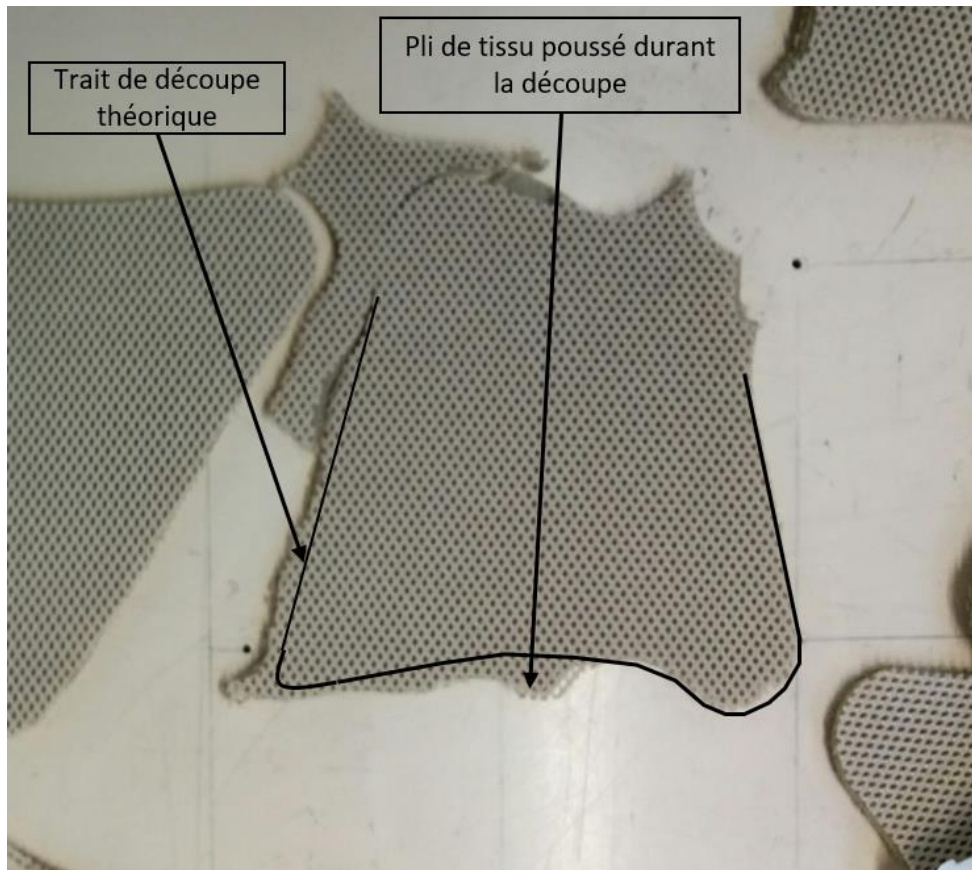
Pour la préhension du matelas durant la découpe, la pile multicouche de matière textile est placée entre un film en polyéthylène, au-dessus, et une feuille de papier perforée, au-dessous. En utilisant un dispositif d'aspiration (turbine d'aspiration) situé dans le châssis de la table de coupe, un vide d'air se crée et rigidifie le matelas de tissu par effet de compression. Ensuite, la tête de coupe se place au-dessus du matelas pour découper les pièces avec la lame vibrante suivant les géométries définies dans le placement.

L'objectif est de pouvoir couper efficacement tout type de matériau textile, en respectant les critères de qualité durant un temps de coupe optimale. La qualité de coupe se caractérise par le respect des dimensions et des formes prévues des pièces finales sur toute l'épaisseur du matelas.

### 1.2.3 Problématique du pilotage des découpeurs textiles

Certains phénomènes peuvent créer des défauts dans la coupe. Par exemple des erreurs du pilotage automatique sur le placement sont susceptibles de créer un chevauchement de pièces adjacentes. Des problèmes peuvent également venir du maintien en position du matelas. Ce maintien permet d'assurer sa stabilité pendant toute la durée de la découpe et il ne doit pas provoquer de déformation de la pièce découpée.

L'imperméabilité et la compressibilité du textile sont deux critères de classification mécanique des matériaux textiles. Les paramètres d'aspiration de la machine doivent être adaptés au choix du tissu afin d'éviter que les plis de tissus ne soient pas poussés par le mouvement de la lame. La **Figure 1.7** montre un pli de tissu souple poussé par la lame, durant la découpe, créant des défauts de qualité.



*Figure 1.7-Plis de tissu poussé par la lame durant la coupe.*

Les matériaux textiles souples et malléables comme la mousse doivent être maintenus avec un minimum de pression afin d'éviter l'écrasement et les déformations trop importantes des pièces finales après la coupe. Le *denim* supporte des efforts d'aspiration importants grâce à la structure rigide de son tissage. Par exemple, un matelas composé de 30 plis de *denim* perd 20% de sa hauteur pour une pression d'aspiration égale à 200 mbar. Comparativement, un matelas de mousse perd entre 50-70% de sa hauteur pour la même force d'aspiration.

La principale difficulté de la coupe multicouche est de respecter les critères géométriques des pièces finales sur toute l'épaisseur du matelas. Durant la coupe, la lame fléchit sous la contrainte exercée par les efforts de coupe latéraux. Un gradient de pression entre les deux flancs de la lame génère un moment de flexion, ce qui modifie la trajectoire initiale de découpe. Ce fléchissement agit directement sur la différence de dimension entre les plis du haut et ceux du bas du matelas (**Figure 1.8**), créant des pièces non conformes (Cosson-Coche 2017).



**Figure 1.8-(a)** Défaut de coupe non verticale dû au fléchissement de la lame ; **(b)** Flexion 3D de la lame (Cosson-Coche 2017).

Pour certains matériaux dont la température de fusion est basse, une mauvaise configuration des paramètres de coupe peut entraîner la fusion du matériau en contact de la lame. Les plis du matelas se soudent donc entre eux et forment un bloc de matière. Certaines machines de coupe sont équipées d'un système de refroidissement par air pulsé permettant d'évacuer une partie de la chaleur générée.

À titre d'exemple, la découpe du « vinyle » nécessite une fréquence de vibration et une vitesse d'avance très faibles pour éviter la fusion des plis dans la zone de contact avec la lame (Cosson-Coche 2017). Ce sont des conditions de coupe qui affectent directement la productivité.

Les paragraphes suivants décrivent les caractéristiques des matériaux textiles, notamment celles du *denim* choisi comme matériau de référence pour cette étude.

## 1.3 Matériaux textiles

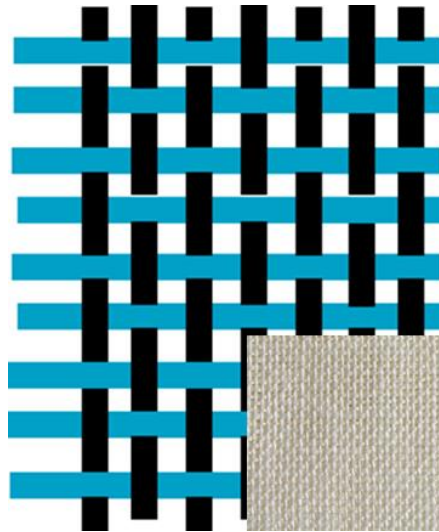
### 1.3.1 Propriétés des matériaux textiles et fabrication

Le matériau textile est un entrelacs de deux fils qui s'entrecroisent pour créer une structure maillée. Généralement, deux familles de fils textiles existent : les fils de chaîne qui sont parallèles au sens de fabrication du matériau et les fils de trame (souvent appelés fils de la duite) perpendiculaires à ceux de chaîne. Le mode d'entrecroisement des fils entre eux est définie par le type d'armure du tissu. Il existe trois armures fondamentales différentes qui sont l'armure toile (ou taffetas), le satin (ou Atlas) et le sergé (ou diagonale). Ces trois modes d'entrecroisement nécessitent des fils de chaîne (appelés fils) qui sont tendus toujours dans le sens de la longueur du tissu, des fils de trame situés dans la largeur du tissu. Toutes les autres armures sont dérivées de ces 3 structures de base. La **Figure 1.9** présente une machine de tissage industrielle.



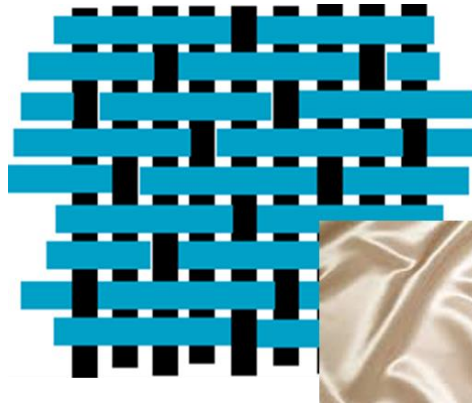
*Figure 1.9-Machine de tissage industrielle.*

–Armure toile : c’est un tissage où la duite passe alternativement au-dessus et au-dessous de chaque fil de chaîne (**Figure 1.10**). Dans cette catégorie de textile, on trouve le coton, les vichys et les mousselines.



*Figure 1.10-Armure toile.*

–Le satin : C’est une armure brillante, douce et souple. Pour créer ce type de maillage textile, un fil de chaîne chevauche au moins quatre fils de la duite avant de repasser sous un autre (**Figure 1.11**). C’est l’armure la plus fragile parce que le fait de chevaucher ainsi plusieurs fils successifs facilite la génération d’accrocs. Le « satin » fait référence au nom de la ville sia-toung (Zaytûn en arabe), l’actuelle Quanzhou au sud-est de la Chine.



*Figure 1.11-Armure de satin.*

–Le sergé : Cette armure est serrée car le fil de trame passe entre un ou deux fils de chaînes. Ce type de tissage est facile à repérer par l’effet des obliques dû à des alignements des duites qui sont décalées dans le sens de la chaîne (**Figure 1.12**). Généralement, le tissu sergé est plus rêche et solide, en raison d’un nombre d’entrecroisements plus important, que les autres armures. Il est souvent utilisé pour la fabrication du *denim* et du *tweed*.



*Figure 1.12-Armure de sergé.*

### 1.3.2 Caractéristiques mécaniques des textiles

L’utilisation croissante des matériaux fibreux dans le domaine industriel rend nécessaire la connaissance de leur comportement mécanique pendant les phases de découpe de façon à être capable de prévoir l’impact des conditions de coupe sur la qualité des pièces finales. Il est également important de savoir quelles conditions permettront de garantir la faisabilité de coupe du tissu.

Pour ces raisons, il faut caractériser les propriétés mécaniques et physiques d’un tissu et comprendre le comportement des fils qui le composent. Un matériau fibreux lui-même sera caractérisé

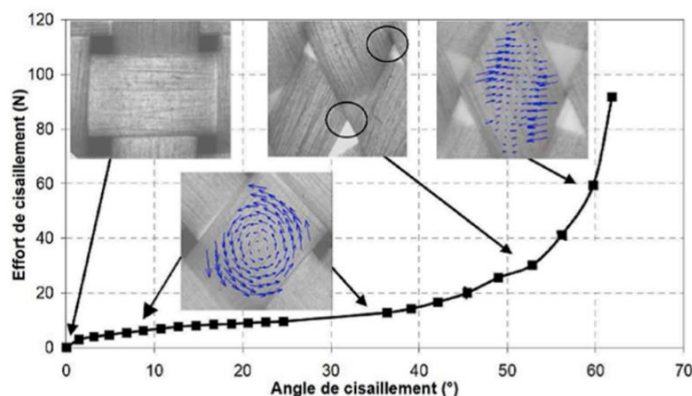
par la façon dont les fils sont entrelacés et leurs propriétés physiques.

La fibre textile peut être caractérisée par les propriétés suivantes :

- Ses caractéristiques physiques comme sa masse linéique ( $Tex = g/km$ ).
- Le module de Young exprimé en  $MPa$  et obtenu souvent par des essais de traction ainsi que la constante de torsion (sans unité) qui est obtenue par des essais de torsion d'un fil autour de son axe longitudinal (*ISO 7211-4*).

Depuis 1956, l'unité internationale de titrage ou la masse linéique utilisée pour les fibres textiles (*Tex*) correspond à la masse en grammes d'un kilomètre de ce fil (*ISO 639-3*). Ainsi,  $1 Tex = 10^{-6} kg/m$ .

Le comportement dans le plan, spécialement en cisaillement, est un sujet souvent relaté dans la littérature scientifique. Les fibres textiles admettent des degrés de liberté permettant de tourner les uns par rapport aux autres dans leur réseau, ce qui attribue au tissu une grande souplesse et modifie ses propriétés (*Kawabata 1996; Dumont 2003; Zhang 2007*). La **Figure 1.13** montre des essais de traction à  $45^\circ$  d'une structure tissée pour étudier la déformation dans le plan en fonction de l'effort de cisaillement.



**Figure 1.13**-Déformation dans le plan du tissu en fonction de l'effort de cisaillement (*Dumont 2007*).

Les caractéristiques du *denim* représentent un immense intérêt pour le travail présenté dans cette thèse. En effet, il est très résistant à la coupe et crée un milieu abrasif pour la lame. Le *denim* présente un taux élevé de silice qui résulte de la technique de sablage pour traiter la toile. Par conséquent, l'outil de découpe a tendance à s'user rapidement, en comparaison avec d'autres tissus d'habillement. La suite de cette section décrit la procédure de fabrication du *denim* et détaille les caractéristiques mécaniques de ce matériau.

### 1.3.3 Fabrication et propriétés du denim

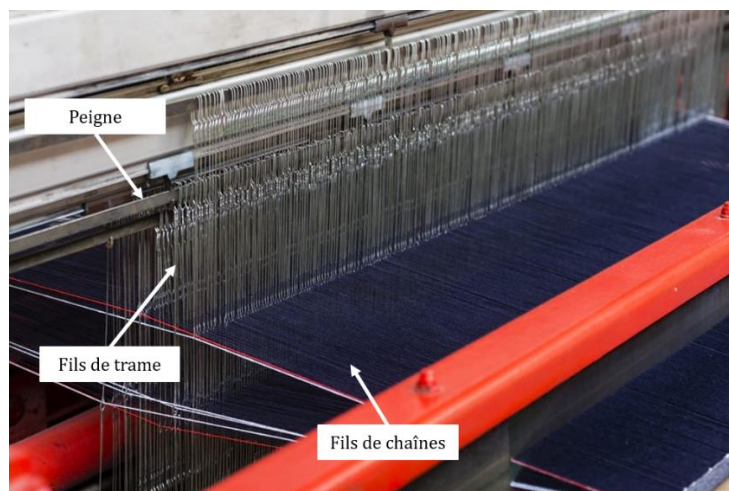
Le *denim* est un matériau textile produit du tissage des fibres selon une armure sergée (**Figure 1.14**).



*Figure 1.14-Armure sergée du denim.*

La fabrication de ce tissu est constituée d'une succession de différentes étapes. Chacune de ces opérations contribue aux propriétés et caractéristiques mécaniques finales du *denim*. Les étapes de fabrication principales sont décrites comme suit :

- Teinture : C'est une opération qui précède le tissage. Une teinture est appliquée directement sur le fil en bobine. Pour le *denim*, les fils de chaînes sont souvent trempés par bains successifs dans une teinture indigo et séchés à l'air libre. De ce fait, la rigidité du fil augmente par rapport au fil de trame souple.
- Tissage : Pour créer l'armure sergée, les fils de chaînes sont déroulés et un fil de trame est introduit entre eux avec un pas défini. À l'aide des machines de tissage, les fils de chaînes sont écartés et resserrés progressivement dans de grands peignes (**Figure 1.15**).



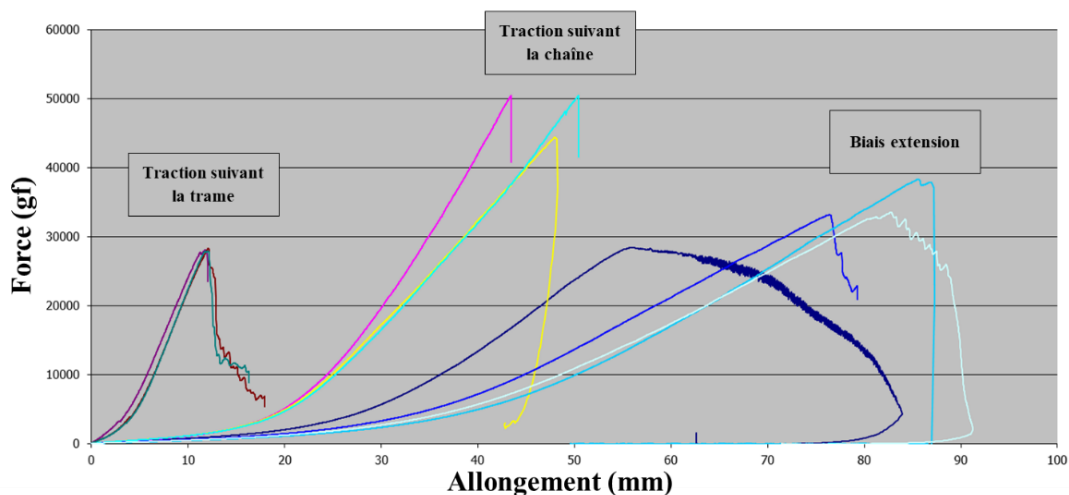
*Figure 1.15-Machine de tissage pour le denim.*

- Calandrage : Après la fabrication de l'armure, le tissu nécessite plusieurs passages entre deux cylindres chauffés pour ajuster sa perméabilité et améliorer son état de surface.
- Traitements et sablage : En dernier lieu, le *denim* peut recevoir des traitements supplémentaires pour améliorer ses propriétés (déperlant, imperméable, etc...). Ce sont, souvent, des traitements chimiques par bains ou pulvérisation. Par ailleurs, pour donner un aspect usé et blanchi au tissu, les fabricants recourent à un traitement de surface par sablage. Cela consiste à propulser des particules fines de silice à haute pression sur le tissu.

Dans notre cas de découpe, c'est cette présence de silice sur les fibres textiles qui participe à la dégradation rapide du pouvoir coupant de la lame.

### 1.3.4 Essai de caractérisation mécanique du « denim »

Le *denim* est un matériau anisotrope avec des propriétés différentes selon le sens de la chaîne ou la duite. Pour caractériser son comportement, il est nécessaire de conduire des essais de traction dans les deux directions des fils selon les normes (EN 14704-1) et (EN ISO 13934-1) (Figure 1.16).



**Figure 1.16**-Courbes de traction de denim.

Dans la plupart des tissus *denims*, le nombre de fils de chaîne est plus grand que celui de la trame. Dans cette étude, le tissu est composé par 16 fils de trame et 26 fils de chaîne, le tout compté sur une surface de  $1 \text{ cm}^2$ .

Le *biais extension* est un test de cisaillement à  $45^\circ$  par rapport au sens des fils de la chaîne. Il montre que le *denim* utilisé est plus sensible aux allongements dans cette direction combinée. Le tissage permet aux fibres textiles de glisser entre elles et rend l'armure sergée davantage mobile. Le



comportement de ce matériau n'est donc pas parfaitement élastique linéaire. À faible déformation, une première zone de la courbe correspond au comblement des jeux existants entre les fils de chaîne et de trame. L'allongement maximal dans cette première partie dépend de la direction de traction ainsi que du type d'armure.

La caractérisation mécanique textile est parfois difficile. En fait, il est rare de trouver un tissu aussi codifié qu'un matériau composite ou métallique. Toutefois, il existe des normes qui permettent de conduire des essais de caractérisation par des essais spécifiques, comme la norme (*ISO 13997*). L'utilisation de ces protocoles scientifiques reste très limitée car ils sont complexes à mettre en œuvre. Le tableau suivant (**Tableau 1.1**) montre les propriétés du tissu employé dans ces travaux.

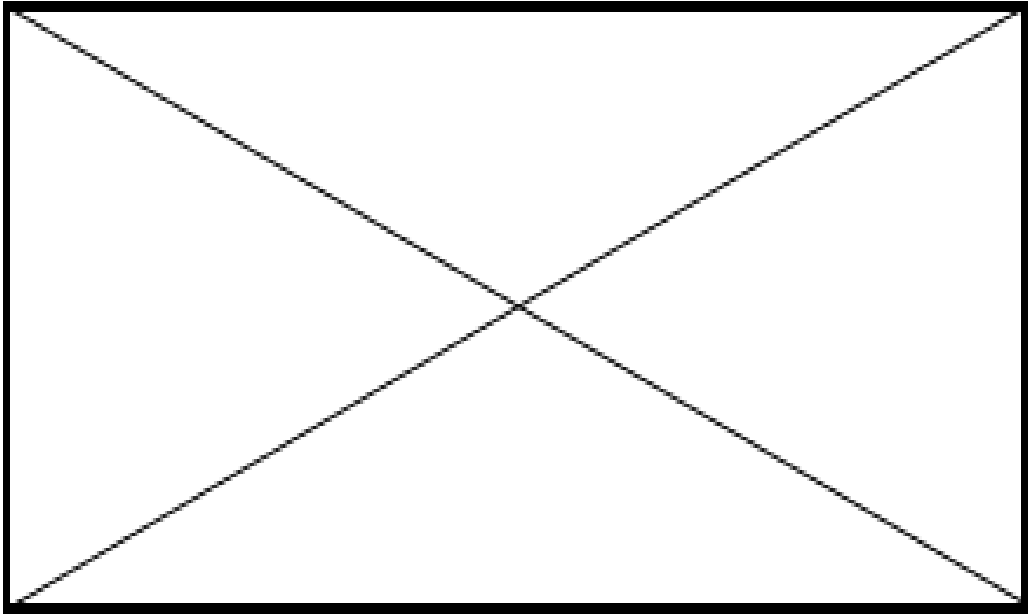
<b>Épaisseur</b>	0.8 mm
<b>Masse volumique</b>	$6.03 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$
<b>Masse linéique du fils de chaîne</b>	150 <i>Tex</i>
<b>Masse linéique du fils de trame</b>	100 <i>Tex</i>
<b>Résistance élastique suivant la chaîne</b>	880 <i>N</i>
<b>Résistance élastique suivant la trame</b>	390 <i>N</i>
<b>Module de cisaillement</b>	1470 <i>Nm</i>

*Tableau 1.1-Caractéristiques mécaniques du denim utilisé durant l'étude.*

Les propriétés physiques et les caractéristiques mécaniques du matériau textile influent sur le mode et le type de contact avec la lame vibrante durant la découpe. Différentes études montrent que la nature des fibres textiles et l'armure d'un tissu ont une influence sur le coefficient de frottement du matériau textile (*Ajayi 1992*). Ainsi, l'usure de la lame vibrante et son évolution durant la coupe sont conditionnées par les caractéristiques du tissu découpé.

#### **1.4 Usure abrasive des lames vibrantes**

L'état de surface des lames de coupe évolue au cours de la découpe du textile. Elles perdent leurs propriétés d'usage durant la découpe et induisent des défauts de qualité inacceptables pour les pièces coupées. Il est ainsi nécessaire de régénérer la surface de coupe et le fil tranchant par rapport à son état fonctionnel initial. Pour ce faire, une procédure d'affûtage est primordiale pendant toute la durée de service d'une lame. La figure ci-dessous illustre l'état du fil tranchant d'une lame affûtée (**Figure 1.17-a**) et un fil tranchant usé (**Figure 1.17-b**) après découpe du tissu *denim*.



**Figure 1.17-**(a) Fil tranchant d'une lame affûtée ; (b) Fil tranchant d'une lame usée (données confidentielles supprimées).

*(Données confidentielles supprimées).*

Dans ces conditions, l'opération d'affûtage des lames de coupe devient délicate. On parlera de l'aptitude à l'affûtage d'un matériau qui est un paramètre primordial pour la rectification des surfaces de coupe opérationnelles.

### **1.5 Les aciers rapides supérieurs frittés**

Actuellement, les aciers rapides (ARS - Aciers Rapides Supérieurs ou HSS - High Speed Steels) frittés sont utilisés dans les ateliers de découpe textile. Leur nom fait référence à leur utilisation pour la fabrication d'outils de coupe de dureté et résilience élevées permettant un accroissement des vitesses de coupe.

Pour les lames de coupe, les aciers rapides supérieurs présentent un intérêt tout particulier par les duretés obtenues après trempe et revenu qui avoisinent 60 à 65 HRC et leur résistance à l'usure due à l'importance des carbures. Leur dureté, la nature et la dimension des carbures leur procurent une meilleure résistance à l'usure. Par conséquent, l'affûtage de ces aciers qui demeure un point clé pour leur développement, est largement dépendant de leurs propriétés microstructurales.

Des résultats obtenus récemment mettent en évidence l'importance de la vitesse de refroidissement et du temps de maintien au revenu pour la formation des carbures primaires et secondaires ainsi que leurs formes et densités (*Ben fredj 2009*). La maîtrise des traitements thermiques appliqués aux lames est donc essentielle pour améliorer la résistance à l'usure des outils obtenus.

Dans la suite de ce chapitre, l'affûtage sera étudié pour des lames fabriquées à partir de trois matériaux différents : un acier rapide conventionnel M2 et deux aciers frittés ASP2053 et ASP2055. Ces trois nuances ont été choisies pour étudier l'influence des différentes caractéristiques mécaniques et microstructurales (la microstructure, la densité des carbures et la microdureté) du matériau sur l'affûtage des lames.

## 1.6 Nuance HSS pour les lames de coupe

La compréhension des mécanismes de dégradation des lames de coupe passe par la connaissance des matériaux d'étude. L'analyse microstructurale d'un outil de coupe usé s'accompagne des connaissances des compositions chimiques et des traitements thermiques des nuances d'aciers choisies.

Cette thèse s'intéresse à trois nuances d'aciers à outils :

- ASP2053 (HS 4-3-8) : C'est un acier au vanadium produit par métallurgie des poudres avec une excellente résistance à l'abrasion.
- ASP2055 (HS 6-4-3) : C'est une nuance d'acier rapide très alliée produite par métallurgie des poudres qui présente une structure de carbures plus fins pour le travail à froid.
- M2 (HS 6-5-2) : C'est un acier rapide moyennement allié largement utilisé dans le domaine des outils de coupe et offrant une bonne usinabilité et de bonnes performances dans de nombreuses applications.

### 1.6.1 Composition chimique

Les plages de composition des aciers rapides sont différentes, selon leurs utilisations et les applications pour lesquelles ils sont prévus. Les nuances d'acier HSS contiennent des éléments d'additions en teneur importante comme le vanadium V, le molybdène Mo, le chrome Cr et le tungstène W. D'autres éléments peuvent exister en faibles pourcentages tels que le silicium Si, le cobalt Co et l'aluminium Al.

L'acier rapide supérieur ASP2053, EN-GJL-200 (désignation normalisée) ou HS 438 (norme européenne) est un alliage de fer et de carbone (2.4 % de carbone) possédant des éléments d'addition en teneur importante tel que le vanadium 8%, le chrome 4.2% et le tungstène 4.2%. L'addition du vanadium engendre une production des carbures primaires de vanadium du type VC. La teneur importante de vanadium dans le matériau augmente le taux de martensite dans la matrice à cause de l'appauvrissement du carbone par la formation des carbures VC. Par conséquent, la fraction volumique d'austénite diminue avec l'augmentation de la teneur en vanadium. Les compositions chimiques de l'acier rapide M2 et des deux aciers rapides supérieurs frittés sont présentées dans le **Tableau 1.2**.

	C(%)	Cr(%)	Mo(%)	W(%)	Co(%)	V(%)	Nb(%)
<b>M2 (HS 6-5-2)</b>	0.90	4.2	5.0	6.4	-	1.8	-
<b>ASP2053 (HS 4-3-8)</b>	2.48	4.2	3.1	4.2	-	8.0	-
<b>ASP2055 (HS 6-4-3)</b>	1.69	4.0	4.6	6.3	9.0	3.2	2.1

**Tableau 1.2-**Compositions chimiques des nuances d'aciers ASP2053, ASP2055 et M2.

Les éléments d'additions tels que le vanadium génèrent des carbures très durs qui favorisent la résistance à l'usure par abrasion de l'acier obtenu. La présence du vanadium avec d'autres éléments d'additions comme le molybdène et le tungstène contribue à améliorer la résistance du matériau à l'oxydation au-delà de 600°C.

Le tungstène et le molybdène se caractérisent par une tolérance aux variations de température, ce qui contribue à élever le point de fusion du matériau. Ils confèrent à l'acier une très bonne résistance à l'usure abrasive surtout à chaud et une meilleure ductilité.

Le chrome permet d'augmenter la trempabilité de l'acier et retarde les effets d'adoucissement lors des revenus. Il s'oppose au grossissement des grains dans la microstructure lors de l'austénitisation. Il participe donc à améliorer la résistance à l'abrasion de l'acier.

Le molybdène, le vanadium, le tungstène sont des éléments d'alliage usuels utilisés pour permettre un bon durcissement de la matrice martensitique et générer des carbures. L'influence des traitements thermiques sur la formation et la précipitation des différents carbures de ces alliages sera détaillée dans la section suivante.

### 1.6.2 Traitements thermiques

Ce sont les traitements thermiques qui engendrent la microstructure finale de l'acier et par conséquent ses propriétés mécaniques.

#### a. Recuit

Après fusion et refroidissement, l'acier reçoit un traitement thermique dit « *recuit* ». Durant la solidification, le matériau génère des tensions mécaniques internes qui lui confèrent une dureté importante. Cependant, l'acier devient très peu résilient à cause de la formation de précipités dont la taille et la densité ne sont pas maîtrisées.

Le recuit permet de relâcher les tensions au sein de la microstructure du matériau et vise à répartir uniformément les carbures eutectiques précipités lors de la solidification. Cette microstructure confère

à l'acier une dureté très faible (Lévêque 2013). En effet, le recuit est considéré comme une « remise à zéro » de la microstructure du matériau et de ses propriétés mécaniques.

Pour les trois nuances utilisées dans cette étude, le recuit se fait entre 850 °C et 900 °C dans un milieu contrôlé pendant une durée de trois heures, suivi d'un refroidissement lent (10 °C/h) jusqu'à 700 °C et enfin un refroidissement à l'air libre. Ensuite, le matériau subit un autre recuit appelé « recuit de dimensionnement » à 600-700 °C pendant environ deux heures, suivi par un refroidissement lent jusqu'à 500 °C. Les duretés Brinell après recuit sont typiquement de 250 HB pour l'acier M2 et entre 300-320 HB pour les nuances d'acier ASP2053 et ASP2055 produites par métallurgie des poudres.

