



HAL
open science

Nouvelle méthode de génération de gammes de fabrication prenant en compte des paramètres économiques et environnementaux

Anoire Ben Jdidia

► **To cite this version:**

Anoire Ben Jdidia. Nouvelle méthode de génération de gammes de fabrication prenant en compte des paramètres économiques et environnementaux. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Paris Saclay (COMUE); Université de Sfax (Tunisie), 2019. Français. NNT : 2019SACLCO28 . tel-02283158

HAL Id: tel-02283158

<https://theses.hal.science/tel-02283158>

Submitted on 10 Sep 2019

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.

Nouvelle méthode de génération de gammes de fabrication prenant en compte des paramètres économiques et environnementaux

Thèse de doctorat de l'Université de Sfax
et de l'Université de Paris-Saclay, préparée à CentraleSupélec

École doctorale n°579 : sciences mécaniques et énergétiques,
matériaux et géosciences (SMEMAG)

Spécialité de doctorat : génie mécanique

Thèse présentée et soutenue à Saint Ouen, le 4 Juillet 2019, par

Anoire BEN JDIDIA ELLEUCH

Composition du Jury :

Christophe TOURNIER Professeur des universités, URPA, ENS Cachan	Président
Samir LAMOURI Professeur des universités, ENSAM	Rapporteur
Olivier BAREILLE Maître de conférences HDR, ECL	Rapporteur
Lasaad WALHA Professeur des universités, ENIS (LA2MP)	Examineur
Mounir BEN AMAR Maître de conférences, Université Paris 13	Examineur
Lucie ROULEAU Maître de conférences, LMSSC / CNAM Paris	Examinatrice
Mohamed Taoufik KHABOU Professeur des universités, ENIS (LA2MP)	Directeur de thèse
Alain RIVIERE Professeur des universités, SUPMECA (QUARTZ)	Directeur de thèse
Alain BELLACICCO Professeur agrégé, SUPMECA (QUARTZ)	Encadrant
Taissir HENTATI Maître assistante habilitée, ENIS (LA2MP)	Encadrante
Mohamed HADDAR Professeur des universités, ENIS (LA2MP)	Invité

Je dédie cette thèse :

A mes parents

A mon Mari

A mon futur enfant

A mon frère et son épouse

A mes beaux parents

Remerciements

Ce travail de recherche est effectué dans le cadre d'une thèse en co-tutelle entre laboratoire de Mécanique, Modélisation et Production (LA2MP) du département de Génie Mécanique de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax et le Laboratoire QUARTZ de l'Institut Supérieur de Mécanique de Paris (SUPMECA).

Je voudrais remercier très vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner cette thèse et pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail. J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur Mohamed HADDAR, Monsieur Mohamed Taoufik KHABOU et Madame Taissir HENTATI pour la confiance, la patience et l'aide qu'ils m'ont accordé au cours de ces années pour la qualité scientifique de leurs remarques et pour m'avoir fait découvrir ce sujet de recherche.

Je remercie infiniment Monsieur Alain RIVIERE et Monsieur Alain BELLACICCO, pour leur confiance de m'avoir accueilli au sein de leur équipe au QUARTZ ainsi que pour les nombreuses discussions que nous avons eu ensemble, pour la qualité scientifique de leurs remarques et pour le temps qu'ils ont bien voulu me consacrer.

Je remercie vivement Messieurs Samir LAMOURI et Olivier BAREILLE pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent à mes amis du LA2MP et du QUARTZ pour m'avoir apporté leur aide, leur soutien et la chaleur humaine dont j'avais tant besoin.

Liste des figures	v
Liste des tableaux	vii
Liste des notations	viii
Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 . Etude Bibliographique	4
1. Introduction	5
2. Architecture d'une machine outil à commande numérique.....	5
3. Consommation d'énergie par les machines-outils.....	6
3.1 Puissance consommée par la rotation de la broche.....	9
3.2 Puissance consommée par l'avance d'un axe	10
3.3 Puissance de coupe	11
4. Etat de l'art.....	13
4.1 Modélisation de l'énergie consommée par une machine-outil	13
4.1.1 Modélisation basée sur les composantes d'une machine	13
4.1.2 Modélisation basée sur le taux d'enlèvement de matière	16
4.1.3 Modélisation basée sur le processus d'usinage	17
4.2 Optimisation de l'énergie consommée par une machine-outil.....	18
4.2.1 Optimisation basée sur le contrôle des paramètres de coupe.....	18
4.2.2 Optimisation basée sur le contrôle de l'outil	20
5. Conclusion.....	21
Chapitre 2 . Modélisation de l'Energie de Coupe Consommée par une Machine Outil.....	22
1. Introduction	23
2. Modélisation de la broche.....	23
2.1 Modélisation de l'effort de coupe.....	23
2.2 Modélisation de l'effort des roulements	26
2.3 Modélisation de l'arbre de la broche par éléments finis.....	27
2.4 Equation de mouvement	27
3. Modélisation de l'énergie consommée par la table d'avance	27

4.	Modélisation de l'énergie consommée par la broche	30
4.1	Modélisation de la puissance de l'enlèvement de matière	30
4.2	Modélisation de la puissance des roulements	31
5.	Modélisation de l'énergie consommée par une machine-outil	33
5.1	Modèle découplé	35
5.2	Modèle couplé	35
6.	Conclusion.....	40
Chapitre 3 . Etude d'une fraiseuse CNC Feeler FV-760.....		41
1.	Introduction	42
2.	Présentation de l'étude expérimentale	42
3.	Puissance et énergie consommées par la table d'avance	46
3.1	Résultats expérimentaux.....	46
3.2	Résultats numériques	47
3.2.1	Comparaison entre le modèle statique, quasi statique et dynamique	48
3.2.2	Comparaison entre l'énergie et la puissance numériques et expérimentales	50
3.2.3	Impact de la masse de la table sur la consommation d'énergie	53
4.	Puissance et énergie consommées par la broche	54
4.1	Résultats expérimentaux.....	54
4.2	Résultats numériques.....	55
4.2.1	Impact de la variation des paramètres de coupe	55
4.2.2	Impact de la présence des défauts de roulement	57
5.	Puissance et énergie consommées par une fraiseuse type Feeler CNC 760	64
6.	Conclusion.....	67
Chapitre 4 . Optimisation de l'Energie Consommée par une Machine Outil.....		69
1.	Introduction	70
2.	Optimisation de l'énergie consommée par une opération de surfacage.....	70
2.1	Fonctions objectifs.....	70
2.1.1	Temps de production	70

