



HAL
open science

Caractérisation des usinages robotisés : application aux processus de transformation du matériau bois

Oussama Ayari

► **To cite this version:**

Oussama Ayari. Caractérisation des usinages robotisés : application aux processus de transformation du matériau bois. Automatique / Robotique. Université de Lorraine, 2020. Français. NNT : 2020LORR0080 . tel-02962837

HAL Id: tel-02962837

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02962837v1>

Submitted on 9 Oct 2020

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.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE



SIMPPÉ



THÈSE DE DOCTORAT
DE
L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCE ET INGENIERIE DES MOLECULES, DES PRODUITS,
DES PROCEDES ET DE L'ENERGIE (SIMPPÉ)

Présentée et soutenue publiquement par

AYARI Oussama

Pour obtenir le grade de DOCTEUR

Spécialité : Sciences du bois et des fibres

Option : Mécanique - Énergétique

**Caractérisation des usinages robotisés : Application
aux processus de transformation du matériau bois.**

À Épinal, le 22/07/2020

COMPOSITION DU JURY

M. MARCHAL Rémy	Professeur. Art et Métiers Paris Tech	Président
M. EYMA Florent	Professeur. Université de Toulouse	Rapporteur
M. GARNIER Sébastien	Maître de Conférences HDR. Université de Nantes	Rapporteur
Mme. PETRISSANS Anélie	Maître de Conférences HDR. Université de Lorraine	Examinatrice
M. MEAUSOONE Pierre-Jean	Professeur. Université de Lorraine	Directeur de thèse
M. BOUALI Anis	Maître de Conférences. Université de Lorraine	Co-Directeur de thèse

LERMAB, 27 rue Philippe Séguin CS 60036 88026 Epinal Cedex, France

Remerciements :

Je souhaite remercier l'ensemble des membres du jury qui ont examiné cette thèse pour leurs observations enrichissantes et leurs conseils. Je tiens à remercier chaleureusement M. MARCHAL Rémy pour avoir accepté de présider mon jury. Je remercie tout spécialement M. GARNIER Sébastien et M. EYMA Florent qui ont accepté d'être rapporteurs pour ma thèse. Je remercie vivement Mme. PETRISSANS Anélie pour avoir accepté d'examiner mon travail de thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Professeur M. MEAUSOONE Pierre-Jean pour avoir dirigé cette thèse et à mon Co-encadrant M. BOUALI Anis, Maître de Conférences, qui m'ont transmis cette passion de la recherche et de l'enseignement. Ils ont enrichi mes connaissances scientifiques et m'ont permis de progresser dans mes travaux de recherche. Par leur encadrement parfait, ils ont contribué à ce que ce travail de recherche se déroule dans les meilleures conditions. Je les remercie pour leurs nombreux conseils, leur disponibilité et leur soutien tout au long de ces trois années de thèse.

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire d'Etude et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB). Je tiens à remercier l'ensemble des membres du personnel pour m'avoir offert un cadre et une atmosphère de travail agréable. Mes remerciements vont également aux membres de l'équipe technique, particulièrement LALLEMAND Julien et DEHARBE Cyril, pour leur soutien quotidien et leur aide.

Je tiens à remercier chaleureusement mes collègues les stagiaires, les doctorants et les post-docteurs : Siham, Claudio, Van diem, Mengya, Imane, Radouane, Jessica, Thaïs, Elizabeth, Asma, Thouraya, Nada, Maximilien, Adam, Taher, Diana, Francisco, Clara, Samantha, Tsegay, Victor, Judith, Sébastien Schaefer, Sébastien Illanos, Giuseppe, Zélie, Christian, Bolazch, Darya, Rafael, Daniel, Sarah, Amalia, Suzana, Xu dong, Angela, Pamelita, Jimena la guapa, el caballero César, Ekatarina, Adèle, karthik, Sukanya, Lara, Carolina, Bickolard, Malek, Khaoula, Nadia, Eduardo, Yacine, Hassen, Emna, Dalenda, Clément, Gaëtan, Philippe, Merlin, Jeanne et Marie. Je remercie tout particulièrement mon grand frère au grand cœur, Blagoj Karakasov, pour les moments de joie qui a apporté à ma vie. Je remercie également sa femme, Elena pour son hospitalité et ses délicieux plats et je n'oublie pas l'aimable Emma qui nous a embelli la vie. Je vous aime. J'adresse également mes remerciements, à la communauté maghrébine à Epinal, mes amis /es du moyen orient et d'Amérique latine: Walid, Wafa, Adem, Ines, Lina, Fethi, Hamza, Houcem, Abdel, Mohamed Jalal, Ilyes, Badis, Chedli, Anis, Baya, Ghofrane, Shayma, Toufic, Fraj, Hatem, Adel, Sami, Borhen, Rayhane, Aymen, Imane, Djalal, Myriam, Amira, Kais, Zahra, Mohamed, Said, Ibrahim, Reda, Ahmad, Imrane, Mohsen, Mouhannad, Ammar, Nawras, Matteo, Kaué, Isabella, Fernanda, César et Jonny.

I owe my deep gratitude to Faia Younan and her masterpieces for providing me motivation, courage, positive vibes, optimism and endurance during a very long and tiring work nights.

Pour terminer, merci à ma famille, spécialement mes parents (Habib et Fatima) ma sœur docteur AYARI Rania et ma grand-mère KADDECH Bakhta, qui m'ont toujours soutenu tout au long

ma thèse et en particulier pendant la rédaction du mémoire pendant la préparation de la soutenance.

Liste des abréviations :

Abréviations	Définition
MOCN	Machine-outil à Commande Numérique.
LVC	« Learning Control Robot ».
IFR	« Internationale Federation of Robot ».
DOF	« Degree Of Freedom » Les degrés de liberté d'un robot.
ERP	« Entreprise Ressource Planning ».
SAP	« System Application and Products ».
MES	« Manufacturing Execution System ».
MDF	« Medium Density Fiber ».
LERMAB	Laboratoire D'Etude et Recherche sur le Matériau Bois.
HSS	«High Speed Steel» : Acier pour l'usinage à grande vitesse.
MGD	Modèle Géométrique Direct.
FAO	Fabrication Assistée par Ordinateur.
CAO	Conception Assistée par Ordinateur.
MEF	Modélisation Élément Fini.

Table des matières

Introduction générale.....	1
<i>Chapitre 1 -Etat de l'art sur la robotique industrielle et la science d'usinage bois.....</i>	5
1.1 Histoire des robots industriels :	6
1.1.1 Evènements contribuant à l'évolution des robots industriels :	6
1.1.2 Typologies des robots industriels :	9
1.2 Innovation des robots industriels (La robotique collaborative) :	13
1.2.1 Définition :	13
1.2.2 Famille de la robotique collaborative :	13
1.2.3 Avantages :	14
1.3 La robotique et l'industrie 4.0 :	14
1.3.1 L'industrie 4.0 : origine et définition :	14
1.3.2 La robotique dans l'industrie 4.0 :	16
1.4 La robotique dans l'industrie mondiale :	17
1.4.1 Classement selon les secteurs industriels	17
1.4.2 Classement selon les plus gros marchés mondiaux :	18
1.5 La robotique dans l'industrie du bois :	19
1.5.1 Domaines d'application :	19
1.5.2 Les enjeux : pourquoi robotiser ?	20
1.6 Les propriétés du bois :	21
1.6.1 Variation liée à l'anatomie et la structure annuelle :	21
1.6.2 Variation liée aux propriétés physico-mécanique :	23
1.7 Les 3 matériaux étudiés :	25
1.7.1 Le bois dérivé MDF (Medium Density Fiber)	26
1.7.2 Le hêtre :	26
1.7.3 Le sapin :	27
1.8 L'usinage du bois:	27

1.8.1 Introduction :	27
1.8.2 Modes de coupe du bois :	28
1.8.3 Coupe orthogonale :	29
1.8.4 Autres orientations de coupe du bois :	35
1.8.5 Le défonçage :	36
1.9 Facteurs influençant l'usinage du bois :	38
1.9.1 Facteurs liés aux conditions d'usinage.....	39
1.9.2 Facteurs liés au matériau :	41
1.9.3 Facteurs liés à la méthode d'usinage :	42
1.9.4 Facteurs liés au robot : la loi de commande	44
1.9.5 Facteurs liés aux matériau, outil d'usinage et mode de coupe :	45
1.10 Conclusion :	46

Chapitre 2: Caractérisation des opérations d'usinage robotisés: Matériels et méthode.....47

2.1 Introduction :	48
2.2 Plateforme robotique :	48
2.2.1 Robot usineur :	48
2.2.2 Notions de base de la robotique :	49
2.2.2.1 Espace de travail :	49
2.2.2.2 Qualité dimensionnelle :	50
2.2.2.3 Répétabilité :	51
2.2.2.4 Singularités du robot :	52
2.2.2.5 Compensation de gravité :	54
2.2.2.6 Rigidité du robot :	54
2.3 Plateforme de programmation robot :	56
2.3.1 La programmation en ligne :	56
2.3.2 La programmation hors ligne :	57

2.4	Banc d'usinage :	58
2.4.1	Electro broche :	58
2.4.2	Défonceuse à commande numérique:	58
2.4.3	Outillage :	59
2.4.3.1	Mèche de défonçage ®VHM 113 :	59
2.4.3.2	Mèche de défonçage ®Leucodur HL05 :	60
2.4.3.3	Avantages :	60
2.5	Chaîne de mesure des efforts de coupe :	61
2.5.1	Capteur d'effort :	61
2.5.1.1	Platine ®Kistler 9257A	61
2.5.1.2	Calibrage de la platine :	62
2.5.2	Amplification des charges : Amplificateur NI 5070A	63
2.5.3	Conversion analogique/numérique : Convertisseur NI 9215	64
2.5.4	Module d'acquisition:	65
2.5.5	Module de traitement de mesure :	66
2.6	Chaîne de mesure des dimensions d'usinage :	67
2.6.1	Table à mesurer :	67
2.6.2	Scanner laser :	68
2.7	Protocole expérimental :	69
2.7.1	Mise en place des échantillons :	69
2.7.2	Opérations d'usinage :	70
2.7.2.1	Contournage :	70
2.7.2.2	Rainurage :	70
2.7.3	Configuration du robot dans l'espace de travail :	72
2.7.3.1	Montages d'usinage :	72
2.7.3.2	Nomenclatures des campagnes expérimentales :	73
2.7.4	Vérification de la rigidité du robot :	76
2.7.4.1	Modèle du robot :	76

2.7.4.2	Simulation par la méthode éléments finis (MEF) :.....	77
2.7.5	Mesure des efforts de coupe :.....	77
2.7.6	Mesure des dimensions d'usinage :.....	79
2.7.7	Mesure de l'orthogonalité :	80
2.8	Récapitulatif des campagnes expérimentales:.....	81
2.9	Influences des phénomènes aléatoires :.....	82
2.9.1	Analyse temporelle :.....	82
2.9.1.1	Essai à vide platine fixe :.....	82
2.9.1.2	Essai à vide platine mobile :	84
2.9.2	Analyse fréquentielle :	86
2.9.2.1	Spectres d'essai à vide platine fixe :.....	86
2.9.2.2	Spectres d'essai à vide platine mobile :.....	87
2.9.3	Interprétation des essais à vides :	88
2.10	Conclusion :.....	88

Chapitre 3 : Caractérisation des usinages robotisées Application au processus de transformation du matériau bois89

3.1	Essais préliminaires :.....	90
3.1.1	Origines des irrégularités d'usinage :	90
3.1.1.1	Usinage matériau tendre (polystyrène) :.....	90
3.1.1.2	Usinage du MDF :	91
3.1.2	Effet machine/matériau :.....	92
3.2	Caractérisation des procédés d'usinage du bois dérivé (MDF).....	92
3.2.1	Usinage avec la défonceuse numérique (campagne référence pour l'usinage du MDF) :	92
3.2.1.1	Choix des outils :.....	93
3.2.1.2	Caractérisation des efforts de coupe :.....	95
3.2.1.3	Caractérisation de la qualité dimensionnelle d'usinage :	97
3.2.1.4	Interaction entre effort de coupe et dimensions d'usinage :.....	98
3.2.1.5	Synthèse de la campagne :.....	100

3.2.2	Caractérisation des procédés d'usinage robotisé du MDF :.....	100
3.2.2.1	Campagne 1.1 « Configuration rigide/Pièce bridée » :	100
3.2.2.2	Campagne 1.2 « Configuration flexible /Pièce bridée » :.....	105
3.2.2.3	Campagne 2.1 « Configuration rigide/pièce portée » :.....	109
3.3	Caractérisation des procédés d'usinage du feuillus (hêtre) :.....	111
3.3.1	Usinage du hêtre avec la défonceuse numérique (campagne référence pour l'usinage du hêtre) :	112
3.3.1.1	Caractérisation des efforts de coupe :.....	112
3.3.1.2	Caractérisation de la qualité dimensionnelle d'usinage :	113
3.3.1.3	Interaction entre effort de coupe et dimensions d'usinage :.....	114
3.3.1.4	Synthèse de la campagne :.....	115
3.3.2	Usinage du hêtre avec le robot anthropomorphe :	115
3.3.2.1	Campagne 1.1 « configuration rigide/pièce bridée ».....	115
3.3.2.2	Campagne 1.2 « configuration flexible/pièce bridée ».....	119
3.4	Effets du mode de coupe	124
3.4.1	Caractérisation des efforts de coupe :	124
3.4.2	Caractérisation de la qualité dimensionnelle d'usinage :.....	126
3.4.3	Interaction entre effort de coupe et dimensions d'usinage :	127
3.4.4	Synthèse de la campagne :	128
3.5	Caractérisation des procédés d'usinage du résineux : sapin sans nœuds (campagne référence pour l'usinage du sapin):	129
3.5.1	Usinage du sapin avec la défonceuse numérique :.....	129
3.5.1.1	Caractérisation des efforts de coupe :.....	129
3.5.1.2	Caractérisation de la qualité dimensionnelle d'usinage :	130
3.5.1.3	Interaction entre effort de coupe et dimensions d'usinage :.....	131
3.5.1.4	Synthèse de la campagne :.....	133
3.5.2	Usinage du sapin avec le robot anthropomorphe:.....	133
3.5.2.1	Campagne 1.1 « configuration rigide/pièce bridée ».....	133
3.5.2.2	Campagne 1.2 « configuration flexible/ pièce bridée » :.....	138
3.6	Effets des irrégularités du sapin(nœuds)	142
3.6.1	Effets sur les efforts de coupe :.....	143
3.6.2	Effets sur la qualité dimensionnelle d'usinage :	145

3.7 Effet de la variation des conditions de coupe	146
3.7.1 Effets sur les efforts de coupe :.....	147
3.7.2 Effets sur la qualité dimensionnelle d'usinage :	147
3.7.3 Effets sur l'orthogonalité :	149
3.8 Conclusion:.....	151
Chapitre 4 : Conclusion générale et perspectives	154
Références :	159
Annexes :.....	170

Table des figures

Figure 1.1: premier circuit intégré 1958[5]	6
Figure 1.2: Premier bras robotique 1969 [6]	6
Figure 1.3 :« Famulus» Premier robot industriel polyarticulé 1973 [8].....	7
Figure 1.4: Learning Control Robot 2010 [13]	8
Figure 1.5:Collaboration homme-robot pour le maintien des planches en bois[8]	8
Figure 1.6: Nombre de robots pour 10.000 employés dans l'industrie manufacturière [28].....	9
Figure 1.7:Espace de travail d'un robot sériel KUKA [8]	10
Figure 1.8:Degré de liberté du robot Kuka [8]	10
Figure 1.9: Structure à chaîne ouverte[147]	10
Figure 1.10: Structure à chaîne fermée [147].....	10
Figure 1.11: Robot sériel à chaîne ouverte Fanuc [15]	11
Figure 1.12: Robot sériel à chaîne fermée ABB 6660 [16].....	11
Figure 1.13: Les principaux composant d'un robot parallèle [17].....	11
Figure 1.14:La plateforme Stewart-Gough 1947 [22].....	11
Figure 1.15: Révolutions industrielles [Photo Ayari]	15
Figure 1.16: Technologies liées à l'Industrie 4.0.....	16
Figure 1.17: Interaction homme-robot : exemple de réseau de communication entre l'opérateur et la machine [29].....	17
Figure 1.18:Estimation du stock annuel de robots par industries en fin d'année 2018 [28]....	18
Figure 1.19: Estimation du stock annuel mondial de robots industriels dans les 15 plus grands marchés [28].....	19
Figure 1.20: Chargement /Déchargement [12].....	20
Figure 1.21:Palettisation / Manutention [32]	20
Figure 1.22: Ponçage bois[29]	20
Figure 1.23: Peinture[33]	20
Figure 1.24: Façonnage de sculptures en bois[15]	20
Figure 1.25: Finition bois[15]	20
Figure 1.26: Coupe transversale d'un tronc d'un arbre [35]	22
Figure 1.27: Vue microscopique du bois de feuillus[37]	23
Figure 1.28: Vue microscopique du bois résineux[37]	23
Figure 1.29 : Limites de cerne (zoomées) [36]	23
Figure 1.30: Efforts exercés sous l'effet du vent [38]	24
Figure 1.31: Directions et plans de travail mécanique du bois[Photo Ayari]	24
Figure 1.32:Machine à commande numérique CNC [15]	28
Figure 1.33: Robot industriel (KUKA kr 210 L180)[15].....	28
Figure 1.34: Angles de la nomenclature de Mckenzie[Photo Ayari]	28
Figure 1.35: Les 3 directions d'usinage du bois [43].....	29
Figure 1.36: Géométrie de la coupe orthogonale[42].....	30
Figure 1.37 :Coupe orthogonale 0°-90°	30
Figure 1.38: Modèle d'efforts parallèles et normaux [48].....	33

Figure 1.39: Copeau de type I [49]	35
Figure 1.40: Copeau de type II [49]	35
Figure 1.41: Copeau de type III [49].....	35
Figure 1.42: Position de l'arête tranchante du couteau en coupe oblique [55].....	36
Figure 1.43: Usinage en avalant [46]	36
Figure 1.44: Usinage en opposition [46].....	36
Figure 1.45: Emballage en bois.....	37
Figure 1.46: Cadres de lunettes en bois chez In'Bo	37
Figure 1.47: Jouets pour enfants en bois	37
Figure 1.48:Moulure et Rainure [64]	38
Figure 1.49:Assemblage Tenon/Mortaise [64].....	38
Figure 1.50: profil/contreprofil [64].....	38
Figure 1.51 :Facteurs influençant l'usinage du bois	39
Figure 1.52 :Cartographie de l'usure de l'outil pour l'usinage avec un robot industriel [84]..	41
Figure 1.53: Evolutions des efforts de coupe en fonction de l'humidité du bois [79]	41
Figure 1.54: Evolution des efforts de coupe en fonction de la densité du bois [86]	42
Figure 1.55: Effets de la vibration sur le trajectoire de l'outil [87]	43
Figure 1.56: Vibration d'usinage pendant toute l'opération[87].....	43
Figure 1.57: Effet de la vibration sur une portion d'usinage [87]	43
Figure 1.58: Effet de la vibration à l'entrée et la sortie de l'outil [87].....	44
Figure 1.59: La commande robotique	44
Figure 2.1(a): Robot Kuka Kr 210L180 [8]	49
Figure 2.1(b): Axes de rotation du robot Kuka Kr 210 L180 [8].....	49
Figure 2.2: Espace de travail du robot Kuka [8]	50
Figure 2.3: Précision d'un robot industriel	50
Figure 2.4: Précision dynamique sur une trajectoire de forme S [119].....	51
Figure 2.5: Précision et répétabilité du robot [147]	51
Figure 2.6: Singularité d'extension [Photo Ayari].....	53
Figure 2.7: Singularité du poignet [Photo Ayari].....	53
Figure 2.8:Au-dessus de la base[Photo Ayari].....	53
Figure 2.9: Compensateur de gravité du Kuka kr 210L180 [15]	54
Figure 2.10: Cartographie de rigidité du Kuka série Kr [131]	55
Figure 2.11: Teach Pendant du robot Kuka [15]	56
Figure 2.12: Pince + ventouse montées sur un robot Fanuc [15].....	56
Figure 2.13: Interface du logiciel Powermill [Photo personnelle]	57
Figure 2.14: Broche d'usinage montée sur le robot + broche fixée au sol [15].....	58
Figure 2.15: La défonceuse numérique [15]	59
Figure 2.16: Fraise hélicoïdale [15]	60
Figure 2.17: Mèche de défonçage [15].....	60
Figure 2.18: Chaîne de mesure des efforts de coupe[Photo personnelle]	61
Figure 2.19: Platine Kistler 9257A [15].....	62
Figure 2.20: 3 paires de plaquettes en quartz [15]	62

Figure 2.21: Application de test de la platine.....	62
Figure 2.22: Amplificateur de charge[15].....	63
Figure 2.23: Afficheur numérique de l'amplificateur [15].....	64
Figure 2.24: Convertisseur NI 9215[15].....	64
Figure 2.25: Interface de configuration du module[Photo Ayari].....	65
Figure 2.26: Interface de mesure des efforts de coupe [Photo Ayari].....	66
Figure 2.27: Mesure des efforts de coupe.....	66
Figure 2.28: Spectre fréquentiel des efforts de coupe.....	66
Figure 2.29: Interaction entre efforts de coupe et dimensions d'usinage.....	67
Figure 2.30: Table à mesurer @mconti [15].....	67
Figure 2.31: Revolver [15].....	67
Figure 2.32: Scanner Laser [15].....	68
Figure 2.33: CNC Charlyrobot [15].....	68
Figure 2.34: Echantillon à usiner.....	69
Figure 2.35: Montage d'usinage [15].....	70
Figure 2.36: Calibrage de la pièce.....	70
Figure 2.37: Rainure débouchante [Photo Ayari].....	71
Figure 2.38: Rainure semi-arêtée [Photo Ayari].....	71
Figure 2.39: Plongée de l'outil dans la matière pour un rainurage[Photo Ayari].....	71
Figure 2.40: Echantillon avec les rainures débouchante.....	72
Figure 2.41: Capteur + échantillon sur la table d'usinage[15].....	72
Figure 2.42: Capteur +échantillon sur la bride du robot [15].....	73
Figure 2.43: Position de l'outil par rapport à la base.....	74
Figure 2.44: Configuration rigide/Pièce bridée[15].....	74
Figure 2.45: configuration rigide/pièce bridée (modélé cinématique) [Photo Ayari].....	74
Figure 2.46: position de l'outil configuration flexible.....	74
Figure 2.47: Configuration flexible /Pièce bridée[15].....	74
Figure 2.48: configuration flexible/pièce bridée (modélé cinématique) [Photo Ayari].....	75
Figure 2.49: Positon du capteur +échantillon.....	75
Figure 2.50: Configuration rigide/Pièce portée[15].....	75
Figure 2.51: Position du capteur +échantillon.....	76
Figure 2.52: Configuration flexible/Pièce portée[15].....	76
Figure 2.53: Déplacement en configuration rigide.....	77
Figure 2.54: Déplacement en configuration flexible.....	77
Figure 2.55: Effort de coupe pendant le rainurage horizontal [Photo personnelle].....	78
Figure 2.56: Effort de coupe pendant le rainurage vertical [Photo personnelle].....	78
Figure 2.57: Mesure de la force résultante[Photo personnelle].....	78
Figure 2.58: Paramètres dimensionnels d'usinage.....	79
Figure 2.59: Mesure des dimensions d'usinage robotisé[Photo personnelle].....	80
Figure 2.60: Triangle ABC [Photo Ayari].....	80
Figure 2.61: Evaluation de l'orthogonalité de l'usinage robotisé[Photo Ayari].....	81
Figure 2.62: Essai à vide platine fixée [15].....	83

Figure 2.63: Effort mesurés à vide capteur fixe (axe y).....	83
Figure 2.64: Effort mesurés à vide capteur fixe (axe x).....	84
Figure 2.65: Efforts mesurés à vide capteur (axe z).....	84
Figure 2.66: Essai à vide platine mobile [15].....	84
Figure 2.67: Efforts mesurés à vide capteur mobile (axe y)	85
Figure 2.68: Effort mesurés à vide capteur mobile (axe x)	85
Figure 2.69: Effort mesurés à vide capteur mobile (axe z)	85
Figure 2.70: Spectre de mesure d'effort suivant X	86
Figure 2.71: Spectre de mesure d'effort suivant Y	86
Figure 2.72: Spectre de mesure d'effort suivant Z	86
Figure 2.73: Spectre de mesure d'effort suivant X	87
Figure 2.74: Spectre de mesure d'effort suivant Y	87
Figure 2.75: Spectre de mesure d'effort suivant Z	87
Figure 3.1: Evolution de la vitesse d'un actionneur	90
Figure 3.2: Echantillon polystyrène usiné $V_a=1000$ mm/min /outil 3 arêtes.....	91
Figure 3.3: Etat de surface de la face latérale de la rainure du polystyrène (scan laser).....	91
Figure 3.4: Echantillon MDF usiné $V_a=1000$ mm/min / outil 3 arêtes.....	91
Figure 3.5: Irrégularités d'usinage	92
Figure 3.6: Scan laser des irrégularités d'usinage	92
Figure 3.7: Effort de coupe suivant l'axe X (usinage MOCN)	93
Figure 3.8: Effort de coupe suivant l'axe Y (usinage MOCN)	93
Figure 3.9: Effort de coupe suivant X usinage MOCN	94
Figure 3.10: Effort de coupe suivant Y MOCN	94
Figure 3.11: Efforts de coupe F_x, F_y, F_z , rainure suivant Y (mode $90^\circ-0^\circ$).....	95
Figure 3.12: Effort de coupe $F_x F_y F_z$, rainure suivant X (mode $90^\circ-90^\circ$)	95
Figure 3.13: Evolution des efforts radiaux	96
Figure 3.14: Evolution des effort tangentiels	96
Figure 3.15: Evolution des efforts de coupe F_{total_ech}	96
Figure 3.16: Mesure des dimensions d'usinage	97
Figure 3.17: Evolution de L_{i_moy}	98
Figure 3.18: Interaction entre les efforts de coupe et les dimensions d'usinage.....	99
Figure 3.19: Dispersion des erreurs résiduelles.....	99
Figure 3.20: Efforts de coupe moyens appliqués par la défonceuse et le robot.....	101
Figure 3.21: Calibrage de l'échantillon	102
Figure 3.22: Evolution de la L_{i_moy} d'usinage avec la défonceuse et le robot en configuration rigide.....	103
Figure 3.23.a: Interaction entre les efforts de coupe et les dimensions d'usinage.....	104
Figure 3.23.b: Dispersion d'erreurs résiduelles.....	104
Figure 3.24.a: FFT des efforts de coupe du MDF : Usinage CNC	104
Figure 3.24.b: FFT des efforts de coupe du MDF : Robot rigide..	104
Figure 3.24.c: FFT des efforts de coupe du MDF : Robot flexible	105

Figure 3.25: Efforts de coupe moyens appliqués par la défonceuse et le robot en configuration rigide et flexible	106
Figure 3.26: Evolution de la $L_{i\ moy}$ avec le robot en configuration flexible et rigide et la défonceuse numérique.....	107
Figure 3.27: Interaction entre les efforts de coupe et les dimensions d'usinage : configuration flexible.....	108
Figure 3.28: Dispersion des erreurs résiduelles.....	108
Figure 3.29: Evolution des efforts résultants	112
Figure 3.30: Evolution de $L_{i\ moy}$	113
Figure 3.31: Interaction entre les efforts de coupe et les dimensions d'usinage (hêtre)	114
Figure 3.32: Dispersion des erreurs résiduelles.....	114
Figure 3.33: Efforts de coupe moyens appliqués par la défonceuse et le robot (configuration rigide)	116
Figure 3.34: Evolution des efforts de coupe du hêtre et MDF en configuration rigide	117
Figure 3.35: Evolution de $L_{i\ moy}$ d'usinage avec la défonceuse et le robot en configuration rigide (usinage hêtre).....	118
Figure 3.36: Effet matériau en usinage robotisé (configuration rigide).....	118
Figure 3.37: Interaction entre effort de coupe et les dimensions d'usinage (hêtre).....	118
Figure 3.38: Dispersion des erreurs résiduelles.....	119
Figure 3.39: Efforts de coupe moyens appliqués par la défonceuse et le robot en configuration rigide et flexible	120
Figure 3.40: Evolution des efforts de coupe du MDF et hêtre en configuration flexible	121
Figure 3.41: Evolution de $L_{i\ moy}$ du hêtre en usinage robotisé et avec la défonceuse.....	122
Figure 3.42: Effet matériau en usinage robotisé (configuration flexible).....	122
Figure 3.43.a: Interaction entre effort de coupe et les dimensions d'usinage.....	123
Figure 3.43.b: Dispersion des erreurs résiduelles.....	123
Figure 3.44.a: FFT des efforts de coupe du Hêtre : Usinage CNC	124
Figure 3.44.b: FFT des efforts de coupe du Hêtre : Robot rigide..	124
Figure 3.44.c: FFT des efforts de coupe du Hêtre : Robot flexible	124
Figure 3.45: Effort de coupe (F_x F_y F_z) rainure suivant X (mode 90°-90°).....	124
Figure 3.46: Effort de coupe en usinage parallèle et perpendiculaire aux fibres du bois	125
Figure 3.47: Paramètre de mesure (L_e).....	126
Figure 3.48: Evolution de $L_{e\ moy}$ en usinage mode 90°-90° et 90°-0°	127
Figure 3.49: Interaction entre effort de coupe et les dimensions d'usinage en mode de coupe 90°-90°	128
Figure 3.50: Dispersion des erreurs résiduelles.....	128
Figure 3.51: Evolution des efforts de coupe CNC (sapin, hêtre, MDF).....	130
Figure 3.52: Evolution de $L_{i\ moy}$ du Sapin.....	131
Figure 3.53: Interaction entre les efforts de coupe et les dimensions d'usinage.....	132
Figure 3.54: Dispersion des erreurs résiduelles.....	132
Figure 3.55: Efforts de coupe moyens appliqués sur le Sapin par la défonceuse et le robot (configuration rigide)	134

Figure 3.56: Evolution des efforts de coupe de l'usinage du hêtre, MDF et Sapin en configuration rigide	134
Figure 3.57: Evolution de $L_{i moy}$ du Sapin (usinage robotisé et cnc)	135
Figure 3.58: Ecart-types de $L_{i moy}$ du Sapin usinage avec le robot et la défonceuse.....	136
Figure 3.59: Ecart-types $L_{i moy}$ du sapin, hêtre et MDF en usinage avec le robot en configuration rigide.....	136
Figure 3.60: Interaction entre effort de coupe et les dimensions d'usinage.....	137
Figure 3.61: Dispersion des erreurs résiduelles.....	137
Figure 3.62: Efforts de coupe moyens appliqués par la défonceuse et le robot en configuration rigide et flexible	138
Figure 3.63: Evolution des efforts du sapin, hêtre et MDF en configuration flexible	139
Figure 3.64: Evolution de $L_{i moy}$ du Sapin en usinage robotisé et avec la défonceuse	140
Figure 3.65: Effet matériau sur la qualité dimensionnelle en configuration flexible.....	141
Figure 3.66.a: Interaction effort de coupe et les dimensions d'usinage du sapin en configuration flexible.....	141
Figure 3.66.b: Dispersion des erreurs résiduelles.....	142
Figure 3.67.a: FFT des efforts de coupe du Sapin : Usinage CNC	143
Figure 3.67.b: FFT des efforts de coupe du Sapin : Robot rigide.....	143
Figure 3.67.c: FFT des efforts de coupe du Sapin : Robot flexible	143
Figure 3.68: Echantillon du sapin avec un nœud sain et adhérent	143
Figure 3.69: Phases d'usinage du Sapin avec nœud	143
Figure 3.70: Les phases d'évolution des efforts de coupe en fonction du temps (Dans et hors nœud).....	144
Figure 3.71: Evolution de $L_{i moy}$ d'usinage dans et dehors du nœud.	145
Figure 3.72: Eclatement du nœud	146
Figure 3.73: Fissure aux bords et au fond du nœud	146
Figure 3.74: Traces de défibrage du nœud	146
Figure 3.75: Effort tangentiel de la rainure horizontale	147
Figure 3.76: Effort tangentiel de la rainure verticale	147
Figure 3.77 : Evolution de $L_{i moy}$ en différentes vitesses (rainure horizontale)	148
Figure 3.78: Evolution de $L_{i moy}$ en différentes vitesses (rainure verticale).....	148
Figure 3.79: Etat de surface en usinage robotisé à 9000 mm/min du Hêtre.....	148
Figure 3.80: Dégradation d'usinage robotisé du Sapin (9000mm/min)	149
Figure 3.81: Dégradation d'usinage robotisé du mélèze (9000mm/min)	149
Figure 3.82: Dégradation d'usinage robotisé du chêne (9000 mm/min)	149
Figure 3.83: Evaluation de l'orthogonalité de l'usinage robotisé.....	149

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Avantages et inconvénients de l'architecture série	12
Tableau 1.2: Avantages et inconvénients de l'architecture parallèle.....	12
Tableau 1.3: Les attentes des industriels vis-à-vis de la robotique	21
Tableau 1.4: Module de Young suivant les trois directions des essences du bois [148].....	25
Tableau 1.5 : Valeurs de coefficient de Poisson de quelques essences du bois [38]	25
Tableau 1.6: Propriétés du MDF	26
Tableau 1.7 : Propriétés du Hêtre.....	27
Tableau 1.8: Propriétés du Sapin.....	27
Tableau 1.9 : Bilan énergétique de la coupe orthogonale	30
Tableau 1.10: Calcul du travail utile "T"	32
Tableau 1.11: Propriétés physiques et mécaniques de quelques essences du bois.....	34
Tableau 1.12: Avantages et inconvénients de défonçage [45]	37
Tableau 1.13 : Facteurs influençant l'usinage robotisé	45
Tableau 2.1: Propriétés techniques du KUKA Kr210.....	49
Tableau 2.2: Propriétés techniques des broches.....	58
Tableau 2.3: Propriétés technique de la défonceuse.....	59
Tableau 2.4: Propriétés techniques de la fraise hélicoïdale	60
Tableau 2.5: Propriétés de la mèche de défonçage	60
Tableau 2.6: Propriétés techniques de la platine Kistler	63
Tableau 2.7: Propriétés techniques de l'amplificateur 5070A.....	64
Tableau 2.8: Propriétés techniques du Convertisseur NI 9215	65
Tableau 2.9: Propriétés techniques de la table à mesurer.....	68
Tableau 2.10: Propriétés techniques du scanner laser.....	69
Tableau 2.11: Conditions de contournage.....	70
Tableau 2.12: Propriétés de la Fonte	76
Tableau 2.13: Déplacement maximal du robot	77
Tableau 2.14: Calcul des efforts de coupe résultants appliqués.....	79
Tableau 2.15: Récapitulatif des campagnes expérimentales	81
Tableau 3.1: Efforts de coupe tangentiels et radiaux (Usinage MDF).....	95
Tableau 3.2: Mesure des dimensions d'usinage (Li)	97
Tableau 3.3: Effort de coupe tangentiels et radiaux campagne 1.1	101
Tableau 3.4: Ecart types des efforts de coupe	102
Tableau 3.5: Mesure des dimensions d'usinage (Li)	102
Tableau 3.6: Comparaison des écarts-types de l'usinage avec la défonceuse et le robot.....	105
Tableau 3.7: Effort de coupe suivant X et Y campagne 1.2.....	105
Tableau 3.8: Ecart types des efforts de coupe	106
Tableau 3.9: Mesure des dimensions d'usinage (Li)	107
Tableau 3.10: Comparaison des écarts-types de l'usinage avec la défonceuse et le robot(flexible et rigide)	109
Tableau 3.11: Effort de coupe tangentiels et radiaux.....	110

Tableau 3.12: Effort normaux de la défonceuse et le robot dans les deux configurations....	110
Tableau 3.13: Effort de coupe du robot en configuration flexible/ pièce portée.....	111
Tableau 3.14: Efforts de coupe tangentiels et radiaux (Usinage hêtre).....	112
Tableau 3.15: Mesure des dimensions d'usinage (Li)	113
Tableau 3.16: Efforts de coupe tangentiels et radiaux	115
Tableau 3.17: Ecart-types des efforts de coupe usinage du hêtre	116
Tableau 3.18: Mesure des dimensions d'usinage (Li)	117
Tableau 3.19: Effort de coupe tangentiels et radiaux.....	120
Tableau 3.20: Ecart-Type des efforts de coupe du hêtre.....	120
Tableau 3.21: Mesure des dimensions d'usinage (Li)	121
Tableau 3.22: Effort de coupe tangentiels et radiaux (Mode 90°-90°)	125
Tableau 3.23: Efforts tangentiels et radiaux en mode 90°-0° et 90°-90°	125
Tableau 3.24: Ecart-types des efforts de coupe.....	126
Tableau 3.25: Mesure des dimensions d'usinage (Le).....	126
Tableau 3.26: Effort de coupe tangentiels et radiaux de CNC (Sapin).....	129
Tableau 3.27: Moyennes des efforts tangentiels, radiaux et totaux avec CNC (hêtre, MDF, sapin)	130
Tableau 3.28: Ecart-types des efforts tangentiels, radiaux et totaux avec CNC (sapin, hêtre, MDF).....	130
Tableau 3.29: Mesure des dimensions d'usinage (Li)	131
Tableau 3.30: Effort de coupe tangentiels et radiaux.....	133
Tableau 3.31: Ecart-types des efforts de coupe (usinage sapin)	134
Tableau 3.32: Mesure des dimensions d'usinage (Li)	135
Tableau 3.33: Effort de coupe du Sapin en configuration flexible	138
Tableau 3.34: Ecart-Type des efforts de coupe (Usinage sapin).....	139
Tableau 3.35: Mesure des dimensions d'usinage du sapin en configuration flexible	140
Tableau 3.36: Efforts de coupe maximaux dans et hors nœud.....	144
Tableau 3.37: Efforts de coupe tangentiels moyens du h en différentes vitesses d'avances .	147
Tableau 3.38: Mesures de l'orthogonalité du rainurage	150

Introduction générale :

Au cours du XXe siècle, le monde a assisté au développement de la robotique dans l'industrie manufacturière. Depuis les années 1970, les robots industriels ont été des outils efficaces et sophistiqués pour réaliser des tâches répétitives et pénibles. Ils sont utilisés aussi pour remplacer l'opérateur humain dans des environnements de travail dangereux. De nos jours la présence de ces robots est largement marquée dans les industries automobiles, électroniques et aéronautiques. Ceci est le résultat de la performance et de la dextérité que les robots industriels ont fait preuve lorsqu'ils sont intégrés dans les chaînes de production. L'utilisation des robots industriels s'est également répandue pour prendre place dans différents secteurs industriels tels que le médical, le pharmaceutique, l'électronique, l'agro-alimentaire, la construction navale, la plasturgie, l'automobile et l'industrie du bois. Leurs rôles consistent généralement à effectuer des tâches nécessitant seulement une bonne répétabilité du robot. Parmi ces opérations, on retrouve classiquement : la manutention, l'assemblage, le chargement / déchargement de marchandises, l'emballage, la finition ...

Actuellement, la concurrence que connaît l'industrie mondiale est très élevée. Le besoin industriel de changement des techniques de production afin de satisfaire les demandes personnalisées des produits, ne cesse de croître. Ce besoin a amené les industriels à agrandir l'ensemble des applications susceptibles d'être robotisées suivant des critères plus exigeants en termes de rendement et d'efficacité. Cette évolution se heurte à des contraintes techniques et technologiques liées aux outils mis en place pour répondre aux exigences industrielles. Ceci est particulièrement valable dans le cas de l'usinage mécanique des métaux comme l'aluminium, l'acier, le titane et d'autres matériaux comme le plastique et les matériaux composites. Cependant, ces contraintes techniques ne sont pas encore abordées par l'industrie du bois.

Aujourd'hui, les secteurs industriels de transformation de matière que ce soit métal, composites ou bois utilisent, généralement, le principe de l'enlèvement de matière par outil coupant pour l'usinage. Habituellement, cette méthode se base sur l'utilisation de machine-outil à commande numérique (MOCN) sur laquelle un ou plusieurs outils de coupe sont installés. Cette pratique a permis d'améliorer la fiabilité des processus de production, d'optimiser le temps de cycle et d'atténuer les charges sur l'opérateur. Malgré ces avantages, le recours à ce type de machine est soumis à plusieurs contraintes non négligeables telles que : un coût d'achat et d'intégration élevé, nécessité du personnel qualifié, une accessibilité limitée à certains points de l'espace et une faible adaptabilité et flexibilité de production.

Compte tenu de ces contraintes, plusieurs secteurs industriels ont adopté les robots industriels, (dit aussi anthropomorphes ou polyarticulés), comme une solution alternative aux machines-outils à commande numérique. Ce choix a été envisagé par l'intérêt que représente la robotique industrielle au regard de :

- Ratios coûts/efficacité plus intéressants ;

- Zone de travail accrue ;
- Flexibilité plus importante : instrumentation complémentaire pouvant être mise en place (système de capteurs d'efforts, systèmes de vision numérique, montage d'usinage personnalisé, système de préhension...) ;
- Niveau de sécurité plus élevé (manipulation des robots à travers des cellules sécurisées) ;
- Réduction du nombre d'opérations humaines par la collaboration à la réalisation des tâches associées à des gestes difficiles.

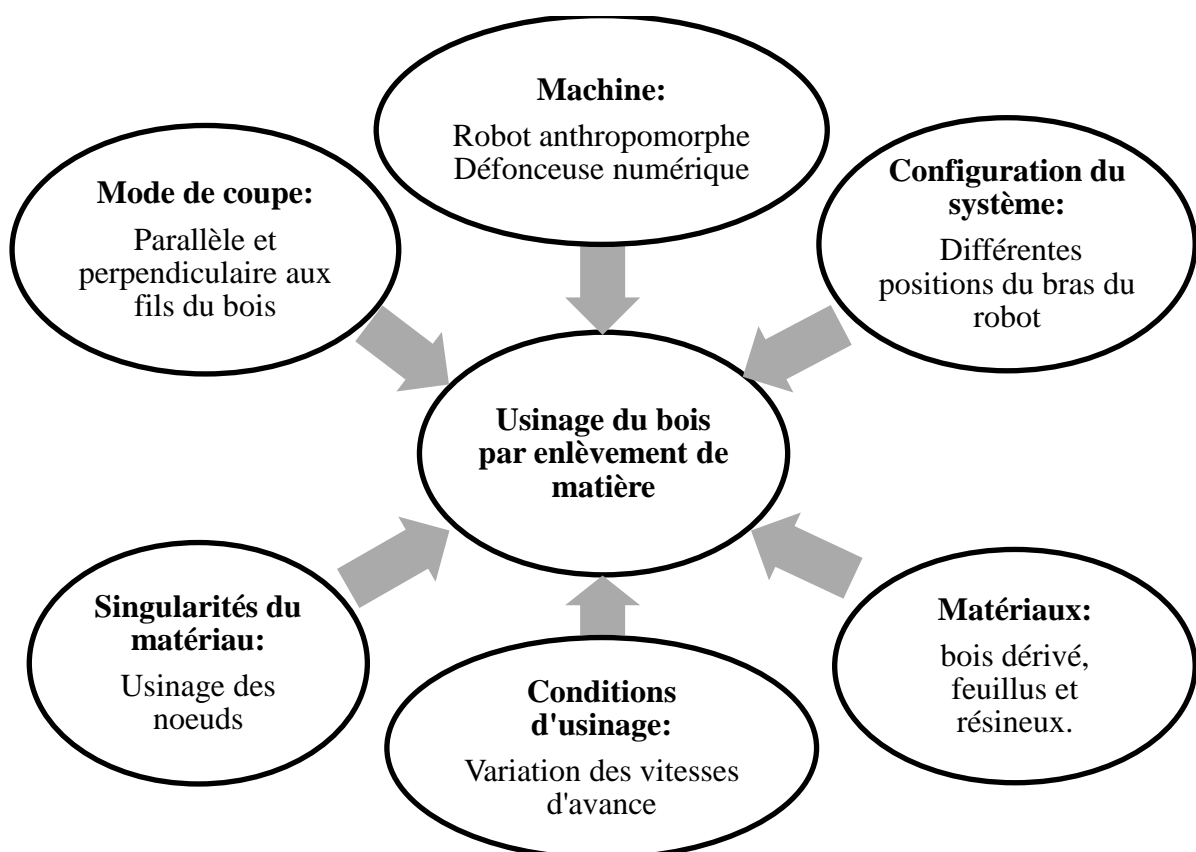
Malgré les multiples avantages précédemment mentionnés, l'utilisation des robots industriels se heurte à plusieurs contraintes. Le manque de raideur au niveau des articulations handicape le robot pour les procédés d'usinage par enlèvement de matière. Les erreurs cumulées dans chaque articulation et le faible rapport entre les masses mobiles et la masse totale, dégradent énormément la qualité dimensionnelle d'usinage ainsi l'aptitude du robot à suivre la trajectoire programmée. Par conséquent, ces défauts empêchent les robots de répondre aux exigences industrielles en termes de tolérance d'usinage et de qualité de surface usinée. Par exemple, selon la norme ISO 2768, les tolérances générales recherchées pour le processus de fraisage varient entre 0,032 mm et 0,250 mm. En comparaison, selon la norme ISO 9283, les erreurs de répétabilité des robots industriels varient entre 0,01 mm et 1 mm. Une contrainte limitant la robotisation des tâches d'usinage réside dans la faible fréquence propre des robots anthropomorphes qui favorise le développement des phénomènes d'instabilité ou « le broutement ». Ce phénomène, provoque des vibrations qui rendent l'usinage robotisé moins précis et moins répétable. Les propriétés des matériaux naturels à usiner tels que : l'anisotropie, la texture fibreuse, la variation de densité et l'hétérogénéité présentent aussi des obstacles qui freinent la robotisation des procédés d'usinage par enlèvement de matière. Toutes ces contraintes n'aident pas la robotique à se positionner correctement pour les opérations d'enlèvement de matière.

Les travaux développés dans le cadre de cette thèse visent à lever les verrous technologiques liés à la phase de transition entre l'usinage avec des machines conventionnelles « mono-opération » et l'utilisation des dispositifs ayant plus de polyvalence et flexibilité opérationnelle (robot polyarticulé). Les difficultés se manifestent généralement au niveau de la complexité d'intégration et d'adaptation de ces machines dans des procédés d'usinage bois par enlèvement de matière. A titre d'exemple, nous pouvons citer l'optimisation des conditions d'usinage pouvant être compromise face aux efforts de coupe. Cette contrainte ne se pose pas avec les machines à commande numérique grâce à leurs rigidités élevées et leurs robustesses. La qualité dimensionnelle d'usinage et son interaction avec les efforts présentent aussi des défis à surmonter.

Objectifs de la thèse :

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre de la robotisation des opérations d'usinage bois par enlèvement de matière. Il vise à solutionner les problématiques technologiques liées à l'usinage de ce matériau par un système robotisé en cherchant l'adéquation de la robotique avec les procédés d'enlèvement de matière. La problématique de l'enlèvement de matière est abordée à travers l'étude des opérations d'usinage courantes dans l'industrie de transformation du bois. Nous cherchons à caractériser les efforts de coupe ainsi que l'interaction effort/qualité dimensionnelle en fonction de plusieurs facteurs :

- La machine utilisée pour l'usinage (robot industriel et MOCN) ;
- La configuration du système robotique ;
- Le matériau usiné ;
- Les singularités du matériau ;
- Les modes de coupe ;
- Les conditions de coupe.



Facteurs influençant l'usinage du bois par un robot polyarticulé

Ce manuscrit est organisé de la façon suivante :

Le **chapitre 1** est un recueil bibliographique abordant essentiellement trois aspects :

Un état de l'art concernant l'utilisation et l'intégration des robots anthropomorphes dans l'industrie en général. Une attention particulière est accordée aux industries du bois. Avant de se plonger dans l'étude des procédés industriels, un retour sur l'anatomie du matériau est réalisé pour pouvoir analyser ses caractéristiques physiques et mécaniques. A la fin, notre bibliographie s'est focalisée sur l'usinage bois en mettant l'accent sur les facteurs influençant le procédé d'enlèvement de matière et la problématique de l'interaction entre efforts de coupe et qualité dimensionnelle pendant l'usinage.

Le **chapitre 2** s'intéresse à la présentation de la cellule robotique et du banc expérimental mis en place afin d'étudier l'usinage du bois par un système robotisé. Des travaux préliminaires sont présentés et permettent de :

- Tester les performances de la chaîne de mesure ;
- Déterminer l'effet des phénomènes aléatoires ;

Par la suite, une description des opérations d'usinage effectuées pendant les campagnes expérimentales est réalisée. A la fin de ce chapitre nous expliquons le protocole expérimental adopté pour étudier les procédés d'usinage du bois par enlèvement de matière utilisés avec un robot anthropomorphe.

Le **chapitre 3** est consacré à l'analyse et l'interprétation des résultats des expérimentations afin de déterminer et quantifier l'effet des facteurs : machine, matériaux, mode de coupe et singularités du matériau sur des procédés d'enlèvement de matière. Une attention particulière est ensuite portée sur les efforts de coupe et leur interaction avec la qualité dimensionnelle d'usinage. Dans cette partie l'objectif sera de déterminer le lien qui existe entre ces paramètres et caractériser la tendance d'évolution de la relation effort/qualité dimensionnelle en fonction des facteurs étudiés précédemment.

Le **chapitre 4** est dédié à la conclusion générale de nos travaux de recherche et les perspectives de développement.

Chapitre 1 -Etat de l'art sur la robotique industrielle et la science d'usinage bois

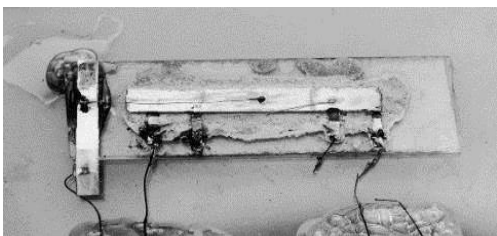
1.1 Histoire des robots industriels :

1.1.1 Evènements contribuant à l'évolution des robots industriels :

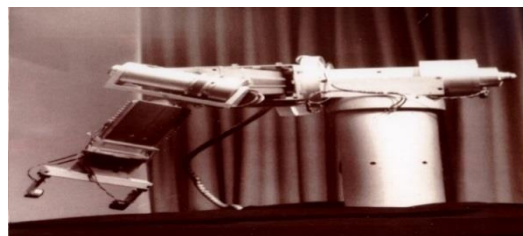
Les robots industriels sont le fruit de nombreuses fusions de technologies et de savoir-faire. La performance et l'efficacité dont ils ont fait preuve en font un moyen de production indispensable dans les grands secteurs industriels. Par conséquent, leur utilisation s'est répandue et a pris place dans de nouveaux secteurs industriels tels que l'industrie métallurgique, plasturgique et la technologie de pointe (fabrication des microprocesseurs, des automates programmables et des capteurs...). Cette prospérité et cette réputation sont dues à une histoire très riche.

En 1921 le mot « robot » a été utilisé pour la première fois dans une pièce de théâtre appelée « Rossum's Universal Robots » de l'écrivain tchèque Karel Capek [1]. Il a inventé le terme à partir de « robota », en tchèque, qui veut dire un esclave. En 1942, Willard Pollard et Harold Roselund ont déposé un brevet du premier robot mécaniquement programmable pour la pulvérisation de peinture pour la société Devilbiss [2]. Trois ans plus tard, l'apparition du premier ordinateur ENIAC développé à l'université de Philadelphia a fait un énorme pas vers la résolution des problèmes calculatoires et l'invention du calcul numérique [3].

Le secteur automobile est le pionnier dans l'intégration des robots industriels. L'année 1954 a connu l'installation du premier robot industriel par George Devol pour extraire des pièces d'une machine de moulage sous pression dans l'usine de Général Motors [4]. En 1961, un deuxième robot industriel « Unimate » a été installé dans une chaîne de production de l'usine Ewing Township pour effectuer des tâches de manutention des pièces mécaniques [4]. Quatre ans plus tard, l'évolution continue de l'informatique a dévoilé le premier circuit intégré créé par Robert Noyce et Jack Kilby [5] de Texas National Instruments (Figure 1.1). En reliant manuellement deux transistors bipolaires, cette invention révolutionnaire a permis de concentrer un maximum de fonctions logiques dans un volume assez réduit. En 1969, Victor Scheinman a créé le bras Stanford, qui est le premier bras robotique à commande électrique [6]. Ayant 6 degrés de liberté, Stanford est le premier robot commandé par un ordinateur. Il a servi plus tard à manipuler des pièces dans le laboratoire d'intelligence artificielle de Stanford (Figure 1.2)



*Figure 1.1: premier circuit intégré
1958[5]*



*Figure 1.2: Premier bras robotique 1969
[6]*

En 1971, le développement des circuits intégrés a donné naissance au premier microprocesseur « Intel 4004 » conçu par Intel. Disposant de 2300 transistors et une fréquence d'horloge allant jusqu'à 740 KHz, il est capable d'effectuer 92.000 opérations de calcul numérique par seconde. Avec une telle puissance d'exécution et 3,81 mm de longueur sur 2,79 mm de largeur, ce circuit intégré possède les mêmes performances que l'ordinateur ENIAC qui occupait 167m² et pesait 30 tonnes [7].

Ces progrès technologiques et ces développements au niveau des circuits intégrés ont joué le rôle de catalyseur pour le développement de la robotique : la firme internationale ®Kuka (l'un des leaders actuels de la conception et la fabrication des robots) a conçu en 1973 « Famulus » (Figure 1.3). Il est le premier robot industriel polyarticulé (contenant plusieurs articulations) à entraînement électromécanique (les axes sont commandés par des moteurs électriques). Il a remplacé les opérateurs dans des tâches pénibles telles que la manipulation et le déplacement des charges lourdes [8].



Figure 1.3 : « Famulus » Premier robot industriel polyarticulé 1973 [8]

Six ans plus tard, le secteur des circuits intégrés a révélé un fruit de son évolution accrue et a dévoilé le microprocesseur ®Motorola 68000. Doté d'une mémoire allant jusqu'à 16 mégaoctets et une fréquence d'horloge allant jusqu'à 12 MHz, il est choisi ensuite pour les ordinateurs Apple ®Macintosh [9]. Grâce aux performances du ®Motorola 68000 le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) a conçu le robot Sherpa dédié aux interventions sur des environnements radioactifs. Il est doté de 6 articulations lui permettant un déplacement libre sans aucun réaménagement de l'espace de travail. La progression des microprocesseurs a connu après l'apparition du processeur ®Pentium chez Intel avec 3.1 millions de transistors et une fréquence d'horloge égale à 66 MHz [10]. Ceci a permis d'augmenter la vitesse d'exécution des instructions de calcul numérique. Cette progression a boosté la conception des contrôleurs du robot comme NEXCOM et Intel Xeon, qui deviennent capables de commander des systèmes mécaniques multiaxes à architecture complexe.

La robotique a tiré un énorme profit de la progression informatique et a continué son développement à un rythme accru. Parallèlement à ceci le marché a connu une évolution importante marquée par un besoin industriel plus variable et plus exigeant. Cette situation a mené à l'apparition d'autres tâches et activités industrielles plus particulières et plus personnalisées telles que le soudage à l'arc, la gravure laser et l'usinage à grande vitesse... Pour répondre à ces besoins, le monde de la robotique a continué de proposer des solutions pour satisfaire les attentes des industriels.

En 2006, ®Motoman a introduit un nouveau style de bras robotique avec une souplesse semblable à celle de la main de l'homme [11]. Pendant la même période ®Kuka a présenté un nouveau modèle de robot industriel à 7 axes Spez KR 5. En 2010, ®Fanuc (un leader mondial de conception et fabrication des robots industriels) a intégré dans son robot 6 axes une technique révolutionnaire : « Learning Control Robot (LVC) » (Figure 1.4) qui permet de mémoriser les vibrations du robot afin d'optimiser la suivi de trajectoire [13]. Pendant l'année 2016, ®Kuka a dévoilé son premier robot intelligent Lbr Iiwa dédié à la collaboration homme-robot (Figure 1.5).



Figure 1.4: Learning Control Robot 2010 [13]

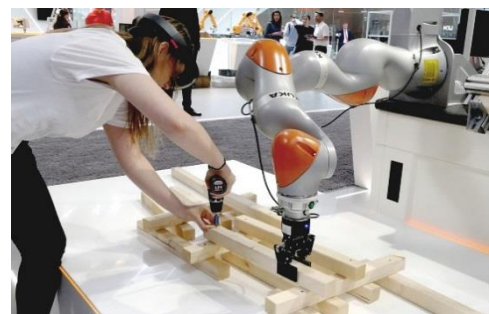


Figure 1.5: Collaboration homme-robot pour le maintien des planches en bois[8]

Grâce à ces progrès technologiques, l'automatisation et la robotisation des tâches industrielles ont connu une croissance importante. Selon l'étude de la Fédération Internationale de la Robotique IFR en 2018,[28], 2.439.543 de nouveaux robots industriels sont installés dans les usines du monde entier soit une augmentation de 15% par rapport à l'année 2017. L'Union Européenne reste le leader du secteur de l'automatisation avec une densité de 114 unités pour 10.000 employés. Selon les statistiques menées par l'IFR en 2015, 65% des pays avec un taux au-dessus de la moyenne mondiale de robots pour 10.000 employés, se trouvent dans l'Union Européenne (Figure 1.6). Au deuxième rang, nous trouvons l'Amérique avec une densité de 99 unités suivie par l'Asie et l'Australie avec 91 robots.

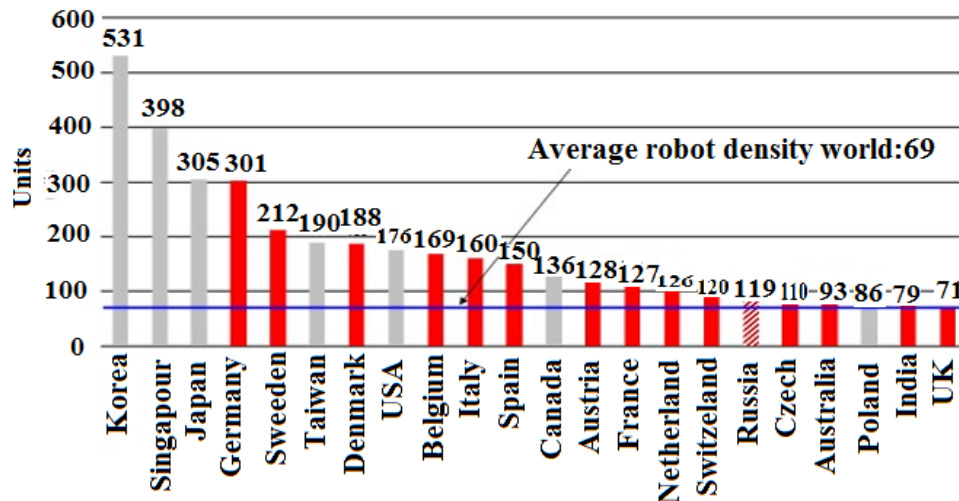


Figure 1.6: Nombre de robots pour 10.000 employés dans l'industrie manufacturière [28]

Selon le rapport établi par l'IFR pendant l'année 2019, environ 36% du marché mondial des robots industriels sont vendus en Chine entre 2017 et 2018. L'Allemagne déclare les chiffres de croissance les plus élevés d'Europe. Elle est le cinquième plus grand marché de robots au monde. Les chiffres d'installation dans l'Allemagne et la Chine sont principalement tirés de l'industrie automobile. D'autres pays comme la république Tchèque et la Pologne connaissent une croissance élevée qui sera de l'ordre de 14% entre 2017 et 2020.

1.1.2 Typologies des robots industriels :

Selon [14] plusieurs critères existent pour classier les robots industriels tels que :

1. La taille et la forme ;
2. L'espace de travail (c'est l'ensemble des points de l'espace atteignables par l'effecteur du robot (Figure 1.7). L'espace de travail ne doit pas être confondu avec l'espace dextre ;
3. Le nombre de degré de liberté (Figure 1.8) ;
4. La structure cinématique ou architecture robot et les caractéristiques de mouvement.

Nous allons adopter dans la suite le critère architecture du robot afin de traiter les typologies des robots qui existent dans différents secteurs industriels tels que l'automobile, la métallurgie, l'électronique, l'agro-alimentaire et l'industrie du bois.

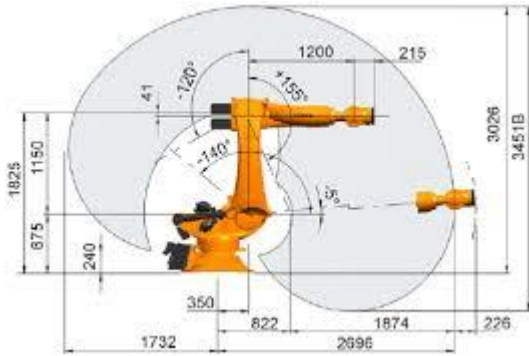


Figure 1.7: Espace de travail d'un robot sériel KUKA [8]

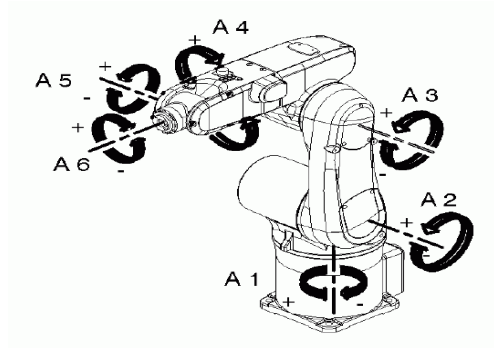


Figure 1.8: Degré de liberté du robot Kuka [8]

1.1.2.1 L'architecture série :

Actuellement, la plupart des manipulateurs existant dans l'industrie ont un comportement anthropomorphe (caractère ressemblant généralement à un bras humain). Ils sont constitués d'une succession de corps rigides. Chacun est lié à son prédécesseur et son successeur par une articulation à un degré de liberté, soit une rotation d'un corps rigide autour d'un axe soit une translation suivant un axe bien défini. Cette structure s'appelle architecture série ou sérielle. Un exemple de mécanisme en série est le robot anthropomorphe à chaîne ouverte ou à chaîne fermée présentés dans la Figure 1.9 et la Figure 1.10. Il se compose d'une succession de corps partant de la base à l'effecteur final, chacun étant lié à son successeur par une articulation rotative. Le nombre des articulations est égal au nombre de degré de liberté.

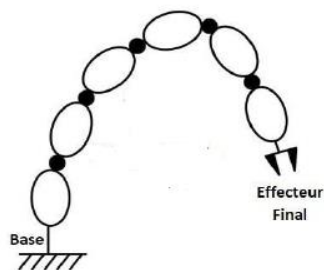


Figure 1.9: Structure à chaîne ouverte [147]

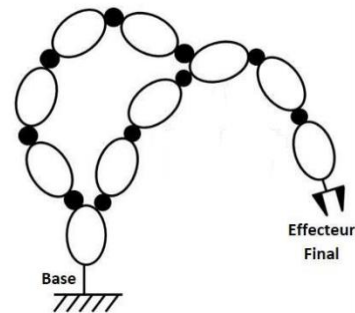


Figure 1.10: Structure à chaîne fermée [147]

Les robots sériels à chaînes ouvertes sont les plus répandus dans l'industrie (Figure 1.11). Ceux à chaîne fermée sont plus rigides et robustes et moins influençables pendant l'exécution des opérations ou le robot est sollicité par des forces extérieures élevées (Figure 1.12).



Figure 1.11: Robot sériel à chaîne ouverte Fanuc [15]



Figure 1.12: Robot sériel à chaîne fermée ABB 6660 [16]

1.1.2.2 L'architecture parallèle :

Un robot parallèle peut être défini comme une chaîne cinématique dans laquelle une plate-forme fixe et une plate-forme mobile sont connectées les unes aux autres par au moins deux chaînes cinématiques indépendantes (Figure 1.13). Ces chaînes sont connectées aux plates-formes fixes et mobiles à travers des liaisons distribuées de manière géométriquement symétrique. Parmi les mécanismes les plus répandus de l'architecture parallèle, nous citons la plateforme Stewart-Gough (Figure 1.14), connue aussi sous le nom de « Hexapod ». Pour cette structure l'élément mobile est une plateforme hexagonale dont les sommets sont reliés aux chaînes cinématiques au travers des rotules. L'autre extrémité est attachée à la base du robot (l'élément fixe) à travers une articulation rotative. Les robots parallèles sont généralement utilisés dans des applications telles que les simulateurs d'avion [17], l'exploitation minière [18], les dispositifs de pointage [19], les centres d'usinage [20] et l'éco-conception des systèmes manipulateurs [21].

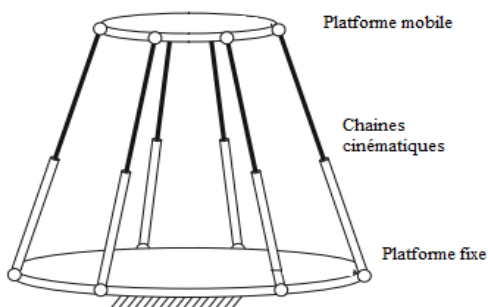


Figure 1.13: Les principaux composants d'un robot parallèle [17].