### b. Austénitisation et trempe

L'objectif est d'obtenir une structure homogène austénitique afin de la transformer durant la trempe en martensite. Les conditions de trempe doivent permettre un refroidissement rapide de l'outil à la température ambiante pour garantir une transformation complète en martensite et ainsi minimiser les transformations de l'austénite en produits d'équilibre (ferrite, perlite) (Mebarki 2003). La matrice austénitique est transformée partiellement en martensite, après trempe, et une fraction d'austénite résiduelle peut rester dans la microstructure de l'acier.

Pour les trois nuances d'acier choisies (Tableau 1.2), le passage d'une structure de recuit à une structure totalement austénitique se fait en deux paliers à 450-500 °C et 850-900 °C, Figure 1.18. L'austénitisation se fait en portant l'acier M2 (HS 6-5-2) aux alentours de 1220°C. Pour les nuances ASP2053 (HS 4-3-8) et ASP2055 (HS 6-4-3) l'austénitisation se fait entre 1050 °C et 1180 °C.

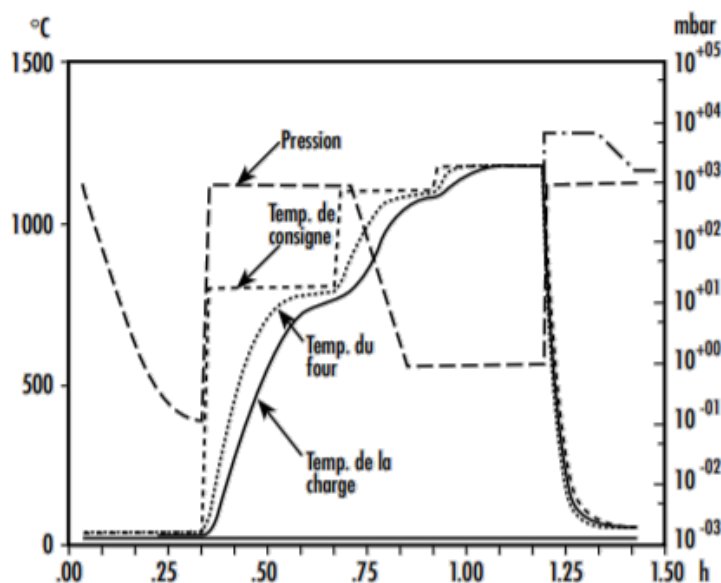


Figure 1.18-Cycle type de température pour un trempe en four sous vide de la nuance d'acier rapide M2 (HS 6-5-2) (Erasteel).

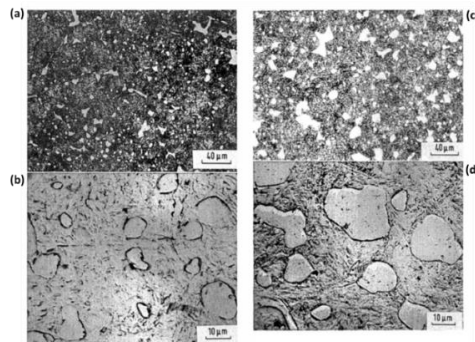
### c. Revenu

Généralement, le choix de la dureté finale de la lame se fait en fonction de la température de revenu. Les aciers à outils subissent une série de traitements de revenu, le premier a pour but de diminuer les contraintes résiduelles en formant des précipités de carbone par diffusion (*appelés carbures secondaires*) et adoucir la martensite dans la matrice (*Lévêque 2013*). Pendant les autres revenus, les carbures changent de morphologie et de taille. L'augmentation de la taille des carbures dépend de la température de revenu et du temps de maintien, ce qui influence les propriétés mécaniques résultantes de l'acier et donc la dureté finale.

Pour les aciers rapides supérieurs frittés ASP2053 (HS 4-3-8) et ASP2055 (HS 6-4-3) la température de revenu est comprise entre 500 °C et 600 °C pendant environ 1h pour obtenir une dureté égale à 64 HRC.

#### 1.6.3 Microstructures typiques des aciers rapides

Les différents traitements thermiques influent sur la structure métallurgique finale des aciers rapides. La microstructure finale est constituée d'une matrice martensitique de revenu sous forme de lattes autour des carbures primaire et secondaire. La **Figure 1.19** montre deux structures métallurgiques différentes des aciers rapides. La matrice de l'acier rapide fritté contient des carbures plus petits que l'acier rapide conventionnel. Bien que les carbures renforcent la matrice des aciers rapides conventionnels, ils posent des problèmes d'affûtage de cette nuance. En effet, ces carbures agissent comme une barrière pour interrompre le mouvement des particules abrasives lors de leur contact avec le matériau (*Shaikh 2013*).



**Figure 1.19-(a et b)** Microstructure d'un acier rapide supérieur fritté T15 après un revenu à 550°C; **(c et d)** Microstructure de l'acier rapide conventionnel M2 après un revenu à 530°C (*Shaikh 2013*).

Globalement, les carbures contribuent aux propriétés des HSS. Ils favorisent le durcissement de la structure. La dureté des carbures est nettement plus élevée que la matrice. Ces derniers protègent l'acier contre les dégradations liées à l'usure. Ainsi, ils participent à l'augmentation de la limite

d'élasticité. Leur présence dans la matrice présente néanmoins des inconvénients car l'aptitude à l'affûtage ou à la rectification de cette nuance d'acier est inversement proportionnelle à la résistance à l'usure.

## 1.7 Aptitude à l'affûtage des lames de coupe

### 1.7.1 Définition

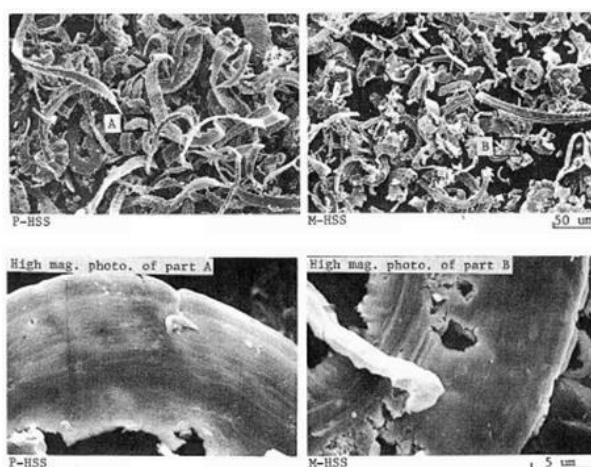
L'aptitude à l'affûtage est le terme utilisé pour désigner la facilité d'une nuance de matériau à être rectifiée (*Badger 2007*). Pour les aciers rapides supérieurs, ce terme désigne l'influence des propriétés de l'acier sur les conditions de coupe des abrasifs utilisés.

Plusieurs études montrent que le pourcentage de carbures de vanadium est un facteur dominant qui affecte l'aptitude à la rectification des aciers HSS (*Kozo et al 1982; Tanguy 1985*). La sensibilité d'un matériau donné aux changements thermiques et structuraux ainsi que le phénomène de surchauffe peuvent influencer le résultat final de l'affûtage (*Lévêque 2004*).

Généralement l'étude de l'affûtage ou l'aptitude à la rectification permet pour une nuance d'acier donnée de choisir le type de bandes abrasives (taille des grains, type de minéral et structure de support...) et les conditions d'affûtage convenables en adéquation avec l'ensemble des contraintes liées au milieu d'usinage (machine de coupe, matériau textile...).

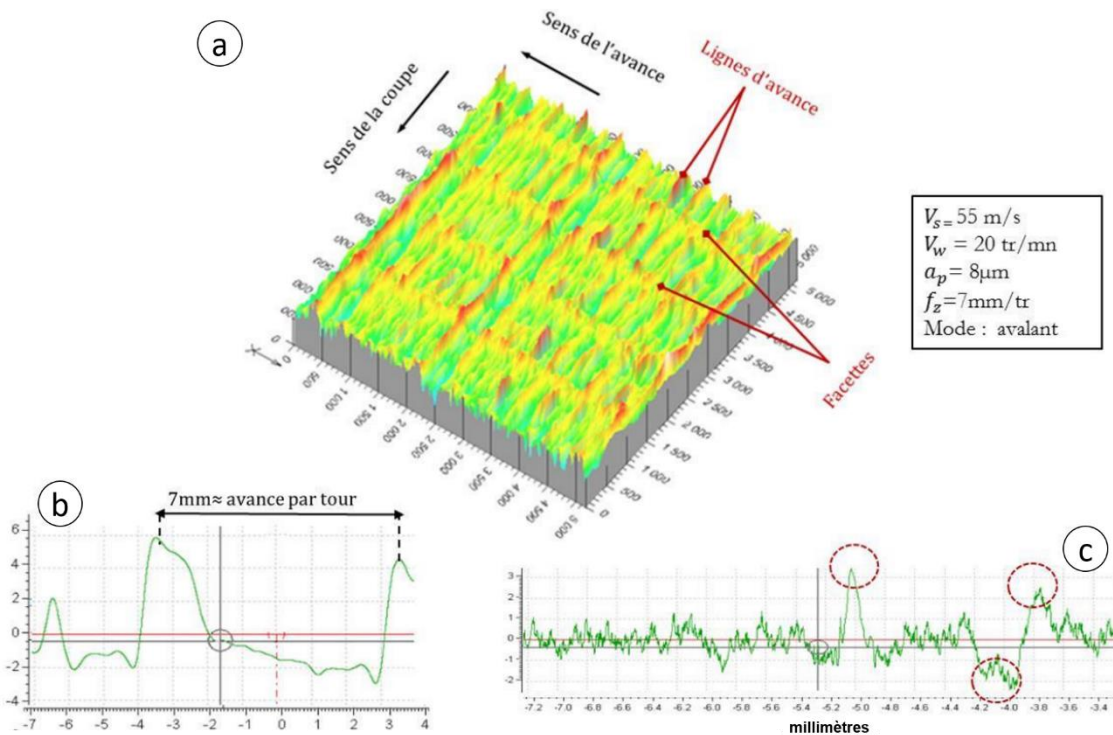
### 1.7.2 Paramètres d'étude de l'affûtage

Plusieurs indicateurs sont utilisés et souvent rapportés dans la littérature pour l'étude de l'affûtage et la rectification d'un acier. L'aptitude à la rectification géométrique d'une lame de coupe peut être évaluée d'une manière globale par le rendu final de la qualité de surface affutée. D'autres grandeurs géométriques sont introduites par les chercheurs comme l'épaisseur maximale de copeaux (**Figure 1.20**) et la profondeur de pénétration des grains abrasifs dans le matériau (*Tanguy 1985*).



**Figure 1.20**-Morphologie des copeaux d'un acier HSS affuté (*Shetty et al. 1982*).

Par ailleurs, l'analyse qualitative, en microscopie numérique, de l'état de surface comme la rugosité arithmétique  $R_a$  ou la hauteur moyenne des éléments du profil  $R_c$  (**Figure 1.21**) constitue un indicateur de la qualité d'un affûtage. D'autres techniques sont introduites par les chercheurs comme la technique sclérométrique simplifiée (*Shetty et al. 1982*). Elle consiste à identifier, à l'échelle d'un grain, les mécanismes d'abrasion mis en jeu. La profondeur des sillons et les mécanismes d'enlèvement des carbures par un grain abrasif sont observés et contrôlés en utilisant un microscope électronique à balayage (*Prasad 1983*).



**Figure 1.21**-Illustration de la topographie d'une surface rectifiée : (a) topographie 3D ; (b,c) profils de rugosité (*Sallem 2014*).

L'aspect énergétique du procédé d'affûtage présente un indicateur fréquemment employé (*Murthy et al. 2000; Hamdi 2000*). Cet indicateur ne tient absolument pas compte de l'apparition des défauts de qualité de surface et de la sensibilité de l'acier à l'affûtage, par exemple l'apparition des bavures et des griffures.

L'ensemble de ces indicateurs permet de déterminer l'aptitude à l'affûtage des aciers HSS. Dans la littérature, il est souvent relaté que le pourcentage de carbure de vanadium est un facteur dominant affectant la qualité d'affûtage (*Kvasnicka 1975; Konig 1981; Jaworski 2009*). Ce sont des carbures plus durs que les gains abrasifs conventionnels, comme les carbures de silicium SiC où les oxydes d'aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dont la microdureté ne dépasse pas 3500 HK (*Tarasov 1951*). D'autres études



montrent que la taille des carbures, la teneur en alliage dans l'acier rapide et la méthode d'élaboration influent beaucoup sur la qualité d'affûtage (*Badger 2007*). Les aciers élaborés par la technique de métallurgie des poudres sont beaucoup plus faciles à affûter car la taille des carbures dans la microstructure est plus petite.

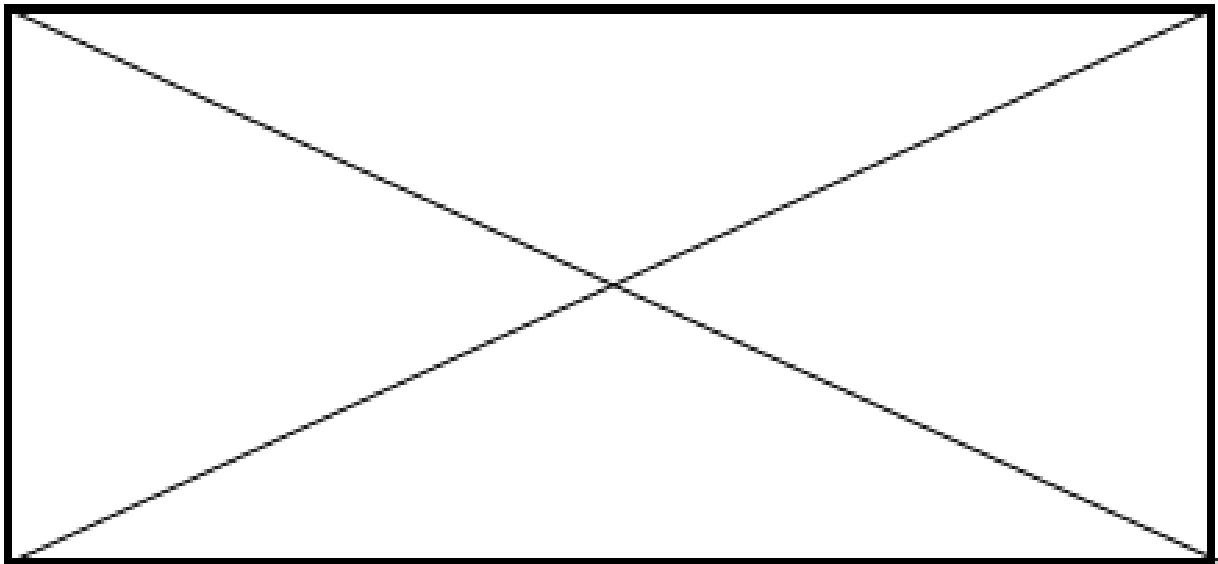
## 1.8 Affûtage des lames de coupe

L'usure des lames, les conditions de coupe et différents paramètres du processus engendrent l'apparition de défauts sur les pièces découpées. Afin de conserver le pouvoir coupant des lames, pour toute la durée de la découpe, plusieurs affûtages des surfaces de coupe sont nécessaires pour régénérer la géométrie et l'état de surface convenable à la coupe du matériau textile choisi.

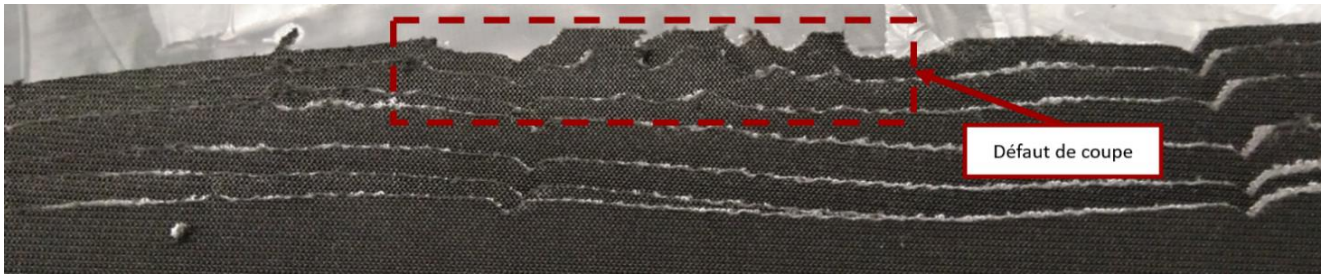
Des essais expérimentaux et des observations faites in situ par l'équipe du centre de recherche et de caractérisation de la société LECTRA montrent qu'une procédure d'affûtage mal faite, en utilisant des paramètres processus inadéquats, présente un éventuel risque de rebut des pièces découpées ainsi qu'une dégradation accélérée du pouvoir coupant de la lame.

D'autres phénomènes de dégradation liés à la microstructure de l'acier peuvent apparaître lors de l'affûtage. Notamment, les carbures très durs peuvent se fracturer sous l'action de l'effort presseur et constituer ainsi un autre corps abrasif provoquant des griffures et sillons profonds sur la lame.

*(Données confidentielles supprimées)*



*Figure 1.22-Défauts d'affûtage sur des lames en acier rapide fritté (données confidentielles supprimées).*

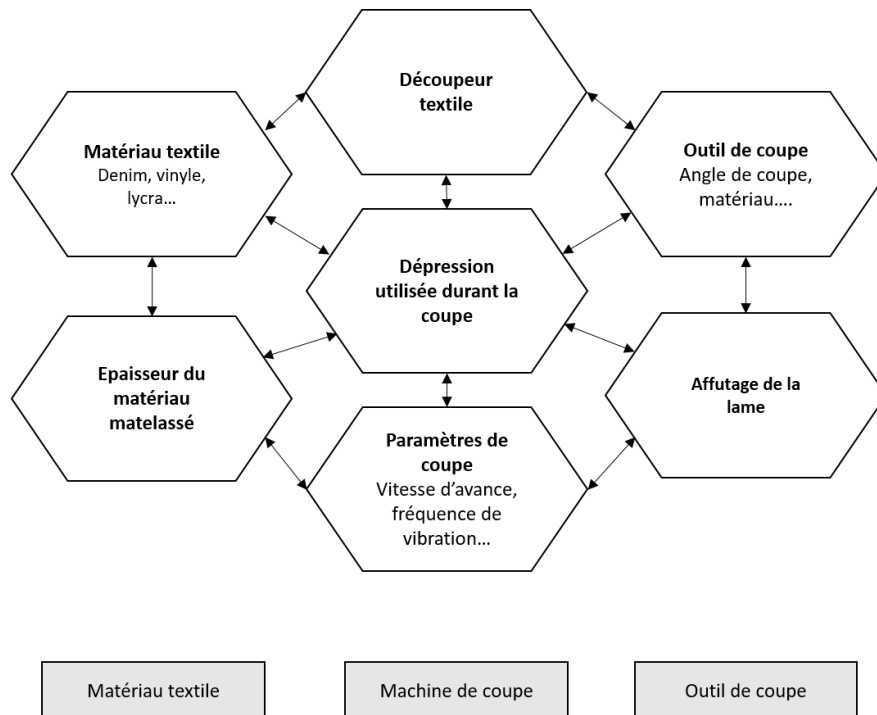


*Figure 1.23-Défaut de coupe sur un tissu (cas d'un défaut d'affûtage de bas de lame).*

L'aptitude à l'affûtage des lames et leur pouvoir coupant dépendent de plusieurs facteurs liés. Ce sont des propriétés qui se caractérisent par le couple outil usinant (bandes abrasives dans notre cas) – matériau usiné (lames de découpe) associé à la qualité géométrique du fil tranchant et des surfaces de coupe. Le choix des bandes abrasives, le type de minéral synthétique et la taille des grains déterminent les mécanismes d'enlèvement de matière.

### 1.9 Modélisation de la découpe des textiles et affûtage des lames vibrantes

D'après ce qui a été évoqué dans les paragraphes précédents, il existe plusieurs paramètres influents sur la qualité de découpe. Certains paramètres sont directement liés aux réglages de la machine comme les paramètres de coupe, d'autres sont liés à l'outil de coupe (caractéristiques mécaniques et paramètres d'affûtage utilisés). La **Figure 1.24** illustre les paramètres influents dans un environnement de découpe textile.



*Figure 1.24-Paramètres influents.*

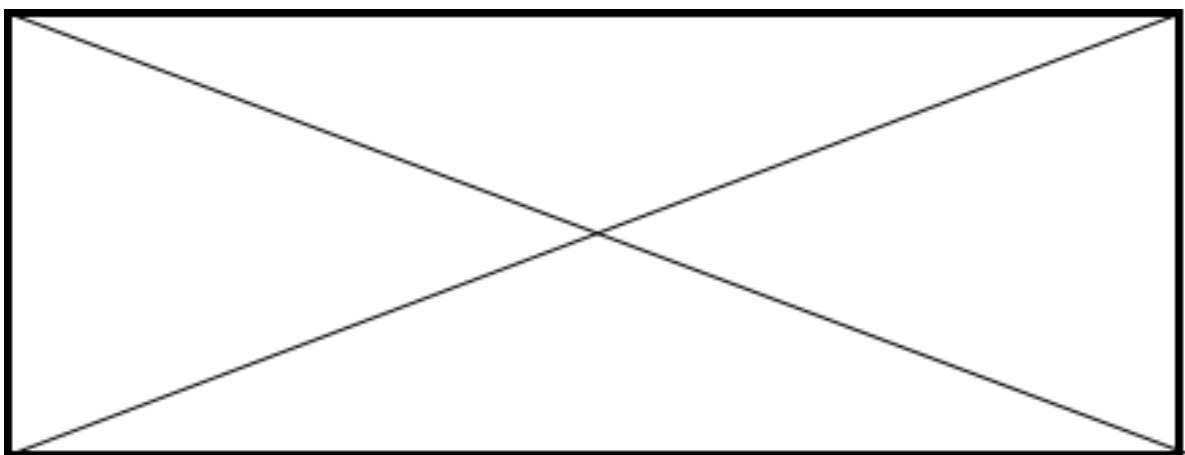
Peu de publications sont consacrées à l'étude de la découpe des matériaux textiles (Boz, 2010 ; Cosson-Coche 2017). Ainsi, les phénomènes mis en jeu sont aujourd'hui mal maîtrisés. Les études dans le domaine de la découpe textile se sont davantage focalisées sur la gestion de la coupe afin d'améliorer la productivité et la qualité des pièces finales (Wong 2003; Rissanen 2013). Différents travaux ont été réalisés afin d'étudier le comportement des tissus durant leur découpe et l'influence de leurs propriétés physiques (Blekac 1998; Wong 2004 ; Tunjo 2008) sur la qualité des pièces et la productivité, tandis que d'autres s'intéressent à l'étude de la rupture des fibres textiles (Shin 2008 ; Aimene 2007).

Il est alors primordial d'étudier le procédé de découpe en se focalisant sur les paramètres de coupe propres aux découpeurs industriels (la vitesse de coupe, la fréquence de vibration de la lame, l'affûtage de la lame, les propriétés de l'outil de coupe).

L'objectif est de proposer des paramètres de coupe et d'affûtage optimaux pour une application donnée. Il est nécessaire de comprendre l'impact des paramètres d'affûtage sur la géométrie de l'outil de coupe et leur influence sur les indicateurs de coupe.

L'étude de la performance de coupe, l'identification des modes et types d'usure de l'outil de coupe constituent un problème complexe, fortement couplé, faisant intervenir des aspects tribologique, métallurgique, mécanique ainsi que thermique. Les effets induits par le contact permanent avec le matériau textile sont multiples. Leur étude repose sur l'analyse de différentes sollicitations locales auquel est soumis le fil tranchant de la lame durant la coupe. Ces observations ont pour vocation d'orienter les travaux selon deux axes principaux de recherches : (données confidentielles supprimées)

La démarche globale suivie au cours de cette étude peut se résumer comme suit (**Figure 1.25**).



**Figure 1.25**-Démarche globale du projet (données confidentielles supprimées).

## **1.10 Conclusion**

Dans ce chapitre bibliographique, des notions de base concernant la découpe textile et l'affûtage de la lame coupante sont détaillées. Un état de l'art concernant les matériaux textiles et leurs caractéristiques physiques et mécaniques est présenté. Ensuite, des notions de base nécessaires à la compréhension de la procédure de découpe par une lame vibrante et la structure d'une machine de découpe industrielle sont définies. Elles sont suivies d'une présentation de l'état de l'art concernant l'impact de l'affûtage de la lame sur la qualité des pièces découpées.

Les recherches ont montré que l'aptitude de rectification des outils de coupe est influencée par l'état mécanique, géométrique de la lame et microstructurale de son matériau. Pour cette raison, l'un des objectifs de cette thèse, traitant de l'affûtage des lames de coupe vibrantes, est la quantification de ces relations de manières phénoménologiques. Pour ce faire une démarche expérimentale est mise en place et détaillée dans le chapitre suivant.



## Étude de l'affûtage de la lame de découpe

“L’ouvrier qui veut bien faire son travail doit commencer par aiguiser ses instruments.”

- Confucius

Cette partie vise à comprendre le comportement de l'affûtage d'un matériau présentant une microstructure aussi particulière que celle de l'acier HSS utilisé pour les lames de coupe. La première section passera en revue les paramètres caractéristiques de l'affûtage, le dispositif mis en place, le matériau étudié et la procédure expérimentale. Les résultats expérimentaux qualitatifs et quantitatifs seront détaillés et analysés. L'influence des différents facteurs (nature et forme du grain, charge appliquée, etc.) sur les mécanismes d'enlèvement de matière et la topographie de la lame affûtée sera étudiée. Cette partie amène enfin à l'identification et au choix de l'abrasif et des paramètres d'affûtage retenus pour la suite de l'étude.



## SOMMAIRE

2.1	État de l'art .....	37
2.1.1	Affûtage : généralités .....	37
2.1.2	Grains abrasifs .....	38
2.1.3	Outils abrasifs : les différentes technologies existantes .....	40
2.1.4	Géométrie des lames coupantes .....	43
2.2	Préambule : conditions industrielles.....	44
2.2.1	Définition du système d'affûtage .....	45
2.2.2	Paramètres caractéristiques de l'affûtage des lames de coupe à tranchant unique .....	47
2.3	Protocole expérimental.....	47
2.3.1	Pièces d'essais .....	47
2.3.2	Conditions d'essais.....	49
2.3.3	Planification de la campagne d'essais : choix du plan d'expériences.....	49
2.3.4	Mesures de la géométrie des lames de coupe.....	51
2.4	Analyses et interprétations de la topographie de la surface affutée .....	52
2.4.1	Défauts macroscopiques et microscopiques de l'affûtage .....	52
2.4.2	Étude de l'influence des paramètres d'affûtage et de leurs interactions .....	53
2.5	Étude de l'effort d'affûtage .....	58
2.5.1	Dispositif expérimental .....	58
2.5.2	Cycle d'affûtage et principe de mesure.....	60
2.5.3	Détermination des facteurs influents .....	61
2.6	Analyses de la corrélation .....	62
2.6.1	Démarche statistique .....	62
2.6.2	Résultats des analyses statistiques.....	65
2.7	Étude de l'influence du temps d'affûtage.....	66
2.7.1	Détermination des facteurs influents .....	66
2.7.2	Microdureté de la lame de coupe .....	66
2.8	Étude de l'influence de l'usure des bandes abrasives .....	67
2.8.1	Étude de l'influence des effets purs .....	68
2.8.2	Apparition du fil retourné.....	68
2.9	Conclusion.....	70





## 2.1 État de l'art

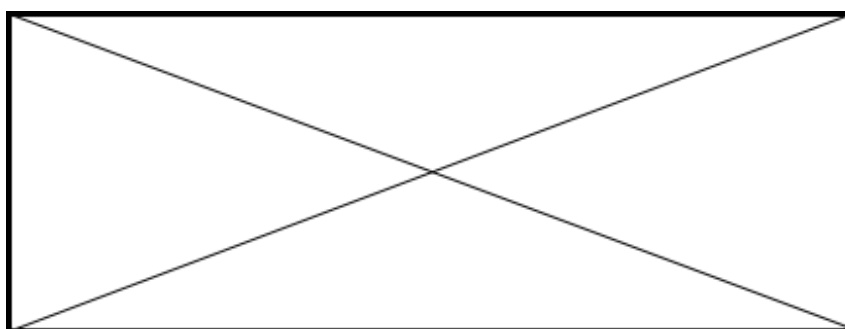
### 2.1.1 Affûtage : généralités

L'affûtage est un procédé d'usinage d'enlèvement de matière par abrasion entre deux surfaces dont l'une est composée d'aspérités dures (Ligier 2004; Norton 1963). L'affûtage est employé, généralement, sur des matériaux durs pour améliorer la qualité de surface de la partie coupante d'une pièce.



**Figure 2.1-**Machines universelles d'affûtage pour des outils de coupe.

Les affuteurs industriels (**Figure 2.1**) sont de types très différents en fonction de l'outil de coupe à affûter (couteau, fraise, foret, ...). Dans le cas de découpe des matériaux textiles, l'outil à affûter est une lame lisse (cf. **Figure 1.2** du chapitre 1). La procédure d'affûtage est utilisée pour rectifier la géométrie initiale de la lame ou après usure de celle-ci. En contrepartie, à chaque affûtage, la largeur de la lame diminue (**Figure 2.2**). **Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.**



**Figure 2.2-**Différentes étapes d'évolution du tranchant d'une lame de coupe: (1) tranchant initial ; (2) tranchant émoussé et usé ; (3) tranchant après affûtage en trait pointillé (données confidentielles supprimées).

L'affûtage des outils de coupe implique l'enlèvement d'une petite quantité d'acier pour ramener le fil tranchant à son état initial ou, éventuellement, lui redonner volontairement un nouvel angle. Plusieurs types et formes d'abrasifs agglomérés (meules compactes, meules d'ébarbage, bandes souples,

etc..) sont utilisés pour effectuer l'opération d'affûtage (**Figure 2.3**). Le choix de la composition de l'agglomérant dépend de la nature du travail à réaliser : environnement de travail, caractéristiques thermomécaniques du matériau usiné, géométrie de la pièce et état de surface souhaités, etc. Les abaques fournis par les fabricants permettent une utilisation optimale de l'outil abrasif choisi en fonction du type du minéral abrasif et de sa résistance mécanique, de la capacité d'accrochage et du clivage des grains abrasifs ainsi que du grammage optimal des particules abrasives.