2.1.2	Coût de production.....	71
2.1.3	Energie consommée.....	72
2.1.4	Rugosité.....	72
2.2	Contraintes.....	72
2.2.1	Contrainte liée à l'effort de coupe	72
2.2.2	Contrainte liée à la puissance de coupe.....	73
2.2.3	Contrainte liée à la résistance pratique à la rupture	73
3.	Formulation mathématique.....	73
4.	Optimisation à l'aide de l'algorithme PSO	74
5.	Résultats et discussions	78
5.1	Optimisation de l'énergie consommée lors d'une seule passe de surfacage.....	79
5.2	Optimisation de l'énergie consommée pour le surfacage multi-passes	81
5.3	Comparaison entre les deux modèles globales d'optimisation.....	83
6.	Conclusion.....	84
	Conclusions et Perspectives	86
	Références	89
	Annexe (A) :	94

Liste des figures

Figure 1.1. Architecture d'une machine outil	6
Figure 1.2. Consommation d'énergie en US en 2012 [Zhou et al, 2016]	7
Figure 1.3. Répartition de la puissance dans une machine-outil	7
Figure 1.4. Répartition de l'énergie constante et variable pour une fraiseuse à 3 axes [Dahmus et Gutowski (2004)]	8
Figure 1.5. Comparaison entre les puissances de rotation de la broche en fonction des vitesses de rotation pour différents types de machines outils (a : tour CK6153i) (b : tour CK6136i) (c : tour CAK6150Di) (d: CY-K500) (e : fraiseuse JTVM6540) (f : fraiseuse XK715B) (g : centre d'usinage XHK-714F) [Lv et al, 2015]	10
Figure 1.6. Comparaison entre les puissances d'un axe d'avance en fonction des vitesses d'avance pour différents types de machines outils (a : tour CK6153i) (b : tour CK6136i) (c : tour CAK6150Di) (d: CY-K500) (e : fraiseuse JTVM6540) (f : fraiseuse XK715B) (g : centre d'usinage XHK-714F) [Lv et al, 2015]	11
Figure 1.7. Comparaison des puissances de coupe pour 3 tours différents	11
Figure 1.8. Comparaison des puissances de coupe pour deux fraiseuse différentes	12
Figure 1.9. Comparaison des énergies consommées par différentes fraiseuses	13
Figure 2.1. Efforts de coupe en fraisage	24
Figure 2.2. Epaisseur statique et dynamique du copeau	25
Figure 2.3. Description schématique de la table d'avance	28
Figure 2.4. Algorithme de calcul de l'énergie de coupe consommée par une table d'avance	30
Figure 2.5. Algorithme de calcul de l'énergie de coupe consommée par la broche	33
Figure 2.6. Discrétisation de la table en éléments finis	36
Figure 2.7. Modélisation de couplage entre la broche et la table d'avance	37
Figure 2.8. Norme de la différence entre les déplacements du nœud 1 de la broche et le nœud 60 de la table d'avance	38
Figure 2.9. Evolution du déplacement du nœud 1 de la broche et du nœud 60 de la table d'avance suivant la direction X (a), direction Y (b) et la direction Z (c)	39
Figure 3.1. Fraiseuse Feeler CNC Fv 760	42
Figure 3.2. Représentation schématique de la broche [https://ekilavuz.com/feeler-fv-760-cnc-dik-isleme-merkezi--fdaef8f2919508ad]	44
Figure 3.3. Armoire de la machine-outil Feeler Fv 760	44
Figure 3.4. Mise en place des instruments de mesure sur la machine-outil.....	45
Figure 3.5. Schéma physique du branchement	46
Figure 3.6. Mesure de la puissance mécanique consommée par l'axe d'avance X pour une opération de surfacage	47
Figure 3.7. Trajectoire de l'outil (a) aller-retour (b) spirale vers l'intérieur.....	50
Figure 3.8. Consommation de l'énergie et de la puissance de coupe par la table pour 4 conditions de coupe.....	51
Figure 3.9. Puissance et énergie consommées pour deux types d'outil de coupe.....	53
Figure 3.10. Influence du poids de la table et de la pièce sur l'énergie consommée.....	53
Figure 3.11. Evolution expérimentale de la puissance consommée par la broche	54

Figure 3.12. <i>Comparaison entre l'énergie et la puissance consommées par la broche pour 4 conditions de coupe</i>	57
Figure 3.13. <i>Défaut d'écaillage du roulement</i>	59
Figure 3.14. <i>Impact de la vitesse de rotation sur l'énergie des roulements lors de la phase d'approche.....</i>	59
Figure 3.15. <i>Variation de la puissance consommée par la broche (a) et du taux d'augmentation de la puissance consommée (b) en fonction de la hauteur du défaut pour trois types d'écaillages (Bague extérieure, Bague intérieure et deux bagues)</i>	61
Figure 3.16. <i>Spectre du déplacement radial du 1^{er} nœud avec et sans défaut</i>	62
Figure 3.17. <i>Défaut d'excentricité de la cage (Hentati, 2008)</i>	63
Figure 3.18. <i>Répartition des efforts de coupe dans le cas d'usinage périphérique</i>	65
Figure 4.1. <i>Algorithme PSO</i>	77