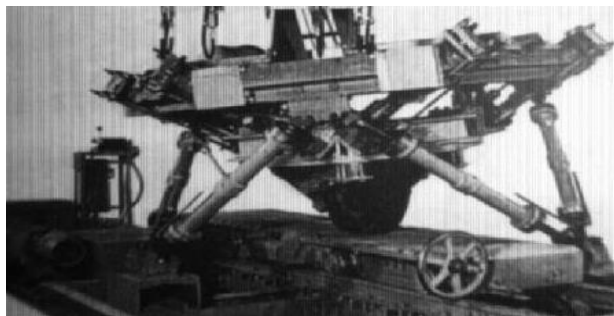


Figure 1.14: La plateforme Stewart-Gough 1947.

1.1.2.3 Avantages et inconvénients des architectures séries et parallèles :

Les robots séries et parallèles sont présents dans plusieurs secteurs industriels grâce à leurs qualités et leurs capacités à satisfaire le besoin de l'industrie. Cependant, cela ne cache pas l'existence d'une certaine faiblesse qui contraint l'intégration des systèmes robotiques dans les

chaînes de production industrielles. Le Tableau 1.1 et le Tableau 1.2 nous présentent une synthèse des avantages et des inconvénients de l'utilisation des robots parallèles et séries

Tableau 1.1: Avantages et inconvénients de l'architecture série

	Avantages	Inconvénients
Architecture série	<ul style="list-style-type: none"> - Zone de travail accrue - Dextérité élevée. - Volume machine réduit. - Manipulation de charge lourde (Kuka Kr Titan 1000kg) - Répétabilité inférieure 0.1mm - Intégration d'instrument d'usinage à grande vitesse et système de préhension. - Collaboration avec d'autres machines et/ou l'opérateur humain. 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible précision. - Flexibilité articulaire élevée. - Inertie importante due aux masses réparties sur toute la chaîne cinématique (actionneurs, organes de transmission). - Défauts de chaîne cinématique (réducteurs, enroulement.) - Incertitude de modélisation du système - Comportement non linéaire. - Conception de commande difficile.

Tableau 1.2: Avantages et inconvénients de l'architecture parallèle

	Avantages	Inconvénients
Architecture parallèle	<ul style="list-style-type: none"> - Haute précision et répétabilité. - Faible inertie. - Rigidité et résistance élevées puisque les efforts sont répartis sur plusieurs chaînes cinématiques. - Vitesse de manipulation élevée. - Volume machine réduit. - Intégration de vision numérique et système de préhension pour les faibles charges. 	<ul style="list-style-type: none"> Espace de travail limitée (enveloppe de forme demi-sphère). - Mobilité restreinte. - Conception complexe (association de plusieurs chaînes cinématiques). - Comportement hautement non linéaire ce qui complique la conception de la commande. - Singularités de déplacement.

1.2 Innovation des robots industriels (La robotique collaborative) :

1.2.1 Définition :

La robotique collaborative est un concept qui permet à un opérateur d'interagir et collaborer avec des robots dans le même espace de travail. Par conséquent, les barrières de sécurité et les enceintes grillagées ne sont plus nécessaires dans l'environnement de travail [23]. L'année 2008 a connu l'intégration du premier robot collaboratif du constructeur « Universal Robot » dans l'industrie de la plasturgie. L'objectif est d'automatiser le suivi des machines à commande numérique. Un robot collaboratif, appelé aussi cobot, est un système capable d'apprendre plusieurs tâches et de collaborer avec l'opérateur soit en tant qu'assistant pendant la réalisation d'un processus, soit en tant que guide. La cobotique est un des piliers de l'usine 4.0 [24].

Le progrès de la technologie des capteurs, de la vision numérique et de l'informatique cognitive, permettent aux robots collaboratifs de prendre conscience de leur environnement. Cela a fait évoluer les capacités des cobots d'anticiper et éviter les collisions et a permis de réaliser de nombreuses tâches pénibles en toute sécurité à proximité de l'opérateur.

Bien que les cobots ont joué un rôle primordial dans la progression de plusieurs secteurs industriels (automobile, électronique, pharmaceutique...), il existe plusieurs facteurs qui freinent la robotique collaborative tels que : le coût élevé, la complexité de leur intégration dans le milieu industriel et leurs exigences en langage de programmation et compétences du personnel. Une autre contrainte est l'idée que toute intégration de système robotique va remplacer les employés et supprimer les postes. Les cobots sont délibérément conçus pour répondre à cette crainte. Ils sont principalement conçus pour fournir plus d'assistance aux opérateurs en réalisant les tâches associées à des gestes difficiles et en prenant en charge les manipulations répétitives et pénibles.

1.2.2 Famille de la robotique collaborative :

La robotique collaborative peut être classée suivant 3 grands axes [23] :

- L'ilot robotisé collaboratif : C'est une collaboration entre l'opérateur et le robot pendant la réalisation d'une tâche industrielle. Selon les besoins de l'opération à exécuter, le robot peut accompagner l'opérateur pendant toute la phase de production ou pendant une tâche bien spécifique ;
- Le robot mobile : Le robot est capable de se déplacer librement dans une zone prédéfinie dans son système afin d'exécuter des commandes précises. Ceci se fait d'une manière autonome sans aucune intervention extérieure que ce soit humaine ou autre ;
- Les exosquelettes : Ce sont des dispositifs portables (bras à contrôle d'effort, orthèse, queue robotisée...) capables de fonctionner en tandem avec

l'utilisateur. Ils agissent comme amplificateurs qui augmentent, renforcent ou restaurent les performances humaines.

1.2.3 Avantages :

L'intégration des robots collaboratifs dans des chaînes de production possède de multiples avantages. L'exemple le plus remarquable est l'optimisation des flux qui se manifeste au niveau de la prise en charge de transport des pièces et des outils. Ceci permet de réduire le nombre de manipulation humaine et diminue le temps de cycle de production. Par conséquent, une meilleure maîtrise du processus et un rendement plus élevé sont demandés. La réalisation des opérations, associées à des gestes difficiles, offre plus de flexibilité et de sécurité et améliore l'ergonomie des postes de travail. L'automatisation des chaînes de production bénéficie aussi de l'installation des robots collaboratifs [24] : au niveau de la numérisation des processus, la mise en place de la robotique collaborative, facilite la gestion des services opérationnels d'une entreprise :

- ERP (*Entreprise Ressource Planning*) : C'est un outil informatique qui permet de gérer l'ensemble des processus opérationnels d'une entreprise ;
- SAP (*Système, Applications and Products*) : C'est un progiciel capable de structurer, organiser et gérer l'ensemble des services au sein d'une entreprise (gestion des ressources humaines, financière, vente, approvisionnement...) ;
- MES (*Manufacturing Execution System*) : C'est un système de supervision industrielle capable de mettre en place une traçabilité complète des informations de production.

La production peut être simulé grâce à une plateforme virtuelle. Ceci contribue à la réduction des coûts, la diminution des accidents de travail et le lancement de la production à un coup sûr. Les robots collaboratifs permettent aussi de surveiller à distance le cycle de production grâce à des technologies sédentaires ou mobiles. Ce qui offre l'opportunité d'utiliser des outils numériques pour analyser le produit et contrôler sa qualité.

1.3 La robotique et l'industrie 4.0 :

1.3.1 L'industrie 4.0 : origine et définition :

Depuis 1784 jusqu'à nos jours, l'industrie mondiale a connu 4 phases de transformations importantes notamment appelées « révolution industrielle ». La première a eu lieu à la fin de 18ème siècle, déclenchée par l'invention de la première machine à vapeur conçue par James Watt en 1760. La deuxième révolution a eu lieu au début du 20ème siècle. Elle est marquée par l'apparition d'une nouvelle organisation de travail, le taylorisme ou le travail à la chaîne et l'usage de l'énergie fossile. La troisième révolution industrielle a pris place dans l'automatisation numérique de la production en se basant sur des systèmes informatiques et électroniques [24]. Actuellement l'industrie mondiale est à nouveau en train de vivre une 4ème

phase révolutionnaire marquée par l'apparition des robots autonomes, l'intelligence artificielle et l'internet des objets (Figure 1.15).

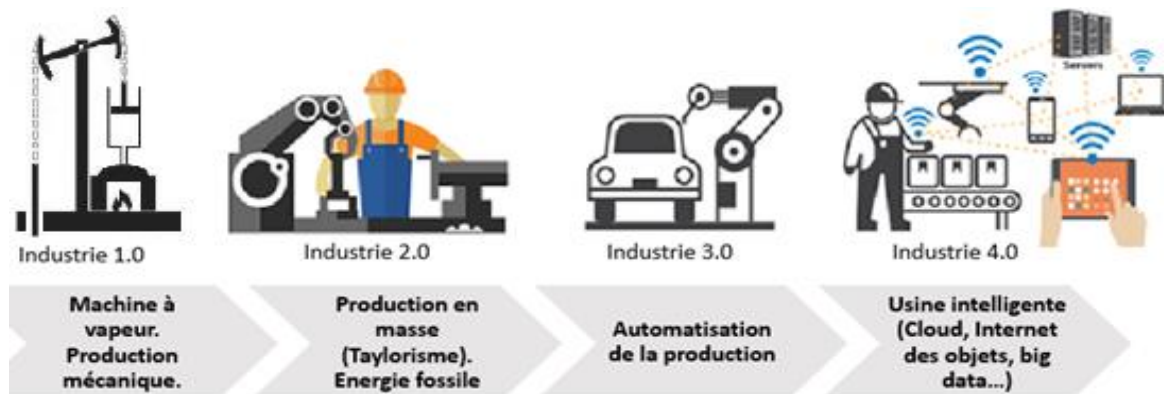


Figure 1.15: Révolutions industrielles [Photo Ayari]

Le terme «Industrie 4.0» est devenu public en 2011. Il est apparu pendant une initiative baptisée «Industrie 4.0» réalisée par le gouvernement et des associations du monde des affaires et du monde universitaire allemand. L'objectif de cette initiative est de promouvoir l'idée de la 4ème révolution industrielle en tant qu'approche pour renforcer la compétitivité de l'industrie manufacturière allemande [25]. Depuis que le gouvernement fédéral allemand a annoncé que l'Industrie 4.0 est le cadre principal pour développer la technologie de pointe, le terme est devenu assez connu et utilisé par de nombreuses entreprises, centres de recherche et universités. Des chercheurs définissent l'Industrie 4.0 comme l'intégration des machines et d'appareils physiques complexes qui interagissent et échangent des données grâce à un réseau capteur installé [26]. D'autres présentent l'Industrie 4.0 comme un nouveau niveau d'organisation et de gestion de la chaîne de production tout au long du cycle de vie des produits [27]. Des industriels présentent l'Industrie 4.0 comme un terme collectif désignant les technologies et les concepts d'organisation de la chaîne de production [25] (Figure 1.16).

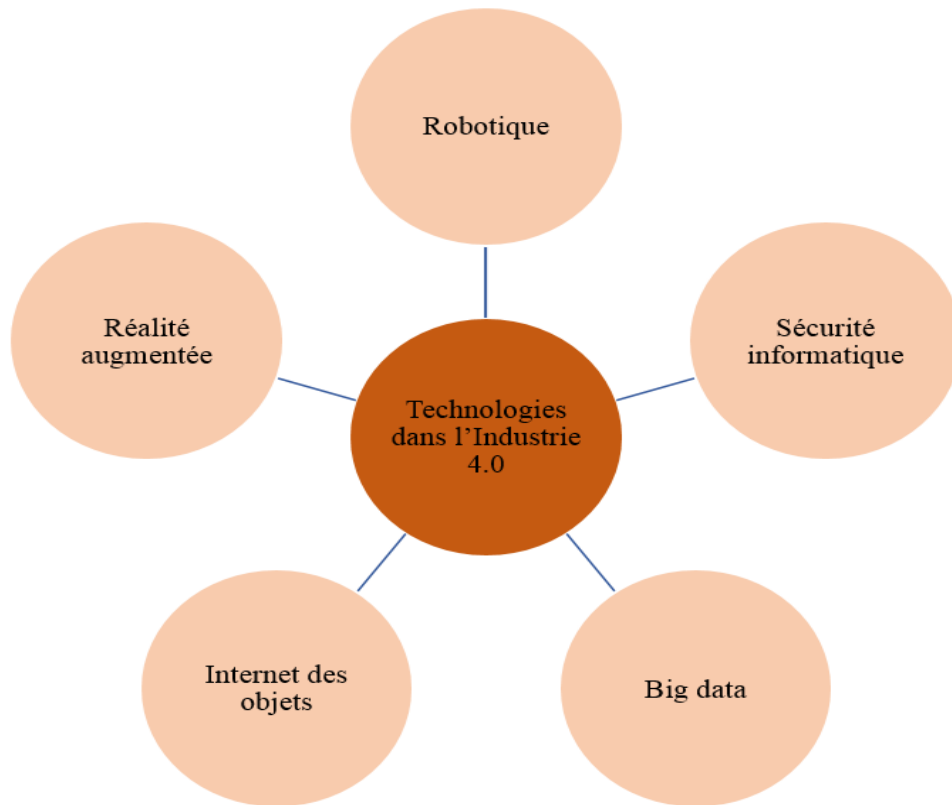


Figure 1.16: Technologies liées à l'Industrie 4.0

1.3.2 La robotique dans l'industrie 4.0 :

Les robots jouent un rôle important dans la modernisation de l'industrie mondiale. Le nombre de robots industriels installés dans les entreprises européennes a doublé depuis 2004 [28]. Une des tendances principales de l'Industrie 4.0 est la mise en place d'un système de production autonome. Le concept se base sur des robots capables d'exécuter des tâches compliquées, tout en assurant la sécurité dans la zone du travail et la collaboration avec l'opérateur. Par conséquent, l'ergonomie de travail n'a plus besoin d'isoler les cellules robotiques et mettre en place des enceintes grillagées.

L'utilisation des robots dans des chaînes de production favorise la numérisation des tâches industrielles. Ceci est dû grâce à des réseaux de capteurs intelligents, des systèmes de vision numérique intégrés dans les robots et des interfaces homme-machine. L'adhésion de la robotique à l'Industrie 4.0 fait apparaître des outils informatiques tels que les mégadonnées « big data » et l'informatique en nuage « cloud computing » capables d'établir des réseaux de communication entre l'opérateur humain et le robot. Par conséquent, l'interaction homme-machine, (Figure 1.17), s'est améliorée à travers la possibilité d'échange des données et des informations entre l'opérateur et la machine.



Figure 1.17: Interaction homme-robot : exemple de réseau de communication entre l'opérateur et la machine [29].

L'industrie 4.0 marque sa présence dans la filière bois. Plusieurs acteurs de ce secteur sont déjà engagés dans une démarche vers « l'usine de futur » : les scieries, les constructeurs bois et les fabricants du meuble. Ceci revient à la productivité et la flexibilité accrues qu'apporte l'intégration des machines connectées telles que les robots dans des processus d'usinage du matériau [116] [129] [139]. Le concept de l'industrie 4.0 offre l'opportunité d'embarquer sur les chaînes de production des systèmes de scan 3D, de vision intelligente et de mesure des efforts. Ceci permet de détecter les singularités et les irrégularités du matériau bois et optimiser les conditions de coupe et améliorer la production.

1.4 La robotique dans l'industrie mondiale :

Entre 2005 et 2008 le nombre annuel de robots vendus a évolué pour atteindre environ 115.000 unités. L'année 2009 est exclue en raison de la crise économique et financière mondiale. Ceci a provoqué une chute exceptionnelle des ventes, seulement 60.000 robots sont vendus dans le monde entier, avec plusieurs projets d'investissements industriels reportés [28].

Depuis 2010, la demande des robots industriels s'est accélérée en raison de la tendance à l'automatisation des chaînes de production ainsi les multiples avantages qu'offre la robotisation des tâches industrielles [28], [29], [30]. En 2019, le nombre total de robots industriels vendus a atteint 420.870 unités (le même nombre est enregistré en 2018). Les pronostics prévoient qu'entre 2020 et 2022 ce nombre augmentera de 12% chaque année.

1.4.1 Classement selon les secteurs industriels

L'industrie automobile est toujours le client principal avec 30% du nombre total de robots installés. Après une forte croissance de 21% du taux d'installation pendant l'année 2017, l'industrie automobile a maintenu le même taux pendant l'année 2018. L'industrie électrique/électronique vient en deuxième position. Elle renferme 25% du nombre total du robot.

En intégrant les robots manipulateurs dans leurs chaînes de production, plusieurs autres secteurs ont tiré d'énormes bénéfices tel que l'industrie de transformation de matière (plasturgie,

métallurgie...) avec 10% du nombre total de robot installés dans le monde. La capacité des robots industriels à s'adapter aux opérations personnalisées de la production a ouvert l'horizon à la robotique pour s'intégrer dans de nouveaux secteurs tels que l'industrie agro-alimentaire, et papetière. La Figure 1.18 illustre la distribution des robots anthropomorphes dans différents secteurs industriels en fin d'année 2018.

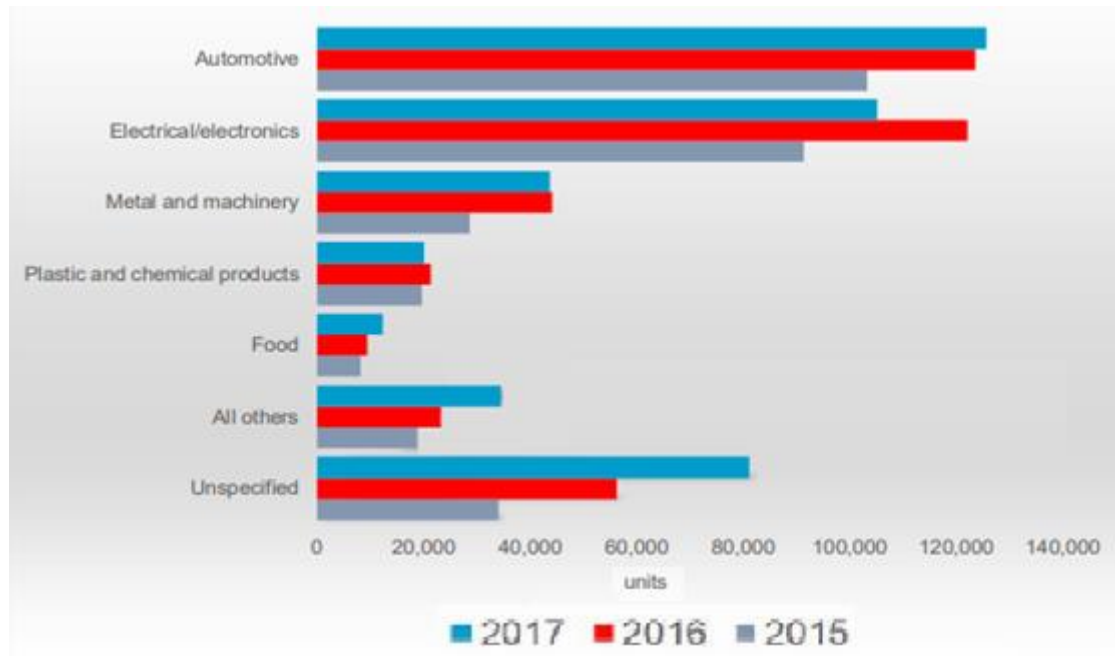


Figure 1.18: Estimation du stock annuel de robots industriels par industries en fin d'année 2018 [28]

1.4.2 Classement selon les plus gros marchés mondiaux :

D'après l'IFR [28], les investissements en robots industriels dans l'Union Européenne ont légèrement diminué en 2016 de 6700 unités par rapport à l'année 2015. En 2011, la France ne possédait que 34.500 robots, pour tous les secteurs de production de biens (automobile, agroalimentaire...etc.). Depuis 2014 jusqu'à 2017, le marché des robots industriels en France a progressé de 39% pour atteindre un nouveau record. L'utilisation des robots dans l'industrie française reste encore faible. La France compte deux fois moins de robots industriels fonctionnels que l'Italie et 4 à 5 fois moins que l'Allemagne, alors qu'il s'agit d'un moyen de renforcer la compétitivité des entreprises [28]. En Espagne, les ventes de robots industriels ont légèrement augmenté pour atteindre un nouveau sommet de 3 900 unités. En 2016, les robots industriels au Royaume-Unis ont augmenté pour la première fois depuis 2012. La Figure 1.19 montre les marchés internationaux qui détiennent 74% du stock mondial des robots industriels.

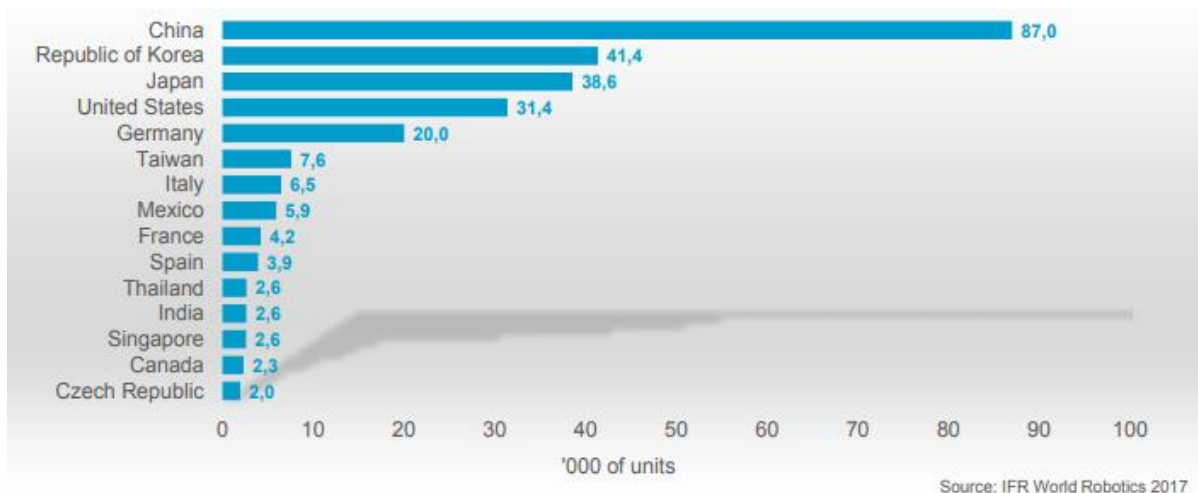


Figure 1.19: Estimation du stock annuel mondial de robots industriels dans les 15 plus grands marchés [28]

1.5 La robotique dans l'industrie du bois :

1.5.1 Domaines d'application :

En termes d'intégration de la robotique dans le processus de la production, les industries du bois viennent au dernier rang par rapport aux secteurs automobile, électronique/électrique, métallurgie et plasturgie [28]. Ceci revient, peut-être à un manque de dynamisme de la part des acteurs de l'industrie du bois. De tous les robots industriels en activité dans le monde, seul 0,2% sont installés dans le processus de travail du bois [31]. Malgré ce faible taux d'utilisation, les applications robotisées dans l'industrie du bois sont multiples et diversifiées :

- Chargement / Déchargement : mise en place ou enlèvement d'un produit assuré par un préhenseur monté sur la bride du robot (Figure 1.20) ;
- Palettisation / Manutention : stockage et transport de marchandises empilées sur une palette et expédiées sous forme de chargement unitaire (Figure 1.21) ;
- Ponçage : usage d'un matériau abrasif avec un mouvement rotatif (Figure 1.22) ;
- Vernissage et Peinture : application par pistolet à peinture sur le bois (Figure 1.23) ;
- Sculptage : façonnage du bois afin d'obtenir une forme décorative (Figure 1.24) ;
- Ebauche (usinage): Un enlèvement important de matière pour se rapprocher rapidement de la cote nominale demandée. (Figure 1.25).



Figure 1.20: Chargement /Déchargement [12]



Figure 1.21: Palettisation / Manutention [32]



Figure 1.22: Ponçage bois[29]



Figure 1.23: Peinture[33]

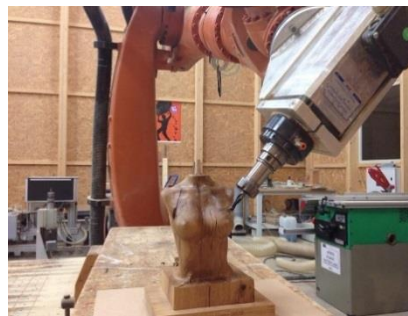


Figure 1.24: Façonnage de sculptures en bois[15]



Figure 1.25: Ebauche[15]

Milutinovic mentionne dans [34] que l'utilisation des robots anthropomorphes pour l'usinage par enlèvement de matière représente 3% à 4% du nombre total de robots installés dans l'industrie mondiale. Il note aussi que des robots sont utilisés dans la construction industrielle des maisons en bois, ainsi que dans la menuiserie. Nous y découvrons également que les entreprises japonaises ont utilisé les expériences et les connaissances acquises dans l'industrie automobile et les ont appliquées dans la production de logements en bois (manipulation, assemblage, clouage) via Toyota Homes Company [34].

1.5.2 Les enjeux : pourquoi robotiser ?

Actuellement, les robots industriels sont capables de répondre aux besoins des opérateurs sur plusieurs axes illustrés dans le Tableau 1.3 :

Tableau 1.3: Les attentes des industriels vis-à-vis de la robotique

	Apport de la robotique
Productivité	<ul style="list-style-type: none"> - Faible coût d'investissement. - Flexibilité et adaptabilité aux tâches industrielles importantes. - Travail avec un temps de cycle constant. - Regroupement de plusieurs tâches en une seule opération.
Qualité	<ul style="list-style-type: none"> - Gain en temps et en espace. - Réduction de l'effet des 3M (Muri, Mura, Muda : excès, irrégularité, gaspillage). - Réduction des taux de rebuts et augmentation du rendement. - Amélioration des techniques de contrôle qualité.
Logistique	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de la logistique d'approvisionnement : Gestion des flux entre l'entreprise et les fournisseurs. - Organisation et gestion de flux interne de l'entreprise.
Ressource humaine	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de la qualité des postes de travail des opérateurs. - Réduction du taux de rotation de la main d'œuvre et les difficultés liées au recrutement.

1.6 Les propriétés du bois :

Nous abordons dans la deuxième partie de ce chapitre l'étude du matériau bois : son aspect anatomique, physique et mécanique. Un état de l'art sur la transformation du bois par usinage est réalisé. Nous étudions plus particulièrement les techniques d'usinage industriel, les modes de coupe, l'interaction entre efforts de coupe/qualité dimensionnelle d'usinage ainsi que les contraintes que les usineurs rencontrent.

1.6.1 Variation liée à l'anatomie et la structure annuelle :

Le bois est un matériau hétérogène, ayant une structure complexe. Son mode de formation et sa structure varient énormément en fonction d'une multitude de paramètres. Afin de comprendre les origines d'une telle variation, il est important de se plonger dans l'anatomie de ce matériau.

En observant une coupe transversale d'un tronc d'arbre nous pouvons distinguer, en allant de l'extérieur vers l'intérieur, plusieurs couches différentes (Figure 1.26) :

- La première partie forme ce qui est connu dans la littérature par le bois parfait ou le Duramen. Il est composé uniquement par des couches du bois non fonctionnelles renfermant des cellules mortes aux membranes épaisses (cellulose, lignine) ;
- La deuxième partie c'est l'Aubier. Il renferme ce qui est connu par le bois fonctionnel caractérisé par ses cellules vivantes. Il assure la conduction de la sève brute ;

- La troisième partie est la couche périphérique qui présente la zone vitale de l'arbre dans laquelle se trouvent les assises génératrices, les tissus conducteurs et protecteurs. Cette partie renferme le Cambium qui est une assise méristématique responsable à la circulation de la sève élaborée. Elle comporte aussi 3 autres couches : Le Phelloderme, le Phellogène et le Suber constituant ce qu'on appelle communément l'écorce qui protège les tissus internes et contribue à la limitation des pertes d'eau par évaporation.

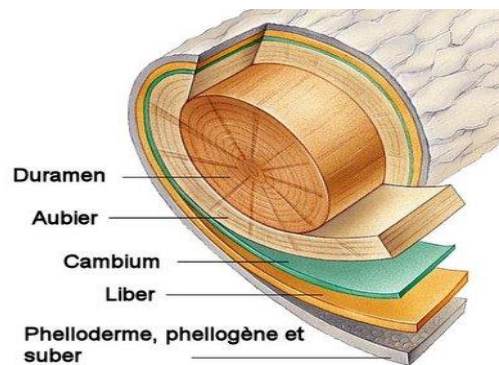


Figure 1.26: Coupe transversale du tronc d'un arbre [35]

Les arbres sont également répartis en deux classes différentes communément appelées les feuillus et les résineux. Elles se caractérisent par des structures anatomiques distinctes :

- **Les feuillus** : Ce sont des arbres à feuilles caduques. Généralement, ils entrent en hibernation pendant la saison d'hiver et perdent leurs feuilles. Ils sont constitués de différents types de cellules telles que les trachéides, les parenchymes, les vaisseaux pour la conduction des sèves et les fibres à parois épaisses pour le soutien mécanique (Figure 1.27). Le bois des feuillus est caractérisé par sa rigidité et sa densité élevées. On cite comme exemple de feuillus : Le Chêne, le Frêne, le Hêtre, le Châtaigner...
- **Les résineux** : Ce sont des arbres portant des feuilles sous forme d'aiguilles. Ils se caractérisent par une croissance rapide ce qui rend leur bois léger et moins dense. Leurs structures anatomiques sont constituées par : des cellules trachéides, qui assurent le transport de la sève brute et le soutien de l'arbre et des cellules de parenchyme qui permettent le stockage et la répartition des substances chimiques (Figure 1.28). Nous citons comme exemple des résineux : le Cèdre, le Sapin, le Pin, le Mélèze, l'Épicéa, ...

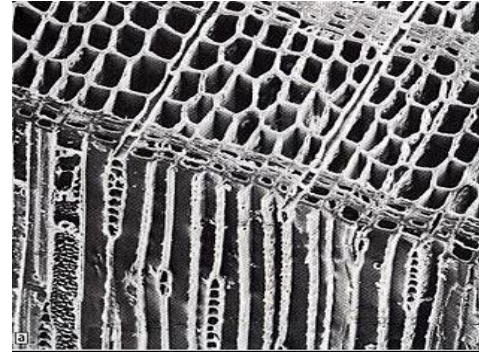
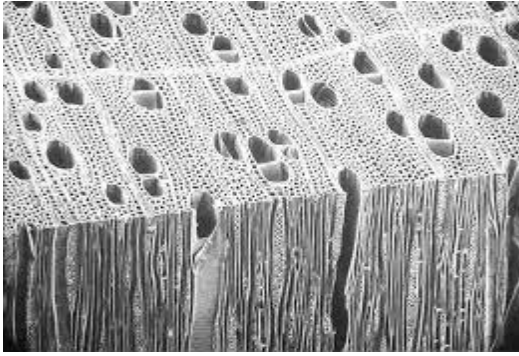


Figure 1.27: Vue microscopique du bois de feuillus[37]

Figure 1.28: Vue microscopique du bois résineux[37]

Le bois peut être différencié selon les lieux de plantation des arbres [36]. Les arbres qui sont issus d'une région à climat tempéré se distinguent par la succession du bois développé pendant la période de reprise de croissance, c'est le bois du printemps. D'autres cellules se développent à la fin de cycle de croissance annuelle c'est le bois d'été. Une couche de bois d'été est généralement dense et de couleur foncée. Une couche de bois de printemps est moins dense et possède une couleur claire. L'ensemble forme un cerne annuel. Les arbres croissants dans une région tropicale présentent un aspect homogène sans limites de cernes marquées (Figure 1.29).

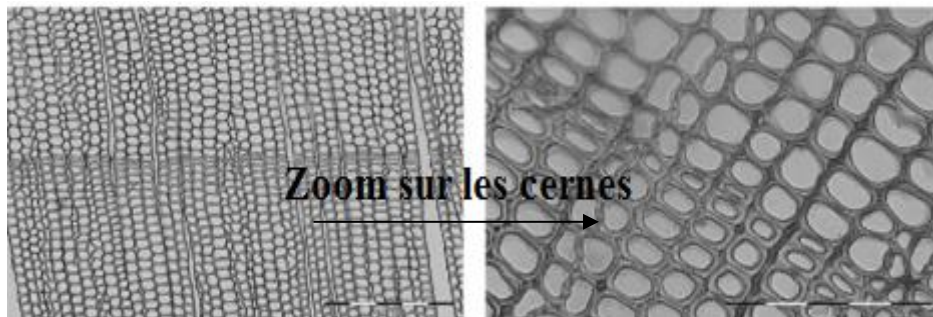


Figure 1.29 : Limites de cerne [36]

1.6.2 Variation liée aux propriétés physico-mécaniques :

Au sein d'un même échantillon les propriétés mécaniques et physiques peuvent varier d'une façon significative. Sous l'effet de son propre chargement et du vent, l'arbre subit des contraintes de compression et surtout de flexion avec une partie comprimée et une partie tendue (Figure 1.30). Pour des contraintes appliquées au-delà du domaine élastique, le bois comprimé résiste moins que le bois tendu et risque de subir des micro-flambements. Pour éviter ce risque les dernières couches de bois formées dans la partie périphérique du tronc ont des performances mécaniques plus élevées en traction lors de la croissance afin de protéger l'arbre d'une trop forte contrainte en compression, c'est le bois de réaction.

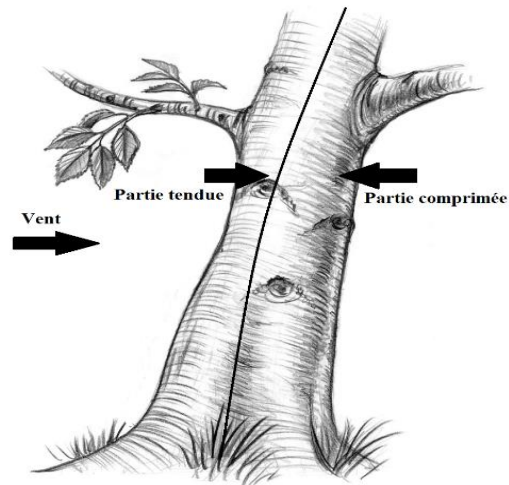


Figure 1.30: Efforts exercés sous l'effet du vent [38]

A l'échelle macroscopique les propriétés du bois varient selon le type d'essence et en fonction du sens d'orientation de ses fibres. Le travail mécanique du bois réagit suivant trois plans de référence définis comme suit (Figure 1.31) :

- Direction Longitudinale --> Correspond à l'axe de l'arbre ;
- Direction Tangentielle --> Tangente aux cernes de croissance ;
- Direction Radiale --> Passe par le centre biologique de l'arbre, la moelle.

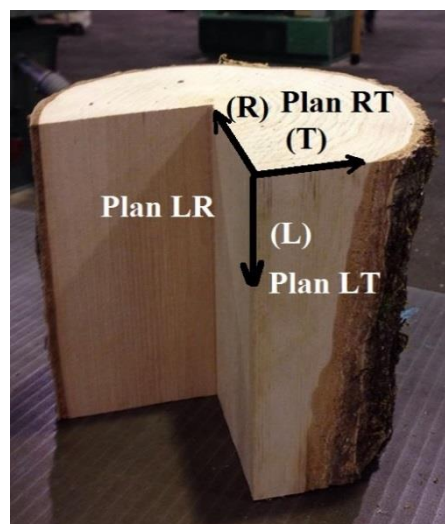


Figure 1.31: Directions et plans de travail mécanique du bois [Photo Ayari]

La dispersion liée aux trois directions précédemment mentionnées, se manifeste au niveau du comportement mécanique non linéaire du matériau et la variation des paramètres physiques suivants :

- **Le module d'élasticité longitudinale ou module de Young** : Noté généralement par E . C'est un coefficient qui mesure la capacité d'un matériau à résister aux changements de longueur lorsqu'il est soumis à une traction ou à une compression longitudinale. Selon Guitard [37], l'évolution de ce module varie en fonction des trois directions de travail du bois selon les équations (1) (2) et (3) :

$$E_{Longitudinal} = 13100 + 41700 \times (\rho - 0,45) \quad (1)$$

$$E_{Radial} = 1000 + 2370 \times (\rho - 0,45) \quad (2)$$

$$E_{Tangentielle} = 636 + 1910 \times (\rho - 0,45) \quad (3)$$

Avec ρ la masse volumique du bois. Quelques valeurs de module de Young pour différentes essences du bois sont illustrées dans le Tableau 1.4

Tableau 1.4: Module de Young suivant les trois directions de quelques essences du bois [148]

	Douglas	Epicéa	Pin	Chêne
$\rho_M [Kg/m^3]$	480	390	490	590
$E_L [N/mm^2]$	16000	11800	16015	14881
$E_R [N/mm^2]$	1010	920	1182	1505
$E_T [N/mm^2]$	800	510	616	830

- **Le coefficient de Poisson** : Noté généralement ν . C'est le rapport entre la contrainte de contraction transversale et la contrainte d'extension longitudinale dans la direction de la force de traction. Le Tableau 1.5 présente les coefficients de Poisson de quelques essences du bois suivant les plans du travail mécanique.

Tableau 1.5 : Valeurs de coefficient de Poisson de quelques essences du bois [38]

	Douglas	Epicéa	Pin	Chêne
ν_{LR}	0,41	0,34	0,39	0,22
ν_{LT}	0,54	0,42	0,44	0,46
ν_{RT}	800	510	616	830

1.7 Les 3 matériaux étudiés :

Dans le but de caractériser les procédés d'usinage robotisé du matériau bois, nous choisissons d'étudier 3 matériaux de propriétés mécaniques différentes : bois dérivé, feuillu et résineux.

1.7.1 Le bois dérivé MDF (Medium Density Fiber)

MDF est un acronyme provenant de l'appellation anglophone « Medium Density Fiberboard ». Appelé en français panneau de fibres à densité moyenne. Le MDF est un composite de fibres de bois et la résine. Techniquement, les copeaux de feuillus et de résineux ayant des dimensions entre 5mm et 40mm sont défibrés puis mélangés avec l'adhésif. Par la suite, l'ensemble est réparti uniformément sur une bande transporteuse. Une pression de 3500 MPa est appliquée sur le mélange sous une température de 200°C pour permettre le processus de réticulation de la colle et donner la forme finale du panneau.

Grâce à ses propriétés mécaniques et physiques illustrées dans le Tableau 1.6, ainsi son homogénéité suivant les axes X et Y, le MDF est utilisé dans plusieurs activités industrielles comme la menuiserie, l'aménagement, la fabrication de meubles et la décoration intérieure.

Tableau 1.6: Propriétés du MDF[152]

Propriétés mécaniques	
Densité	0,65
Module d'élasticité	2628 N/mm ²
Résistance à la flexion	27,9 N/mm ²
Résistance à la traction	0,62 N/mm ²
Humidité	8% à 9%

1.7.2 Le hêtre :

Le hêtre, arbre à feuilles caduques, appartient à la famille des Fagaceae *Fagus Sylvatica*. C'est la troisième essence feuillue française récoltée en volume par année. Il est facilement reconnu grâce à son écorce gris clair, mince et lisse. Son bois est hétérogène et dense de couleur blanc grisâtre ou jaune rougeâtre. Il est généralement reconnu par son aspect rigide et nerveux (Tableau 1.7). Le hêtre est l'une des essences dont le bois est apte à une très grande diversité d'emplois. C'est un matériau référence pour les usineurs pour qualifier l'usinage du bois. Il est fréquemment utilisé dans la fabrication des meubles, des sièges et des escaliers. Nous le trouvons aussi dans la fabrication des placages stratifiés, les lambris, les lamellés collés et les charpentes légères. Il est présent aussi dans la menuiserie et l'ébénisterie.

Tableau 1.7 : Propriétés du hêtre [153]

Propriétés mécaniques	
Densité	0,75
Module d'élasticité (Direction radiale)	13280N/mm ²
Résistance à la flexion	111N/mm ²
Résistance à la traction	125N/mm ²
Humidité	8% à 9%

1.7.3 Le sapin :

Le sapin appartient à la famille des *Pinaceae*, sous-embranchement des gymnospermes. C'est un arbre conifère (résineux) à tronc droit et à aiguilles persistantes. Le sapin est originaire des régions tempérées de l'hémisphère nord de la terre. Le bois du sapin se caractérise par un taux élevé de lignine. Sa résistance mécanique élevée (module d'élasticité, résistance à la flexion et la traction) fait du bois de sapin un matériau parfait pour la construction. Le sapin est utilisé dans plusieurs activités industrielles telles que: le bardage, la menuiserie intérieure/extérieure, ossature du bois. Les propriétés mécaniques du bois de sapin sont illustrées dans le Tableau 1.8.

Tableau 1.8: Propriétés du sapin (Baumier) [154]

Propriétés mécaniques	
Densité	0,45
Module d'élasticité (Direction radiale)	14300 N/mm ²
Résistance à la flexion	80 N/mm ²
Résistance à la traction	93N/mm ²
Humidité	8% à 9%

1.8 L'usinage du bois:

1.8.1 Introduction :

L'usinage est un procédé de transformation mécanique du matériau. Il permet de créer une forme précise par enlèvement de matière tout en respectant des plans de conception mécanique. Cette phase met en œuvre de nombreuses techniques particulières qui varient en fonction du : matériau à usiner, opération d'usinage, dimensions, nombre de pièce à réaliser, outil, modes et conditions de coupe.

L'industrie du bois fait appel à certains types de machine d'usinage tel que les machines de débit (déligneuse, dégauchisseuse...) des machines traditionnelles (tenonneuse, mortaiseuse...) et les machines à commande numérique (centre d'usinage numérique, Figure 1.32, tour numérique ...) et les robots manipulateurs de marques diverses telles que Kuka (Figure 1.33), Stäubli, ABB...



Figure 1.32: Machine à commande numérique CNC [15]



Figure 1.33: Robot industriel (KUKA kr 210 L180)[15]

1.8.2 Modes de coupe du bois :

Le bois réagit différemment suivant les trois directions du travail mécanique de l'outil. Kivimaa a mis en place une nomenclature pour caractériser l'interaction entre l'outil et la matière pendant l'usinage par enlèvement de matière [39]. Il s'est basé sur l'orientation de l'arête tranchante de l'outil et la direction de coupe. McKenzie a amélioré cette nomenclature et a défini 3 modes de coupe dont la notation est basée sur deux indices [40] (Figure 1.34): le premier est l'angle formé entre la direction de l'arête de coupe et la direction du fil du bois et le deuxième présente l'angle formé entre la direction de déplacement de l'outil et le fil du bois.

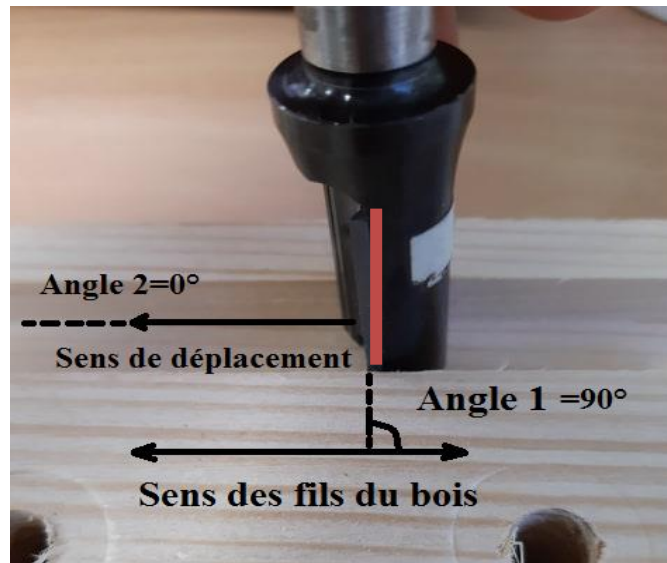


Figure 1.34: Angles de la nomenclature de Mckenzie[Photo Ayari]

Les trois directions principales de coupe sont illustrées dans la Figure 1.35:

- Coupe 90° - 90° : L'arête tranchante et la direction de mouvement de l'outil sont perpendiculaires à la direction des fibres du bois ;
- Coupe 0° - 90° : L'arête tranchante est parallèle à la direction des fibres du bois et le mouvement de l'outil est perpendiculaire ;
- Coupe 90° - 0° : C'est une opération de coupe suivant le plan longitudinal. Le mouvement de l'outil est parallèle à la direction des fibres et l'orientation de l'arête est perpendiculaire.
- Coupe 0° - 0° : N'existe pas.

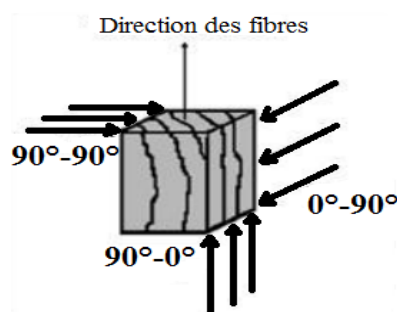


Figure 1.35: Les 3 directions d'usinage du bois [43]

1.8.3 Coupe orthogonale :

La coupe est dite orthogonale lorsque l'arête tranchante de l'outil est perpendiculaire à la direction du mouvement de la pièce du bois (ou la direction des fils). La surface obtenue est parallèle à la surface d'origine. Dans l'industrie, de nombreuses machines-outils fonctionnent en mode coupe orthogonale. Nous pouvons citer comme exemple la scie circulaire, la scie à ruban, la raboteuse, le tour à bois, la tronçonneuse... Ce mode de coupe est très utilisé dans les travaux de recherche qui analysent les formations de copeaux et l'usure de l'outil [41] [42] [43] et l'énergie consommée [44]. D'autres recherches se sont intéressées aux efforts de coupe qui varient en fonction de la direction de coupe [45].

Pour définir le comportement de l'outil et modéliser l'enlèvement de matière les chercheurs ont utilisé les 3 coefficients mécaniques suivants (Figure 1.36) :

- Angle de dépouille (γ). Il réagit sur la pénétration de l'arête tranchante dans le bois et intervient lors du dégagement du copeau ;
- Angle de coupe (α). Il sert à éviter le talonnement du bois sur l'outil. S'il est trop faible, la face de dépouille frotte sur le bois, provoquant l'échauffement et l'usure de l'outil. S'il est trop élevé, l'arête tranchante devient plus fragile ;
- Angle taillant (β). Il est complémentaire aux deux précédents et conditionne la résistance de l'outil à l'usure ;

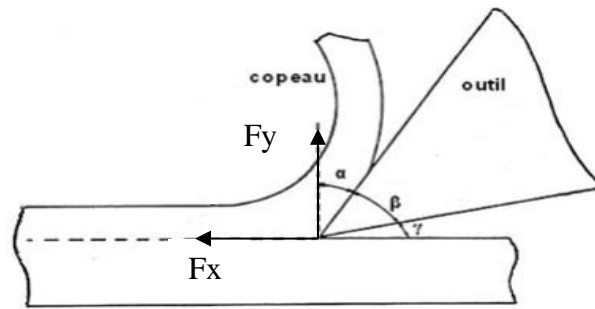


Figure 1.36: Géométrie de la coupe orthogonale[42]

Grâce aux coefficients α , γ , β , des chercheurs ont pu établir un modèle de consommation d'énergie pendant l'usinage du bois par enlèvement de matière. Orlowski dans [47] a pu établir un bilan énergétique de la coupe orthogonale 0° - 90° (Figure 1.37). Il a étudié les relations existantes entre l'énergie de création de surface, l'énergie de frottement et la dissipation mécanique par unité de volume. Pour un parcours « dl » le bilan des énergies est présenté par les équations (4) (5) (6) (7) (8) (9) et (10) illustrées dans le Tableau 1.9:

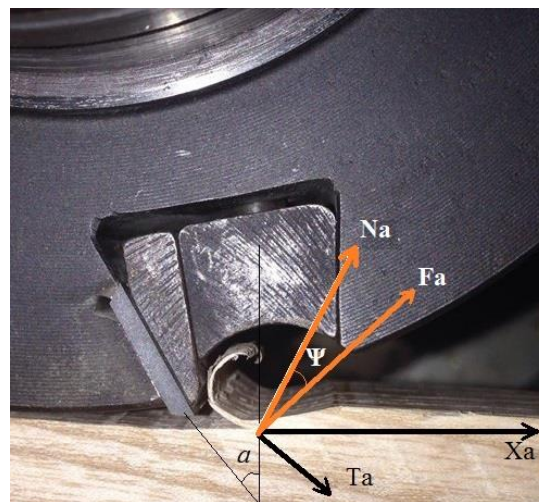


Figure 1.37 : Coupe orthogonale 0° - 90° sur une toupie

Tableau 1.9 : Bilan énergétique de la coupe orthogonale

Travail de la force F_a	$W_\alpha = X_\alpha \times b \times dl$ (4)
Energie de frottement	$W_f = T_\alpha \times b \times dl \times \cos(\alpha)$ (5)
Energie de création de surface	$W_s = G \times b \times dl$ (6)
Dissipation mécanique	$W_d = D \times e \times b \times dl$ (7) / $W_d = W_s + W_f + W_\alpha$ (8)

Avec : $T_\alpha = F_\alpha \times \sin(\Psi)$ (9) Effort de dépouille, $X_\alpha = F_\alpha \times \cos(\alpha - \Psi)$ (10) Effort frontal.

b : Largeur du copeau, α : Angle d'attaque, e : Prise de passe, Ψ : Angle de dépouille

1.8.3.1 Les efforts de coupe :

Lors du contact entre l'outil et le matériau pendant l'usinage, des efforts de coupe prennent naissance instantanément au niveau de l'arête tranchante (Figure 1.36). La description de ces efforts (valeurs, positions angulaire, évolution) est souvent utilisée pour étudier et modéliser le processus d'enlèvement de matière. D'autres facteurs comme le bruit, la mesure des vibrations, la température et la qualité de surface sont, quant à eux, peu traités [45].

La mesure des efforts de coupe est un outil intéressant permettant de développer des modèles de coupe physico-mécaniques pour mieux comprendre les phénomènes observés lors de la coupe. Ces modèles permettent de concevoir des machines et des outils afin d'optimiser le processus d'enlèvement de matière.

1.8.3.2 Les méthodes théoriques de mesure des efforts de coupe :

- Méthode de Petitpas [46]:

C'est l'approche la plus ancienne (1923). Elle a traité le cas du défonçage, du rabotage et d'autres opérations d'usinage similaires. Elle consiste à décomposer la puissance totale du travail de l'outil en trois parties :

- Travail utile « T » : Dépend du matériau à usiner ;
- Travail à vide de la MOCN « T₀ » ;
- Travail dû à l'aménage automatique « T₃ ».

Pour calculer la puissance totale de la machine il faut sommer les 3 paramètres « T », « T₀ », « T₃ » :

$$F_{totale} = T + T_0 + T_3 \quad (11)$$

Pour calculer T, il suffit de fixer la valeur de la profondeur de passe « e_m » et relever le produit commun c.e_m qui figure dans la dernière ligne du Tableau 1.10. Ensuite il faut juste appliquer l'équation (12) :

$$T = c.e_m \cdot \sqrt{h.v} \quad (12)$$

c = coefficient du matériau / h = largeur de coupe / v = prise de passe

Tableau 1.10: Calcul du travail utile "T"

	Coefficient c	e _m =Épaisseur de passe en cm			
Bois blanc	c= 45	e _m =	0,30	0,49	0,65
Feuillus ou résineux	c=83	e _m =	0,21	0,34	0,45
Tortillards dur et sec	c=85	e _m =	0,16	0,26	0,34
Produit commun	c.e _m =		13,5	22	20

- **Méthode Kivimaa** [39] :

Kivimaa a traité la variation des efforts de coupe en fonction des variables de coupe. Il a présenté les efforts de coupe totaux, par l'équation (13) :

$$F_c = (K_e + K_c \times e_m) \times b \quad (13)$$

Ou e_m signifie l'épaisseur moyenne de copeau en mm, b correspond à la largeur d'usinage (mm)

K_e coefficient d'arête représentant une force par unité de largeur de coupe (N/mm)

K_c, lié directement à l'angle de coupe normal, représente la force par unité de surface de la section du copeau. (N/mm²)

- **Méthode de Norman Franz** [49]:

Cette approche est la plus utilisée actuellement. Elle se base sur le calcul d'effort de coupe sur une dent en appliquant l'équation (14) :

$$F = F_t \times b \times K_e \times K_h \quad (14)$$

K_e= Coefficient du matériau / K_h= Coefficient d'humidité / b= Largeur de coupe en cm / F_t = Effort qui dépend du mode de coupe et l'épaisseur du copeau. Elle se calcule grâce à l'équation (15) (16) et (17) :

$$F_t = 40 + (120 \times e_m) \quad (\text{en mode } 90^\circ\text{-}0^\circ) \quad (15)$$

$$F_t = 20 + (40 \times e_m) \quad (\text{en mode } 0^\circ\text{-}90^\circ) \quad (16)$$

$$F_t = 100 + (300 \times e_m) \quad (\text{en mode } 90^\circ\text{-}90^\circ) \quad (17)$$

Où e_m est l'épaisseur moyenne du copeau calculée par l'équation 20.

- **Autres méthodes de mesure :**

D'autres modèles de coupe ont été développés afin de décrire la formation et les types de copeaux générés en fonction des efforts de coupe données [39],[49]. Le modèle de Eugene [50], écrit pour la coupe orthogonale du métal, a été adapté par McKenzie [40].

Selon la norme internationale des grandeurs de base en usinage et rectification NF-E66-507, la force appliquée pour usiner le matériau bois se décompose en une force parallèle F_p et une force normale F_n par rapport à la surface usinée (Figure 1.38). Les valeurs et les directions de ces composantes dépendent de plusieurs facteurs propres à l'outil de coupe, aux conditions de travail ainsi qu'au matériau à usiner [51]. La modélisation des forces tangentielles et radiales pendant l'usinage du bois est le sujet de nombreux travaux [52] [47].

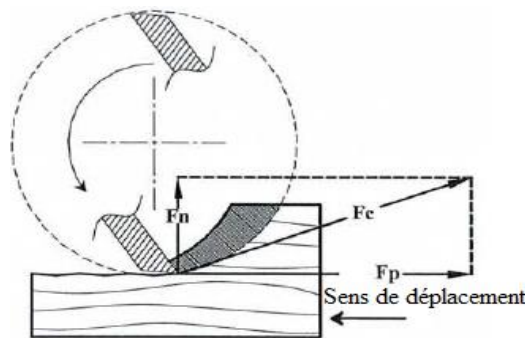


Figure 1.38: Modèle d'efforts parallèles et normaux [48]

Cependant, la problématique des mesures des efforts de coupe semble ne pas être encore résolue de manière adéquate. Ceci revient au grand nombre d'essence du bois usinées, de leurs variabilités et de la différente configuration de coupe utilisée dans la littérature qui rend le travail peu comparable.

D'autres études sur la modélisation des efforts de coupe portent sur l'analyse des propriétés mécaniques du bois [141]. Eyma a utilisé un modèle de calcul d'effort de coupe pour les feuillus et les résineux [46] présenté par les équations 18 et 19. La méthode fait appel au module d'élasticité en compression E_c , la pente élastique de ténacité P_f et l'infra-densité ID qui est le rapport entre le poids anhydre et le volume saturé d'un échantillon du bois. Les valeurs de E_c, P_f et ID sont illustrées dans Tableau 1.11.

$$F_{c\text{feuillus}} = (0,0031, E_c / ID) + (0,00139, P_f) \quad (18)$$

$$F_{c\text{résineux}} = 27,716.ID + 21,036 \quad (19)$$

Tableau 1.11: Propriétés physiques et mécaniques de quelques essences du bois.

Essences	ID	E_c	$P_{f,I}$
Fromager	0,204	1373	403
Epicéa	0,31	2990	2441
Frake	0,554	4906	8664
Hêtre	0,573	4841	5959
Frene	0,602	6177	6995
Eucalyptus	0,705	6408	8245
Moabi	0,714	6103	7552
Ipé	0,851	6540	14672

D'autres travaux de recherches se sont intéressés à l'épaisseur des copeaux pour développer un modèle qui caractérise l'interaction entre les forces appliquées et l'enlèvement de matière [53] [41],[142]. D'autres facteurs ont été les sujets pour étudier l'usinage du bois tels que l'orientation de l'arête tranchante [54] [55], l'usure des outils [56],[140], la masse volumique, la teneur en humidité et la température du bois [57].

1.8.3.3 Formation de copeaux lors de la coupe orthogonale :

En étudiant l'usinage du bois en coupe orthogonale, Franz [49] a défini trois types de copeau : Type I, II, III.

Les copeaux de type I sont formés lorsque les conditions de coupe mènent à un enlèvement de matière par scission suivant un plan parallèle à l'arête tranchante (Figure 1.39). Ses conditions sont également : un angle de coupe élevé, une faible prise de passe. La formation de ce type de copeau est caractérisée par une faible consommation d'énergie des machines-outils.

Les copeaux de type II, (Figure 1.40), sont obtenus à travers des conditions de coupe différentes: Un angle de coupe qui varie entre 10 et 25° et une faible prise de passe. En pénétrant dans la matière l'outil exerce une compression longitudinale qui crée des forces de cisaillement. L'enlèvement de matière s'effectue suivant une ligne droite qui s'étale à partir de l'arête tranchante de l'outil, formant ainsi un copeau continu. En général, l'usinage, produisant des copeaux de type II, donne la meilleure qualité de surface avec une force normale proche de zéro.

Le type III, (Figure 1.41) est obtenu à la suite d'une rupture par compression et cisaillement longitudinal. Contrairement aux cas précédents, le copeau résultant n'a pas de forme définie et il est réduit en fragments. Les paramètres expérimentaux qui mènent à la formation de ce type de copeau sont : Un angle de coupe proche de 0°. L'usinage donnant un copeau de type III est souvent accompagné par une consommation importante d'énergie vu l'implication des

propriétés mécaniques du matériau dans le procédé d'usinage. Par conséquent des efforts de coupe plus élevés sont générés. Ces résultats sont confirmés par Gonçalves et Néri dans [58].

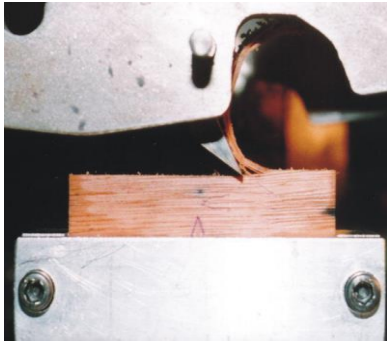


Figure 1.39: Copeau de type I [49]

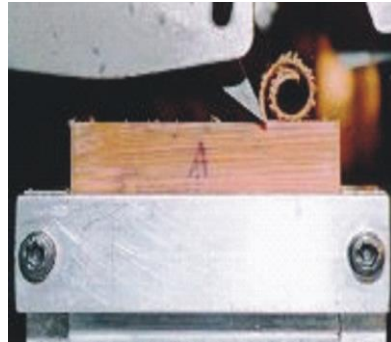


Figure 1.40: Copeau de type II [49]

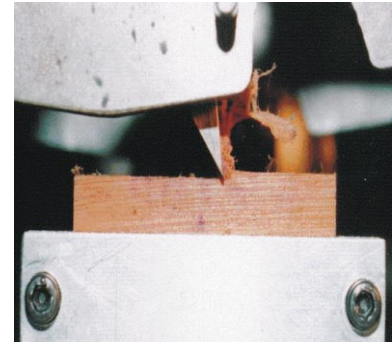


Figure 1.41: Copeau de type III [49]

Pour garantir une épaisseur de copeau constante et par conséquent une meilleure qualité de surface, les chercheurs recourent toujours à l'interaction entre les paramètres de coupe et l'épaisseur des copeaux en faisant appel à la formule suivante spécifique au défonçage du bois :

$$e_m = \frac{f_z}{\Pi} \quad (20)$$

$$f_z = \frac{V_f}{N \times Z} \quad (21)$$

f_z : L'avance par dent (mm/dent) V_f : Vitesse d'avance (mm/min) N : Vitesse de rotation (tr/min)

Z : Nombre de dent H : Profondeur de passe (mm) e_m : Epaisseur du copeau (mm)

D : Diamètre de l'outil (mm)

1.8.4 Autres orientations de coupe du bois :

L'usinage du bois possède d'autres orientations de coupe fréquemment utilisées dans l'industrie du bois. Leurs caractéristiques se différencient complètement de celles de la coupe orthogonale et chacun a ses particularités d'un point de vue consommation d'énergie, qualité de surface et effort de coupe. Dans la suite nous allons étudier quelques exemples :

- **Coupe oblique:** Elle est caractérisée par une inclinaison de l'arête tranchante d'un angle appelé angle d'inclinaison d'arête de coupe (Figure 1.42). Ceci permet d'amplifier le pouvoir coupant de l'outil [59] en ayant une coupe progressive dans le bois. Des outils de coupe pour le corroyage ont été développés en utilisant ce principe ;

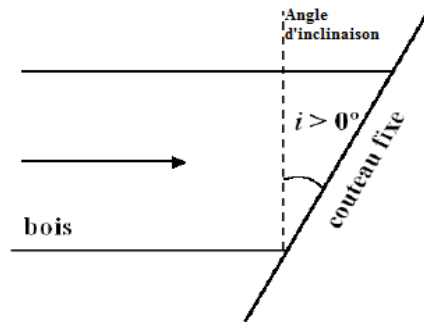


Figure 1.42: Position de l'arête tranchante du couteau en coupe oblique [55]

- **Coupe périphérique** : C'est la coupe « Classique » d'un outil de coupe cylindrique où les arêtes de coupe sont positionnées sur l'enveloppe du cylindre. Ils existent deux stratégies pour effectuer une coupe périphérique :

1/ Un usinage en avalant, où l'avance de la pièce en bois et le déplacement de l'outil de coupe ont le même sens (Figure 1.43) ;

2/ Un usinage en opposition, où le sens du déplacement est l'inverse de la trajectoire de l'outil de coupe (Figure 1.44).

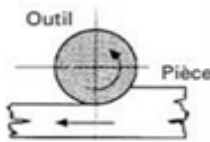


Figure 1.43: Usinage en opposition [46]

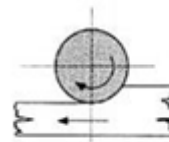
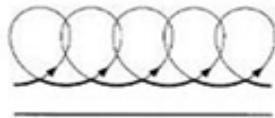
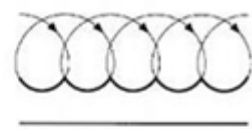


Figure 1.44: Usinage en avalant [46]



1.8.5 Le défonçage :

1.8.5.1 Définition:

Le défonçage est un procédé d'enlèvement de matière quand un outil de type mèche travaille en pleine matière en usinage en avalant ou en opposition.

Le défonçage peut être appliqué sur toutes les pièces à base de matériau bois et ses dérivés: bois massif, OSB, panneaux de particules, lamibois, MDF, contreplaqué latté/lamellé et contreplaqué à pli... Plusieurs secteurs industriels font appel à cette technique d'usinage pendant la production tels que : La menuiserie, la fabrication des meubles, l'emballage en bois (Figure 1.45) (fabrication des boîtes, des caisses et des cagettes), l'optique (fabrication des cadres de lunettes) (Figure 1.46), le loisir: fabrication des jouets (Figure 1.47).



Figure 1.45: Emballage en bois



Figure 1.46: Cadres de lunettes en bois chez In'Bo



Figure 1.47: Jouets pour enfants en bois

1.8.5.2 Avantages du défonçage:

Comme les autres procédés d'usinage par enlèvement de matière, l'opération de défonçage possède des avantages et des inconvénients liés à plusieurs facteurs tels que l'usure de l'outil la qualité de surface, les vibrations et le broutement... Dans le Tableau 1.12, nous avons récapitulé les points forts et les points faibles de défonçage du bois.

Tableau 1.12: Avantages et inconvénients de défonçage [45]

Avantages	Inconvénients
1/ Possibilité de réaliser des usinages sur des pièces à morphologies complexes.	1/ Des températures de coupe très élevées peuvent être générées.
2/ Le défonçage peut atteindre une précision de 0,02mm, ce qui permet d'avoir une grande régularité au niveau de l'état de surface.	2/ Efforts de coupe très élevés dans certaines conditions de coupe.
3/ Applicable sur n'importe quelle essence du bois.	3/ Usure fréquentes des outils de coupe.
4/ Substitution de certaines opérations d'usinage telles que : le dégauchissage, le tenonnage le mortaisage...	4/ Consommation élevée de la puissance électrique.
5/ Exécution rapide, ce qui diminue le temps de cycle et augmente le flux de production.	5/ Un coût d'installation et de maintenance élevé.
	6/ Nécessité d'un personnel qualifié ayant les compétences nécessaires pour manipuler les machines à commande numérique.

1.8.5.3 Opérations de défonçage :

Plusieurs opérations d'usinage bois peuvent s'apparenter à des opérations de défonçage telles que le corroyage et le profilage [60]. La génération de surface plane (Surfaçage), le dressage des chants (contournage) et l'ornement linéaire (moulurage, rainurage) sont tous des opérations

de défonçage. Elles exigent l'existence d'un brut à surface plane considérée comme un plan de référence pour le travail d'outil.