*Figure 2.3-Outils abrasifs et leur utilisation (source Norton, 3M, VSM).*

De manière générale, l'opérateur doit généralement réaliser des essais expérimentaux pour identifier l'abrasif permettant d'obtenir la qualité de surface recherchée, la vitesse de coupe ou la vitesse de défilement du support abrasif optimale en fonction de la pièce usinée.

### 2.1.2 Grains abrasifs

À l'état naturel, les grains abrasifs sont des minéraux ou des roches d'une dureté élevée traités pour générer de petites particules abrasives. Les grains naturels comme l'Emery, le Granet ou le Quartz ont cédé leur place aux abrasifs industriels plus performants comme le carbure de silicium, l'oxyde d'aluminium et le zirconium. Ces derniers ont des caractéristiques plus homogènes et des propriétés stables dans le temps, notamment leur dureté. En 1812, Friedrich Mohs a entrepris des travaux majeurs en minéralogie pour établir une classification des minéraux. Il a utilisé les propriétés physiques de ces minéraux (poids spécifique, dureté et fragilité) pour les classer selon une échelle, appelée l'échelle de Mohs (*Poirot 2004*).

Cette échelle se présente sous la forme d'un classement croissant de dix minéraux suivant leur dureté. Un nombre entier entre 1 et 10 est attribué aux matériaux (**Tableau 2.1**), le talc est le plus friable

(indice 1) et le plus dur est le diamant. Depuis, d'autres indicateurs (dureté VICKERS, BRINELL et ROCKWELL) ont été ajoutés à ce tableau. Les indices de l'oxyde d'aluminium et du carbure de silicium sont respectivement égaux à 9 et 9.5.

Minéral	Indice de dureté MOHS	Comportement de matériau
Talc	1	Friable sous l'ongle
Gypse	2	Rayable avec l'ongle
Calcite	3	Rayable avec le cuivre
Fluorite	4	Rayable facilement au couteau
Apatite	5	Rayable au couteau
Orthose	6	Rayable à la lime
Quartz	7	Raye le verre
Topaze	8	Rayable au carbure de tungstène
Corindon	9	Rayable au carbure de silicium
Diamant	10	Rayable avec un autre diamant

*Tableau 2.1-Classement des minéraux établi par Friedrich MOHS.*

Généralement un outil abrasif est composé de particules minérales homogènes en taille et de même nature. Il existe une classification granulométrique, mise en place par la FEPA « Fédération Européenne des Producteurs d'Abrasifs » (FEPA 1955), en fonction de la taille moyenne des grains abrasifs (Tableau 2.2).

Indice	Diamètre moyen (µm)	Indice	Diamètre moyen (µm)
P12	1815	P240	58,5
P16	1324	P320	46,2
P20	1000	P400	35
P24	764	P500	30,2
P30	642	P600	25,8
P36	538	P800	21,8
P40	425	P1000	18,3

*Tableau 2.2-Classification par taille des grains (FEPA).*

Le terme « granulométrie » est utilisé pour décrire, du point de vue qualitatif, la taille moyenne des grains par pouce linéaire du tamis. La méthode du tamisage est utilisée pour séparer les grains en tailles normalisées entre l'indice P12 et P220. Pour un indice supérieur ou égale à P240, les abrasifs sont classés par tailles avec la méthode de sédimentation (technique hydraulique). La forme des particules abrasives est quelconque avec des facettes de coupe variées et aléatoires. Cependant pour fabriquer une géométrie de grains répétitifs, des industriels ont élaboré des procédures de fabrication des bandes abrasives avec des agrégats de grains de même géométrie. Les différentes bandes abrasives seront présentées dans le paragraphe suivant.

### **2.1.3 Outils abrasifs : les différentes technologies existantes**

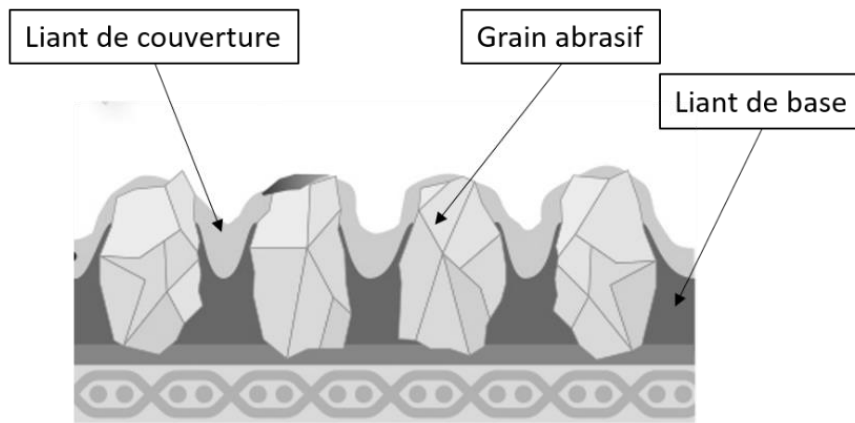
Les outils abrasifs sont composés d'un mélange de particules abrasives et d'un liant organique, minéral ou métallique. Les grains sont répartis régulièrement sur un support rigide ou semi-rigide.

Pour fabriquer un outil abrasif, le mélange d'éléments abrasifs et de liant est cuit à une température élevée, c'est la procédure de vitrification. La cuisson des liants minéraux se fait à une température comprise entre 900°C et 1300°C. D'autres liants tels que les résines synthétiques polymérisent à une température égale à 180°C.

Les abrasifs les plus durs sont les diamants et le nitrure de bore cubique (cBN). Le choix du matériau abrasif et de son support découle d'un compromis entre légèreté, rigidité et facilité de mise en forme.

#### **a. Les abrasifs conventionnels**

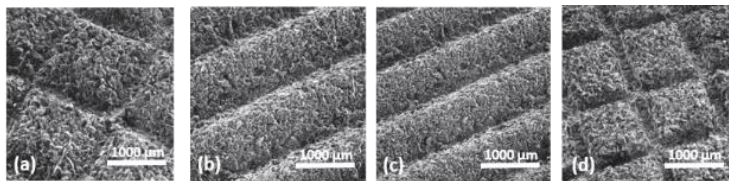
L'abrasif appliqué ou conventionnel est le plus utilisé par l'industrie. Il est constitué d'un support souple et d'une couche d'éléments abrasifs de même granulométrie. L'abrasif est solidement relié au support avec de la résine pour conserver sa durabilité en cas de température ou de pression élevées (**Figure 2.4**). Le support peut être du papier d'un grammage compris entre 70 et 300 g/m<sup>2</sup> ou une toile, entre autres en coton ou en polystyrène. Les supports en textile sont plus solides que ceux en papier. Ils ont une résistance accrue à la déchirure et à l'échauffement car ils supportent mieux les efforts de torsion et de flexion. Les supports en papier sont généralement imprégnés de latex pour obtenir une meilleure résistance à l'eau.



**Figure 2.4-**Organisation structurelle d'un abrasif appliqué (Source VSM).

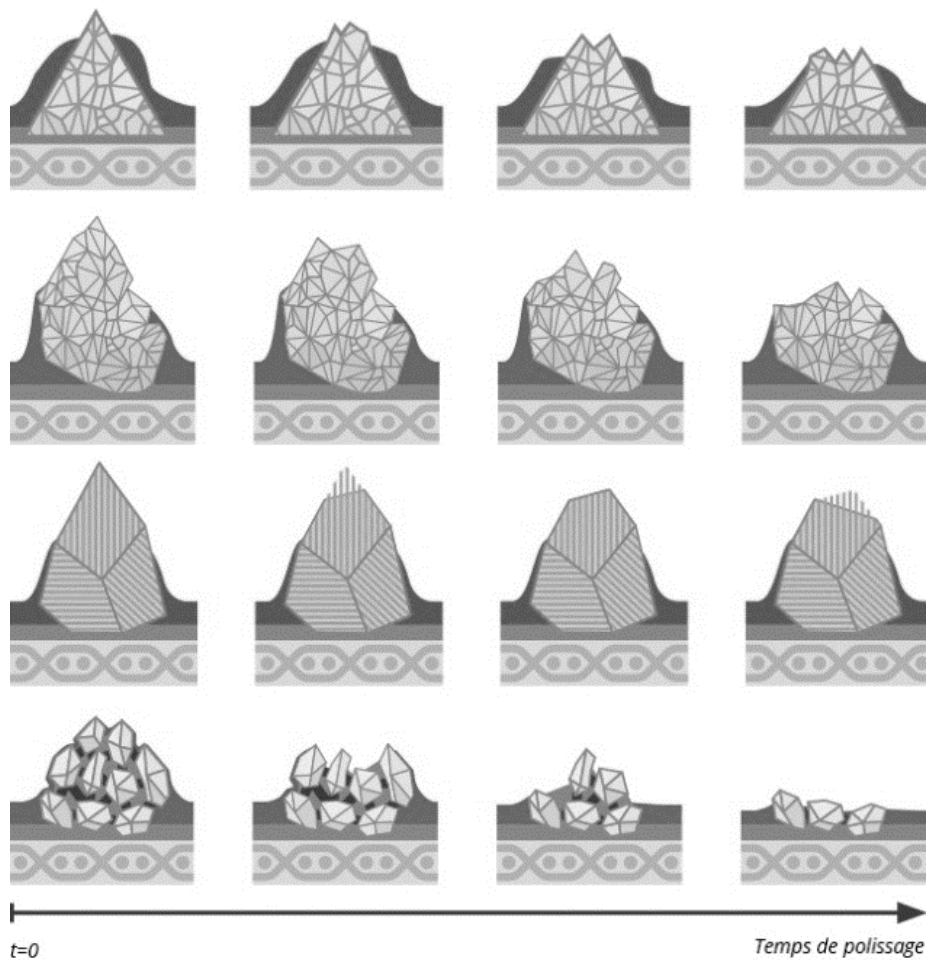
### b. Les abrasifs structurés

La technologie des grains structurés date de la fin des années 90 et vise à fabriquer des agrégats de grain répétitifs sur un support souple (**Figure 2.5**). Il existe trois géométries d'abrasifs structurés (pyramidale, parallélépipédique et tri-hélicoïdale). La structure cristalline extrêmement fine des grains permet d'obtenir un auto-affûtage (clivage) optimisé, qui s'explique par un fractionnement des grains abrasifs usés qui laissent la place aux nouvelles arêtes vives.



**Figure 2.5-**Organisation des abrasifs structurés : (a) structure pyramidale ; (b) structure tri-hélicoïdale ; (c) structure tri-hélicoïdale fine ; (d) structure parallélépipédique.

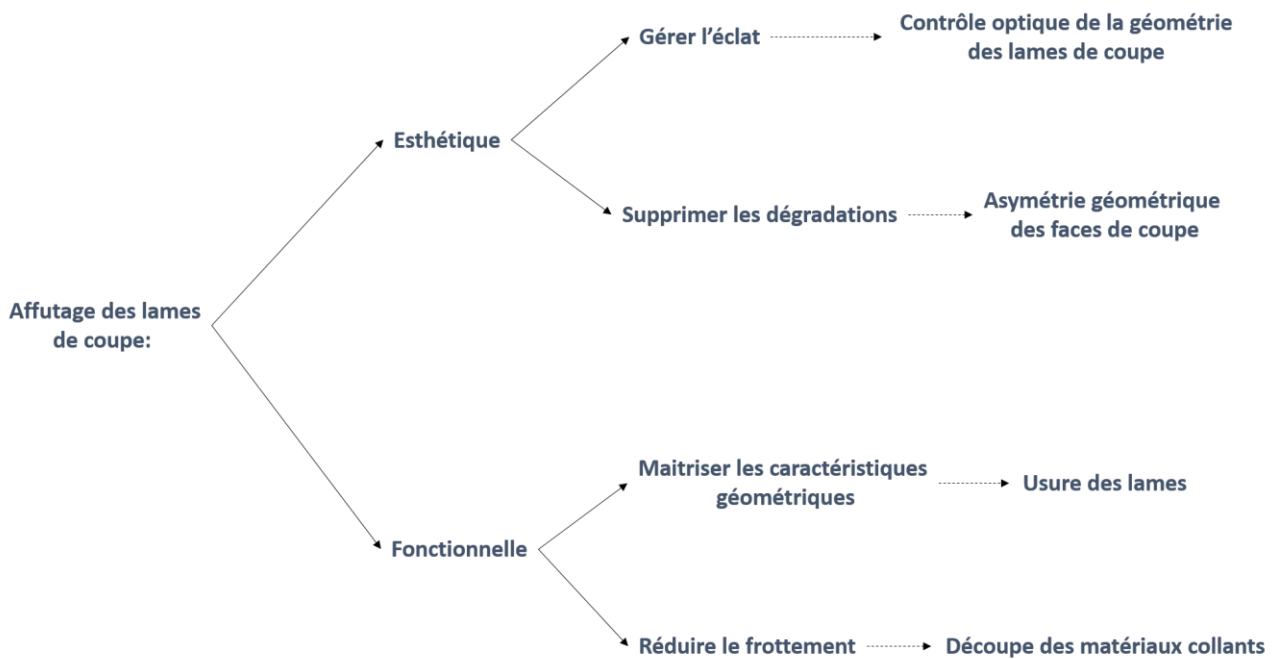
La structure des bandes offre une souplesse au support, tout en garantissant une meilleure qualité de surface et une quantité d'abrasifs plus élevée qu'avec des abrasifs appliqués. En effet, les abrasifs structurés sont composés de plusieurs grappes de grains compacts. Les grains émoussés se détachent sous l'action des forces de coupe et laissent place aux grappes de grains sous-jacentes (**Figure 2.6**).



**Figure 2.6**-Concept d'auto-affûtage des grappes de grains (Source VSM).

Il existe plusieurs manières d'associer les grains entre eux. Deux modes se distinguent. Le premier concerne les abrasifs conventionnels qui se caractérisent par une liaison rigide entre les grains et une répartition aléatoire des particules abrasives sur le support de l'outil abrasif. La deuxième structure « abrasif structuré » se caractérise par une certaine souplesse dans la liaison entre les grains abrasifs. Elle permet de corriger la géométrie de la lame usée avec des résultats répétables d'affûtage.

Dans ce travail, nous allons comparer la qualité d'affûtage des lames de coupe en utilisant deux structures abrasives (bandes abrasives conventionnelles et structurées). Ce choix permet de produire une qualité d'affûtage homogène sur toute la surface (*Motorcu 2010; Brosse 2009*). Leurs propriétés permettent de maîtriser leur pouvoir coupant et elles assurent une productivité optimale (*Hokkirigawa 1988*). La variété de type et de taille d'éléments abrasifs permet de répondre à plusieurs situations et différentes géométries de surface (**Figure 2.7**).



*Figure 2.7-Synthèse des applications d'affûtage des lames de coupe.*

#### 2.1.4 Géométrie des lames coupantes

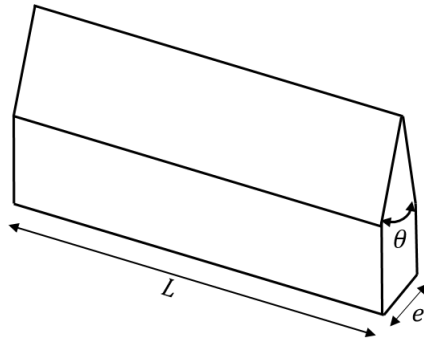
Dans le contexte de l'étude, l'outil coupant utilisé est une lame lisse de 30 cm de long. L'angle de coupe  $\theta$  correspond à l'angle qui forme la pointe de l'outil (**Figure 2.8**). Pour un outil à tranchant unique, l'angle de coupe conditionne la coupe et la résistance de l'outil. Il doit être minimisé sans fragiliser la pointe de l'outil. En effet, la valeur idéale de l'angle est le résultat d'un compromis entre la tenue dans le temps du tranchant et le pouvoir coupant. Cette valeur varie donc en fonction de l'utilisation des lames de découpe et des caractéristiques du matériau découpé. Les lames de coupe pour le textile présentent des angles de tranchant relativement faibles (environ 30°). Cependant, il est très pratique de disposer d'une gamme d'outils similaires mais dont la géométrie du tranchant diffère (*Annexe A.3*). Chaque lame est alors optimisée pour son usage.

Les géométries des lames, utilisées dans cette étude, sont données dans le **Tableau 2.3**.

	Longueur de la lame (mm)	Épaisseur de la lame $e$ (mm)	Largeur de la lame $L$ (mm)	Angle de coupe $\theta$ (°)	
<b>Lame de coupe</b>	365	2.4	8.5	25	30

*Tableau 2.3-Dimensions des lames utilisées dans cette étude.*

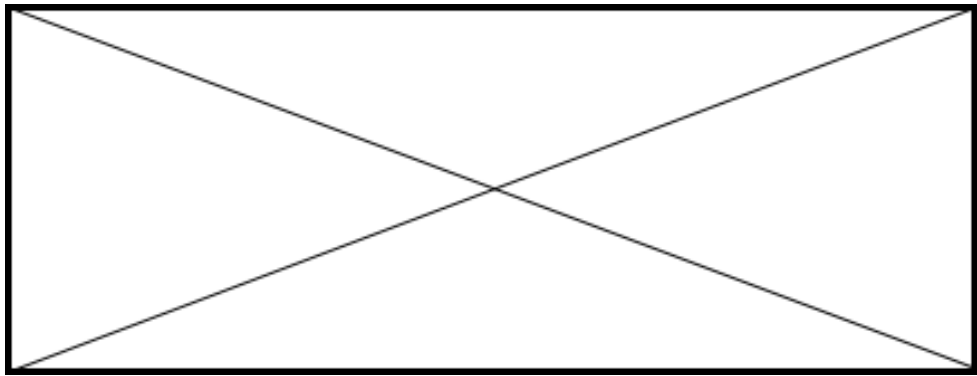




*Figure 2.8-Géométrie de la lame de coupe.*

## 2.2 Préambule : conditions industrielles

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

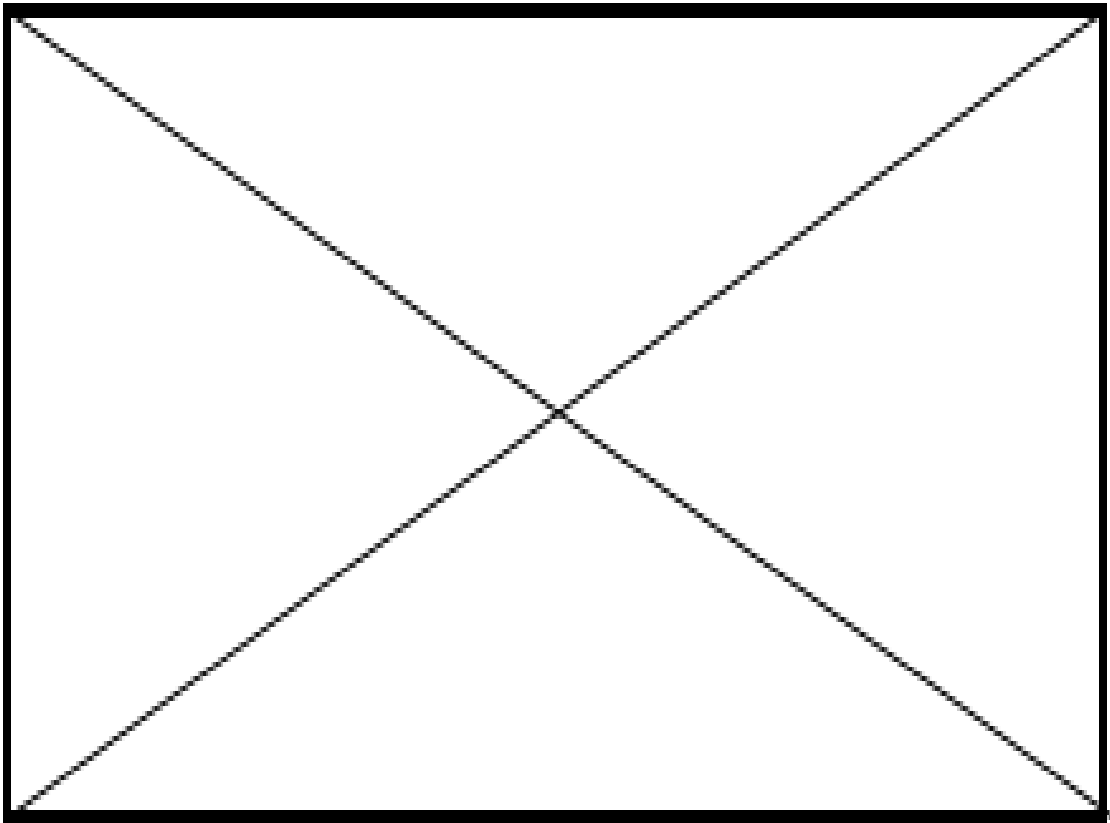


*Figure 2.9-Structure des bandes abrasives : (a) abrasif structuré « U464 » ; (b) abrasif conventionnel « CK712 »*  
*» (données confidentielles supprimées).*

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

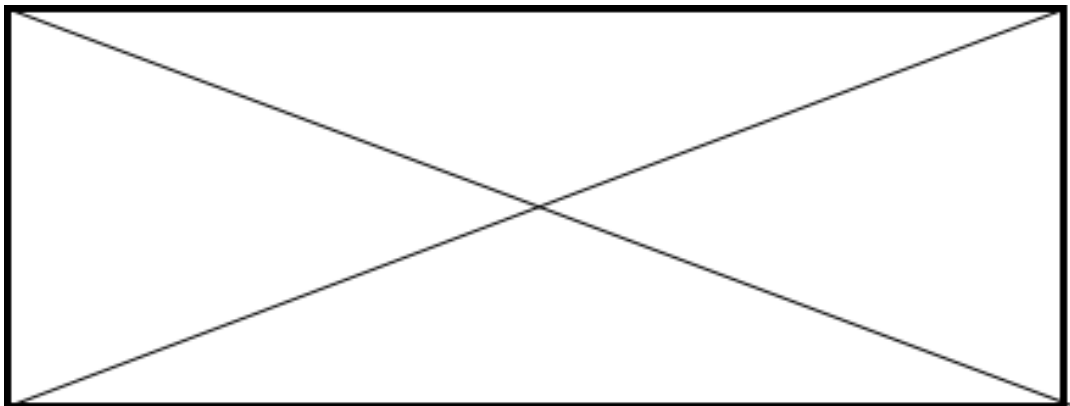
### 2.2.1 Définition du système d'affûtage

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.



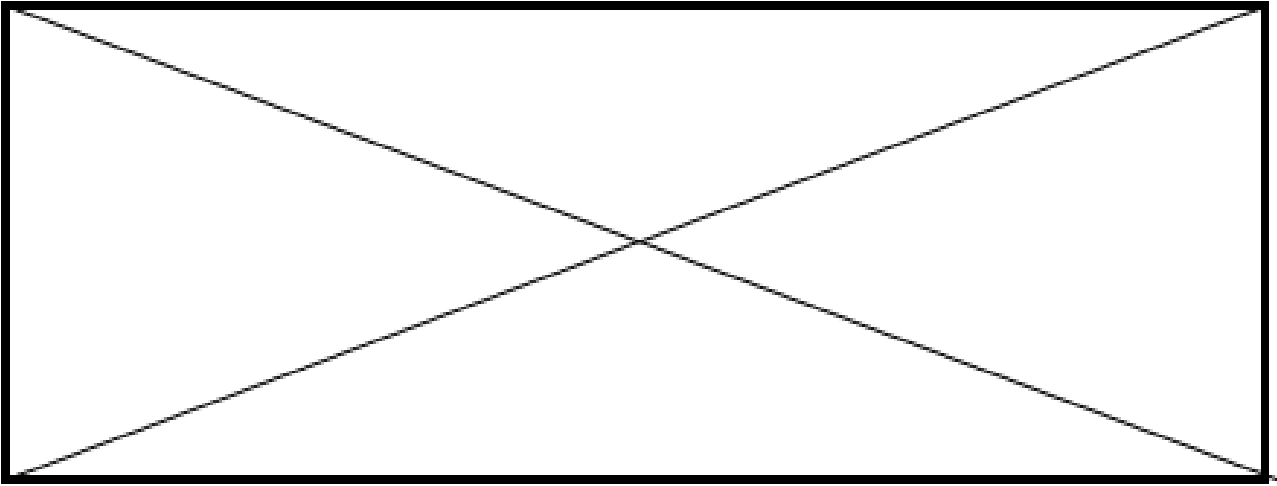
*Figure 2.10- Dispositif d'affûtage des lames de coupe : (a) montage sur la machine de coupe; (b) affuteur industriel LECTRA (données confidentielles supprimées).*

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.



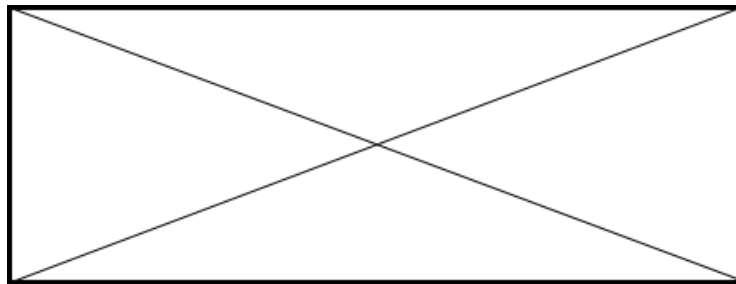
*Figure 2.11-Cycle d'affûtage d'une lame de coupe (données confidentielles supprimées).*

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.



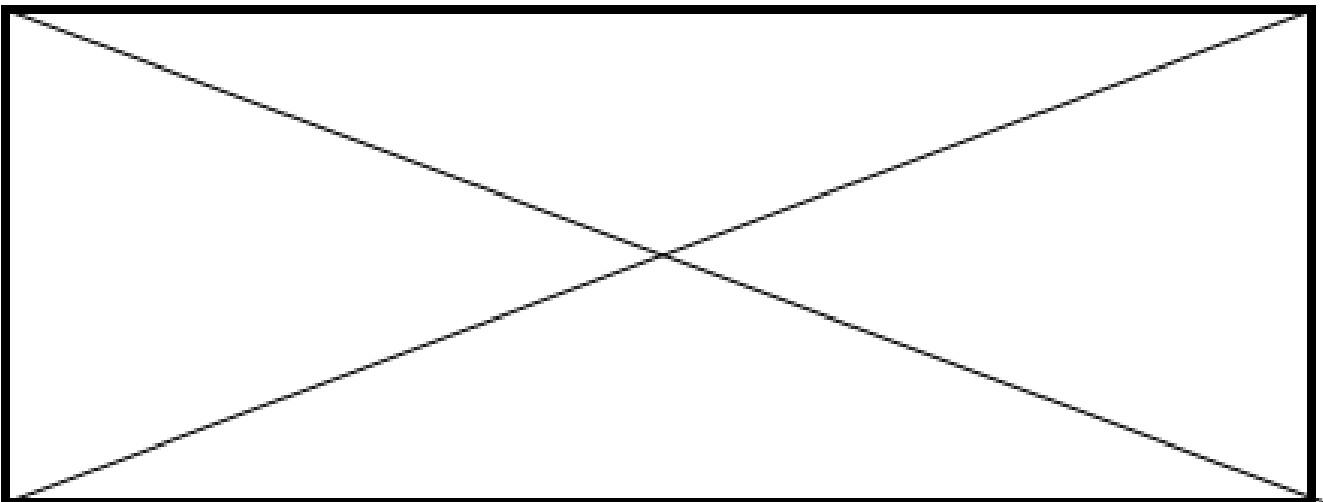
**Figure 2.12**-Banc d'affûtage (données confidentielles supprimées).

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.



**Figure 2.13**-Vue d'ensemble du nouvel affuteur avec multiplicateur de vitesse (données confidentielles supprimées).

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.



**Figure 2.14**-Mesure de l'effort de commande : (a) CAO de l'affuteur instrumenté ; (b) Capteur de force en traction/compression (données confidentielles supprimées).

## 2.2.2 Paramètres caractéristiques de l'affûtage des lames de coupe à tranchant unique

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

## 2.3 Protocole expérimental

### 2.3.1 Pièces d'essais

Dans cette étude, trois nuances de matériaux métalliques ont été utilisées pour fabriquer des lames (cf. paragraphe 1.6.1 du chapitre 1). Le **Tableau 2.5** détaille leurs propriétés physiques.

	Masse volumique $g/cm^3$	Module d'élasticité $10^5 MPa$	Conductivité thermique $W/m^{\circ}C$	Chaleur spécifique $J/kg^{\circ}C$
M2 (HS 6-5-2)	8.1	2.25	24	420
ASP2053 (HS 4-3-8)	7.7	2.50	24	420
ASP2055 (HS 6-4-3)	8.0	2.40	24	420

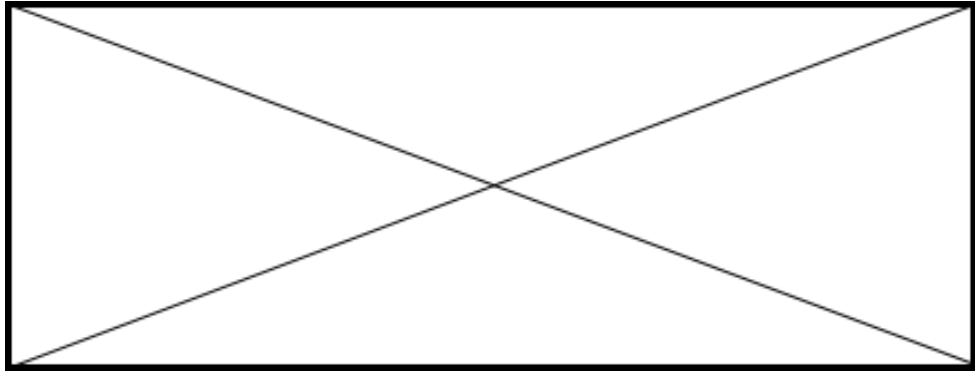
*Tableau 2.4-Propriétés physiques des trois nuances d'acier utilisées.*

Les lames ont subi un traitement thermique qui diffère d'un matériau à un autre. Le **Tableau 2.6** donne un aperçu des caractéristiques mécaniques obtenues selon le traitement thermique utilisé. Les valeurs de mesure de ténacité sont obtenues à l'aide d'un essai de flexion 4 points (*Erasteel*).