Liste des tableaux

Tableau 3-1. <i>Caratéristiques du chariot d'une fraiseuse Feeler CNC Fv 760</i>	43
Tableau 3-2. <i>Caractéristiques de la broche</i>	43
Tableau 3-3. <i>Paramètres de la simulation</i>	48
Tableau 3-4. <i>Energie consommée par la table pour une seule passe de surfacage</i>	49
Tableau 3-5. <i>Puissance et énergie de coupe consommées par la table expérimentales</i>	50
Tableau 3-6. <i>Paramètres de coupe</i>	55
Tableau 3-7. <i>Puissance et énergie consommées par les roulements saints de la broche</i>	58
Tableau 3-8. <i>Puissance consommée par la broche pendant la phase d'approche pour différentes valeurs du défaut d'écaillage de la bague extérieure</i>	60
Tableau 3-9. <i>Variation de la puissance consommée par la broche lors de la phase d'approche en présence d'un défaut d'excentricité de la cage</i>	63
Tableau 3-10. <i>Puissance numérique consommée par la broche pour différents types de défauts lors des phases d'approche et de coupe</i>	64
Tableau 3-11. <i>Puissance consommée (W) par une machine outil utilisant un modèle couplé et non couplé pour différents types d'usinage et différentes vitesse de rotation</i>	67
Tableau 4-1. <i>Caractéristiques du cas d'étude</i>	78
Tableau 4-2. <i>Résultats de l'optimisation de chaque fonction</i>	79
Tableau 4-3. <i>Valeurs de chaque fonction</i>	79
Tableau 4-4. <i>Résultats de l'optimisation mono-passe globale</i>	80
Tableau 4-5. <i>Résultats de l'optimisation de chaque fonction</i>	81
Tableau 4-6. <i>Résultats de chaque fonction</i>	82
Tableau 4-7. <i>Résultats de l'optimisation multi-passes globale</i>	82
Tableau 4-8. <i>Comparaison entre l'énergie et le temps de coupe lors du sufaçage</i>	84
Tableau 4-9. <i>Erreur entre les résultats de l'optimisation en mono-passe et multi-passes</i>	84

Liste des notations

Symbole	Désignation
$dF_{t,i}$	composante élémentaire tangentielle
$dF_{r,i}$	composante élémentaire radiale
$dF_{a,i}$	composante élémentaire axiale
$\Phi_i(t)$	position angulaire instantanée du $i^{\text{ème}}$ dent
Φ_p	angle entre deux arrêtes successives
Ω	vitesse angulaire de la broche
$h(\Phi_i(t))$	épaisseur du copeau
k_t	pression spécifique de coupe tangentielle
k_r	pression spécifique de coupe radiale
k_a	pression spécifique de coupe axiale
a_p	profondeur de passe axiale
$g(\Phi_i(t))$	fonction décrivant le contact entre la dent et la pièce
Φ_{st}	angle d'entrée de la fraise
Φ_{ex}	angle de sortie de la fraise
f_z	avance par dent
h_s	composante statique de l'épaisseur du copeau
h_d	composante dynamique de l'épaisseur du copeau
$u_x(t)$	déplacement de l'outil suivant la direction X à l'instant t
$u_y(t)$	déplacement de l'outil suivant la direction Y à l'instant t
$u_x(t-\tau)$	déplacement de l'outil suivant la direction X à l'instant $(t-\tau)$
$u_y(t-\tau)$	déplacement de l'outil suivant la direction Y à l'instant $(t-\tau)$
τ	période de passage
Δ_j	écrasement entre la bille et les pistes de roulement
F_j	charge normale
k_p	constante de Hertz

$d(\psi_j)$	distance entre les centres de courbure des bagues intérieure et extérieure sous charge
d_0	distance entre les centres de courbure des bagues intérieure et extérieure à vide
$\Delta_{r,j}^*$	déflexion radiale
$\Delta_{z,j}^*$	déflexion axiale
$F_{roulement}$	effort exercé par tous les éléments roulants des différents roulements
$[M_b]$	matrice masse
$[K_b]$	matrice raideur
$[G_b]$	matrice gyroscopique
$[C_b]$	matrice centrifuge
J_1	moment d'inertie du moteur
J_2	moment d'inertie de l'engrènement
k_2	rapport de transmission de l'engrènement
η_2	rendement de l'engrènement
J_3	moment d'inertie de la vis
η_3	rendement de la vis
p_3	pas de la vis
d_m	diamètre de la vis
μ_g	frottement entre la glissière et la vis
μ_b	frottement entre la vis et les butés
P_{mm}	puissance de coupe consommée par la table d'avance
L_p	longueur de la pièce
ω	vitesse de rotation du moteur de la table d'avance
T_{coupe}	couple de coupe variable au cours du temps
T_1	couple de frottement causé par le guidage en translation
T_2	couple de frottement causé par les roulements
T_3	couple de l'enlèvement de matière
M_t	poids de la pièce et de la table
F_{pb}	précontrainte des butées

F_{ps}	précontrainte de la vis
$F_z(t)$	effort de coupe instantanée axiale
$F_x(t)$	effort de coupe d'avance instantanée
P_c	puissance de coupe
P_{en}	puissance de l'enlèvement du matière
P_{pr}	pertes de roulements
$F_t(t)$	effort de coupe tangentiel variable en fonction du temps
T_{charge}	couple lié à la charge appliquée sur un roulement,
T_{billes}	couple lié à la rotation des billes
$T_{viscosité}$	couple lié à la viscosité
d_{mr}	diamètre moyen du roulement
C_s	facteur de charge
N_{billes}	nombre de billes
μ_b	coefficient de frottement
f_0	facteur du type de roulement
ν_{oil}	viscosité cinématique
E_{fixes}	énergie constante
$E_{installation}$	énergie nécessaire pour l'activation des unités auxiliaires de la machine
$E_{mise\ en\ place}$	énergie nécessaire pour un mouvement de coupe sans charge
$E_{changement\ outil}$	énergie requise pour changer les outils de coupe
t_{cho}	temps nécessaire pour un changement d'outil
T	durée de vie de l'outil
$E_{engament}$	énergie nécessaire pour l'approche de l'outil vers la pièce
$E_{dégagement}$	énergie nécessaire pour le dégagement de l'outil
$E_{c\ seule\ passe}$	énergie nécessaire pour réaliser une passe d'enlèvement de matière
$[M_{couplage}]$	matrice masse du système couplé broche et table d'avance