Le profilage, ou « profilé », consiste à générer des formes plus ou moins complexes suivant des directions linéaires aux différentes dimensions de la pièce. Le moulurage (Figure 1.48) sert à usiner un ornement à profil constant en saillie ou en creux destiné à souligner les lignes architecturales d'une surface.

Le mortaisage et le tenonnage sont deux opérations d'usinage très répandues dans l'industrie du bois (Figure 1.49). Elles consistent à créer une liaison d'encastrement entre deux pièces ayant généralement une liaison orientée d'un angle de 90°[60]. Usiner une mortaise revient à réaliser un logement en enlevant un volume de matière généralement parallélépipédique de dimensions bien définies. Le Tenonnage consiste à usiner une forme souvent parallélépipédique centré ou excentré au bout de la pièce. La cavité créée par la mortaiseuse reçoit après le tenon pour donner une liaison d'encastrement.

Le rainurage (Figure 1.48) consiste à créer une entaille longue et étroite, généralement de section rectangulaire. La cavité reçoit, par la suite, une languette qui est un complément de la rainure pour assembler les panneaux [61]. Il se présente généralement sous la forme d'un élément d'assemblage male.

Le contre profilage (Figure 1.50), est une opération d'enlèvement de matière sur le bout de la pièce afin de donner une forme parallélépipédique. Peut être considéré, géométriquement comme une opération particulière de profilage.

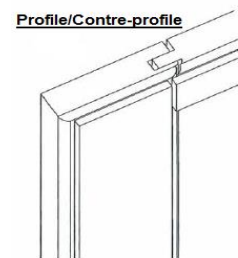
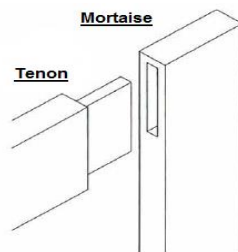
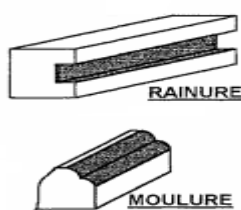


Figure 1.48: Moulure et Rainure [61]

Figure 1.49: Assemblage Tenon/Mortaise [61]

Figure 1.50: profil/contreprofil [61]

1.9 Facteurs influençant l'usinage du bois :

Suite à de nombreuses analyses des résultats et de constatations effectuées pendant des projets de recherche sur l'usinage du bois au LERMAB [60], [62], [63], [64] Nous pouvons résumer les facteurs influençant l'usinage dans le digramme cause à effet de la Figure 1.51.

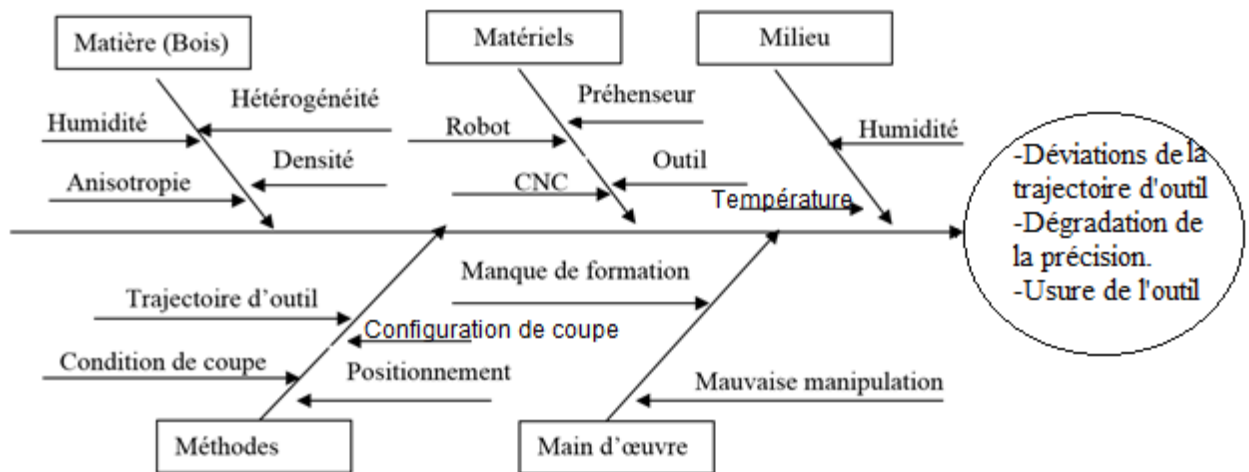


Figure 1.51 : Facteurs influençant l'usinage du bois

Il a été observé que les propriétés mécaniques de différents matériaux du bois influencent énormément les efforts de coupe et la qualité d'usinage par enlèvement de matière [65]. Il s'est avéré aussi que l'ensemble machine-outil et méthodes de coupe joue un rôle déterminant au niveau des efforts [66]. Suite aux travaux bibliographiques, nous avons décidé d'étudier les rôles que peuvent jouer la défonceuse numérique, le robot, le matériau (MDF, hêtre, sapin) et les modes de coupe sur les procédés d'usinage du bois par enlèvement de matière.

1.9.1 Facteurs liés aux conditions d'usinage :

1.9.1.1 La vitesse de coupe :

Dans le domaine de l'usinage bois, plusieurs travaux de recherche se sont intéressés aux effets des conditions de coupe sur la qualité de surface obtenue, la qualité du profil usiné et les efforts de coupe [67], [68], [69].

Quant à l'effet de la vitesse de coupe, les opinions divergent. Certains chercheurs ont trouvé que ce facteur n'a aucun effet sur la plupart des essences du bois pour une large gamme de vitesse [67] : McKenzie a étudié également l'effet de la vitesse de coupe [40]. Il a usiné une multitude d'essence de bois en faisant varier la vitesse de coupe entre 0,2m/s et 6,3m/s. Il n'a trouvé aucun effet significatif sur l'effort de coupe. De la même manière, pour Kivimaa, en mode de coupe 0°-90°, l'augmentation de la vitesse de coupe de 2,5m/s à 50m/s n'a aucun effet sur les efforts [39]. Cependant, en évaluant la variation des efforts de coupe dans la direction d'usinage, McKenzie a constaté un effet sur les efforts mesurés lorsque la vitesse de coupe est entre 15m/s et 150m/s. Il a constaté l'apparition d'une force supplémentaire due à l'accélération qui peut être assimilée à une force d'inertie. Bernard Thibault a pu observer dans [70], en déroulant du bois vert, que lorsque la vitesse de coupe augmente le coefficient de frottement diminue.

1.9.1.2 La température:

Pendant l'usinage du bois, le frottement entre l'arête tranchante de l'outil et la matière transforme l'énergie mécanique consommée par le système en une énergie thermique [71],[137]. Contrairement au métal, la conductivité thermique du bois est faible [72], [73]. Par conséquent la quasi-totalité de la chaleur générée est transférée à l'outil, ce qui augmente sa température. Kivimaa a étudié l'effet de ce phénomène sur l'effort de coupe. Il a trouvé que la variation de la température du système dépend de la nature de l'essence usinée. Lorsque l'outil usine le bois sec, la température n'a pas réellement de grande influence sur les efforts de coupe. Ce qui n'est pas le cas avec le bois vert, ou humide, l'effort décroît lorsque la température diminue. Ratnasingam, en usinant du MDF et du feuillu, a constaté qu'il existe une relation de proportionnalité directe entre les efforts de coupe et la température [74]. Plus la chaleur générée est élevée, plus les forces appliquées dans la région de coupe sont importantes.

1.9.1.3 L'usure de l'outil :

L'usure de l'outil est définie comme une perte ou une déformation de la matière au niveau de l'arête tranchante due aux effets des phénomènes mécaniques tels que l'abrasion sous fortes et faibles charges, l'érosion, la cavitation et la fatigue [80]. Des phénomènes chimiques associés au processus de coupe peuvent aussi contribuer à l'usure de l'outil. Nous citons comme exemple : l'oxydation, la corrosion électrochimique et la corrosion biochimique [80].

Des chercheurs ont constaté que les efforts de coupe et l'état de surface sont très sensibles à la modification géométriques de l'outil [81], [82]. Itaya et Tsuchiya [83] ont conclu que la conséquence directe de l'usure des arêtes tranchantes est une augmentation au niveau des efforts de coupe et au niveau de la consommation électrique de la machine. La perte progressive de la capacité à couper le bois mène à une qualité de surface dégradée et un coût d'opération élevé. Tratar a établi une cartographie de l'usure de l'outil, (Figure 1.52), en usinant du MDF avec un robot anthropomorphe [84]. Il a trouvé que la configuration et la faible rigidité de la machine contribuent énormément à la dégradation de l'arête tranchante de l'outil. En utilisant un outil à une dent en HSS de diamètre 12mm qui tourne à 8000 tr/min, avec une vitesse d'avance égale à 2400mm/min et vitesse de coupe de 300m/s, Tratar a pu déterminer que plus la distance entre la broche d'usinage et la base du robot est importante plus la tendance de l'outil à être usé est élevée [84].

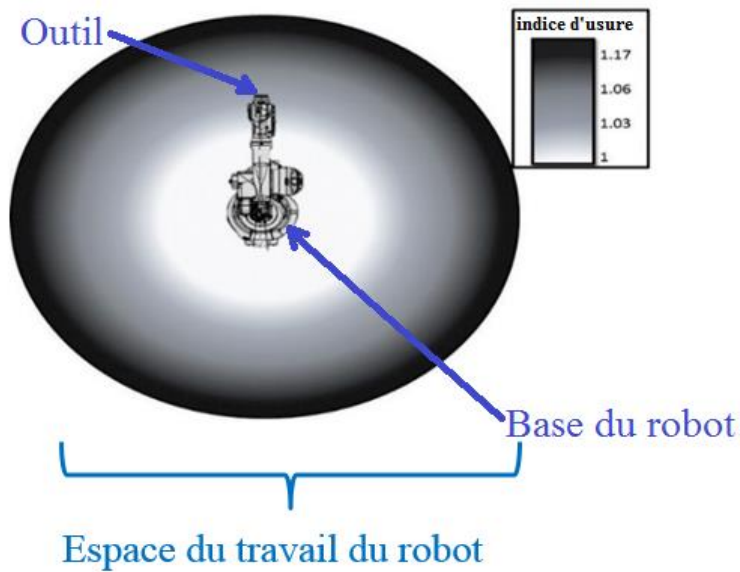


Figure 1.52: Cartographie de l'usure de l'outil pour l'usinage du bois avec un robot industriel [84]

1.9.2 Facteurs liés au matériau :

1.9.2.1 L'humidité

Plusieurs études ont traité le sujet de l'humidité et elles ont montré que son effet sur l'usinage du bois est loin d'être négligeable [75], [76], [37]. Pendant l'enlèvement de matière, l'eau contenue dans les cellules du bois se libère dans les zones où les contraintes sont maximales. Ceci rend le matériau plus visqueux et engendre une augmentation de la résistance mécanique (module de Young plus élevé). Ce phénomène est connu sous le nom d'effet maxwell [67] [77], [78]. Zhaolong a constaté une autre manière d'évolution des efforts [79]. Ils ont trouvé que lorsque l'humidité du bois augmente, les efforts de coupe décroît initialement puis ils se stabilisent (Figure 1.53).

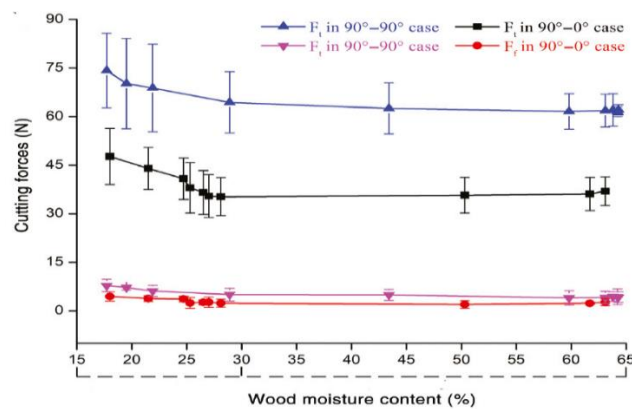


Figure 1.53 : Evolution des efforts de coupe en fonction de l'humidité du bois [79]

1.9.2.2 La densité du bois :

En étudiant l'effet de la densité du bois sur les processus d'usinage par enlèvement de matière, Hernandez a usiné 3 feuillus tropicaux « *Amburana cearensis* », « *Aspidosperma macrocarpon* » et « *Clarisia racemosa* » [85]. Il a montré qu'il existe une relation de proportionnalité directe entre la densité et les efforts de coupe. Ces résultats ne contredisent pas les travaux menés par Chuchala et al [86] : en étudiant l'effet de l'origine de provenance du bois et sa densité, ils ont prouvé que les forces de coupe sont plus importantes lorsque la densité de l'essence à usiner est élevée (Figure 1.54).

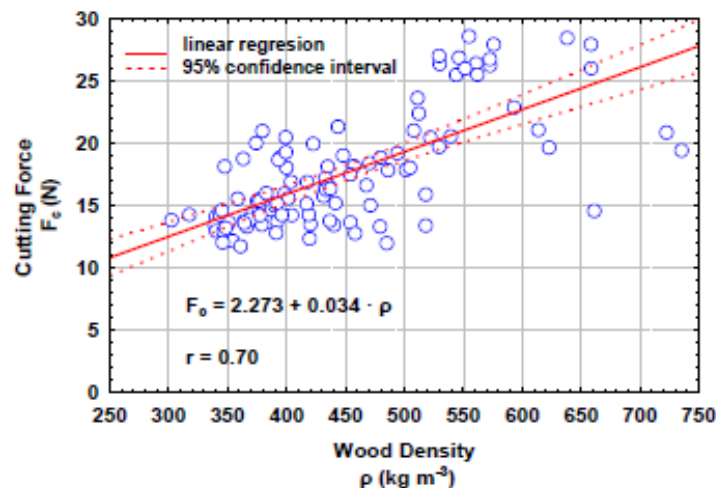


Figure 1.54: Evolution des efforts de coupe en fonction de la densité du bois [86]

1.9.3 Facteurs liés à la méthode d'usinage :

1.9.3.1 Les vibrations d'usinage :

L'apparition des efforts de coupe élevés pendant l'usinage du bois provoque des phénomènes de vibration au niveau du déplacement de l'outil. Ils sont classés selon 3 catégories [87] [88] :

1. **Les vibrations libres** : Elles apparaissent suite à un choc du montage d'usinage (la broche, l'outil, l'échantillon). Elles sont absentes pendant la procédure d'enlèvement de la matière ;
2. **Les vibrations forcées** : Elles apparaissent lorsque l'ensemble outil/pièce est sollicité par des charges importantes d'une façon cyclique et d'une fréquence proche de la fréquence de l'outil. Elles sont généralement dues à un défaut d'excentricité de la pièce pendant la mise en place ou lorsque la pièce à usiner est ébauchée en « patatoïde ». L'apparition des phénomènes de vibrations forcées dégrade l'état de surface et induit des défauts dimensionnels sur les pièces ;
3. **Le broutement ou « chattering »** : appelés aussi les vibrations auto-entretenues. Elles se différencient par rapport aux vibrations forcées, par une fréquence différente à celle de l'outil. Le broutement apparaît généralement suite à des perturbations au niveau de la

structure du montage d'usinage qui peuvent atteindre des amplitudes élevées. Ces phénomènes sont extrêmement redoutés par les usineurs parce que leur présence dégrade la rugosité de la pièce et provoquent des chocs sur l'arête tranchante et la broche. Le passage d'une dent sur une surface usinée par la dent précédente, qui renferme déjà une ondulation, induit des variations au niveau de la section des copeaux et des fluctuations des efforts de coupe.

1.9.3.2 L' effet de la vibration :

Lorsque les vibrations apparaissent, leurs amplitudes et leurs fréquences s'ajoutent à celles du système d'usinage, ce qui perturbe la trajectoire réelle de l'outil, plus précisément la trajectoire de l'arête tranchante (Figure 1.55)

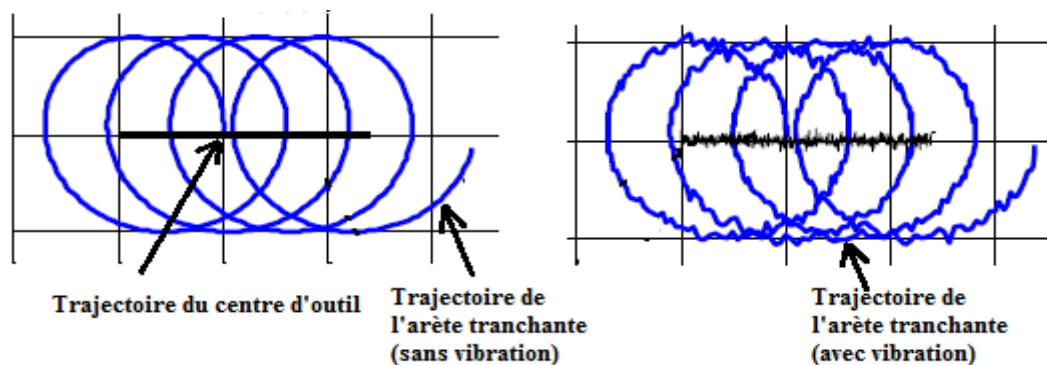


Figure 1.55: Effets de la vibration sur la trajectoire de l'outil [87]

Par conséquent, les états de surface générés sont médiocres. Les vibrations peuvent être présentes pendant toute l'opération d'usinage comme illustré dans la (Figure 1.56) ou seulement suivant une portion de la pièce avant de reprendre une forme plus constante (Figure 1.57). Les vibrations peuvent apparaître aussi au moment de l'entrée dans la matière et au moment du retrait de l'outil. Dans ce cas, la partie centrale du profil est usinée sans défaut apparent (Figure 1.58).



Figure 1.56: Vibration d'usinage pendant toute l'opération[87]

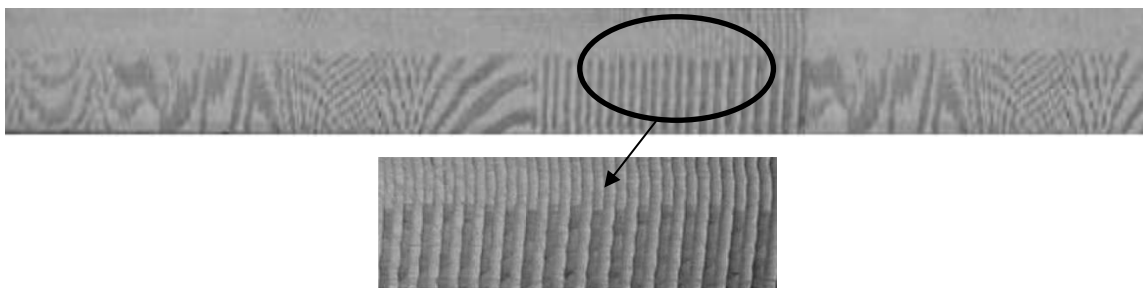


Figure 1.57: Effet de la vibration sur une portion d'usinage [87]

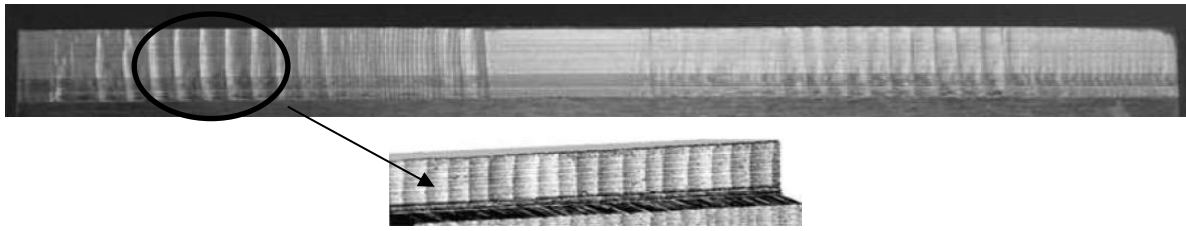


Figure 1.58: Effet de la vibration à l'entrée et la sortie de l'outil [87]

1.9.4 Facteurs liés au robot : la loi de commande

1.9.4.1 Commande des systèmes robotiques :

Un autre facteur déterminant dans l'usinage du bois par enlèvement de matière, c'est le comportement du dispositif usineur face aux efforts de coupe qui prennent naissance lors du contact entre l'outil et la matière. D'un point de vue technique, les actionneurs intégrés dans le système usineur sont les responsables du déplacement de l'outil et le suivi de la trajectoire programmée. Ces actionneurs sont des moteurs de technologies différentes : Moteur à courant continu, servomoteur... Généralement, ils sont commandés à travers un ensemble d'instructions implémentées dans la partie logicielle du système. C'est la loi de commande.

1.9.4.2 Définition d'une commande robotique :

Pour la mise en service, les robots ont besoin d'ordres sous la forme d'une série d'instructions générée par un contrôleur. Ceci se réalise à travers l'élaboration d'une loi de commande. Elle peut être définie comme une série d'impulsions électrique générées par une unité de traitement (automates programmables industrielles, cartes électroniques microprogrammes, relais d'automatisme). Ces instructions sont transmises vers des pré-actionneurs (Contacteurs, variateurs de vitesse, distributeurs) qui commandent par la suite les actionneurs (moteurs, vérins hydrauliques ou pneumatiques) pour effectuer l'opération souhaitée (Figure 1.59).

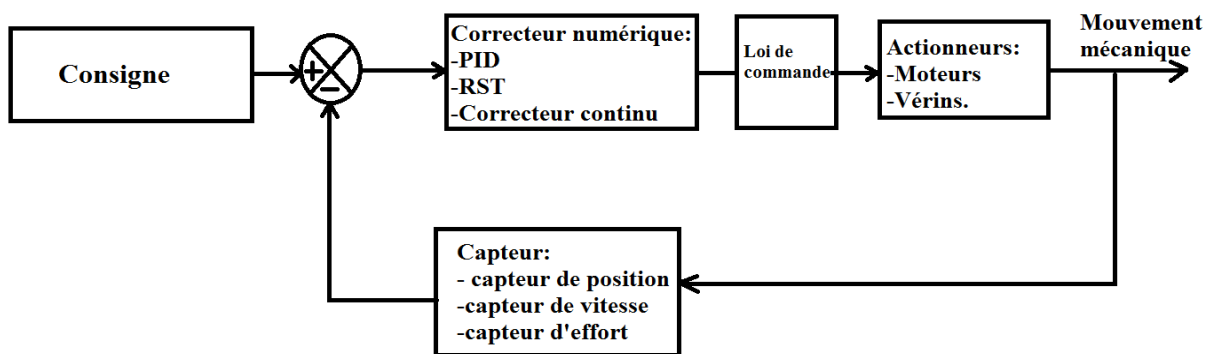


Figure 1.59: La commande robotique

1.9.4.3 Enjeux de la commande robotique :

Le pilotage des robots industriels reste relativement compliqué à cause de leurs structures multi-corps élastiques à plusieurs variables couplées, leurs chaînes de transmission amortissables et

leurs cinématiques non linéaires. Lors du développement de la loi de commande, l'opérateur doit absolument prendre en compte les facteurs ayant d'énormes influences sur le comportement du robot.

Parmi lesquels on cite les facteurs les plus dominants :

- La flexibilité articulaire, les offsets des axes, l'incertitude des paramètres du modèle géométriques [89], [90], [91] ;
- Les amortissements et les vibrations pendant le suivi de la trajectoire [92] ;
- La non linéarité des modèles mécaniques, les tolérances des engrenages, le frottement, les défauts de construction dans la chaîne cinématique et l'élasticité [93] ;
- La planification de mouvements [94], [95], [96], le traitement de la redondance [97], [98],[99],[100] ;
- Les singularités géométriques [101],[102].

1.9.5 Facteurs liés aux matériau, outil d'usinage et mode de coupe :

Il existe d'autres facteurs ayant une influence importante et remarquable sur l'usinage par enlèvement de matière. Dans le Tableau 1.13, nous rassemblons ces principaux facteurs :

Tableau 1.13 : Facteurs influençant l'usinage par enlèvement de matière

	Liés à l'outil	Liés au matériau	Liés au mode de coupe
Facteurs	1/ La matière de l'outil [103], [104]. 2/ La finesse de l'arête tranchante et la surface de la face d'attaque [84]. 3/ Etat de surface de l'arête tranchante [105].	1/ Le traitement thermique [107] [108]. 2/ Propriétés du matériau (Feuillus, résineux, bois dérivé) [109] [110]. 3/ Singularités de matériau (présence des nœuds, des fentes...) 4/ Irrégularité de matériau (objets métalliques incrustés dans le bois...).	1/ L'épaisseur et la largeur du copeau [79]. 2/ Les angles d'usinage (l'angle d'attaque, l'angle taillant, l'angle de dépouille) [111]. 3/ Les conditions de coupe (vitesse d'avance, l'avance par dent, profondeur de coupe...) [112],[113], [105],[136]. 4/ Les modes de coupe (90°-0°/ 90°-90°/ 0°-90°) [114]. 5/ La technologie de coupe [115],[138].

1.10 Conclusion :

La tendance de la robotisation mondiale ne cesse de croître dans les secteurs connus comme pionnières de l'intégration des robots industriels dans les chaînes de production (automobile, aéronautique). Grâce à son efficacité et aux performances techniques dont elle a fait preuve, la robotique conquiert de nouveaux secteurs et occupe un rôle central dans leurs progressions et développement (métallurgie, plasturgie, agro-alimentaire, pharmaceutique...). Actuellement, l'industrie du bois s'appuie sur des systèmes de transformation traditionnels connus pour leur robustesse de fonctionnement (machines-outils traditionnelles, machines-outils à commande numérique). Le taux de robotisation dans l'industrie du bois reste faible et l'usage des robots se limite à la réalisation de tâches simples (manutention, charge-décharge, palettisation). L'état de l'art révèle que l'utilisation des robots industriels pour l'usinage du bois rencontre plusieurs contraintes non négligeables: la dispersion du matériau bois liée à son anatomie et ses propriétés mécaniques, des efforts de coupe très variables élevés et des phénomènes de vibration qui prennent naissance lors du contact entre l'outil et la matière. Notre travail bibliographique montre aussi que la robotisation de l'usinage du bois rencontre d'énormes enjeux liés au système robotique: la flexibilité articulaire, les offsets des axes, l'incertitude des paramètres du modèle géométrique et la non-linéarité des modèles du robot. Ces contraintes et ces enjeux constituent un défi à surmonter afin de développer l'usage des robots industriels pour l'usinage du bois. Ceci n'aura lieu que lorsque les facteurs influençant le procédé d'enlèvement de matière seront connus, analysés et identifiés.

Chapitre 2 -Caractérisation des opérations d'usinage robotisées : Matériels et méthodes

2.1 Introduction :

Actuellement, l'utilisation des outils à arêtes coupantes présente une technique incontournable de mise en œuvre des procédés d'usinage. Dans les industries du bois, cette approche est souvent employée, que ce soit dans la première ou la deuxième transformation. Les machines de débit (déligneuse, dégauchisseuse, raboteuse ou corroyeuse...), les machines conventionnelles (tenonneuse, mortaiseuse...) et les machines à commande numérique (centre d'usinage numérique, tour numérique ...) nécessitent toutes l'utilisation d'outils à arêtes coupantes mis en œuvre dans des conditions de coupes optimales. Il est d'usage d'associer à chaque machine une fonction spécifique (perçage, rainurage, contournage, surfaçage...). La maîtrise des conditions de coupe permet généralement d'aboutir à un produit qui répond aux besoins et exigences des contraintes industrielles. Dans les industries du bois, ce procédé d'usinage est rarement adopté avec les robots industriels. Ceci revient à des contraintes techniques liées à la machine [116], [117] et au matériau usiné [36].

Ce chapitre est dédié à la présentation des équipements expérimentaux mis à notre disposition pour étudier les procédés d'usinage bois avec des systèmes robotisés. Nous mettons en place une plateforme robotique instrumentée par une chaîne de mesure d'efforts de coupe. Un protocole expérimental précis est établi pour caractériser les efforts et la qualité dimensionnelle d'usinage en fonction des paramètres suivants : machine, configuration machine, matériau, mode de coupe, singularités du matériau et conditions de coupe.

Avant de lancer les campagnes expérimentales, nous réalisons des essais à vide pour tester les performances de la chaîne de mesure des efforts et quantifier l'influence des phénomènes aléatoires (accélération du robot, inertie de l'ensemble capteur d'effort + composants du robot, vibrations des équipements à proximité).

2.2 Plateforme robotique :

2.2.1 Robot usineur :

Le robot utilisé pour réaliser les expériences est un manipulateur industriel polyarticulé à 6 degrés de liberté de marque ®Kuka référencé Kr210 L180 (Figure 2.1(a)). Le robot est composé principalement de 4 parties :

- L'Embase : C'est la base du robot qui supporte tout le système ;
- La Tourelle : Elle abrite les deux actionneurs de l'axe 1 et 2. Elle est équipée par un équilibreur, appelé aussi compensateur de gravité, qui permet de compenser une partie de l'inertie des corps composant le robot. La compensation est réalisée grâce à la technologie vérin ressort ;
- L'épaule : Il relie la partie supérieure du robot avec sa base et renferme l'axe 3 ;

➤ Bras + poignet : Ils abritent les 3 actionneurs de 3 derniers axes du robot. C'est la partie qui contient la bride du robot, appelée aussi l'organe terminal. Les axes 4,5 et 6 sont concourants en un point appelé centre de poignet. L'ensemble émule le mouvement d'une rotule.

La Figure 2.1(b) et le Tableau 2.1 illustrent, respectivement, les degrés de liberté et les propriétés techniques du robot ®Kuka Kr210.



Figure 2.1(a): Robot Kuka Kr 210L180 [8]

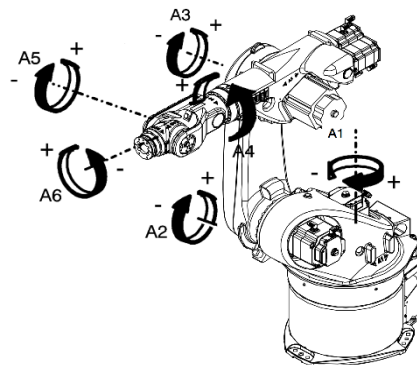


Figure 2.1(b): Axes de rotation du robot Kuka Kr 210 L180 [8]

Tableau 2.1: Propriétés techniques du KUKA Kr210.

Portée maximale	3000mm	Axe 1 (A1)	$\pm 185^\circ$
Charge nominale	180 Kg	Axe 2 (A2)	$+70^\circ/-120^\circ$
Nombre d'axe	6	Axe 3 (A3)	$+155^\circ/-119^\circ$
Répétabilité	0,06mm	Axe 4 (A4)	$\pm 350^\circ$
Poids	1455 Kg	Axe 5 (A5)	$\pm 125^\circ$
Contrôleur	KR C2	Axe 6 (A6)	$\pm 350^\circ$

2.2.2 Notions de base de la robotique :

Nous consacrons cette partie à l'explication des notions de base de la robotique sur lesquelles est basée notre étude.

2.2.2.1 Espace de travail :

L'espace de travail du robot renferme deux zones différentes (Figure 2.2) :

- Une zone atteignable : C'est l'ensemble des points de l'espace accessible par l'organe terminal du robot ;

- Une zone dextre : C'est l'ensemble des points de l'espace atteignable par l'organe terminal du robot sans limitations d'orientations.

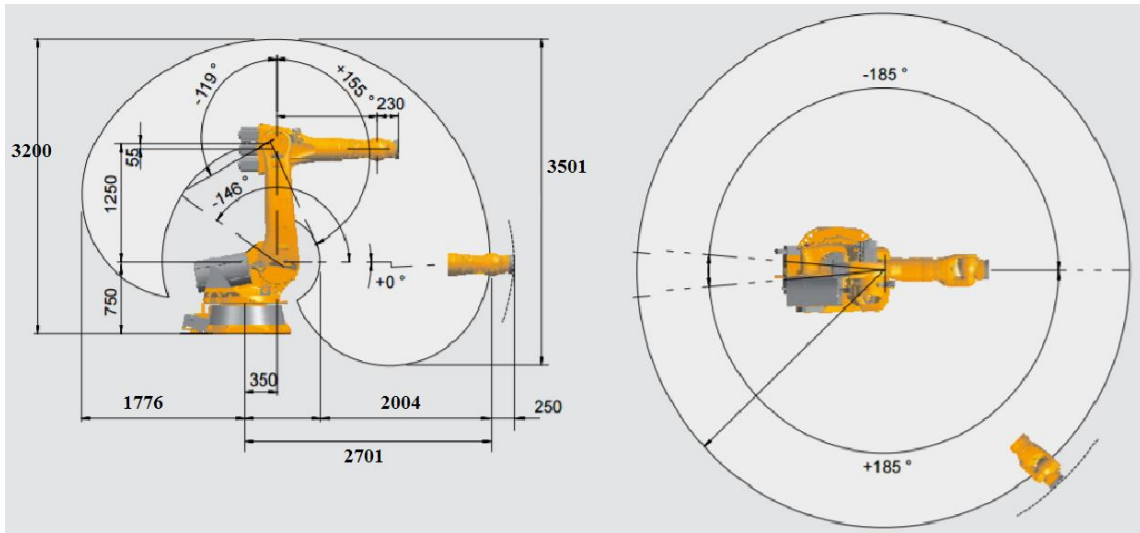


Figure 2.2: Espace de travail du robot Kuka [8]

2.2.2.2 Précision:

Les robots industriels sont conçus généralement pour effectuer des tâches répétitives (pick and place) ce qui explique leurs bonnes répétabilité et leurs faibles précisions. Ces deux notions ont des significations tellement proches que les utilisateurs les confondent souvent. Pour remédier ceci, il est nécessaire de définir pour la suite les notions de précision et répétabilité.

La norme ISO 9283, définit deux types de précision robotique :

- **Précision statique** : Elle présente la capacité du robot industriel à ramener son poignet à une position et une orientation précise. Elle présente l'écart entre la pose (position et orientation) commandée et la pose réelle atteinte. Cette différence est due à l'imprécision du modèle du robot réalisé et implémenté dans le contrôleur par le concepteur (Figure 2.3) ;

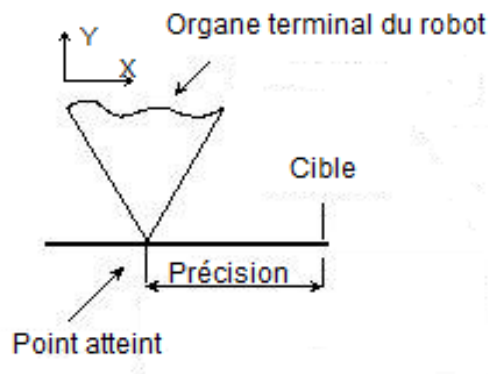


Figure 2.3: Précision d'un robot industriel [Photo personnelle]

- **Précision dynamique** : Elle est définie comme étant l'aptitude du robot à suivre une trajectoire programmée sans erreur. Plusieurs facteurs peuvent affecter la précision dynamique du robot tels que la souplesse des articulations, les offsets des axes, l'effet thermique et les défauts des chaînes cinématiques (Figure 2.4).

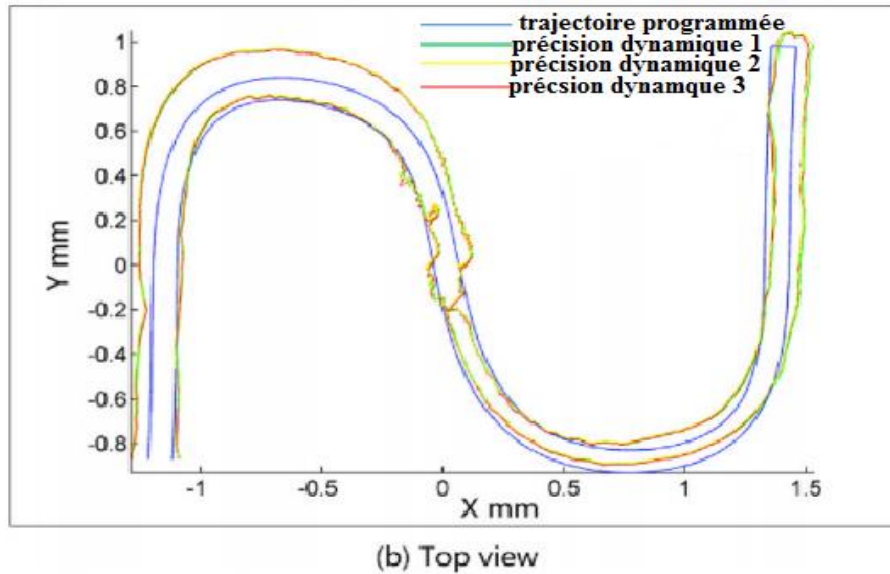


Figure 2.4: Précision dynamique sur une trajectoire de forme S [119]

2.2.2.3 Répétabilité :

Selon la norme ISO 9328, la répétabilité présente la reproductibilité de l'orientation et la position de l'organe terminal du robot en utilisant la même commande (Figure 2.5). La répétabilité des robots industriels se diffère selon leurs tailles, leurs charges maximales, leur structures et la qualité de fabrication de leurs composants. Elle est de l'ordre de 0,03 mm à 0,1 mm pour les robots de faible et de moyenne envergures. Pour les grands manipulateurs, elle peut dépasser 0,2 mm [118]. Plusieurs facteurs peuvent influencer la répétabilité à travers des phénomènes aléatoires tels que les frottements, les jeux, la non-linéarité du modèle géométrique, les réglages des asservissements [119]. Il est quasiment impossible de modéliser et anticiper ces facteurs.

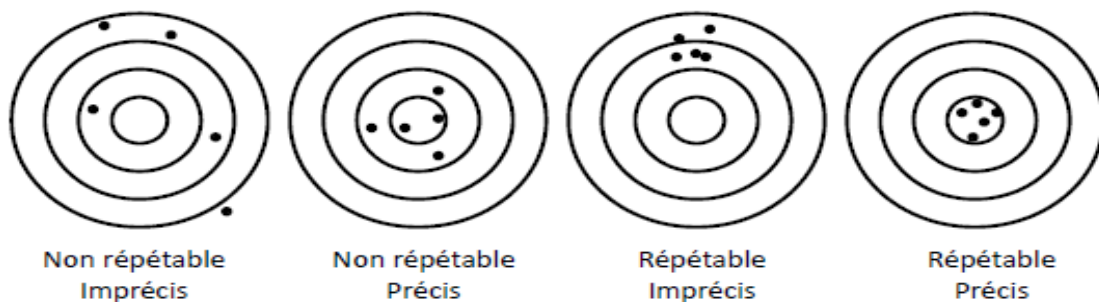


Figure 2.5: Précision et répétabilité du robot [147]

2.2.2.4 Singularités du robot :

Dans des zones précises de l'espace de travail et dans des configurations spécifiques, les robots anthropomorphes sont soumis à des contraintes non négligeables en termes de déplacement et orientation de l'effecteur final. Ce sont les singularités. Elles sont définies en tant que points de l'espace où le robot perd sa capacité à déplacer son organe terminal dans une direction quelconque. La présence des singularités dans un espace de travail peut affecter profondément la performance et le contrôle des actionneurs et entraîner divers couples élevés sur les liaisons. Dans la littérature, les singularités sont étudiées à travers la matrice Jacobienne référencée par l'équation (23) [120]. C'est un outil mathématique qui permet de calculer les solutions des variables articulaires (positions des actionneurs) en fonction des coordonnées spatiales du point à atteindre [123] [124] [126]. La Jacobienne permet aussi de déterminer la relation entre les efforts exercés par l'organe terminal sur l'environnement et les couples aux niveaux des actionneurs [125]. Le calcul de la Jacobienne se fait en dérivant le modèle géométrique direct (MGD) du robot présenté par l'équation (22).

$$\text{MGD} = \begin{pmatrix} f_1(x_1, \dots, x_n) \\ \cdot \\ \cdot \\ f_m(x_1, \dots, x_n) \end{pmatrix} \quad (22)$$

La Jacobienne dans un point M de l'espace :

$$\text{J(M)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (23)$$

Où $f_1 \dots f_m$ sont les coordonnées de l'organe terminal du robot en fonction des variables articulaires $X_1 \dots X_n$.

Quand le déterminant de l'inverse de la Jacobienne est nul le robot est en singularité [121].

Pour le robot ®Kuka Kr 210 L180, il existe 3 singularités lors de déplacements dans l'espace de travail :

- Position étendue du poignet (Figure 2.6) : l'extension de A2-A3 croise le point central du poignet ;

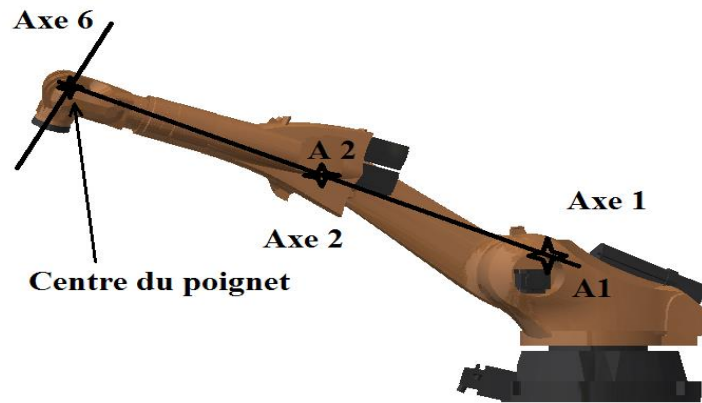


Figure 2.6: Singularité d'extension [Photo personnelle]

- Singularité du poignet (Figure 2.7) : Dans ce cas, les axes 4 et 6 sont parallèles. Il est impossible de déterminer les positions de ces deux axes sans ambiguïté. La transformation inverse donne une infinité de solutions de positions pour les axes A4 et A6 ;

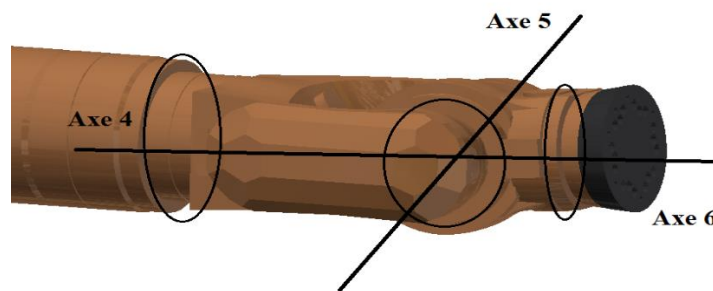


Figure 2.7: Singularité du poignet [Photo personnelle]

- Singularité au-dessus de la tête (Figure 2.8) : Dans cette configuration le point central du poignet, localisé à l'intersection des axes A4, A5 et A6, est positionné sur l'axe 1.

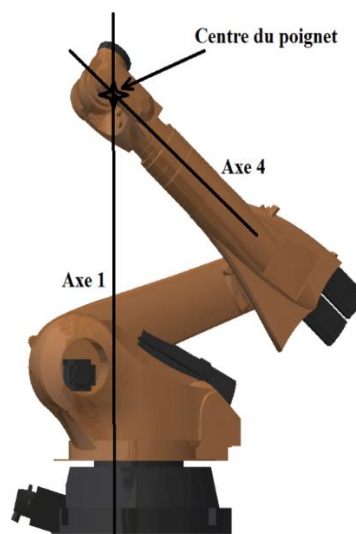


Figure 2.8: Au-dessus de la base [Photo personnelle]

2.2.2.5 Compensation de gravité :

Le robot utilisé est équipé d'un système d'équilibrage capable de compenser l'inertie du robot (Figure 2.9). Son rôle consiste à générer une force sur la deuxième articulation du robot afin de diminuer le couple articulaire exercé. Plusieurs travaux de recherche se sont intéressés à l'impact du compensateur de gravité sur les performances du manipulateur : Klimchik a établi un modèle de rigidité d'un manipulateur industriel ®Kuka Kr 210-TM en se basant sur les propriétés mécaniques de son compensateur pneumatique [127]. Dans les recherches présentées dans [128], Klimchik s'est basé sur le modèle statique du compensateur de gravité à ressort d'un robot KUKA KR-270 pour calculer la matrice de rigidité du manipulateur. L'objectif de ces travaux est d'améliorer le comportement du robot pendant l'exécution des opérations au cours desquelles les articulations du robot subissent des efforts importants.



Figure 2.9: Compensateur de gravité du Kuka kr 210L180 [15]

2.2.2.6 Rigidité du robot :

L'utilisation des robots anthropomorphes dans l'usinage du bois par enlèvement de matière se heurte au manque de rigidité du système. Celui-ci provient de plusieurs sources telles que : les systèmes de transmissions, les jeux mécaniques, les corps du robot et la commande des actionneurs. Abele et al ont montré dans [129] que la flexibilité de l'ensemble bras, épaule et poignet est infinitésimale par rapport à celle des articulations. Face à ces contraintes, le choix de la configuration du notre robot pour les campagnes expérimentales est basé sur les travaux menés par Doukas et al [130] et Dumas et al [131]. Claire Dumas a établi une cartographie de dextérité d'un robot ®Kuka série Kr (Figure 2.10) en utilisant le nombre de conditions de la Jacobienne [132]. Elle a démontré les endroits de l'espace de travail où le comportement du robot est dextre (couleur claire) et les zones où la manipulabilité du robot est faible (couleur foncée).

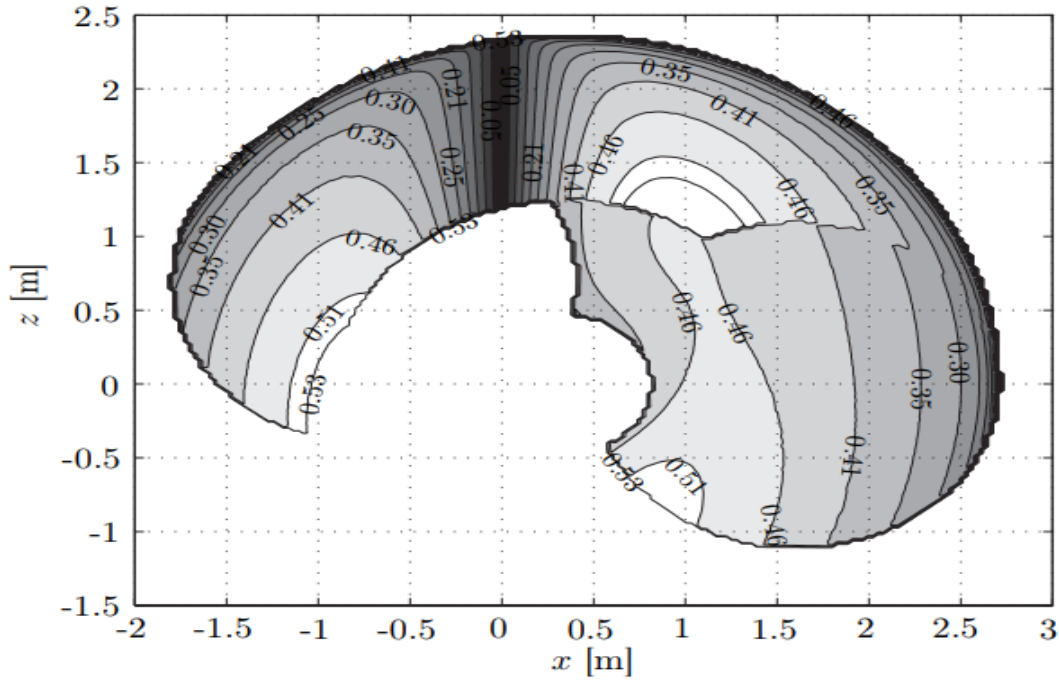


Figure 2.10: Cartographie de dextérité du Kuka série Kr [131]

Pour réaliser ceci, elle a utilisé la matrice des raideurs aux articulations du robot définie dans [133]. Ensuite, en appliquant l'équation 24, elle a calculé le torseur cinématique t au niveau de l'effecteur du robot en faisant appel à la matrice Jacobienne qui relie les vitesses articulaires avec la vitesse de l'effecteur terminal du robot.

$$t = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = J\dot{\theta} \quad (24)$$

Avec :

t : le torseur cinématique de l'effecteur.

J : La matrice Jacobienne du robot.

\dot{p} : Le vecteur des vitesses articulaires / \dot{w} : Le vecteur des vitesses angulaires.

$\dot{\theta}_i$: Le vecteur de la vitesse au niveau des articulations, (équation 25). Il est souvent exprimé dans le repère de base du robot :

$$\dot{\theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 & \dot{\theta}_2 & \dot{\theta}_3 & \dot{\theta}_4 & \dot{\theta}_5 & \dot{\theta}_6 \end{bmatrix}^T \quad (25) \text{ (T= transposé)}$$

Claire Dumas a présenté la manipulabilité et la dextérité des robots en mesurant l'indice de performance cinéto-statique : C'est un outil mathématique qui permet d'analyser le mouvement des systèmes mécaniques à corps rigide dans des conditions statiques. Il caractérise les relations entre, les vitesses rectilignes et angulaires ainsi les forces et les moments au niveau de la chaîne cinématique. Par conséquent, Dumas a adopté le nombre de conditions de la Jacobienne du robot illustré dans l'équation 26:

$$K_f(J) = 1/m \sqrt{\text{tr}(J^T J) \text{tr}[(J^T J)^{-1}]} \quad (26)$$

La matrice Jacobienne d'un robot anthropomorphe n'est pas homogène. Afin de simplifier le calcul, Claire Dumas a utilisé une approche algébrique linéaire appelée la normalisation des vecteurs. Appelons M_N la matrice Jacobienne normalisée du robot ®Kuka calculée par l'équation (27).

$$M_N = \begin{bmatrix} 1/L & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix} J \quad (27)$$

L : La longueur caractéristique du robot déterminée par la procédure expliquée dans [134].

$I_{3 \times 3}$: La matrice d'identité 3X3.

$0_{3 \times 3}$: la matrice de zéro.

L'utilisation du nombre de conditions permet de déterminer les endroits de l'espace de travail où le robot possède plus de dextérité et manipulabilité.

2.3 Plateforme de programmation robot :

Notre cellule robotique dispose de deux moyens de programmation du robot :

- Programmation en ligne
- Programmation hors ligne

2.3.1 La programmation en ligne :

Elle consiste à générer un programme « au pied de la machine » à travers une interface Homme-Machine appelée « Teach Pendant » (Figure 2.11). C'est l'interface homme machine privilégiée d'un robot. Il s'agit d'un organe de pilotage du robot. Il permet aux programmeurs de créer des trajectoires de déplacement selon différentes méthodes (linéaires, circulaire, point to point). Le « Teach Pendant » offre aussi la possibilité aux programmeurs de gérer des entrées/sorties pour la manipulation des dispositifs qui fonctionnent en collaboration avec le robot (Caméra intelligente, broche d'usinage, pince de manutention, ventouse...) (Figure 2.12).



Figure 2.11: Teach Pendant du robot Kuka [15]



Figure 2.12: Pince + ventouse montées sur un robot Fanuc [15]

La programmation en ligne nécessite la disponibilité totale du robot. Il est nécessaire d'arrêter la production pour autoriser la manipulation en toute sécurité. Avec cette approche, il est nécessaire de définir manuellement tous les points caractéristiques de la trajectoire à suivre (points de départ, d'arrivée, zones de retrait et de sécurité, évitement des singularités et des obstacles...).

Cette méthode a l'avantage d'être précise au niveau de la trajectoire de déplacement et de permettre l'anticipation de tous les cas problématiques : collision, singularité, lissage des trajectoires, apprentissage de l'environnement et estimation de temps de cycle. Son principal inconvénient est son coût de mise en œuvre en termes de temps de programmation et donc d'arrêt de la production [139].

2.3.2 La programmation hors ligne :

Cette approche permet de générer des programmes sur un robot à partir d'un environnement de simulation. Dans ce cas, la plateforme de simulation est hébergée sur un PC distant et elle nécessite une modélisation fidèle de la cellule robotisée. Chaque constructeur de robot propose sa plateforme de simulation. L'avantage de cette méthode est d'offrir la possibilité aux programmeurs d'anticiper les difficultés liées à la génération de trajectoires (obstacles, singularités, lissage, vitesse et accélération, torsion des câbles, optimisation des temps de cycles...) sans qu'il ne soit nécessaire d'arrêter la production.

La programmation hors ligne du robot est favorisée dans tous les modes opératoires mis en place dans le cadre des essais réalisés dans nos travaux. Dans notre cas, nous utilisons ®Powermill dont l'interface est présentée dans la Figure 2.13.

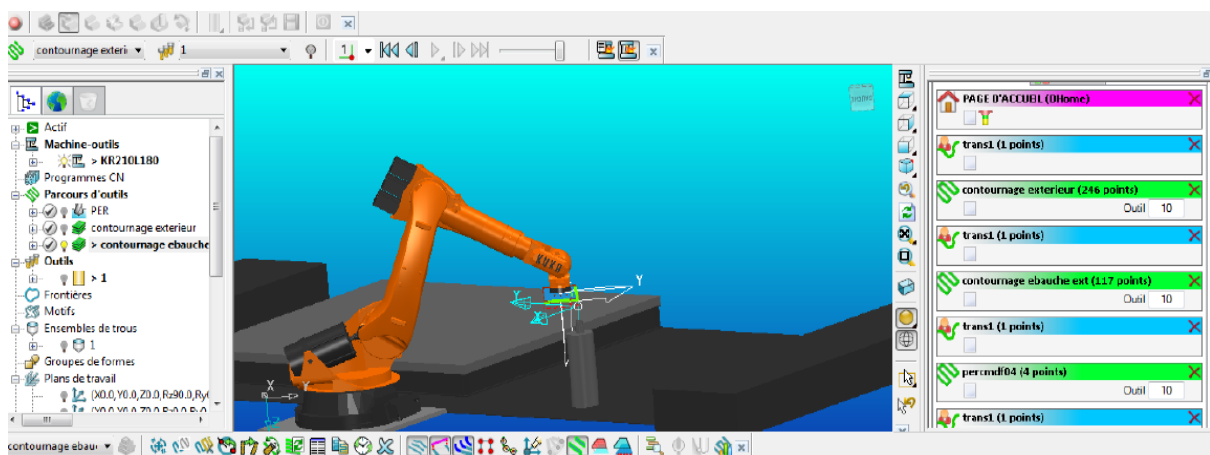


Figure 2.13: Interface du logiciel Powermill [Photo Ayari]

Powermill est un logiciel FAO qui permet de générer des programmes sur une machine-outil à partir d'un environnement de simulation. Il offre la possibilité de créer des trajectoires d'outils pour des opérations d'usinage allant de 2 à 7 axes.

Il faut néanmoins garder en tête que les trajectoires générées dépendent fortement de la modélisation [122] et de la qualité de la calibration de l'environnement réel et de l'environnement simulé. Il est souvent nécessaire de reprendre les programmes au pied de la machine pour corriger et améliorer les coordonnées des points définis en simulation.

2.4 Banc d'usinage :

2.4.1 Electros broches :

Pour l'usinage robotisé nous disposons de deux électro-broches. La première est montée sur le robot. Sa vitesse de rotation maximale est de 18000 tr/min (Figure 2.14). La deuxième est fixée au sol avec des électro-aimants (Figure 2.14). Sa vitesse maximale est de 15000 tr/min. Les propriétés techniques des électro-broches sont illustrées dans le Tableau 2.2.

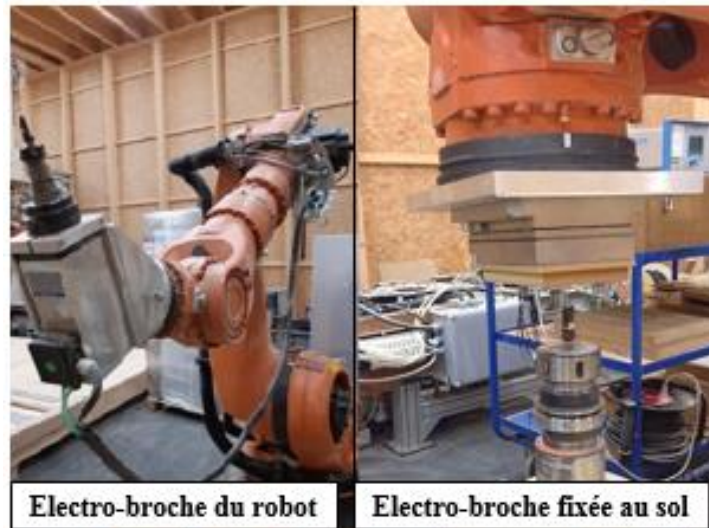


Figure 2.14: Broche d'usinage montée sur le robot + broche fixée au sol [15]

Tableau 2.2: Propriétés techniques de la broche

Propriétés	Broche robot	Broche fixée au sol
Puissance:	5,6 KW	4,8 KW
Vitesse maximale :	18000 tr/min	15000 tr/min
Vitesse utilisée :	15000 tr/min	15000 tr/min
Fréquence utilisée :	250 Hz	250Hz
Poids	30 Kg	60 Kg

2.4.2 Défonceuse à commande numérique:

Notre cellule expérimentale est équipée d'une défonceuse à commande numérique à 3 axes ayant une broche d'usinage à grande vitesse (Figure 2.15). Le Tableau 2.3 illustre les propriétés techniques de cette machine. Ce type de défonceuse est couramment utilisé dans l'industrie du bois et est apprécié pour sa rigidité la haute qualité et la flexibilité du processus de fabrication comme mentionné dans [143][152]. Le recours à la défonceuse numérique est fréquent dans la recherche et nous la trouvons souvent dans des travaux de recherche qui traitent des sujets tels que :

- L'usure de l'outil et l'influence des conditions de coupe [56] ;
- La quantification de l'influence des propriétés mécaniques des essences du bois sur l'usinage par enlèvement de matière [85] ;
- La formation des copeaux [53] ;
- La modélisation des efforts de coupe [55] ;
- Les phénomènes de vibrations et leurs effets sur le déroulement des procédés d'usinage [144].



Figure 2.15: La défonceuse numérique [15]

Tableau 2.3: Propriétés technique de la défonceuse

Marque: Crénau industriel
Dimensions: X 1000mm / Y 1600mm Z 270 mm
Puissance de la broche: 6KW
Vitesse de rotation maximale: 18000 tr/min
Fréquence maximale: 300 Hz
Vitesse utilisée : 15000 tr/min
Fréquence utilisée : 250 Hz

2.4.3 Outillage :

Les outils utilisés pour l'usinage sont des mèches de défonçage. Elles sont montées sur la porte-outil de l'électro-broche à travers des pinces de diamètres 12 mm et 14 mm.

2.4.3.1 Mèche de défonçage ®VHM 113 :

Pour tester notre banc expérimental au cours des procédés d'usinage, une fraise hélicoïdale est utilisée (Figure 2.16). Elle est conçue pour les usinages de finition du bois et est fortement recommandée pour usiner des matériaux tels que les MDF et le stratifié compact. Les propriétés techniques de la fraise sont illustrées dans le Tableau 2.4.



Figure 2.16: Fraise hélicoïdale [15]

Tableau 2.4: Propriétés de la fraise hélicoïdale

Diamètre de coupe	12 mm
Matériau de coupe	Monobloc de carbure
Longueur de coupe	50 mm
Nombre de dents	3

2.4.3.2 Mèche de défonçage ®Leucodur HL05 :

Le deuxième outil utilisé est une mèche à une dent à denture droite et à plaquette de carbure montée avec un couple de serrage égal à 5 N.m (Figure 2.17). Elle est conçue spécialement pour l'étude des efforts pendant des opérations d'usinage comme le défonçage dans des conditions de coupe classiques. Tratar et al se sont basé, dans [84], sur ce type de mèche pour traiter l'usure des arêtes de coupe pendant l'usinage du MDF avec un robot anthropomorphe. Le Tableau 2.5 illustre les propriétés techniques de l'outil.



Figure 2.17: Mèche de défonçage [15]

Tableau 2.5: Propriétés de la mèche de défonçage

Diamètre de coupe	14 mm
Matériau de coupe	Carbure de tungstène
Angle de coupe	18°
Angle de taillant	57°
Nombre de dents	1

2.4.3.3 Avantages :

Notre choix est orienté vers l'utilisation de ces deux types de mèche parce qu'elles disposent des qualités et des avantages suivants [135] :

- Grande facilité d'affûtage ;
- Facilité et rapidité de montage et démontage de l'arête tranchante (pour l'outil de défonçage) ;
- Bonne évacuation du copeau ;
- Faible consommation d'énergie ;
- Longue durée de vie ;
- Capacité de garder le même profil pendant plusieurs opérations d'affûtage.

Leurs corps d'outil sont :

- Tenaces ;
- Résistants à la fatigue ;

- Brasables si la fixation des dents l'exige.

Les matériaux de leurs arêtes tranchantes sont :

- Durs ;
- Résistants à l'usure / insensibles à la corrosion.

2.5 Chaîne de mesure des efforts de coupe :

La mesure des efforts de coupe se déclenche automatiquement lors de la pénétration de l'outil dans la matière. Les contraintes appliquées sur la partie supérieure du capteur d'effort ®Kistler se transforment en signaux électriques et subissent les opérations suivantes (Figure 2.18) :

- ✓ Amplification par la station NI 5070A ;
- ✓ Conversion analogique/ numérique à travers le convertisseur NI 92 ;
- ✓ Transmissions des signaux avec le mono-module NI-USB 9162 ;
- ✓ Acquisition des signaux par le module LABVIEW développé au laboratoire ;
- ✓ Traitement et affichage des résultats dans le domaine temporel et fréquentiel avec les régimes Matlab.

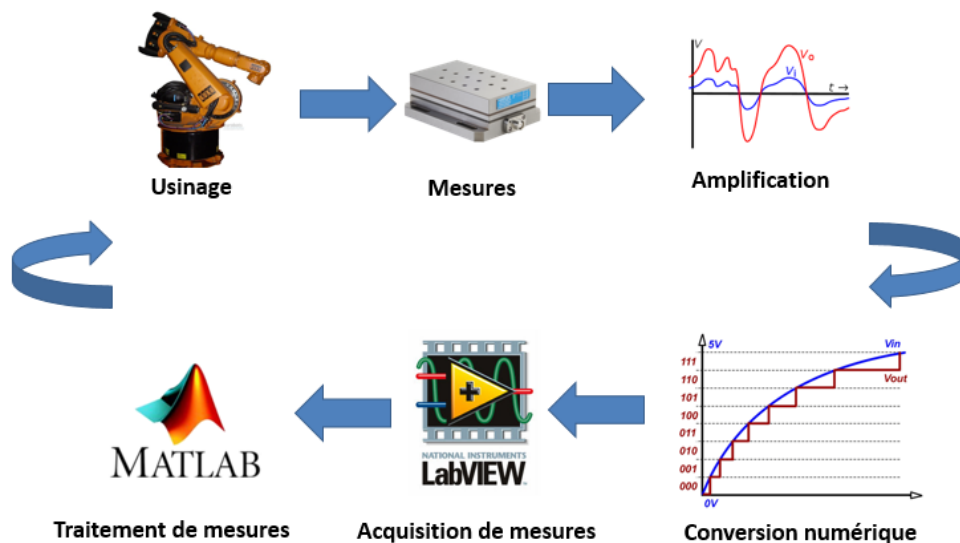


Figure 2.18: Chaîne de mesure des efforts de coupe [Photo personnelle]

Nous détaillons dans la suite les différents équipements qui constituent la chaîne de mesure expérimentale.

2.5.1 Capteur d'effort :

2.5.1.1 Platine ®Kistler 9257A

Pour mesurer les efforts de coupe pendant l'usinage, nous avons instrumenté notre cellule robotique avec un dynamomètre (une platine) de marque ®Kistler 9257A (Figure 2.19). Il comprend trois paires de plaquettes en cristal de quartz constituant 3 capteurs superposés l'un

sur l'autre. Leur rôle est de mesurer dynamiquement et quasi statiquement les 3 composantes orthogonales d'une force (F_x , F_y , F_z) qui agissent dans des directions quelconques (Figure 2.20). La force à mesurer est introduite sur la face supérieure du dynamomètre et distribuée sur 3 plaquettes en quartz qui sont disposées entre la base et la plaque de recouvrement.

La première plaquette est capable de mesurer la pression selon l'axe Z alors que les deux autres sont sensibles au cisaillement selon les axes X et Y. La mesure se fait pratiquement sans déformation.



Figure 2.19: Platine Kistler 9257A [15]

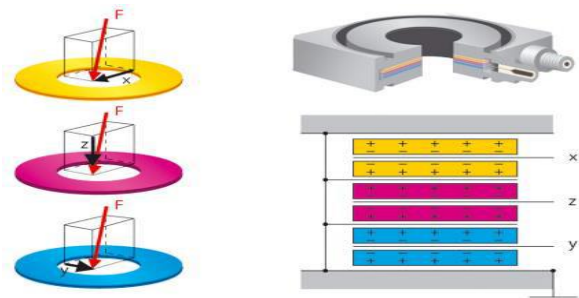


Figure 2.20: 3 paires de plaquettes en quartz [15]

2.5.1.2 Calibrage de la platine :

Avant d'intégrer la platine dans la chaîne de mesure, il a fallu la calibrer pour assurer que la précision de mesure reste au niveau requis. Pour réaliser cela, nous avons utilisé un anneau dynamométrique qui a permis de redéfinir les incertitudes indiquées par le constructeur et améliorer les paramètres liés à l'acquisition. Une fois ces réglages réalisés, nous avons effectué une série de mesures pour tester le fonctionnement du capteur en appliquant des contraintes mécaniques. Le signal acquis est affiché sur une interface numérique de test fourni par le constructeur (Figure 2.21).