	Température du trempé $^{\circ}C$	Température de revenu $^{\circ}C$	Dureté <i>HRC</i>	Ténacité <i>Nm</i>
M2 (HS 6-5-2)	1220	560	61	39
ASP2053 (HS 4-3-8)	1150	560	64	39
ASP2055 (HS 6-4-3)	1050	560	64	45

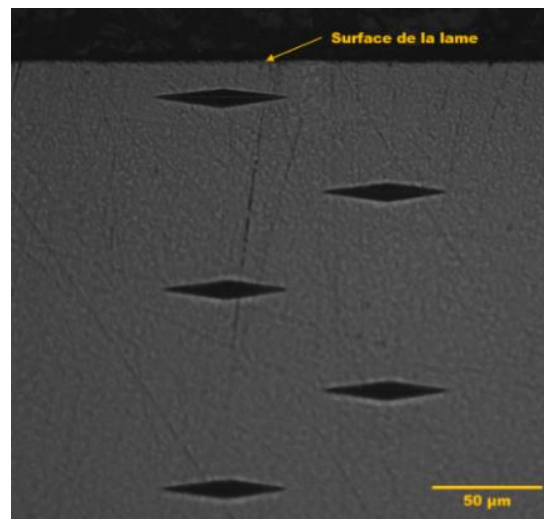
*Tableau 2.5-Caractéristiques mécaniques des aciers rapides utilisés.*

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.



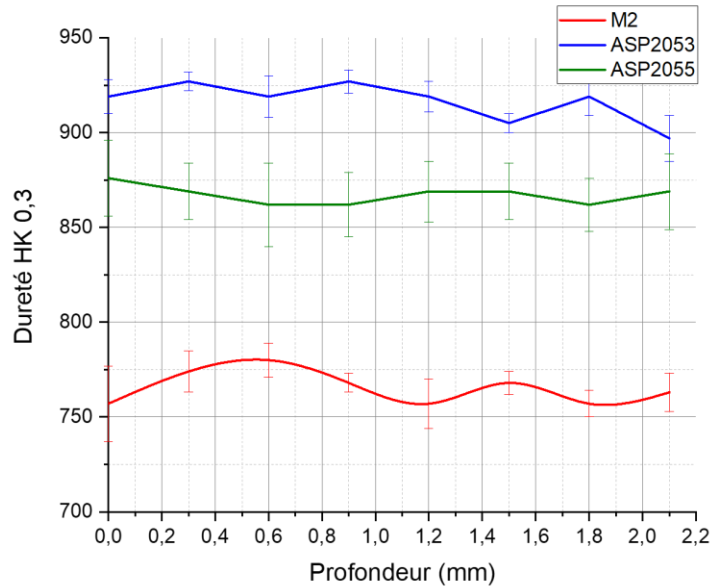
**Figure 2.15**-Microstructures des aciers HSS : (a) acier M2 ; (b) acier ASP2053 ; (c) acier ASP2055 (données confidentielles supprimées).

Des essais de mesure de la microdureté ont été réalisés selon la norme EN ISO 6507-1. Le profil de microdureté Knoop, à une charge de 300 gf, a été effectué depuis la surface vers le cœur de la lame et cela pour les trois nuances d'aciers utilisées (**Figure 2.16**).



**Figure 2.16**-Chemin de mesure de la microdureté des lames de coupe.

La **Figure 2.17** montre les trois niveaux de dureté des aciers rapides supérieurs. Les valeurs moyennes sont  $916 \pm 8$  HK pour l'acier ASP2053,  $867 \pm 17$  HK pour l'acier AP2055 et  $765 \pm 10$  HK pour le M2. L'effet de la dispersion est lié à l'hétérogénéité de la microstructure due à la présence des carbures dans la matrice.



*Figure 2.17-Profils de microdureté en coupe.*

### 2.3.2 Conditions d'essais

*Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.*

### 2.3.3 Planification de la campagne d'essais : choix du plan d'expériences

L'état de surface issu de l'opération d'affûtage dépend de plusieurs paramètres. Dans le but d'approfondir la compréhension de ce processus, une approche expérimentale a été mise en place.

#### a. Approche expérimentale

En se basant sur les résultats de la littérature (*Barge 2005; Boccalini 2002; Krishna 2011; Motorcu 2010*), l'étude de l'influence relative des paramètres d'entrée et leurs interactions sur l'état de surface en affûtage des lames de coupe portera sur 7 facteurs considérés comme prédominants : *Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.*

#### b. Choix de la méthodologie expérimentale

Pour mener à bien l'étude de l'affûtage des lames de coupe, deux voies peuvent être envisagées en fonction des connaissances initiales : i) Soit, une étude numérique qui se base sur l'identification d'une loi et des essais couvrant son domaine de validité ; ii) Soit lorsqu'aucune théorie n'a été identifiée, des essais expérimentaux sont réalisés afin de détecter les paramètres d'entrée influent sur le résultat d'affûtage. Une première tendance peut alors être dégagée en vue d'expliquer les phénomènes engendrés. Ces essais sont souvent le point de départ du développement d'une modélisation pertinente du processus étudié. Pour l'étude de l'affûtage des lames de coupe, une démarche expérimentale a été

mise en place. Cette approche permet à la fois de diminuer le nombre d'essais, d'étudier l'influence d'un nombre important de paramètres, d'obtenir des informations sur les effets directs des facteurs et de leurs interactions et d'en tirer des modèles empiriques en extrayant des conclusions justifiées des mesures effectuées.

Pour répondre à ce besoin, nous avons appliqué la méthode des plans d'expériences factoriels. Dans cette démarche, il existe deux types de plans:

- Le plan factoriel complet : C'est un plan dans lequel on mesure les réponses pour toutes les combinaisons de niveaux de facteurs (paramètres d'entrée) et toutes les interactions entre deux ou plusieurs facteurs.
- Le plan factoriel fractionnaire : C'est un plan dans lequel on n'effectue qu'un sous-ensemble déterminé ou une "fraction" des essais. Certaines interactions sont confondues et ne peuvent pas être séparées. Ainsi, elles sont considérées négligeables.

Cependant, un plan complet avec 7 facteurs à trois niveaux aurait engendré 2187 essais et se serait révélé très couteux en temps et ressources pour notre étude. Un plan factoriel fractionnaire mixte a donc été choisi dans un premier temps pour la suite de ces travaux. **Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.**

Un plan d'expériences caractérise une relation linéaire entre les paramètres d'entrée et les caractéristiques des phénomènes étudiés (ici, la topographie de surface et l'effort normal d'affûtage). L'**Équation 2.1** donne le principe de la loi de modélisation.

$$a_i = \sum_{k=1}^n \alpha_i b_i + \sum_{k=1}^n \sum_{j(\neq i)=1}^n \beta_i b_i b_j + c_i \quad 2.1$$

où  $a_i$  est le paramètre de sortie,  $b_i$  est un paramètre d'entrée,  $\alpha_i$  est la pondération liée au paramètre d'entrée  $b_i$ ,  $\beta_i$  est la pondération liée à l'interaction entre deux paramètres d'entrée différents et  $c_i$  est une constante. L'indice  $n$  représente le nombre de facteurs d'entrée.

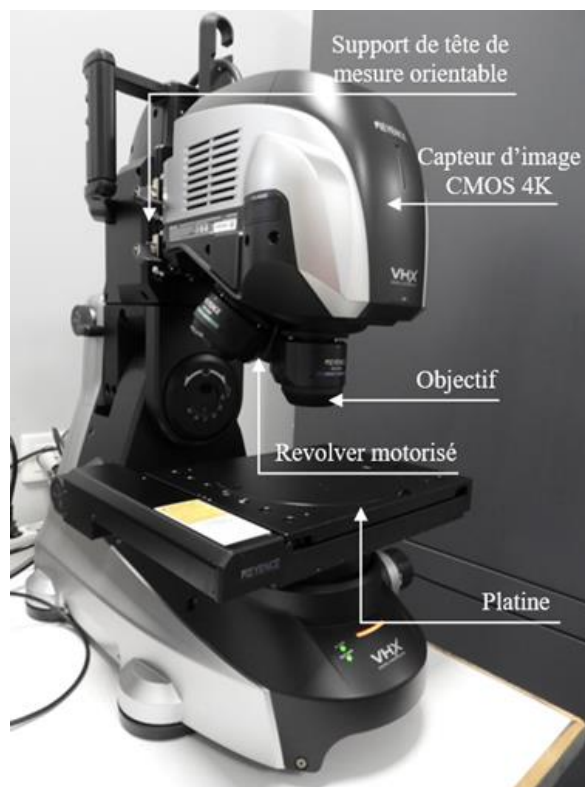
Un plan fractionnaire mixte de type  $(3^{p-2} \cdot 2^{k-1})$  est mis en place, avec  $(p, k)$  le nombre de facteurs par niveau ( $n = p + k$ ). Le plan d'expériences est donc composé de  $3^{4-2} \cdot 2^{3-1} = 36$  essais (*Annexe A.2*) et toutes les interactions à trois facteurs où plus sont négligées et elles ne seront pas étudiées. Ce plan d'expériences fractionnaire offre une incertitude minimale pour l'estimation des inconnues du modèle (*McLean and Anderson 1984*). Cela permet à la fois d'étudier les différents paramètres d'entrée retenus et leurs interactions choisies en réduisant le nombre d'essais.

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

Pour cette étude, l'affûtage est effectué à sec avec 3 répétitions pour chaque condition testée. Dans le but de garantir des conditions initiales identiques, des affûtages d'ébauche sont tout d'abord réalisés pour roder les bandes abrasives et pour corriger les défauts géométriques liés à la procédure initiale de fabrication des lames.

#### 2.3.4 Mesures de la géométrie des lames de coupe

La caractérisation géométrique des lames de coupe est obtenue par numérisation des surfaces de coupe à l'aide d'un microscope numérique Keyence© VHX-7000 (**Figure 2.18**). Le microscope a été utilisé pour effectuer les mesures 3D des lames de coupe neuves, affûtées et usées. Son logiciel de traitement d'images permet de s'affranchir des problèmes de brillance et de surexposition. Il permet d'obtenir des images nettes avec beaucoup de contraste présentant le rendu de la surface observée. En capturant plusieurs images pendant le déplacement de la platine, l'assemblage des données 3D peut être réalisé simultanément. Cela permet de vérifier les contours globaux de la lame. L'angle de coupe et la rugosité de surface de coupe  $S_a$  ou linéique  $R_c$  (ISO4287 1997) du fil tranchant de la lame peuvent également être mesurés. Pour les mesures de rugosité, un grossissement élevé est recommandé afin d'obtenir des mesures précises. Par exemple, la précision de mesure est égale à  $\pm 0.1\mu\text{m}$  pour un grossissement [x800-1500] (Keyence).



**Figure 2.18**-Microscope numérique Keyence VHX-7000.



Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

## 2.4 Analyses et interprétations de la topographie de la surface affûtée

### 2.4.1 Défauts macroscopiques et microscopiques de l'affûtage

Parmi les défauts de surfaces détectés après affûtage, certains sont identifiables visuellement et d'autres nécessitent des observations microscopiques. Le profil de rugosité montre que les lignes d'avance sont liées essentiellement à l'orientation des grains abrasifs et à leur cinématique par rapport à la lame (**Figure 2.22**).

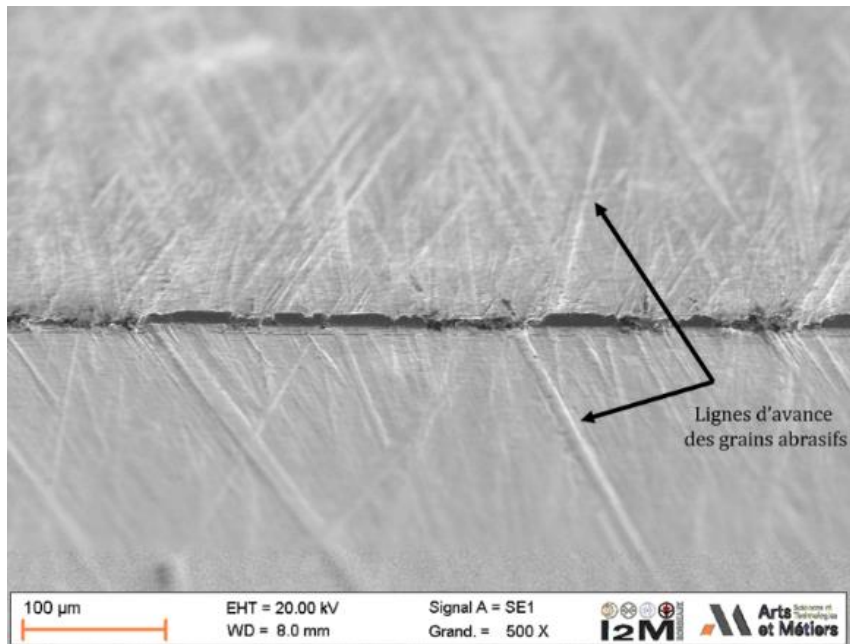


Figure 2.19-Lignes d'avances des grains abrasifs sur les surfaces de la lame.

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

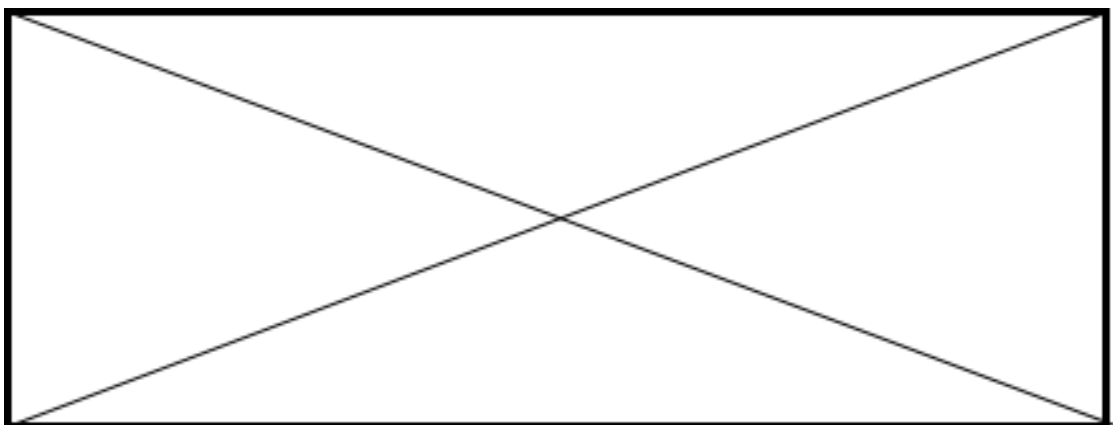


Figure 2.20-Défauts d'affûtage au niveau du fil tranchant « Fil retourné » : (matériau M2;  $V_b = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $F_t = 50 \text{ Hz}$ ;  $P_z = 5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ) (données confidentielles supprimées).

Il est important de noter que les différents types de défauts d'affûtage sont fortement influencés par les vibrations au sein même de l'affuteur : les *vibrations du système* (*vibrations forcées*) qui sont généralement dues au montage des systèmes de transmission de mouvement ; les *vibrations locales* (*auto générées*) sont issues du déplacement des bras d'affûtage et du défilement des bandes abrasives.

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

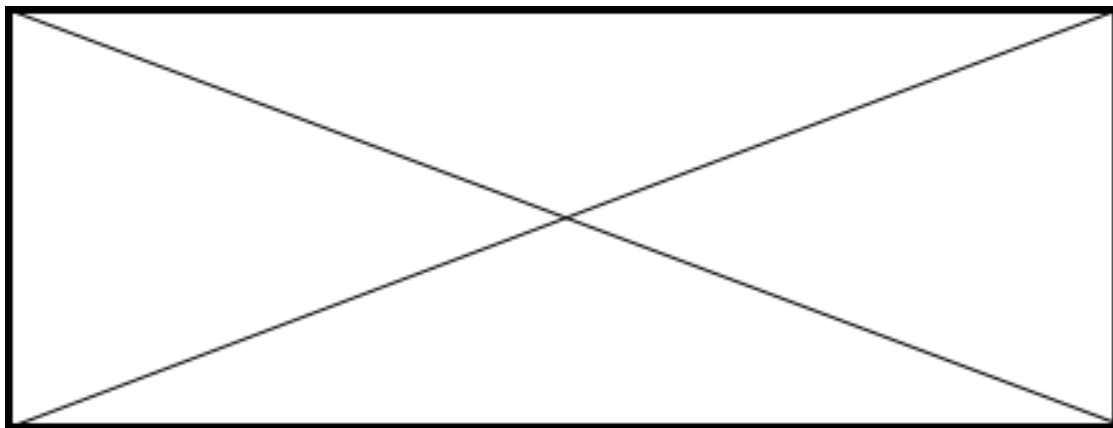


Figure 2.21-Evaluation visuelle du fil tranchant après affûtage (données confidentielles supprimées).

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

## 2.4.2 Étude de l'influence des paramètres d'affûtage et de leurs interactions

### a. Étude des effets des paramètres

Les effets moyens de chaque facteur d'affûtage sont calculés suivant la méthode ANOVA (Alexis 1995).

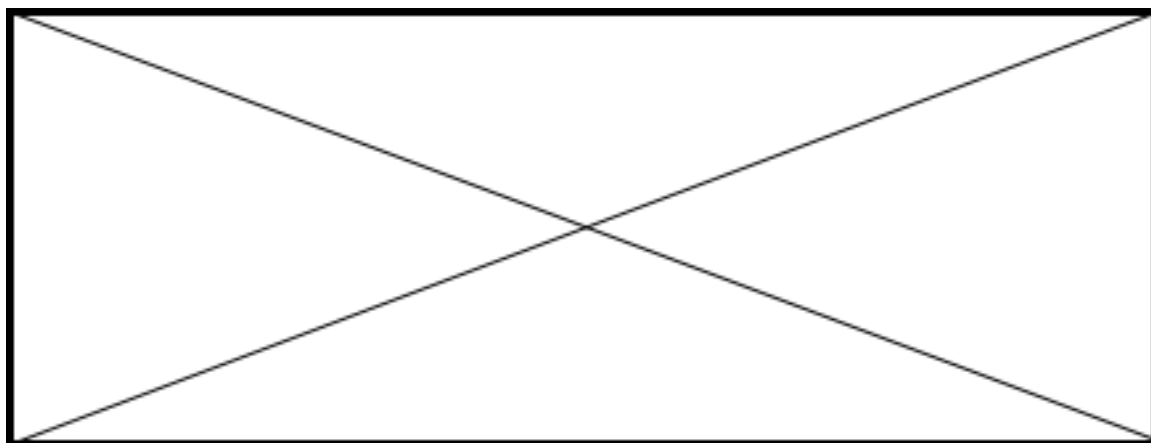
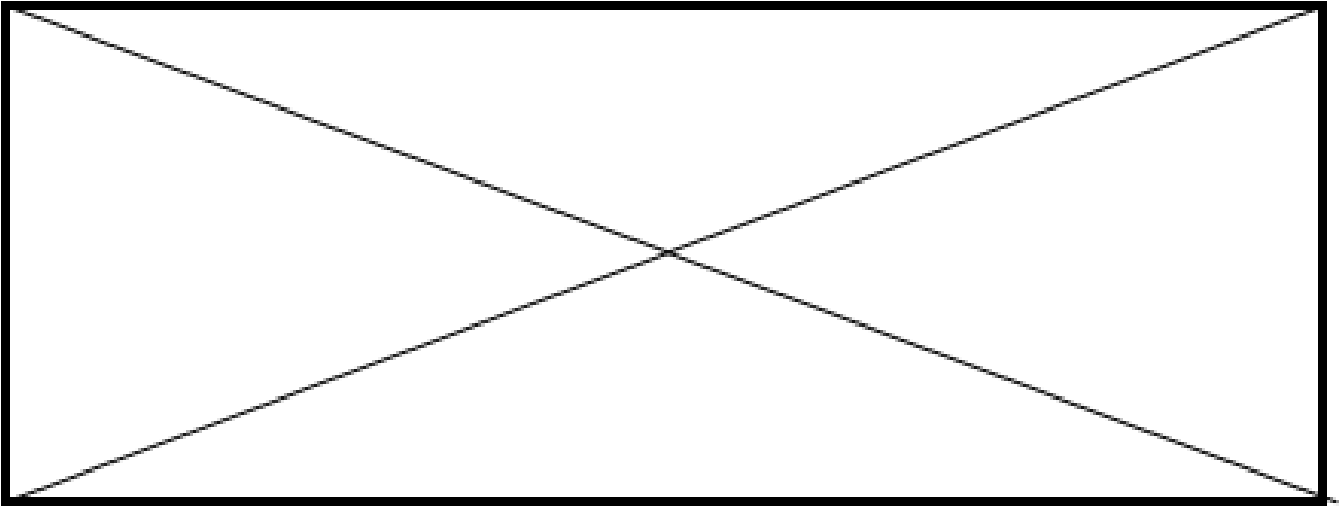


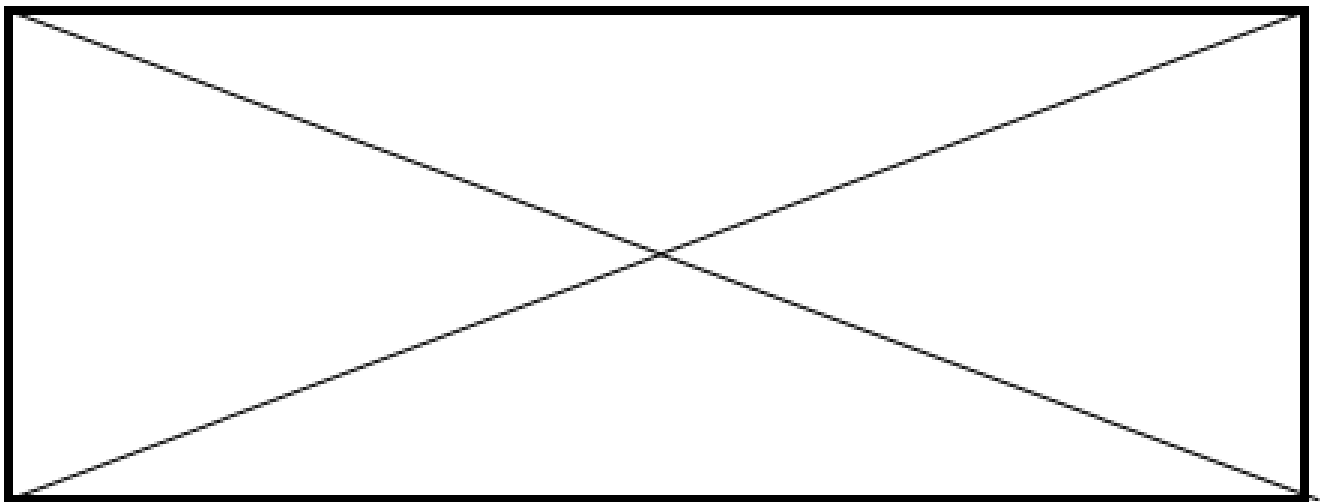
Figure 2.22-Diagrammes des effets moyens correspondant aux paramètres liés au fil tranchant : (a)  $R_e$ , (b)  $R_c$  (données confidentielles supprimées).

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.



*Figure 2.23-Formation de défaut du fil tranchant "fil retourné" durant l'affûtage (données confidentielles supprimées).*

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.



*Figure 2.24-Plastification de la matière au niveau du fil tranchant "fil retourné" : (matériau M2;  $V_b = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $F_t = 100 \text{ Hz}$ ;  $P_z = 4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ) (données confidentielles supprimées).*

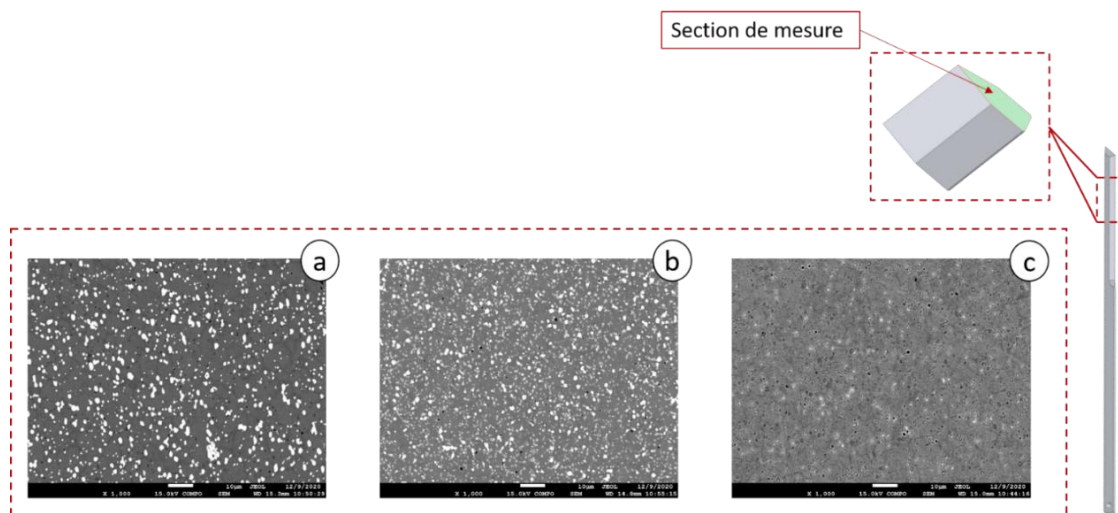
Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

#### **b. Étude de l'effet de la microstructure**

Les caractéristiques microstructurales du matériau de la lame (dureté, type de carbure et leurs densités) sont les facteurs les plus influents sur les deux paramètres topographiques étudiés (**Figure 2.27**).

Pour expliquer cette forte influence, des analyses métallurgiques et des micrographies approfondies ont été réalisées. Chaque lame a été découpée au disque à tronçonner sous lubrification

afin de minimiser les échauffements. Ensuite, la surface observée a subi différentes étapes de préparation : un polissage « poli miroir » et une attaque chimique avec de l'acide nitrique à 10% pour révéler les structures martensitiques. Les observations et les images ont été réalisées au microscope électronique à balayage. La **Figure 2.28** illustre les trois microstructures des aciers rapides M2, ASP2053 et ASP2055. Les visualisations sont faites dans un plan normal au fil tranchant.



**Figure 2.25**-Micrographie MEB de la microstructure des trois aciers de lame : (a) M2 ; (b) ASP2055 ; (c) ASP2053.

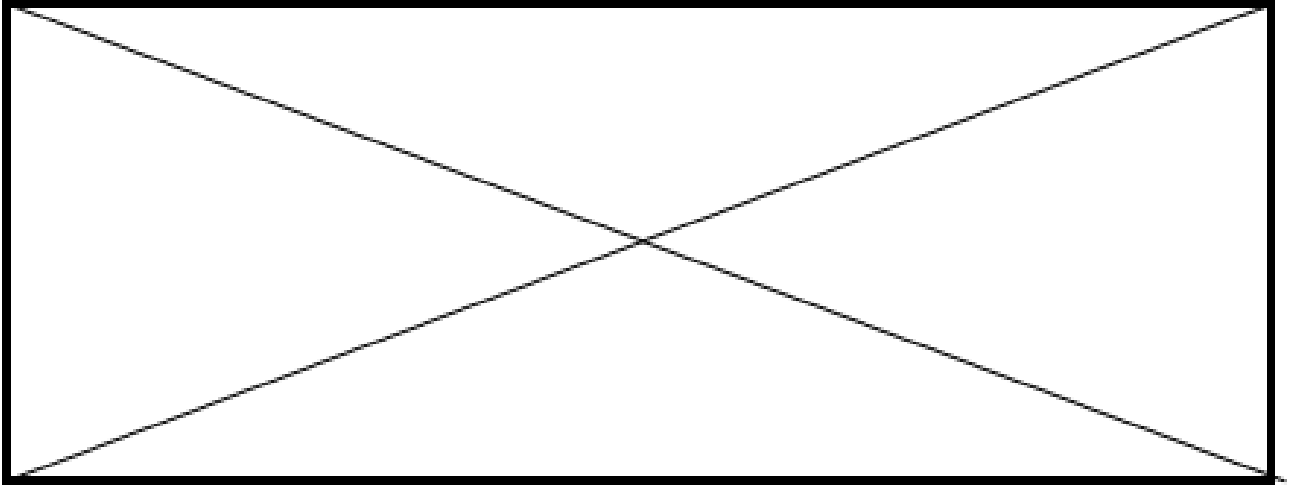
Les grains de la microstructure des aciers rapides obtenus par métallurgie des poudres sont plus petits et fins, comparativement à l'acier rapide conventionnel M2. Le type de carbure et leur distribution dans la matrice déterminent la résistance du matériau à l'abrasion (*Shizhong 2006*). La littérature s'accorde sur le fait que la densité et la taille des carbures primaires et secondaires contrôlent l'aptitude à la rectification d'un matériau (*Huth 2009; Chang-Jun 1994*). D'autres études arrivent à des résultats similaires (*Badger 2007; Zhong 2020*), à partir d'essais d'usure avec des papiers abrasifs sur plusieurs nuances d'aciers rapides. Le lien entre la résistance à la rectification et la microstructure de l'acier a été démontré en faisant varier le pourcentage de carbures et leurs types. Une autre étude (*Wei 2006*) a montré qu'au-delà d'un seuil de dureté de l'acier (58 HRC), la résistance à l'usure abrasive dépend de la quantité et de la morphologie des carbures au sein de la matrice martensitique.

L'affûtage des aciers relativement ductiles comme l'acier rapide M2 (61 HRC) donne un état de surface affûté grossier, et le rayon d'acuité minimum qui peut être réalisé est grand comparativement aux les résultats d'affûtage des aciers frittés durs ASP2053 et ASP2055 (64 HRC).