$[K_{couplage}]$	matrice raideur du système couplé broche et table d'avance
$[C_{couplage}]$	matrice d'amortissement modal du système couplé broche et table d'avance
k_g	rigidité localisé
f_1	temps de production
f_2	coût de l'opération
f_3	énergie consommée
f_4	rugosité
n_{passes}	nombre de passe de l'opération d'usinage
d_a	longueur d'approche
D	diamètre de l'outil
t_o	temps nécessaire pour changer une plaquette défectueuse
a	distance de sécurité
k_0	coût auxiliaire
k_e	coût de production de l'énergie électrique
k_t	prix de revient d'une arrête de coupe
E_{totale}	énergie totale consommée par la machine outil
$X_i^k(j)$	vecteur position
$V_i^k(j)$	vecteur vitesse

Introduction Générale

L'évolution de la technologie et les exigences de la vie moderne ont conduit à une forte consommation énergétique. Le train de vie confortable ainsi que la volonté d'assurer une évolution strictement croissante de la société sont basés sans doute sur une forte alimentation énergétique. Bien que le secteur industriel est actuellement le deuxième consommateur d'énergie après la construction des bâtiments, la consommation mondiale d'énergie industrielle devrait croître de 3000 Mtoe en 2010 à 5000 Mtoe en 2050, amenant à rendre ce secteur le premier consommateur d'énergie. L'industrie restera donc toujours un grand consommateur d'énergie non renouvelable ayant pour source les carburants fossiles. En 2009, l'AIE a affirmé qu'environ 85% de toute les énergies produites proviennent de combustibles fossiles limitées, qui est malheureusement liée systématiquement à l'émission de gaz contenant du dioxyde de carbone et amenant à l'effet de serre. Dans le but de le minimiser, les pays industriels se sont donc occupés des problèmes environnementaux provenant de la consommation excessive de carburants fossiles. Dans une entreprise de fabrication, les gammes et les outillages de fabrication sont conçus pour satisfaire les spécifications des pièces et à fabriquer en optimisant le temps et les coûts de production alors que la consommation énergétique, le coût des déchets et des consommables n'est que très peu ou pas du tout pris en compte. L'Eco fabrication a permis d'intégrer la notion de la consommation d'énergie dans les opérations d'usinages. Deux approches sont développées avec une première approche dont l'objectif est l'aide à la décision pour la mise en place d'un scénario de fabrication avec le minimum d'impact environnemental et le maximum de gain économique, et une deuxième est basée sur l'optimisation multi-objectifs des opérations de fabrication en tenant compte des caractéristiques techniques du produit. Cette approche permet la modélisation des différentes étapes de fabrication du produit en couplant les piliers économique, écologique et technologique. C'est dans ce cadre que rentre notre travail de thèse où on a développé un outil numérique permettant de soutenir la prise de décision des activités de fabrication liée à la consommation d'énergie. Ce modèle peut être utilisé pour optimiser une gamme d'usinage à savoir la tenue en compte des paramètres non seulement économiques mais aussi écologiques (consommation d'énergie) en respectant la faisabilité technique.

Plusieurs recherches concernant la modélisation énergétique ainsi que l'analyse de la consommation d'énergie par les machines outils pour prédire sa consommation lors de l'usinage ont été élaborées. Dans le premier chapitre, une revue générale sur les modèles d'estimation de la consommation d'énergie d'une machine outil est présentée. En effet, l'énergie consommée par cette dernière peut être modélisée en se basant sur les énergies consommées par les composantes d'une machine, soit sur le taux d'enlèvement de matière ou bien sur le processus d'usinage. Une discussion portant sur les limites de ces modèles est effectuée. Plusieurs modèles d'optimisation de cette énergie ont été

développés dans la littérature et sont présentés dans une seconde étape dans le chapitre 1. Ces modèles peuvent être basés sur le contrôle des paramètres de coupe ou sur le contrôle de l'outil.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté deux modèles numériques pour estimer respectivement l'énergie consommée par une table d'avance et par une broche permettant ainsi de déduire l'énergie consommée par une machine outil. Ces modèles tiennent compte de l'aspect dynamique de l'effort de coupe et des efforts des roulements. La modélisation repose sur la détermination de l'effort de coupe variable en fonction du temps qui est déduit en résolvant l'équation de mouvement du système de coupe (broche ou machine-outil) discrétisé en éléments finis en utilisant la méthode de Newark couplée avec l'algorithme de Newton Raphson. Cet effort de coupe est utilisé pour calculer la puissance puis l'énergie consommée par la table d'avance, la broche et par conséquent la machine outil.

Afin de valider notre approche, la puissance et l'énergie obtenues à partir du modèle développé sont comparées avec la puissance et l'énergie obtenues avec un dispositif expérimental. Les résultats obtenus sont présentés dans le troisième chapitre. Une étude paramétrique est réalisée pour mettre l'accent sur l'impact de la variation des paramètres de coupe (avance, vitesse de coupe et profondeur de passe) sur la valeur de la puissance et de l'énergie consommées. On introduit par la suite des défauts d'usure et de montage au niveau des roulements et nous présentons leurs impacts sur le comportement énergétique de la machine.