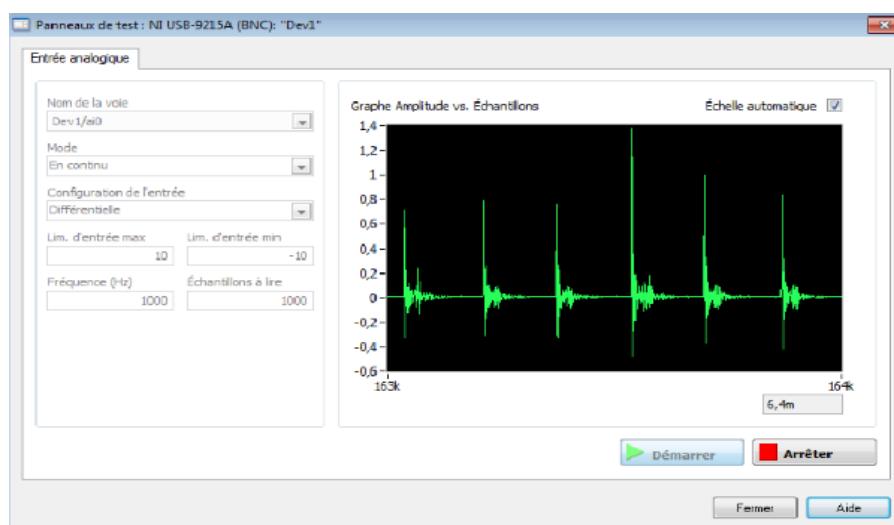


Figure 2.21: Application de test de la platine

Nous avons, ensuite, évalué la précision de la platine à travers l'application d'une contrainte de 120 N en montant une charge de 12 Kg. Il s'est avéré que la précision est de l'ordre de ± 1 N. Le Tableau 2.6 illustre les propriétés techniques de la platine ©Kistler 9257A.

Tableau 2.6: Propriétés techniques de la platine Kistler

Propriétés	Unité	Valeur
Fréquence de résonance	KHz	3,5
Sensibilité	pC/N	-7,5 pour Fx/Fy
	pC/N	-3,7 pour Fz
Plage de température	°C	0...70
Cross talk (bruit)	%	$\leq \pm 2$
Poids	Kg	10
Capacité	pF	220
Linéarité	%FSO	$\leq \pm 1$
Résistance d'isolement	Ω	$> 10^{13}$

2.5.2 Amplification des charges : Amplificateur NI 5070A

Les efforts encaissés par les plaquettes sont convertis grâce à des jauges piézoélectriques [145]. Par la suite, les signaux électriques générés sont directement menés aux entrées de l'amplificateur de charge 5070A (Figure 2.22), par l'intermédiaire d'un câble de connexion. Les canaux de mesure captent la charge émise par le capteur d'effort et la convertissent en une tension qui lui est proportionnelle.



Figure 2.22: Amplificateur de charge[15]

L'amplificateur est doté d'un afficheur numérique qui visualise en temps réel la force appliquée ainsi que la valeur maximale et minimale des forces mesurées pendant une période T. Il fournit aussi d'autres informations nécessaires pour la mise en place de la chaîne et l'acquisition des mesures telles que les canaux activés et leurs sensibilités (Figure 2.23). Le Tableau 2.7 illustre les propriétés techniques de l'amplificateur 5070.

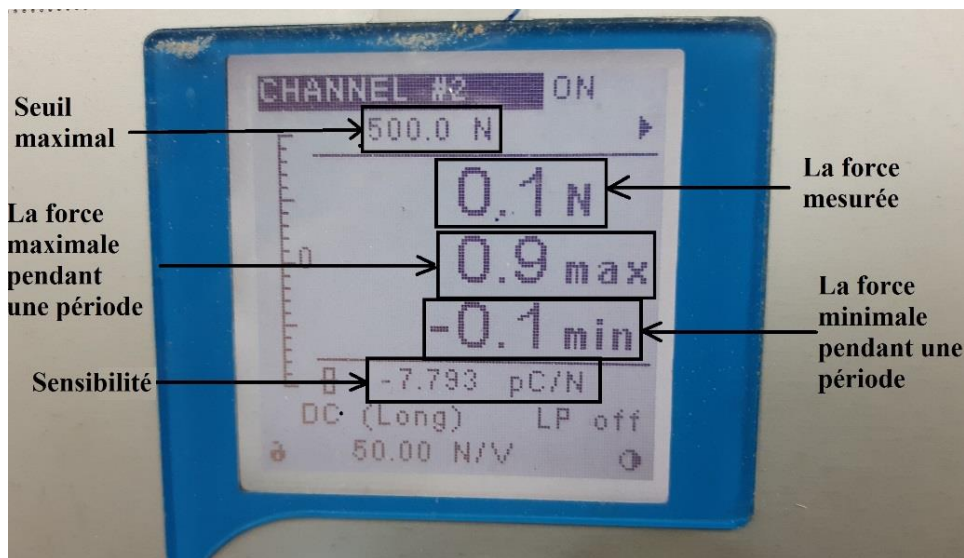


Figure 2.23: Afficheur numérique de l'amplificateur [15]

Tableau 2.7: Propriétés techniques de l'amplificateur 5070A

Propriétés	Unité	Valeurs
Nbre de canaux de mesure		4
Tension de sortie	V	± 10
Courant de sortie	mA	$< \pm 2$
Impédance de sortie	Ω	10
Signal parasite de sortie	mVpp	< 10

2.5.3 Conversion analogique/numérique : Convertisseur NI 9215

Après l'amplification, les signaux sont transmis via une liaison série RS232 vers un convertisseur analogique numérique NI 9215, (Figure 2.24), monté sur un adaptateur NI 9162. L'ensemble permet de numériser les signaux acquis et les envoyer à un ordinateur pour être traités. Les propriétés techniques du convertisseur sont illustrées dans le Tableau 2.8.



Figure 2.24: Convertisseur NI 9215[15]

Tableau 2.8: Propriétés techniques du Convertisseur NI 9215

Propriétés	Unité	Valeur
Nombre de canaux de mesure		4 canaux différentiels
Résolution	bits	16
Tension de sortie	V	±10
Impédance de sortie	GΩ	1
Plage de température	°C	-40...70
Bande passante de signal d'entrée	Khz	420

2.5.4 Module d'acquisition:

Une fois que la numérisation est établie, un module développé au LERMAB sur LABVIEW acquiert les signaux numérique (Figure 2.25). Avec une fréquence d'échantillonnage de 2 KHz, il génère 32768 points de mesure pour chaque composante de force (F_x, F_y, F_z). Il permet de visualiser l'évolution des efforts de coupe appliqués sur l'échantillon en fonction du temps (Figure 2.26). Les mesures effectuées sont ensuite enregistrées dans un fichier de calcul Excel.

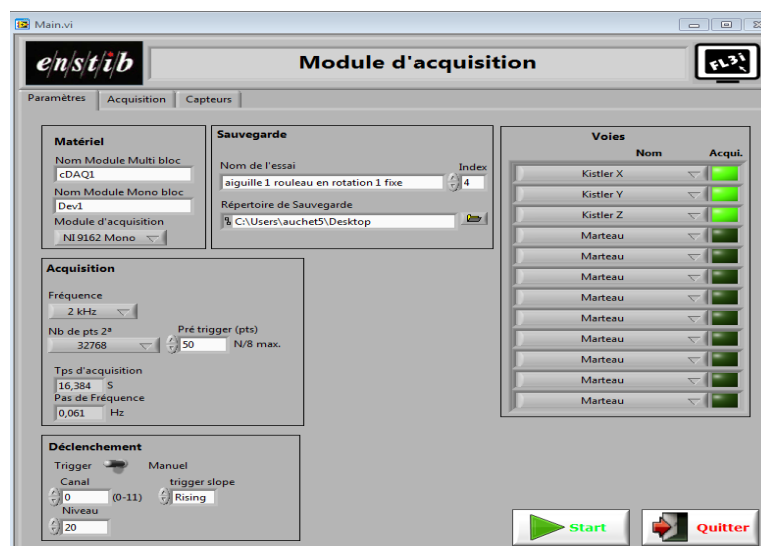


Figure 2.25: Interface de configuration du module [Photo personnelle]

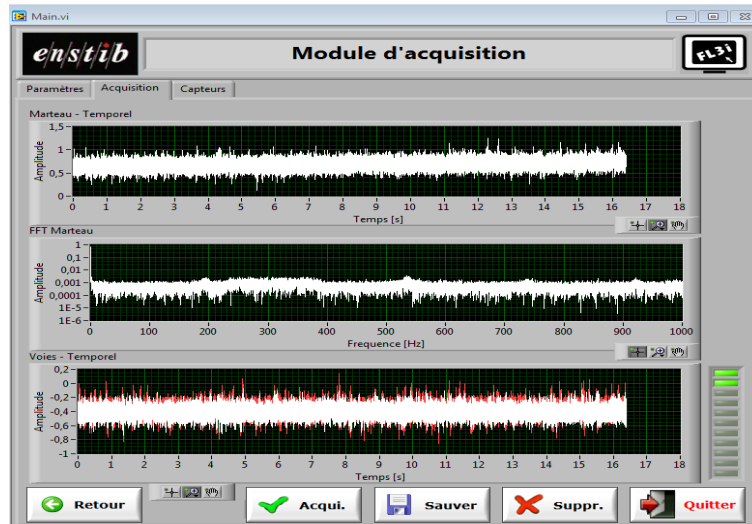


Figure 2.26: Interface de mesure des efforts de coupe

2.5.5 Module de traitement de mesure :

Pour traiter les résultats, nous avons mis en place un module de traitement des mesures sur Matlab. Le but est d'analyser l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps (Figure 2.27). Un deuxième module est réalisé pour générer les spectres fréquentiels de mesure (Figure 2.28), afin d'étudier les vibrations du système. Un troisième module développé avec Matlab est mis en place pour déterminer l'interaction entre les efforts de coupe et la qualité dimensionnelle d'usinage robotisé, (Figure 2.29).

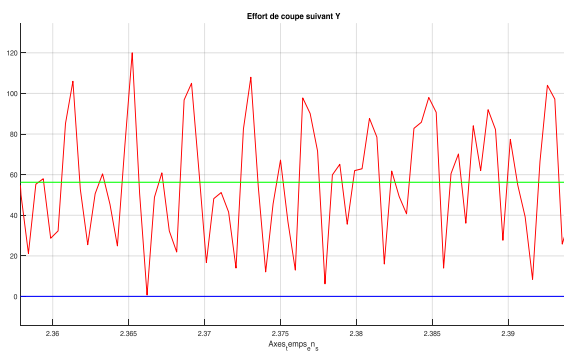


Figure 2.27: Mesure des efforts de coupe

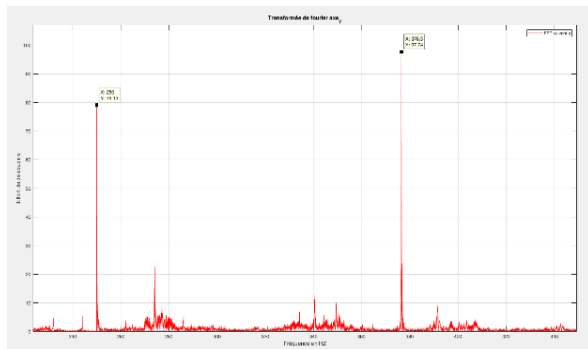


Figure 2.28: Spectre fréquentiel des efforts de coupe

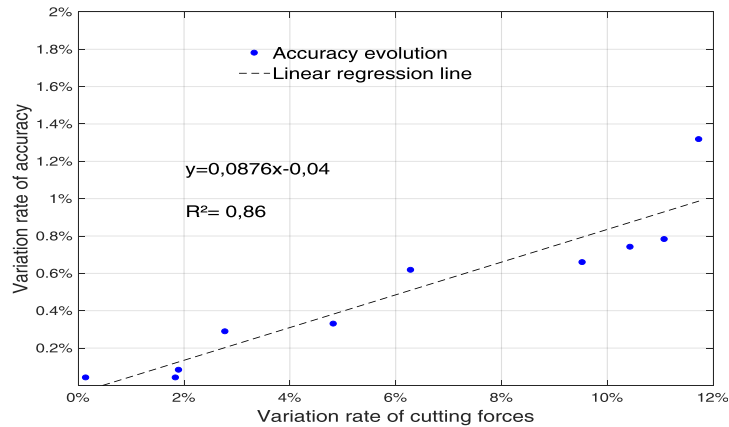


Figure 2.29: Interaction efforts de coupe/qualité d'usinage du MDF avec le robot (comparaison avec les résultats obtenus avec l'MOCN)

2.6 Chaîne de mesure des dimensions d'usinage :

2.6.1 Table à mesurer :

Pour évaluer la qualité d'usinage, les dimensions du profil usiné sont contrôlés à l'aide d'une table à mesurer @M.conti (Figure 2.30). Elle est équipée d'un afficheur numérique qui visualise les mesures en mm ou en pouces. Un système appelé Revolver, est intégré dans la machine (Figure 2.31). Il comprend 6 pivots différents dont chacun est conçu pour effectuer une mesure précise selon les profils à vérifier. Il permet de mesurer les coordonnées des points suivant 3 axes X,Y et Z. Les mesures sont prélevées directement sur un afficheur numérique et enregistrées sur un micro-ordinateur connecté à la machine. Dans la Figure 2.31, nous attribuons un numéro à chaque pivot pour expliquer son rôle dans le Tableau 2.9. La sélection du pivot se fait par la rotation de la frette.



Figure 2.30: Table à mesurer @mconti [15]

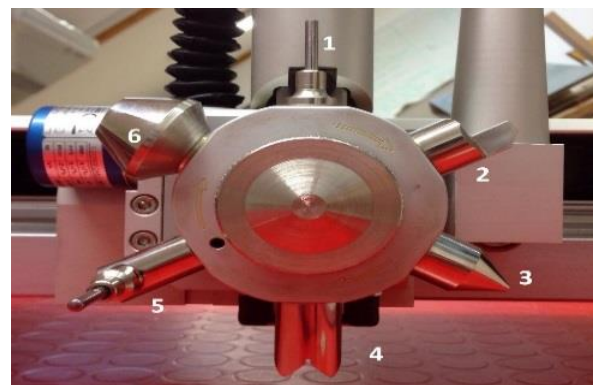


Figure 2.31: Revolver [15]

Tableau 2.9: Propriétés techniques de la table à mesurer

Pivots	Utilisation
Numéro 1	Mesure des profondeurs des trous / Mesure des distances entre-axe des trous/ Mesure des dimensions du profil usiné (longueur et largeur)
Numéro 2	Retour à zéro de la machine/ Mesure de la longueur et de la largeur du panneau / Vérification de l'équerre du panneau/ Vérification du parallélisme entre 2 cotés.
Numéro 3	Retour à zéro de la machine / Mesure des entre-axes des trous ayant des diamètres de 4 à 20 mm.
Numéro 4	Mesure des entre-axes des trous verticaux.
Numéro 5	Mesure de la profondeur des trous latéraux
Numéro 6	Mesure des entre-axes des trous ayant des diamètres de 18 à 32mm.

Pour la caractérisation de la qualité dimensionnelle d'usinage dans les campagnes expérimentales, nous utilisons le pivot numéro 1.

2.6.2 Scanner laser :

Pour visualiser les irrégularités du profil usiné, un scanner laser haute précision est utilisé (Figure 2.32). Il permet d'analyser les géométries obtenues. Un capteur laser ©Keyence est monté sur un porteur ©Charlyrobot ayant une répétabilité de 0,05mm. Il est équipé de 3 moteurs pas à pas offrant 3 degrés de liberté (Figure 2.33). La précision et la répétabilité élevées du capteur laser permettront de détecter, visualiser et mesurer les erreurs dimensionnelles au niveau de la forme usinée (Tableau 2.10).



Figure 2.32: Scanner Laser [15]

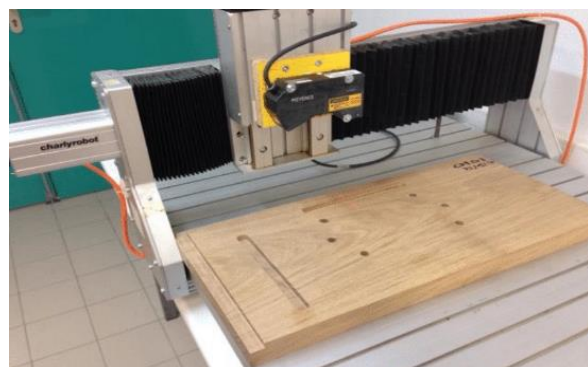


Figure 2.33: CNC Charlyrobot [15]

Tableau 2.10: Propriétés techniques du scanner laser

Modèle	LJ-G200
Contrôleur	LJ-G5000P
Alimentation	24 VCC
Connexion	RS232/Ethernet/USB
Diamètre faisceau laser	30 μ m
Précision	$\pm 5 \mu$ m
Répétabilité	0,05 μ m

2.7 Protocole expérimental :

2.7.1 Mise en place des échantillons :

Les échantillons à usiner sont issus de différents matériaux feuillus (hêtre), résineux (sapin) et bois dérivé (MDF). Pour assurer une répétabilité expérimentale, environ 200 échantillons au total sont usinés pour caractériser les efforts de coupe et la qualité dimensionnelle des différents matériaux suivant différentes configurations machine. Pour la mise en place de l'échantillon, nous avons effectué, deux perçages de diamètre 8mm dans lesquels seront insérés deux vis de serrage (Figure 2.34). Ces vis permettent de brider la pièce pendant les usinages.

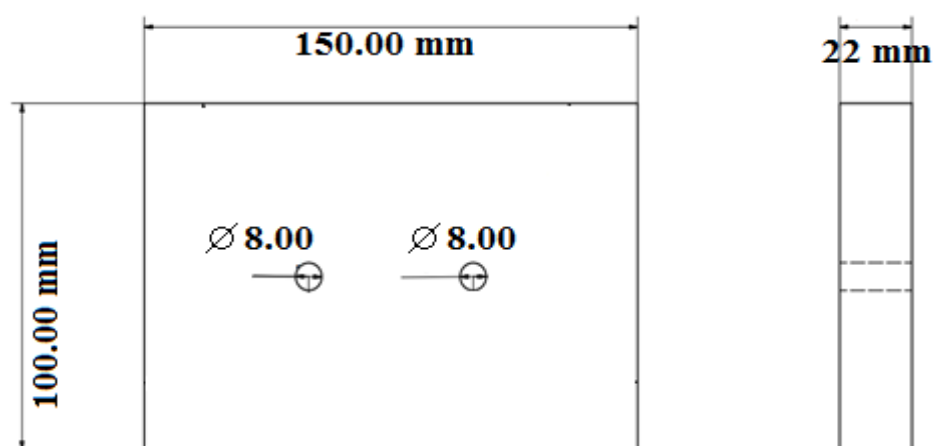


Figure 2.34: Echantillon à usiner

Pour assurer une mise en place optimale du système d'usinage et assurer que les mesures effectuées sont bien les efforts de coupe qui régissent entre l'outil et la matière, l'échantillon

est monté directement sur la platine @Kistler (Figure 2.35). Ensuite, pour assurer un couple de serrage égal nous utilisons une clé dynamométrique @Facom réglée à 5 N.m.



Figure 2.35: Montage d'usinage [15]

2.7.2 Opérations d'usinage :

Afin d'étudier la robotisation des procédés d'usinage bois par enlèvement de matière et caractériser leurs efforts de coupe, leurs qualité dimensionnelle et l'interaction entre eux, nous réalisons sur chaque échantillon un contournage et un rainurage que nous définissons dans la suite.

2.7.2.1 Contournage :

Le contournage est une opération d'usinage généralement utilisée en ébauche ou en finition sur des surfaces planes. Il consiste à conférer à une pièce une forme ou un contour à la suite d'un passage d'un outil à arête coupante suivant une trajectoire curviligne et continue.

Le choix d'introduire l'opération de contournage dans notre protocole expérimental revient à la nécessité de calibrer la pièce avant tout autre usinage et créer des plans de référence nécessaires pour l'analyse dimensionnelle dans la suite (Figure 2.36). Les conditions de contournage sont illustrées dans le Tableau 2.11.

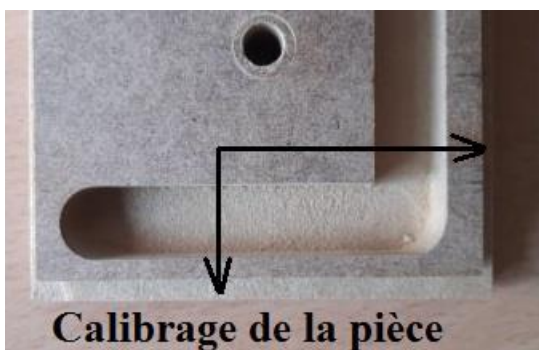


Figure 2.36: Calibrage de la pièce

2.7.2.2 Rainurage :

Tableau 2.11: Conditions de contournage

Vitesse broche	15000 tr/min
Vitesse d'avance	1000 mm/min
Prise de passe	14 mm
Nombre de dent	1 dent
Avance par dent	0,066 mm/dent
Epaisseur copeau	0,021 mm

C'est une entaille longue pratiquée dans l'épaisseur de la pièce du bois qui peut être débouchante (Figure 2.37) ou semi-arrêtée (Figure 2.38). Ayant généralement une section rectangulaire, le rainurage est omniprésent dans plusieurs activités de travail du bois telles que la menuiserie, l'ébénisterie. Il est souvent réalisé pour servir à des assemblages (tenon mortaise) ou recevoir des parties coulissantes comme le guidage des pièces mobiles d'un meuble.

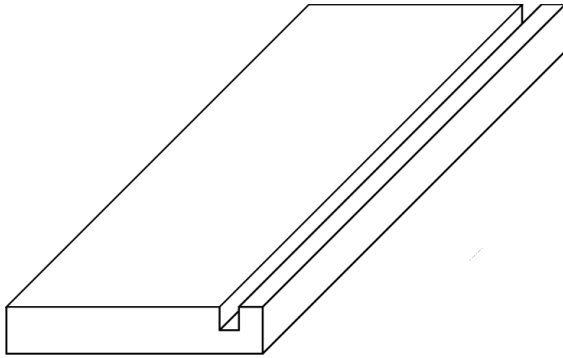


Figure 2.37: Rainure débouchante [Photo Ayari]

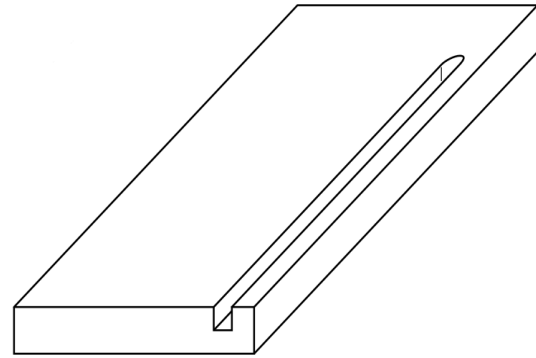


Figure 2.38: Rainure semi-arrêtée [Photo Ayari]

Pendant le rainurage, les 3 faces de l'outil (avant, gauche et droite) (Figure 2.39) sont en contact avec la matière. Ceci favorise l'apparition des efforts de coupe importants et présente une opportunité pour nous afin d'étudier ce procédé d'usinage robotisé. Les conditions de coupe sont les mêmes que celles du contournage.

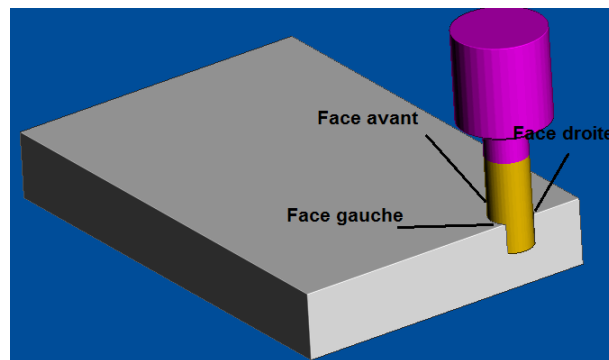


Figure 2.39: Plongée de l'outil dans la matière pour un rainurage [Photo Ayari]

Deux opérations de rainurage débouchant sont réalisées sur les 3 matériaux (hêtre, sapin, MDF) suivants les axes X et Y (rainurage horizontal et rainurage vertical) (Figure 2.40). L'objectif est d'étudier le comportement du robot suivant différentes directions et différents modes de coupe (90° - 0°) et (90° - 90°).

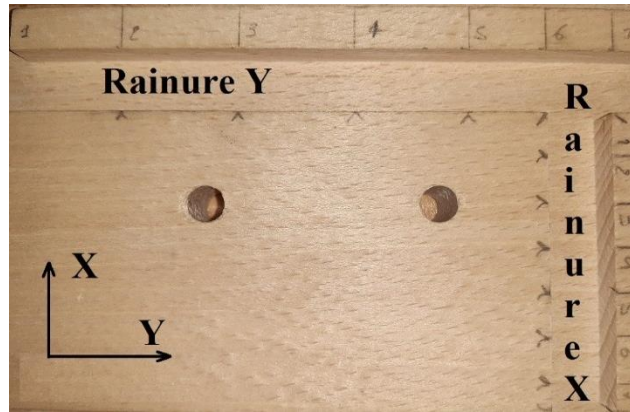


Figure 2.40: Echantillon avec les rainures débouchante

2.7.3 Configuration du robot dans l'espace de travail :

En se basant sur la cartographie de la rigidité présentée dans la Figure 2.10, plusieurs configurations (emplacement de la bride) sont choisies pour effectuer le rainurage et le contournage. L'objectif est d'obtenir une rigidité variable de la machine. Ceci nous permettra, dans la suite, de caractériser l'effet des efforts de coupe sur la qualité dimensionnelle en fonction de la rigidité du manipulateur.

2.7.3.1 Montages d'usinage :

Pour les campagnes expérimentales, nous adoptons deux différents montages d'usinage :

- Le premier consiste à brider l'ensemble capteur et échantillon présenté dans la Figure 2.41 sur une table munie d'un système de dépression. Le robot, dans ce cas, est considéré comme un usineur (le robot porte l'outil d'usinage) ;

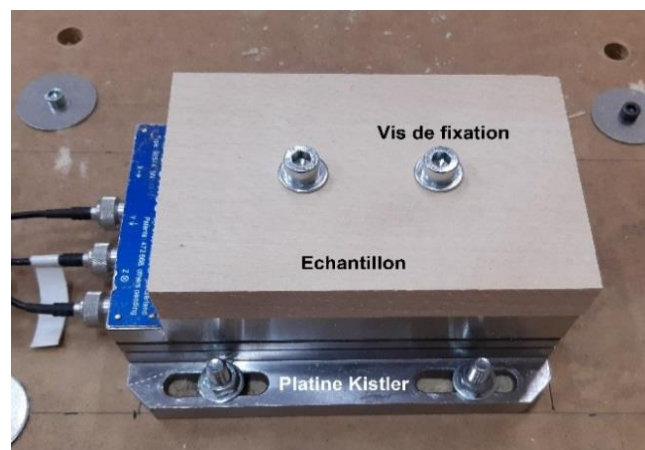


Figure 2.41: Capteur + échantillon sur la table d'usinage[15]

- La deuxième consiste à monter l'ensemble capteur et échantillon sur l'organe terminal du robot (la bride) et le transporter vers un poste d'usinage fixe (Figure

2.42). Dans ce cas le robot est considéré comme porteur (le robot porte la pièce à usiner).

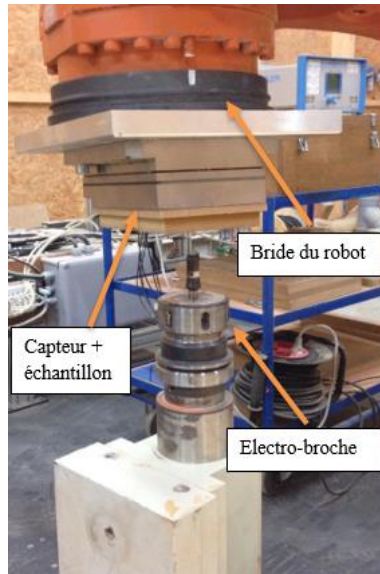


Figure 2.42: Capteur + échantillon sur la bride du robot [15]

2.7.3.2 Nomenclatures des campagnes expérimentales :

Pour étudier les procédés d'usinage robotisés et caractériser l'effet de l'utilisation d'un robot anthropomorphe, nous décidons d'usiner les 3 matériaux étudiés en deux configurations machine ayant des rigidités différentes. Dans la première, le bras du robot contenant l'outil (ou l'échantillon selon le montage) usine à une distance proche de la base du robot. Dans la deuxième, l'usinage est effectué dans les limites de l'espace de travail de la machine. En se basant sur les travaux menés par Claire Dumas et al (paragraphe 2.2.2.6), nous déduisons les deux configurations du robot et les distances entre sa base et son organe terminal:

✓ Campagne 1.1 « Configuration rigide avec pièce bridée » :

Dans cette campagne l'échantillon et le capteur sont fixés sur la table d'usinage. Sur la carte de la dextérité (Figure 2.43), nous représentons la base du robot par une étoile verte et la position de l'organe terminal par une étoile rouge. L'outil est placé à 1,3 mètre de la base du robot afin d'obtenir une rigidité élevée du manipulateur (Figure 2.44, Figure 2.45).

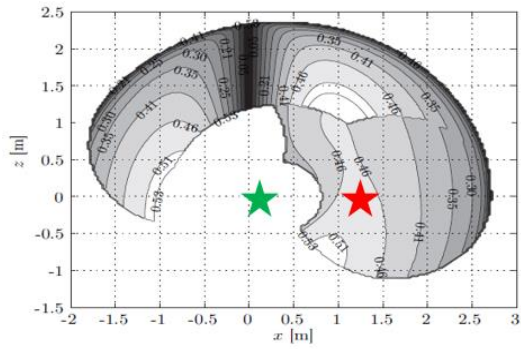


Figure 2.43: Position de l'outil par rapport à la base

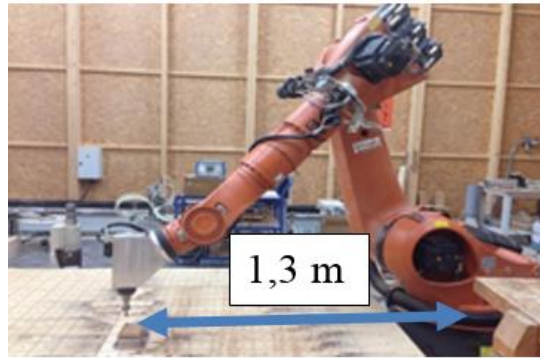


Figure 2.44: Configuration rigide/Pièce bridée[15]

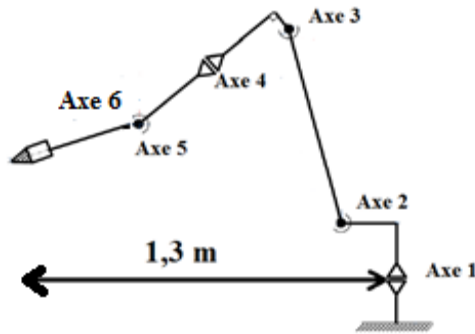


Figure 2.45: configuration rigide/pièce bridée (modèle cinématique)

✓ **Campagne 1.2 « Configuration flexible avec pièce bridée » :**

L'échantillon du bois et le capteur sont fixés sur la table d'usinage. Dans cette campagne, la configuration du robot est choisie de telle sorte que la rigidité de la machine soit faible (Figure 2.46). Par conséquent, l'effecteur final est positionné à 2,6 mètres de la base du robot (Figure 2.47, Figure 2.48).

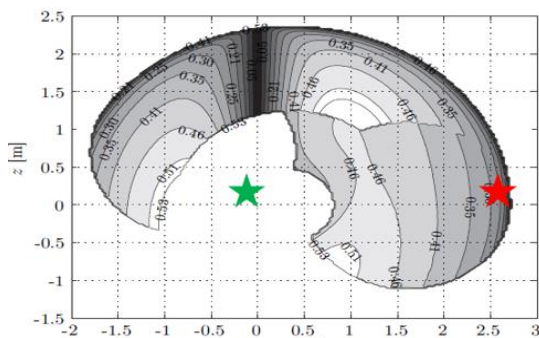


Figure 2.46: position de l'outil configuration flexible

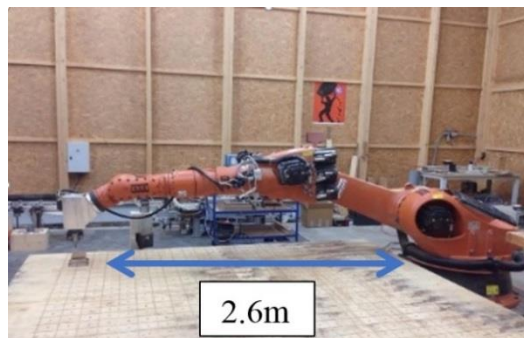


Figure 2.47: Configuration flexible /Pièce bridée[15]

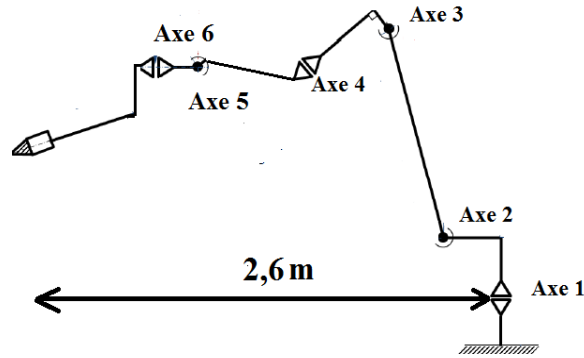


Figure 2.48: configuration flexible/pièce bridée (modèle cinématique)

✓ **Campagne 2.1 : « Configuration rigide avec pièce portée » :**

L'échantillon du bois et le capteur sont montés sur l'organe terminal du robot avec une plaque de maintien métallique (Voir annexe). L'ensemble est porté par le manipulateur vers l'outil qui est monté sur une broche d'usinage fixée au sol avec des électro-aimants. L'effecteur final du robot est placé à 1,3 mètre de la base pour avoir une rigidité élevée de la machine (Figure 2.49, Figure 2.50). (Même modèle cinématique de la campagne 1.1)

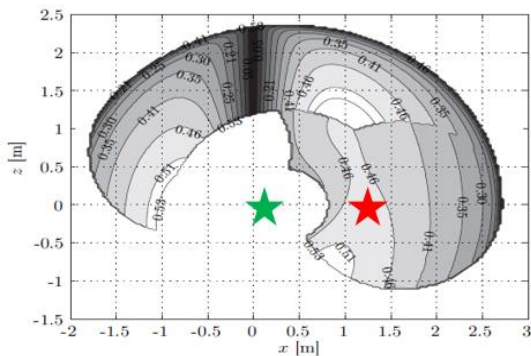


Figure 2.49: Position du capteur + échantillon

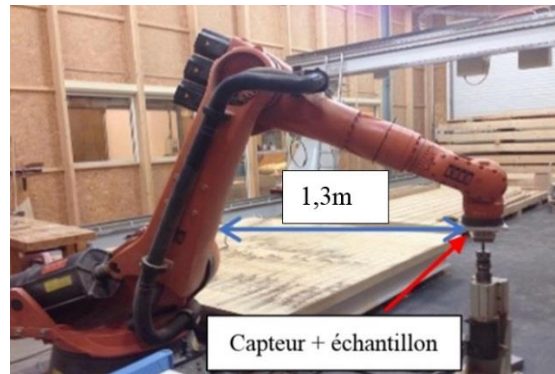


Figure 2.50: Configuration rigide/Pièce portée[15]

✓ **Campagne 2.2 : « Configuration flexible avec pièce portée » :**

Le capteur et l'échantillon du bois sont montés de la même façon que la campagne 2.1. L'effecteur final est placé à 2,6 mètres de la base du robot pour que la rigidité de la machine soit faible (Figure 2.51, Figure 2.52).

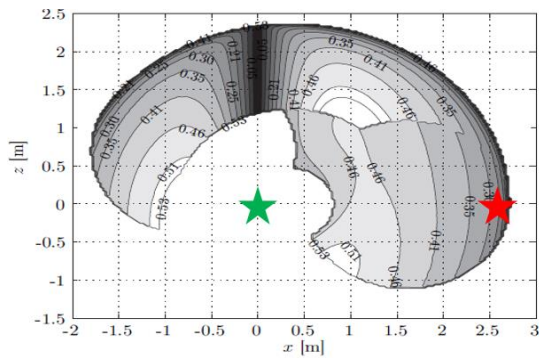


Figure 2.51: Position du capteur + échantillon

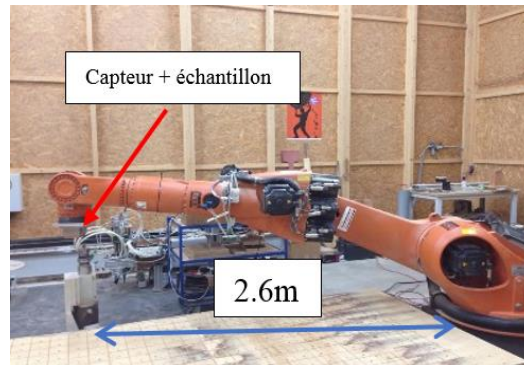


Figure 2.52: Configuration flexible/Pièce portée[15]

2.7.4 Vérification de la rigidité du robot :

Pour établir la carte de rigidité, Dumas et al ont utilisé un robot anthropomorphe Kuka de la même famille que le nôtre (série Kr) mais un modèle différent (240-2). Par conséquent, pour vérifier la rigidité des différentes positions du robot que nous avons choisi, nous réalisons une modélisation du comportement du robot sous l'effet des forces mécaniques appliquées sur son organe terminal.

2.7.4.1 Modèle du robot :

Inspiré par les études de Doukas et al [130], nous avons utilisé le même protocole expérimental pour valider le niveau de rigidité des deux configurations : Avec le logiciel Inventor Autodesk, nous utilisons la méthode des éléments finis sur le modèle mécanique du robot comme présenté dans [146]. La base de la machine est fixe et tous les corps du système sont traités comme des composants indéformables. Le matériau appliqué est la Fonte (choix du constructeur). Ses propriétés, fournies par le logiciel, sont illustrées dans le (Tableau 2.12).

Tableau 2.12: Propriétés de la Fonte

Propriétés	Valeurs
Masse volumique	7,15g/cm ³
Résistance à la traction	884 MPa
Module de Young	120,5 GPa
Coefficient de Poisson	0,3
Module de cisaillement	46,34 GPa
Limite d'élasticité	758 (MPa)

2.7.4.2 Simulation par la méthode éléments finis (MEF) :

Nous considérons que le frottement au niveau des articulations est nul. Les raideurs aux articulations choisis sont illustrés dans l'annexe. La taille de l'élément de maille est de 0,2 mm. Une force de 500 N est appliquée sur l'organe terminal. Nous mesurons le déplacement du robot pour caractériser sa rigidité (Figure 2.53, Figure 2.54, Tableau 2.13).

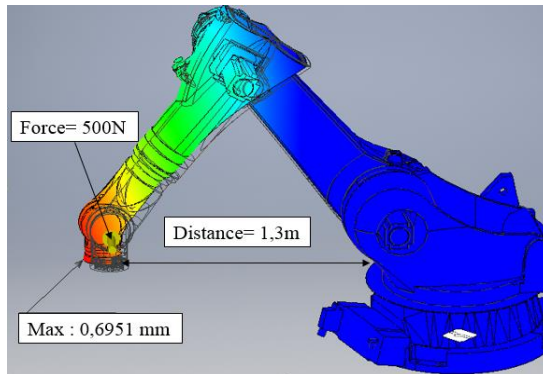


Figure 2.53: Déplacement en configuration rigide

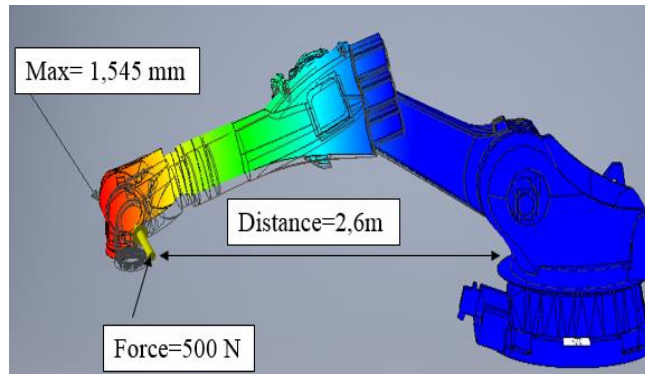


Figure 2.54: Déplacement en configuration flexible

Tableau 2.13: Déplacement maximal du robot

Déplacement maximal	
Configuration rigide	0,69 mm
Configuration flexible	1,54 mm

Les résultats obtenus révèlent qu'à 1,3 m de la base, le poignet du robot se déplace d'une distance égale à 0,69 mm. En s'éloignant de 2,6 m et sous les mêmes contraintes mécaniques appliquées, le déplacement augmente pour atteindre 1,54 mm.

Ces résultats confirment notre réflexion concernant la rigidité variable dans les deux positions choisies. Ils prouvent qu'en usinant proche de la base (Figure 2.53), le robot est assez rigide pour encaisser les forces appliquées sur son organe terminal. Cependant, ce comportement diffère en usinant dans les limites de l'espace de travail où le système paraît flexible (Figure 2.54).

2.7.5 Mesure des efforts de coupe :

La chaîne instrumentale mise en place, mesure les 3 composantes des forces appliquées par l'outil sur la matière ($F_x F_y F_z$). Les mesures sont effectuées lors du rainurage horizontal (Figure 2.55), et vertical (Figure 2.56).

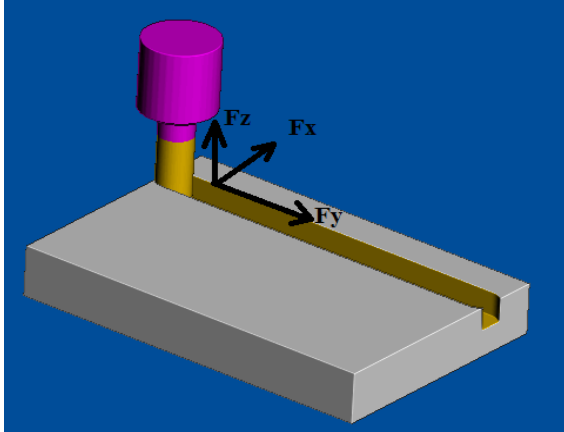


Figure 2.55: Effort de coupe pendant le rainurage horizontal

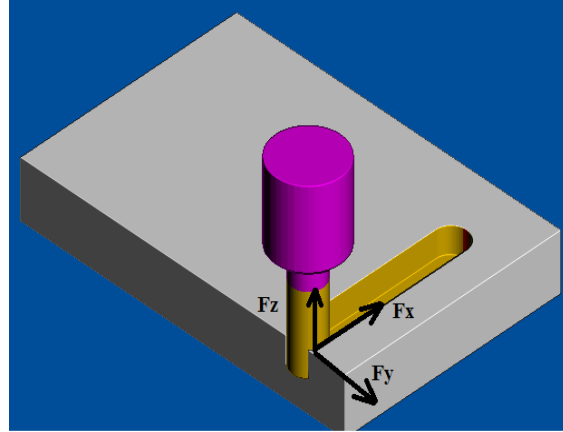


Figure 2.56: Effort de coupe pendant le rainurage vertical

Les résultats obtenus avec l'usinage robotisé sont comparés avec les efforts de coupe mesurés sur la défonceuse numérique dans les mêmes conditions expérimentales illustrées dans le Tableau 2.11. A partir des efforts de coupes mesurés suivant les axes X, Y et Z, nous calculons l'effort résultant appliqué sur l'échantillon pendant le rainurage en utilisant le théorème de Pythagore (équation 28) (Figure 2.57).

$$F_{total_échantillon} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (28)$$

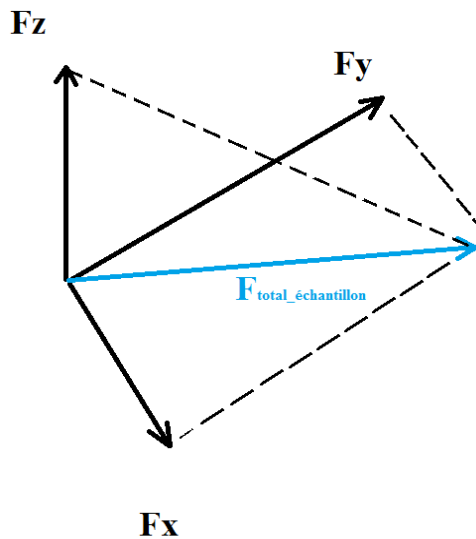


Figure 2.57: Les composantes de la force résultantes (F_x, F_y, F_z)

F_x : La moyenne des forces appliquées sur l'axe X.

F_y : La moyenne des forces appliquées sur l'axe Y

F_z : La moyenne des forces appliquées sur l'axe Z.

Pour caractériser les efforts de coupe pendant toute la campagne expérimentale, le même calcul est appliqué sur chaque échantillon Tableau 2.14 :

Tableau 2.14: Calcul des efforts de coupe résultants appliqués

	F_x	F_y	F_z	$F_{total_échantillon}$
Echantillon 1	a_1	b_1	c_1	$F_{total_échantillon_1} = \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2}$
.
.
.
.
Echantillon 10	a_{10}	b_{10}	c_{10}	$F_{total_échantillon_10} = \sqrt{a_{10}^2 + b_{10}^2 + c_{10}^2}$

2.7.6 Mesure des dimensions d'usinage :

Pour caractériser la qualité dimensionnelle des procédés d'usinage réalisés nous utilisons la table à mesurer et le scanner laser pour mesurer les deux paramètres suivants :

- « L_i » : C'est la distance entre le bord de la rainure horizontale et le bord de la surface de référence obtenue avec le contournage (Figure 2.58) ;
- « L_e » : C'est la distance entre le bord de la rainure verticale et le bord de la surface de référence obtenue avec le contournage (Figure 2.58).

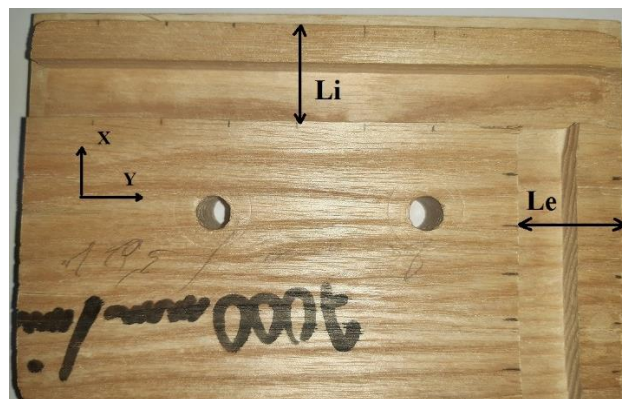


Figure 2.58: Paramètres dimensionnels d'usinage

Les mesures de ces deux paramètres sont effectuées sur 6 points équidistants de chaque échantillon pour assurer une répétabilité de mesure (Figure 2.59). La distance entre deux points de mesure est 15 mm pour la rainure suivant l'axe Y ($L_{i1}..L_{i2}$) et 10 mm pour la rainure suivant l'axe X ($L_{e1}..L_{e2}$).

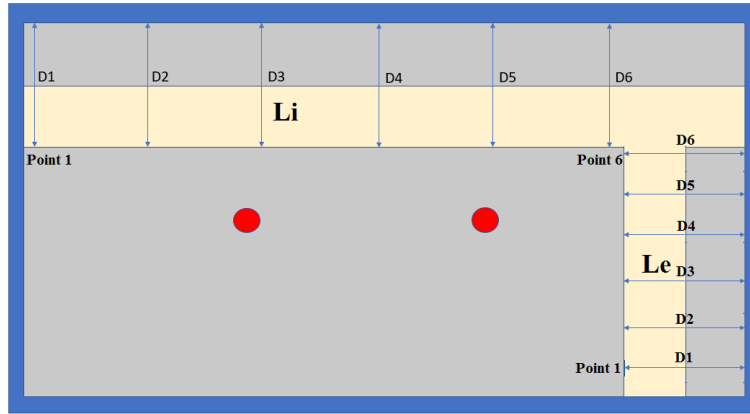


Figure 2.59: Mesure de dimensions d'usinage robotisé

2.7.7 Mesure de l'orthogonalité :

Le troisième paramètre dimensionnel étudié pour caractériser les procédés d'usinage robotisés est l'orthogonalité de la rainure horizontale par rapport à la rainure verticale. Pour réaliser ceci nous nous sommes basés sur la loi des cosinus :

Elle est appelée aussi théorème de Pythagore généralisé et théorème d'Al-Kashi. Dans un triangle quelconque (Figure 2.60), la loi des cosinus établit une relation qui relie la longueur d'un côté « a » à celles de deux autres « b », « c » en utilisant le cosinus de l'angle juste en face $\hat{B}\hat{A}\hat{C}$.

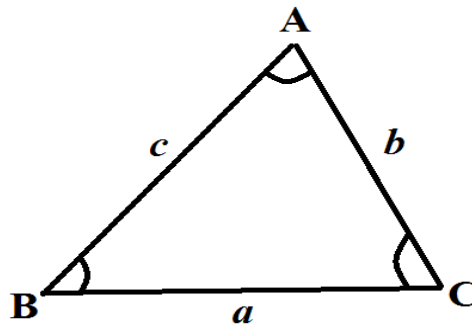


Figure 2.60: Triangle ABC

La valeur de l'angle $\hat{B}\hat{A}\hat{C}$ peut être estimée en appliquant l'équation (28) :

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2.b.c.\cos(\hat{B}\hat{A}\hat{C}) \quad (28)$$

Pour évaluer l'orthogonalité des profils usinés (rainure verticale et horizontale), nous étudions l'évolution de l'angle $\hat{B}\hat{A}\hat{C}$ en appliquant l'équation (29) :

$$\hat{B}\hat{A}\hat{C} = \ar\cos[(-1/2).(a^2 - b^2 - c^2) / b.c)] \quad (29)$$

En reliant les points de mesure utilisés pour la caractérisation de la qualité dimensionnelle d'usinage (point1...point6) nous obtenons au total 5 triangles à étudier (Figure 2.61) : ABC/ AB'C'/ AB''C''/ AB'''C'''/ AB''''C''''.

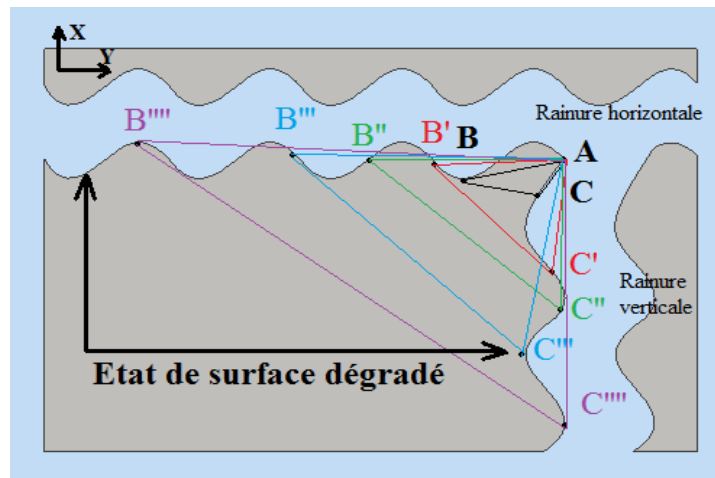


Figure 2.61: Evaluation de l'orthogonalité de l'usinage robotisé

2.8 Récapitulatif des campagnes expérimentales:

Nous résumons dans le Tableau 2.15 toutes des campagnes expérimentales réalisées pendant ces travaux de recherches pour caractériser les procédés d'usinage robotisés.

Tableau 2.15: Récapitulatif des campagnes expérimentales

Matériaux	Machine	Configuration	(Capteur+ échantillon)	Nomenclature	Usinage	Particularités
MDF	Robot	Rigide	Fixé sur la table	Campagne 1.1	Rainurage	Caractérisation effort de coup + qualité dimensionnelle
			Porté par le robot	Campagne 2.1	Rainurage	Caractérisation effort de coup + qualité dimensionnelle
		Flexible	Fixé sur la table	Campagne 1.2	Rainurage	Caractérisation effort de coup + qualité dimensionnelle
			Porté par le robot	Campagne 2.2	Rainurage	Caractérisation effort de coup + qualité dimensionnelle
Défonceuse numérique	Standard	Fixé sur la table	Campagne référence	Rainurage	Caractérisation effort de coup + qualité dimensionnelle	

hêtre	Robot	Rigide	Fixé sur la table d'usinage	Campagne 1.1	Rainurage	Caractérisation effort de coup + qualité dimensionnelle Effet mode de coupe. Orthogonalité. Effet de la variation des vitesse d'avance
		Flexible	Fixé sur la table d'usinage	Campagne 1.2	Rainurage	Caractérisation effort de coup + qualité dimensionnelle.
		Défonceuse numérique	Standard	Fixé sur la table d'usinage	Campagne référence	Rainurage
sapin	Robot	Rigide	Fixé sur la table d'usinage	Campagne 1.1	Rainurage	Caractérisation effort de coup + qualité dimensionnelle. Effet des nœuds Orthogonalité. Effet de la variation des vitesses d'avance
		Flexible	Fixé sur la table d'usinage	Campagne 1.2	Rainurage	Caractérisation effort de coup + qualité dimensionnelle.
		Défonceuse numérique	Standard	Fixé sur la table d'usinage	Campagne référence	Rainurage

2.9 Influences des phénomènes aléatoires :

Pour tester le banc de mesure et quantifier l'effet des phénomènes aléatoires tels que l'accélération du robot, le couple de serrage et l'inertie du capteur, des essais à vide sont réalisés. Ils consistent à démarrer la broche et la chaîne de mesure et parcourir la trajectoire du contournage et du rainurage sans avoir usiné l'échantillon.

2.9.1 Analyse temporelle :

2.9.1.1 Essai à vide platine fixe :

Dans cette expérience, la platine ®Kistler est bridée sur la table d'usinage avec 4 vis ayant un couple de serrage égal à 5 N.m. L'échantillon est monté avec deux vis serrées à 5 N.m (Figure 2.62) pour assurer une mise en place droite et éviter le glissement sous l'effet des efforts de coupe.

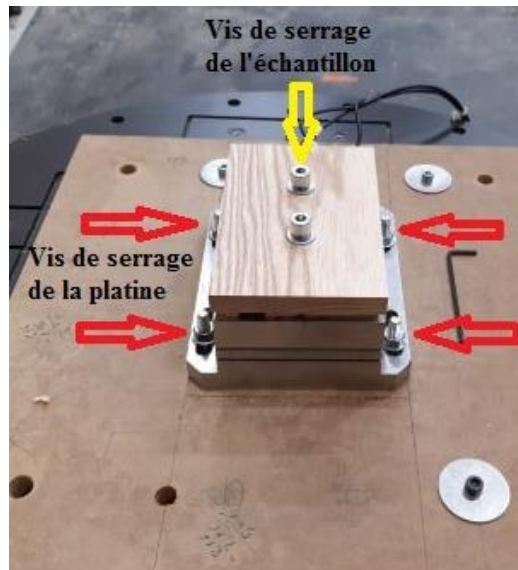


Figure 2.62: Essai à vide platine fixée [15]

L'électro-broche est initialement située à 10 cm au-dessus du capteur. Les mesures obtenues avant de lancer la broche sont nulles. Nous démarrons le moteur à 15000 tours/min pour déterminer l'effet de la vibration du système sur le capteur. Les résultats de mesures suivant l'axe Y sont illustrés dans la Figure 2.63.

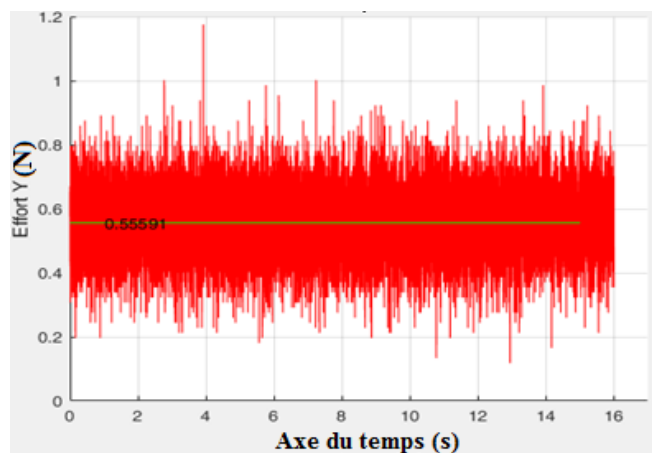


Figure 2.63: Effort mesurés à vide capteur fixe (axe y)

L'usinage à vide suivant les trajectoires du contournage et rainurage donne des efforts qui varient dans l'intervalle [0.11 N / 1.9 N] avec une moyenne de 0,55 N. Ces faibles valeurs nous révèlent que le serrage de la platine et l'échantillon ainsi que les vibrations des équipements à proximité n'influencent pas les mesures du capteur et leurs effets sont négligeables. Nous réalisons les mêmes constats pour les résultats suivant l'axe X et Z, (Figure 2.64), (Figure 2.65) (Valeurs moyenne : 3,40N pour F_x et 2,60 N pour F_y)

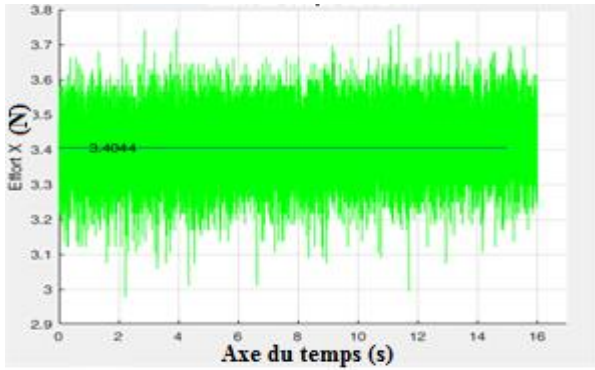


Figure 2.64: Effort mesurés à vide capteur fixe (axe x)

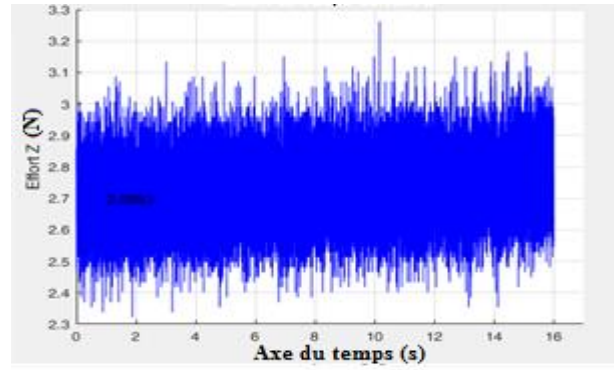


Figure 2.65: Efforts mesurés à vide capteur (axe z)

2.9.1.2 Essai à vide platine mobile :

Pour cet essai, la platine @Kistler est montée directement sur la bride du robot, (Figure 2.66) avec 4 vis ayant un couple égal à 5 N.m. L'échantillon est fixé de la même manière que l'essai précédent. L'objectif principal est de caractériser les efforts de coupe, la qualité d'usinage et l'interaction entre eux lorsque le robot est porteur de l'échantillon à usiner.

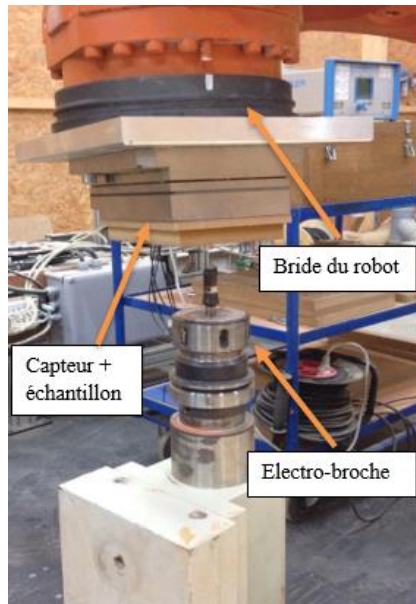


Figure 2.66: Essai à vide platine mobile [15]

L'électro-broche est bridée au sol avec des électro-aimants et située à 10 cm en dessous du capteur. Avant de lancer les mesures nous avons démarré le moteur à 15000 tour/min. Les résultats des mesures suivant l'axe Y sont illustrés dans la Figure 2.67.

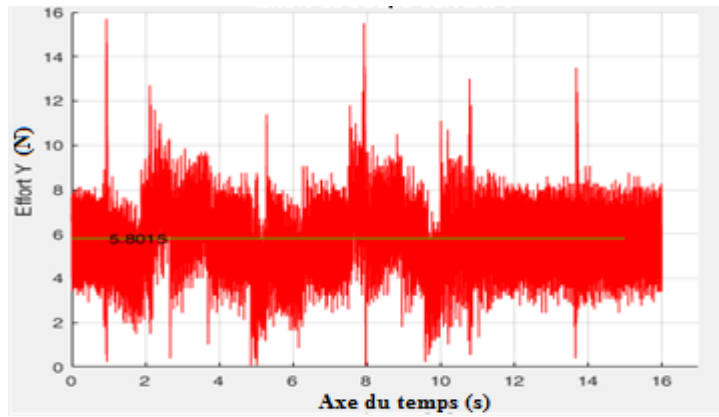


Figure 2.67: Efforts mesurés à vide capteur mobile (axe y)

En montant la platine ©Kistler sur le robot, les mesures à vide indiquent des variations importantes des efforts entre 0,11 N et 16 N. La valeur moyenne est 5,80 N soit 10 fois supérieure à celle obtenue avec un capteur fixe. Suivant l'axe X, les efforts présentent une légère augmentation pour atteindre une valeur moyenne de 5.1 N (Figure 2.68).

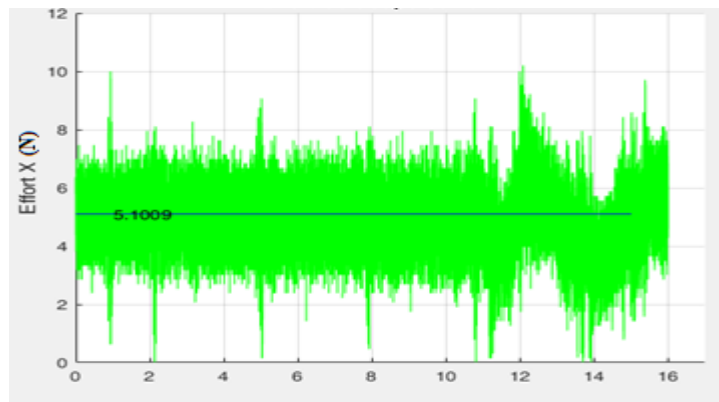


Figure 2.68: Efforts mesurés à vide capteur mobile (axe x)

D'autres résultats remarquables sont obtenus au niveau des mesures suivant l'axe Z. Les efforts varient entre 2,67 N et 25,3 N. La valeur moyenne est 17,51 N (Figure 2.69).

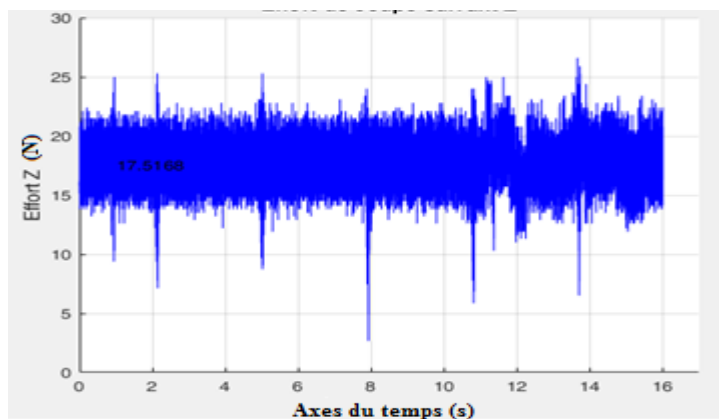


Figure 2.69: Efforts mesurés à vide capteur mobile (axe z)

Contrairement à l'essai précédent, la mesure avec un capteur ®Kistler mobile démontre une énorme influence des couples de serrage du capteur et de l'échantillon, le déplacement du robot et l'inertie du système de mesure. Ceci se traduit par des variations importantes des efforts axiaux (suivant l'axe Z) et latéraux (suivant X et Y).

2.9.2 Analyse fréquentielle :

A l'aide d'un module développé sur Matlab, nous appliquons la transformée de Fourier (FFT) sur les signaux des essais à vide pour établir leurs spectres fréquentiels. L'objectif principal de cette partie est d'analyser l'effet du bruit mécanique dû à la vibration des équipements à proximité du capteur (moteur de l'électro-broche, table d'usinage, châssis du robot lors du freinage...).