L'acier produit par la méthode conventionnelle contient de gros carbures. Ces derniers émoussent les grains abrasifs et leur présence dégrade l'état de surface du fil tranchant affûté. L'usure des grains

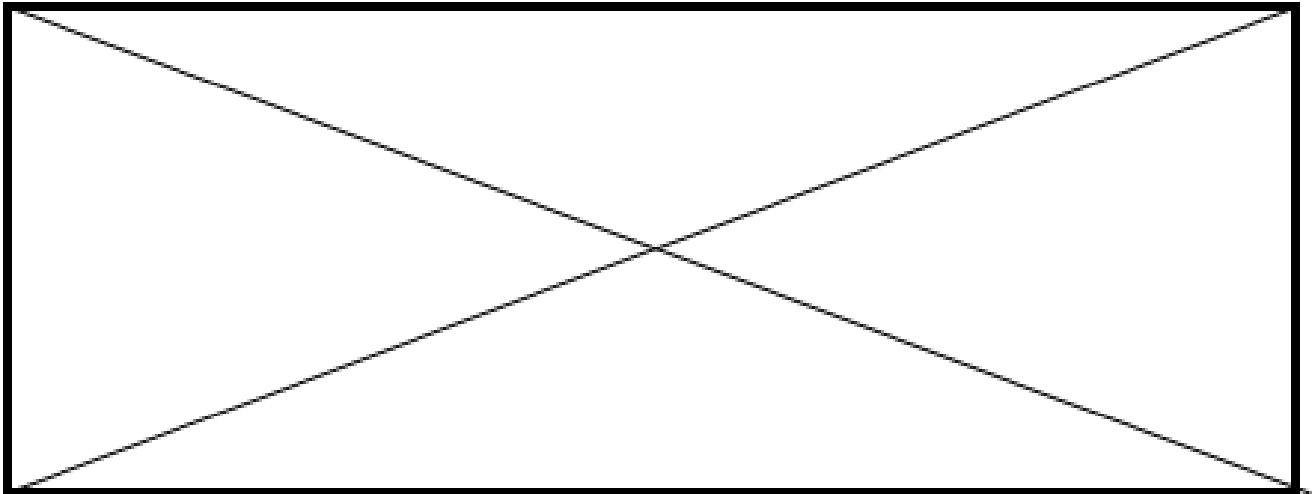
abrasifs durant l'affûtage des lames s'amplifie par la présence des agrégats de carbure dans la microstructure. Ces derniers sont générés par une solidification rapide pendant la phase du refroidissement durant un cycle de traitement thermique.

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.



**Figure 2.26**-Arrachement de carbures durant l'affûtage : (a) Microstructure d'un acier rapide conventionnel ; (b) Microstructure d'un acier rapide fritté (données confidentielles supprimées).

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.



**Figure 2.27**-Arrachement des carbures au niveau de l'arête tranchante de la lame (données confidentielles supprimées).

### c. Étude des interactions

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

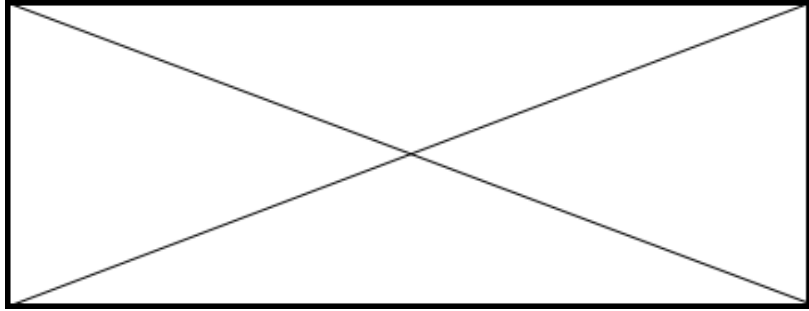


Figure 2.28-Diagrammes d'interactions correspondants aux :  $R_e$  et  $R_c$  (données confidentielles supprimées).

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

### d. Pouvoir coupant des lames affûtées

Ce plan d'expériences a mis en évidence les tendances des paramètres caractérisant la topographie d'un fil tranchant affûté en acier rapide en fonction des paramètres opératoires du processus.

Des essais de coupes ont été réalisés pour étudier l'évolution de l'effort de coupe en fonction de la qualité d'affûtage des lames. Le **Tableau 2.10** présente les conditions de coupe.

Sens de coupe	Fréquence de vibration $F_l$ (Hz)	Vitesse de coupe $V_c$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	Matériau textile	Épaisseur du matelas (mm)	Géométrie de la lame (mm)
Sens trame	100	40	Denim	25 (25 plis)	2.4X8.5

Tableau 2.6-Paramètres de coupe.

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

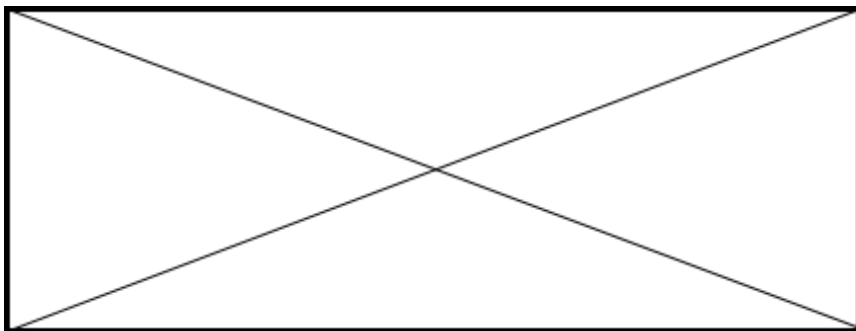
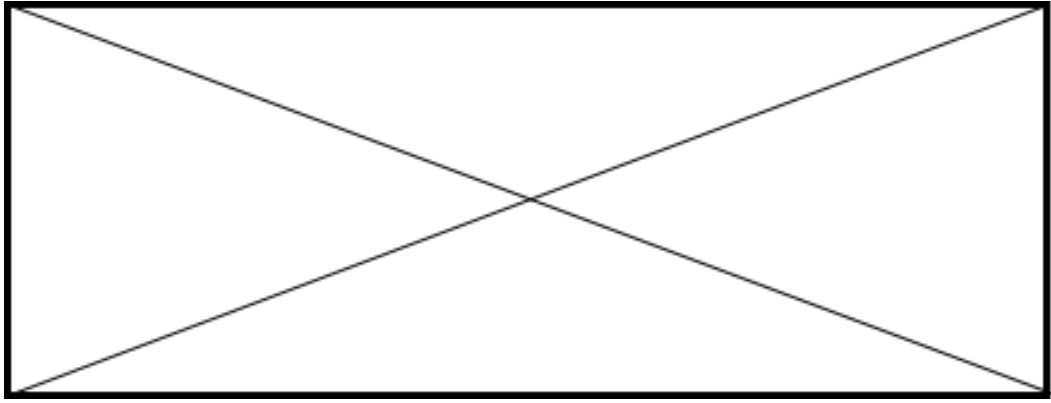


Figure 2.29-Évolution de l'effort frontal de coupe en fonction de l'état du fil tranchant de la lame : (a) fil tranchant fin ; (b) présence du fil retourné après affûtage (données confidentielles supprimées).



**Figure 2.30-** Évolution de l'effort frontal en fonction du rayon d'acuité et de la rugosité du fil tranchant après affûtage (données confidentielles supprimées).

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

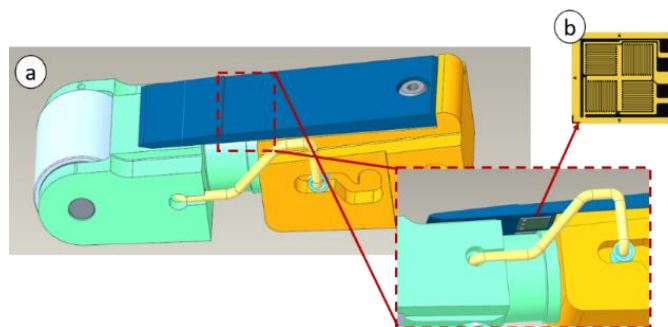
## 2.5 Étude de l'effort d'affûtage

Ce paragraphe vise à déterminer l'effort d'affûtage normal et étudier l'influence des paramètres opératoires sur leurs évolutions.

### 2.5.1 Dispositif expérimental

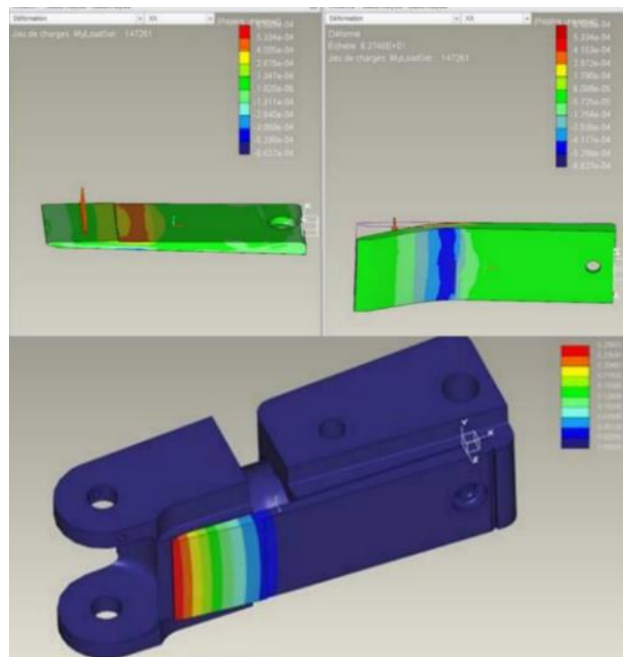
Cette partie présente le montage développé pour les essais d'affûtage des lames de coupe destiné à mesurer l'effort de coupe normal. La cinématique de l'affuteur industriel ne permet pas de mesurer les efforts à l'aide d'un dynamomètre classique.

Pour cela, l'affuteur a été modifié afin de disposer des jauges de déformation sous la plaquette d'affûtage. Les plaquettes assurent le contact entre les bandes abrasives et la surface de la lame durant le cycle d'affûtage. Le système doit s'adapter aux équipements de la machine de découpe et assurer le même fonctionnement qu'un affuteur industriel. Il est important de noter que le système de mesure ne modifie pas la cinématique de l'ensemble affuteur-lame. La **Figure 2.34** montre le montage des jauges de déformations sous la plaquette d'affûtage.



**Figure 2.31-** Montage de mesure de l'effort d'affûtage : (a) plaquette d'affûtage ; (b) jauges de déformation en pont complet.

Les jauges sont placées en pont complet par doigt, afin d'éviter la dispersion thermique. La distance entre les jauges et le doigt mobile a été optimisée à partir de simulations numériques de la flexion des plaquettes. L'objectif est de vérifier que le déplacement n'endommagera pas les capteurs et les fils électriques. La plaquette est modélisée comme une poutre en flexion dont la déformation maximale est située à proximité de l'encastrement, comme le montre la **Figure 2.35**. Les jauges sont placées le plus proche possible de l'encastrement de la plaquette afin d'avoir une meilleure sensibilité. Un étalonnage des jauges de déformation a été réalisé afin de déterminer l'effort résultant d'affûtage appliqué sur la surface de la lame.



**Figure 2.32-**Deformation en flexion pure des plaquettes d'affûtage.

L'avantage de ce type de capteur est d'avoir une fréquence d'acquisition élevée allant jusqu'à 1 MHz ce qui dépasse la réponse de la structure à la fréquence de vibration de la lame avec laquelle on travaille. L'effort d'affûtage mesuré par les jauges de déformation est la combinaison de l'effort d'appui normal  $F_N$  et de l'effort tangentiel  $F_T$  (**Figure 2.36**). Ainsi, l'effort appliqué sur la lame par un bras d'affûtage est donné par l'**Équation 2.4**.

$$F_{affutage}^{bras} = \sqrt{F_N^2 + F_T^2} \quad 2.4$$

L'effort d'affûtage totale est exprimé par l'**Équation 2.5** :

$$F_{affutage} = n_{bras} \cdot F_{affutage}^{bras} \quad 2.5$$

Avec ( $n_{bras} = 3$ ) est le nombre des bras d'affûtage.



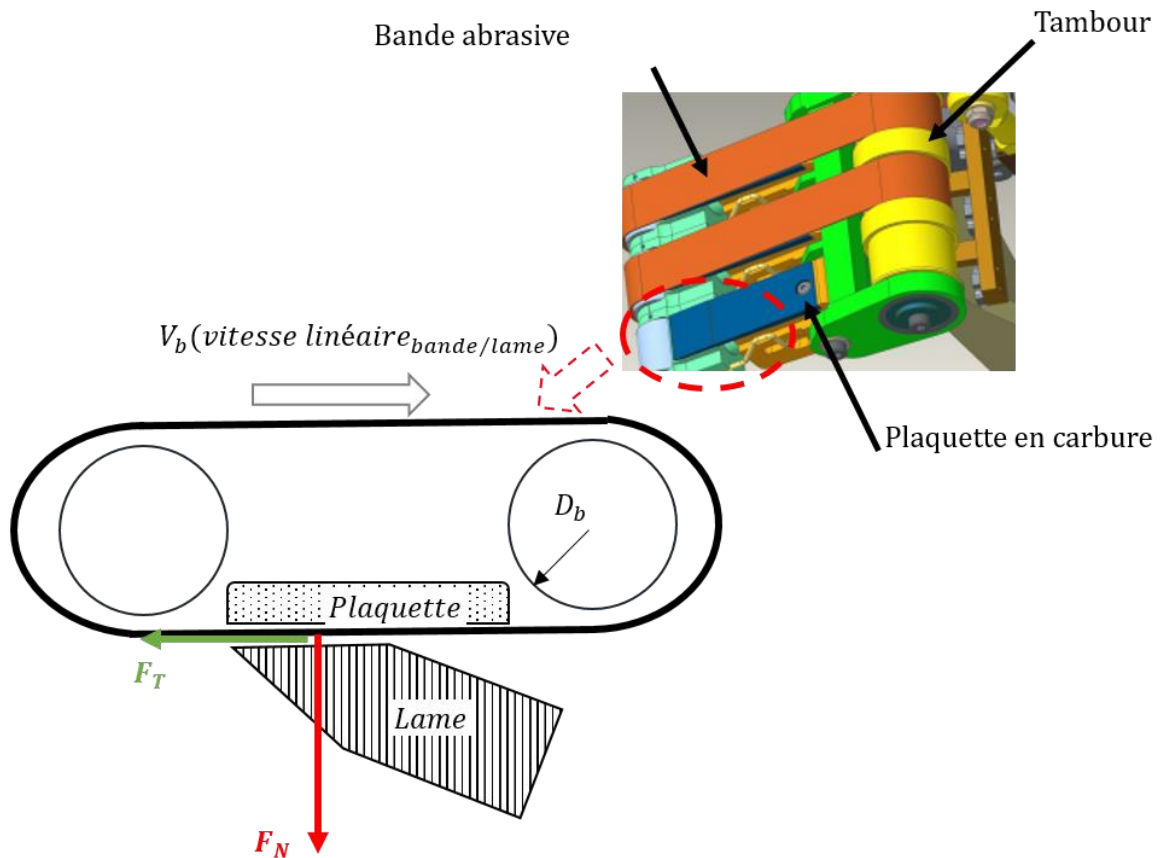
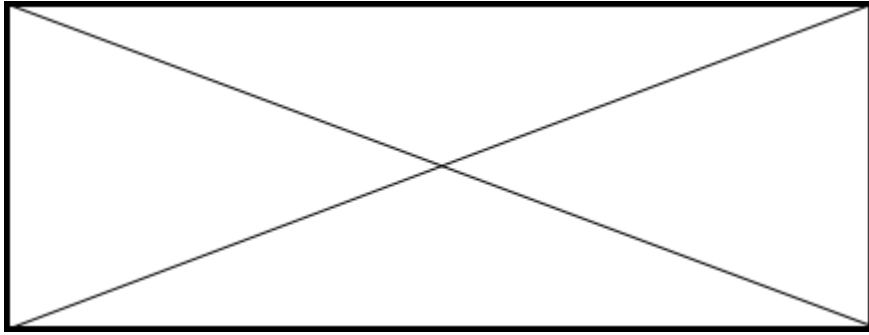


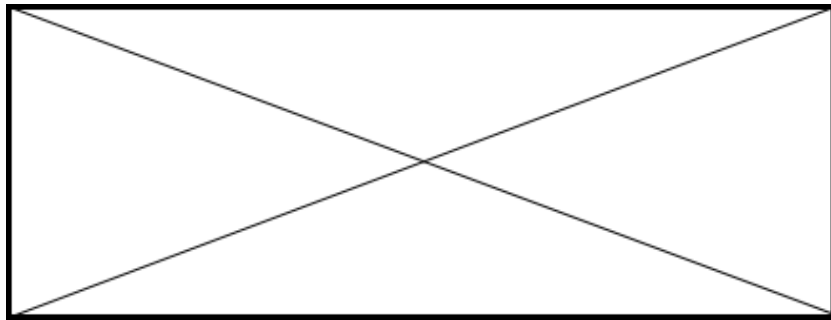
Figure 2.33-Efforts en affûtage.

### 2.5.2 Cycle d'affûtage et principe de mesure

Pour mener les essais du plan d'expériences défini au paragraphe 2.3.2, nous avons besoin de connaître les courbes caractéristiques d'un cycle d'affûtage. Un relevé typique de l'effort d'affûtage et de la position des bras de l'affuteur est illustré par la **Figure 2.37**. Dans les procédés d'affûtage et de rectification, les signaux acquis sont très bruités par la dynamique du procédé et de l'outil. Généralement, ceux-ci englobent les informations utiles liées au signal et aux vibrations du système. Dans le cas présent, il s'ajoute la cinématique complexe de l'affuteur adopté lors des essais et la vibration de la lame. Cette combinaison a créé des défauts de mesure surtout à des fréquences de vibrations importantes de la lame d'où l'oscillation de l'effort normal  $F_N$  en régime stationnaire. L'analyse spectrale montre des pics de fréquences aux alentours de la fréquence d'oscillation de la lame (**Figure 2.38**).



**Figure 2.34**-Cycle d'affûtage (Lame en ASP2053 ;  $\theta = 30^\circ$  ; Abrasif structuré P150 ;  $V_b = 21 \text{ m. s}^{-1}$  ;  $F_l = 100 \text{ Hz}$  ;  $P_z = 4. 10^5 \text{ Pa}$ ) (données confidentielles supprimées).

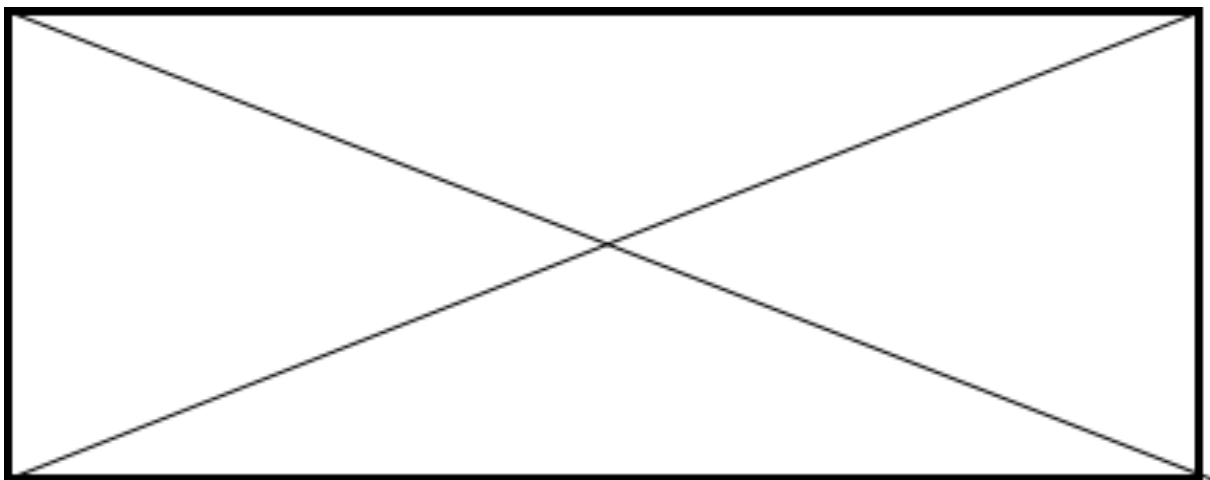


**Figure 2.35**-Analyse spectrale du signal de l'effort normal d'affûtage (Lame en ASP2053 ;  $\theta = 30^\circ$  ; Abrasif structuré P150 ;  $V_b = 21 \text{ m. s}^{-1}$  ;  $F_l = 100 \text{ Hz}$  ;  $P_z = 4. 10^5 \text{ Pa}$ ) (données confidentielles supprimées).

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

### 2.5.3 Détermination des facteurs influents

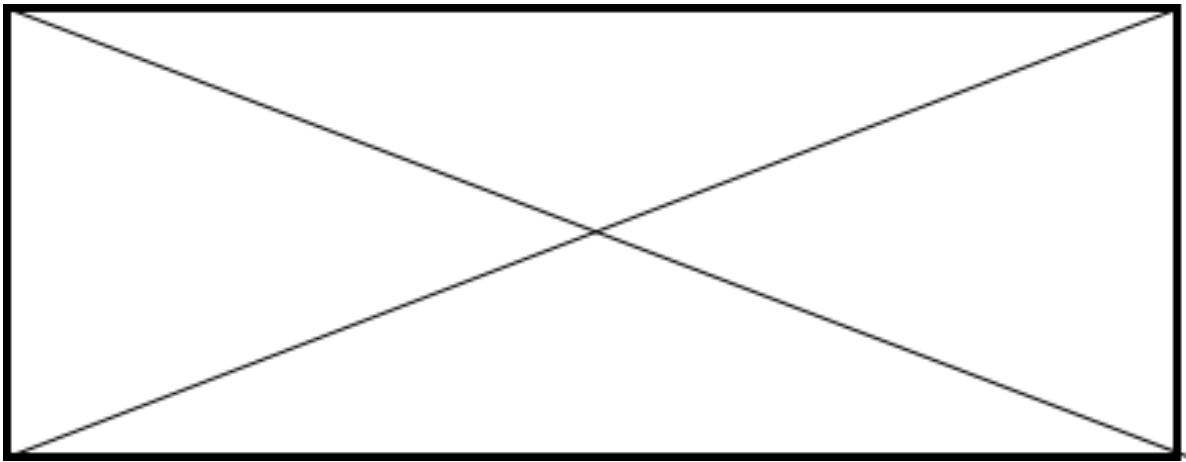
Les effets moyens de chaque paramètre d'affûtage des lames ont été calculés. Les graphes des réponses relatives à l'effort normal sont respectivement présentés sur la **Figure 2.39**.



**Figure 2.36**- Diagrammes des effets purs correspondant à l'effort d'affûtage (données confidentielles supprimées).

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

Les interactions des variables d'entrées sur l'effort normal sont représentées sur la **Figure 2.40**.



**Figure 2.37**-Graphe des interactions sur l'effort d'affûtage  $F_{\text{affûtage}}$  (données confidentielles supprimées).

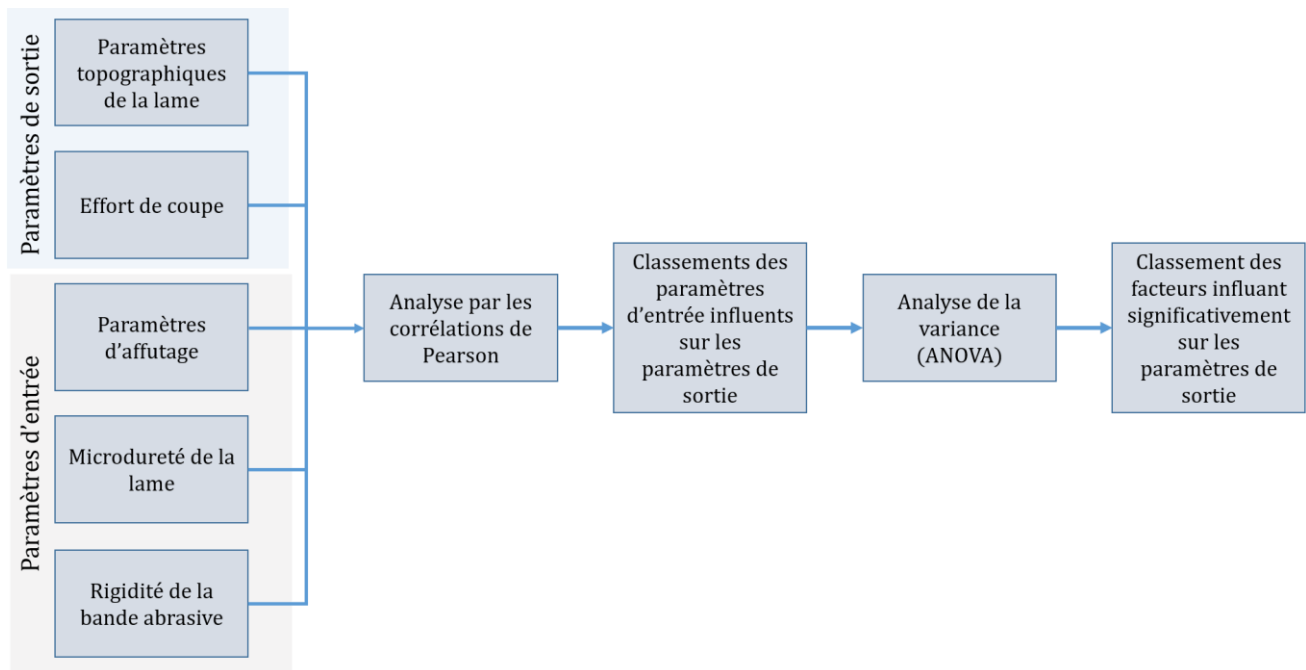
Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

## 2.6 Analyses de la corrélation

### 2.6.1 Démarche statistique

Pour le traitement des résultats, des analyses de la corrélation et de la variance sont conduites.

La démarche de l'analyse statistique est détaillée dans la **Figure 2.41**.



**Figure 2.38**-Démarche de l'analyse statistique.

L'analyse de la corrélation dite de Bravais-Pearson consiste à étudier la corrélation entre plusieurs variables statistiques. En effet, il s'agit d'une quantification de la liaison qui peut exister entre les variables par un coefficient  $\varepsilon_{corr}$  calculé comme suit :

$$\varepsilon_{corr} = \frac{cov(X, Y)}{\sigma(X) \cdot \sigma(Y)} \quad 2.6$$

Avec  $\sigma$  l'écart type et  $cov(X, Y)$  la covariance des variables X et Y. Pour cette étude, la variable X correspond à un paramètre d'affûtage (vitesse de défilement des bandes abrasives  $V_b$ , fréquence de vibration de la lame  $F_l$ , pression d'affûtage  $P_z$ , microdureté de la lame et angle de coupe  $\theta$ , structure de la bande abrasive et taille des grains). La variable Y correspond à un paramètre de l'état de surface du fil tranchant (rayon d'acuité  $R_e$  et rugosité  $R_c$ ) et l'effort d'affûtage. Le coefficient de corrélation est indépendant des unités de mesure des variables, ce qui autorise les comparaisons entre eux. Les mesures doivent être normalisées entre -1 et 1. Le coefficient de corrélation permet de caractériser une relation linéaire positive ou négative. Un coefficient  $\varepsilon_{corr}$  nul indique l'absence de corrélation entre les deux variables étudiées.

Tout d'abord, les corrélations de Pearson sont calculées pour chaque couple (paramètre d'affûtage /topographie de la lame ou effort d'affûtage). Les résultats sont présentés dans le **Tableau 2.13**. Il est important de noter qu'une valeur positive du coefficient de corrélation correspond à une évolution du couple de paramètres dans le même sens, et qu'une valeur négative correspond à une évolution dans des sens opposés. Tous les calculs sont faits à l'aide du logiciel « *Minitab* ».

<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>

**Tableau 2.7-Corrélations de Pearson entre les paramètres d'entrée et les paramètres de sortie( données confidentielles supprimées).**

Ensuite, on a identifié les paramètres d'affûtage et les caractéristiques de la lame ayant des coefficients de corrélation de Pearson à valeur absolue supérieure à 0.5. Les paramètres sélectionnés font l'objet d'une étude de la variance. Les indices de Fisher et les probabilités de dissociation  $p$  sont alors calculés, comme le montre le **Tableau 2.14**.

<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>

**Tableau 2.8-Probabilités de l'hypothèse nulle  $p$  (données confidentielles supprimées).**

Le calcul des indices de Fisher (**Tableau 2.15**) permet d'établir un classement selon l'ordre d'importance (*Benoist 1994*). L'indice de Fisher est le rapport du carré moyen du modèle à celui des résidus. Il permet de calculer la probabilité que ces deux carrés ne soient pas égaux. En d'autres termes, si le F de Fisher est élevé (faible probabilité que le modèle soit celui de la moyenne), les variations des réponses mesurées sont bien dues aux variations des facteurs. Si l'indice de Fisher est proche de 1, les variations des réponses mesurées sont comparables à celles des résidus.

<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>

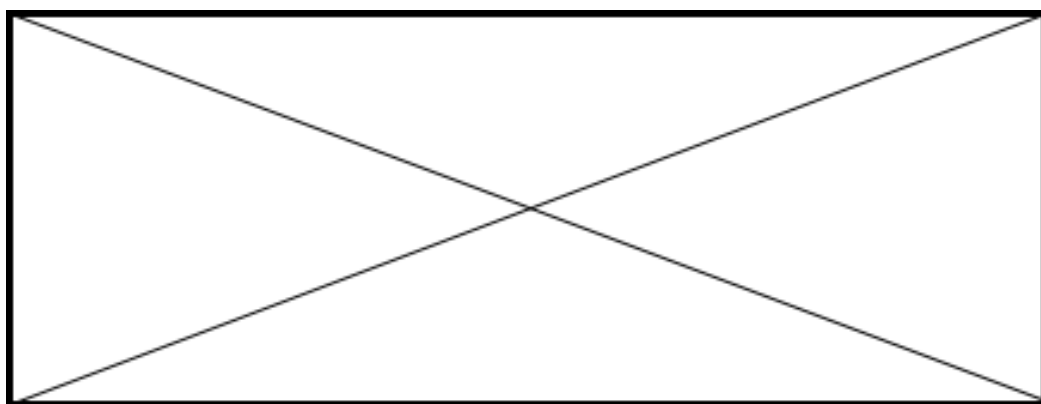
**Tableau 2.9-Indices de Fisher (données confidentielles supprimées).**

## 2.6.2 Résultats des analyses statistiques

Les analyses de corrélation ont permis l'identification des paramètres influents sur la procédure d'affûtage et les paramètres topographiques du fil tranchant de la lame. La **Figure 2.42** montre que la pression d'affûtage  $P_z$  et la microstructure de la lame jouent le rôle le plus important pour (données confidentielles supprimées). Dans un deuxième ordre vient la rigidité et la structure de la bande abrasive.

En ce qui concerne (données confidentielles supprimées), il s'est avéré que la pression d'affûtage  $P_z$  et les caractéristiques microstructurales de la lame ont le même niveau d'influence.