Dans le dernier chapitre, nous présentons un modèle permettant d'optimiser l'énergie consommée par une machine outil. L'algorithme d'optimisation (essaim des particules) PSO est appliqué sur une opération de surfacage dans le but d'identifier les paramètres de coupe optimaux qui minimisent à la fois l'énergie consommée, le temps de production et le coût en respectant les consignes technologiques.

Chapitre 1. Etude Bibliographique

1. Introduction

L'augmentation de la consommation d'énergie dans l'industrie manufacturière cause l'émission de grandes quantités de CO₂ dont l'effet est négatif sur l'environnement. Une recherche est élaborée par (Herzog et al. 2009) a montré que près de 19% des émissions de gaz à effet de serre sont comptabilisés dans les opérations de fabrication. Par conséquent, la consommation d'énergie des procédés de fabrication suivie des émissions de CO₂ doivent être réduites de manière urgente afin d'atténuer la pollution environnementale et la crise énergétique. Selon (He et al. 2012), 99% des impacts environnementaux proviennent de l'énergie électrique consommée par les procédés de fraisage et de tournage. Ainsi, la réduction de la consommation d'énergie des machines-outils est importante pour protéger l'environnement. Ce chapitre est destiné à présenter les différents travaux réalisés pour l'estimation de l'énergie consommée par les machines-outils utilisées pour différents procédés d'usinage.

2. Architecture d'une machine outil à commande numérique

Une telle machine outil est composée d'un bâti, des unités auxiliaires (éclairage, pompes de lubrification, ventilateur etc...), d'une colonne (logement de la broche), d'une électro-broche, d'une table et un chariot d'avance. Le chariot se déplace sur les glissières de la console par l'intermédiaire d'un écrou fixé dans le support et de la vis de l'avance transversale. La pièce à usiner est serrée dans l'étau qui est positionné dans la table à l'aide de rainures en T. L'électro-broche est considérée comme l'élément essentiel et qui assure la rotation de l'outil de coupe. Plusieurs solutions de guidage en rotation sont utilisées pour une électro-broche tels que les paliers à roulements.

Pendant un processus d'usinage, les mouvements nécessaire à réaliser un produit final sont assurés par les différents composants de la machine-outil qui consomment de l'énergie électrique. On décrit dans les sections suivantes le taux de consommation de chaque composant qui varie d'une machine à une autre des conditions de coupe à une autre.

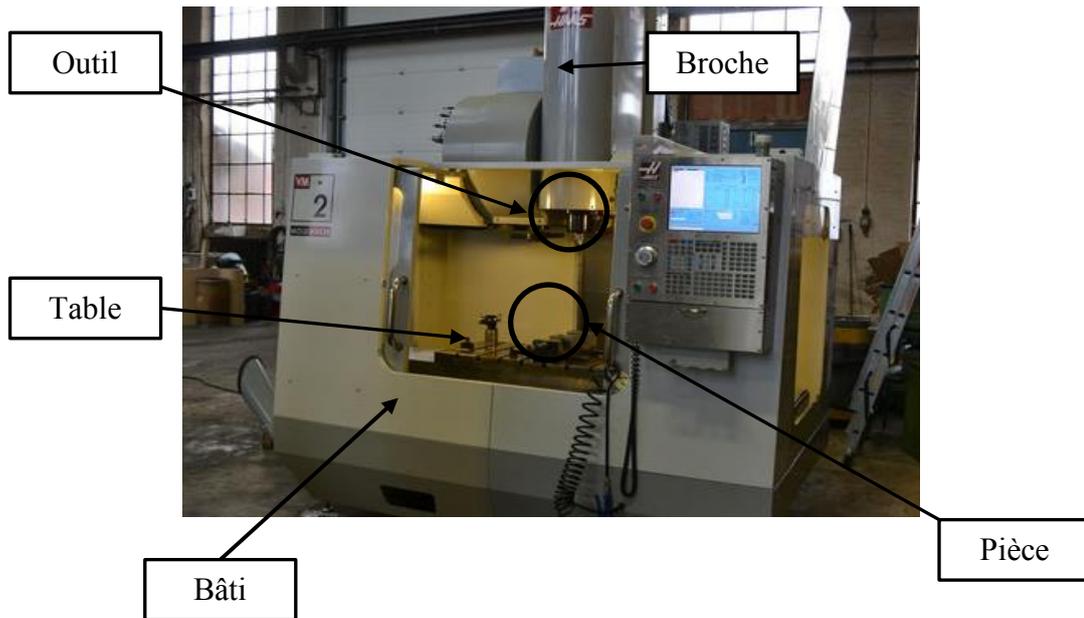


Figure 1.1. *Architecture d'une machine outil*

3. Consommation d'énergie par les machines-outils

L'un des problèmes les plus graves auxquels l'industrie manufacturière est actuellement confrontée est la consommation d'énergie. L'énergie utilisée par le secteur industriel a plus que doublé au cours des 50 dernières années et l'industrie consomme actuellement environ la moitié de l'énergie mondiale (Mouzon et al. 2007). Par exemple, en Chine, l'énergie utilisée dans l'industrie manufacturière et représente 58% de la consommation totale d'énergie du pays en 2010. Les machines-outils à commande numérique sont des systèmes électromécaniques complexes avec de multiples sources d'énergie. Elles sont les plus importants moyens de production dans l'industrie manufacturière et consomment une grande quantité d'énergie lors des opérations d'usinage comme le montre la figure 1.2.

On distingue de nombreux types de machines-outils à commande numérique, tels que les tours à commande numérique, les fraiseuses à commande numérique, les rectifieuses à commande numérique et les centres d'usinage. Chaque type de machine-outil à commande numérique contient également une grande variété de machines. Il existe de nombreuses différences dans la structure mécanique, les performances du moteur et le contrôle du mouvement pour différentes machines-outils. Ainsi, les caractéristiques d'alimentation en énergie peuvent varier considérablement d'une machine-outil à autre. Il est convenu d'après (Dahmus et Gutowski, 2004) que la demande de puissance des équipements de production, en particulier les machines outils, se composent d'un composant constant et un autre variable. La première couvre le besoin constant pour assurer le

fonctionnement des unités des machines-outils telles que l'unité centrale, les ventilateurs et l'éclairage. Cette composante est indépendante de la sélection des paramètres du processus d'usinage. Alors que la demande de puissance variable dépend de la sélection des paramètres du procédé et peut être attribuée à la broche ou les entraînements des axes de la table pour une machine de fraisage par exemple (figure 1.3).