2.9.2.1 Spectres d'essai à vide platine fixe :

Nous constatons que les spectres fréquentiels suivant les 3 axes X, Y et Z ont une impulsion au niveau de la fréquence fondamentale 250 Hz avec un module d'effort faible et égal à :

- ✓ 0,55 N suivant X (Figure 2.70) ;
- ✓ 3,4 N suivant Y, (Figure 2.71) ;
- ✓ 3,4 N suivant Z, (Figure 2.72).

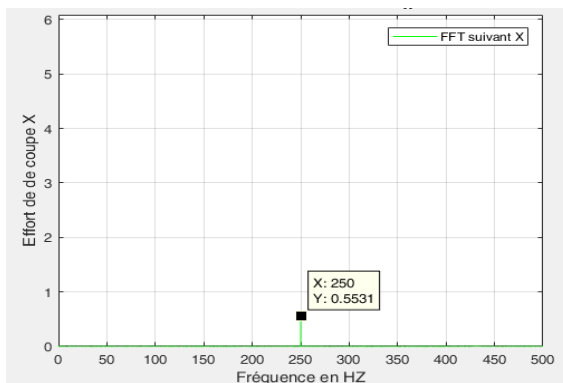


Figure 2.70: Spectre d'efforts suivant X

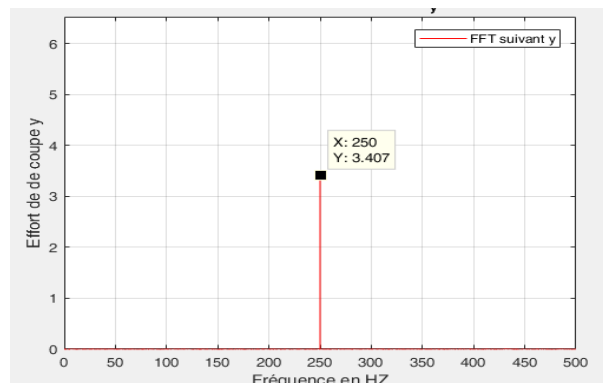


Figure 2.71: Spectre d'efforts suivant Y

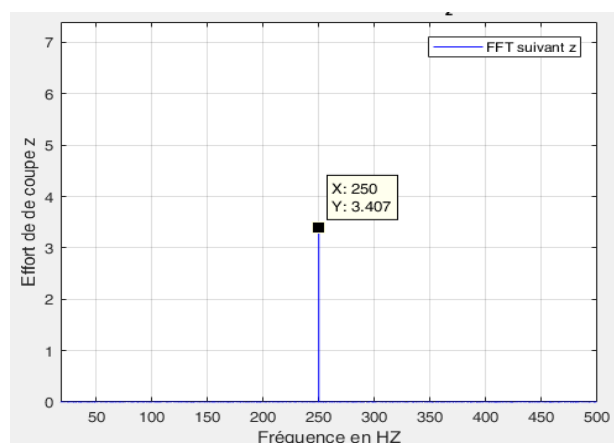


Figure 2.72: Spectre d'efforts suivant Z

Les faibles modules des efforts mesurés et l'absence des harmoniques sur les spectres prouvent que le système de mesure est stable et robuste lorsque la platine @Kistler est montée sur la table d'usinage. Les vibrations dues à la rotation du moteur de l'électro-broche ainsi que le mouvement et le freinage du châssis du robot n'ont pas beaucoup d'influence sur la stabilité du capteur.

2.9.2.2 Spectres d'essai à vide platine mobile :

Contrairement à l'essai précédent, dans les spectres de mesures avec un capteur mobile, nous constatons l'apparition des harmoniques à différentes fréquences : 100 Hz, 117 Hz et 366 Hz ayant différentes amplitudes qui varient entre 3 N et 20 N (Figure 2.73, Figure 2.74, Figure 2.75).

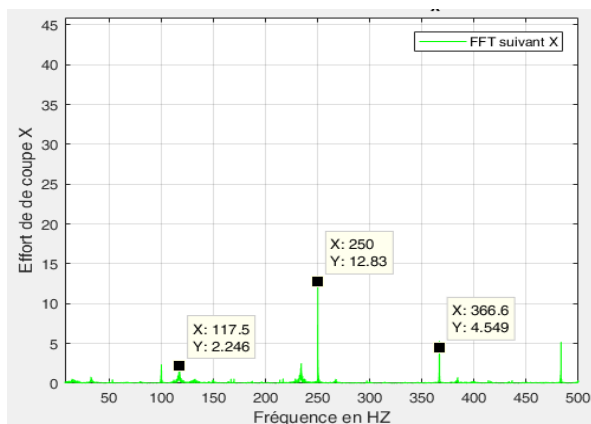


Figure 2.73: Spectre d'efforts suivant X

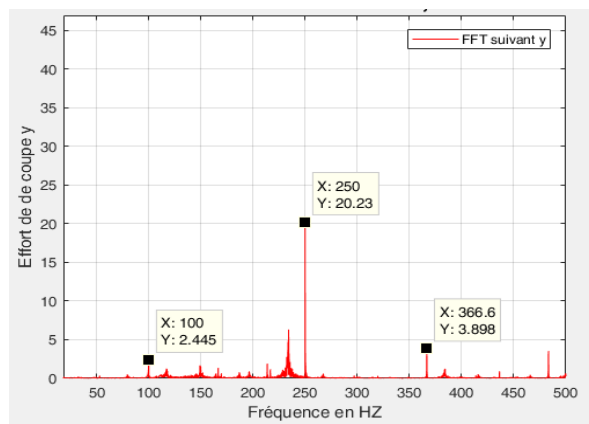


Figure 2.74: Spectre d'efforts suivant Y

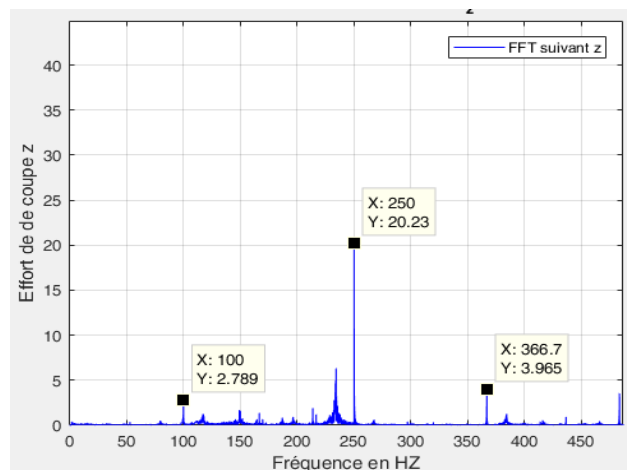


Figure 2.75: Spectre d'efforts suivant Z

Ces résultats prouvent qu'en configuration « capteur mobile », la platine dynamométrique est moins stable et plus sensible aux bruits mécaniques dû aux vibrations de la broche et le mouvement du robot. De même les phénomènes aléatoires influent énormément les grandeurs mesurées et dégradent les performances du capteur.

2.9.3 Interprétation des essais à vides :

Les essais à vide montrent qu'en montant le capteur sur la bride du robot les performances de la chaîne de mesure des efforts deviennent très sensibles aux vibrations liées au mouvement du robot et du fonctionnement des équipements à proximité. Dans les campagnes expérimentales, notamment celles avec un échantillon porté par le robot, les mesures des efforts de coupe sont biaisées par les effets des phénomènes aléatoires. Selon les résultats des campagnes expérimentales dans la suite, nous déciderons si ce mode de travail sera adopté ou non.

2.10 Conclusion :

Ce chapitre introduit l'ensemble des équipements constituant le banc expérimental utilisé pour étudier et caractériser les procédés d'usinage. Pour définir notre environnement expérimental, la composition de la chaîne instrumentale mise en place pour mesurer les efforts ainsi que son principe de fonctionnement sont traités et détaillés. De même, les dispositifs métrologiques exploités pour caractériser la qualité dimensionnelle d'usinage robotisé et rechercher son interaction avec les efforts sont présentés.

Le chapitre suivant sera consacré à la réalisation des campagnes expérimentales et des mesures. Il traitera de l'étude du comportement du robot ainsi que de l'évolution des efforts de coupe et la qualité dimensionnelle d'usinage en fonction de la rigidité de la machine, des matériaux usinés, des modes de coupe et des singularités du matériau.

Chapitre 3 -Caractérisation des usinages robotisés :
Application aux processus de transformation du
matériau bois.

3.1 Essais préliminaires:

3.1.1 Origines des irrégularités d'usinage :

Le déplacement de l'outil par un robot anthropomorphe comporte 3 phases principales (Figure 3.1) :

1/ Accélération ;

2/ Déplacement à vitesse constante ;

3/ Décélération.

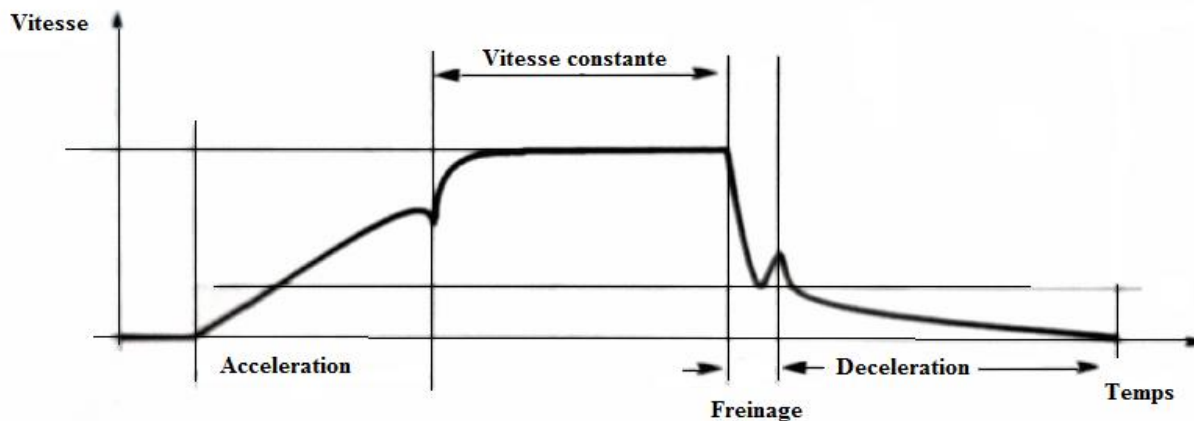


Figure 3.1: Evolution de la vitesse d'un actionneur[8]

Les phases de démarrage et freinage des actionneurs tels que les moteurs à courant continu et les servo-moteurs, sont accompagnées par des vibrations du système et des chaînes de transmissions (châssis, arbre moteur, réducteur...). Ceci nous conduit à s'interroger sur l'origine de provenance des problématiques de suivi de trajectoire. Trois pistes sérieuses peuvent être envisagées :

- L'effet de l'accélération et la décélération de la machine ;
- Les caractéristiques mécaniques du matériau ;
- La faible rigidité du robot.

Qui est à l'origine des déviations de trajectoire ?

3.1.1.1 Usinage d'un matériau tendre (polystyrène) :

Afin de percevoir l'effet de l'accélération et de la décélération sur l'usinage robotisé, nous réalisons des rainures suivant les axes X et Y sur un matériau tendre et homogène (polystyrène) (Figure 3.2) dans les mêmes conditions expérimentales que celles décrites dans le Tableau 2.11. L'usinage est réalisé en configuration rigide / pièce bridée. La surface obtenue est analysée par la suite avec le scanner laser.

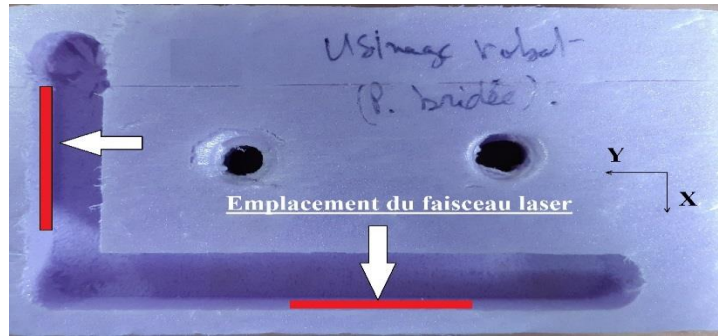


Figure 3.2: Echantillon polystyrène usiné $V_a=1000$ mm/min /outil 3 arêtes

En scannant les faces latérales des rainures, nous constatons une régularité au niveau des surfaces usinées. Les mesures sont effectuées à une échelle de 1mm X 1mm. Elles ne dépassent pas 0,09mm (Figure 3.3).

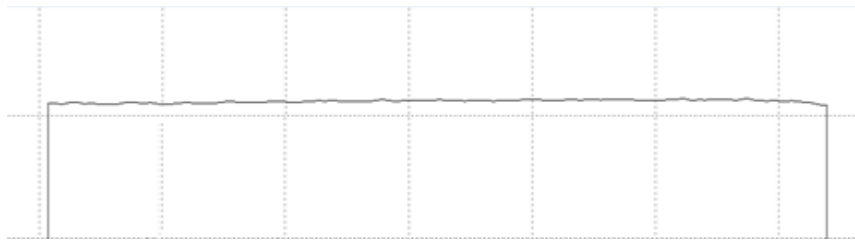


Figure 3.3: Etat de surface de la face latérale de la rainure du polystyrène (scan laser)

3.1.1.2 Usinage du MDF :

Le même rainurage est réalisé sur du MDF (Figure 3.4) qui présente un module d'élasticité plus élevé que celui du polystyrène ($E_{(MDF)}=2628$ N/mm² $\gg E_{(polystyrène)} =1300$ N/mm² [149]). Il possède également une certaine isotropie par rapport au bois massif (paragraphe 1.7.1).



Figure 3.4: Echantillon MDF usiné

L'inspection avec le faisceau laser des faces latérales révèle des irrégularités importantes (Figure 3.5). La surface usinée renferme des ondulations de matière dues aux déviations de la

trajectoire d'outil. Le profil scanné (Figure 3.6) présente un écart de 0,6 mm entre l'amplitude minimale et maximale des ondulations.

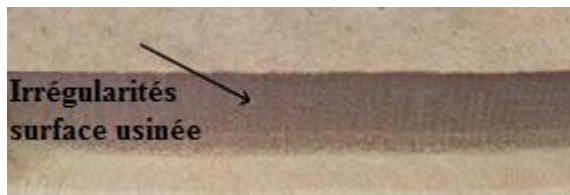


Figure 3.5: Irrégularités d'usinage

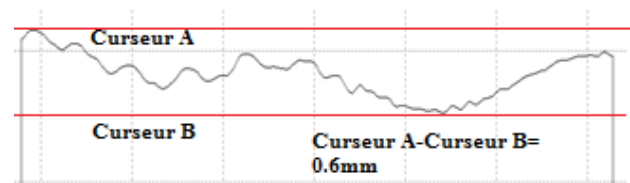


Figure 3.6: Scan laser des irrégularités d'usinage

3.1.2 Effet machine/matériau :

L'usinage du polystyrène avec le robot Kuka a abouti à une surface régulière sans aucune déformation géométrique. Ces constats montrent que les phénomènes de vibrations qui accompagnent l'accélération et la décélération des actionneurs du robot n'ont aucun effet apparent sur le suivi de la trajectoire et l'état de surface du profil usiné.

Dans ces conditions expérimentales et en remplaçant le polystyrène par du MDF, des vibrations importantes apparaissent. Des défauts dimensionnels et une dégradation de l'état de surface sont constatés. Ces résultats laissent penser, dans notre cas, que les origines des phénomènes de vibration pendant le déplacement de l'outil sont liés à la nature du matériau, à ses caractéristiques mécaniques (texture, module d'élasticité...) et à la faible rigidité du robot face à un matériau « dur ». Les éventuels effets liés aux accélérations et décélérations présentés dans 3.1.1 sont éliminés. La stabilité du système pendant ces deux phases n'est pas remise en cause.

3.2 Caractérisation des procédés d'usinage du bois dérivé (MDF)

Nous procédons dans la suite à caractériser les efforts de coupe et la qualité d'usinage bois par enlèvement de matière en utilisant la défonceuse numérique et le robot anthropomorphe.

3.2.1 Usinage avec la défonceuse numérique (campagne référence pour l'usinage du MDF) :

La défonceuse à commande numérique joue le rôle de l'acteur principal sur lequel se base la majorité des industries de transformation du matériau. Elle est actuellement la machine qui répond aux besoins industriels. Ceci est le fruit des performances techniques (la rigidité, la répétabilité...) dont la défonceuse a fait preuve. Par conséquent, les résultats des campagnes expérimentales menées par le robot sont comparés à ceux obtenus avec la défonceuse numérique (campagne référence). Ces qualités justifient l'orientation de notre choix vers l'utilisation de la campagne d'usinage menée par la défonceuse numérique comme la campagne référence pour caractériser les efforts de coupe, la qualité dimensionnelle d'usinage et l'interaction entre les deux.

3.2.1.1 Choix des outils :

- **Usinage avec la mèche à 3 dents :**

Pour réaliser le rainurage suivant les axes X et Y de l'échantillon en MDF, nous utilisons la mèche de défonçage VHM 113 à 3 dents et de diamètre 12 mm. La vitesse de rotation de la broche est fixée à 15000 tr/min et la vitesse d'avance à 1000mm/min. L'enlèvement de matière est réalisé en une seule prise de passe de 14mm. La Figure 3.7 et la Figure 3.8 présentent respectivement l'évolution des efforts de coupe F_x et F_y en fonction du temps pendant 10 tours de l'outil (équivalent à une durée de 0,04s). Le signal obtenu est filtré à l'aide d'un filtre passe bas de fréquence de coupure égale à 2Khz. Chaque tour de l'outil est présenté par 8 points de mesure.

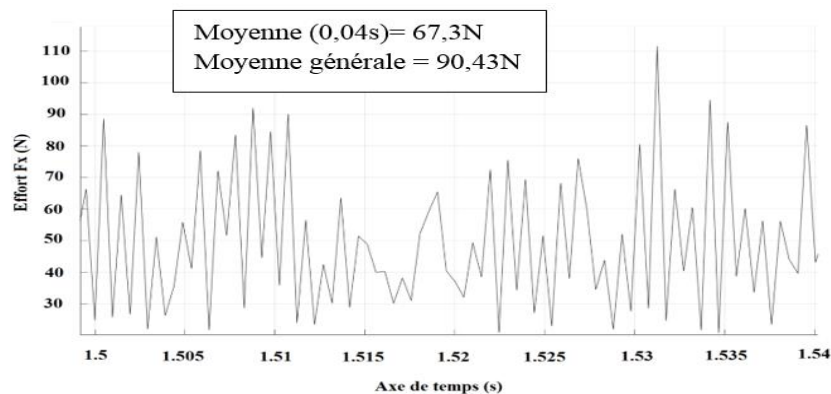


Figure 3.7: Efforts de coupe suivant l'axe X (usinage MOCN)

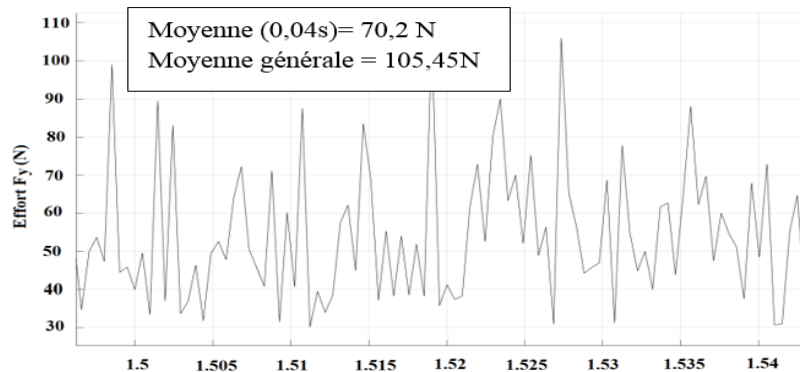


Figure 3.8: Efforts de coupe suivant l'axe Y (usinage MOCN)

En analysant les mesures des efforts de coupe F_x et F_y nous constatons l'absence d'un cycle régulier de l'enlèvement de matière et d'énormes fluctuations au niveau des efforts. Ceci se manifeste surtout au niveau de l'écart entre la moyenne mesurée pendant 10 tours de l'outil (0,04s) et celle mesurée pendant l'opération d'usinage (figure 3.7 et figure 3.8). Ces variations montrent que le rendement de l'outil est instable. Une telle évolution complique l'étude du comportement des arêtes coupantes. Les raisons à ces irrégularités peuvent être liées à :

- Des défauts de centrage de l'outil ;
- Une hétérogénéité locale du matériau ;
- Une usure de la surface coupante ;
- Arêtes de coupe non positionnées sur le même cercle de coupe ;
- Des enlèvements de matière non équivalentes.

- **Usinage avec la mèche à une dent :**

Dans la suite, pour simplifier l'étude de l'évolution des efforts de coupe et obtenir des mesures plus faciles à traiter et à analyser, nous utilisons la mèche Leucodur HL05 une dent et diamètre 14 mm. Le rainurage est effectué dans les mêmes conditions de coupe Tableau 2.11 (Vitesse d'avance, vitesse de rotation et profondeur de passe). Les résultats de F_x et F_y sont présentés dans la figure 3.9 et la figure 3.10.

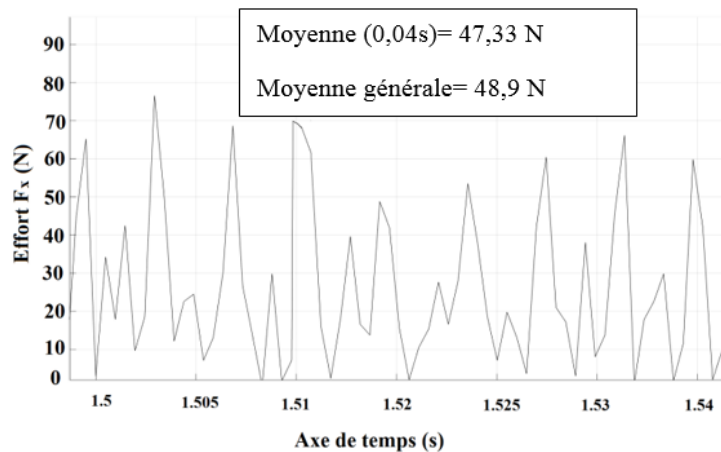


Figure 3.9: Efforts de coupe suivant X (usinage MOCN)

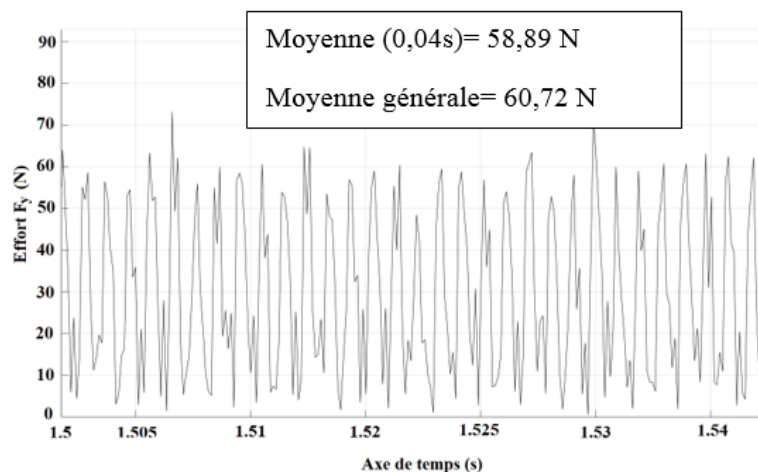


Figure 3.10: Efforts de coupe suivant Y (usinage MOCN)

En comparant ces mesures avec celles obtenues avec l'outil VHM 113, nous constatons une certaine régularité au niveau de l'enlèvement de matière qui correspond au travail de l'arête coupante de l'outil. Elle se manifeste sous la forme d'un cycle répétitif d'efforts de faibles

variations suivant les axes X et Y. Les faibles écarts entre les valeurs moyennes d'efforts (figure 3.9 et figure 3.10) confirment une stabilité au niveau du rendement de l'outil. En se basant sur ces résultats, toutes les prochaines campagnes expérimentales seront réalisées avec l'outil Leucodur HL05 à une dent.

3.2.1.2 Caractérisation des efforts de coupe :

Pour garantir une répétabilité expérimentale et avoir des mesures d'effort de coupe statistiquement traitables, nous usinons 10 échantillons du MDF suivant les axes X et Y (Figure 3.11 et Figure 3.12).

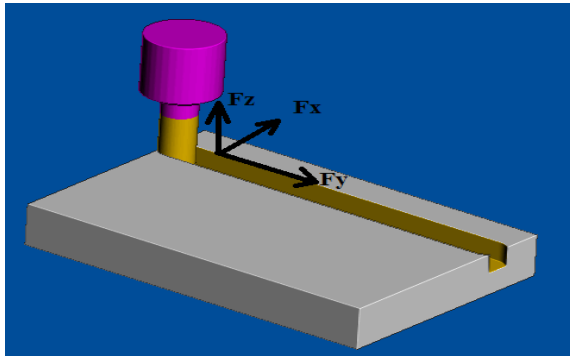


Figure 3.11: Efforts de coupe F_x, F_y, F_z , rainure suivant Y (mode $90^\circ-0^\circ$)

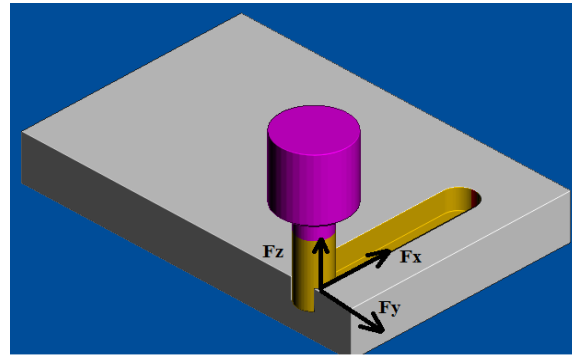


Figure 3.12: Efforts de coupe F_x, F_y, F_z , rainure suivant X (mode $90^\circ-90^\circ$)

Vu l'organisation structurelle du MDF en terme d'absence de texture fibreuse suivant X et Y, nous nous intéressons seulement dans cette section à la rainure suivant l'axe Y montrée dans la Figure 3.11. Pour chaque échantillon nous calculons (Tableau 3.1) la moyenne des efforts tangentiels et radiaux (F_{x_moy} , F_{y_moy}). Les mesures sont réalisées pendant 10 tours de l'outil, soit 90 points traités. Ensuite la force totale appliquée sur chaque échantillon, F_{total_ech} est calculée par l'équation du Tableau 2.14:

$$F_{total_ech} = \sqrt{(F_{x_moy})^2 + (F_{y_moy})^2}$$

Tableau 3.1: Efforts de coupe tangentiels et radiaux (Usinage MDF)

	$F_{x_moy}(N)$	$F_{y_moy}(N)$	F_{total_ech}
Echantillon 1	43,30	50,76	66,72
Echantillon 2	43,60	56,13	71,07
Echantillon 3	40,51	51,85	65,79
Echantillon 4	41,87	50,70	65,75
Echantillon 5	42,12	49,89	65,29
Echantillon 6	43,11	53,30	68,55
Echantillon 7	41,12	54,23	68,05
Echantillon 8	40,89	53,12	67,03
Echantillon 9	44,60	53,41	69,58
Echantillon 10	42,16	52,10	66,24
Moyenne	42,32	52,54	67,04
Ecart type :$\bar{\sigma}$	1,31	1,87	1,87

Pour caractériser les efforts de coupe pendant l'usinage avec la défonceuse numérique la Figure 3.13 et la Figure 3.14 montrent respectivement l'évolution des paramètres F_{x_moy} et F_{y_moy} .

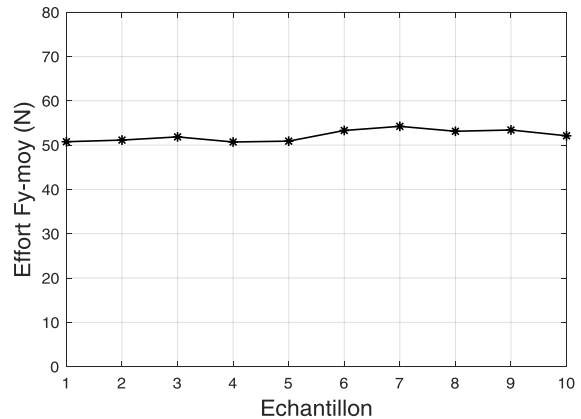
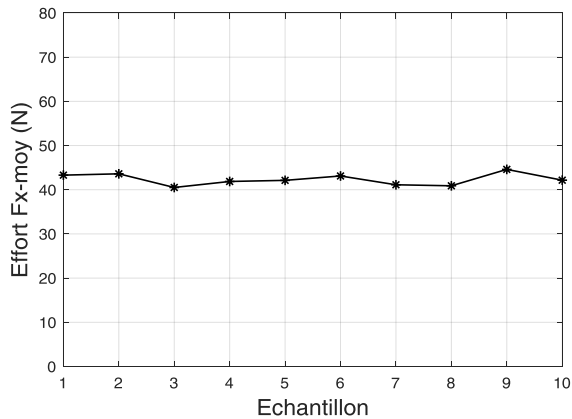


Figure 3.13: Evolution des efforts radiaux Figure 3.14: Evolution des effort tangentiels

Suivant l'axe Y, la défonceuse numérique a eu besoin d'appliquer 15% d'effort tangentiels en plus pour enlever la matière (15% de la force totale 67,56 N). Cette différence varie selon plusieurs facteurs comme la densité du MDF, l'épaisseur du copeau et l'avance par dent comme expliqué par Aguilera dans [63]. Les efforts totaux fluctuent légèrement entre 65,2 N et 71 N (Figure 3.15). L'écart entre l'effort maximal et minimal ne dépasse pas 5,8 N, soit 8,5% par rapport à la moyenne 67,57 N (Figure 3.15). Cette variation est considérée faible par rapport aux résultats présentés à la suite. Ceci prouve que, dans nos conditions de coupe expérimentales, la défonceuse numérique a un rendement constant et répétable en terme d'efforts de coupe. Ce comportement de machine a été constaté aussi en usinant différentes essences de bois comme par exemple le douglas et le sapin [45].

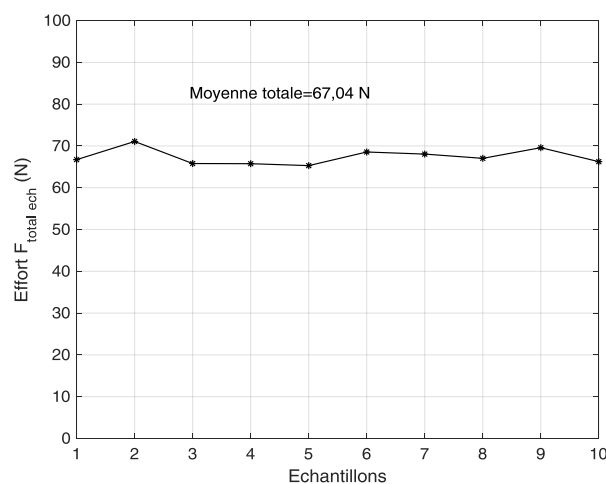


Figure 3.15: Evolution des efforts de coupe F_{total_ech}

3.2.1.3 Caractérisation de la qualité dimensionnelle d'usinage :

Une fois le rainurage réalisé, nous procédons à la caractérisation de la qualité dimensionnelle d'usinage. Nous utilisons pour cela la table à mesurer (décrite dans le paragraphe 2.6.1). Nous introduisons les paramètres L_i présentés dans la Figure 3.16 afin de caractériser la qualité d'usinage. Le plan de référence utilisé pour l'analyse dimensionnelle est le bord de la pièce. Nous nous intéressons seulement aux mesures de L_i vu l'homogénéité du matériau usiné. La mesure de L_i est réalisée sur 6 points équidistants (D1...D6). L'outil numéro 1 de la table à mesurer est utilisé (Figure 2.31). Les mesures de L_i sont illustrées dans le Tableau 3.2 (L_{ij} représente la mesure du paramètre L_i au point D_j).

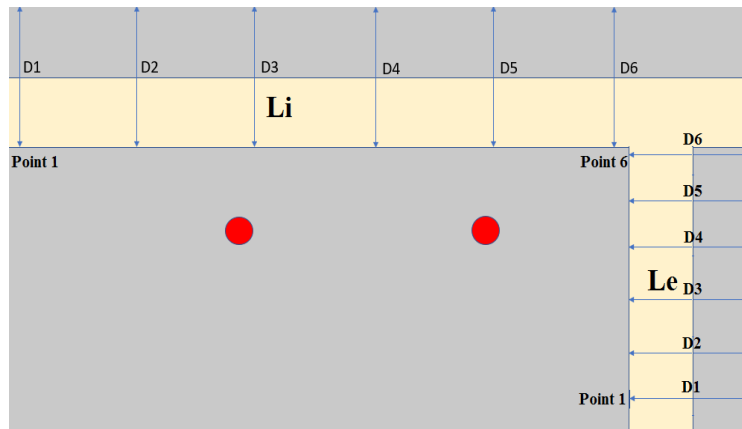


Figure 3.16: Mesure des dimensions d'usinage

Tableau 3.2: Mesure des dimensions d'usinage (L_i)

	Ech1	Ech2	Ech3	Ech4	Ech5	Ech6	Ech7	Ech8	Ech9	Ech10
L_{i1}	20	20,1	19,9	20	19,9	20,1	20,1	19,9	20,1	20
L_{i2}	20	20,1	19,9	19,9	19,9	20,1	20	20	20	19,9
L_{i3}	20	20,1	20	19,9	19,9	20	19,9	20	19,9	20
L_{i4}	19,9	20,1	19,9	19,9	19,9	20,1	20	20	20,1	19,9
L_{i5}	20	20,1	19,9	19,9	19,9	20,1	20	20,1	20	19,9
L_{i6}	20	20,1	20	19,9	19,9	20,1	19,9	19,9	20	20
Moyenne L_{i_moy}	19,98	20,1	19,93	19,92	19,9	20,08	20	20	20,02	19,95
Ecart type : $\bar{\sigma}$	0,04	0,00	0,05	0,08	0	0,04	0,07	0,07	0,04	0,05
Moyenne totale de L_{i_moy}	19,98 mm									

La variation des dimensions d'usinage obtenue est illustrée dans la Figure 3.17 sous la forme de l'évolution du paramètre L_{i_moy} de chaque échantillon pendant la campagne de mesure.

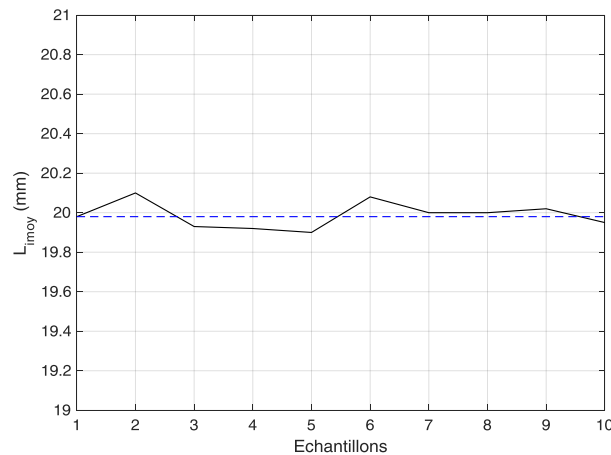


Figure 3.17: Evolution de L_{i_moy}

Nous remarquons que le paramètre L_{i_moy} évolue avec de légères fluctuations ascendantes et descendantes par rapport à la moyenne, qui atteignent une valeur maximale de 0,12 mm pour l'échantillon 2. Ces résultats démontrent que l'usinage avec la défonceuse numérique garantit une qualité dimensionnelle élevée. Cette stabilité d'usinage est confirmée par une faible dispersion de mesure ($6 < 0,08$).

3.2.1.4 Interaction entre effort de coupe et dimensions d'usinage :

Nous traçons, dans la suite, l'évolution du paramètre L_{i_moy} de chaque échantillon en fonction de F_{total_ech} qui lui correspond. Pour étudier l'interaction effort de coupe / qualité dimensionnelle, nous procédons à :

- **Une régression linéaire** pour définir un modèle qui traduit l'interaction effort/ qualité dimensionnelle. La pente du modèle linéaire nous permettra d'évaluer la tendance de variation du phénomène.
- **Un coefficient de détermination R^2** nous permettant de déterminer la robustesse de la régression linéaire à prédire l'évolution du phénomène. Deux conditions doivent se présenter pour que le modèle soit robuste :
 - R^2 proche de 1
 - Une dispersion aléatoire des erreurs résiduelles $(L_{i_expérimentale} - L_{i_modèle})^2$ en fonction des efforts de coupe. Le coefficient $L_{i_modèle}$ présente la projection de valeur de $L_{i_expérimentale}$ sur la droite de régression linéaire.

La Figure 3.18 illustre l'évolution du paramètre L_{i_moy} en fonction des efforts de coupe qui correspondent à chaque échantillon F_{total_ech} .

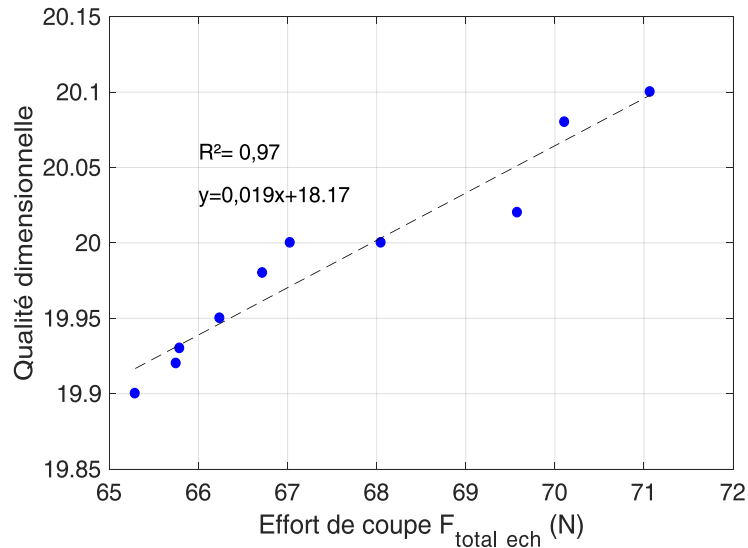


Figure 3.18: Interaction entre les efforts de coupe et les dimensions d'usinage

Nous constatons que lorsque les forces appliquées pour enlever la matière augmentent la qualité dimensionnelle d'usinage se dégrade. Ces résultats démontrent que la dégradation de la des dimensions de la rainure évolue proportionnellement aux efforts de coupe. La Figure 3.19 illustre l'évolution des erreurs résiduelles ($L_i\ expérimentale - L_i\ modèle$)².

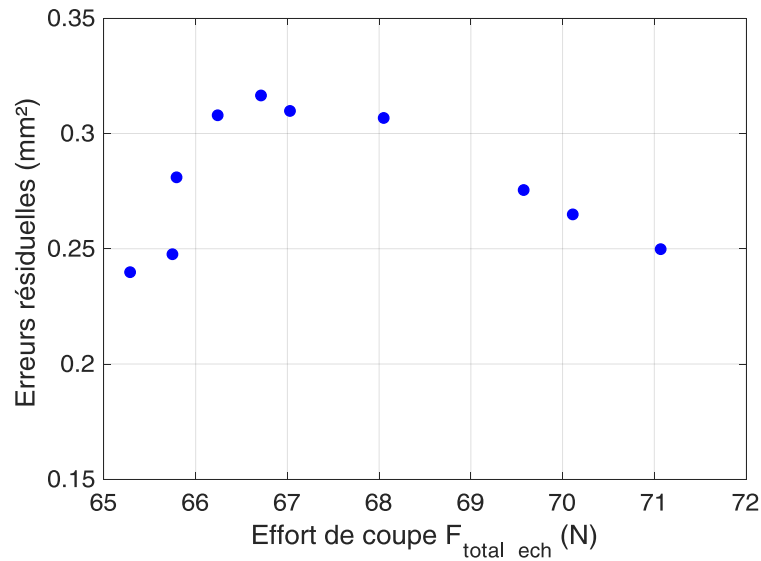


Figure 3.19: Dispersion des erreurs résiduelles

La dispersion des erreurs résiduelles est aléatoire et R^2 est égal à 0,97. Donc le modèle est robuste et la variation des mesures est faible ce qui justifie la stabilité d'usinage en termes d'effort de coupe et dimensions d'usinage.

La pente du modèle est faible et égale à 0,019, ce qui montre que la tendance de variation du phénomène est lente.

3.2.1.5 Synthèse de la campagne :

Cette campagne expérimentale nous permet de caractériser les efforts de coupe et la qualité dimensionnelle d'usinage du bois MDF avec une défonceuse numérique dans des conditions de coupe industrielles. 3 grandes conclusions peuvent être tirées:

- Les efforts de coupe tangentiels dépassent de +10 N les efforts radiaux (soit 15% de la force totale) ;
- Les efforts de coupe résultants ont une faible fluctuation ;
- L'interaction efforts / qualité dimensionnelle d'usinage évolue suivant une relation de proportionnalité directe : Plus les efforts de coupe augmentent plus la dégradation de la dimensions d'usinage augmente. Cette interaction évolue d'une manière lente pendant l'usinage en série.

La défonceuse numérique est assez robuste et rigide pour assurer un usinage en série stable, précis et répétable en termes d'effort. Ces résultats justifient l'orientation de notre choix à considérer cette campagne comme référence de comparaison avec l'usinage robotisé.

3.2.2 Caractérisation des procédés d'usinage robotisé du MDF :

3.2.2.1 Campagne 1.1 « Configuration rigide avec pièce bridée » :

- **Caractérisation des efforts de coupe :**

Pour l'usinage robotisé nous procédons comme la campagne précédente : Nous rainurons 10 échantillons d'MDF suivant l'axe Y. L'opération est réalisée à 1,3 m de la base du robot soit dans l'espace de travail où le robot possède une rigidité élevée comme expliqué dans 2.7.3.2. Nous conservons les mêmes conditions de coupe (pour mémoire : Tableau 2.21):

Tableau 2.11: Conditions d'usinage

Vitesse broche	15000 tr/min
Vitesse d'avance	1000mm/min
Profondeur de passe	14 mm
Nombre de dent	1 dent
Avance par dent	0,066mm/dent
Epaisseur copeau	0,021 mm

Le Tableau 3.3 illustre les mesures des paramètres des efforts de coupe F_{x_moy} , F_{y_moy} ainsi la force moyenne totale exercée sur chaque échantillon F_{total_ech} .

Tableau 3.3: Effort de coupe tangentiels et radiaux campagne 1.1

	$F_{x_moy}(N)$	$F_{y_moy}(N)$	F_{total_ech}
Echantillon 1	17,36	39,54	43,18
Echantillon 2	13,6	36,13	38,60
Echantillon 3	17,52	30,49	35,17
Echantillon 4	19,79	33,30	38,74
Echantillon 5	17,48	33,85	38,10
Echantillon 6	15,3	33,41	36,75
Echantillon 7	17,22	30,67	35,17
Echantillon 8	11,72	37,69	39,47
Echantillon 9	17,34	33,89	38,07
Echantillon 10	19,72	36,69	41,65
Moyenne	16,70	34,56	38,49
Ecart type : σ	2,52	2,92	2,54

L'usinage robotisé du MDF en configuration rigide aboutit à des efforts (tangentiels $F_{y_moy}=34,56$ N) doubles par rapport à ceux radiaux ($F_{x_moy}=16,70$ N).

En comparant avec la campagne menée par la défonceuse, nous constatons clairement que, dans les mêmes conditions de coupe, les efforts mesurés sont inférieurs (Figure 3.20). Ceci sera expliqué dans la suite à travers l'analyse fréquentielle des signaux d'effort obtenus. La dispersion des mesures des efforts de coupe autour de leurs valeurs moyennes a augmenté (Tableau 3.4).

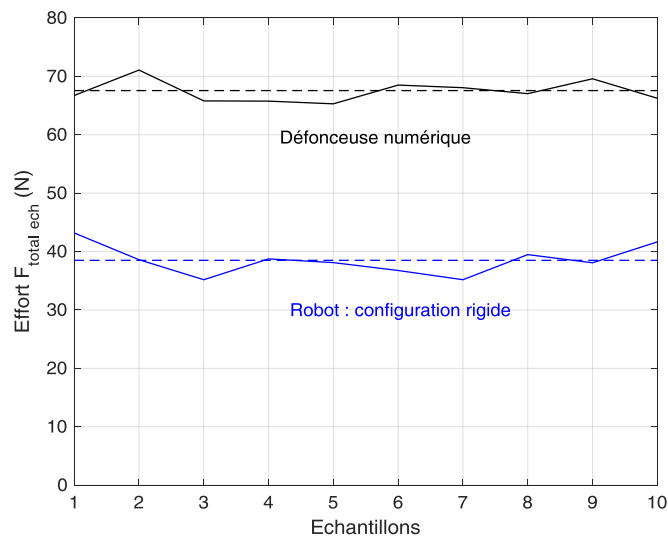


Figure 3.20: Efforts de coupe moyens appliqués par la défonceuse et le robot

Tableau 3.4: Ecart types des efforts de coupe

	$\bar{\sigma}_{Fx_moy}$	$\bar{\sigma}_{Fy_moy}$	$\bar{\sigma}_{Ftotal_ech}$
Usinage avec la défonceuse	1,31	1,87	2,04
Usinage config. rigide	2,52	2,92	2,54

- **Caractérisation de la qualité dimensionnelle d'usinage :**

Pour caractériser la qualité dimensionnelle de l'usinage robotisé nous suivons la même procédure pour mesurer le paramètre L_i . Nous rappelons qu'avant chaque usinage robotisé, la pièce est calibrée à travers un contournage extérieur réalisé par le robot dans les mêmes conditions de coupe du rainurage (Figure 3.21). Ce calibrage nous permet d'éliminer les erreurs dues à la modélisation de la cellule robotique et de créer un plan de référence nécessaire pour l'analyse dimensionnelle (Tableau 3.5). Nous traçons dans la Figure 3.22 l'évolution de L_{i_moy} durant la campagne expérimentale.

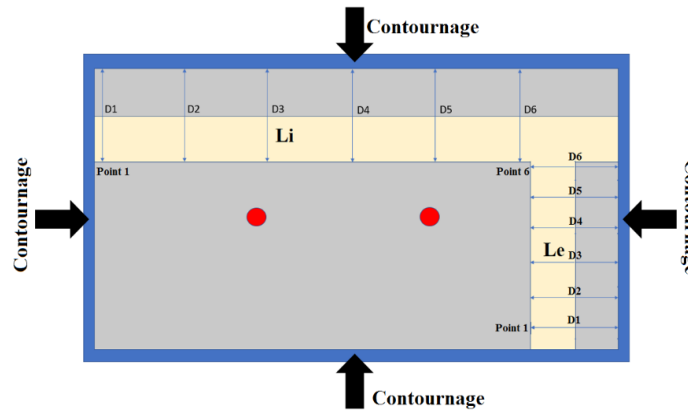


Figure 3.21: Calibrage de l'échantillon

Tableau 3.5: Mesure des dimensions d'usinage (L_i)

	Ech1	Ech2	Ech3	Ech4	Ech5	Ech6	Ech7	Ech8	Ech9	Ech10
L_{i1}	19,7	19,6	19,5	19,6	19,6	19,5	19,7	19,7	19,6	19,7
L_{i2}	19,7	19,6	19,5	19,6	19,6	19,5	19,5	19,7	19,5	19,7
L_{i3}	19,7	19,6	19,5	19,7	19,6	19,5	19,5	19,7	19,5	19,7
L_{i4}	19,8	19,5	19,6	19,5	19,5	19,6	19,5	19,6	19,5	19,6
L_{i5}	19,7	19,6	19,5	19,7	19,6	19,5	19,5	19,6	19,6	19,6
L_{i6}	19,8	19,7	19,6	19,7	19,6	19,6	19,5	19,7	19,6	19,7
Moyenne (L_{imoy})	19,73	19,6	19,53	19,63	19,58	19,53	19,53	19,67	19,55	19,67
Ecart type : σ	0,05	0,06	0,05	0,08	0,04	0,05	0,08	0,05	0,05	0,05
Moyenne totale de L_{imoy}	19,60 mm									

MDF / Robot : configuration flexible avec pièce bridée

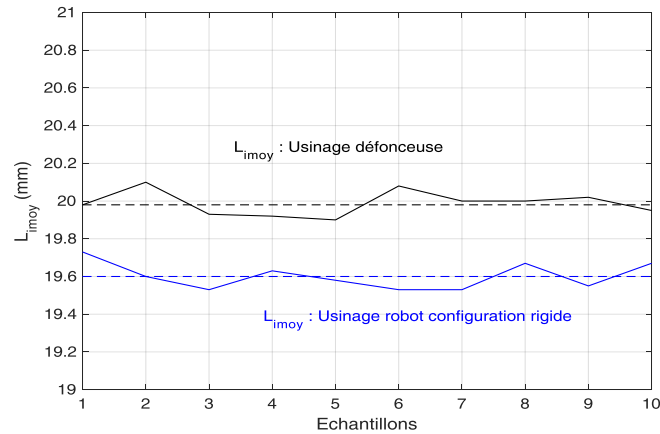


Figure 3.22: Evolution de L_{i_moy} avec la défonceuse et le robot en configuration rigide

Les mesures de L_{i_moy} de l'usinage robotisé sont inférieures à celles obtenues avec la défonceuse pour un rainurage réalisé avec les mêmes dimensions. Ceci est dû également aux perturbations de déplacement du robot et les irrégularités au niveau du plan de référence créé.

La fluctuation élevée des efforts de coupe augmente le nombre de variations ascendantes et descendantes (Figure 3.22).

L'utilisation du robot anthropomorphe a révélé une faible rigidité faces aux contraintes mécaniques pendant l'enlèvement de matière.

- **Interaction entre effort de coupe et les dimensions d'usinage :**

Pour caractériser l'interaction efforts/ qualité dimensionnelle d'usinage nous utilisons la même procédure et les mêmes outils mathématiques (Figure 3.23.a).

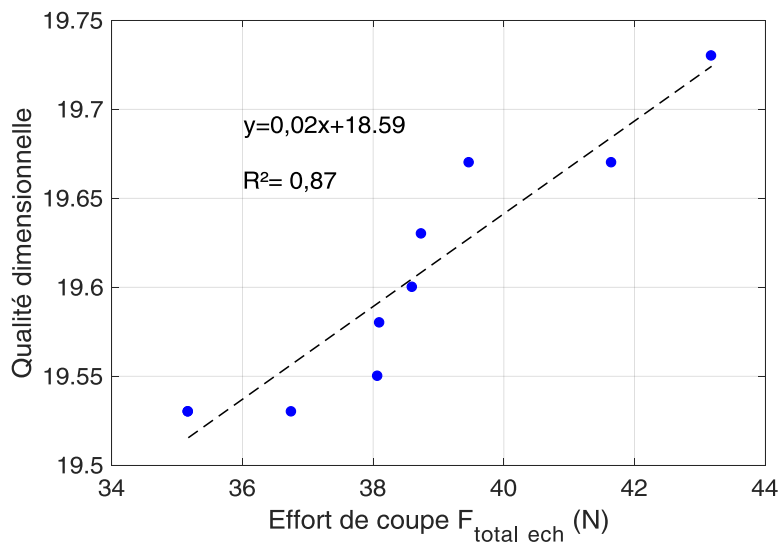


Figure 3.23.a: Interaction entre les efforts de coupe et la qualité dimensionnelle

L'évolution des dimensions d'usinage en fonction des efforts de coupe révèle l'existence d'une relation proportionnelle directe. Plus les forces appliquées par le robot augmentent, plus la qualité dimensionnelle se dégrade en s'éloignant de sa valeur moyenne totale 19,60 mm. Par

conséquent, le changement de la machine d'usinage n'a pas d'influence sur la relation effort/dimensions d'usinage. La dispersion des erreurs résiduelles est aléatoire (Figure 3.23.b).

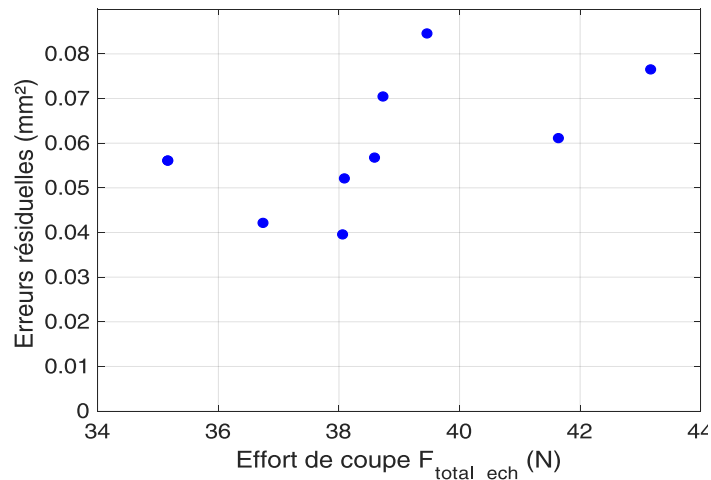


Figure 3.23.b: Dispersion des erreurs résiduelles

En comparant avec la campagne menée par la défonceuse, le coefficient R^2 a diminué pour atteindre $R^2_{robot_rigide}=0,87$. Par conséquent le modèle est moins robuste. Ceci est dû à la dispersion et variation des efforts de coupe avec une qualité dimensionnelle plus faible par rapport à leurs moyennes. La pente du modèle linéaire indique que la tendance de fluctuation de l'interaction effort/qualité dimensionnelle est lente et ne diffère pas à celle obtenue avec la défonceuse numérique.

- **Analyses fréquentielles :**

En constatant la diminution des efforts de coupe en usinant le MDF qui passent de 67,6 N avec la défonceuse à 38,5 N avec le robot en configuration rigide, nous décidons de déterminer les différents spectres fréquentiels des signaux d'effort obtenus (Figures 3.24.a.b.c).

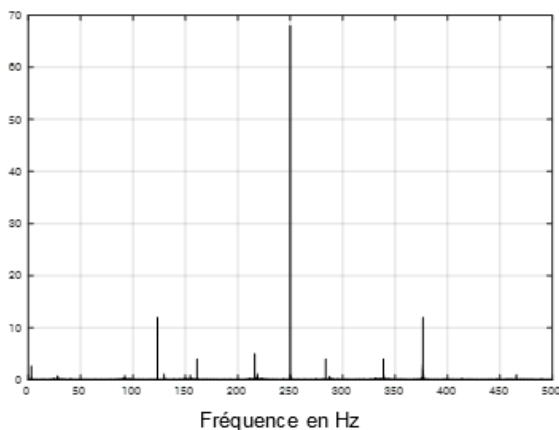


Figure 3.24.a : FFT des efforts de coupe du MDF : Usinage CNC

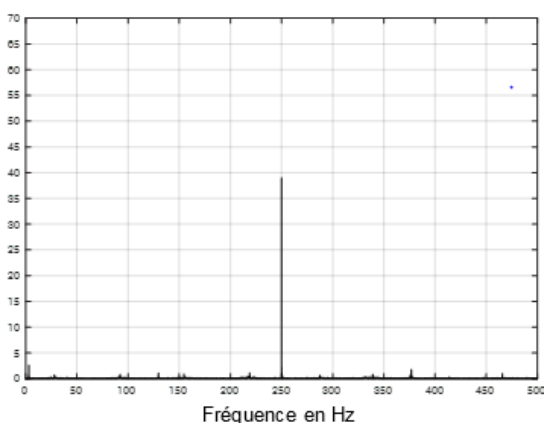


Figure 3.24.b : FFT des efforts de coupe du MDF : Robot rigide

MDF / Robot : configuration flexible avec pièce bridée

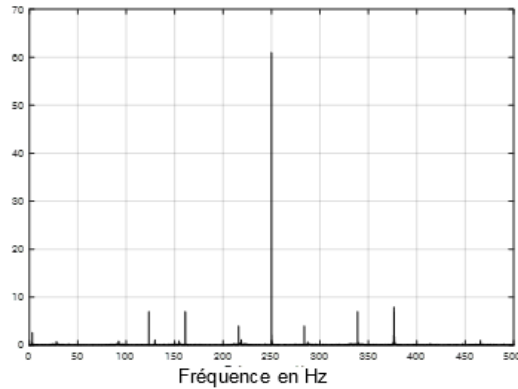


Figure 3.24.c : FFT des efforts de coupe du
MDF : Robot flexible

L'analyse spectrale montre la présence des fréquences harmoniques dans les spectres d'usinage avec la défonceuse et le robot en configuration flexible. Ces harmoniques sont absentes dans le spectre d'usinage robotisé en configuration rigide. Ce constat nous permet de déduire qu'il existe une perte d'énergie en changeant la machine et que le robot en configuration rigide encaisse et absorbe les vibrations d'usinage.

3.2.2.2 Campagne 1.2 « Configuration flexible avec pièce bridée » :

Dans cette section nous visons à investiguer davantage l'effet de la faible rigidité du robot. En se basant sur la cartographie de rigidité, nous avons cherché les points de l'espace de travail où le robot présente une rigidité minimale. Ces zones correspondent aux ensembles de points situés aux limites de l'espace de travail (Paragraphe 2.2.2.1). Pour cela, dans cette campagne, nous plaçons l'outil à une distance de 2,6m de la base du robot comme expliqué dans le paragraphe 2.7.3.2.

- **Caractérisation des efforts de coupe :**

Les efforts de coupe tangentiels et radiaux ainsi que l'effort résultant appliqué sur chaque pièce sont illustrés dans le Tableau 3.7. La Figure 3.25 présente l'évolution des mesures avec la défonceuse et le robot dans les deux configurations.

Tableau 3.7: Effort de coupe suivant X et Y campagne 1.2

	$F_{x_moy}(N)$	$F_{y_moy}(N)$	F_{total_ech}
Echantillon 1	34,57	55,5	65,39
Echantillon 2	32,87	48,09	58,25
Echantillon 3	34,9	51,79	62,45
Echantillon 4	41,62	47,61	63,24
Echantillon 5	34,08	49,68	60,25
Echantillon 6	39,12	51,48	64,66
Echantillon 7	37,46	48,62	61,38
Echantillon 8	32,45	42,56	53,52
Echantillon 9	39,12	49,68	63,23
Echantillon 10	32,45	42,46	53,44
Ecart type : σ	3,25	3,99	4,27

MDF / Robot : configuration flexible avec pièce bridée

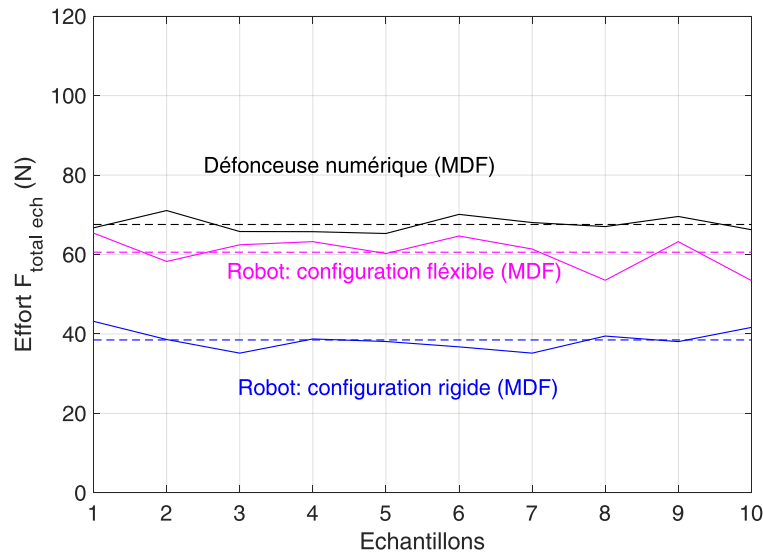


Figure 3.25: Efforts de coupe moyens appliqués par la défonceuse et le robot en configuration rigide et flexible

En configuration flexible, nous mesurons des efforts de coupe supérieurs à ceux en position rigide et inférieurs à ceux de la défonceuse numérique. Par conséquent en changeant la configuration de la machine, la sollicitation des échantillons pour enlever la matière s'est intensifiée. Les écarts types, présentés dans le Tableau 3.8, montrent l'amplification des fluctuations et dispersions des forces appliquées par rapport à celles des campagnes précédentes.

Tableau 3.8: Ecart types des efforts de coupe

	$\bar{\sigma}_{Fx_moy}$	$\bar{\sigma}_{Fy_moy}$	$\bar{\sigma}_{Ftotal_ech}$
Usinage avec la défonceuse	1,31	1,87	2,04
Usinage avec le robot en configuration rigide	2,52	2,92	2,54
Usinage avec le robot en configuration flexible	3,25	3,99	4,27

Ces résultats mettent en évidence l'effet de la configuration machine. En usinant dans l'espace de travail où la rigidité du robot est minimale, le système devient incapable de résister face aux phénomènes de vibrations d'usinage.

- **Caractérisation de la qualité dimensionnelle :**

En termes d'effort de coupe, la diminution de la rigidité du robot a engendré une augmentation des fluctuations des mesures. Nous cherchons dans cette partie l'influence de ces variations sur l'aspect dimensionnel de l'usinage. Le même protocole expérimental est suivi. Les résultats sont illustrés dans le Tableau 3.9. La Figure 3.26 présente une comparaison entre les dimensions d'usinage obtenues avec la défonceuse et le robot dans ces deux configurations.

Tableau 3.9: Mesure des dimensions d'usinage (L_i)

	Ech1	Ech2	Ech3	Ech4	Ech5	Ech6	Ech7	Ech8	Ech9	Ech10
L_{i1}	19,8	19,6	19,3	19,8	19,3	19,3	19,1	19,1	19,8	19,3
L_{i2}	19,6	19	19,4	19,1	19,3	19,9	19,5	19,6	19,1	19,5
L_{i3}	19,4	19,4	19,7	19,4	19,1	19,3	19,6	19,8	19,5	19
L_{i4}	19,4	19,6	19,2	19,8	19,1	19,9	19,1	19,1	19,9	19,3
L_{i5}	19,5	19,2	19,3	19,2	19,8	19,2	19,2	19,3	19,2	19,4
L_{i6}	19,3	19,4	19,4	19,5	19,6	19,4	19,8	19,1	19,3	19
Moyenne (L_{imoy})	19,5	19,37	19,38	19,47	19,37	19,5	19,38	19,33	19,47	19,25
Ecart type : $\hat{\sigma}$	0,18	0,23	0,17	0,29	0,28	0,32	0,29	0,3	0,33	0,21
Moyenne totale de L_{imoy}	19,40									

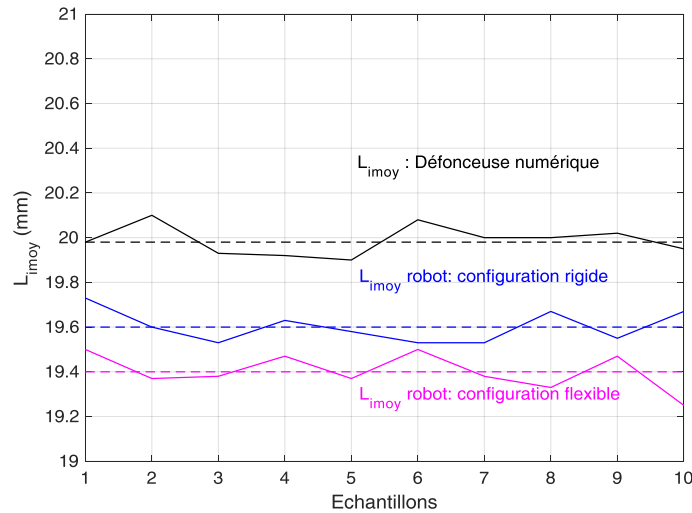


Figure 3.26: Evolution de L_{imoy} avec le robot en configuration flexible et rigide et la défonceuse numérique

Malgré l'utilisation de la même commande du robot (même programme et même dimensions), la dégradation de la qualité dimensionnelle s'accroît en configuration flexible (Figure 3.26). A partir de ce constat, nous pouvons déduire que plus le bras du robot est tendu, plus l'emplacement de l'outil dans l'espace de travail est imprécis. Autrement dit, plus l'organe terminal du robot est loin de la base, moins les dimensions d'usinage sont respectées. L'amplification des fluctuations des efforts de coupe lors du changement de la configuration du robot a abouti à une qualité dimensionnelle médiocre par rapport à celle de la configuration rigide et la défonceuse numérique:

- Le nombre de variations ascendantes et descendantes de part et d'autre de la valeur moyenne de la campagne a augmenté ;
- Les écarts type de L_{imoy} (Tableau 3.9) révèlent une dispersion de mesure importante, supérieure à celle de l'usinage en configuration rigide et également à celle de la défonceuse.

- **Interaction entre effort de coupe et dimensions d'usinage:**

La régression linéaire et le coefficient de détermination sont toujours utilisés pour étudier la tendance d'évolution de l'interaction efforts/ dimensions d'usinage.