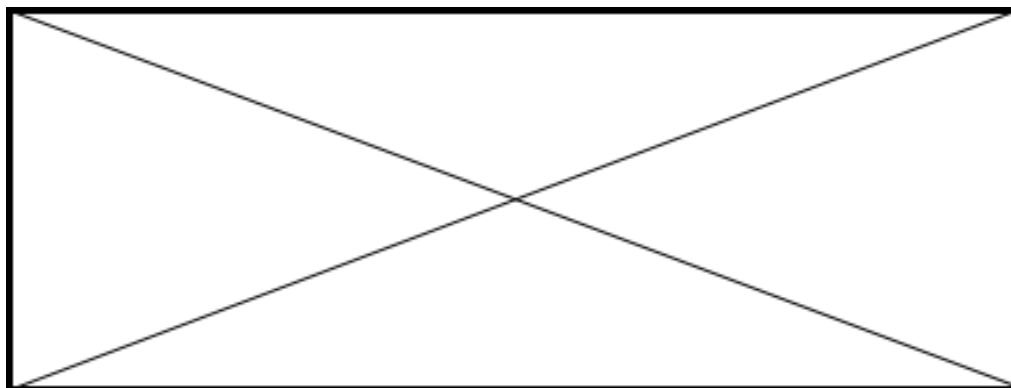
Pour l'effort d'affûtage, la pression d'affûtage  $P_z$ , la vitesse de défilement des bandes abrasives  $V_b$  sont les facteurs les plus influents.



**Figure 2.39**-Coefficients de corrélation de Pearson concernant les paramètres d'entrée du plan d'expériences (données confidentielles supprimées).

Après une analyse de la variance de type « 2 ways ANOVA » entre ces paramètres identifiés, le calcul des probabilités  $p$  de l'hypothèse de non association des facteurs a permis d'obtenir les résultats illustrés dans la **Figure 2.43** :

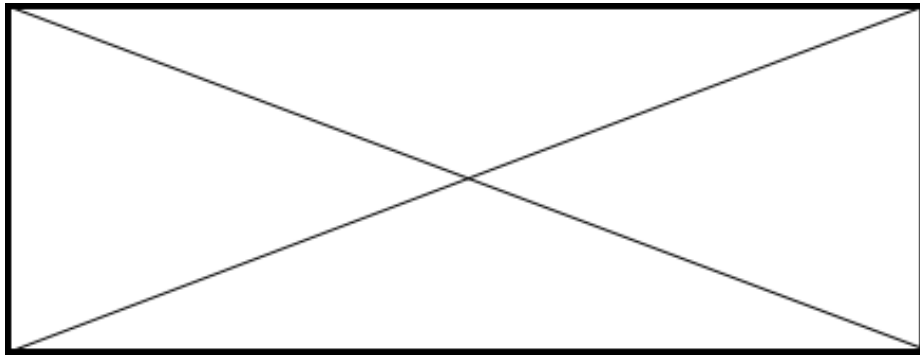
Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.



**Figure 2.40**-Probabilité  $p$  de dissociation calculée (2 ways ANOVA) (données confidentielles supprimées).

Afin de quantifier l'importance de ces paramètres, les indices de Fisher  $F_{Fisher}$  (Schimmerling; 1998) permettent de réaliser un classement par ordre d'importance en se basant sur les critères suivant (Figure 2.44) :

- $F_{Fisher} \geq 21$  : paramètre important de 1er ordre.
- $F_{Fisher} \leq 21$  : paramètre important de 2ème ordre.



**Figure 2.41**-Indices de Fisher résultants de l'analyse de la variance de la relation entre les paramètres d'entrée et de sortie du plan d'expériences (données confidentielles supprimées).

Les paramètres d'entrée sont classés comme suit :

- La pression d'affûtage  $P_z$  (premier ordre).
- La vitesse de défilement des bandes abrasives  $V_b$  (premier ordre).
- Les caractéristiques mécaniques et physiques du matériau de la lame (deuxième ordre).
- La géométrie de la lame (angle de coupe  $\theta$ ) (deuxième ordre).
- La rigidité de la bande abrasive (deuxième ordre).
- La fréquence de vibration de la lame  $F_l$  (deuxième ordre).

## 2.7 Étude de l'influence du temps d'affûtage

### 2.7.1 Détermination des facteurs influents

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

### 2.7.2 Microdureté de la lame de coupe

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

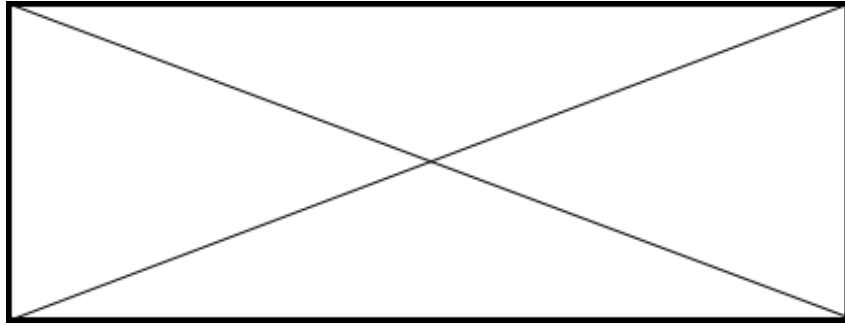


Figure 2.42-Chemin de mesurage pour la microdureté Knoop HK (données confidentielles supprimées).

La mesure de la microdureté Knoop HK de la pointe de la lame est mesurée selon la norme EN ISO 4545-4 en utilisant un processus automatisé de mesures multiples sur une machine TUKON-1202 de WilsonHardness®. Le principe consiste à appliquer une charge de 100 gf (0.98 N) sur la surface de la lame via une empreinte normalisée en diamant et récupérer les dimensions de l’empreinte résultante, **Figure 2.52**, afin de déduire la dureté HK correspondante à :

$$HK = \frac{2F \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{gd_1d_2} \quad 2.7$$

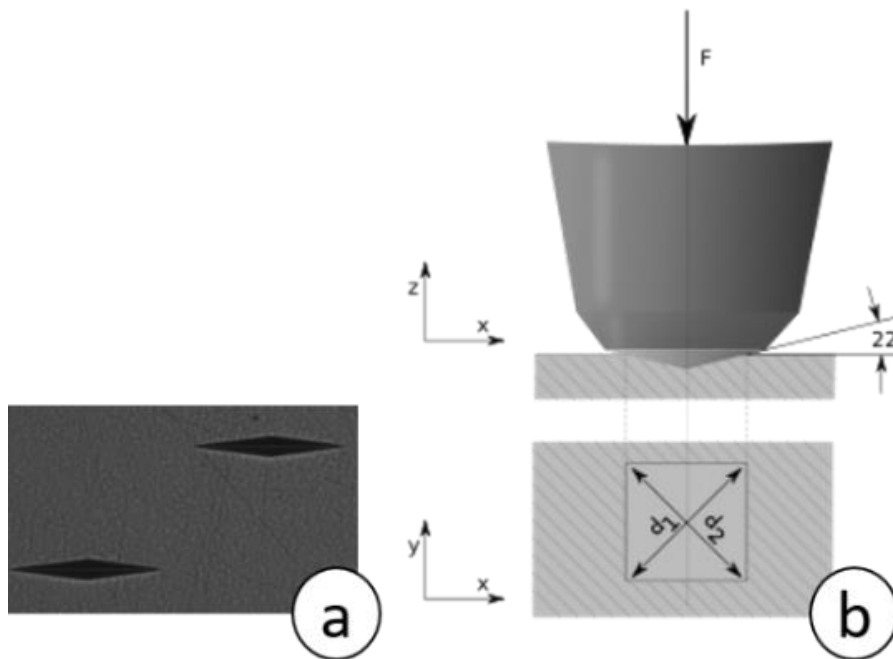


Figure 2.43-(a) Empreinte de l’indenteur sur la surface latérale de la lame ; (b) Schéma de principe de l’essai de dureté Knoop.

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.



## 2.8 Étude de l'influence de l'usure des bandes abrasives

### 2.8.1 Étude de l'influence des effets purs

Un deuxième plan d'expériences a été établi pour étudier l'influence du temps d'affûtage et de l'usure de la bande abrasive en utilisant une bande structurée avec support rigide. Les paramètres d'entrée sont donnés dans le **Tableau 2.19**.

L'objectif de ce plan d'expériences est d'étudier les éventuelles non-linéarités des paramètres d'entrée choisis à l'issue des études précédentes et de définir des abaques industriels en fonction de l'usure des bandes abrasives (nombre des cycles d'affûtages).

<i>données confidentielles supprimées</i>		<i>données confidentielles supprimées</i>	
<i>données confidentielles supprimées</i>		<i>données confidentielles supprimées</i>	
<i>données confidentielles supprimées</i>		<i>données confidentielles supprimées</i>	
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>

**Tableau 2.10**-Facteurs du plan d'expériences et leurs niveaux (*données confidentielles supprimées*).

Les effets moyens de chaque paramètre d'affûtage ont été calculés suivant la méthode statistique ANOVA. Les graphes de réponses relatives au rayon d'acuité et rugosité du fil tranchant en fonction du nombre d'affûtages sont respectivement présentés sur les **Figure 2.54** et **Figure 2.55**. L'objectif de cette étude statistique est de trouver les paramètres processus qui conduisent à une topographie de la surface de la lame optimale pour la découpe textile.

*Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.*

## 2.8.2 Apparition du fil retourné

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

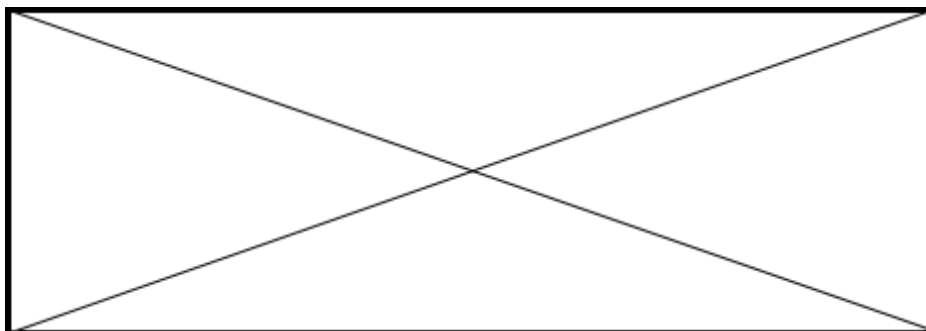


Figure 2.44-Evaluation visuelle du « fil retourné » après affûtage (*données confidentielles supprimées*).

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

Il est à noter aussi que l'influence des paramètres opératoires varie en fonction de l'usure des bandes abrasives. Ces résultats permettent d'obtenir des configurations d'affûtage optimales en fonction de la topographie de la lame souhaitée.

Trois classifications industrielles pour l'affûtage ont été établies, **Tableau 2.20** :

Affûtage léger : utilisé pour le début du cycle d'affûtage. Les grains abrasifs ne nécessitent pas une grande pression pour déclencher le clivage. Ils admettent un pouvoir coupant très élevé.

Affûtage moyen : utilisé avec un état d'usure des bandes abrasives ayant réalisées plus de 800 affûtages. Une légère augmentation de la pression pour conserver un taux d'enlèvement de matière constant.

Affûtage fort : utilisé à la fin de cycle de vie d'une bande abrasive afin de garantir un pouvoir coupant des particules abrasives acceptable et prolonger la durée de vie de la bande, en évitant les échauffements locaux à cause du frottement.

<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>

Tableau 2.11-Configurations optimales des paramètres d'affûtage (*données confidentielles supprimées*).

## 2.9 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était d'étudier l'affûtage des lames de coupe et de caractériser la géométrie de leur fil tranchant affuté. Les essais ont été organisés suivant une logique propre aux plans d'expériences fractionnaires. Ils ont permis de définir les plages optimales d'affûtage des lames de coupe fabriquées à partir de trois matériaux différents. Il a été mis en avant que les caractéristiques topographiques de la lame après affûtage étaient proportionnelles à l'effort presseur pour une bande abrasive donnée.

**Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.**

Nous avons cherché à mettre en avant les paramètres qui caractérisent l'affûtage des lames de coupe par différentes structures des bandes abrasives. Les résultats obtenus permettent d'identifier les plages de fonctionnement optimales de l'affuteur des lames de découpe textile.

Dans le chapitre suivant, les résultats de la caractérisation expérimentales des composantes du torseur d'actions mécaniques et leurs évolutions en fonction de l'usure de la lame affutée seront détaillés.

## Étude de la découpe des matériaux textiles

“All life is an experiment. The more experiments you make the better”

- Ralph Waldo Emerson

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale de la découpe des matériaux textiles. Un bref état de l'art est premièrement réalisé afin de détailler les différentes approches expérimentales envisageables. Le dispositif mis en place et la démarche expérimentale sont présentés. Les deux sections suivantes permettent d'étudier l'influence des paramètres de coupe sur les composantes du torseur mécanique appliquées sur la lame pour la première, **cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés**



## SOMMAIRE

3.1	Introduction .....	75
3.2	Montage expérimental .....	77
3.2.1	Dynamomètre à cinq composantes .....	77
3.2.2	Mesure de l'effort vertical .....	79
3.3	Conditions d'essais .....	82
3.4	Mesure du torseur des actions mécaniques .....	84
3.5	Évolution des composantes du torseur mécanique .....	87
3.5.1	Évolution de l'effort vertical de coupe $Fz$ .....	89
3.5.2	Évolution du moment de coupe $My$ .....	89
3.6	L'axe central .....	89
3.6.1	Définition .....	89
3.6.2	Évolution de l'axe central .....	90
3.7	Conclusion .....	91



### 3.1 Introduction

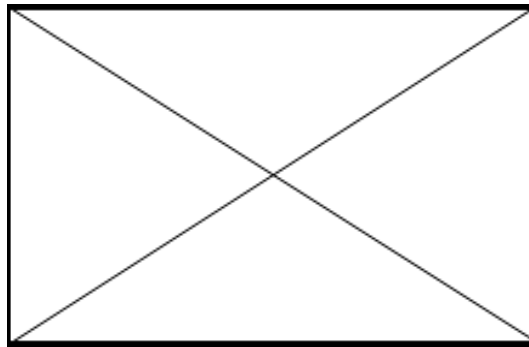
Peu de publications s'attardent sur l'étude des mécanismes de coupe des matériaux textiles. Les phénomènes mis en jeu sont rarement connus sauf par des approches empiriques. Le nombre important de matériaux textiles avec des caractéristiques différentes complique la modélisation analytique du processus de découpe. Dans la littérature, certaines études proposent d'étudier le comportement du tissu durant la découpe selon certains paramètres comme les caractéristiques du matériau textile et la géométrie de la lame (*Boz 2010*). D'autres études se concentrent sur le phénomène de la coupe d'un fil afin de comprendre les mécanismes de rupture des fibres textiles (*Shin 2003*). Cette démarche scientifique n'est valable que dans son domaine de définition.

De la même façon que l'étude de la coupe métallique en usinage, il faudrait appliquer les mêmes démarches de recherche pour étudier la découpe textile. En effet, il existe trois approches prépondérantes pour l'étude de la coupe dans l'usinage métallique qui sont susceptibles d'être applicables à l'étude de la découpe du tissu :

- Approche analytique : Le modèle analytique est basé sur la définition géométrique de l'outil coupant et cinématique du procédé. Il définit la géométrie principale de l'outil, les principaux angles de coupe et l'interaction outil-pièce par des équations d'équilibre (*Merchant 1944; Outeiro 2006; Yousofi 2015*). Il permet de caractériser et d'étudier les phénomènes internes comme l'évolution des champs de déformations et de la température. Toutefois, une bonne définition des lois de comportement du matériau est nécessaire afin de définir les différentes interactions entre l'outil et la matière usinée. Pour la découpe textile, cette approche apparaît très compliquée car le comportement des matériaux textiles est difficilement transposable. La modélisation analytique nécessite alors de nombreux essais de caractérisations mécaniques complexes à mettre en œuvre afin d'établir les différentes lois de frottement entre les faces de la lame et les fibres textiles.
- Démarche numérique : L'objectif de l'approche numérique de la coupe est d'appréhender les phénomènes de coupe selon différentes discrétisations comme les éléments finis (*Marty 2004; Vazquez 2014*), les différences finies (*Lynda 2009*) ou SPH (*Limido 2005*). Cette méthode a l'avantage de permettre la prédiction du comportement du matériau textile durant la découpe (**Figure 3.1**). De la même façon que l'approche analytique, la modélisation numérique se base sur la définition des lois de comportement du matériau à découper et les différentes lois de frottement. L'intérêt de l'approche numérique consiste



alors de prédire le comportement du tissu durant la découpe sans avoir recours aux démarches expérimentales.



**Figure 3.1**-Localisation des contraintes de cisaillement durant la découpe des textiles par la méthode de simulation numérique (Lectra) (données confidentielles supprimées).

- Démarche expérimentale : Le modèle expérimental cherche à réunir un grand nombre de paramètres mesurables pour refléter au mieux la réalité. Il permet d'établir des relations entre la nature globale du torseur des actions mécaniques de coupe et l'état de l'outil coupant, à savoir, sa santé intrinsèque (usure, qualité d'affûtage...). Selon les moyens de mesures disponibles, le modèle met en œuvre la totalité des informations issues du torseur des actions mécaniques alors que le modèle analytique s'appuie sur la connaissance de l'effort dans le sens d'avance de l'outil uniquement. Les premières traces de cette méthode figurent dans les travaux de (*Kienzle 1952*) qui introduisent la notion d'efforts spécifiques dans les trois directions pour les efforts en fonction des paramètres facilement observables (usure de l'outil ou la rugosité des surfaces usinées). Le modèle expérimental met en avant les paramètres influents dans l'évolution des composantes du torseur des actions mécaniques (*Laporte 2005 ; Albert 2010*). La transposition de la démarche pour étudier les procédés peu maîtrisés comme la découpe des matériaux textiles est possible car la démarche est indépendante du procédé étudié.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude de la découpe textile d'un point de vue « torsoriel » dans le cadre d'une démarche expérimentale. L'étude vise ainsi à comprendre l'influence de l'usure du fil tranchant de la lame sur l'évolution des composantes du torseur des actions mécaniques mesurée. La géométrie finale des pièces découpées est dépendante de la santé de la partie active de la lame (fil tranchant) qui joue un rôle essentiel dans le bon déroulement de la découpe textile. Cependant, la qualité du tranchant n'est qu'un facteur en interaction avec d'autres paramètres tels que la vitesse de coupe, la fréquence de vibration et la qualité de l'affûtage.

L'objectif de ce chapitre est de déterminer les facteurs influençant les efforts et les moments de coupe mesurés afin de suivre l'état de la lame. La perspective de l'amélioration de la durée de vie d'une lame permet de saisir tout l'intérêt d'une meilleure compréhension et maîtrise de son comportement pendant la coupe.

## 3.2 Montage expérimental

### 3.2.1 Dynamomètre à cinq composantes

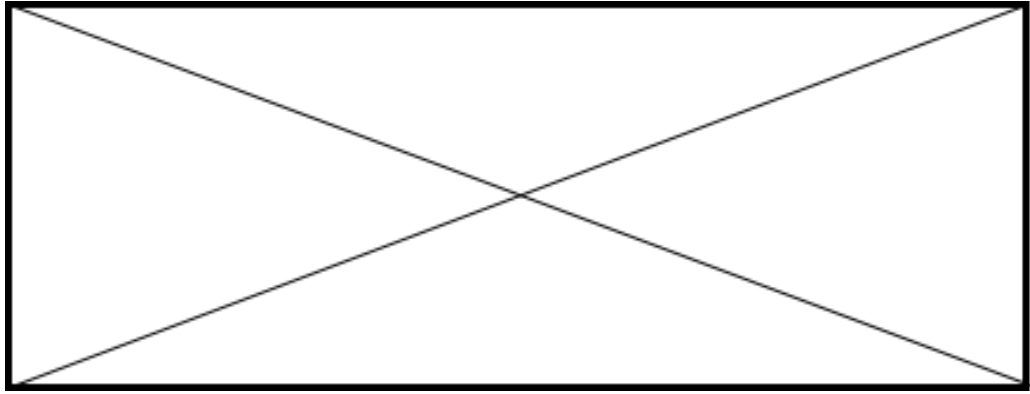
Dans cette partie sont préalablement présentés les montages développés pour les essais de découpe des matériaux textiles. L'objectif est de mesurer les efforts et les moments appliqués sur la lame vibrante durant la phase de coupe. Les contraintes sont liées à la difficulté d'intégrer des capteurs d'efforts classiques disponibles sur le marché (type Kistler) sur la machine dans laquelle la cinématique de l'ensemble de découpe ne le permet pas. Le dynamomètre doit être intégré dans la machine sans modification des géométries externes des différents composants. Il doit mesurer les actions mécaniques au plus près d'où elles sont générées.

Pour cela, une structure mécanique assemblée avec des jauges de déformations a été développée, comme le montre la **Figure 3.2**. Le dynamomètre est capable de mesurer les déformations d'un corps d'épreuve sur lequel des jauges de déformations ont été positionnées. Les efforts et moments de coupe

sont alors déduits à partir d'une matrice d'étalonnage  $[M] = \begin{pmatrix} M_{11} & \dots & M_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{51} & \dots & M_{56} \end{pmatrix}$  prédéfinie (Cosson-Coche 2017).

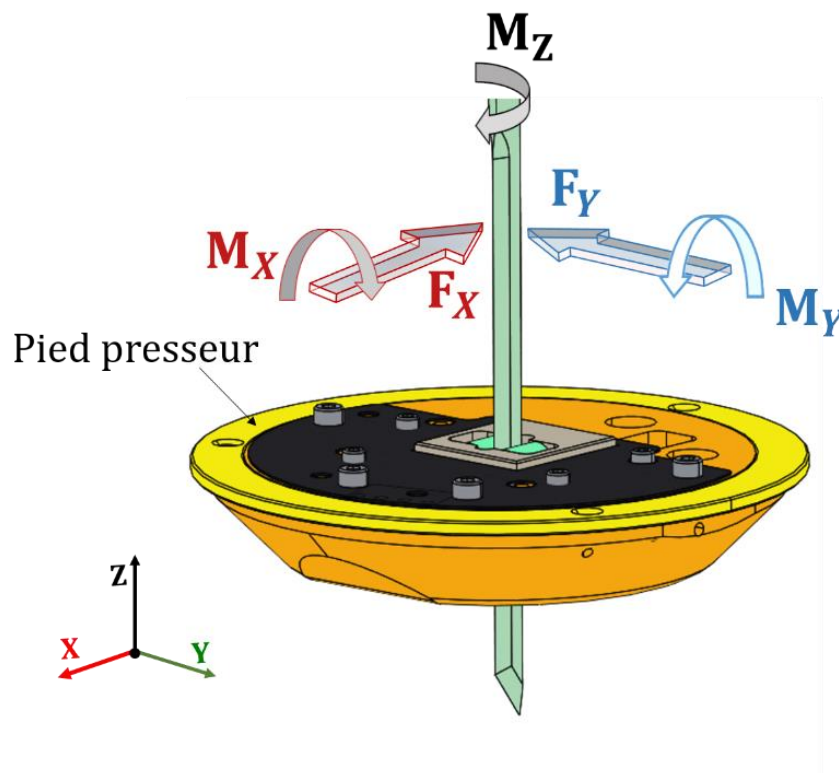
L'**Équation 3.1** présente l'expression du calcul des efforts et des moments de coupe en fonction des signaux des jauges de déformation  $A_{i=[1\ 6]}$ , où  $i$  est le numéro du pont de jauges considéré.

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_{11} & \dots & M_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{51} & \dots & M_{56} \end{pmatrix} \quad 3.1$$



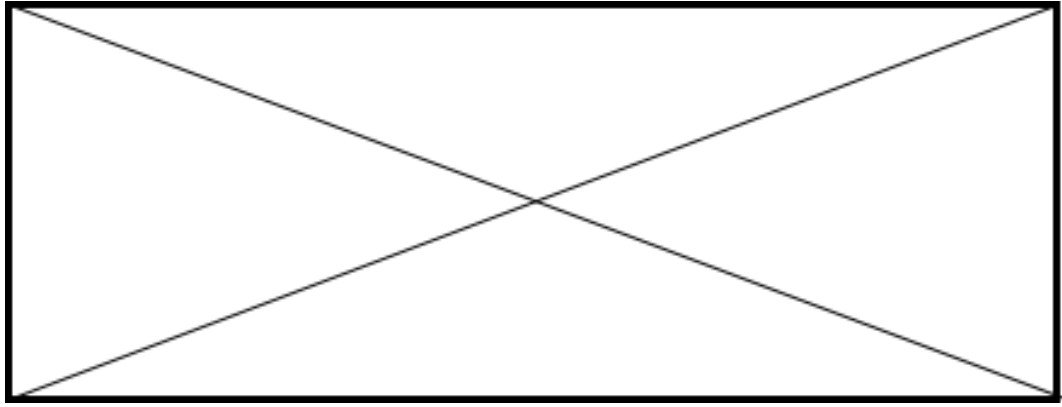
**Figure 3.2-** Structure du dynamomètre à jauges de déformation (Cosson-Coche 2017) (données confidentielles supprimées).

L'instrumentation de la machine de découpe de textiles avec un dynamomètre permet de mesurer en temps réel l'évolution de 5 composantes du torseur des actions mécaniques : les deux efforts ( $F_x, F_y$ ) et les trois moments ( $M_x, M_y$  et  $M_z$ ). La composante  $F_z$  ne peut être mesurée à l'aide de ce dynamomètre (cf. paragraphe 3.2.2). La **Figure 3.3** présente les différents axes de mesures du dynamomètre.



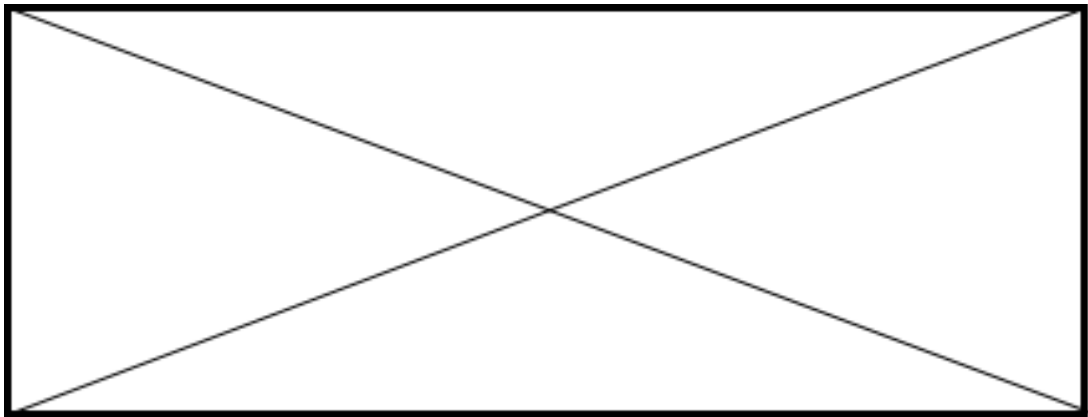
**Figure 3.3-** Axes de mesures du dynamomètre.

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.



**Figure 3.4**-Emplacement du dynamomètre et la carte électronique dans le pied de biche  
(*données confidentielles supprimées*).

Les données mesurées avec le dynamomètre sont récupérées par la commande numérique de la machine à travers une chaîne de transmission décrite sur la **Figure 3.5**.

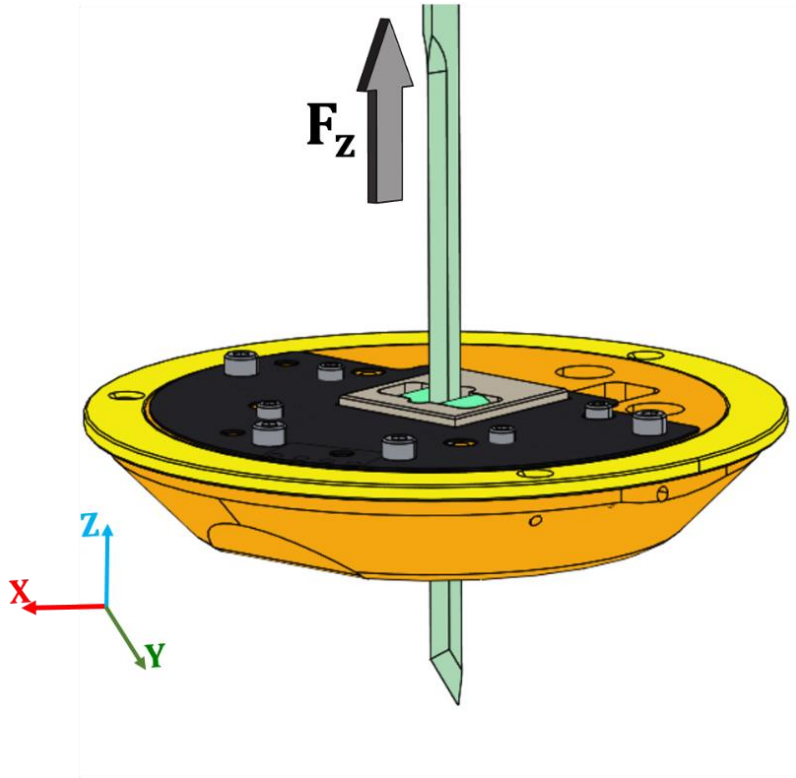


**Figure 3.5**-Cheminement de l'information (*données confidentielles supprimées*).

### 3.2.2 Mesure de l'effort vertical

À partir des études préliminaires de validation (*Cosson-Coche 2017*), les évolutions des différentes composantes de ce torseur mécanique tronqué ont été étudiées, notamment leurs évolutions en fonction de l'épaisseur du matériau à découper et de l'orientation du tissage du matériau textile. Cependant, ce dynamomètre ne permet pas de mesurer l'effort vertical appliqué sur la lame durant la découpe parce que la lame est en mouvement de vibration sans frottement à travers la structure du dynamomètre installé dans le pied presseur.