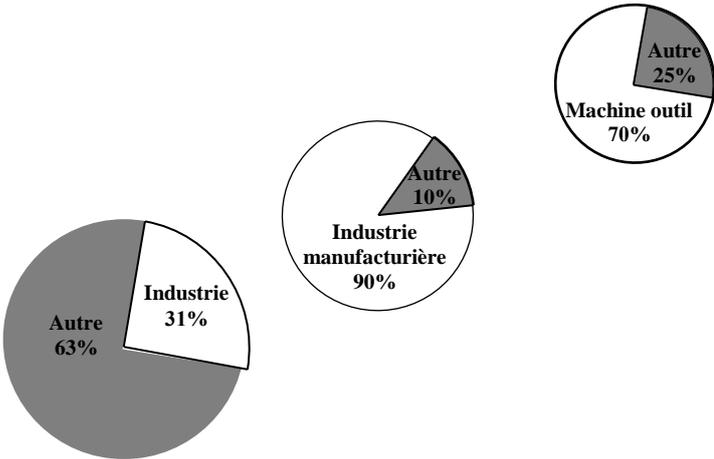


Figure 1.2. Consommation d'énergie en US en 2012 [Zhou et al. 2016]

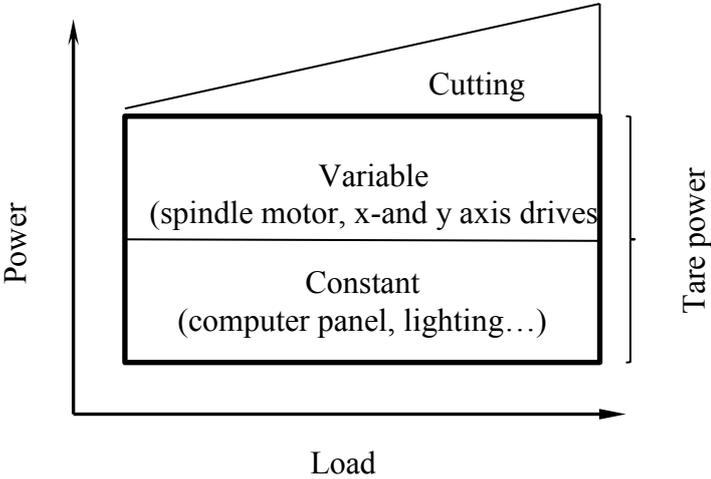


Figure 1.3. Répartition de la puissance dans une machine-outil

[Dahmus et Gutowski, 2004]

La consommation d'énergie en usinage n'est pas uniquement réservée à la pointe de l'outil mais aussi elle concerne l'alimentation des équipements auxiliaires tels que la manutention de la pièce et des coupeaux, la circulation des lubrifiants, le changement des outils, et l'alimentation des unités de pilotage de la machine (exemple d'une fraiseuse à 3 axes donnée par la (figure 1.4).

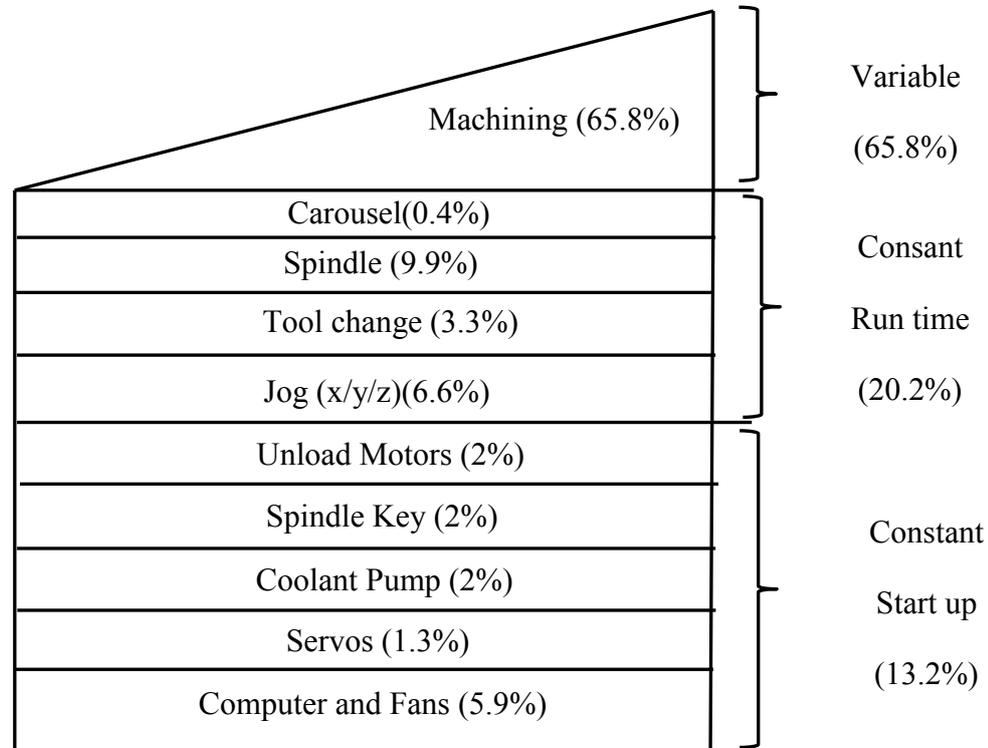


Figure 1.4. Répartition de l'énergie constante et variable pour une fraiseuse à 3 axes