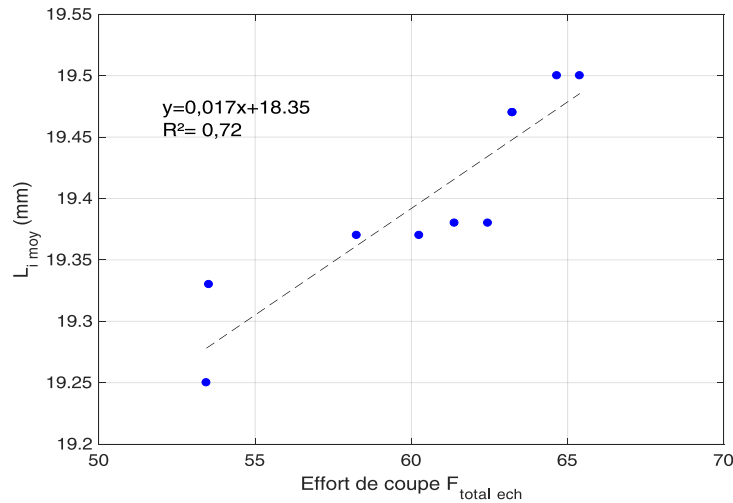


Figure 3.27: Interaction entre les efforts de coupe et la dimensions d'usinage: configuration flexible

Dans l'usinage en configuration flexible comme dans les campagnes précédentes, la dégradation de la qualité dimensionnelle évolue encore d'une manière proportionnelle directe aux efforts de coupe. Le coefficient de détermination continue sa décroissance $R^2_{CNC}=0,97 > R^2_{robot\ rigide}=0,82 > R^2_{robot\ flexible}=0,72$. La dispersion des erreurs résiduelles est toujours aléatoire.

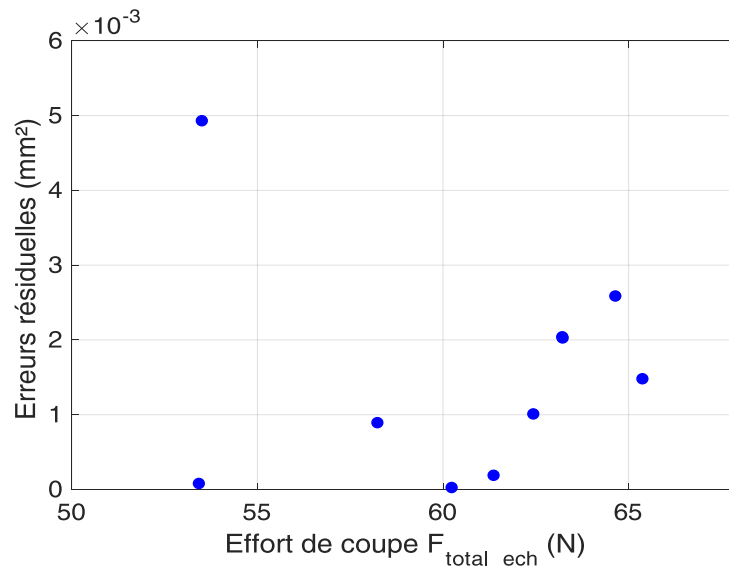


Figure 3.28 : Dispersion des erreurs résiduelles

Le modèle linéaire perd de plus en plus sa robustesse et sa capacité de prédire l'évolution du phénomène. Ceci est due aux augmentations des fluctuations au niveaux des mesures requises. Par conséquent, La pente du modèle linéaire révèle que la configuration du robot n'a pas

MDF / Robot : configuration rigide avec pièce portée /efforts tangentiels, radiaux et normaux

d'influence sur la tendance de variation de la relation efforts / qualité dimensionnelle puisque elle est faible dans les deux cas.

- **Synthèse de la campagne :**

Cette campagne nous permet de retirer les conclusions suivantes :

- En configuration flexible, les efforts tangentiels et radiaux dépassent largement ceux de la configuration rigide ;
- Le robot, malgré son équilibre, n'arrive pas à compenser sa faible rigidité en position tendue et l'inertie de ses différents composants ce qui engendre une dispersion importante des efforts de coupe et une dégradation de la qualité dimensionnelle (Tableau 3.10). Par conséquent l'usinage est moins répétable en production série ;

Tableau 3.10: Comparaison des écart-types de l'usinage avec la défonceuse et le robot(flexible et rigide)

	Usinage Robot (flexible)	>>	Usinage Robot (rigide)	>>	Usinage défonceuse
$\sigma (F_{total_ech})$	4,27	>>	2,54	>>	2,04
$\sigma (Limoy)$ (moyenne)	0,26	>>	0,056	>>	0,040

- Le remplacement de la défonceuse par le robot ou le changement de la configuration de la machine n'a pas d'influence sur l'interaction effort/ qualité dimensionnelle .

3.2.2.3 Campagne 2.1 « Configuration rigide avec pièce portée » :

L'objectif de cette campagne est de caractériser les efforts de coupe et la qualité dimensionnelle en changeant la technique de préhension de l'échantillon. Pour cela le capteur @Kistler et la pièce à usiner sont montés sur l'organe terminal du robot et positionnés à 1,3m de la base du robot comme montré dans la Figure 2.44. Les conditions de coupe sont toujours les mêmes (Tableau 2.11)

- **Efforts de coupe tangentiels et radiaux :**

Les échantillons MDF sont calibrés et rainurés suivant l'axe Y. L'outil à une dent (référence Leucodur HL05) est utilisé. Les signaux acquis sont traités à travers une fonction développée sur Matlab qui permet de soustraire les mesures à vide de la platine comme expliqué dans le paragraphe 2.9. Le Tableau 3.11 illustre les mesures des paramètres des efforts de coupe F_{x_moy} , F_{y_moy} ainsi la force moyenne totale exercée sur chaque échantillon F_{total_ech} .

Tableau 3.11: Effort de coupe tangentiels et radiaux

	$F_x_moy(N)$	$F_y_moy(N)$	F_{total_ech}
Echantillon 1	51,27	55	68,76
Echantillon 2	53,94	58,34	73,04
Echantillon 3	50,37	56,07	69,09
Echantillon 4	52,03	57,22	71,00
Echantillon 5	52,82	60,52	74,14
Echantillon 6	54,14	63,23	77,11
Echantillon 7	49,75	58,53	70,75
Echantillon 8	57,22	64,22	79,71
Echantillon 9	52,89	57,06	71,38
Echantillon 10	49,22	64,22	75,25
Moyenne	52,71	58,91	72,77

En comparant avec les résultats de la campagne 1.1 (configuration rigide avec pièce bridée) les efforts ont eu une hausse élevée et inattendue alors que nous avons usiné du MDF (même matériau) avec les mêmes conditions de coupe. Les efforts radiaux et tangentiels dépassent les mesures obtenues avec la défonceuse numérique.

- **Efforts de coupe normaux :**

Les efforts normaux suivant l'axe Z observés sont très élevés contrairement aux campagnes précédentes (Tableau 3.12).

Tableau 3.12: Effort de coupe normaux de la défonceuse et le robot dans les deux configurations

	$F_Z(CNC)$	$F_Z(rigide / bridée)$	$F_Z(rigide / portée)$
Echantillon 1	14,67	16,23	43,58
Echantillon 2	14,71	8,74	41,48
Echantillon 3	10,28	14,83	37,42
Echantillon 4	13,01	12,92	36,27
Echantillon 5	10,1	11,31	40,45
Echantillon 6	10,5	11,89	39,83
Echantillon 7	12	10,36	34,94
Echantillon 8	15	7,61	34,88
Echantillon 9	13,45	10,52	41,93
Echantillon 10	12,74	7,61	34,88
Moyenne	12,64	11,60	38,98

Cette évolution révèle qu'en configuration rigide/pièce portée, le bras du robot est sollicité par des contraintes verticales très élevées issues de la broche fixée au sol. Ceci engendre des vibrations au niveau de l'ensemble capteur / échantillon / effecteur. Ces vibrations sont peu amorties par notre robot.

Des résultats similaires sont obtenus avec la campagne 2.2 (configuration flexible avec pièce portée) avec des efforts de coupe tangentiels, radiaux et normaux beaucoup plus élevés que ceux obtenus avec la configuration rigide (Tableau 3.13) (Figure 3.28).

Tableau 3.13: Effort de coupe du robot en configuration flexible/ pièce portée

	$F_x_moy(N)$	$F_y_moy(N)$	$F_z_moy(N)$	F_{total_ech}
Echantillon 1	54,57	85,5	50,28	113,21
Echantillon 2	52,87	78,09	50,53	106,99
Echantillon 3	54,9	81,79	51	110,93
Echantillon 4	61,62	77,61	41,41	107,40
Echantillon 5	54,08	79,68	49,78	108,40
Echantillon 6	59,12	81,48	48,65	111,81
Echantillon 7	57,46	78,62	52,94	110,84
Echantillon 8	52,45	72,56	51,3	103,19
Echantillon 9	59,12	79,68	42,39	107,89
Echantillon 10	52,45	72,46	51,3	103,11
Moyenne	56,24	79,45	48,70	108,84

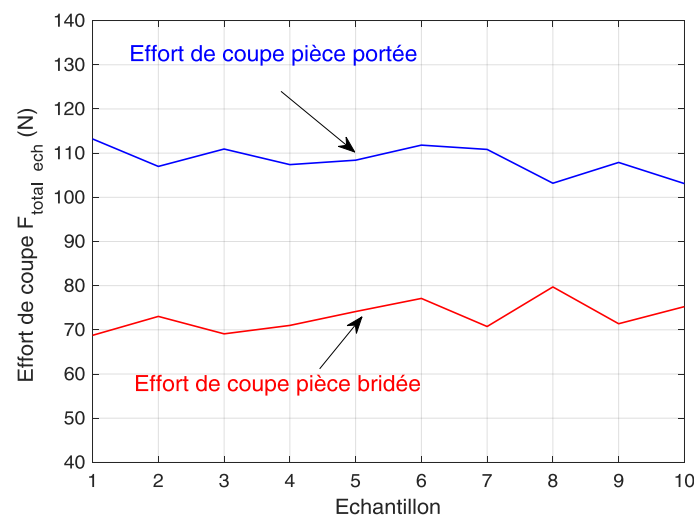


Figure 3.28 : Evolution des efforts de coupe en pièce bridée et portée

Ces résultats montrent que les mesures obtenues restent biaisées par des facteurs et des phénomènes aléatoires incontrôlables tels que :

- L'inertie du capteur d'effort + composants du robot.
- Les vibrations des équipements à proximité.

Par conséquent, cette campagne ne nous permet pas de caractériser les efforts de coupe et la qualité dimensionnelle en pièce portée. Dans la suite, nous étudierons uniquement l'usinage en pièce bridée.

3.3 Caractérisation des procédés d'usinage du feuillus (hêtre) :

Dans cette campagne nous souhaitons déterminer l'effet du bois massif sur l'usinage robotisé. Notre choix est orienté vers l'utilisation du hêtre pour des raisons expliquées dans le paragraphe 1.5.2.2. Le protocole expérimental reste toujours le même et l'usinage robotisé dans ces deux configurations est comparé avec une campagne référence réalisée avec la défonceuse. Dans

MDF / Robot : configuration rigide avec pièce portée /efforts tangentiels, radiaux et normaux

cette section le rainurage est effectué suivant le sens du fil du bois (suivant l'axe Y de l'échantillon en mode 90°-0°).

3.3.1 Usinage du hêtre avec la défonceuse numérique (campagne référence pour l'usinage du hêtre) :

3.3.1.1 Caractérisation des efforts de coupe :

Comme nous avons procédé avec l'usinage du MDF, les efforts tangentiels et radiaux sont mesurés pour chaque échantillon. Une inspection visuelle de l'état de surface de l'arête coupante est réalisée avant le lancement de la campagne. Aucune usure n'a été trouvée. Les conditions de coupe sont les mêmes (pour mémoire : Vitesse d'avance=1000 mm/min, Rotation de la broche 15000 tr/min, Prise de passe=14mm, Avance par dent=0,066 mm/dent).

Le Tableau 3.14 illustre les mesures des efforts obtenues. La Figure 3.29 présente l'évolution de la force totale résultante.

Tableau 3.14: Efforts de coupe tangentiels et radiaux (Usinage hêtre)

	$F_x_moy(N)$	$F_y_moy(N)$	F_{total_ech}
Echantillon 1	45,95	54,60	71,36
Echantillon 2	49,24	54,72	73,61
Echantillon 3	46,97	55,41	72,64
Echantillon 4	45,79	53,01	70,05
Echantillon 5	44,15	50,20	66,85
Echantillon 6	45,58	55,12	71,52
Echantillon 7	46,03	53,42	70,52
Echantillon 8	44,34	55,52	71,05
Echantillon 9	49,08	54,52	73,36
Echantillon 10	48,97	55,77	74,22
Moyenne	46,61	54,23	71,51
Ecart type :σ	1,81	1,67	2,47

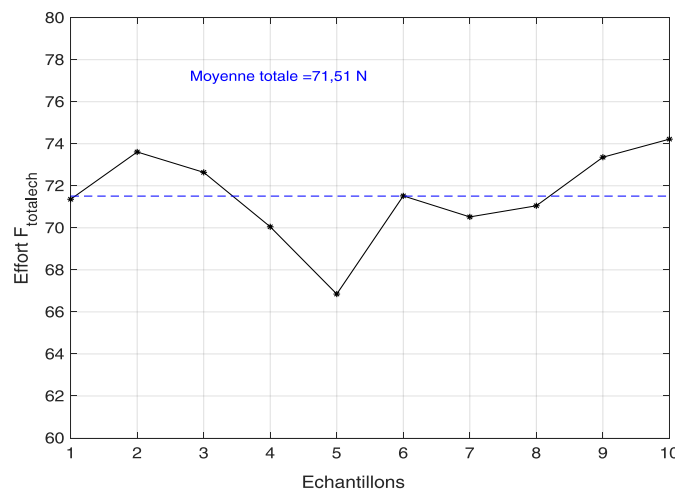


Figure 3.29: Evolution des efforts résultants

En comparant avec l'usinage du MDF (Tableau 3.1) (page 95), nous constatons une légère augmentation de +2N et +4N respectivement aux niveaux des efforts tangentiels et radiaux. Les

écart-types restent relativement faibles par rapport à ceux des campagnes précédentes. Par conséquent, le changement du MDF par le hêtre, qui est plus hétérogène et plus dense, n'influence pas la stabilité et la répétabilité de la défonceuse en termes d'effort de coupe.

3.3.1.2 Caractérisation de la qualité dimensionnelle :

Nous cherchons dans cette partie comment les dimensions d'usinage évolue et si le matériau étudié a un effet sur l'aspect dimensionnel. Les mesures de L_i sont illustrées dans le Tableau 3.15. La Figure 3.30 présente l'évolution du paramètre L_{i_moy} durant la campagne expérimentale.

Tableau 3.15: Mesure des dimensions d'usinage (L_i)

	Ech1	Ech2	Ech3	Ech4	Ech5	Ech6	Ech7	Ech8	Ech9	Ech10
L_{i1}	21	21,1	21	21,1	20,9	21,1	20,9	21	21	21,1
L_{i2}	20,9	21	21	21	20,9	20,9	21	21	21	21
L_{i3}	20,9	21	21	20,9	20,9	20,9	20,9	21	21	21
L_{i4}	20,9	21	21	20,9	20,9	21,1	21	20,9	21	21
L_{i5}	21	21	21	20,9	21	20,9	21	20,9	21	21
L_{i6}	21,1	21	21	21	21,1	21	21	21	21,1	21
Moyenne (L_{i_moy})	20,97	21,02	21	20,97	20,95	20,98	20,97	20,97	21,02	21,02
Ecart type : σ	0,08	0,04	0	0,08	0,08	0,1	0,05	0,05	0,04	0,04
Moyenne totale de L_{i_moy}	20,99									

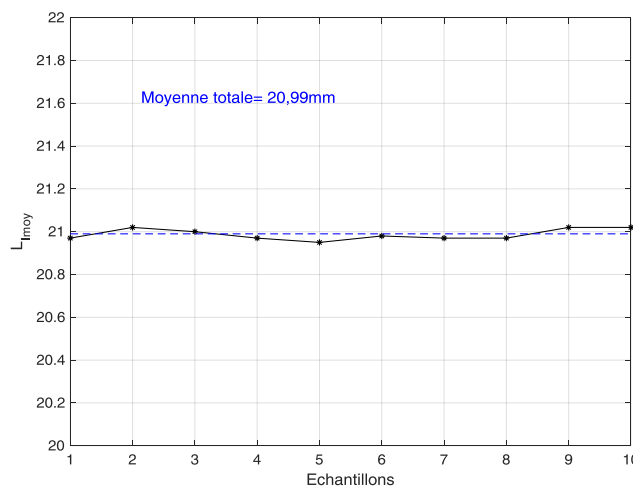


Figure 3.30: Evolution de L_{i_moy}

La Figure 3.30 montre que la variation maximale par rapport à la moyenne est détectée au niveau de l'échantillon 5 et elle ne dépasse pas 0,04mm. La mesure des dimensions est stable. L'augmentation des efforts de coupe par rapport à l'usinage du MDF n'a pas d'impact sur le parcours de l'outil. Ceci explique la robustesse de la défonceuse à encaisser les vibrations du système même en usinant du feuillus.

Les écart-types démontrent une faible dispersion des efforts de coupe, ce qui nous conduit à déduire que l'usinage de bois massif n'a pas d'effet sur la répétabilité de la défonceuse numérique en terme de forces appliquées pour enlever la matière.

3.3.1.3 Interaction entre effort de coupe et dimensions d'usinage :

Les mêmes outils mathématiques sont utilisés pour caractériser l'interaction efforts/qualité dimensionnelle et sa tendance d'évolution pendant l'usinage du hêtre avec la défonceuse (Figure 3.31).

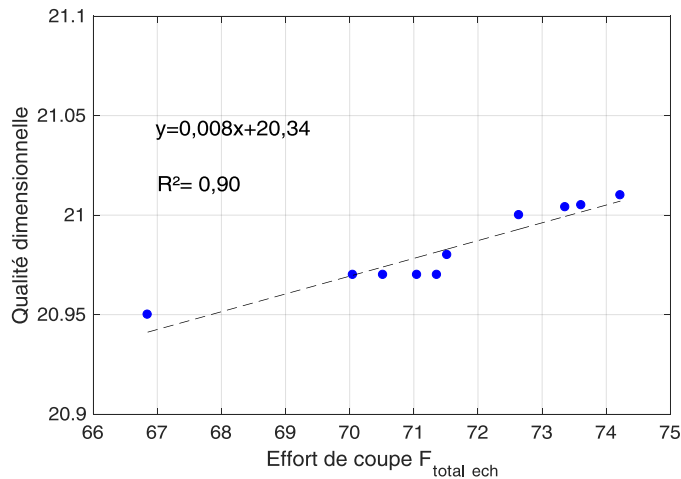


Figure 3.31: Interaction entre les efforts de coupe et les dimensions d'usinage (hêtre)

Le changement du matériau n'a pas modifié l'évolution de l'interaction efforts/qualité dimensionnelle. Plus les forces appliquées pour enlever la matière augmentent plus les déviations de la trajectoire d'outil s'accroissent. La dispersion des erreurs résiduelles est toujours aléatoire (Figure 3.32).

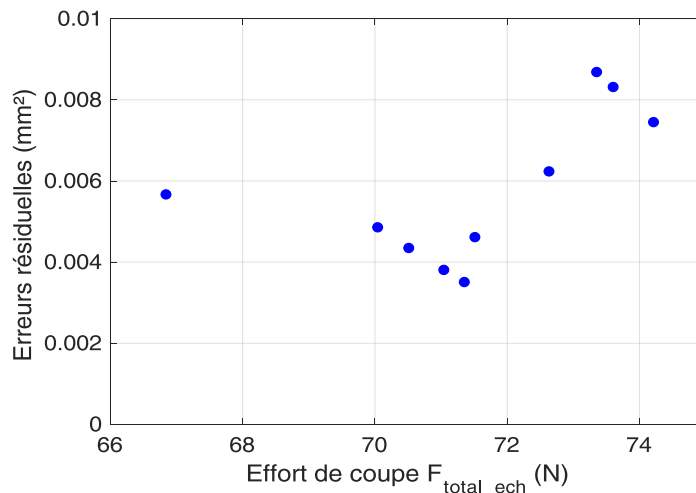


Figure 3.32: Dispersion des erreurs résiduelles

$R^2_{hêtre}=0,90 < R^2_{MDF}=0,97$ la robustesse du modèle linéaire a diminué. Cependant, le coefficient de détermination montre une faible dispersion des mesures et prouve que le changement du matériau n'a pas d'impact sur la stabilité et la répétabilité de la défonceuse en terme d'effort de coupe et qualité dimensionnelle. La pente du modèle indique que la tendance de variation du phénomène est plus lente que celle avec l'MDF.

3.3.1.4 Synthèse de la campagne :

Cette campagne expérimentale nous permet de déterminer le comportement des efforts de coupe et la qualité dimensionnelle d'usinage du hêtre avec la défonceuse numérique dans des conditions de coupe industrielles. Les conclusions que nous pouvons tirer sont :

- En usinant le hêtre, la différence entre les efforts tangentiels et radiaux est moins importante que celle avec l'MDF ;
- Avec le Hêtre comme avec l'MDF la dégradation de la qualité dimensionnelle évolue toujours suivant une relation proportionnelle directe en fonction des efforts de coupe.

3.3.2 Usinage du hêtre avec le robot anthropomorphe :

3.3.2.1 Campagne 1.1 « configuration rigide avec pièce bridée »

- **Caractérisation des efforts de coupe**

La même procédure de mesure expliquée précédemment est suivie. Le Tableau 3.16 illustre les mesures des efforts tangentiels et radiaux et également leurs moyennes.

Tableau 3.16: Efforts de coupe tangentiels et radiaux

	$F_{x_moy}(N)$	$F_{y_moy}(N)$	F_{total_ech}
Echantillon 1	33,47	45,05	56,12
Echantillon 2	39,05	45,49	59,95
Echantillon 3	33,87	42,56	54,39
Echantillon 4	38,74	43,49	58,24
Echantillon 5	34,08	47,83	58,73
Echantillon 6	34,76	46,42	57,99
Echantillon 7	34,76	45,49	57,25
Echantillon 8	34,58	54,93	64,91
Echantillon 9	34,08	44,52	56,07
Echantillon 10	38,9	47,09	61,08
Moyenne	35,63	46,29	58,41
Ecart type :σ	2,10	3,62	4,18

En comparant avec l'usinage du hêtre par la défonceuse numérique, nous constatons une large différence aux niveaux des efforts de coupe appliqués :

$$F_{moyenne_robot} = 58,41 < F_{moyenne_CNC} = 71,51$$

Les fluctuations des mesures s'amplifient comme les montre la Figure 3.33

Hêtre / Robot : configuration rigide avec pièce bridée

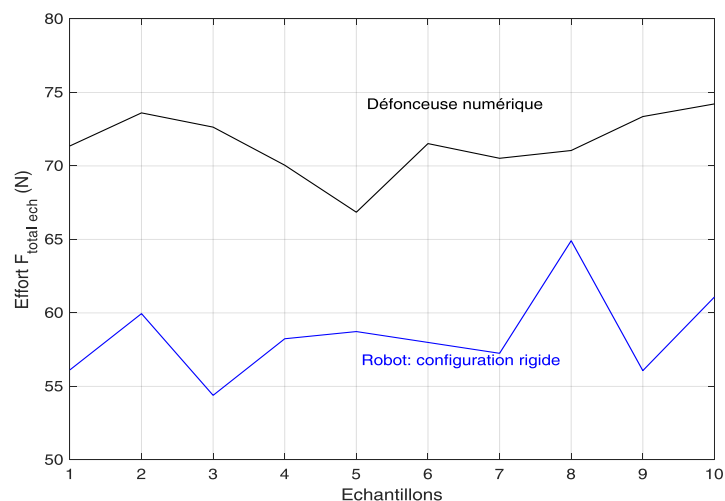


Figure 3.33: Efforts de coupe moyens appliqués par la défonceuse et le robot sur hêtre (configuration rigide)

En comparant maintenant avec l'usinage du MDF en configuration rigide (Figure 3.34), l'effet de changement du matériau se manifeste au niveau de l'énorme écart entre les forces appliquées par le robot pour usiner du hêtre et celles pour l'MDF.

$$F_{moyenne_MDF} = 38,49N \ll F_{moyenne_hêtre} = 58,41N$$

Cette hausse est accompagnée par des efforts plus dispersifs ce qui a diminué la répétabilité du robot en termes d'effort de coupe Tableau 3.17.

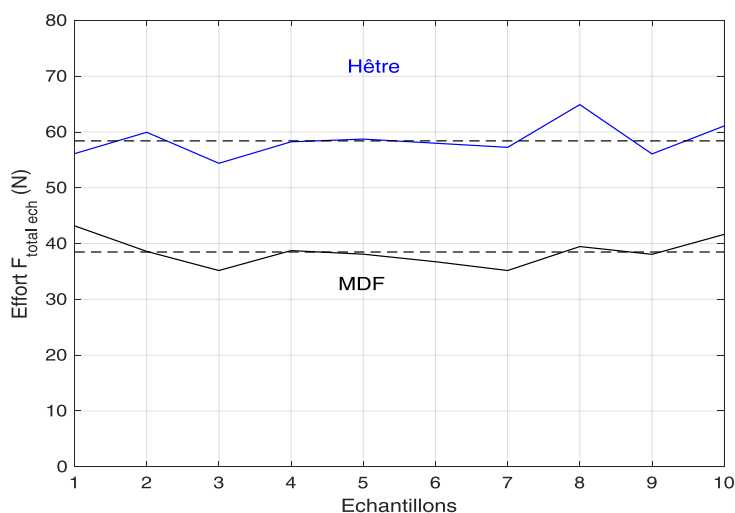


Figure 3.34: Evolution des efforts de coupe de l'usinage du hêtre et MDF en configuration rigide

Tableau 3.17: Ecart-types des efforts de coupe usinage du hêtre

	$\hat{\sigma}_{Fx_moy}$	$\hat{\sigma}_{Fy_moy}$	$\hat{\sigma}_{Ftotal_ech}$
Usinage avec la défonceuse	1,81	1,67	2,47
Usinage config rigide	2,10	3,62	4,18

• **Caractérisation de la qualité dimensionnelle :**

Le changement du MDF par le hêtre a montré que le robot applique plus de forces pour enlever la matière ce qui a accentué la fluctuation des efforts de coupe. L'objectif dans cette section est de déterminer l'effet de ce comportement sur la qualité dimensionnelle d'usinage. Les mesures de L_i sont illustrées dans Tableau 3.18. La Figure 3.35 compare l'évolution de L_i du hêtre usiné avec la défonceuse et le robot en configuration rigide.

Tableau 3.18: Mesure des dimensions d'usinage (L_i)

	Ech1	Ech2	Ech3	Ech4	Ech5	Ech6	Ech7	Ech8	Ech9	Ech10
L_{i1}	21,2	21,3	21,2	21,3	21,2	21,3	21,3	21,3	21,2	21,4
L_{i2}	21,4	21,4	21,2	21,3	21,3	21,3	21,2	21,3	21,1	21,4
L_{i3}	21,2	21,4	21,2	21,3	21,3	21,3	21,2	21,4	21,1	21,5
L_{i4}	21,1	21,5	21,1	21,3	21,3	21,3	21,2	21,7	21,2	21,5
L_{i5}	21,1	21,4	21,1	21,3	21,4	21,3	21,2	21,9	21,2	21,6
L_{i6}	20,9	21,2	20,9	21,3	21,4	21,2	21,2	22,1	21,0	21,5
Moyenne ($L_{i moy}$)	21,15	21,37	21,12	21,30	21,32	21,28	21,22	21,60	21,13	21,48
Ecart type : σ	0,15	0,10	0,12	0,00	0,08	0,04	0,05	0,34	0,08	0,08
Moyenne totale de $L_{i moy}$	21,30									

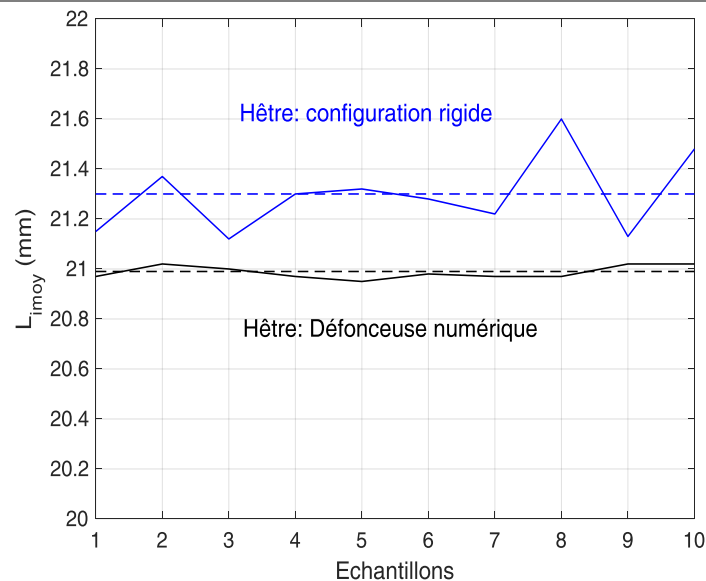


Figure 3.35: Evolution de la $L_{i moy}$ d'usinage avec la défonceuse et le robot en configuration rigide (usinage hêtre)

Les valeurs de la $L_{i moy}$ d'usinage robotisé sont supérieures à celles obtenues avec la défonceuse malgré que le rainurage est réalisé avec les mêmes dimensions. Ceci est dû également à l'imprécision de déplacement du robot et les irrégularités au niveau du plan de référence créé. En usinant le hêtre avec le robot en configuration rigide, les dimensions évoluent d'une manière différente par rapport à celle de la défonceuse. Ils subissent plus de variations ascendantes et

Hêtre / Robot : configuration rigide avec pièce bridée

descendantes par rapport à la valeur moyenne de la campagne malgré la diminution des efforts de coupe. Le même comportement est trouvé avec l'usinage du MDF en configuration rigide qui est à l'origine de la flexibilité des articulations du robot.

L'effet matériau (densité et hétérogénéité plus élevées) se manifeste au niveau des amplitudes des fluctuations qui ont augmenté avec le hêtre pour atteindre une valeur maximale de 0,3mm par rapport à la moyenne (Figure 3.36).

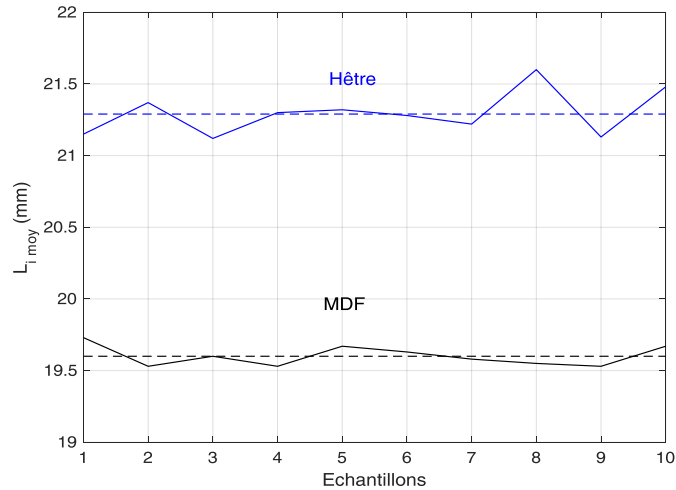


Figure 3.36: Effet matériau en usinage robotisé (configuration rigide)

- **Interaction entre effort de coupe et qualité dimensionnelle :**

En usinage robotisé ou avec la défonceuse, l'interaction efforts / qualité dimensionnelle du hêtre évolue suivant une relation proportionnelle directe (Figure 3.37). La dispersion des erreurs résiduelles est aléatoire (Figure 3.38).

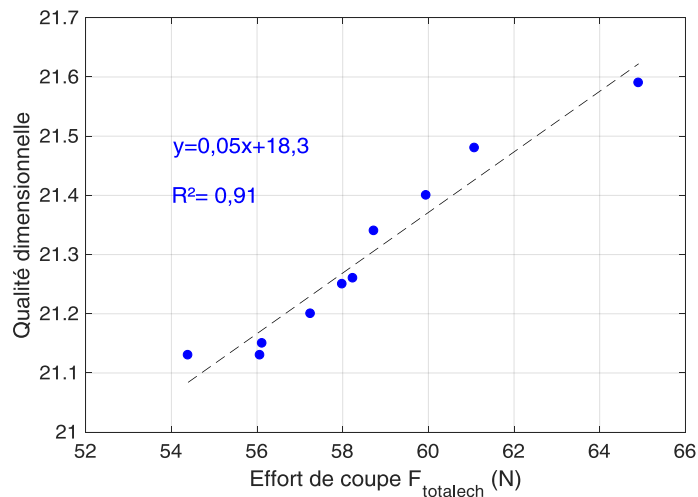


Figure 3.37: Interaction entre effort de coupe et les dimensions d'usinage (hêtre)

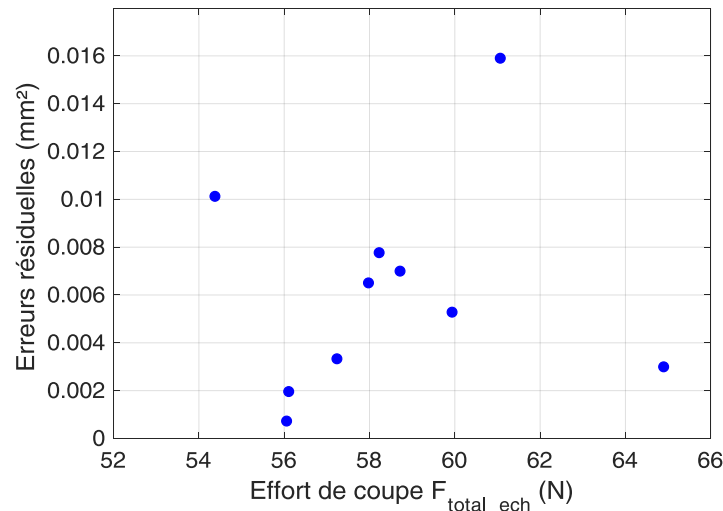


Figure 3.38: Dispersion des erreurs résiduelles

En comparant avec l'usinage de la défonceuse $R^2_{robot(hêtre)}=0,91 < R^2_{CNC(hêtre)}=0,94$. Malgré la diminution des efforts de coupe, la dispersion des mesures autour du modèle a augmenté ce qui a affaibli sa robustesse. Certes, en comparant avec l'interaction effort/ qualité dimensionnelle du MDF le modèle linéaire est plus puissant en prédiction de l'évolution du phénomène.

La pente du modèle linéaire a augmenté ce qui révèle que la tendance de l'interaction effort/qualité dimensionnelle d'usinage est plus rapide que celle du MDF pour une même variation en distance. .

- **Synthèse de la campagne :**

Cette campagne expérimentale nous permet de déterminer l'effet machine et matériau sur la caractérisation des efforts de coupe et la qualité dimensionnelle . Les conclusions que nous pouvons tirer sont :

- En usinage par enlèvement de matière, les efforts tangentiels sont supérieurs aux efforts radiaux indépendamment de la machine utilisée ou le matériau à usiner ;
- En usinant du bois massif, l'utilisation du robot anthropomorphe accentue la fluctuation des efforts de coupe ce qui dégrade au fur et à mesure la qualité dimensionnelle ;
- L'hétérogénéité et la densité du hêtre accentuent les variations des efforts de coupe appliqués ;
- La relation entre les efforts de coupe et la dégradation de la qualité dimensionnelle évolue suivant une relation proportionnelle directe indépendamment de la machine utilisée et de le matériau à usiner.

3.3.2.2 Campagne 1.2 « configuration flexible avec pièce bridée »

Nous cherchons dans cette section l'effet de la configuration de la machine pendant l'usinage du bois massif en terme d'effort de coupe, qualité dimensionnelle et interaction entre eux.

- **Caractérisation des efforts de coupe :**

Le Tableau 3.19 illustre les mesures des efforts tangentiels, radiaux et totaux. La Figure 3.39 compare les efforts de coupe obtenus avec la défonceuse et le robot.

Tableau 3.19: Effort de coupe tangentiels et radiaux

	$F_x_moy(N)$	$F_y_moy(N)$	F_{total_ech}
Echantillon 1	57,1	83,36	101,04
Echantillon 2	49,77	75,27	90,24
Echantillon 3	41,4	86,16	95,59
Echantillon 4	51,19	89,09	102,75
Echantillon 5	56,89	83,29	100,86
Echantillon 6	45,2	80,53	92,35
Echantillon 7	48,35	87,62	100,07
Echantillon 8	45,3	73,34	86,20
Echantillon 9	48,83	90,18	102,55
Echantillon 10	55,78	84,01	100,84
Moyenne	49,98	83,29	97,13
Ecart type :σ	5,33	5,57	5,82

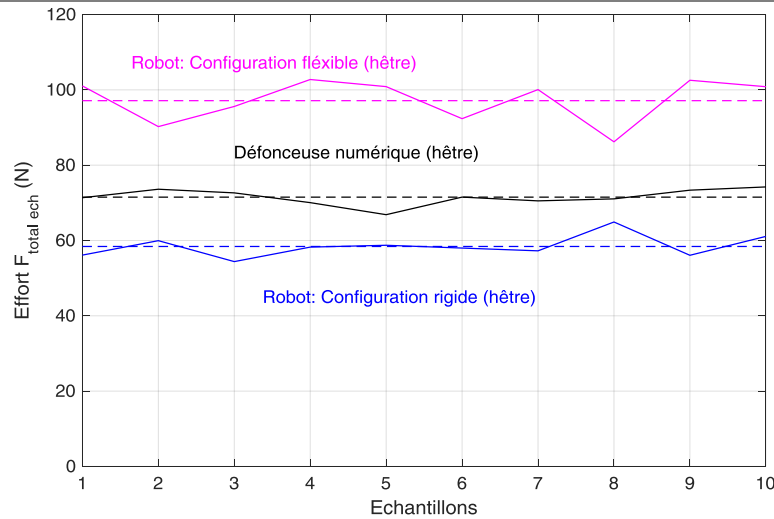


Figure 3.39: Efforts de coupe moyens appliqués par la défonceuse et le robot en configuration rigide et flexible

Le changement de la configuration du robot a engendré une hausse au niveau des efforts de coupe. Les mesures ont même dépassé celles obtenues avec la défonceuse (Figure 3.39).

$$F_{rigide} = 58,41 < F_{CNC} = 71,51N < F_{flexible} = 97,13N$$

Cette augmentation est accompagnée par une plus grande dispersion et fluctuation des efforts tangentiels et radiaux comme le montrent les écarts types présentés dans le Tableau 3.20.

Tableau 3.20: Ecart-Type des efforts de coupe du hêtre

	$\hat{\sigma}_{Fx_moy}$	$\hat{\sigma}_{Fy_moy}$	$\hat{\sigma}_{Ftotal_ech}$
Usinage avec la défonceuse	1,81	1,67	2,47
Usinage avec le robot en configuration rigide	2,10	3,62	4,18
Usinage avec le robot en configuration flexible	5,33	5,57	5,82

L'effet matériau se manifeste au niveau de l'augmentation des efforts de coupe, bien évidemment, à cause de la densité élevée du hêtre et également son hétérogénéité (Figure 3.40):

$$F_{MDF} = 60,58N < F_{hêtre} = 97,13N$$

De plus, le remplacement du MDF par le hêtre en configuration flexible a augmenté le nombre de variation ascendantes et descendantes et a amplifié ses amplitudes (Figure 3.40). Par conséquent l'usinage est moins répétable en termes d'efforts de coupe.

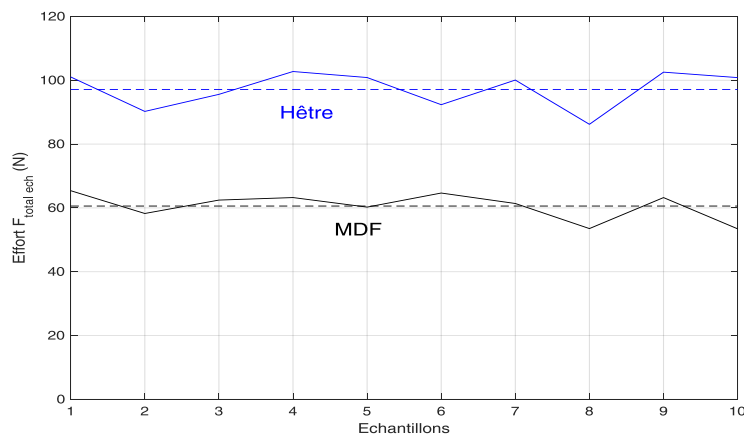


Figure 3.40: Evolution des efforts de coupe du MDF et hêtre en configuration flexible

• **Caractérisation de la qualité dimensionnelle :**

Cherchons maintenant l'effet de changement de la configuration du robot sur la qualité dimensionnelle d'usinage. Les mesures de L_i sont illustrées dans le Tableau 3.21. La Figure 3.41 présente l'évolution de $L_{i\ moy}$ de l'usinage du hêtre avec le robot (en configuration flexible et rigide) et la défonceuse.

Tableau 3.21: Mesure des dimensions d'usinage (L_i)

	Ech1	Ech2	Ech3	Ech4	Ech5	Ech6	Ech7	Ech8	Ech9	Ech10
L_{i1}	21,2	21,2	20,9	21,4	21,2	21,1	21,3	20,8	21,30	21,3
L_{i2}	21,1	21,3	20,8	21,3	21,5	20,9	21,6	20,7	21,10	21,5
L_{i3}	21,0	21,4	21,2	21,3	21,1	21,1	21,5	20,9	21,00	21,2
L_{i4}	21,1	21,5	20,9	21,2	21,3	21	21,5	21,0	21,00	21,4
L_{i5}	21,0	21,1	21	21,5	21,3	20,8	21,6	21,0	21,10	21,3
L_{i6}	21,1	21,3	21	21,3	21,4	21	21,5	20,9	21,10	21,1
Moyenne ($L_{i\ moy}$)	21,09	21,30	20,97	21,33	21,30	20,98	21,50	20,88	21,10	21,30
Ecart type : $\hat{\sigma}$	0,08	0,14	0,14	0,10	0,14	0,12	0,11	0,12	0,11	0,14
Moyenne totale de $L_{i\ moy}$	21.17									

Hêtre / Robot : configuration flexible avec pièce bridée

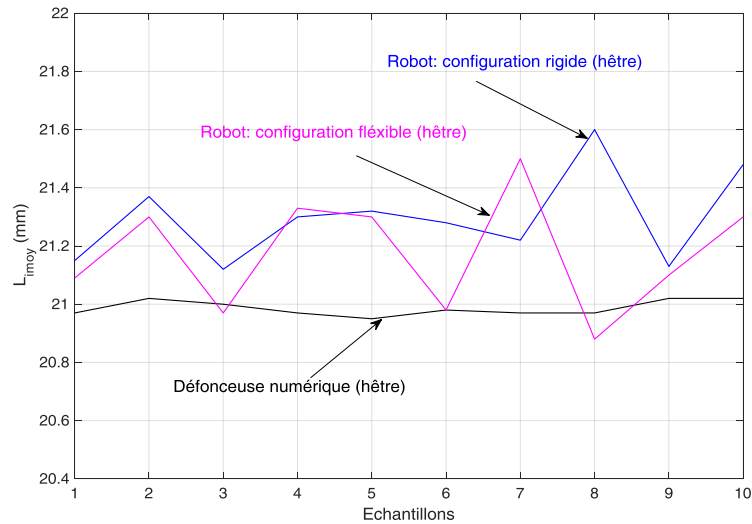


Figure 3.41: Evolution de la $L_{i moy}$ du hêtre en usinage robotisé et avec la défonceuse

En étudiant l'effet machine sur l'usinage du hêtre, la Figure 3.41 montre qu'en changeant la défonceuse par un robot anthropomorphe, la qualité dimensionnelle subit une énorme dégradation à cause de la faible rigidité. Ceci s'accroît avec le changement de la configuration du robot. Les fluctuations deviennent plus nombreuses et plus importantes en amplitude.

L'effet matériau en configuration flexible (Figure 3.42) ne diffère pas de celui trouvé en configuration rigide. Plus l'hétérogénéité et la densité sont élevées plus la qualité dimensionnelle varie.

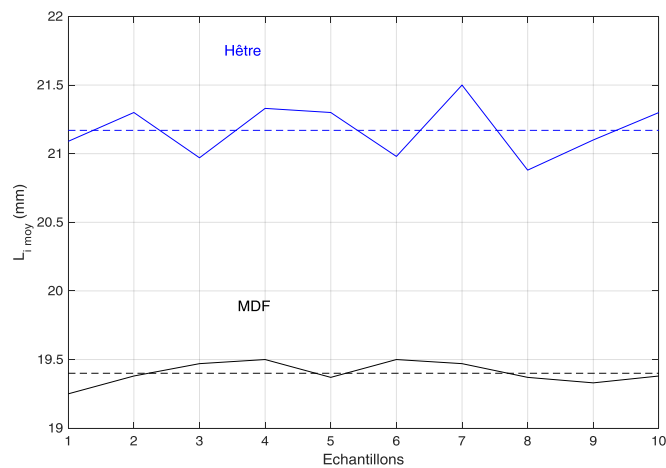


Figure 3.42: Effet matériau en usinage robotisé (configuration flexible)

- **Interaction entre effort de coupe et dimensions d'usinage :**

En usinage robotisé, l'effet de la configuration machine et du matériau n'influe pas sur l'interaction entre les efforts de coupe et la qualité dimensionnelle (Figure 3.43.a). La dispersion des erreurs résiduelles est toujours aléatoire (Figure 3.43.b)

Hêtre / Robot : configuration flexible avec pièce bridée

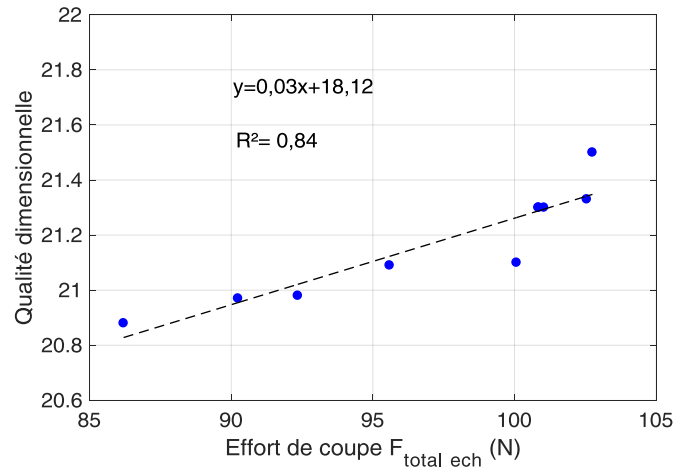


Figure 3.43.a: Interaction entre effort de coupe et les dimensions d'usinage

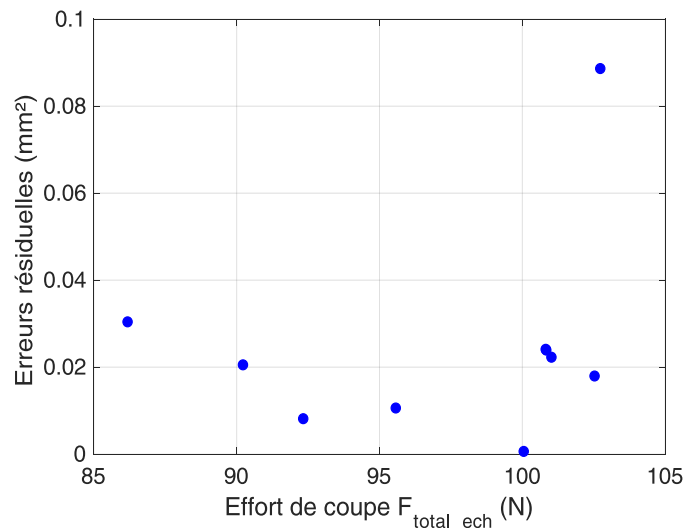


Figure 3.43.b: Dispersion des erreurs résiduelles

En comparant avec les campagnes précédentes (paragraphe 3.3.1 et 3.2.1), le coefficient de détermination diminue : $R^2_{robot_flexible(hêtre)}=0,84 < R^2_{robot_rigide(hêtre)}=0,90 < R^2_{CNC(hêtre)}=0,94$ ce qui signifie qu'en changeant la configuration du robot, le modèle devient moins robuste. Ceci est dû à l'augmentation du nombre de fluctuations (variations ascendantes et descendantes) ainsi leurs amplitudes. Le même comportement est trouvé avec le MDF.

La pente du modèle linéaire indique que la tendance de variation du phénomène est moins rapide que celle de la configuration rigide et plus rapide que celle du MDF.

- **Analyses fréquentielles :**

En constatant la diminution des efforts de coupe en usinant le Hêtre qui passent de 71,5 N avec la défonceuse à 58,4 N avec le robot en configuration rigide, nous décidons de déterminer les transformées de Fourier des signaux comme nous avons procédé avec le MDF (paragraphe 3.2.2.1) (Figures 3.44.a.b.c).

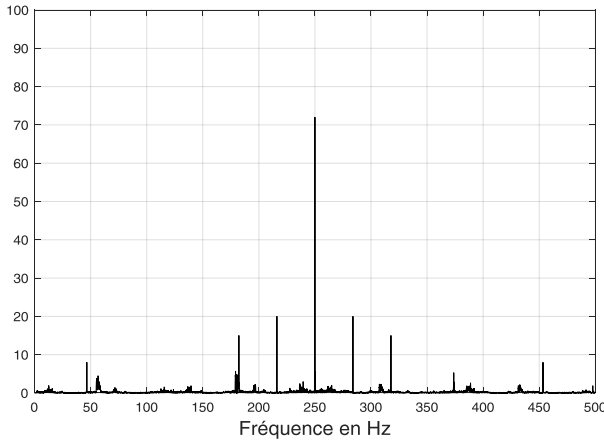


Figure 3.44.a : FFT des efforts de coupe du Hêtre : Usinage CNC

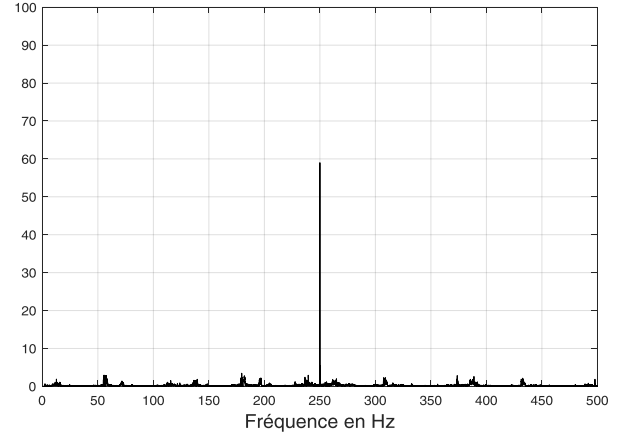


Figure 3.44.b : FFT des efforts de coupe du Hêtre : Robot rigide

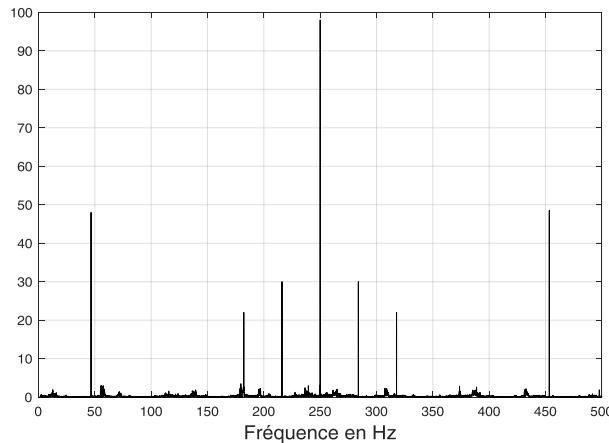


Figure 3.44.c : FFT des efforts de coupe du Hêtre : Robot flexible

Le même phénomène observé avec l'usinage du MDF se reproduit. L'analyse spectrale montre la présence des fréquences harmoniques dans les spectres d'usinage avec la défonceuse et le robot en configuration flexible. Ces harmoniques sont absentes dans le spectre d'usinage robotisé en configuration rigide. Ce constat nous permet de déduire qu'il existe une perte d'énergie en changeant la machine et que le robot en configuration rigide encaisse et absorbe les vibrations d'usinage.

- **Synthèse de la campagne :**

Dans cette campagne, nous mesurons des fluctuations supérieures à celles de la défonceuse. Ceci est dû aux vibrations que subit le système d'usinage. Ces vibrations ont pour origine :

- L'effet inertiel du bras du robot qui affaiblit la rigidité du système malgré l'intervention automatique du compensateur de gravité ;
- Une densité et une hétérogénéité du hêtre plus élevées que celles du MDF, qui induisent des forces de réaction du matériau (opposées aux efforts de coupe) plus importantes. Par conséquent le système vibre davantage et perturbe le parcours d'outil ;
- Indépendamment du matériau usiné, de la machine utilisée et sa configuration, la dégradation de la qualité dimensionnelle s'accroît lorsque les efforts de coupe augmentent.

3.4 Effet du mode de coupe:

L'usinage du hêtre dans les campagnes précédentes est réalisé en mode 90° - 0 . Dans cette section, nous caractérisons les efforts de coupe et la qualité dimensionnelle en usinage robotisé en mode 90° - 90° (perpendiculaire au sens du fil) (Figure 3.45). Le même protocole expérimental est utilisé. Le robot usine en configuration rigide pour diminuer l'effet des phénomènes de vibrations. Avant de lancer la campagne une inspection sur l'état de surface de l'arête coupante est effectuée afin de vérifier qu'il n'y ait pas d'ébréchures sur l'arête.

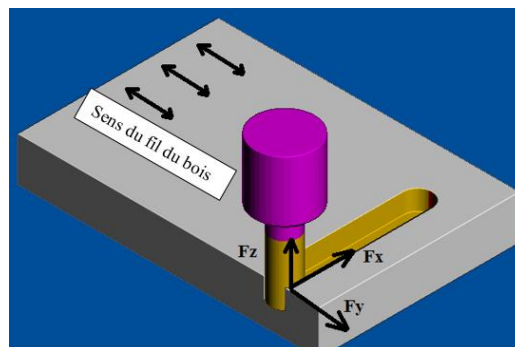


Figure 3.45: Effort de coupe (F_x F_y F_z)
rainure suivant X (mode 90° - 90°)

3.4.1 Caractérisation des efforts de coupe :

Le Tableau 3.22 illustre les efforts de coupe tangentiels et radiaux durant l'usinage 90° - 90° en configuration rigide. La Figure 3.46 compare l'évolution des efforts de coupe moyens en usinage perpendiculaire et parallèle aux fibres du bois.

Tableau 3.22: Effort de coupe tangentiels et radiaux (Mode 90°-90°)

	$F_x_moy(N)$	$F_y_moy(N)$	F_{total_ech}
Echantillon 1	384,23	298	486,25
Echantillon 2	388,96	288	483,98
Echantillon 3	383,27	298,44	485,76
Echantillon 4	389,51	283,85	481,96
Echantillon 5	387,10	283,4	479,75
Echantillon 6	388,41	289,09	484,19
Echantillon 7	390,00	288	484,81
Echantillon 8	386,13	287,7	481,53
Echantillon 9	382,62	287,84	478,80
Echantillon 10	385,46	287,05	480,60
Moyenne	386,57	289,14	482,76
Ecart type :σ	2,65	5,13	2,63

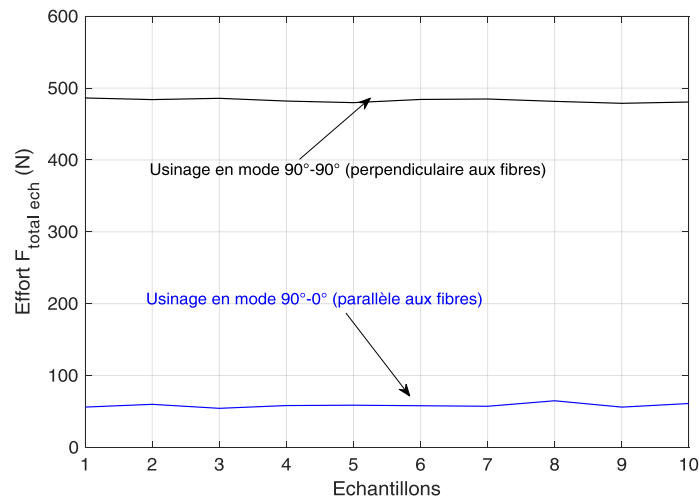


Figure 3.46: Effort de coupe en usinage parallèle et perpendiculaire aux fibres du bois

Sachant que les efforts tangentiels en mode 90°-0° se transforment en efforts radiaux en mode 90°-90°, les mesures révèlent une hausse importante (facteur 8) en usinage perpendiculaire aux fil du bois (Tableau 3.23). Les forces totales appliquées se sont multipliées aussi par 8.

Tableau 3.23: Efforts tangentiels, radiaux et totaux en mode 90°-0° et 90°-90°

	Mode 90°-0°	Mode 90°-90°	Rapport
Moyenne efforts tangentiels	46,29	386,57	386,57/46,25=8,35
Moyenne efforts radiaux	35,63	289,14	289,14/35,63=8,11
Moyenne F_{total_ech}	58,41	482,76	482,76/58,41=8,26

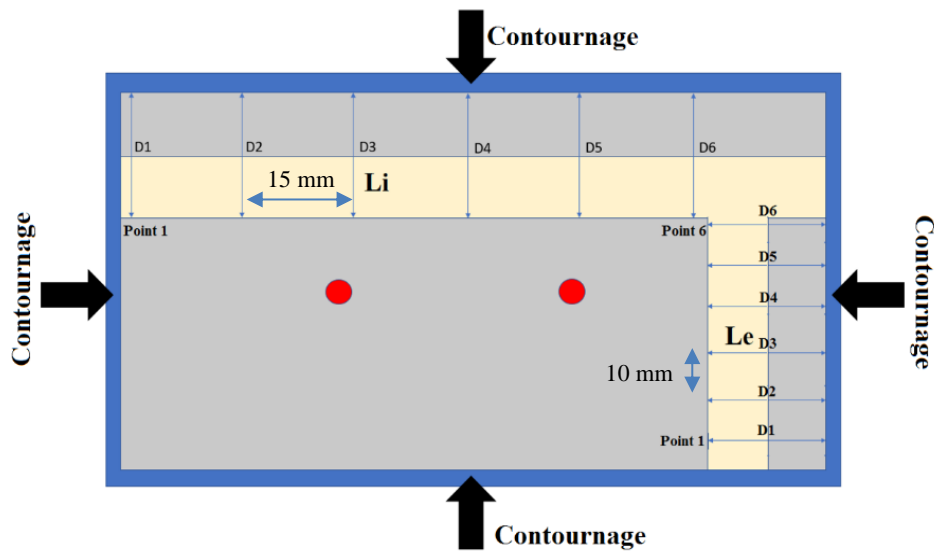
Cette hausse est accompagnée par une augmentation des écart-types Tableau 3.24. L'usinage en mode 90°-90° a accentué les efforts tangentiels et radiaux ainsi leurs dispersions, ce qui a diminué la répétabilité du robot en termes d'efforts de coupe.

Tableau 3.24: Ecart-types des efforts de coupe

	$\bar{\sigma}_{Fx_moy}$	$\bar{\sigma}_{Fy_moy}$
Mode 90°-0° (parallèle aux fibres)	2,10	3,62
Mode 90°-90° (perpendiculaire)	2,65	5,13

3.4.2 Caractérisation de la qualité dimensionnelle :

Pour caractériser l'usinage robotisé en mode 90°-90°, le même protocole expérimental est utilisé pour mesurer le paramètre L_e : Avant chaque expérience, la pièce est calibrée avec un contournage extérieur réalisé par le robot dans les mêmes conditions de coupe de rainurage. Le prélèvement des mesures est réalisé sur 6 points équidistants de 15 mm pour L_i et 10 mm pour L_e (Figure 3.47). Les résultats obtenus sont illustrés dans le Tableau 3.25 et la Figure 3.48.

Figure 3.47: Paramètre de mesure de (L_e)Tableau 3.25: Mesure de la (L_e)

	Ech1	Ech2	Ech3	Ech4	Ech5	Ech6	Ech7	Ech8	Ech9	Ech10
L_{e1}	20,8	20,2	20,2	19,9	19,9	20,2	20,3	19,7	19,3	19,9
L_{e2}	20,5	20	20,2	19,8	19,9	20,4	20,1	19,9	19,4	19,9
L_{e3}	20,5	19,9	20,3	20	19,8	20,1	20,2	20	19,3	19,9
L_{e4}	20,4	19,8	20,2	19,9	19,7	19,9	20,5	19,9	19,3	19,6
L_{e5}	20,7	20,1	20,4	19,7	19,4	20,4	20,2	19,6	19,1	19,4
L_{e6}	20,8	20	20,6	20,1	19,6	20,3	20,5	19,4	19,5	19,8
Moyenne L_{emoy}	20,62	20,00	20,32	19,90	19,72	20,22	20,30	19,75	19,32	19,75
Ecart type : $\bar{\sigma}$	0,17	0,14	0,16	0,14	0,19	0,19	0,17	0,23	0,13	0,21
Moyenne totale de L_{emoy}						19,99				

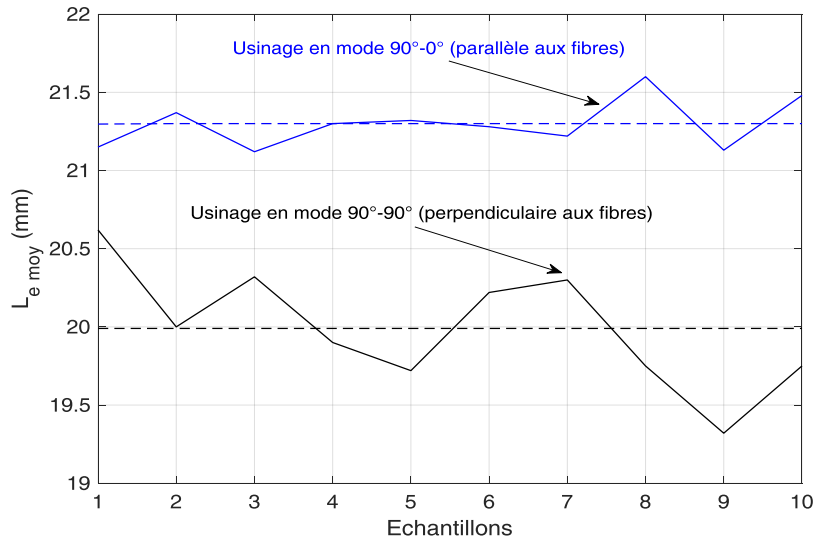


Figure 3.48: Evolution de $L_{e moy}$ en usinage mode 90° - 90° et 90° - 0°

En mode de coupe 90° - 90° , l'évolution de la qualité dimensionnelle durant la campagne subit des fluctuations plus élevées que celles en mode 90° - 0° . Cette dégradation se manifeste au niveau du nombre de variations ascendantes et descendantes ainsi que de leurs amplitudes qui augmentent pour atteindre une valeur maximale 0,67 mm par rapport à la moyenne de la campagne.

3.4.3 Interaction entre effort de coupe et dimensions d'usinage:

Les campagnes précédentes ont démontré que l'interaction entre les efforts de coupe et la qualité dimensionnelle évolue suivant une relation proportionnelle directe indépendamment de la machine, sa configuration et le matériau usiné. Cette partie s'intéresse à l'effet de mode de coupe.

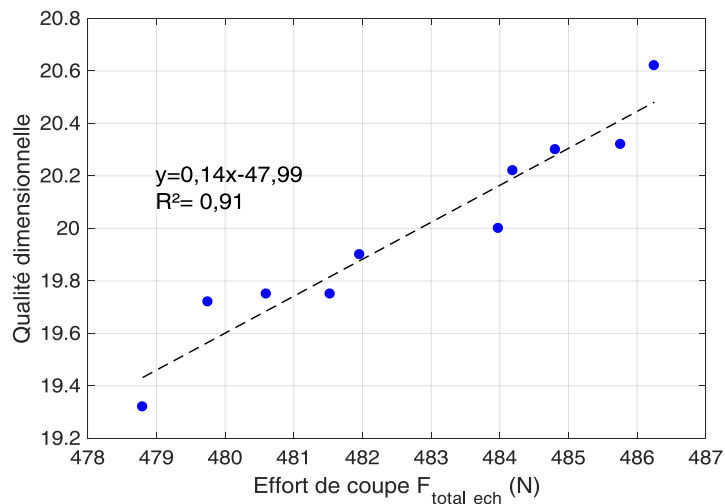


Figure 3.49: Interaction entre effort de coupe et $L_{i moy}$ en mode de coupe 90° - 90°

La Figure 3.49 montre que les efforts de coupe et les dimensions d'usinage évoluent de la même façon trouvée avec la coupe 90°-0°. La dispersion des erreurs résiduelles est toujours aléatoire (Figure 3.50).