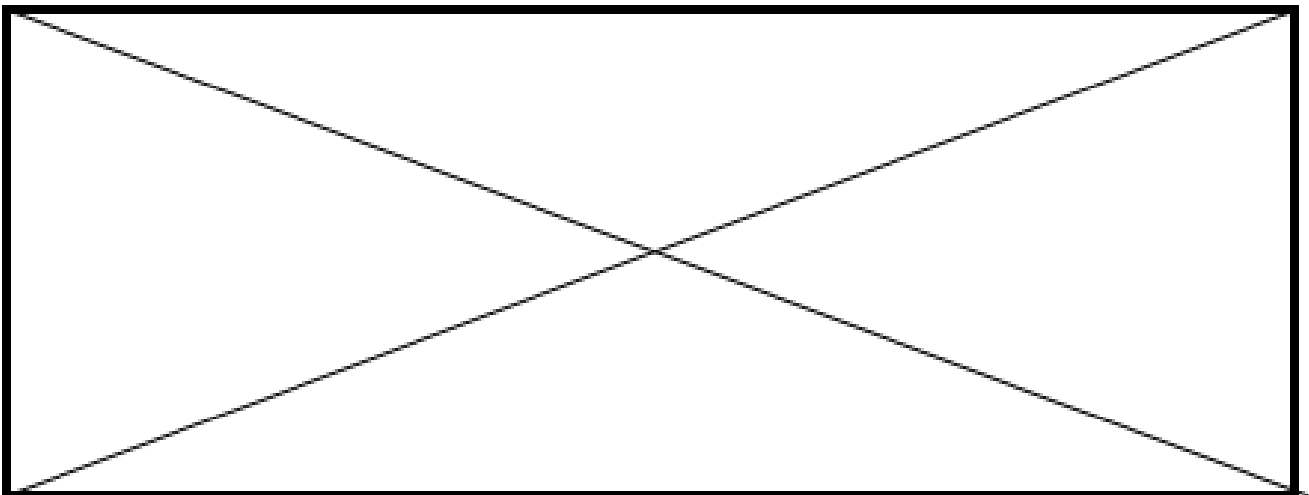
Pour compléter le système de mesure et permettre une analyse complète du torseur d'actions mécaniques, un nouveau montage instrumenté capable de mesurer l'effort vertical de coupe  $F_z$  a été conçu et implémenté (**Figure 3.6**).



*Figure 3.6-Sixième composante du torseur mécanique.*

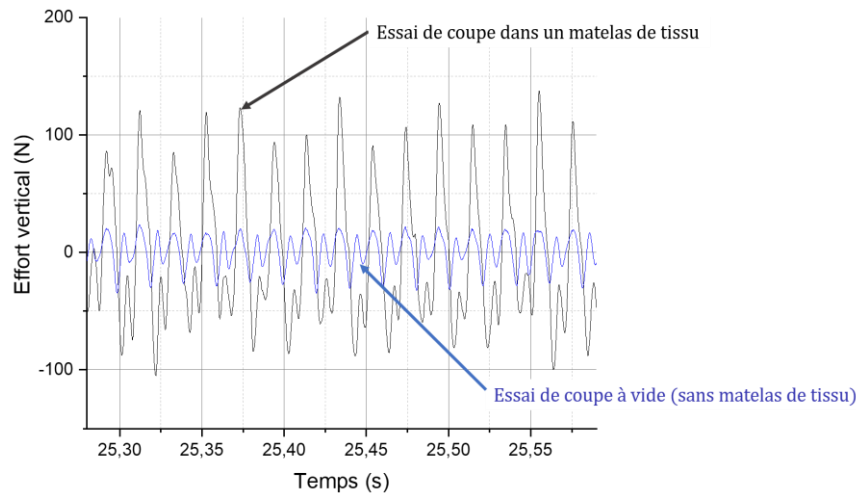
La problématique principale identifiée avant de concevoir ce montage est de garantir un fonctionnement efficace de la lame de coupe tout en permettant de mesurer les actions de coupe simultanément.

*Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.*



*Figure 3.7-Dispositif de mesure de l'effort vertical appliqué sur la lame durant la découpe  $F_z$  (données confidentielles supprimées).*

L'effort mesuré par le capteur correspond à l'effort de maintien du boîtier de vibration en position basse majoré des efforts verticaux. Il est possible de tracer l'évolution de l'effort vertical de coupe lié au frottement de la lame sur le tissu découpé, en faisant la soustraction entre l'effort mesuré dans un matelas et celui d'une coupe sans matière. La **Figure 3.8** montre l'évolution de l'effort de coupe vertical entre un essai de coupe à vide (sans tissu) et une découpe d'un matelas de *denim* de 25 plis (**lame en acier M2,  $V_c = 40 \text{ m. min}^{-1}$ ,  $F_1 = 50 \text{ Hz}$** ).



**Figure 3.8-** Évolution de l'effort vertical pour un essai de coupe à vide et une découpe d'un matelas de *denim*.

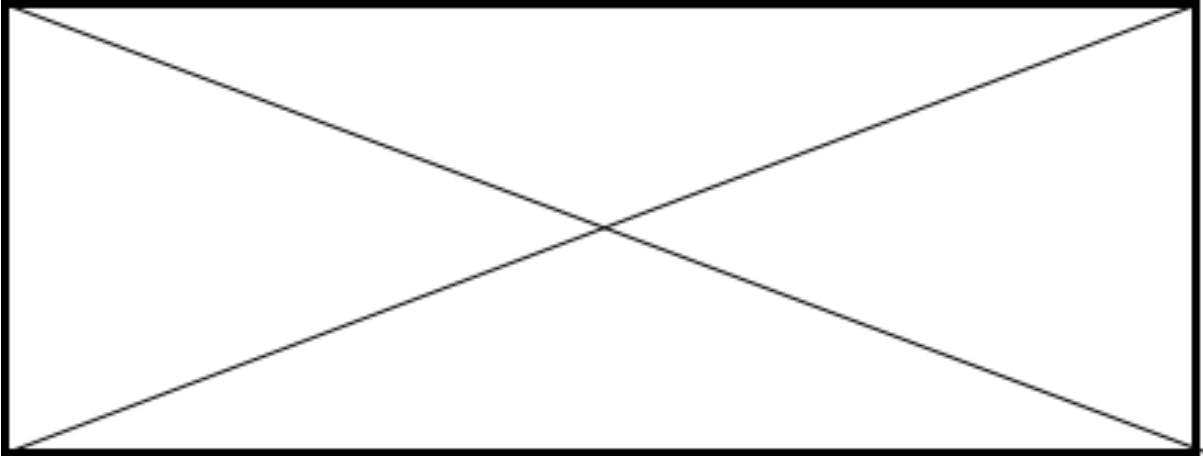
Ce montage respecte les exigences suivantes :

- Le boîtier de vibration est maintenu en position basse durant la phase de coupe.
- Le dispositif n'empêche pas le mouvement oscillatoire de la lame durant la découpe.
- Les données mesurées via le dynamomètre à cinq composantes ne sont pas altérées par le montage du capteur d'effort.

L'étude mécanique du montage durant son fonctionnement a été effectuée (*Annexe A.4*) pour assurer le non-décollement du capteur durant la découpe.

L'enregistrement de la mesure est réalisé à l'aide d'une carte d'acquisition de type « SIRUS Dewesoft ». Le système de la carte a été connecté via un câble USB au poste de lecture et de traitement de la machine de découpe. La fréquence d'acquisition des données de la carte est égale à 20000 Hz/voie. Les différents amplificateurs intégrés à la carte permettent d'acquérir et traiter plusieurs types de données (tension, LVDT, accéléromètre, courant, signal d'un demi-pont/pont complet de jauges, thermocouple, résistance et etc.) en temps réel. Elle est donc utilisée pour acquérir l'ensemble des mesures des

composantes du tenseur des actions mécaniques (**Figure 3.9**). Ces informations permettront d’analyser le comportement de la lame durant la découpe et l’évolution de son usure.



**Figure 3.9**-Mesure des six composantes du tenseur des actions mécaniques (*données confidentielles supprimées*).

La suite de ce chapitre détaille le protocole expérimental mis en place pour étudier l’évolution des efforts en fonction des paramètres de coupe et de l’usure de la lame.

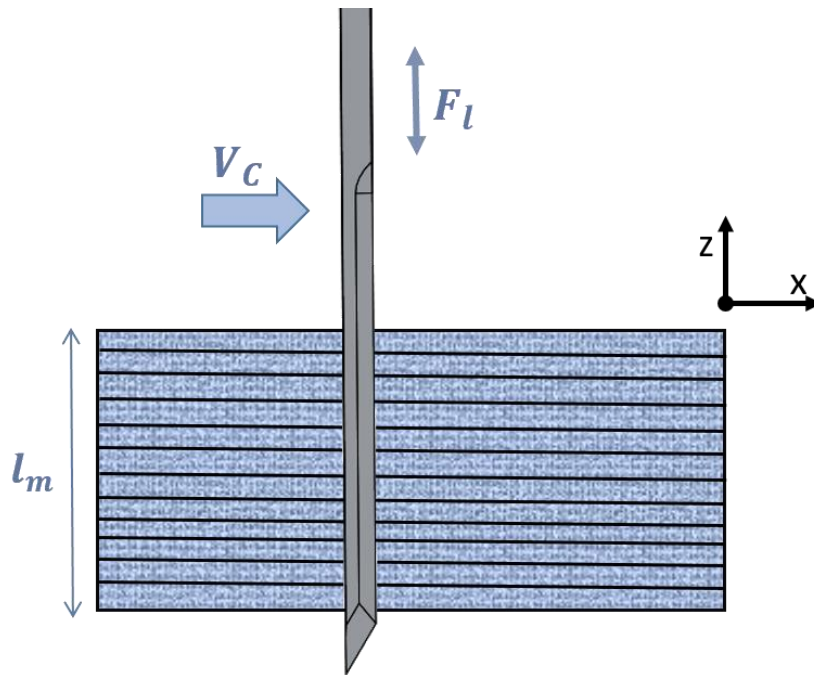
**3.3 Conditions d’essais**

Compte tenu des faits observés dans le chapitre précédent et en se basant sur les résultats de la littérature (*Cosson-Coche 2017*), l’étude portera sur 4 facteurs : (*données confidentielles supprimées*).

Le **Tableau 3.1** répertorie les différents niveaux des paramètres choisis.

<i>données confidentielles supprimées</i>			<i>données confidentielles supprimées</i>		<i>données confidentielles supprimées</i>		<i>données confidentielles supprimées</i>		<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>

**Tableau 3.1**-Configurations de coupe (*données confidentielles supprimées*).



**Figure 3.10-Paramètres de coupe.**

Pour assurer de bonnes conditions de coupe, toutes les lames sont préalablement affûtées et contrôlées afin d'obtenir la même géométrie de coupe initiale. Les conditions d'affûtage sont choisies en amont en fonction des différents matériaux utilisés. Le **Tableau 3.2** liste les différentes conditions d'affûtage utilisées. Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

<i>données confidentielles supprimées</i>		<i>données confidentielles supprimées</i>				<i>données confidentielles supprimées</i>	
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>
<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>	<i>données confidentielles supprimées</i>

**Tableau 3.2-Paramètres d'affûtage des lames de coupe et topographie obtenue (*données confidentielles supprimées*).**



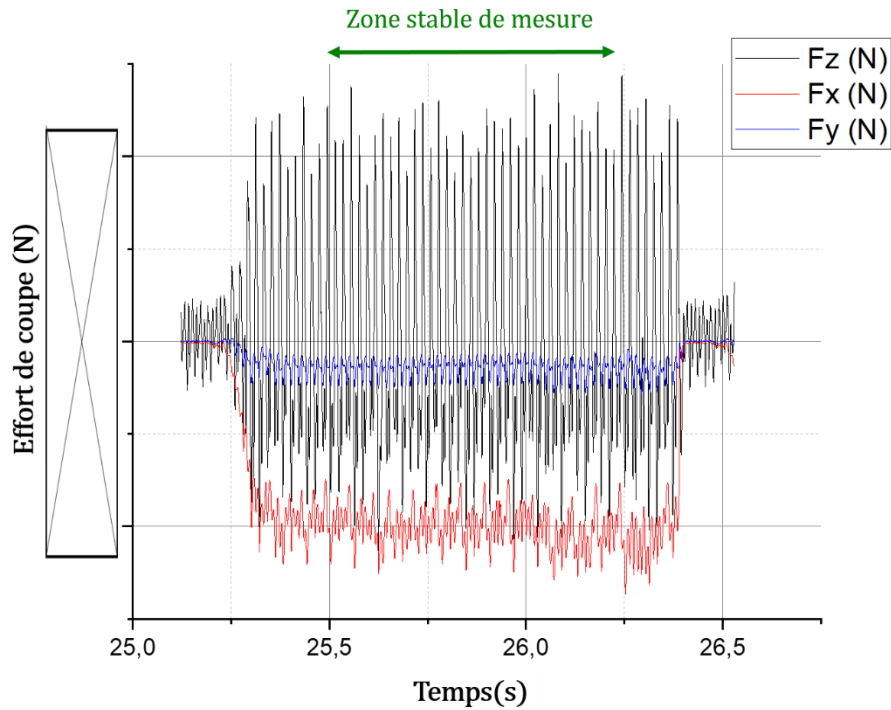
Pour chaque essai, la mesure du torseur des actions mécaniques s'effectue sur une coupe de 500 mm de longueur afin de vérifier l'évolution de la topographie de la lame. Les observations du fil tranchant sont effectuées à l'aide d'un microscope numérique VHX-7000 (*Keyence*) pour mesurer (*données confidentielles supprimées*).

Les informations sur les composantes du torseur des actions mécaniques sont extraites de la zone stabilisée de découpe (**Figure 3.9**). Il est à noter aussi que l'acquisition des données a été réinitialisée après chaque passage de la lame dans le matelas de tissu afin d'annuler un décalage (offset) du signal. Un nouveau matelas de tissu a été utilisé pour chaque essais. Ce choix permet d'obtenir un environnement de coupe identique pour tous les essais de coupe. Concernant la découpe et la préparation des matelas de tissu, un matelasseur industriel, présenté dans le paragraphe 1.2.2 (cf. le chapitre 1) a été utilisé. L'annexe (*Annexe A.5*) montre l'emplacement du matelas sur la table de travail du découpeur textile.

### **3.4 Mesure du torseur des actions mécaniques**

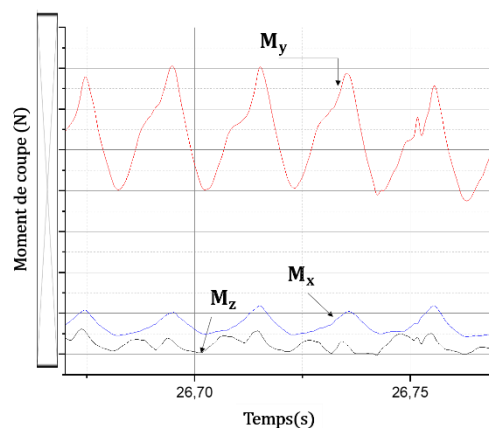
L'objectif de cette section est d'analyser les résultats de mesure des efforts et des moments de coupe issues des essais expérimentaux. L'intérêt est donc désormais d'analyser en détail l'évolution de chaque composante du torseur en fonction des paramètres de coupe et de la topographie du fil tranchant. Cela permet de suivre l'état de la lame et son pouvoir coupant.

Un relevé des efforts et des moments de coupe (**Figure 3.11**) montre que la phase stable de mesure est remarquable à plusieurs titres :



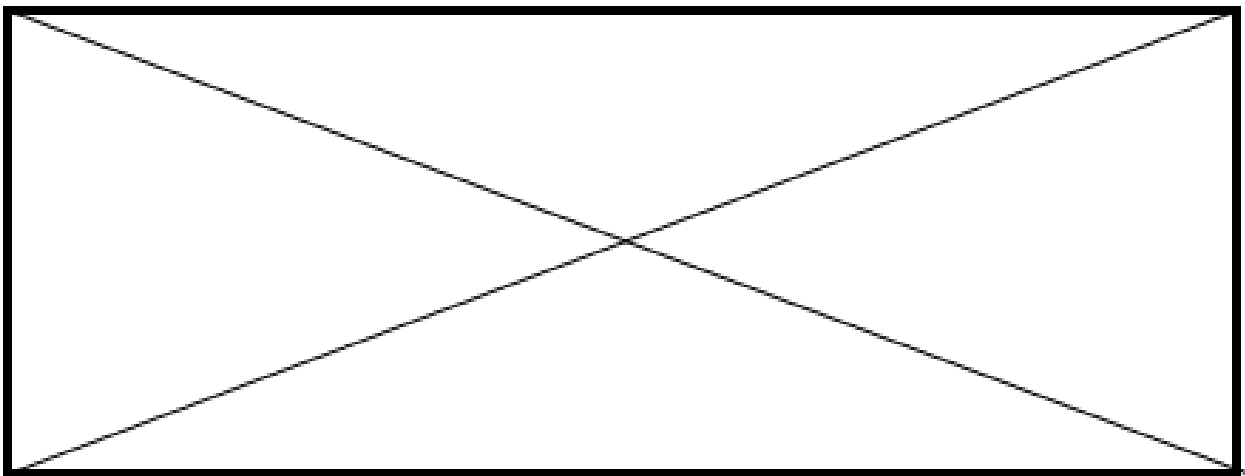
**Figure 3.11**-Tracés des efforts et des moments de coupe.

- Les efforts ( $F_x, F_y$ ) ont une valeur moyenne non nulle et de forme sinusoïdale avec une fréquence égale à la fréquence de vibration de la lame.
- Les moments suivants ( $M_x, M_y$  et  $M_z$ ) ont une valeur moyenne non nulle et ils sont de forme sinusoïdale due au mouvement d'oscillation de la lame, comme le montre la **Figure 3.12**. La fréquence du signal est égale à la fréquence de vibration de l'outil coupant.



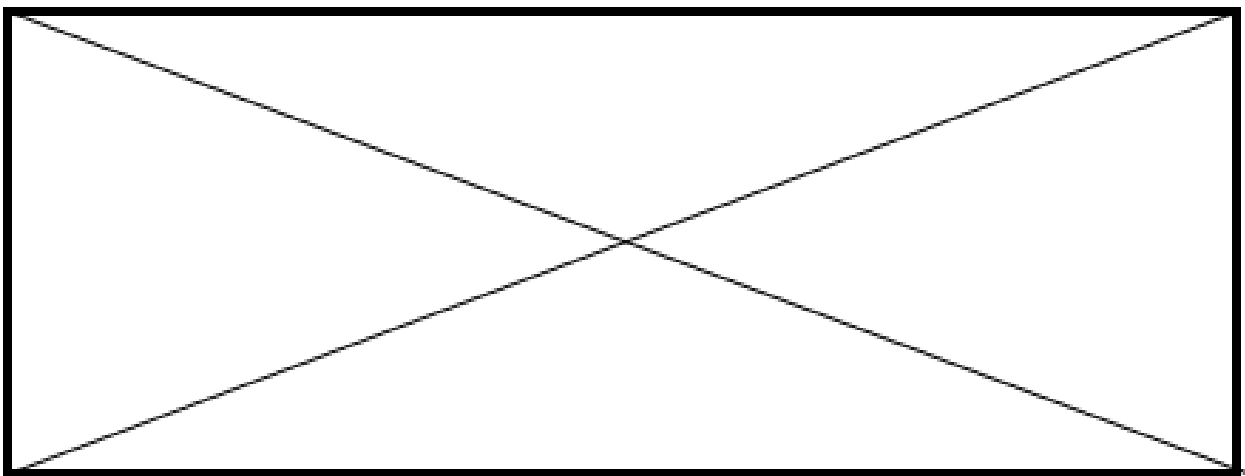
**Figure 3.12**-Signaux des moments de coupe pour une opération de découpe

- L'effort  $F_z$  est très sensible à la cinématique de coupe. L'effort vertical est nul aux points mort haut et bas parce qu'il n'y a pas de frottement entre la lame et la matière. Le signal de l'effort  $F_z$  oscille en suivant les mouvements de la lame, comme le montre la **Figure 3.13**. Il est important de noter qu'il existe une dissymétrie de l'effort mesuré (entre la montée et la descente de la lame). Ceci est à mettre en relation avec la réaction de la table à la descente et du système d'aspiration à la montée provoquant un mouvement oscillatoire non symétrique (vitesse de la lame différent à la descente et à la montée pour une vitesse d'avance constante).



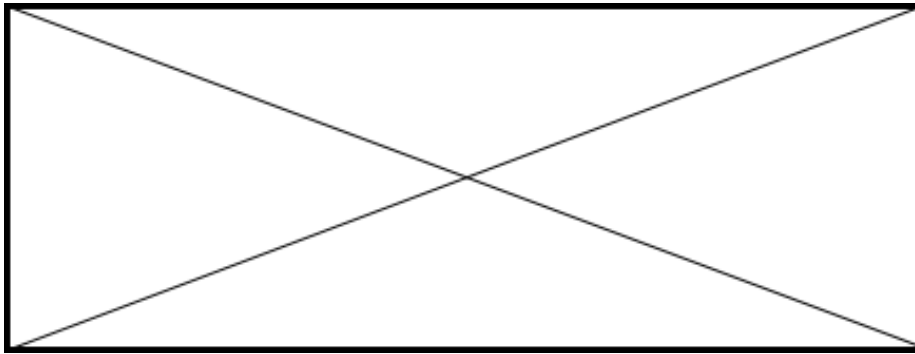
*Figure 3.13-Signaux des efforts de coupe vertical  $F_z$  et frontal  $F_x$  pour une opération de découpe (données confidentielles supprimées).*

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.



*Figure 3.14-Évolution de l'amplitude de l'effort vertical  $F_z$  en fonction de la longueur de coupe parcourue par la lame (données confidentielles supprimées).*

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

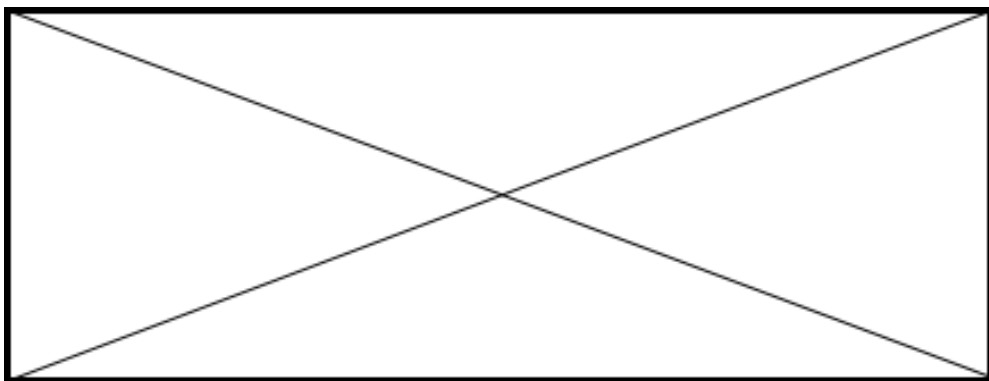


**Figure 3.15-** Évolution des efforts de coupe appliqués sur une lame de coupe en ASP2053 ( $V_c = 40 \text{ m. min}^{-1}$ ;  $F_l = 50 \text{ Hz}$ ) (données confidentielles supprimées).

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

Il est important de noter que la découpe des trajectoires rectilignes (*Annexe A.5*) ne sollicite pas la lame en flexion. L'évolution de l'effort latéral de coupe  $F_y$  est alors négligeable par rapport aux autres composantes mesurées.

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

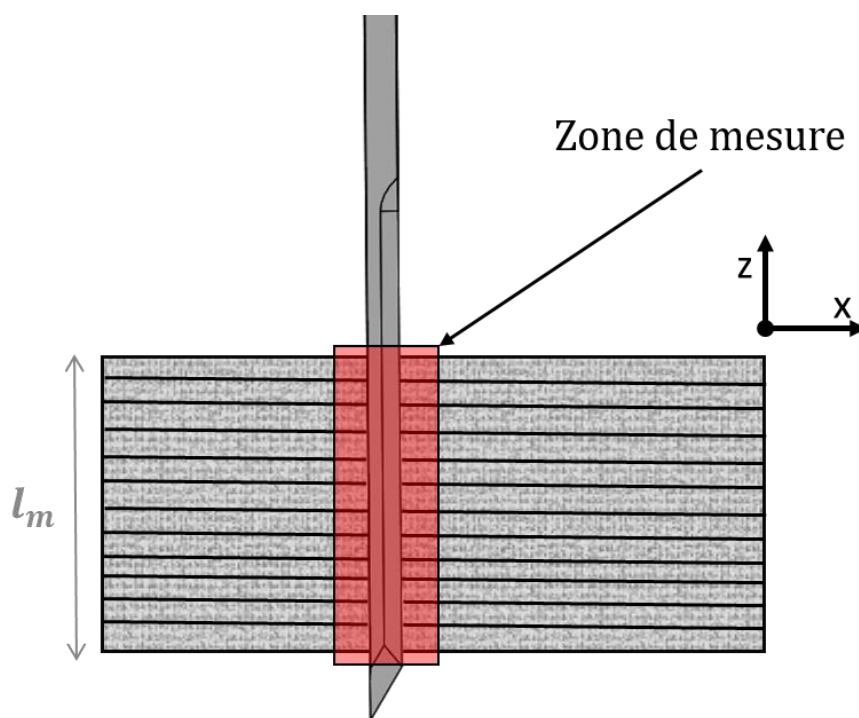


**Figure 3.16-** Évolution des moments de coupe appliqués sur une lame de coupe en ASP2053 ( $V_c = 40 \text{ m. min}^{-1}$ ;  $F_l = 50 \text{ Hz}$ ) (données confidentielles supprimées).

### 3.5 Évolution des composantes du torseur mécanique

La mesure des six composantes du torseur des actions mécaniques permet d'étudier la découpe des matériaux textiles d'un point de vue « torsorien ». Le comportement de la lame coupante est alors défini par l'évolution des efforts et des moments de coupe en fonction des paramètres d'entrée (les paramètres de coupe et la géométrie de la lame). Cette approche consiste à établir des corrélations entre les paramètres topographiques de la lame et les composantes torsorielles.

Comme on a pu le constater précédemment (cf. paragraphe 2.4.2-b), les efforts de coupe évoluent en fonction de l'état du fil tranchant. Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.



**Figure 3.17**-Zone de mesure des paramètres topographiques de la lame.

Les caractéristiques topographiques du fil tranchant sont mesurées systématiquement après chaque découpe. La lame suit alors le cycle suivant :

- Affûtage initial de la lame. Il est réalisé une seule fois au début de l'essai de coupe (cf. **Tableau 3.2**).
- Découpe d'un matelas de *denim* avec mesure du torseur des actions mécaniques pour chaque passage de 500 mm de longueur.
- Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

Plusieurs cycles de découpe sont enchainés jusqu'à atteindre une longueur de coupe totale égale à 10000 mm (selon le retour d'expérience des utilisateurs de découpeur textile, c'est la longueur maximale de découpe dans un matelas de *denim* avant réaffûtage de la lame).

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

### 3.5.1 Évolution de l'effort vertical de coupe $F_z$

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

### 3.5.2 Évolution du moment de coupe $M_y$

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

## 3.6 L'axe central

### 3.6.1 Définition

Les notions de glisseur et de torseur couple sont directement liées aux travaux menés au début du siècle précédent sur l'outil mathématique « torseur » (*Stawell Ball 1900, Laporte 2005*). A tout torseur il est possible d'associer un axe central (exception faite des torseurs couple purs), objet unique calculé à partir des six composantes du torseur (**Figure 3.29**). L'axe central est une droite définie par un point de réduction et une direction. O est le point où le torseur des actions mécaniques a été déplacé (pointe de l'outil) et P est le point courant décrivant l'axe central. OP est le vecteur associé au bipoint [O, P]. Cette droite correspond au lieu où le moment du torseur des actions mécaniques est minimum. Le calcul de l'axe central revient donc à déterminer l'ensemble des points (une droite) où le torseur peut être exprimé en fonction d'un glisseur (la direction de la droite) et un torseur couple pur (**Équation 3.7**).

L'introduction de l'axe central permet de synthétiser l'ensemble des informations (les six composantes du torseur des actions mécaniques) en une entité caractéristique de l'état de la lame durant la découpe du tissu.

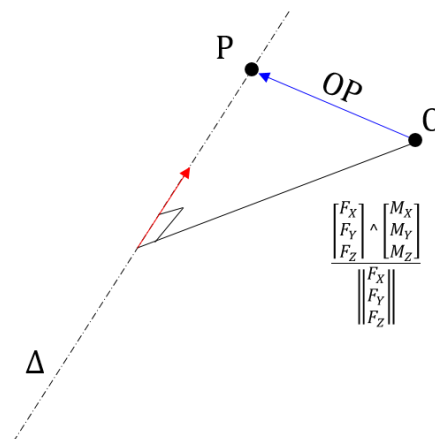


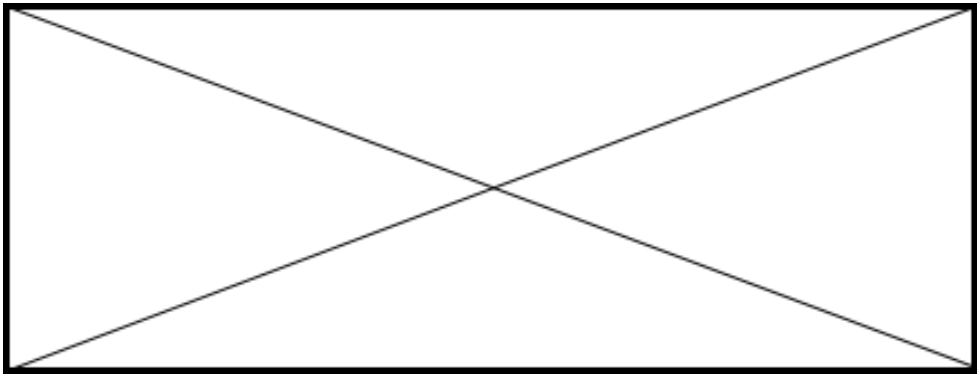
Figure 3.18-Représentation de l'axe central.

$$OP = \frac{\begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} M_X \\ M_Y \\ M_Z \end{bmatrix}}{\left\| \begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix} \right\|} + \alpha \begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix} \quad 3.7$$

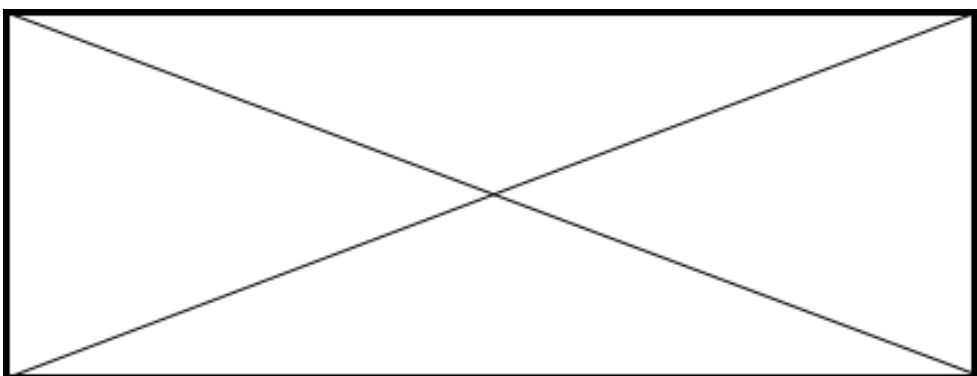
### 3.6.2 Évolution de l'axe central

L'axe central est calculé pour chaque point de mesure durant la découpe. Les efforts et moments de coupe ont des signaux sinusoïdaux de fréquence égale à la fréquence de vibration de la lame. En réalité, les signaux en x et les signaux en y ne sont pas en phase. Cela engendre des composantes tournantes du torseur des actions mécaniques (efforts et moments). Par conséquent, l'axe central est incliné et non concourant par rapport à l'axe de vibration de la lame.