[Dahmus et Gutowski, 2004]

Il faut noter que, dans certains cas, la consommation d'énergie par les équipements auxiliaires, dépasse de loin celle imposée par les exigences réelles de coupe. En effet la consommation de l'énergie par les équipements auxiliaires atteint, selon le type de la machine-outil, les taux de 48% à 69% de l'énergie totale consommée et demeure constante indépendamment de la charge comme le montre (Dahmus et Gutowski, 2004) par une étude réalisée sur trois différents types de machine outils avec des équipements auxiliaires ayant de différentes capacités. Une étude réalisée par (Gutowski et al. 2005) sur un grand centre d'usinage Toyota montre que la consommation d'énergie par les équipements auxiliaires est constante et atteint un taux de 85,2% de la totalité de l'énergie consommée tout au long du processus de fabrication. Une étude réalisée par (Devoldere et al. 2007) montre que 47% de l'énergie consommée par une fraiseuse à cinq axes est réservée à une phase non productive qui atteint un taux de 65% de la totalité du temps opérationnel de cette machine-outil.

Dans la suite une comparaison en termes de consommation d'énergie pour différents machine outil est présentée.

3.1 Puissance consommée par la rotation de la broche

Quel que soit le type de la machine-outil, la broche est considérée comme l'élément de base pour réaliser une opération d'usinage, et consomme une quantité importante d'énergie qui varie selon le type de la machine outil. Une comparaison est effectuée par (Lv et al. 2015) concernant la puissance consommée par la broche pour différentes vitesses et machines outil. Cette étude montre que les vitesses de rotation élevées sont atteintes en utilisant des centres d'usinage ou des fraiseuses à l'exception des tours à commandes numériques (figure 1.5).

À la même vitesse de rotation, la puissance consommée par la broche pour les fraiseuses et les centres d'usinage à commande numérique est bien inférieure à celle consommée par les tours à commande numérique. Ceci est expliqué par le fait que, la transmission du mouvement à la broche des tours à commande numérique est assurée par de nombreux systèmes de transmission tels que des courroies, des arbres, des engrenages. En plus, le poids de l'appareil de transmission du tour à commande numérique est bien supérieur à celui des fraiseuses et des centres d'usinage à commande numérique, en conséquence, le couple de friction de la broche des tours est supérieur à celui des fraiseuses ce qui entraîne une consommation plus importante de la puissance lors de la rotation de la broche. Pour les tours à commande numérique, la puissance de rotation de la broche varie en fonction du type des transmissions. En effet, la consommation électrique des chaînes de transmission à basse vitesse est bien supérieure à celle des chaînes de transmission à grande vitesse.

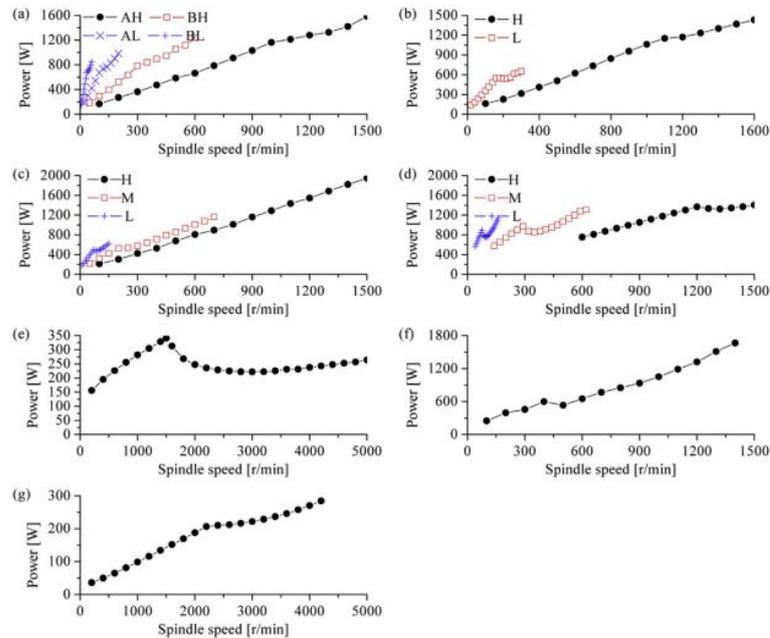


Figure 1.5. *Comparison entre les puissances de rotation de la broche en fonction des vitesses de rotation pour différents types de machines outils (a : tour CK6153i) (b : tour CK6136i) (c : tour CAK6150Di) (d: CY-K500) (e : fraiseuse JTVM6540) (f : fraiseuse XK715B) (g : centre d'usinage XHK-714F) [Lv et al. 2015]*

3.2 Puissance consommée par l'avance d'un axe

Une deuxième comparaison est effectuée par (Lv et al. 2015) en termes de la puissance consommée par un axe d'avance à différentes vitesses d'avance.

Les résultats, illustrés par la figure 1.6, montrent que la puissance consommée par un axe d'avance des fraiseuses et des centres d'usinage à commande numérique est supérieure à celle du tour à commande numérique. Cela est expliqué par le fait que la table des fraiseuses et des centres d'usinage à commande numérique est plus lourdes, ce qui engendre un frottement accru lors du mouvement d'avance. De plus, la puissance du mouvement suivant l'axe Z vers le haut est supérieure à celle vers le bas, car la puissance utilisée pour soulever la broche principale est supérieure à celle utilisée pour équilibrer sa gravité lors de la descente de l'axe Z.

Les résultats ci-dessus nous permettent de conclure que la puissance consommée par les mouvements de coupe dans l'air lors de rotation de la broche ainsi que l'avance d'un axe varie de manière significative entre les différentes machines-outils. De plus, la puissance dépend également des paramètres du processus d'usinage tels que la vitesse de rotation de la broche, le taux d'avance, etc.