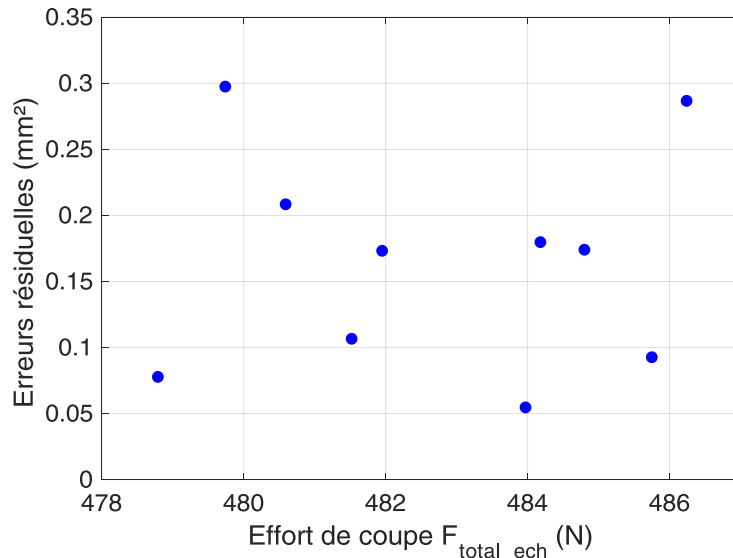


Figure 3.50: Dispersion des erreurs résiduelles

En comparant avec la campagne d'usinage en mode 90°-0°, le coefficient de détermination reste le même, $R^2_{90^\circ-90^\circ} = 0,91 = R^2_{90^\circ-0^\circ} = 0,91$, malgré la hausse des efforts de coupe et leurs fluctuations. Par conséquent, en configuration rigide, le modèle linéaire est robuste quel que soit le mode de coupe.

La pente du modèle linéaire indique que la tendance de variation du phénomène est largement plus rapide que celle obtenue en mode 90°-0°.

3.4.4 Synthèse de la campagne :

Cette campagne expérimentale nous permet de déterminer l'effet du mode de coupe en usinage robotisé en configuration rigide. Nous pouvons tirer les conclusions suivantes:

- Pour enlever la matière perpendiculairement aux sens des fibres du bois, le robot est obligé de multiplier par 8 fois les efforts tangentiels et radiaux ;
- En termes d'effort de coupe total (F_{total_ech}) les mesures sont multipliées par 8. Cette opération engendre des fluctuations des contraintes mécaniques appliquées sur l'échantillon supérieures à celles trouvées en mode 90°-0°. Par conséquent la répétabilité du robot en terme des forces appliquées diminue et la qualité dimensionnelle est dégradée davantage ;
- Lorsque les efforts de coupe augmentent, la qualité dimensionnelle se dégrade davantage. La relation de proportionnalité directe se présente.

3.5 Caractérisation des procédés d'usinage du résineux: sapin sans nœuds (campagne référence pour l'usinage du sapin):

Dans cette campagne, nous visons à caractériser les efforts de coupe et la qualité dimensionnelle ainsi que l'interaction entre eux en usinant du bois résineux (sapin). Le protocole expérimental est toujours le même et l'usinage robotisé est comparé à celui de la défonceuse afin de déterminer l'effet machine. Une comparaison avec les campagnes d'usinage du hêtre et du MDF est réalisée pour caractériser l'effet matériau. Le mode de coupe étudié est 90° - 0° suivant le sens des fils du bois. Dans le chapitre suivant, nous déterminons l'effet des irrégularités des nœuds du sapin sur les efforts de coupe et la qualité dimensionnelle .

3.5.1 Usinage du sapin avec la défonceuse numérique :

3.5.1.1 Caractérisation des efforts de coupe :

Comme nous avons procédé avec l'usinage du MDF et du hêtre, les moyennes des efforts tangentiels et radiaux ainsi que les forces totales résultantes sont mesurés pour chaque échantillon. Le Tableau 3.26 illustre les mesures des efforts obtenus.

Tableau 3.26: Effort de coupe tangentiels et radiaux de CNC (Sapin)

	$F_x_moy(N)$	$F_y_moy(N)$	F_{total_ech}
Echantillon 1	43,55	53,55	69,02
Echantillon 2	45,56	54,56	71,08
Echantillon 3	45,23	52,23	69,09
Echantillon 4	45,12	52,14	68,95
Echantillon 5	43,99	56,99	71,99
Echantillon 6	44,45	52,45	68,75
Echantillon 7	45,18	53,37	69,93
Echantillon 8	40,47	52,45	66,25
Echantillon 9	42,19	51,19	66,34
Echantillon 10	40,47	51,23	65,29
Moyenne	43,62	53,02	68,65
Ecart type :6	1,93	1,74	2,15

Les efforts tangentiels dépassent les efforts radiaux de +10 N (soit 14,5% de la force totale). Le même comportement est trouvé pendant l'usinage du MDF. Ceci prouve la répétabilité de la défonceuse en termes d'effort de coupe.

En comparant cette campagne avec l'usinage du hêtre et du MDF avec la défonceuse (Figure 3.51), nous constatons l'effet du matériau sur l'évolution des efforts de coupe. Plus le matériau est dense et hétérogène plus les forces totales appliquées sont élevées [86]. Cependant, l'étude des efforts de coupe du sapin est difficilement comparable comme le note Eyma [46], parce que la réaction de cette essence avec l'outil de coupe est très variable.

La comparaison entre les forces tangentielles, radiales et totales (Tableau 3.27) montre une faible variation. Les fluctuations de mesures sont ainsi similaires et faibles (Tableau 3.28). Ceci est dû également à la rigidité élevée de la défonceuse et sa capacité à résister aux phénomènes des vibrations et à encaisser des efforts de coupe élevés sans perturber la trajectoire d'usinage.

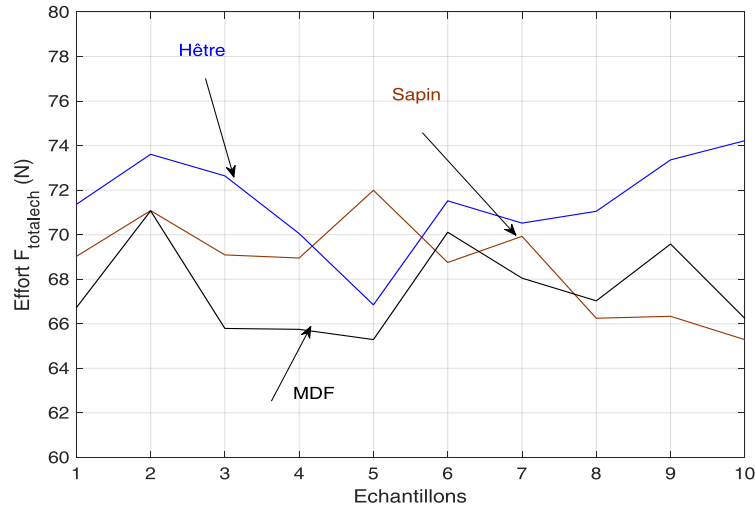


Figure 3.51: Evolution des efforts de coupe avec la CNC (sapin, hêtre, MDF)

Tableau 3.27: Moyennes des efforts tangentiels, radiaux et totaux avec CNC (hêtre, MDF, Sapin)

	$F_{x_moy}(N)$	$F_{y_moy}(N)$	F_{total_ech}
Usinage MDF (CNC)	42,32	52,54	67,56
Usinage hêtre (CNC)	46,61	54,23	71,51
Usinage sapin (CNC)	43,62	53,02	68,65

Tableau 3.28: Ecart-types des efforts tangentiels, radiaux et totaux avec CNC (sapin, hêtre, MDF)

	σ_{Fx_moy}	σ_{Fy_moy}	σ_{Ftotal_ech}
Usinage MDF (CNC)	1,31	1,87	2,04
Usinage hêtre (CNC)	1,81	1,67	2,47
Usinage sapin (CNC)	1,93	1,74	2,15

3.5.1.2 Caractérisation de la qualité dimensionnelle :

L'usinage du MDF, du hêtre et du sapin a montré que la défonceuse numérique exerce, dans les mêmes conditions de coupe, des efforts de coupe quasi-égaux. Nous cherchons dans cette partie comment la qualité dimensionnelle d'usinage du sapin évolue. Les mesures de L_i sont illustrées dans le Tableau 3.29. La Figure 3.52 présente l'évolution du paramètre L_{i_moy} durant la campagne.

Le décalage entre les mesures de la $L_{i\ moy}$ du hêtre et les autres matériaux, est dû à un effet matériau ayant une densité élevée ainsi qu'un effet calibrage de la pièce avec le robot.

Tableau 3.29: Mesure des dimensions d'usinage (L_i)

	Ech1	Ech2	Ech3	Ech4	Ech5	Ech6	Ech7	Ech8	Ech9	Ech10
L_{i1}	20	20,1	20	20	20,2	19,9	20,2	20	20	19,9
L_{i2}	20	20,2	20	20,1	20	20	20	20	20	20
L_{i3}	20,1	20	20	20,1	20	20,1	20	20,1	19,9	20,1
L_{i4}	20,1	20,1	20,1	20	20	20,1	20	19,9	20	20
L_{i5}	20	20	20,1	20	20	20	20	20	20,1	19,9
L_{i6}	20	20	20,1	19,9	20,1	20	20,1	20	20	20
Moyenne ($L_{i\ moy}$)	20,03	20,07	20,05	20,02	20,05	20,02	20,05	20,0	20,00	19,98
Écart type : σ	0,05	0,08	0,05	0,08	0,08	0,08	0,08	0,06	0,06	0,08
Moyenne totale de $L_{i\ moy}$	20,03									

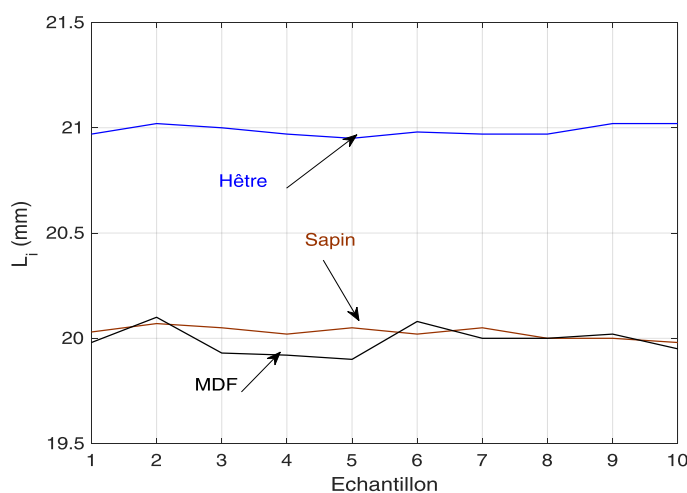


Figure 3.52: Evolution de $L_{i\ moy}$ du sapin

L'évolution des dimensions d'usinage du sapin ne diffère pas trop à celles trouvées avec le hêtre et l'MDF. En analysant les résultats obtenus, nous remarquons que le paramètre $L_{i\ moy}$ évolue d'une manière stable avec légères fluctuations, ascendantes et descendantes, qui atteint une valeur maximale de 0,05 mm par rapport à la moyenne de la campagne.

3.5.1.3 Interaction entre effort de coupe et dimensions d'usinage :

L'usinage du hêtre et du MDF avec la défonceuse a démontré que l'interaction entre les efforts de coupe et la dégradation de la qualité dimensionnelle évolue suivant une relation proportionnelle directe. Nous cherchons dans cette partie l'évolution de cette interaction pour le sapin.

Sapin / CNC

La Figure 3.53 montre que l'interaction effort / qualité dimensionnelle, en usinant du sapin, évolue aussi suivant une relation proportionnelle directe. La dispersion des erreurs résiduelles est toujours aléatoire (Figure 3.54).

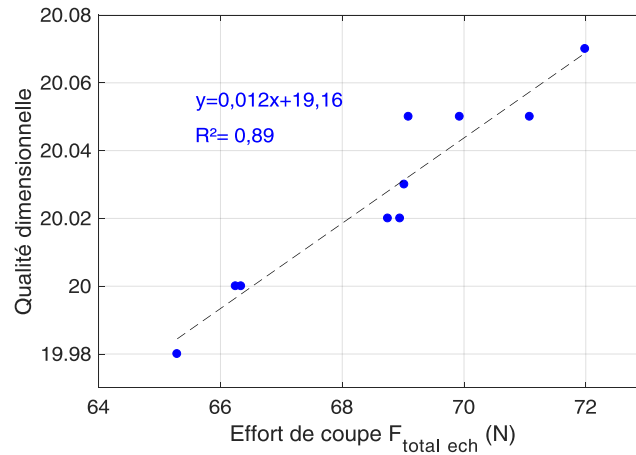


Figure 3.53: Interaction entre les efforts de coupe et dimensions d'usinage

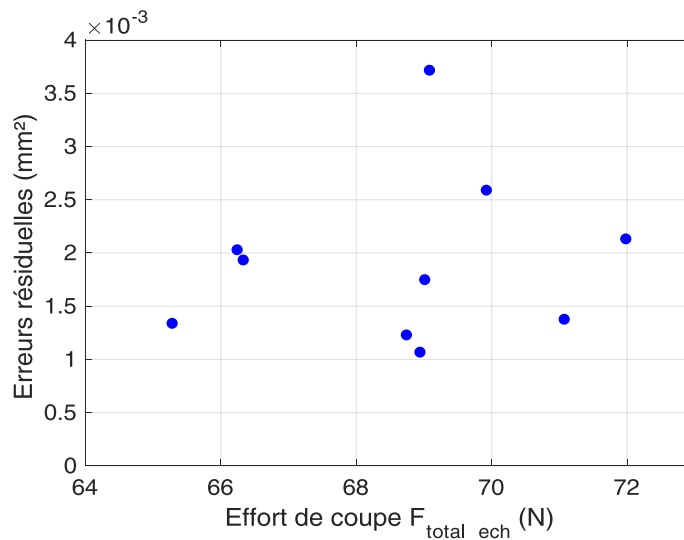


Figure 3.54: Dispersion des erreurs résiduelles

En comparant avec la campagne d'usinage du hêtre et MDF, le coefficient de détermination a légèrement diminué $R^2_{CNC(sapin)}=0,89 < R^2_{CNC(hêtre)}=0,90 < R^2_{CNC(MDF)}=0,97$. Malgré cette baisse la capacité du modèle à prédire l'évolution du phénomène reste élevée. Le coefficient de détermination montre une faible dispersion des mesures qui prouve que l'usinage du sapin n'a pas d'impact sur la stabilité et la répétabilité de la défonceuse en termes d'effort de coupe et qualité dimensionnelle.

La tendance de variation du phénomène est la même que celle trouvée avec le MDF (même pente du modèle).

3.5.1.4 Synthèse de la campagne :

Cette campagne expérimentale nous permet de caractériser le comportement des efforts de coupe et la qualité dimensionnelle d'usinage du sapin avec une défonceuse numérique dans des conditions de coupe industrielles. Nous déduisons que :

- L'usinage en série du feuillu, du résineux ou du MDF avec la défonceuse numérique se caractérise par une stabilité et répétabilité en termes d'effort de coupe et dimensions d'usinage. Malgré les différences entre les matériaux usinés, les contraintes mécaniques appliquées pour enlever la matière sont proches ;
- En utilisant la défonceuse numérique pour usiner du hêtre, du MDF ou du sapin, la qualité dimensionnelle se dégrade au fur et à mesure au augmentation des efforts.

3.5.2 Usinage du sapin avec le robot anthropomorphe:

3.5.2.1 Campagne 1.1 « configuration rigide avec pièce bridée »

- **Caractérisation des efforts de coupe :**

Dans cette partie nous cherchons l'effet de la machine sur l'usinage du sapin. Le Tableau 3.30 illustre les mesures des efforts tangentiels et radiaux ainsi que leurs moyennes.

Tableau 3.30: Effort de coupe tangentiels et radiaux

	$F_{x_moy}(N)$	$F_{y_moy}(N)$	F_{total_ech}
Echantillon 1	28,34	43,46	51,88
Echantillon 2	24	42,56	48,86
Echantillon 3	28,67	40,23	49,40
Echantillon 4	29,79	40,14	49,99
Echantillon 5	27,48	47,89	55,21
Echantillon 6	25,3	40,45	47,71
Echantillon 7	27,22	41,37	49,52
Echantillon 8	21,72	47,29	52,04
Echantillon 9	27,34	39,19	47,78
Echantillon 10	30,45	39,23	49,66
Moyenne	27,03	42,18	50,21
Ecart type :6	2,68	3,16	2,28

Quel que soit le matériau usiné, hêtre, sapin ou MDF, et quel que soit la machine d'usinage le robot ou la défonceuse numérique, les efforts tangentiels appliqués sont toujours supérieurs aux efforts radiaux.

En comparant avec la campagne menée par la défonceuse numérique, en usinant avec le robot les efforts de coupe obtenus sont inférieurs, (Figure 3.55) et l'augmentation remarquable des fluctuations de mesures (Tableau 3.31). Ceci démontre que l'usinage robotisé du sapin, comme celui du hêtre et du MDF, est moins rigide et moins répétable en termes d'efforts de coupe.

Sapin / Robot : configuration rigide avec pièce bridée

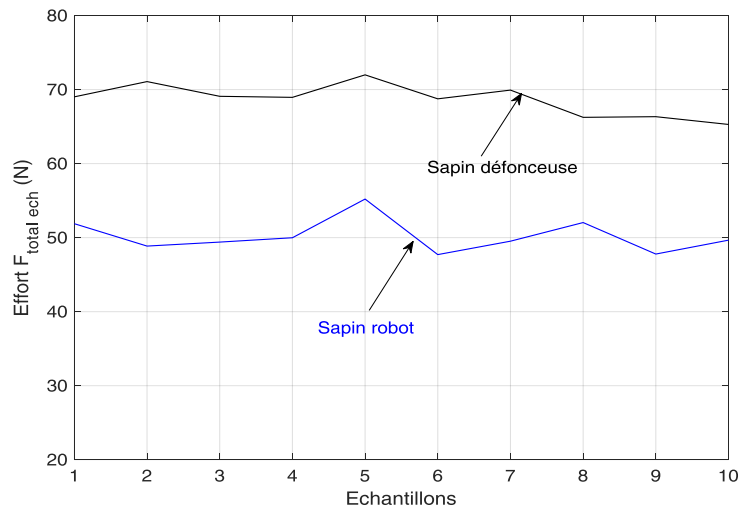


Figure 3.55: Efforts de coupe moyens appliqués sur le sapin par la défonceuse et le robot (configuration rigide)

Tableau 3.31: Ecart-types des efforts de coupe (usinage Sapin)

	$\hat{\sigma}_{F_x_{moy}}$	$\hat{\sigma}_{F_y_{moy}}$	$\hat{\sigma}_{F_{total_{ech}}}$
Usinage avec la défonceuse	1,93	1,74	2,15
Usinage config. rigide (sapin)	2,68	3,16	2,28

En comparant maintenant avec l'usinage du MDF et du hêtre en configuration rigide (paragraphe 3.2.1.1 et 3.3.2.1) les amplitudes des efforts de coupe moyens du sapin sont inférieures à celles du hêtre et supérieures à celles du MDF (Figure 3.56). Ceci prouve qu'en usinage robotisé les forces appliquées et leurs fluctuations sont proportionnelles à la densité et l'hétérogénéité du matériau usiné.

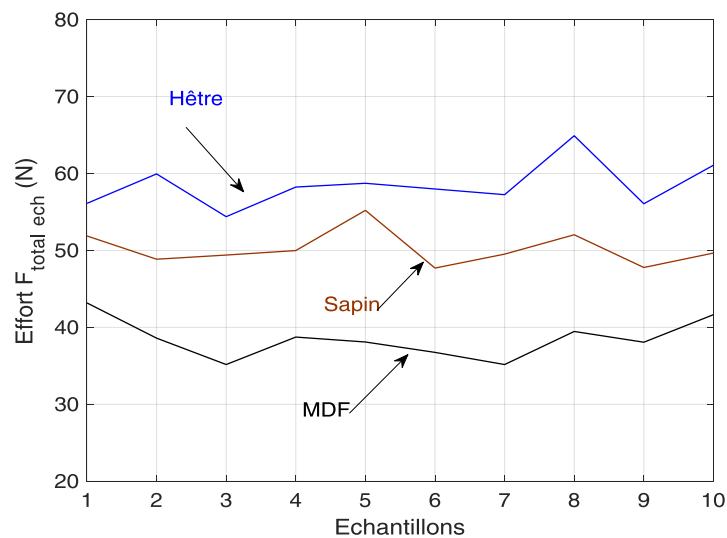


Figure 3.56: Evolution des efforts de coupe de l'usinage robotisé du hêtre, MDF et sapin en configuration rigide

- **Caractérisation de la qualité dimensionnelle**

L'usinage robotisé du sapin en configuration rigide a montré que l'évolution des efforts de coupe dépend de l'hétérogénéité et la densité du matériau usiné. Nous cherchons dans cette partie l'effet de ce facteur ainsi que l'effet de la machine sur le parcours d'outil. Le Tableau 3.32 illustre les mesures de $L_{i moy}$ du sapin. Nous comparons dans la Figure 3.57 l'usinage du sapin avec le robot et avec la défonceuse.

Tableau 3.32: Mesure des dimensions d'usinage (L_i)

	Ech1	Ech2	Ech3	Ech4	Ech5	Ech6	Ech7	Ech8	Ech9	Ech10
L_{i1}	20,1	20	20	20,1	20,1	19,9	20	20,1	20,1	20
L_{i2}	20,1	19,9	20	20	20,1	19,9	20	20	20	20
L_{i3}	19,9	19,9	20	20,1	20,1	19,9	20,1	20	19,9	19,9
L_{i4}	20	19,9	19,9	20	20,1	19,9	20,1	20	19,9	20
L_{i5}	20	20,1	19,9	19,9	19,9	20	19,9	20	19,9	20
L_{i6}	20	20	20,1	20	20,1	20,1	19,9	20,1	20	20,1
Moyenne (L_{imoy})	20,02	19,97	19,98	20,02	20,07	19,95	20	20,03	19,97	20
Ecart type : σ	0,08	0,09	0,08	0,09	0,08	0,09	0,09	0,05	0,09	0,06
Moyenne totale de L_{imoy}	20									

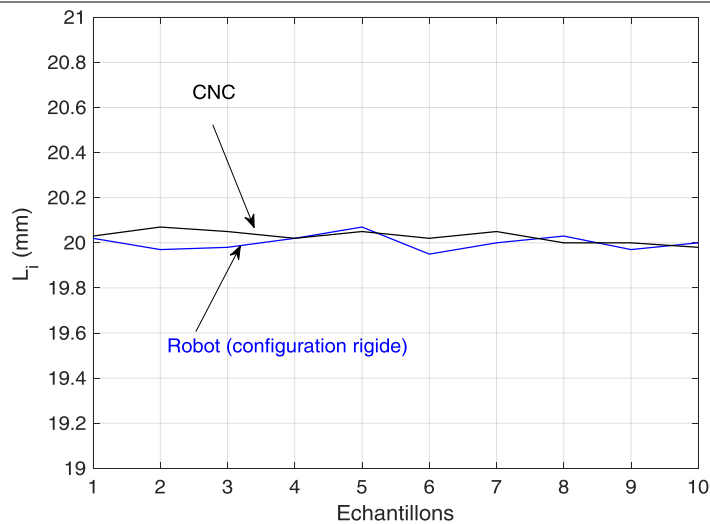


Figure 3.57: Evolution de la L_{imoy} du Sapin (usinage robotisé et cnc)

La comparaison de l'usinage du sapin avec la défonceuse et le robot en configuration rigide ne nous permet pas d'évaluer la variation de la qualité dimensionnelle puisque que l'évolution des mesures est assez proche. Pour remédier ça, nous traçons dans la Figure 3.58 les écart-types de mesure pendant les deux campagnes.

Les histogrammes démontrent que la qualité dimensionnelle de coupe s'est dégradée en usinant le sapin avec le robot en configuration rigide. Le même phénomène est trouvé avec le hêtre et l'MDF.

Sapin / Robot : configuration rigide avec pièce bridée

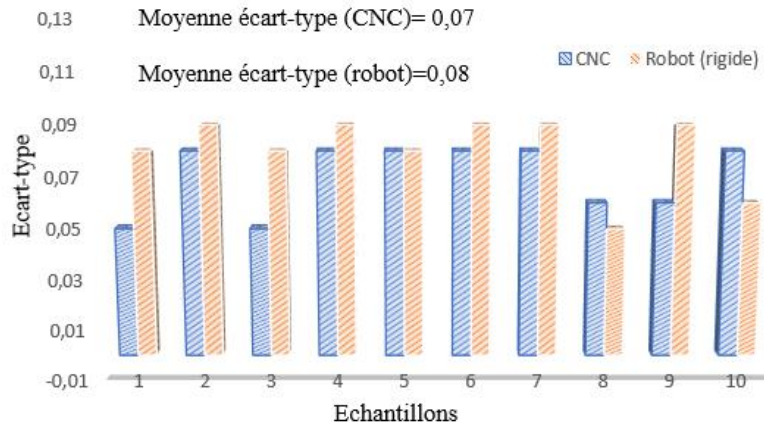


Figure 3.58: Ecart-types de $L_{i\text{ moy}}$ du Sapin en usinage avec le robot et la défonceuse

En comparant avec l'usinage robotisé du hêtre et du MDF en configuration rigide (Figure 3.59), la variation de la qualité dimensionnelle du sapin est inférieure à celle du hêtre et supérieure à celle du MDF. Ceci est dû à l'évolution des efforts de coupe qui, elle-même, est située entre celle du hêtre et du MDF.

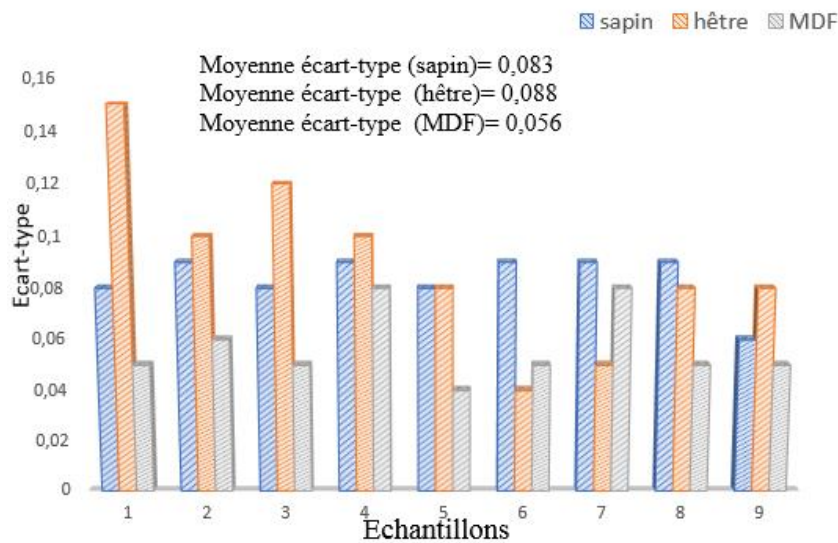


Figure 3.59: Ecart-types de $L_{i\text{ moy}}$ du sapin, hêtre et MDF en usinage avec le robot en configuration rigide

- **Interaction entre effort de coupe et dimensions d'usinage :**

L'usinage du hêtre et du MDF avec le robot en configuration rigide a démontré que l'interaction entre les efforts de coupe et la dégradation de la qualité dimensionnelle évolue suivant une relation proportionnelle directe. Nous cherchons dans cette partie l'évolution de cette interaction pour le sapin (Figure 3.60). En usinage robotisé l'interaction effort/qualité dimensionnelle du sapin, comme avec le hêtre et le MDF, évolue de la même manière. La dispersion des erreurs résiduelles est toujours aléatoire (Figure 3.61).

Sapin / Robot : configuration rigide avec pièce bridée

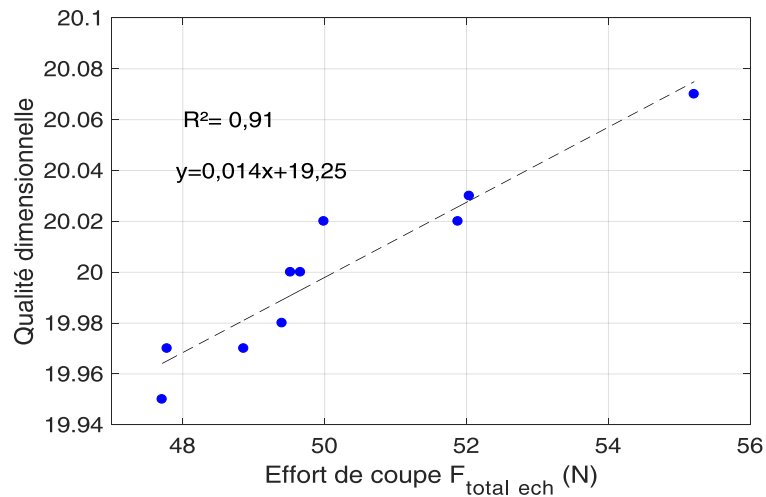


Figure 3.60: Interaction entre effort de coupe et dimensions d'usinage

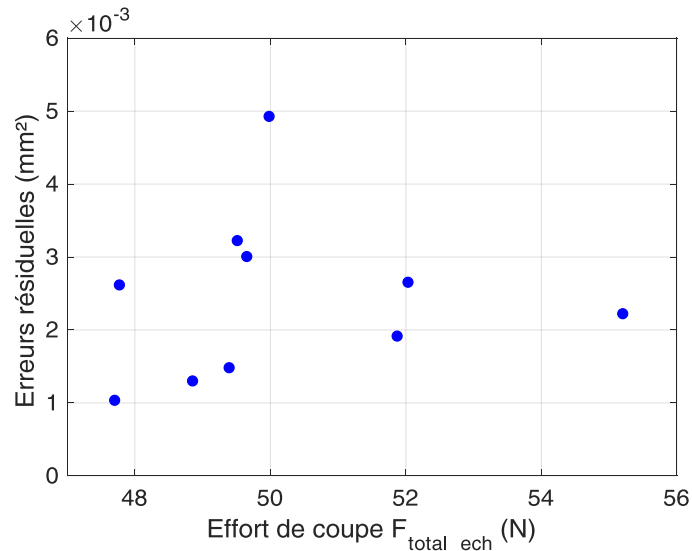


Figure 3.61: Dispersion des erreurs résiduelles

En comparant avec la campagne 1.1 du hêtre les coefficients de détermination sont égaux $R^2_{(sapin)}=0,91 = R^2_{(hêtre)}=0,91$. Ceci montre qu'en configuration rigide, les modèles linéaires de du hêtre et du sapin ont la même capacité de prédiction de l'évolution du phénomène.

La tendance de variation du phénomène est plus rapide que celle trouvée avec l'MDF et le hêtre.

- **Synthèse de la campagne :**

Nous pouvons conclure à partir de cette campagne que :

- En usinage robotisé, les efforts de coupe, la qualité dimensionnelle et leurs variations dépendent de la densité et l'hétérogénéité du matériau suivant une relation proportionnelle directe : Plus le matériau est dense et hétérogène plus la caractérisation d'usinage est variable. Ceci explique pourquoi en usinant du sapin les mesures sont toujours comprises entre celles du hêtre et celles du MDF ;

Sapin / Robot : configuration rigide avec pièce bridée

- Indépendamment du matériau usiné, le changement de la défonceuse par un robot anthropomorphe rend l'usinage en série moins répétable et plus sensibles aux phénomènes de vibration vu la faible rigidité du système ;
- Avec le sapin comme avec le hêtre et le MDF, le modèle linéaire de la qualité dimensionnelle en fonction des efforts de coupe.

3.5.2.2 Campagne 1.2 « configuration flexible avec pièce bridée » :

- **Caractérisation des efforts de coupe :**

Dans cette partie nous usinons le sapin en configuration flexible afin de chercher l'effet de la position du robot en termes d'effort de coupe, qualité et interaction entre eux. Le Tableau 3.33 illustre les mesures des efforts tangentiels et radiaux ainsi que leurs moyennes. La Figure 3.62 présente l'évolution de la force totale résultante avec la défonceuse et le robot dans ses deux configurations.

Tableau 3.33: Effort de coupe du Sapin en configuration flexible

	$F_x_moy(N)$	$F_y_moy(N)$	F_{total_ech}
Echantillon 1	34,65	70,85	78,86
Echantillon 2	30,95	80,47	86,21
Echantillon 3	30,45	70,69	76,96
Echantillon 4	39,78	80,89	90,14
Echantillon 5	30,35	80,65	86,17
Echantillon 6	39,78	71,56	81,87
Echantillon 7	30,58	78,89	84,60
Echantillon 8	37,89	70,45	79,99
Echantillon 9	38,78	71,45	81,29
Echantillon 10	30,19	70,12	76,34
Moyenne	34,34	74,602	82,12
Ecart type :σ	4,28	4,88	4,46

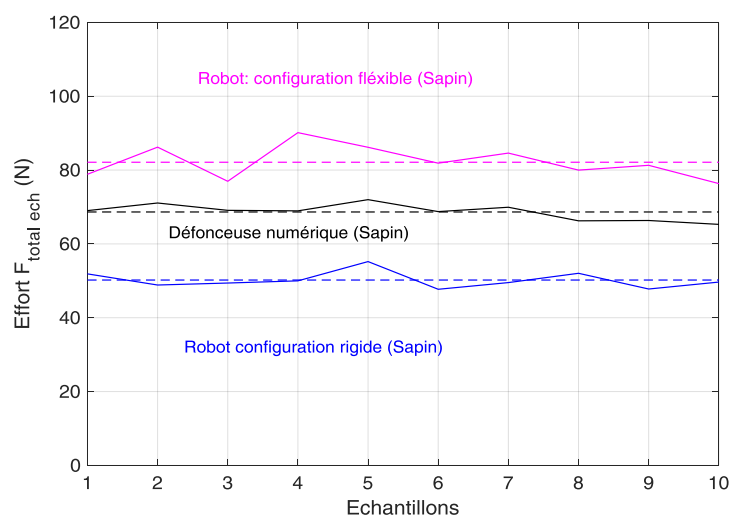


Figure 3.62: Efforts de coupe moyens appliqués par la défonceuse et le robot en configuration rigide et flexible

Le changement de la configuration du robot a engendré une hausse remarquable au niveau des amplitudes des efforts de coupe qui ont dépassé celles obtenues avec la défonceuse. Le même comportement a été trouvé avec l'usinage du hêtre en configuration flexible. Cette augmentation est accompagnée par une énorme dispersion et fluctuation des efforts tangentiels et radiaux comme les montrent les écarts types présentés dans le Tableau 3.34. Par conséquent l'usinage est moins répétable pendant une production série. Ces variations des efforts restent toujours comprises entre celles du hêtre et celles du MDF.

Tableau 3.34: Ecart-Type des efforts de coupe (Usinage sapin)

	σ_{Fx_moy}	σ_{Fy_moy}	σ_{Ftotal_ech}
Usinage avec la défonceuse	1,93	1,74	2,15
Usinage avec le robot en configuration rigide	2,68	3,16	2,28
Usinage avec le robot en configuration flexible	4,29	4,89	4,46

Pour chercher l'effet du matériau nous comparons ces résultats avec l'usinage du MDF et du hêtre en configuration flexible (paragraphe 3.2.2.2 et 3.3.2.2) (Figure 3.63).

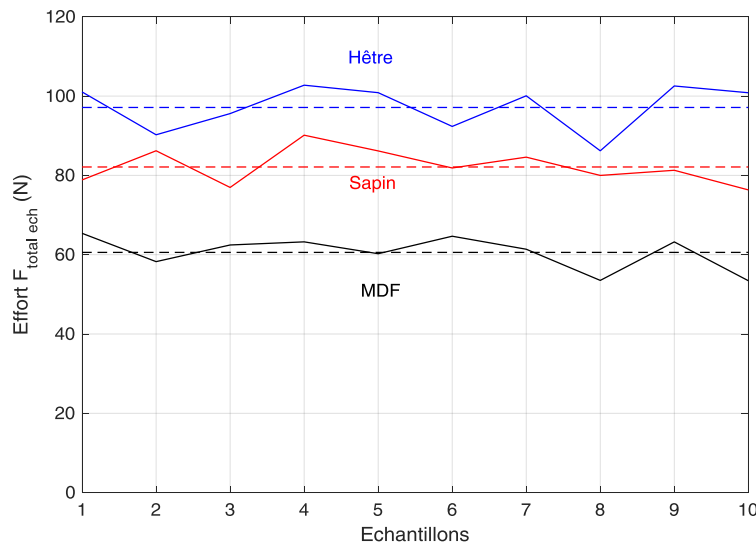


Figure 3.63: Evolution des efforts de coupe du sapin, hêtre et MDF en configuration flexible

Comme en configuration rigide, l'évolution des efforts de coupe du sapin est comprise entre celle du hêtre et celle du MDF. Par conséquent, cette expérience ne met pas en évidence une influence de la position du robot sur l'intervalle dans lequel évoluent les mesures. L'hétérogénéité et la densité restent les facteurs les plus influents: Ils engendrent des fluctuations dont les amplitudes sont importantes avec le hêtre, moins élevées avec le sapin et faibles avec le MDF.

- **Caractérisation de la qualité dimensionnelle :**

Nous cherchons dans cette partie l'effet de la configuration flexible du robot sur la qualité dimensionnelle d'usinage du Sapin. Les mesures de L_i sont illustrées dans le Tableau 3.35. La

Figure 3.64 présente une comparaison de l'évolution de la qualité dimensionnelle d'usinage du sapin avec le robot la défonceuse.

Tableau 3.35: Mesure de la qualité d'usinage du Sapin en configuration flexible

	Ech1	Ech2	Ech3	Ech4	Ech5	Ech6	Ech7	Ech8	Ech9	Ech10
L_{i1}	20,1	20	20	20,4	20	20,1	20	20	19,9	19,9
L_{i2}	20,1	20,1	19,9	20,5	20,1	20	20,2	20	20,1	20
L_{i3}	20,1	20,5	20,3	20,2	20,5	20,3	20,3	19,9	20	19,9
L_{i4}	20,1	20,4	20,4	20,3	20,4	19,9	20,2	20,1	20,2	20,1
L_{i5}	20	20,4	20	20,2	20,4	20,4	20,2	20,3	20,3	20,3
L_{i6}	20,1	20	19,9	20,1	20	20,3	20,1	20,3	20,3	19,9
Moyenne (L_{imoy})	20,08	20,23	20,08	20,28	20,23	20,17	20,17	20,10	20,13	20,02
Ecart type : σ	0,04	0,23	0,21	0,15	0,23	0,20	0,10	0,17	0,16	0,16
Moyenne totale de L_{imoy}	20,15									

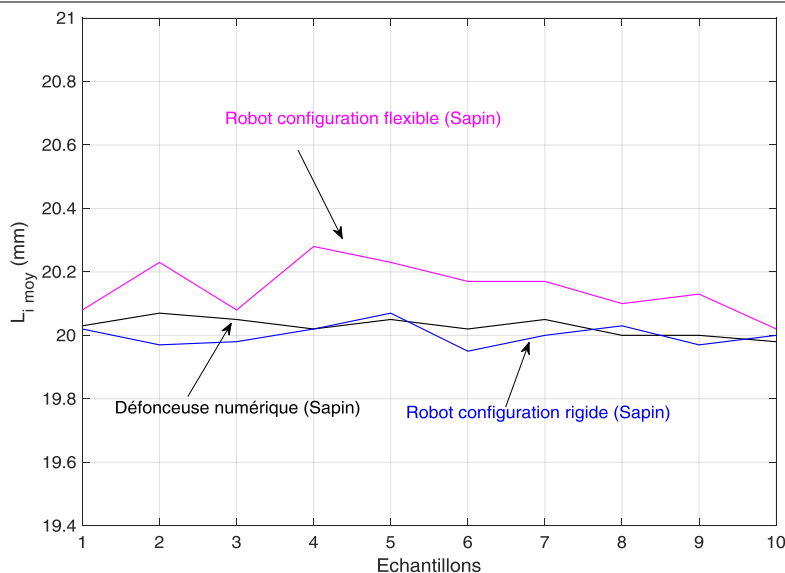


Figure 3.64: Evolution de la L_{imoy} du Sapin en usinage robotisé et avec la défonceuse

Pour l'étude de l'effet machine sur l'usinage du sapin, la Figure 3.64 montre que, entre la défonceuse et le robot anthropomorphe, des fluctuations de mesures apparaissent au niveau de l'évolution des dimensions d'usinage. Elles s'accroissent avec le changement de la configuration du robot. La qualité dimensionnelle subit une énorme dégradation et le système perd sa stabilité et sa répétabilité en production série.

L'effet matériau en configuration flexible (Figure 3.65), ne diffère pas de celui trouvé avec le hêtre et le MDF. Plus le matériau est hétérogène et dense, plus la qualité dimensionnelle est dégradée.

Sapin / Robot : configuration flexible avec pièce bridée

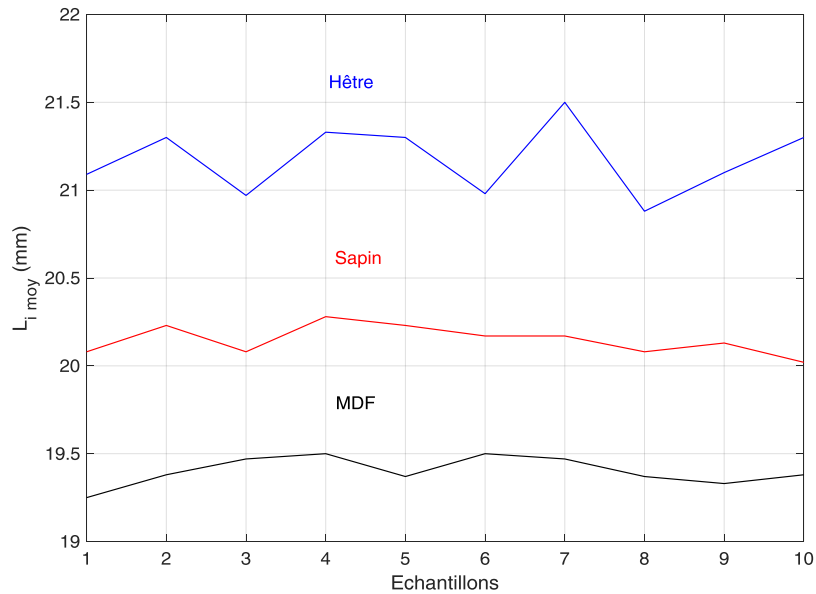


Figure 3.65: Effet matériau sur la qualité dimensionnelle en configuration flexible

- **Interaction entre effort de coupe et les dimensions d'usinage :**

L'usinage du sapin avec la défonceuse et le robot en configuration rigide ont démontré que l'interaction entre les efforts de coupe et la dégradation de la qualité dimensionnelle évolue suivant une relation proportionnelle directe. Dans cette partie, nous cherchons l'effet du changement de la configuration du robot sur l'évolution du phénomène. La Figure 3.66.a montre que la relation de proportionnalité directe entre les efforts de coupe et la dégradation de la qualité dimensionnelle persiste. La dispersion des erreurs résiduelles est toujours aléatoire (Figure 3.66.b).

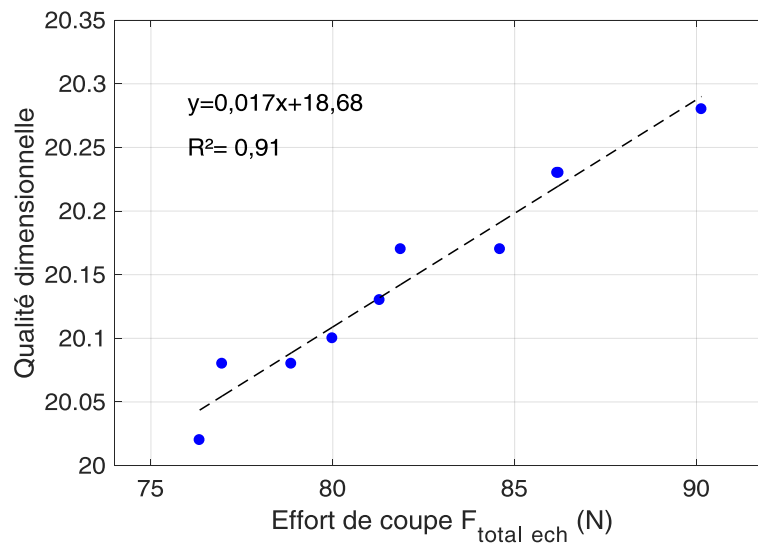


Figure 3.66.a: Interaction effort de coupe et les dimensions d'usinage sapin configuration flexible

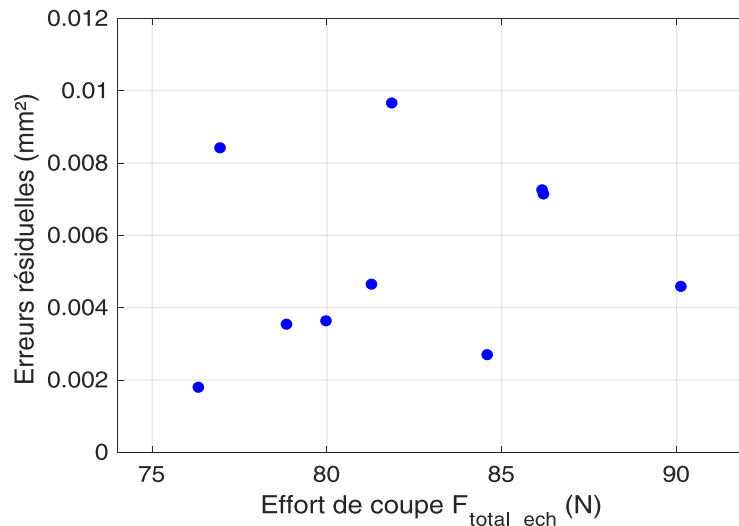


Figure 3.66.b: Dispersion des erreurs résiduelles

En comparant avec la campagne 1.1 et l'usinage avec la défonceuse, les coefficients de détermination sont égaux $R^2_{CNC}=0,91 = R^2_{rigide}=0,91 = R^2_{flexible}=0,91$. Ceci montre qu'en usinant le sapin, le changement de la machine ou de sa configuration n'influe pas sur la robustesse du modèle linéaire. La tendance de variation de la relation est plus rapide que celles trouvées avec la défonceuse et la configuration rigide du robot.

- **Analyses fréquentielles :**

En constatant la diminution des efforts de coupe en usinant le Sapin qui passent de 68,7 N avec la défonceuse à 50,2 N avec le robot en configuration rigide, nous décidons de déterminer les transformées de Fourier des signaux comme nous avons procédé avec le MDF (paragraphe 3.2.2.1) (Figures 3.67.a.b.c).

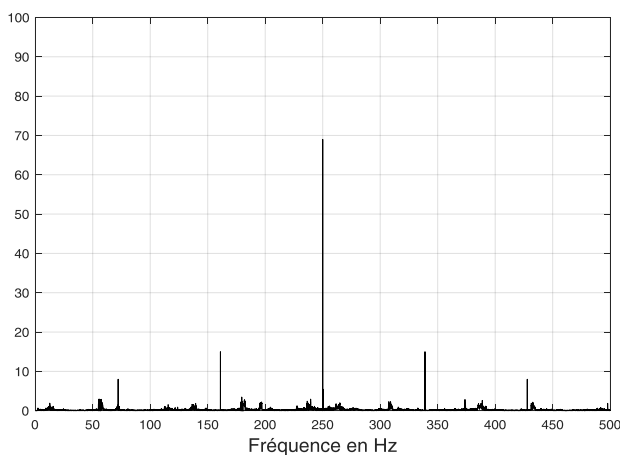


Figure 3.67.a : FFT des efforts de coupe du Sapin : Usinage CNC

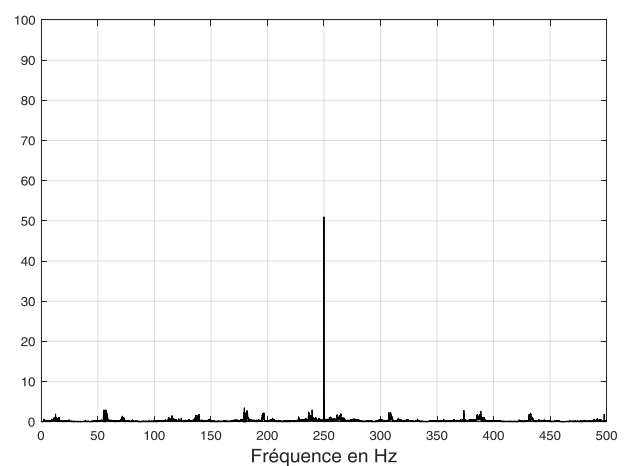


Figure 3.67.b : FFT des efforts de coupe du Sapin : Robot rigide

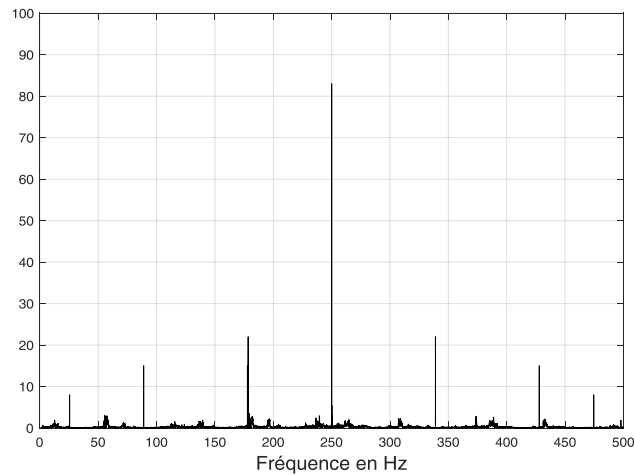


Figure 3.67.c : FFT des efforts de coupe du Hêtre : Robot flexible

Le même phénomène observé avec l'usinage du MDF et du Hêtre se reproduit. L'analyse spectrale montre la présence des fréquences harmoniques dans les spectres d'usinage avec la défonceuse et le robot en configuration flexible. Ces harmoniques sont absentes dans le spectre d'usinage robotisé en configuration rigide. Ce constat nous permet de déduire qu'il existe une perte d'énergie en changeant la machine et que le robot en configuration rigide encaisse et absorbe les vibrations d'usinage.

- **Synthèse de la campagne :**

Cette campagne expérimentale nous permet de déterminer l'effet de la configuration flexible du robot sur l'usinage du sapin. Nous déduisons que :

- En usinant le sapin, le changement de la configuration du robot n'influence pas la plage d'évolution des efforts de coupe et la qualité dimensionnelle qui est toujours bornée par les mesures du hêtre (borne supérieure) et les mesures du MDF (borne inférieure) ;
- La configuration du robot n'influe pas sur l'interaction entre les efforts de coupe et la dégradation de la qualité dimensionnelle qui évolue toujours suivant une relation proportionnelle directe ;
- Contrairement aux usinages du MDF et du hêtre, le modèle linéaire de l'interaction effort/qualité dimensionnelle est rigoureux, indépendamment de la machine et de sa configuration.

3.6 Effets des irrégularités du sapin (nœuds):

Les campagnes précédentes ont abouti à la caractérisation des efforts de coupe et de la qualité dimensionnelle d'usinage du sapin sans singularité en utilisant la défonceuse et le robot anthropomorphe. Dans cette section, nous portons notre intérêt sur l'influence des singularités du matériau. Pour cela nous usinons des nœuds saints et adhérents du sapin (Figure 3.68). Nous

Variation des conditions de coupe sur les efforts, la qualité dimensionnelle et l'orthogonalité

souhaitons caractériser les efforts de coupe et la qualité dimensionnelle lorsque l'outil usine ces singularités. Le même protocole expérimental est adopté et le même outil est utilisé. Dans des travaux de recherche antérieurs, nous trouvons que l'usinage des nœuds est traité essentiellement en sciage [150] [151]. Le sujet n'est pas encore abordé pour le défonçage avec une défonceuse ou un robot. Dans notre étude, nous nous intéressons seulement à l'évolution des efforts tangentiels en usinage robotisé en configuration rigide.

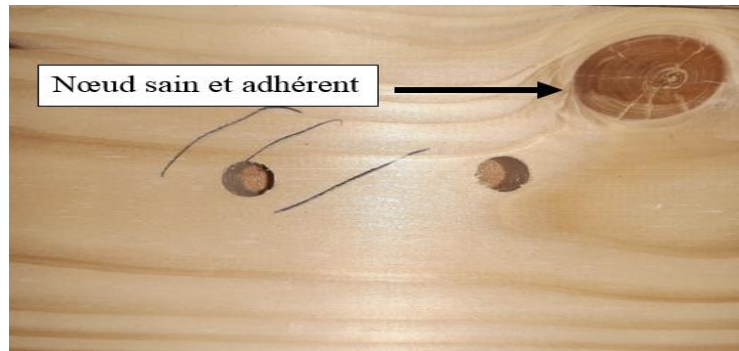


Figure 3.68: Echantillon du Sapin avec un nœud sain et adhérent

3.6.1 Effets sur les efforts de coupe :

L'opération du rainurage effectuée comporte deux phases (Figure 3.69) :

- Hors nœud : concerne l'usinage de la matière non noueuse ;
- Dans le nœud : lorsque l'outil usine le nœud.

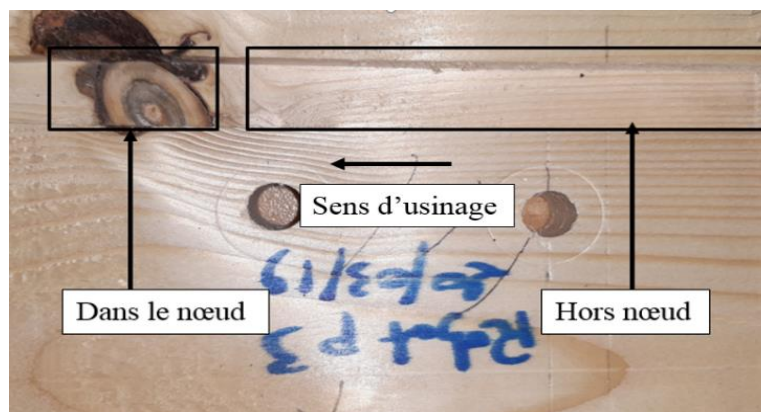


Figure 3.69: Phases d'usinage du Sapin avec nœud

L'évolution des efforts de coupe en fonction du temps est présentée dans la Figure 3.70. Pour caractériser le procédé d'usinage, nous mesurons les valeurs maximales des forces appliquées sur l'échantillon dans et hors nœud. Pour déterminer l'effet produit lorsque l'outil usine une singularité du sapin, nous mesurons les pourcentages de variation des efforts hors nœud (F_{HN}) par rapport à ceux dedans (F_{DN}) (Tableau 3.36).

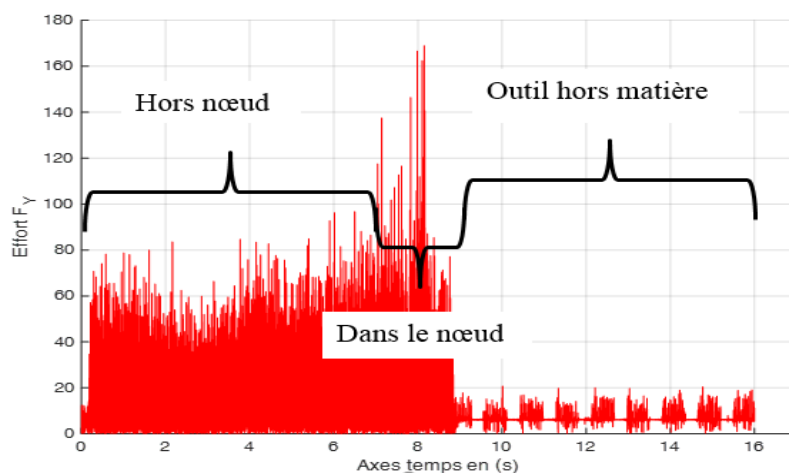


Figure 3.70: Les phases d'évolution des efforts de coupe en fonction du temps (Dans et hors nœud)

Tableau 3.36: Efforts de coupe maximaux dans et hors nœud

	Efforts max hors nœud (F_{HN})	Efforts max dans le nœud (F_{DN})	Pourcentage de variation de F_{DN} par rapport à F_{HN}
	N	N	
Echantillon 1	31,6	103,72	328%
Echantillon 2	51,7	134,18	259%
Echantillon 3	76,3	112,5	147%
Echantillon 4	38,7	84,7	218%
Echantillon 5	53,68	137,6	256%
Echantillon 6	72,22	143,02	198%
Echantillon 7	54,04	130,16	240%
Echantillon 8	48,8	87,96	181%
Echantillon 9	41,6	57,92	139%
Echantillon 10	71	150,88	212%

L'usinage d'un nœud engendre une hausse instantanée au niveau des efforts de coupe. Ceci revient également au changement de la densité du matériau qui est élevée au cœur du nœud ainsi au changement brusque des orientations des fils du bois. Certes, cette augmentation est variable d'un échantillon à un autre comme le montre la variation de F_{DN} par rapport F_{HN} (Tableau 3.36). Ceci est dû à la variété des caractéristiques des nœuds usinés (dimension, profondeur, type) ainsi les particularités du résineux en usinage par enlèvement de matière [46].

3.6.2 Effets sur la qualité dimensionnelle d'usinage :

La caractérisation des efforts de coupe lorsque l'outil usine un nœud a abouti à une élévation soudaine au niveau des contraintes mécanique appliquées. Dans cette partie nous cherchons l'effet de ce phénomène sur l'évolution de la qualité dimensionnelle lors de l'usinage.

Le même protocole expérimental est utilisé. Les mesures du paramètre L_i sont toujours prélevées sur 6 points équidistants. La Figure 3.71 illustre les résultats obtenus sur deux échantillons.

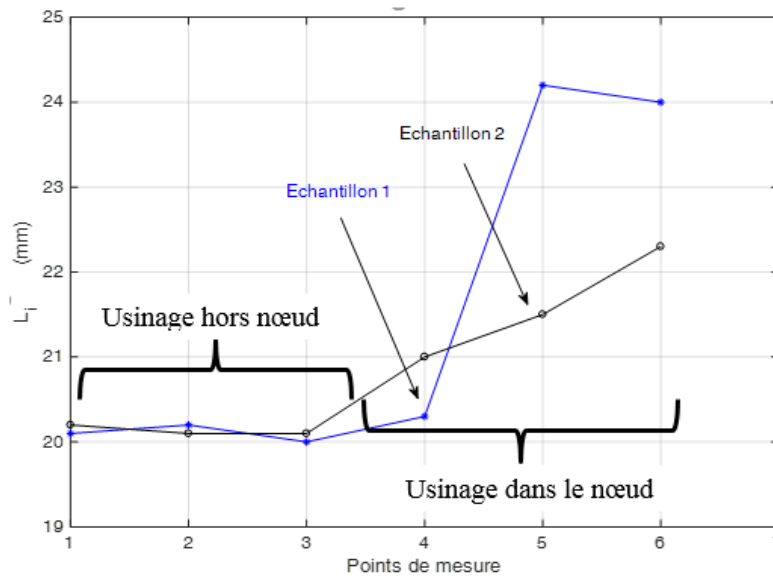


Figure 3.71: Evolution de la L_i dans et dehors du nœud.

Les efforts de coupe qui s'intensifient lors du passage de l'outil par un nœud sain et adhérent entraînent une imprécision dimensionnelle qui dépasse 4mm avec l'échantillon 1 et l'échantillon 2 (Figure 3.71). Par conséquent, l'état de surface subit une énorme dégradation qui se manifeste sur plusieurs formes telles que :

- Eclatement du nœud et une partie du matériau est détachée de la pièce (Figure 3.72) ;
- Fissuration du fond et des bords de la rainure (Figure 3.73) ;
- Traces de défibrage au niveau du corps du nœud (Figure 3.74).

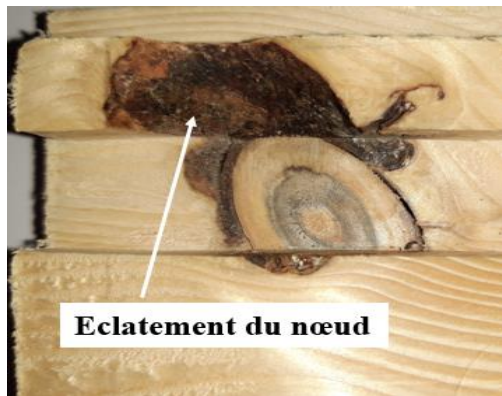


Figure 3.72: Eclatement du nœud

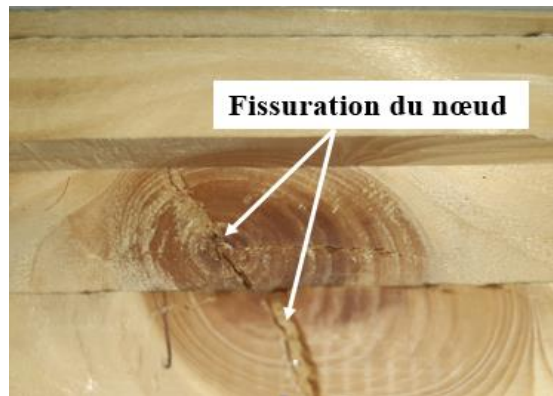


Figure 3.73: Fissure aux bords et au fond du nœud

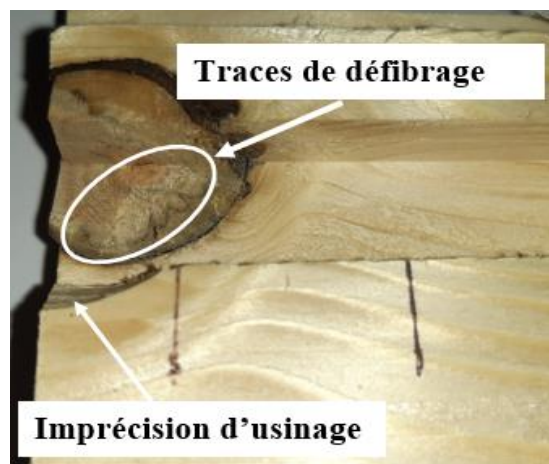


Figure 3.74: Traces de défibrage du nœud

3.7 Effet de la variation des conditions de coupe:

La caractérisation des efforts de coupe et de la qualité dimensionnelle effectuée dans les campagnes précédentes a démontré que l'usinage robotisé est sensible à la configuration de la machine, aux modes de coupe, aux propriétés du matériau et aux singularités. Nous cherchons dans cette section à étudier l'effet de variation des conditions de coupe sur l'aspect dimensionnel et esthétique du matériau. Pour effectuer ceci, notre choix est orienté vers l'utilisation du hêtre, essence très souvent utilisée dans les travaux de recherche.

Nous caractérisons dans cette campagne l'influence de la vitesse d'avance du robot. Le même protocole de mesure des efforts de coupe et la qualité dimensionnelle est utilisé. Nous nous intéressons aux rainurages suivant les deux modes de coupe 90° - 0° (rainure horizontale) et 90° - 90° (rainure verticale). Trois vitesses d'avance du robot sont adoptées :

- 4000mm/min pour une avance par dent égale à 0,266mm/tr/dent.
- 7000mm/min pour une avance par dent égale à 0,46mm/tr/dent.
- 9000mm/min pour une avance par dent égale à 0,6 mm/tr/dent.

Variation des conditions de coupe sur les efforts, la qualité dimensionnelle et l'orthogonalité

3.7.1 Effets sur les efforts de coupe :

Nous étudions dans cette section l'évolution des efforts tangentiels moyens de deux rainures :

- Horizontale : Parallèle au fil du bois (Figure 3.75) ;
- Verticale : Perpendiculaire au fil du bois (Figure 3.76) .

Les mesures des efforts tangentiels moyens du hêtre en différentes vitesses sont présentées dans le Tableau 3.37.