La présence des efforts de coupe tournants (**Figure 3.30**) durant un cycle de montée et de descente de la lame implique que le point courant P décrit une forme « elliptique ». Les efforts de coupe cycliques génèrent une évolution cyclique de l'axe central par rapport à l'axe vertical de mesure. Les axes centraux génèrent ainsi une gerbe prenant la forme d'un hyperboloïde de révolution. Une telle observation a été notée dans la littérature dans le cas de l'opération de perçage (*Laporte 2005*). La **Figure 3.31** présente de la distribution des axes centraux pour un cycle de montée et descente de la lame.



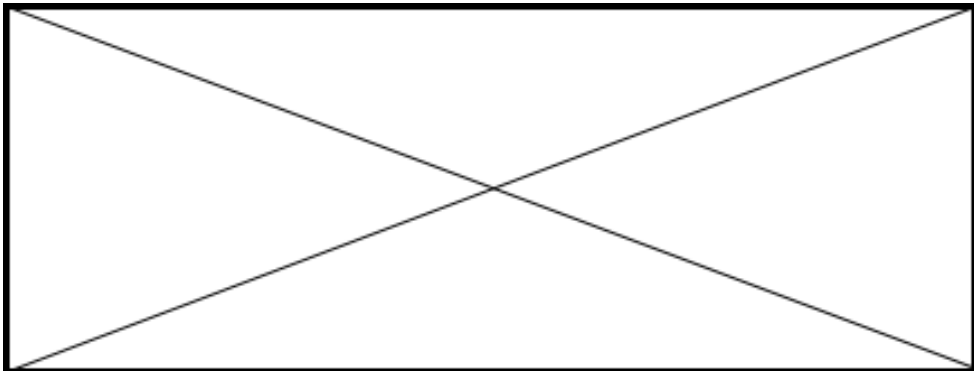
*Figure 3.19-Efforts de coupe tournants ( $F_x$  et  $F_y$ ) (données confidentielles supprimées).*



*Figure 3.20-Schéma de la distribution des axes centraux suivant un hyperboloïde de révolution pour un cycle de montée et descente de la lame (données confidentielles supprimées).*

Les composantes d'actions mécaniques évoluent en fonction de l'usure du fil tranchant et de la dégradation du pouvoir coupant de la lame. L'évolution des efforts et des moments de coupe entraîne

une évolution du glisseur (la direction de l'axe central) du torseur des actions mécaniques. Les axes centraux suivent alors la direction de la résultante des efforts. La **Figure 3.32** présente la direction de la droite de l'axe central par rapport aux axes de mesures (X, Y, Z).



*Figure 3.21-Repère de l'étude (données confidentielles supprimées).*

**Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.**

### 3.7 Conclusion

L'étude du torseur des actions mécaniques permet, lors de la découpe des textiles, d'établir des corrélations entre les paramètres définissant la qualité du fil tranchant de la lame (géométrie et état de surface) et les composantes des efforts de coupe  $F_z$  et  $F_x$ . Cependant, les analyses de corrélation montrent que les paramètres torsoriels pris individuellement ne sont pas suffisants pour caractériser l'état d'usure de l'outil de coupe.

L'utilisation de l'axe central associé au torseur des actions mécaniques permet de qualifier précisément l'aptitude de la lame à découper. En étudiant l'évolution des six composantes torsorielles, il est apparu que l'inclinaison verticale de l'axe central présente une forte corrélation avec (*données confidentielles supprimées*). Ces constatations sont valables pour les différentes conditions de coupe utilisées. Il s'avère que l'inclinaison verticale de l'axe central est un marqueur significatif de la santé du fil tranchant de la lame.

**Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.**



# Conclusion générale

Cette thèse contribue à la compréhension des mécanismes intervenant lors de la découpe des matériaux textiles et de l'affûtage de lames de coupe vibrantes pour apporter une amélioration au fonctionnement des machines de découpe industrielles. Une instrumentation originale et conséquente du découpeur a été développée pour caractériser les grandeurs mécaniques présentes dans la zone de coupe. Elle a permis d'étudier la découpe d'un tissu, de caractériser des pratiques industrielles du type empirique comme l'affûtage de la lame et d'identifier les conditions opératoires optimales.

Le premier chapitre présente les bases de l'étude en décrivant le procédé spécifique de la découpe textile. Le processus complet de la découpe d'un matelas de tissu est alors décrit : le matelassage, le maintien en position par aspiration du matelas et la découpe par l'action simultanée de la vibration de la lame et de son avance. Les propriétés mécaniques et physiques du textile *denim* sont présentées.

Dans ce domaine d'application, les problématiques de découpe textile sont nombreuses. La dégradation du pouvoir coupant de la lame oblige la machine à interrompre son travail pour affûter le tranchant de la lame. La famille des aciers rapides supérieurs utilisée pour fabriquer les lames est présentée ainsi que leur particularité microstructurale.

Les lames de coupe affûtées doivent répondre à des exigences fonctionnelles en liaison avec la tribologie de contact, la topographie de surface, etc. Ces critères sont en relation étroite avec l'opération de découpe d'un tissu à savoir la qualité des pièces découpées. Dans l'optique de répondre aux besoins industriels et de faire face aux problématiques d'affûtage des différentes nuances HSS, non résolues dans l'entreprise Lectra, il a été nécessaire d'étudier l'impact du procédé d'affûtage sur la géométrie de l'outil coupant. Cette étude fait l'objet du deuxième chapitre et se base sur des connaissances de la physique de l'abrasion à l'échelle globale mais également sur l'étude des paramètres du procédé influençant l'intégrité de surface.

Le deuxième chapitre présente l'étude de l'affûtage des lames de coupe en aciers rapides supérieurs. Un banc d'essai a été développé et implanté sur une machine de découpe industrielle. Une démarche expérimentale a été mise en place afin de répondre à la problématique d'affûtage. Les conditions d'affûtage comme : les vitesses de défilement des bandes abrasives, le temps d'affûtage, la pression ont été balayées pour déterminer leur influence sur la qualité du fil tranchant. L'influence des conditions d'affûtage sur la topographie des surfaces affûtées a été mise en évidence grâce à une multitude de mesures directes (simultanément avec le processus d'affûtage) et en post-traitement (sur les surfaces des lames générées par l'affûtage) faisant appel à plusieurs techniques expérimentales :

- La mesure des efforts d'affûtage.
- La création des modèles 3D du profil de coupe de la lame à partir des observations au microscope numérique.
- La mesure des topographies de la surface affutée par un microscope numérique.
- Les analyses microstructurales des matériaux de lames en utilisant le polissage et l'attaque chimique avec la microscopie optique et la microscopie électronique à balayage.

Des méthodes statistiques ont été mises en œuvre pour établir les liens entre les paramètres d'affûtage et la topographie finale des lames affutées. Elles ont permis d'expliquer des phénomènes ayant lieu suite à l'affûtage et de comparer la qualité d'affûtage des lames induites par les différentes configurations d'affûtage.

Différents types de bandes abrasives ont été testés afin de mettre en évidence l'interaction entre la nature de ces derniers et la microstructure des nuances HSS.

De cette étude expérimentale, les conclusions suivantes peuvent être retenues :

- À partir du plan d'expériences, on a pu préciser les effets et les interactions les plus significatifs des paramètres opératoires d'affûtage sur la topographie de surface des lames.
- (Données confidentielles supprimées).
- (Données confidentielles supprimées).
- On note aussi qu'en rectification des lames de coupe vibrantes, les paramètres opératoires n'agissent pas d'une façon indépendante mais leurs impacts sur la qualité finale de la lame affutée sont conditionnés par leurs interactions.
- Pour l'étude de l'effort d'affûtage, le plan d'expériences utilisé a conduit à un aperçu de l'impact des différents paramètres du procédé sur son évolution. (Données confidentielles supprimées).
- Les résultats expérimentaux montrent que les abrasifs classiques ont très rapidement perdu leur pouvoir abrasif. (Données confidentielles supprimées).
- La suite de ce chapitre est consacrée à l'analyse de l'effet du temps d'affûtage sur la qualité finale du fil tranchant affuté. (Données confidentielles supprimées).

Nous avons identifié les configurations optimales des paramètres d'affûtage pour chaque plage d'usure de bande abrasive.

Le troisième chapitre a fait l'objet d'une analyse des composantes du torseur d'actions mécaniques durant la découpe d'un matelas de tissu avec des lames initialement affûtées. Dans un premier temps, les différents moyens utilisés dans la mesure des actions de coupe ont été décrits. Un dynamomètre à base de jauges de déformation a été implanté sur une pièce maîtresse de la machine de découpe (le pied presseur) offrant la possibilité de mesurer des efforts et les moments de coupe suivant cinq axes. En complément, d'autres capteurs d'efforts ont été installés sur la machine ; notamment le capteur d'effort uni-axial pour mesurer l'effort vertical de coupe.

Cette instrumentation inédite d'un découpeur textile permet d'étudier le comportement de la lame durant la découpe de textile et de caractériser les actions mécaniques inhérentes à la coupe en fonction de l'état de la lame et de l'usure de son fil tranchant.

Compte tenu du faible nombre de recherches sur la coupe de tissus, il a été convenu de choisir une démarche empirique pour ces travaux de thèse et de la centrer sur la découpe d'un seul tissu. Le troisième chapitre livre les résultats et les analyses obtenus à partir des essais de coupe d'un matelas de coupe de *denim*. Tout d'abord, les premiers essais de coupe ont mis en évidence l'évolution de l'effort vertical de coupe en fonction de l'usure du fil tranchant de la lame. (*Données confidentielles supprimées*). Nous avons donc identifié, grâce aux essais expérimentaux, le mode et le type d'usure des lames de coupe. L'étude a permis d'identifier l'évolution de l'effort vertical à partir des informations données par les jauges de déformation du dynamomètre. (*Données confidentielles supprimées*).

La prise en compte de l'ensemble des composantes du torseur des actions mécaniques de découpe a montré qu'il existe des relations entre l'évolution du torseur et l'aptitude de la lame à couper.

Afin de simplifier l'analyse, il apparaît que l'axe central du torseur des actions mécaniques permet d'identifier le comportement de la lame pendant la phase de découpe. Jusqu'à présent, dans la littérature, la problématique de découpe textile est rarement abordée sous l'angle des efforts de coupe et elle ne l'a jamais été suivant une approche torsorielle. Ce travail a pu mettre en évidence les fortes corrélations qui existent entre la santé de la lame de coupe et l'inclinaison de l'axe central sur un cycle de vibration de la lame.

**Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.**



# Perspectives

Cette étude, au champ d'investigation large, ne peut prétendre avoir couvert exhaustivement les différents aspects de la découpe du textile. Ce travail de thèse est une contribution qui donne lieu à de nombreuses perspectives.

L'étude de l'axe central dans le cas de découpe textile par une lame vibrante a permis d'identifier un marqueur fiable du pouvoir coupant de la lame. Cependant, il faudrait poursuivre les travaux afin d'obtenir un outil complet. Tout d'abord, il faut établir si les conclusions relatives à la découpe de *denim* sont généralisables au cas de découpe d'autres matériaux textiles. La découpe de *denim* n'est pas identique à la coupe de la toile ou du vinyle, encore moins les mousses ou le matériau textile stratifié (matériau élaboré à partir de plusieurs couches de matière textile assemblées avec une résine). 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. Les conclusions de l'étude devraient alors être étendues à un panel plus vaste de couple lame/tissu afin de valider la démarche. Pour atteindre cet objectif, une étude complémentaire est à mettre en route. Il faut étudier l'influence des propriétés physiques et mécaniques des matériaux textiles sur l'évolution des paramètres caractéristiques de l'axe central.

Cette étude a été élaborée dans un environnement macroscopique. Une nouvelle approche multi-échelle permettra de comprendre davantage les phénomènes en jeu, notamment les conditions de contact entre la lame et le tissu ainsi les actions thermomécaniques des matériaux textiles pouvant modifier le comportement de la découpe.

Des essais de coupe en utilisant des placements réels et industriels, au lieu d'une simple trajectoire rectiligne, sont nécessaires pour étendre la méthode à des trajectoires complexes. La méthodologie proposée dans cette étude et la réactivité des moyens de mesures seront vérifiées dans le cas d'une découpe des pièces réelles.

**Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.**



# Bibliographie

## A

---

- (Almen and Black 1966)* Basic theories relating to fatigue in metals. Metal engineering Chart, vol. 6, p. 9– 15, 1966.
- (Albert, 2010)* Identification et modélisation du torseur des actions de coupe en fraisage, Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, N° d'ordre 4152, 2010.
- (Alexis 1995)* Pratique industrielle de la méthode Taguchi. AFNOR, 1995.
- (Ajayi 1992)* Fabric Smoothness, Friction and Handle, Textile Research Journal, 1992.

## B

---

- (Badger 2007)* Grindability of Conventionally Produced and Powder-Metallurgy High-Speed Steel. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 56, p.353–356.
- (Ben fredj 2009)* Effects of abrasive type cooling mode and peripheral grinding wheel speed on the AISI D2 steel ground surface integrity. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 49, p.261–272, 2009.
- (Benoist 1994)* Plans d'expériences : construction et analyse, Lavoisier – Tec & Doc, Paris, 1994.
- (Bhushan 1991)* Handbook of tribology: materials, coatings, and surface treatments, p. 1088. 1991.
- (Blekač 1998)* Influence of Mechanical and Physics properties of fabrics on cutting process, International Journal of Clothing Science and Technology, vol. 10, no 3/4, p. 293-304, 1998.
- (Boccalini 2002)* Microstructure and wear resistance of high speed steels for rolling mill rolls. 6th International Tooling Conference, p. 425–437. 2002.
- (Boz, 2010)* An investigation on the Cutting parameters for various types of fabrics, Tekstil ve Konfeksiyon, vol. 22, no 1, p. 52-57, janv. 2012
- (Brient et al 2012)* Influence of the grinding parameters on the service life of glass

work pieces. MUGV –Intercut, 2012.

*(Brosse 2009)*

Modélisation expérimentale et numérique des effets induits par la rectification, Application à la rectification haute productivité, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, N° d'ordre 527 MI, 2009.

## C

---

*(Chang-Jun 1994)*

An investigation of the role of secondary carbide in martensitic steel during three-body abrasion wear, *Wear*, vol. 176, p. 103–109, 1994.

*(Couétard, 1993)*

Capteur de force à deux voies et application notamment à la mesure d'un torseur de forces, Brevet No. 93403025.5, 1993.

*(Cosson-Coche 2017)*

Étude de la découpe de matériau en feuille souple par lame vibrante, Thèse de doctorat, NNT 2017BORD0020, Université de Bordeaux, 2017.

## D

---

*(Dumont 2007)*

La mesure des déformations pour l'étude du comportement et la mise en forme des renforts de composites. Congrès français de mécanique. AFM, Maison de la Mécanique, hal-03360347, 2007.

## E

---

*(Erasteel)*

<https://www.erasteel.com>.

## F

---

*(Falkenberg 1996)*

Tönshoff HK, Falkenberg Y (1996) High-speed grinding of cast iron crankshafts with CBN tools. *IDR (engl.)*, p. 115–119, 1996.

*(FEPA 1955)*

<https://fepa-abrasives.org/>.

## G

---

*(Gahr 1988)*

Modelling of two-body abrasive wear, *Wear*, vol. 124, p. 87-103,



1988.

*(Grandguillaume 2015)*

Optimisation de la fabrication de moule: une approche globale des procédés de fraisage et de polissage, 14eme colloque national AIP Primeca, 2015.

*(Guo 1999)*

Temperatures and Energy Partition for Grinding with Vitrified CBN Wheels. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 48, p. 247–250, 1999.

## H

---

*(Hahn 1956)*

The relationship between grinding conditions and thermal damage in the workpiece. Transactions of the ASME 78:807–810. 1956.

*(Hamdi 2000)*

Contribution à l'étude de la physique de l'interface meule-pièce dans le cadre de la rectification conventionnelle et à grande vitesse, Ecole Centrale de Lyon, NNT 2000ECDL0039, 2000.

*(Hokkirigawa 1988)*

An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear. Tribology International, vol. 21, no 1, p. 51–57. 1988.

*(Huth 2009)*

Development of wear and corrosion resistant cold-work tool steels produced by diffusion alloying. Wear, vol. 267, p. 449–457, 2009.

*(Hwang 2003)*

Measurement of temperature field in surface grinding using infra-red (IR) imaging system. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, vol. 125, p. 377–388, 2003.

## K

---

*(Kawabata 1996)*

Effect of Mechanical and Physical Properties on Fabric Hand, Elsevier.

*(Kienzle 1952)*

Die bestimmung von kräften und leistungen an spanenden werkzeugmaschinen. VDI-Z 94, p. 299–305, 1952.

*(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, no 8, p. 925-937, 1996.

*(Kim 1999)*

Indirect cutting force measurement in multi-axis simultaneous NC milling processes, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 39, no 11, p. 1717-1731, nov. 1996.

*(Krishna 2011)*

Determination and optimization of cylindrical grinding process parameters using taguchi method and regression analysis. International Journal of Engineering Science and Technology vol. 3, p. 5659–5665, 2011.

- (*Konig 1981*) Influence of the composition and structure of steels on grinding process. CIRP Annals - Manufacturing Technology, p. 547–552, 1981.
- (*Kozo et al 1982*) Effects of grain refining of carbides on the grindability of high-vanadium high speed steel. The 25th Congress on Materials-Research-Metallic Materials, p. 171–176, 1982.
- (*Kvasnicka 1975*) Grindability of Tool Steels from the Viewpoint of Surface Quality, 16th MTDR-Conference, vol. 5. P. 361-365, 1975.

## L

---

- (*Lacharnay 2010*) Optimisation d'une gamme de polissage sur moçn 5 axes, Intercut 2010 – 6ème Assises MUGV, 2010.
- (*Laporte 2005*) Comportement et endommagement de l'outil en perçage à sec : applications aux assemblages aéronautiques, Université de Bordeaux, NNT 2005BOR13088, 2005.
- (*Laval 1998*) Étude théorique et expérimentale de l'indentation des matériaux élastoplastiques homogènes ou revêtus. Application à la mesure de la rhéologie et de l'adhérence des films minces, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, NNT 1998ENMP0544, 1998.
- (*Lévêque 2004*) Aciers à outils. Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, vol. 330, p. 2–42, 2004.
- (*Lévêque 2013*) Aciers à outils: mise en œuvre. In : Techniques de l'ingénieur. M4587, 2013.
- (*Ligier 2004*) Avaries en lubrification: application aux paliers, TECHNIP, 2004.
- (*Limido 200*) Modélisation numérique de la Coupe Orthogonale en UGV, Colloque National MECAMAT, Université de Toulouse, 2005.
- (*Lynda 2009*) Modélisation et simulation de la coupe orthogonale en utilisant un code de calcul par la méthode des éléments finis, Thèse de doctorat, NNT 2008/DM, Université de Batna 2, 2009.

## M

---

- (*Marty 2004*) Simulation numérique de l'usinage par outil coupant à l'échelle macroscopique : contribution à la définition géométrique de la surface usinée, NNT 2003ENAM0008, Arts et Métiers ParisTech,

2003.

- (McLean and Anderson 1984)* Applied factorial and fractional designs. M.Dekker, New York, 1984.
- (Merchant 1945)* Basic mechanics of the cutting process, ResearchGate, vol. 11, p. 168-175, janv. 1944.
- (Mebarki 2003)* Relation microstructure - propriétés mécaniques d'aciers martensitiques revenus destinés aux outillages de mise en forme d'alliages légers, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, p. 181-217, NNT 2003ENMP1124, 2003.
- (Motorcu 2010)* The Optimization of Machining Parameters Using the Taguchi Method for Surface Roughness of AISI 8660 Hardened Alloy Steel. Journal of Mechanical engineering, vol. 56, p.391–401, 2010.
- (Murthy et al. 2000)* Studies on the grindability of some alloy steels. Journal of Materials Processing Technology, vol. 104, p.59–66, 2000.

## N

---

- (Norton 1963)* Norton SA (ed), La rectification, p.336, 1965.

## O

---

- (Outeiro 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, no 14, p. 1786-1794, nov. 2006.
- (Outwater 1952)* Surface temperatures in grinding. Transactions of ASME, vol.74, p. 73–86, 1952.

## P

---

- (Prasad 1983)* A study of carbide removal mechanisms during quartz abrasion :I In situ scratch test studies. Wear, vol. 92, p.253–268, 1983.

# R

---

*(Rissanen 2013)* Zero-waste fashion design: a study at the intersection of cloth, fashion design and pattern cutting, Phd Thesis, 2013.

# S

---

*(Sallem 2014)* Étude de l'aptitude à la rectification des aciers rapides supérieurs. Application aux cylindres de laminage des alliages d'aluminium, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, NNT 2014ENISE0024, 2014.

*(Schimmerling 1998)* Pratique des plans d'expériences, Edition Lavoisier Paris Tec et Doc, 1998.

*(Shetty et al. 1982)* A study of abrasive wear mechanisms using diamond and alumina scratch tests. *Wear*, vol. 80, p. 347–376, 1982.

*(Shin 2008)* Generalized practical models of cylindrical plunge grinding processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, p.61–72, 2008.

*(Shizhong 2006)* Investigation on wear behaviors of high-vanadium high-speed steel compared with high-chromium cast iron under rolling contact condition. *Materials Science and Engineering*, vol. 434, p. 63–70, 2006.

*(Stawell Ball 1900)* A treatise on the theory of screws, Cambridge: at the university press, 1900.

*(Sugihara 1998)* Stability limit of regenerative chatter in cylindrical plunge grinding-A proposal of the practical stability limit equation. *JSPE*, Vol. 46-2, p. 201–206, 1998.

# T

---

*(Tanguy 1985)* Rectification:Connaissances de base et données pratiques, 1985.

*(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, 2008.

# V

---

- (Vazquez 2014)* Cutting Force Modeling, CIRP Encyclopedia of Production Engineering, Éd. Springer Berlin Heidelberg, p. 315-329, 2014.
- (Vilumsone-Nemes, 2012)* Industrial Cutting of Textile Materials, 1 edition. Oxford, Philadelphia: Woodhead Publishing, 2012.
- (Vu Thi 2005)* Effect of Friction on Cut Resistance of Polymers, Journal of Thermoplastic Composite Materials, vol. 18, p. 23-35, 2005.

# W

---

- (Wei 2006)* Research on wear resistance of high speed steel with high vanadium content, Materials Science and Engineering, vol. 404, p. 138–145, 2006.
- (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, p. 641-648, 2003.
- (Wong 2004)* Genetic Optimization of JIT Operation Schedules for Fabric-cutting Process in Apparel Manufacture, Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 17, p. 341-354, 2004.

# Y

---

- (Yousfi 2015)* Modélisation thermomécanique 3D en fraisage, Université de Bordeaux, 2015.

# Z

---

- (Zhang 2007)* A revisit to some wheel – workpiece interaction problems in surface grinding, vol. 2, p. 905–913, 2007.
- (Zhang 2020)* An investigation on grinding mechanism of alumina ceramic using a grooved grinding wheel with inclined cross section, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol, 111, p. 2391–2399, 2020.
- (Zhao 1998)* Effects of vanadium and a matrix hardness on wear resistance and

grindability of general high speed steel., CISRI. China, p. 408–414, 1998.



# Annexe

## Annexe A.1 : cycle d'affûtage

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

## Annexe A.2 : plans d'expériences

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

## Annexe A.3 : dessin de définition des lames de coupe

Cette partie fait référence à des données et des résultats confidentiels. Aussi ils ont été supprimés.

## Annexe A.4 : Étude mécanique du dispositif de mesure de l'effort vertical de coupe

Dans un premier temps, l'objectif est de déterminer l'effort d'ancrage nécessaire afin d'assurer le non-décollement du capteur entre (*données confidentielles supprimées*). À l'aide de la mesure indirecte des efforts de coupe par lecture des courant moteurs, l'effort de coupe vertical peut être évalué et est supposé inférieur à 400 N. Le couple de serrage minimal peut être calculé par l'équation 3.1 donnée par la norme NF E25-030-2 (NF E25 Afnor 2014).

$$T_{min} = F_{min} \left( \frac{P}{2\pi} + \mu(0.577d_2 + r_m) \right) \quad 3.1$$

Avec

- $T_{min}$  (N.m) le couple de serrage minimal.
- $F_{min}$  (400 N) la précharge requise minimale.
- $P$  (0.5 mm) le pas de filetage.
- $d_2$  (2.38 mm) le diamètre à flanc de filet de la vis.
- $r_m$  (5.5mm) le diamètre d'appui de l'écrou.

D'après les calculs, le couple minimal de serrage à appliquer doit alors être égal à 1.4 N.m. Le couple minimal mesurable par la clé dynamométrique numérique à disposition vaut 2.4 N.m. De ce fait, cette valeur de couple a été choisie pour fixer le capteur d'effort unidirectionnel au boîtier de vibration. Ce couple permet d'assurer le non-décollement du capteur lors du fonctionnement pour un effort de coupe maximal égal à 400 N.



### Annexe A.5 : Emplacement du matelas sur la machine de coupe

La **Figure A.1** montre les trajectoires rectilignes de coupe d'une lame vibrante dans un matelas du *denim*. La longueur totale de coupe réalisée par la lame dans le matelas est égale à 1000 mm. La découpe a été réalisée dans le sens des fils de trame.

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 tissu ayant pour effet de le rigidifier et de le maintenir en place durant la découpe.



*Figure A.1-Emplacement du matelas sur la machine de coupe*





**TITRE :****ÉTUDE DE L’AFFÛTAGE DES LAMES VIBRANTES ET ÉVOLUTION DE LEUR POUVOIR COUPANT DANS LE CADRE DE LA DECOUPE DE MATERIAUX TEXTILES SOUPLES.****Résumé :**

L’état de surface de la lame évolue au cours de leur service et surtout durant la coupe des matériaux abrasifs comme le denim. Les faces de la lame sont exposées à l’usure et elles perdent, au cours du temps, leur capacité à couper et leurs propriétés d’usage. Cette dégradation des performances de l’outil induit des défauts de qualité de coupe. Il est, de ce fait, primordial de restituer les performances de coupe de l’outil. Généralement, cela se fait par affûtage.

Les exigences en matière de qualité des pièces coupées, temps et performances de coupe rendent l’opération de l’affûtage plus en plus importante et délicate. A ceci s’ajoute le fort gradient de dureté des aciers rapides. Donc, l’aptitude à la rectification du matériau utilisé pour l’outil de coupe est un paramètres clé pour restituer les performances de la lame selon un cahier des charges défini.

Ainsi, l’objectif de cette recherche est de comprendre le mécanisme d’usure et de maîtriser la qualité de coupe et la productivité de la lame. Pour ce faire, il est nécessaire de définir les paramètres qui doivent conduire au réaffûtage et les conditions de contact géométrique ou micro-géométrique qui favorisent l’usure de l’outil. Une étude expérimentale conduira à une meilleure compréhension des phénomènes physiques engendrés par la coupe. L’approche scientifique a pour but de définir une démarche et un outils physiques pour étudier la relation entre les éléments de l’affûtage de la lame, l’usure et la qualité de coupe, en gardant à l’esprit les contraintes du milieu industriel. Cette étude permet de déterminer les paramètres qui caractérisent le comportement de la lame à la coupe. Les modèles expérimentaux permettent de caractériser l’usure et l’opération d’affûtage. Les objectifs principaux du projet sont : Établir une stratégie expérimentale pour étudier les effets de l’affûtage sur la lame (type d’abrasif, taille/orientation des grains, etc.) et d’étudier l’évolution de l’usure et les modes et types de dégradation de la lame.

**Mots clés :** Lame de découpe, matériaux textiles, usure de l’outil de coupe, affûtage et stratégie expérimentale.

---

**TITLE :****SHARPENING OF VIBRATING BLADES AND EVOLUTION OF THEIR CUTTING PERFORMANCES DURING THE CUTTING OF FLEXIBLE TEXTILE MATERIALS.****Abstract :**

Blade wear is an essential factor that influence textile cutting quality and precision and it is important to seek an appropriate method to predict the cutting tool conditions. In this study, the relationship between cutting force against the abrasive wear is studied and identified through the evolution of the roughness and the cutting edge radius, which provides a technical foundations for online

monitoring of the blade's wear conditions and cutting quality. Moreover, this study analyzes the sharpening conditions of three different HSS blade in order to regenerate the suitable tool's cutting edge. An instrumented sharpener was installed in an industrial textile cutter, in order to investigate the influence of the sharpening parameters and process time in the quality of the cutting edge.

This study analyzes the cutting conditions of superimposed plies of a flexible material "Denim" by a vibrating blade. To investigate the cutting performances of the tool, an experimental study have been performed to study the sharpening process of three different HSS blades. Hence, an industrial sharpener is equipped with numerous sensors, to assess the influence of the sharpening parameters on the resulting blade geometry. Next, we investigate the cutting behavior of textile material and the wear evolution of the blades through measuring the cutting efforts and controlling the tool geometries. The blade's vertical effort range has been found the most significant.

Yet, to investigate the performances of the cutting tool an experimental study about the blade sharpening process has been established. The blade is sharpened several times during the cut to regenerate its cutting ability. Hence, a sharpener is equipped with numerous sensors, to assess the influence of the sharpening forces on the resulting blade geometry. The factors affecting the blade's grindability were investigated by observing the grinding surfaces.

Generally, the cutting blades are made with high-speed steel, which has high wear resistance and hardness, making it particularly difficult to grind than softer steels such as the stainless steel.

Next, a model of physical phenomena about the cutting tool wear is proposed, taking different parameters into account the geometry of the blade, the cut parameters, and the mechanical properties of the textile material.

**Keywords :** Cutting blade, textile materials, industrial textile cutter, cutting edge, sharpening and experimental study.