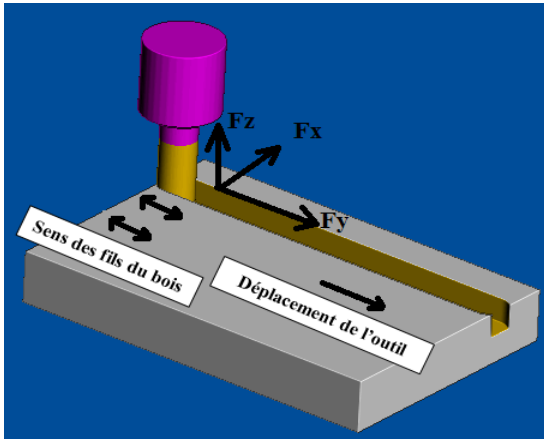


Figure 3.75: Effort tangentiel F_y de la rainure horizontale

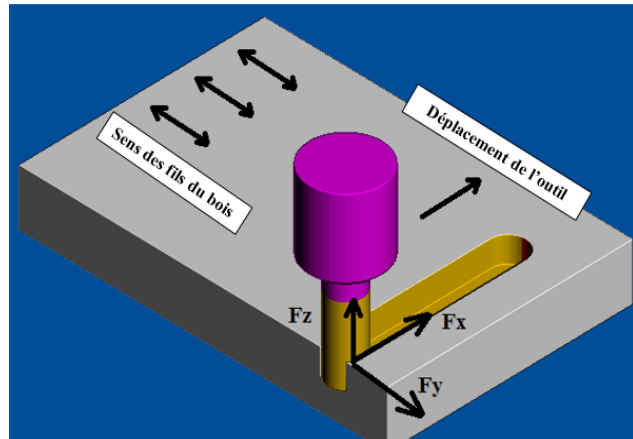


Figure 3.76: Effort tangentiel F_x de la rainure verticale

Tableau 3.37: Efforts de coupe tangentiels moyens du hêtre pour différentes vitesses d'avance

	4000 mm/min	7000mm/min	9000mm/min
Rainure horizontale (Fig 3.75)	192,25 N	213,47 N	263 N
Rainure verticale (Fig 3.76)	205 N	250,36 N	303,97 N

A partir des résultats obtenus, nous remarquons que les efforts de coupe évoluent proportionnellement à la vitesse d'avance d'usinage. Plus le déplacement du robot est rapide plus les contraintes mécaniques appliquées par l'outil s'intensifient. De plus, la comparaison entre l'usinage parallèle et perpendiculaire aux fils du bois confirme le résultat obtenu dans le paragraphe 3.4. En changeant la vitesse d'avance, les efforts de coupe en mode $90^\circ-0^\circ$ restent toujours inférieurs à ceux en mode $90^\circ-90^\circ$.

3.7.2 Effets sur la qualité dimensionnelle :

L'augmentation de la vitesse d'avance du robot entraîne une augmentation importante au niveau des efforts de coupe. Nous visons à analyser l'effet sur la qualité dimensionnelle d'usinage. Les mesures sont prélevées dans 6 points équidistants de la rainure horizontale (Figure 3.77), et verticale (Figure 3.78).

Variation des conditions de coupe sur les efforts, la qualité dimensionnelle et l'orthogonalité

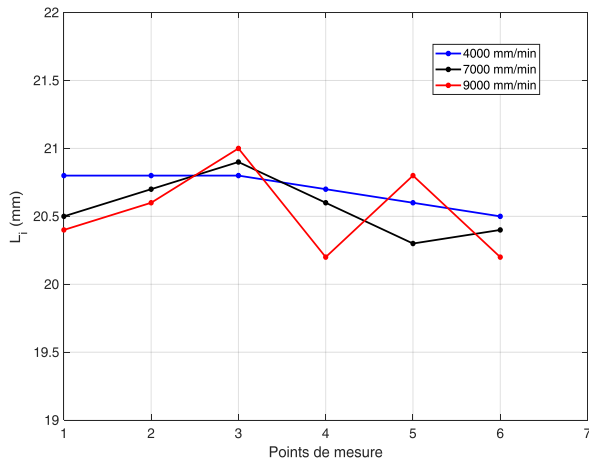


Figure 3.77 : Evolution de L_i en différentes vitesses (rainure horizontale)

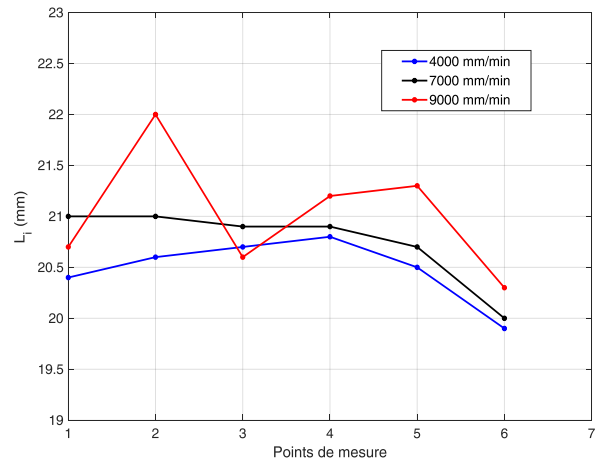


Figure 3.78: Evolution de L_i en différentes vitesses (rainure verticale)

Nous constatons que la hausse des efforts de coupe a diminué la qualité dimensionnelle d'usinage. Cette dernière est proportionnelle à la vitesse d'avance du robot. Plus le déplacement est rapide plus la géométrie du profil usiné est dégradée.

L'évolution des dimensions d'usinage diffère d'un sens à l'autre. Cette fluctuation est plus importante lorsque l'usinage réalisé perpendiculairement au fil du bois (mode de coupe $90^\circ-90^\circ$).

La surface usinée subit une dégradation importante avec la vitesse 9000mm/min. L'endommagement de l'état de la rainure usinée se manifeste sous la forme d'éclats de matière, de déviations de trajectoires et d'ondulations aux niveaux des surfaces latérales (Figure 3.79).

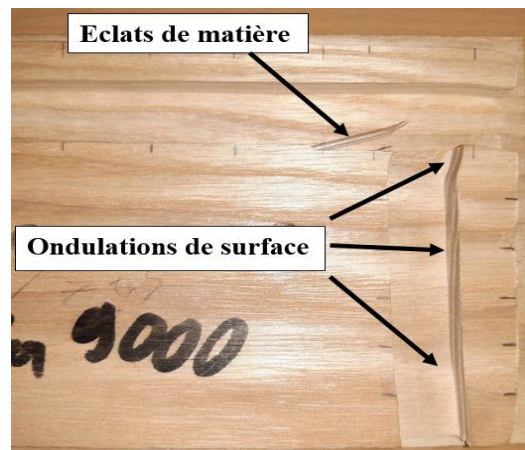


Figure 3.79: Etat de surface en usinage robotisé à 9000 mm/min du Hêtre

Ces constatations nous ont amené à effectuer les mêmes expériences sur d'autres essences comme le sapin, le mélèze et le chêne afin d'étudier leurs réactions face à la variations des vitesses d'avance du robot. Les résultats obtenus et les phénomènes de dégradation d'usinage observés sont similaires à ceux trouvés avec le hêtre (Figure 3.80, Figure 3.81, Figure 3.82).

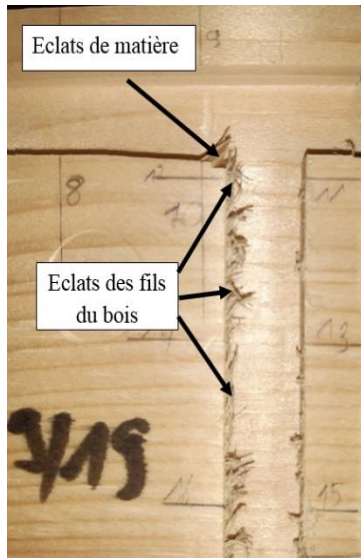


Figure 3.80: Dégradation d'usinage robotisé du Sapin (9000mm/min)

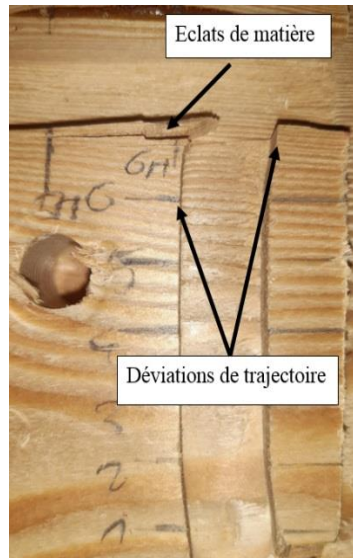


Figure 3.81: Dégradation d'usinage robotisé du mélèze (9000mm/min)

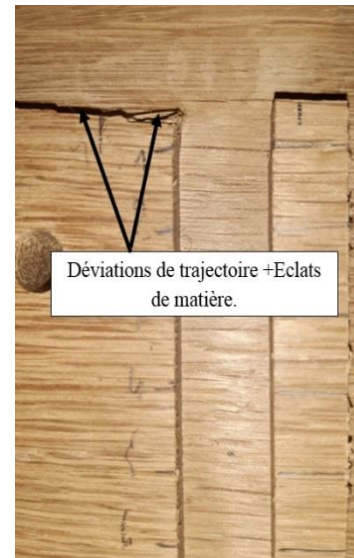


Figure 3.82: Dégradation d'usinage robotisé du chêne (9000 mm/min)

3.7.3 Effets sur l'orthogonalité :

Après avoir étudié l'effet de la vitesse d'avance sur les efforts de coupe et la qualité dimensionnelle, nous cherchons ensuite l'influence sur l'orthogonalité entre le rainurage horizontal et le rainurage vertical effectués dans les mêmes conditions expérimentales. Pour cela nous étudions la variation des mesures des angles formés par les deux rainures ($B\hat{A}C$ / $B'\hat{A}C'$ / $B''\hat{A}C''$...) (Figure 3.83). Les résultats (Tableau 3.38) sont calculés suivant le théorème d'El Kashi décrit dans 2.7.7.

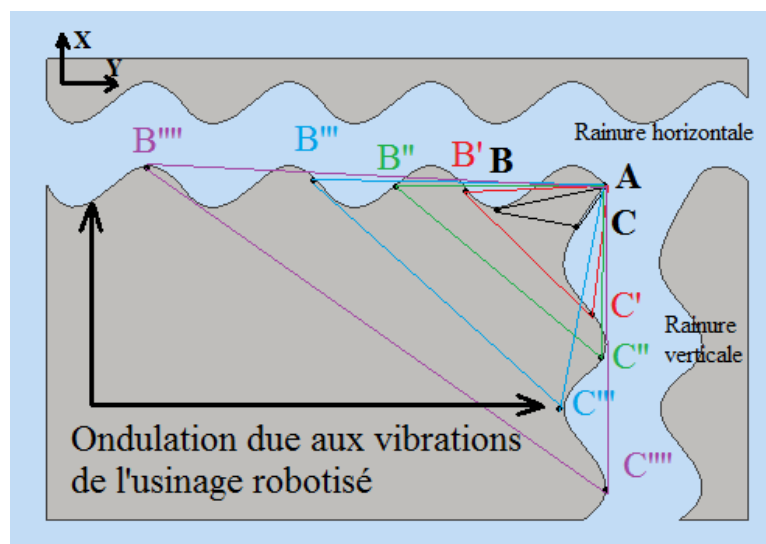


Figure 3.83: Evaluation de l'orthogonalité de l'usinage robotisé

Tableau 3.38: Mesures de l'orthogonalité du rainurage

	B$\hat{A}C$	B'$\hat{A}C'$	B''$\hat{A}C''$	B'''$\hat{A}C'''$	B''''$\hat{A}C''''$	Déviatiion maximale
4000 mm/min	89,9°	91,3°	91,2°	91,4°	91,2°	1,50°
7000 mm/min	91,9	92,2°	91,8°	95,8	97,7°	5,90°
9000 mm/min	91,7°	92,2°	92,5°	85,7°	87,8°	6,80°

Pour l'échantillon usiné à 4000 mm/min, nous remarquons que les angles calculés sont quasi-constants, très proche des 90° théoriques et la déviation maximale est faible.

En augmentant la vitesse d'avance à 7000 mm/min, l'évolution des angles connaît plus de fluctuation pour atteindre une valeur maximale de 5,90°. Cette variation s'intensifie à 9000 mm/min où l'écart maximal atteint 6,80°. Ces résultats nous permettent de déterminer que plus la vitesse d'avance du robot augmente plus l'angle, supposé droit, entre les deux rainures varie. Par conséquent, le profil usiné « perd » au fur et à mesure son orthogonalité.

3.8 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous caractérisons l'usinage robotisé en termes d'efforts de coupe, qualité dimensionnelle et interaction entre eux.

Trois matériaux courants dans l'industrie du bois : le MDF, le hêtre et le sapin, sont utilisés. Les campagnes menées par la défonceuse numérique sont considérées comme référence vu les performances en rigidité, stabilité et répétabilité de la machine. Les résultats obtenus confirment les qualités de cette machine.

Les travaux réalisés se basent sur l'analyse des efforts de coupe et la qualité dimensionnelle en fonctions de 3 facteurs :

- Machine : Effet de remplacement de la défonceuse par le robot anthropomorphe ;
- Configuration machine : Effet du changement de la position du robot ;
- Matériau : Effet de l'utilisation des différents matériaux : panneaux dérivé du bois et bois massif.

L'étude démontre que, indépendamment du matériau usiné, de la machine et de sa configuration, la dégradation de la qualité dimensionnelle d'usinage s'accroît lorsque les efforts de coupe augmentent. La robustesse du modèle linéaire utilisé pour étudier la tendance d'évolution de l'interaction effort/qualité dimensionnelle diminue lorsque le robot usine proche de la limite de son espace de travail.

L'effet configuration de la machine révèle que, plus l'outil usine loin de la base du robot plus le système encaisse des vibrations qui augmentent les efforts de coupe et perturbent la trajectoire d'usinage. Ce phénomène s'amplifie lorsque la densité et l'hétérogénéité du matériau sont élevées. En outre, la comparaison entre la défonceuse et le robot a mis en évidence l'effet de la faible rigidité des articulations qui se manifeste au niveau des degrés de fluctuations des efforts de coupe qui diminuent la stabilité et la répétabilité d'usinage en production série. Ce phénomène s'intensifie en changeant le mode de coupe. Les mesures des efforts de coupe se multiplient par 8. A la fin de chapitre, l'usinage des singularités du sapin dévoile une croissance rapide et soudaine des efforts de coupe qui endommage l'état de la surface usinée et dégrade la qualité dimensionnelle et l'orthogonalité de coupe. Les mêmes constatations sont réalisées lorsque la vitesse d'avance du robot augmente.

Chapitre 4 : Conclusion générale et perspectives

4.1 Conclusion générale :

Le travail mené dans cette thèse s'inscrit dans le cadre de la caractérisation des procédés d'usinage bois robotisés. La souplesse mécanique naturelle du robot industriel ainsi que les propriétés mécaniques du bois induisent naturellement des problèmes de fluctuations des efforts de coupe et, par conséquent, une dégradation des performances de suivi de trajectoires lors des opérations d'usinage.

A travers ce manuscrit, nous avons abordé deux aspects importants pour les industries du bois :

- L'étude de la robotique industrielle ;
- L'étude de l'usinage du bois par enlèvement de matière.

Nous avons débuté ce travail par un retour sur les événements contribuant à l'évolution des robots industriels. Nous présentons dans un ordre chronologique l'évolution de l'informatique et sa contribution à la progression et au développement de la robotique industrielle. Les études statistiques effectuées en 2019, par la Fédération Internationale de la Robotique (IFR), nous ont permis de diagnostiquer le positionnement des métiers d'intégration des robots anthropomorphes dans l'industrie en générale et dans le secteur du bois en particulier. Ces statistiques indiquent clairement que les industries du bois viennent au dernier rang, loin derrière le secteur automobile, électronique/électrique, métallurgique et plasturgique. Le chapitre 1 nous a permis de présenter quelques domaines d'utilisation des robots anthropomorphes dans l'industrie du bois et ainsi mettre en exergue les enjeux existants pour les industries du bois. La deuxième partie de notre veille bibliographique est dédiée à l'étude du matériau bois. Sa structure complexe nous a amené à nous plonger dans son anatomie afin de comprendre les origines de la dispersion de ses caractéristiques mécaniques et physiques. Au final notre étude aura porté sur trois matériaux couramment utilisés dans les industries du bois :

- Le MDF (bois dérivé) ;
- Le hêtre (feuillu) ;
- Le sapin (résineux).

A la fin du chapitre 1, un état de l'art sur les opérations d'usinage bois par enlèvement de matière et les modes de coupe est réalisé. L'étude porte également sur le défonçage, usinage fréquemment utilisé dans les industries du bois. Ses avantages et ses inconvénients sont présentés. Une attention particulière est accordée aux facteurs influençant le défonçage robotisé :

- Facteurs liés au matériau ainsi qu'aux outils d'usinage et modes de coupe ;
- Facteurs liés aux conditions de coupes ;
- Facteurs liés au robot : loi de commande.

Le chapitre 2 est consacré à la présentation du banc d'usinage utilisé. Nous commençons par une description technique du robot usineur, son électro-broche et ses outils. Ensuite, nous rappelons quelques notions de base de la robotique telles que :

- L'espace de travail ;
- La précision ;
- La répétabilité ;
- Les notions de singularité pour un robot ;
- Les techniques de compensation de gravité ;
- La rigidité du robot.

Ce travail de recherche a pu être mené à terme grâce la plateforme de robotique disponible au LERMAB. Cette plateforme composée de matériels robotiques et d'outils de simulation est présentée dans le chapitre 2. Cet équipement a été adapté afin de constituer un véritable banc d'usinage instrumenté, équipé d'une série d'instruments de mesure des efforts de coupe et de la qualité dimensionnelle . Cette chaîne d'acquisition constituée d'une platine à base de capteurs piézoélectriques, d'une station d'amplification et d'un convertisseur analogique numérique a également fait l'objet d'une présentation au chapitre 2. La mise en place d'un module d'acquisition sous la forme d'une interface numérique et d'un module de traitement de résultats développé sur MATLAB a été nécessaire pour réaliser l'ensemble des mesures de ce travail. Le protocole expérimental adopté est détaillé par étapes. Les configurations du robot dans son espace de travail sont choisies en se basant sur une cartographie de sa rigidité. Ces choix sont justifiés ensuite à travers l'étude de comportement du robot sous l'application des contraintes mécaniques. Ceci est effectué grâce à la méthode de la modélisation par éléments finis.

Afin de mesurer et de quantifier l'effet des phénomènes aléatoires, nous effectuons des essais à vide (déplacement du robot sans usinage). Les premières analyses fréquentielles et temporelles révèlent une sensibilité élevée des mesures au montage du capteur monté sur la bride du robot (configuration robot porteur de l'échantillon). Ceci se manifeste particulièrement au niveau des efforts mesurés sur l'axe Z de l'échantillon qui dépasse 25 N en usinage à vide. Après avoir présenté l'équipement et les outils disponibles, nous réalisons dans le chapitre 3 les essais préliminaires pour vérifier l'hypothèse indiquant que les vibrations pendant l'usinage proviennent du mouvement du robot en phase d'accélération et de décélération. Pour cela, nous avons usiné du polystyrène, en tant que matériau « tendre » et homogène. Les résultats obtenus sont alors comparés avec ceux du MDF. L'inspection avec le faisceau laser sur les surfaces usinées montre des irrégularités d'usinage sur le MDF. En revanche, aucune dégradation n'a été détectée sur le polystyrène. Par conséquent, les vibrations liées au mouvement en phases d'accélération et décélération du robot ne sont pas remises en cause.

L'étape suivante consiste à analyser les résultats des efforts de coupe, qualité dimensionnelle et interaction entre eux en usinant 3 matériaux différents avec la défonceuse à commande numérique et le robot industriel. Les résultats obtenus démontrent qu'il existe une relation de proportionnalité directe entre les efforts de coupe et la dégradation de la qualité dimensionnelle, et cela indépendamment de la machine utilisée. Plus les forces appliquées pour enlever la matière sont élevées, plus les performances de suivi de trajectoire de l'effecteur diminuent.

En termes de stabilité du système, les mesures ont révélé que plus l'outil usine loin de la base du robot, plus les efforts de coupe fluctuent et plus la qualité dimensionnelle se dégrade. Ceci s'accroît lorsque l'hétérogénéité et la densité du matériau sont élevées. Par conséquent, le robot est moins stable et ses performances en terme de répétabilité en production série se dégradent. Les fluctuations des efforts et la dégradation de la qualité dimensionnelle s'intensifient en changeant le mode de coupe.

Le cas des singularités liées au matériau est abordé. En effet, les mesures dévoilent un saut rapide et brusque des efforts lorsque l'arête coupante traverse un nœud. Ceci engendre, par conséquent, des éclats et des fissures au niveau de la matière et dégrade l'orthogonalité de la coupe.

A la fin du chapitre 3, la variation des vitesses d'avance du robot sur le hêtre a abouti à un endommagement au niveau de la surface usinée sous la forme d'ondulations et d'éclats de matière dues aux déviations de la trajectoire d'outil. Les mêmes expériences de variation des vitesses d'avance du robot sont réalisées sur d'autres essences comme le mélèze (résineux) et le chêne (feuillu) pour étudier la qualité d'usinage. Les résultats trouvés sont similaires à ceux obtenus précédemment (des éclats de matière, des déviations de trajectoire d'outil et des fissures).

4.2 Perspectives :

Parmi les perspectives possibles de ce travail, plusieurs pistes peuvent être envisagées pour améliorer les résultats présentés dans ce manuscrit de thèse et les adapter à des applications plus larges.

Les travaux de recherche réalisés se focalisent sur l'étude du rainurage débouchant. D'autres procédés d'usinage bois par enlèvement de matière peuvent être étudiés et caractérisés en termes d'efforts de coupe, de qualité dimensionnelle et d'interaction. Nous citons, comme exemples, le perçage, le contournage, le sciage....

D'autres essences de bois telles que le chêne, l'épicéa, le bouleau, peuvent être étudiées et caractérisées d'un point de vue effort de coupe et qualité dimensionnelle en utilisant la même méthodologie et le même protocole expérimental adopté dans cette thèse.

D'autres paramètres expérimentaux liés à la cinématique de la coupe comme la profondeur de passe, l'avance par dent et l'épaisseur du copeaux.... peuvent être intégrés dans le protocole expérimental pour déterminer leurs effets sur le procédé d'usinage robotisé.

L'usure de l'outil de coupe en fonction des configurations du robot dans son espace de travail est un sujet important et intéressant qui peut être abordé afin d'établir une carte d'usure comme celle de la rigidité utilisée dans cette thèse.

L'utilisation des tables d'expérience (tables de Tagushi) peut présenter un moyen efficace pour améliorer le mode expérimental et exploiter encore plus de facteurs et déterminer leurs effets sur l'usinage robotisé. Les études d'influence des caractéristiques physiques et mécaniques du matériau sur la robotisation des procédés d'enlèvement de matière et l'effet de variation de conditions de coupe sont des pistes à creuser.

Les essais avec un échantillon porté par le robot est une piste qui nécessite encore quelques développements. Il est possible de mettre en place une approche qui permet d'atténuer les effets des phénomènes aléatoires qui biaisent les mesures des efforts de coupe en usinage pièce portée.

L'amélioration de la stabilité du robot pendant l'enlèvement de matière peut être envisagée par l'élaboration de commandes, en position et en force, capables d'apporter de meilleures performances d'asservissement au niveaux des moteurs du robot. Ceci ne sera réalisable qu'à travers l'identification des paramètres du robot nécessaires pour élaborer le modèle dynamique (inerties, frottement, raideurs...). Cette opération n'est pas une tâche simple vu que les paramètres à identifier sont non linéaires et non stationnaires.

L'optimisation de déplacement de l'organe terminal peut être réalisée à travers l'ajout des capteurs de positions au niveau du bras du robot. L'intégration de ces capteurs dans la commande du robot pourrait permettre de corriger les défauts des articulations.

Références bibliographiques :

Les références bibliographiques sont organisées comme suit :

- Références scientifiques : Elles regroupent les articles de journaux scientifiques, congrès, séminaires, thèse de doctorat, ouvrages, rapports généraux et brevets.
- Références techniques : Elles regroupent les références internet, presse industrielle et fiche techniques.

Références scientifiques :

- [1] Karel Capek, Theatre book "Rossum's Universal Robots," Prague: Translated by Paul Selver and Nigel Playfair, 1921, p. 86
- [2] Pollard.W.L.V and Roselund.H "Position controlling apparatus," US Patent N°2286571, 22-April-1938.
- [3] Henderson.H, "Encyclopedia of computer science and technology," New York: Facts On File, ISBN 978-0-8160-6382-6, 2009.
- [4] George Devol, "Programmed article transfer." US Patent 2988237, 10-Dec-1954.
- [5] Kilby.J.S and Noyce.R.1976. "Invention of the integrated Circuit," *IEEE Transactions on electron devices*. 7 (23):648-653.
- [6] Scheinman.V, Roth.B and Rastegar.J.1973."On the design of computer-controlled manipulators. On the Theory and Practice of Robots and Manipulators," *Proceedings of the First CISM-IFTOMM Symposium*: 93–113.
- [7] Faggin.F, Hoff.M.E, Mazor.S and Shima.M.1996. "The History of the 4004," *IEEE Micro*, vol. 16(6): 10–20.
- [9] Stritter.E and Gunter.T. 1979. "Microsystems and microprocessor architecture for a changing world: The Motorola 68000," *IEEE Microsystems Computer*. 12(2): 43–52.
- [10] Alpert.D and Avnon.D. 1993. "Architecture of the Pentium microprocessor," *IEEE micro*, 13(3): 11–21.
- [14] Lung Wen Tsai "Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators," ISBN: 978-0-471-32593-2.
- [17] Stewart. D. 1965. "A Platform with Six Degrees of Freedom," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 180:371-386.
- [18] Arai. T, Cleary. K, Homma. K and Nakamura.H 1991. "Development of Parallel Link Manipulator for underground excavation task," *International Symposium on Advanced Robot Technology*. 5(4): 541–548.

- [19] Gosselin. C and Hamel. J. 1994. "The Agile Eye: A High – Performance Three – Degree – of – Freedom Camera-Orienting Device" *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 781–786.
- [21] Kaci.L, Briot.S, Boudaud.C and Martinet.P. 2017. "Control-based Design of a Five-bar Mechanism," *New Trends in Mechanism and Machine Science, Springer*:303–311.
- [22] Flavien Paccot, "Contribution à la commande dynamique référencée capteurs de robots parallèles," Thèse de doctorat, Université Clermont Auvergne, 2009.
- [24] Kamarul Bahrin.M.A, Othman.M.F, Nor Azli N.H, and Talib.M.F.2016. "Industry 4.0: a review on industrial automation and robotic" *Jurnal Teknologi* 78: 6–13
- [25] Hermann.M, Pentek. T and Otto.B.2015. "Design-Principles-for-Industrie-4.0-Scenarios" A literature review, Audi Stiftungslehrstuhl Supply Net Order Management. University of Dortmund.
- [27] Henning Kagermann.W.W, Helbig.J, "Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0". Final report of the Industrie 4.0 Working Group, 2013.
- [30] Summers.M. 2005 "Robot Capability Test and Development of Industrial Robot Positioning System for the Aerospace Industry" *SAE Transactions*. 1108–1118.
- [31] Landscheidt.S, Kans.M and Winroth.M. 2017. "Opportunities for Robotic Automation in Wood Product Industries: The Supplier and System Integrators Perspective," *Procedia Manufacturing*. 11: 233–240.
- [34] Milutinovic.D, Glavonjic.M, Slavkovic.N, Dimic.Z, Zivanovic.S, Kokotovic.B and Tanovic.L. 2011. "Reconfigurable robotic machining system controlled and programmed in a machine tool manner" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53 (9–12):1217–1229.
- [36] Trouy M-C, Triboulot.P, "Anatomie du bois: Formation, fonctions et identification" Quae, ISBN 978-2-7592-2349-7. 2015.
- [37] Guitard.D," Mécanique du matériau bois et composites" Cépadués, vol. 1. ISBN 285-4-2815-27. 1987.
- [38] Bodig.J and Goodman.R. 1973 "Prediction of elastic parameters for wood", *wood science*. 5(4):249-264.
- [39] Kivimaa.E, "Cutting forces in wood-working" volume 18. Université du Michigan State Institute for Technical Research, ISSN 0073-1749, 1950.
- [40] McKenzie.W, "Fundamental analysis of the wood-cutting process" vol. 1, Department. of Wood Technology, School of Natural Resources, the University of Michigan: Ann Arbor, UMR2615 1961.

- [41] Norman.C.Franz. 1955. “An analysis of chip formation in wood Machining.” *Forest products journal* University of Michigan.
- [42] Aknouche Hamid, “Etude de l’usure des outils de coupe traités dans le domaine de l’usinage du bois,” Thèse de doctorat en mécanique, Université M'Hamed Bougara, Algérie, 2009.
- [43] Pfeiffer.R, Collet.R, Denaud.L-E and Fromentin.G.2015 “Analysis of chip formation mechanisms and modelling of slabber process” *Wood Science and Technology*.49(1): 41–58.
- [44] Aguilera. A and Méausoone P-J. 2012. "Cutting energy on wood and wood products machining" *Wood and Wood Products*: 57–86.
- [45] Marchal.R, Mothe.F, Denaud L-E, Thibaut.B, Bleron.L.2009 “Cutting forces in wood machining – Basics and applications in industrial processes. A review COST Action E35 2004–2008: Wood machining – micromechanics and fracture,” *Holzforschung*. 63(2)
- [46] Eyma Florent “Caractérisation des efforts de coupe de différentes essences de bois à l’aide de leurs paramètres mécaniques,” Thèse de doctorat en science du bois, Université de Lorraine, Epinal, France, 2002.
- [47] Orłowski.K.A, Ochrymiuk.T, Atkins.A, and Chuchala.D. 2013 “Application of fracture mechanics for energetic effects predictions while wood sawing,” *Wood Science and Technology*. 47(5):949–963.
- [48] Zerizer Abdellatif “Contribution à l’étude de l’usinabilité du M. D. F. (Medium density fiberboard)” Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, 1991.
- [49] Norman C. Franz, “An analysis of the wood-cutting process,” University of Michigan. ISBN: 0472751425-978047275-1426. 2016
- [50] Eugene.M, 1945. “Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip,” *Journal of Applied Physics*. 267–275.
- [51] Koch.P, “Utilization of hardwoods growing on southern pine sites,” *Agricultural Handbook of Southern Research Station* 3: 1124-1985
- [52] Naylor.A, Hackney.P, Perera.N and Clahr.E.2012. “A predictive model for the cutting force in wood machining developed using mechanical properties” *BioResources*. 7(3):2883-2894.
- [53] George E.Woodson and Koch.P. 1970. “Tool Forces and Chip Formation In Orthogonal Cutting Of Loblolly Pine,” *U.S. Department of Agriculture Forest Service Research Paper*. p: 29
- [54] Komatsu M.1993. “Effects of the radial rake angle of the peripheral cutting-edge on the cutting force and machined-surface roughness,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 39:628–635.

- [55] Jin.W and Cai.L.1996. "Study and analysis on cutting forces of oblique cutting of wood," *Holz als Roh- und Werkstoff*. 54(4): 283–286.
- [56] Sheikh-Ahmad.J.1997. "Measurement of Tool Wear and Dulling in the Machining of Particleboard," *Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar*. 659-670
- [57] Harold A. Stewart.A.1980. "Some surfacing defects and problems related to wood moisture content" *wood and Fiber science*. 12(3):175-182.
- [58] Gonçalves.R and Néri.A.C.2005. "Orthogonal cutting forces in juvenile and mature *Pinus taeda* wood," *Scientia Agricola*, 62 (4): 310–318.
- [59] Cool Julie, "Optimisation de l'usinage de finition du bois d'épinette noire pour fins d'adhésion," Thèse de doctorat en science du bois, Université Laval, p. 276.2011
- [60] Boucher Jérémy, "Caractérisation de la coupe rotative du bois : interaction machine / outil / pièce / procédé," Thèse de doctorat en science du bois, Université de Lorraine, Nancy, 2007.
- [61] Méausoone Pierre Jean, "Approche en ingénierie concurrente pour les industries du bois," Thèse de doctorat en science du bois, Université Henri Poincaré, Nancy, 1996.
- [62] Eyma.F, "Influence du matériau bois dans le calcul de l'effort de coupe," Université Henri Poincaré-Nancy 1, Epinal, Rapport d'études bibliographique du DEA de sciences de Sciences du bois, 1999.
- [63] Aguilera Alfredo "Optimisation des conditions de coupe pour l'usinage du bois application de la méthode couple outil matière au défonçage des panneaux de fibres de densité moyenne," Thèse de doctorat en science du bois, Université de Nancy 1, 2000.
- [64] Eyma.F, Méausoone P.-J, Larricq.P and Marchal.R.2005. "Utilization of a dynamometric pendulum to estimate cutting forces involved during routing. Comparison with actual calculated values," *Annals of Forest Science*. 62(5): 441–447.
- [65] Cristóvão Luis "Machining Properties of Wood: Tool Wear, Cutting Force and Tensioning of Blades" Thèse de doctorat. Université de technologie Skelleftea, Suède 2013.
- [66] Andersson J-E and Johansson G.2001. "Robot control for wood carving operations," *Mechatronics*.11(4): 475–490.
- [67] Costes J-P and Larricq.P.2002 "Towards high cutting speed in wood milling," *Annals of Forest Science*. 59 (8): 857–865.
- [68] Thoma.H, Peri.L and Lato.E. 2015. "Evaluation of wood surface roughness depending on species characteristics," *Maderas. Ciencia y tecnología*. 10–18.
- [69] Aguilera.A and Martin.P. 2001 "Machining qualification of solid wood of *Fagus silvatica* L. and *Picea excelsa*: cutting forces, power requirements and surface roughness," *Holz als Roh- und Werkstoff*. 59 (6): 483–488.

- [70] Bernard Thibaut “Le processus de coupe du bois par déroulage,” Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Languedoc, 1988.
- [71] Igaz.R, Kminiak.R, Krišťák.L, Němec.M, and Gerge.T.2018. “Methodology of Temperature Monitoring in the Process of CNC Machining of Solid Wood” *Sustainability*, 11(1): 95.
- [72] Troppová.E, Tippner.J, Hrčka.R, and Halachan.P. 2013. “Quasi-Stationary Measurements of Lignamon Thermal Properties” *BioResources*, 8 (4): 6288–6296.
- [73] Kubovský.I, Oberhofnerová.E, Kačík.F and Pánek.M.2018 “Surface Changes of Selected Hardwoods Due to Weather Conditions”. *Forests*. 9 (9): 557.
- [74] Ratnasingam.J, Ramasamy.G, and Pew.T.M. 2010 “Tool Temperature and Cutting Forces during the Machining of Particleboard and Solid Wood,” *Journal of Applied Sciences*. 2881–2886.
- [76] Kollmann and Coté, "Principles of Wood Science and Technology", *Solid Wood*, vol.1. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag. ISBN 978-3-642-87928-9
- [77] Marchal Rémy, “Valorisation par tranchage et déroulage des bois de chênes méditerranéens,” Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques, Languedoc, 1989.
- [78] Mothe Frédéric, “Aptitude au déroulage du bois de Douglas : conséquences de l’hétérogénéité du bois sur la qualité des placages,” Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Vandoeuvre les Nancy, 1988.
- [79] Zhaolong.Z, Dietrich.B, Mats.E, Birger.M, Xiaolei.G, Pingxiang.C and Nanfeng.Z. 2018.“Cutting forces and chip formation revisited based on orthogonal cutting of Scots pine,” *Holzforschung*, :73(2):131–138
- [80] Gauvent Marc, “Optimisation de la durée de vie d’un outil de coupe pour l’industrie du bois. Analyse et compréhension des modes d’usure. Mise au point de solutions innovantes avec tests industriels.” Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, 2001.
- [81] Pahlitzsch.G and Sandvob.E.1970 “Verschleißuntersuchungen beim Fräsen von Faserhartplatten,” *Holz als Roh-und Werkstoff*, 28(7): 245–254.
- [82] McKenzie.W.M and Karpovich.H. 1975 “Wear and blunting of the tool corner in cutting a wood-based material,” *Wood Science and Technology*. 9(1): 59–73.
- [83] Itaya.S and Tsuchiya.A. 2003. “Development of CrN coated tool to create smooth surface of solid wood aiming to mit sanding process in furniture production,” *The Proceeding of the 16th International Wood Machining Seminar*. 74–81.
- [84] Tratar.J, Franci. P and Janez. K.2014. “Tool Wear Performance Evaluation in MDF Machining with Anthropomorphic Robot.” *Tehnički Vjesnik*. 21(4) : 911–915.

- [85] Hernández.R.E and Almeida.G.J.2007. “Effects of wood density and interlocked grain on the shear strength of three Amazonian Tropical hardwoods,” *Wood and Fiber Science* 35(1): 154–166.
- [86] Chuchala.D, Orłowski.K, Sandak.A, Sandak.J, Pauliny.D and Barański.J.2014. “The Effect of Wood Provenance and Density on Cutting Forces While Sawing Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.),” *Bioresources*. 9: 5349–5361
- [87] Wehbe Toufic “Étude des vibrations de pièce mince durant l’usinage par stéréo corrélation d’images” Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Toulouse, 2010.
- [88] Boughedaoui.R, Belaidi.I, and Ouali.M. 2014. “Modelisation des vibrations d’usinage,” *International conference of modeling and simulation ETB Blida DZ* <https://doi.org/10.13140/2.1.3726.3367>.
- [89] Olabi.A, Damak.M, Bearee.R, Gibaru.O and Leleu.S. 2012. “Improving the accuracy of industrial robots by offline compensation of joints errors” *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. 492–497
- [90] Bouali.A, Yagoubi.M and Chevrel.P.2007. “Systèmes LPV rationnels et réalisations implicites affines: analyse et commande.” GdR CNRS MACS, GT MOSAR, Approches LPV et gain-scheduling.
- [91] Bouali.A, Yagoubi.M and Chevrel.P.2007. “Systèmes LPV rationnels et réalisations implicites affines: analyse et commande.” *GdR CNRS, Thématiques: Approches LPV et gain-scheduling*.
- [92] Makarov Maria, “Contribution à la Modélisation et la Commande Robuste de Robots Manipulateurs à Articulations Flexibles - Applications à la Robotique Interactive.,” Thèse de doctorat, Supélec, 2013.
- [93] Moberg Stig “On Modeling and Control of Flexible Manipulators,” Thèse de doctorat, Linköping University, Linköping, Sweden, 2007.
- [94] Brooks.R.A.1983. “Planning Collision- Free Motions for Pick-and-Place Operations,” *The International Journal of Robotics Research*. 2(4): 19–44.
- [95] Faverjon.B. 1984. “Obstacle avoidance using an octree in the configuration space of a manipulator,” *Proceedings, IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Atalanta, USA.
- [96] Craig. J, Ping.H and Sastry.S.1986. “Adaptive control of mechanical manipulators,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 190–195.
- [97] Liégeois.A.1977. “Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms.,” *IEEE Transactions Systems Man Cybernetics*. 1(7): 868–871.
- [98] Vukobratovic. M and Kircanski.J.1984. “A dynamic approach to nominal trajectory synthesis for redundant manipulators,” *IEEE Transaction. Systems Man Cybernetics*. 580–586.

- [99] Yoshikawa. T, "Manipulability of robotic mechanisms," *International Journal of Robotics Research*. 3–9, 1985.
- [100] Sciavicco.L and Siciliano.B. "Modelling and Control of Robot Manipulators" 2nd edition. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. London. ISBN 978-1-4471-0449-0, 2000.
- [101] Khalil. W, Liegois. A. 1979 "Commande dynamique des robots," *RAIRO automatique / Systems analysis and control*.13 (2): 189–201.
- [102] Luh. J, Walker. M and Paul. R.1980. "Resolved acceleration control of mechanical manipulators," *IEEE Transactions on Automatic Control (ITAC)*.25(3): 468–474.
- [103] Sheikh-Ahmad.J and Morita.T.2002 "Tool Coatings for Wood Machining: Problems and Prospects," *Forest Products Journal*. 43–51
- [104] Szwajka.K and Trzepieciński.T. 2016. "Effect of tool material on tool wear and delamination during machining of particleboard," *Journal of Wood Science*. 62(4): 305–315
- [105] Chladil.J, Sedlák.J, Šebelová.E.R, Kučera.M, and Dado.M.2019 "Cutting Conditions and Tool Wear when Machining Wood-Based Materials," *BioRes*. 14(2): 3495-3505
- [106] Magoss.E.2008. "General Regularities of Wood Surface Roughness" *Acta Silv. Lign. Hung*, 4:81-93.
- [107] Koleda.P, M. Korčok.M, Barčík.S, and Il'áš.S.2018. "Effect of Temperature of Heat Treatment on Energetic Intensity of Flat Milling of Picea Abies," *Management Systems in Production Engineering*. 26 (3):151–156.
- [108] Sandak.J, Goli.G, Cetera.P, Sandak.A, Cavalli.A, and Todaro.L.2017 "Machinability of Minor Wooden Species before and after Modification with Thermo-Vacuum Technology," *Materials (Basel)*. 10(2).
- [109] Sofuoğlu.S.D and Kurtoğlu.A. 2014. "Some machining properties of 4 wood species grown in Turkey," *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 38(3):420-427.
- [110] "Machining and Related Characteristics of United States Hardwoods," U.S. department of agriculture. Forest service. p.70. August 1962.
- [111] Kuljich.S, Herna.R.E, Llave.A.M, and Koubaa.A.2013 "Effects of cutting direction, Rake angle and depth of cut on cutting forces and surface quality during machining of balsam Fir", *Wood and fiber science*, 45 (3): 11-15
- [112] Porankiewicz.B.2013. "Wood Machining Investigations: Parameters to Consider for Thorough Experimentation," *BioResources*, 9(1): 4–7.
- [113] Đurković.M, Mladenović.K.G, Tanović.L and Danon.G.2018 " Impact of Feed Rate, Milling Depth and Tool Rake Angle in Peripheral Milling of Oak Wood on the Cutting Force," *Maderas. Ciencia y Tecnología* 20(1) : 25–34.

- [114] Thibaut.B, Denaud.L-E Collet.R, Marchal.R, Beauchêne.J, Mothe.F, Méausoone P-J, Martin. P, Larricq.P, Eyma.F, “Wood machining with a focus on French research in the last 50 years,” *Annals of Forest Science*. 73(1): 163–184.
- [115] Svatoš.M, Kopecký.Z and Rousek.M.2011 “Effects of the technology of machining on the surface quality of selected wood,” *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun*. 59(6): pp. 329–336.
- [116] Pliego-Jiménez.J and Arteaga-Pérez.M.A, “Adaptive position/force control for robot manipulators in contact with a rigid surface with uncertain parameters,” *European Control Conference*. 22:1–12.
- [117] Pandremenos J, Doukas C, Stavropoulos P, Chryssolouris G. 2011. Machining with robots: a critical review. *7th International Conference on Digital Enterprise Technology Athens, Greece Proceedings of DET*: 1–9.
- [118] Sirinterlikci.M, Tiryakioglu.M, Bird.A, Harris.A, and Kweder.K. 2009 “Repeatability and Accuracy of an Industrial Robot: Laboratory Experience for a Design of Experiments Course,” *Technology. Interface Journal*. 9 (2). ISSN 1523-9926
- [119] Zhong.L, Bi.Q, Huang.N, and Wang.Y.2018. “Dynamic accuracy evaluation for five-axis machine tools using S trajectory deviation based on R-test measurement,”. *International Journal of Machine and Tool Manufacture*.125:20–33
- [120] Damak.M, Grosbois.J, and Desmet.P. “Vision robot based absolute accuracy measurement - calibration and uncertainty evaluation,” *35th International Symposium on Robotics*, March, Paris,France. 2004.
- [121] Deblaise Dominique, “Contribution à la modélisation et à l’étalonnage élasto-géométriques des manipulateurs à structure parallèle,” Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Rennes. 2006.
- [122] Khalil.W and Dombre.E, "Modeling, Identification and Control of Robots. Butterworth-Heinemann". ISBN 978-0-08-053661-3. 2004.
- [123] Jean-Pierre Merlet "Jacobian, manipulability, condition number and accuracy of parallelrobots," ISRR, Oct 2005, San Francisco.
- [124] Manjunath.T.C and Ardil.C.2008 “Development of A Jacobean Model for A 4-Axes Indigenously Developed SCARA System,” *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*. 2(10): 7.
- [125] Nasr.M, Marey.M, Abdelhameed.M.M, and Tolbah.F.A.2018. “Using Genetic Algorithm for Singularity Avoidance in Positioning Tasks of a Robotic Arm,” *International Journal "Information Models and Analyses*. 7(2): 14.
- [126] Wenger Philippe, "Aptitude d’un robot manipulateur à parcourir son espace de travail en présence d’obstacles." Thèse de doctorat. Université de Nantes 1989.

- [127] Klimchik.A, Pashkevich.A, Caro.S, and Furet.B.2017. “Calibration of Industrial Robots with Pneumatic Gravity Compensators,”*IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Munich, Germany. 2017.
- [128] Klimchik.A, Ambiehl.A, Garnier.S, Furet.B, Pashkevich.A.2017.“Efficiency evaluation of robots in machining applications using industrial performance measure,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*.48:12-29
- [129] Abele.E, Weigold.M, and Rothenbecher.S.2007. “Modeling and Identification of an Industrial Robot for Machining Applications,” *CIRP Annals. - Manufacturing Technology*. 56 (1): 387–390.
- [130] Doukas.C, Pandremenos.J, Stavropoulos.P, Foteinopoulos.P and Chryssolouris.G.2012. “On an Empirical Investigation of the Structural Behavior of Robots,” *Procedia CIRP* 3: 501–506.
- [131] Dumas.C, Caro.S, Garnier.S and Furet.B, “Joint stiffness identification of six-revolute industrial serial robots,” *Robotics and Computer.-Integrated. Manufacturing*. 27(4): 881–888.
- [132] Qin Jin “Commande hybride position/force robuste d’un robot manipulateur utilisé en usinageet/ou en soudage” Thèse de doctorat. Arts et Métiers ParisTech, 2013.
- [134] Khan.W.A and Angeles.J.2005 “The Kinetostatic Optimization of Robotic Manipulators: The Inverse and the Direct Problems,” *Sandvik Coroman*.128(1):168–178.
- [137] Kubs.J, Gasparik.M, Gaff.M, Kaplan.L, Cekovska.H, Jezek.J, Sticha.V. 2017. “Influence of thermal treatment on power consumption during plain milling of lodgepole pine (*Pinus contorta* subsp. *murrayana*),” *Bioresources*, 12:407–418.
- [139] Karim.A and Verl.A. “Challenges and obstacles in robot-machining,” *Robotics (ISR), 44th International Symposium*. 1–4.Seoul, South Korea. 2013
- [140] Bendikiene.R, Keturakis.G, Pilkaite.T and Pupelis.E.2015. “Wear Behaviour and Cutting Performance of Surfaced Inserts for Wood Machining,” *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*. 61(7-8): 459-464
- [141] Naylor.A, Hackney.P, Perera.N and Clahr.E, “A predictive model for the cutting force in wood machining developed using mechanical properties,”
- [142] Curti.R, Marcon.B, Collet.R, Lorong.P, Denaud L-E and Pot.G.2017. “Cutting forces and chip formation analysis during green wood machining,” *Conference: International wood machining seminar at Warsaw*.
- [143] Costes.J-P, Ko.P-L, Ji.T, Petit.C-D and Altintas.Y.2004. "Orthogonal cutting mechanics of maple: modeling a solid wood-cutting process". *Journal of Wood Science* 50: 28–34.

- [144] Cordes.M, Hintze.W and Altintas.Y, “Chatter stability in robotic milling,” *Robotics. Computer-Integrated.Manufacturing.* 55(A): 11–18.
- [145] Ioan Alexandru Ivan “Utilisation des résonateurs piézoélectriques fonctionnant en mode d’épaisseur pour la réalisation de capteurs,” Thèse de doctorat. Université Franche-Comté. 2006.
- [146] Ayari.O, Bouali.A, Méausoone P-J. 2020." Cutting forces and accuracy characterization during wood machining with serial robots," *European Journal of Wood and Wood product.* <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01539-4>
- [147] Jose Gutierrez Tapia "Modélisation et identification géométrique de robots utilisés pour des opérations d'usinage. Médecine humaine et pathologie." Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2016.
- [148] Thi Van Diem “Modélisation du comportement au feu des structures en bois,” thèse de doctorat Université de Lorraine, Epinal, France, 2018.
- [149] Yves Couasnet "Propriétés caractéristiques des matériaux de construction" Memento 4 - ème éditions ISBN 2281143457. 2007.
- [150] Laurent St. 1971. "Influence of knots on cutting forces in sawmilling." *Canadian Journal of Forest and Research.* 1(1):43-56
- [151] Malcom F.B and Hallock.H. 1972. "Effects of three sawing methods on wrap of Hand Maple Dimension cutting" *Forest Products Journal.* 22(4):57-60
- [152] Tomasz Gawronski.2012."Optimisation of CNC routing operations of wooden furniture parts." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* .67: 2259–2267.

Références techniques :

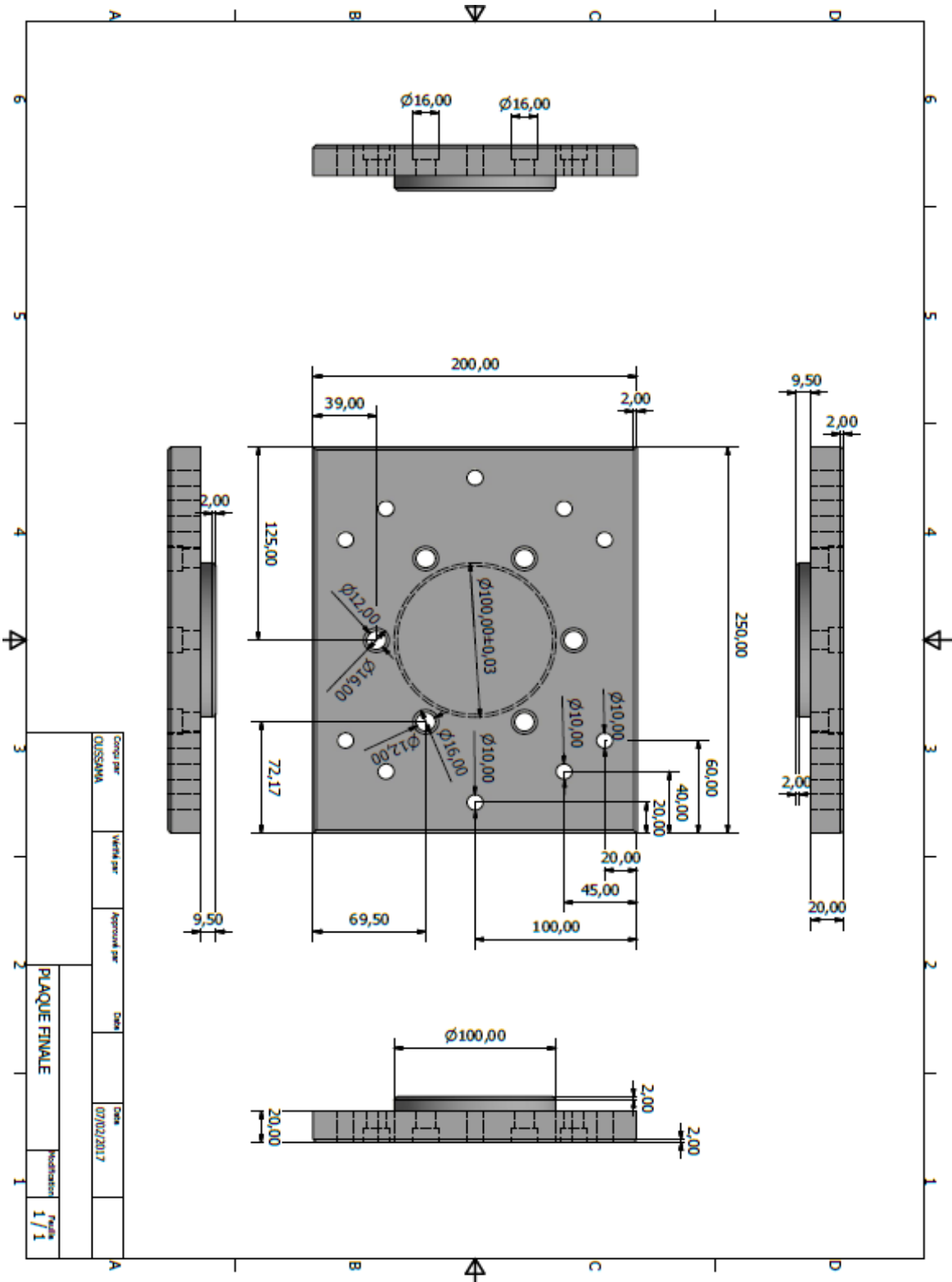
- [8] “KUKA.” KUKA Robotics, 10-Jun-2016.
<https://www.campus-industrie.eu/wp-content/uploads/2016/07/kuka.pdf>
https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/9cb8e311bfd744b4b0eab25ca883f6d3/kuka_pb_schwere_tl_en.pdf
- [11] YASKAWA company, “IA20 Motoman.” Oct-2006.
<https://pdf.directindustry.com/pdf/yaskawa-europe-gmbh/motoman-ia20/14473-10356.html>
- [12] Kuka company, “Kuka Robotics”
<https://www.kuka.com/fr-fr/produits-et-prestations/syst%C3%A8mes-de-robots>
- [13] Factory & automation company “Fanuc Robotics” <https://www.fanuc.eu/uk/en/robots>.

- [15] Inventaire interne LERMAB. Equipe d'usinage. 10 pages. 2019
- [16] "Fiche IRB 6660 PreMa FR.pdf." <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-6660>
- [20] Giddings and Lewis, "Giddings and Lewis Machine Tool".1995. https://dk8mx37zdr9bp.cloudfront.net/metal-cutting-composites/Giddings%20%26%20Lewis/Giddings%20Documents/FDLHistory_2019_v1_pages.pdf
- [23] Guide pratique de l'usine du futur- enjeux et panorama de solution.
- [26] Consortium II. Fact Sheet. 2015. https://www.iiconsortium.org/docs/IIC_FACT_SHEET.pdf
- [28] International federation of Robotics, "Executive_Summary_WR_2018 and 2019 Industrial_Robots.pdf." 2019. https://ifr.org/downloads/press2018/Executive_Summary_WR_2018_Industrial_Robots.pdf
- [29] ABB-Robotic-product-range-brochure-2018.
- [32] GLF Bois, "Fabrique des palettes bois en Rhone-Alpes.". <https://www.glfbois.fr/>
- [33] Atlante Menuiserie- Fermetures-Portails. <https://www.atlantem.fr.>
- [35] Denis.P, "Structure d'une tige," *Sylviculture-Ecologie*. 26-November-2005. <http://sylviculture-ecologie.blogspot.com/2005/11/un-peu-de-lecture-structure-dune-tige.html>.
- [75] "Wood Handbook, Wood as an Engineering Material," p. 509. https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf
- [133] Felipe Diniz, "Condition number and matrices," https://www.researchgate.net/publication/315096515_Condition_number_and_matrices
- [135] Sandvik Coromant, *die_mold.pdf* <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/fr-fr/c-2900-166.pdf>
- [136] Moser.P, "Cutting data recommendations," Uddeholm Corrax.2007. https://www.uddeholm.com/files/Cutting_Data_Corrax_eng.pdf
- [138] Herbert Schulz, "The History of High-Speed Machining," 1999. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.469.365&rep=rep1&type=pdf>
- [152] Bois de construction – Les panneaux fibres de bois – Le MDF. <http://www.comptoirdesbois.fr/les-bois-de-construction-les-panneaux-fibres-de-bois/>

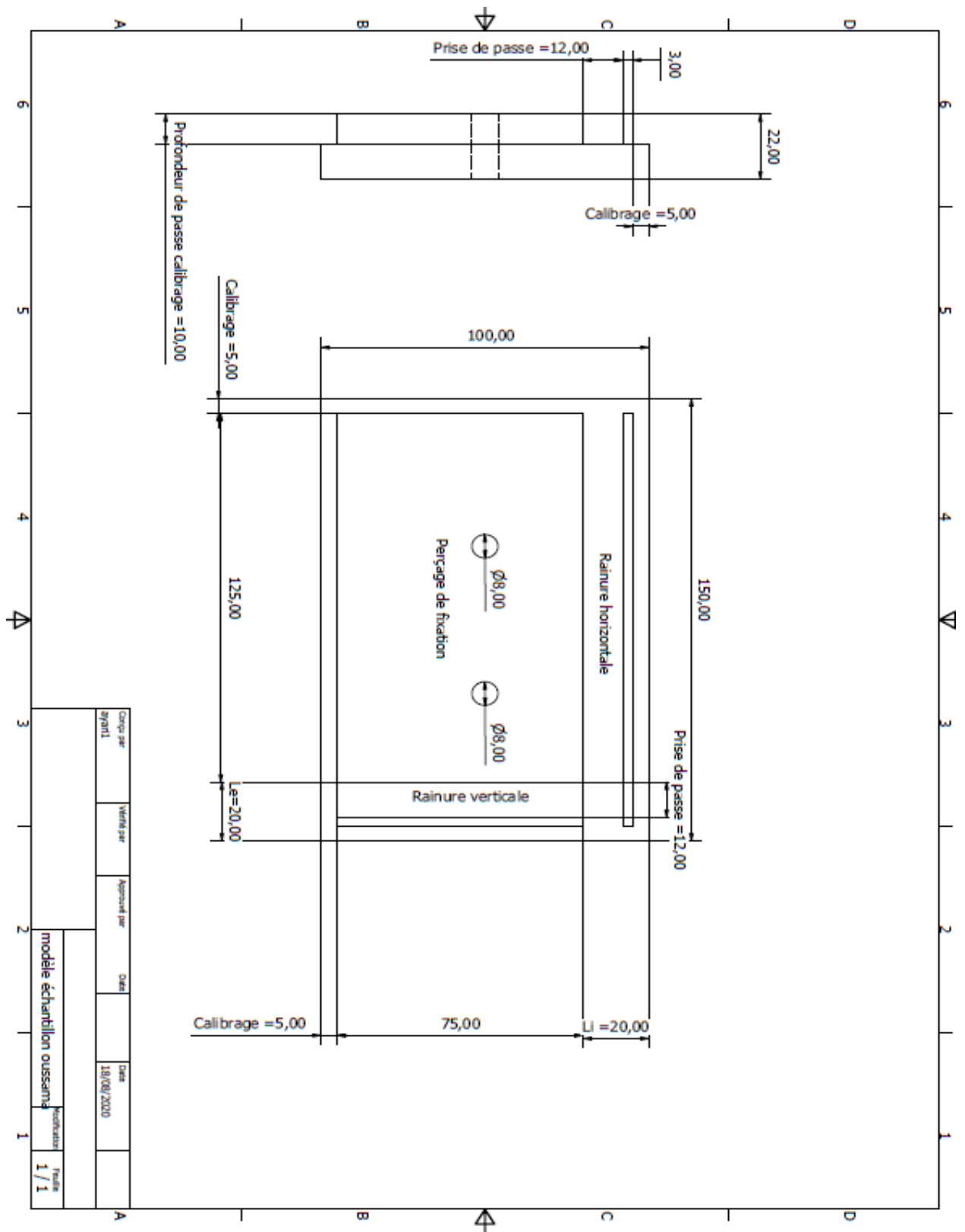
[153] <https://tropix.cirad.fr/FichiersComplementaires/FR/Temperees/HETRE.pdf>

[154] <https://tropix.cirad.fr/FichiersComplementaires/FR/Temperees/SAPIN.pdf>

Annexes :



Plaque du maintien du capteur



Dessin Mécanique de l'échantillon

Raideurs aux articulations des axes du Kuka KR210 L180

Raideurs aux articulations	Valeurs (Nm/rad)
K₁	6,21x10 ⁶
K₂	6,66x10 ⁶
K₃	3,91x10 ⁶
K₄	3,78x10 ⁶
K₅	3,29x10 ⁶
K₆	2,28x10 ⁶

Résumé de thèse :

Caractérisation des usinages robotisés : Application aux processus de transformation du matériau bois.

De nos jours, la robotisation de l'usinage du bois par enlèvement de matière reste une tâche compliquée et peu répandue. Cela revient également aux contraintes non négligeables auxquelles est soumise l'utilisation d'un robot industriels (dit aussi anthropomorphe ou polyarticulé). Celles-ci concernent en particulier les opérations qui demandent une grande précision et une certaine agilité. En effet, les efforts exercés sur les articulations du robot et sur l'outillage se heurtent à une rigidité naturelle insuffisante des robots polyarticulés. Ce qui fait perdre la machine ses performances en termes de rendement et efficacité et dégrade la qualité de l'usinage. De plus, les propriétés variables du matériau bois ne fait pas du robot polyarticulé le candidat idéal pour des procédés d'usinage par enlèvement de matière. Pour répondre à cette problématique nous cherchons, à travers cette thèse, à améliorer l'usinage du bois robotisé en prenant en compte les difficultés technologique majeures : Rigidité naturelle, Qualité dimensionnelle d'usinage et efforts de coupe et interaction entre eux. Ainsi les difficultés liées à l'anatomie du bois : Hétérogénéité, anisotropie, texture fibreuse et les singularités. Pour solutionner cette problématique nous avons utilisé une machine-outil à commande numérique (CNC) et un robot anthropomorphes ®Kuka équipé d'un moteur d'usinage à grande vitesse. Nous avons instrumenté notre banc expérimental par une chaîne de mesure d'effort et une table à mesurer numérique pour quantifier les erreurs dimensionnelles des profils usinés. Trois matériaux du bois sont usinés : Feuillu (Hêtre), résineux (Sapin) et bois dérivé (MDF). Les résultats obtenus démontrent qu'il existe une relation de proportionnalité directe entre les efforts de coupe et la dégradation de la qualité dimensionnelle, et cela indépendamment de la machine utilisée. Plus les forces appliquées pour enlever la matière sont élevées, plus les performances de suivi de trajectoire de l'effecteur diminuent. En termes de stabilité du système, les mesures ont révélé que plus l'outil usine loin de la base du robot, plus les efforts de coupe fluctuent et plus la qualité dimensionnelle se dégrade. Ceci s'accroît lorsque l'hétérogénéité et la densité du matériau sont élevées. Par conséquent, le robot est moins stable et ses performances en terme de répétabilité en production série se dégradent. Les fluctuations des efforts et la dégradation de la qualité dimensionnelle s'intensifient en changeant le mode de coupe. Les efforts de coupe se multiplient par 8 lorsque l'outil usine perpendiculairement aux fils du bois.

Le cas des singularités liées au matériau est abordé. En effet, les mesures dévoilent un saut rapide et brusque des efforts qui se multiplie par 3 lorsque l'arête coupante traverse un nœud. Ceci engendre, par conséquent, des éclats et des fissures au niveau de la matière et dégrade l'orthogonalité de la coupe. La variation des vitesses d'avance du robot de 4m/min à 9m/min en usinage du hêtre a abouti à un endommagement au niveau de la surface usinée sous la forme d'ondulations et d'éclats de matière dues aux déviations de la trajectoire d'outil. Les mêmes expériences de variation des vitesses d'avance du robot sont réalisées sur d'autres essences comme le mélèze (résineux) et le chêne (feuillu) pour étudier la qualité d'usinage. Les résultats trouvés sont similaires à ceux obtenus précédemment (des éclats de matière, des déviations de trajectoire d'outil et des fissures).

Mots clefs : robot, usinage du bois, efforts de coupe.

Summary :

Characterization of robotic machining : Application to wood material transformation processes.

Nowadays, the robotization of wood machining remains a complicated and uncommon task. This is also due to the significant constraints to which the use of an industrial robot (also known as anthropomorphic or polyarticulated) is subject. These particularly concern operations that require a high degree of precision and agility. Indeed, the forces exerted on the robot's articulations and on the tooling come up against the insufficient natural rigidity of polyarticulated robots. This causes the machine to lose its performance in terms of output and efficiency and degrades the quality of machining. In addition, the variable properties of the wood material do not make the polyarticulated robot the ideal candidate for material removal machining processes. In order to answer this problem, we seek, through this thesis, to improve the machining of robotized wood by taking into account the major technological difficulties: natural rigidity, dimensional quality of machining and cutting forces and interaction between them. Thus the difficulties related to the wood anatomy: Heterogeneity, anisotropy, fibrous texture and singularities. To solve this problem we used a numerically controlled (CNC) machine tool and an anthropomorphic @Kuka robot equipped with a high-speed machining engine. We instrumented our experimental bench with a force measuring chain and a digital measuring table to quantify the dimensional errors of the machined profiles. Three wood materials are machined: Hardwood (Beech), softwood (Fir) and derived timber (MDF). The results obtained show that there is a direct proportional relationship between cutting forces and degradation of dimensional quality, regardless of the machine used. The higher the forces applied to remove the material, the more the tracking performance of the end effector decreases. In terms of system stability, measurements have shown that the farther the tool works from the robot base, the more the cutting forces fluctuate and the more the dimensional quality deteriorates. This becomes more pronounced when material heterogeneity and density are high. As a result, the robot is less stable and its performance in terms of repeatability in series production degrades. Fluctuations in stress and degradation of dimensional quality are intensified by changing the cutting mode. Cutting forces increase by a factor of 8 when the tool works perpendicular to the wood grain. The case of material-related peculiarities is discussed. Indeed, measurements show a rapid and sudden jump in forces which multiplies by 3 when the

cutting edge passes through a knot. This leads to splinters and cracks in the material and degrades the orthogonality of the cut. The variation of the robot feed rates from 4m/min to 9m/min in beech machining resulted in damage to the machined surface in the form of material ripples and splinters due to deviations in the tool path. The same experiments on the variation of the robot feed rates are carried out on other species such as larch (softwood) and oak (hardwood) to study the machining quality. The results found are similar to those obtained previously (material splinters, tool path deviations and cracks).

Keywords: robot, wood machining, cutting forces.