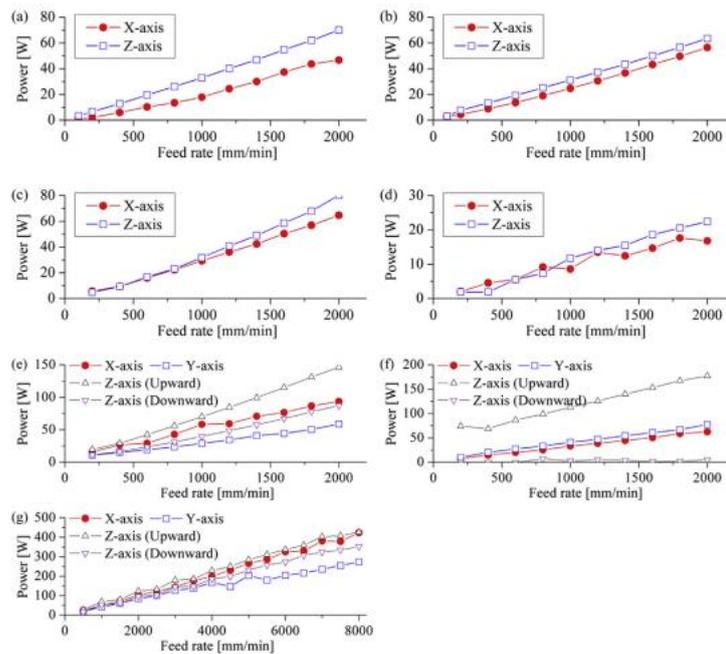


Figure 1.6. *Comparison entre les puissances d'un axe d'avance en fonction des vitesses d'avance pour différents types de machines outils (a : tour CK6153i) (b : tour CK6136i) (c : tour CAK6150Di) (d: CY-K500) (e : fraiseuse JTVM6540) (f : fraiseuse XK715B) (g : centre d'usinage XHK-714F) [Lv et al. 2015]*

3.3 Puissance de coupe

La puissance nécessaire pour l'enlèvement de matière pour différentes machines de fraisage et de tournage est aussi comparée par (Lv et al. 2015). Les résultats illustrés par les figures 1.7 et 1.8 montrent que la puissance de coupe de tournage dépend uniquement du matériau de la pièce et des paramètres de coupe, mais rarement des machines-outils. Par contre la puissance de fraisage de chaque fraiseuse CNC varie d'une machine à une autre. Cet exemple illustre l'importance du choix de la machine pour réduire l'empreinte énergétique lors de l'usinage d'un produit par une fraiseuse.

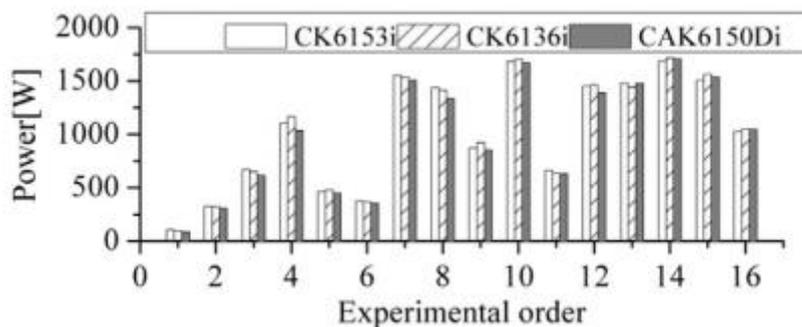


Figure 1.7. *Comparaison des puissances de coupe pour 3 tours différents [Lv et al, 2015]*

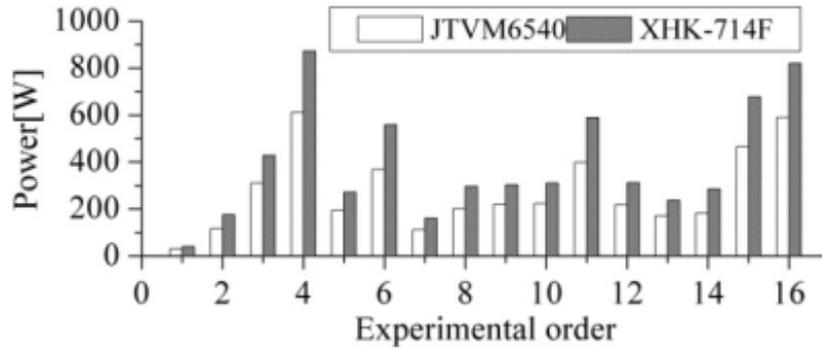


Figure 1.8. *Comparaison des puissances de coupe pour deux fraiseuses différentes*

[Lv et al. 2015]

Les fraiseuses ont considérablement évolué pour devenir des machines modernes et capables d'effectuer des opérations complexes sur plus de 5 axes. Bien qu'elles fonctionnent sur les mêmes principes de base, les fraiseuses modernes à commande numérique diffèrent considérablement des anciennes. (Kordonowy, 2002) a étudié plusieurs générations de fraiseuses afin de comparer leurs performances électriques. Son travail confirme que toutes les fraiseuses CNC ne consomment pas la même quantité d'électricité. La figure 1.9 décrit une comparaison de la quantité d'énergie consommée par une fraiseuse ancienne, une fraiseuse à 3 axes et une fraiseuse moderne à 5 axes. En effet, 65,8% de l'énergie consommée par la machine ancienne est destinée pour l'enlèvement de matière, par contre 48.1% de l'énergie consommée par la machine à 3 axes est destinée pour l'enlèvement de matière, et seulement 24,2% de l'énergie consommée par machine récente à 5 axes est dépensée pour l'enlèvement de matière. La figure 1.9 montre que la consommation d'énergie dépend du type de la machine, alors pour déterminer cette consommation d'énergie plusieurs modèles sont proposés dans la littérature et qui vont être décortiqués dans ce rapport avant de proposer notre modèle de prévision de la consommation d'énergie par les machines outils.

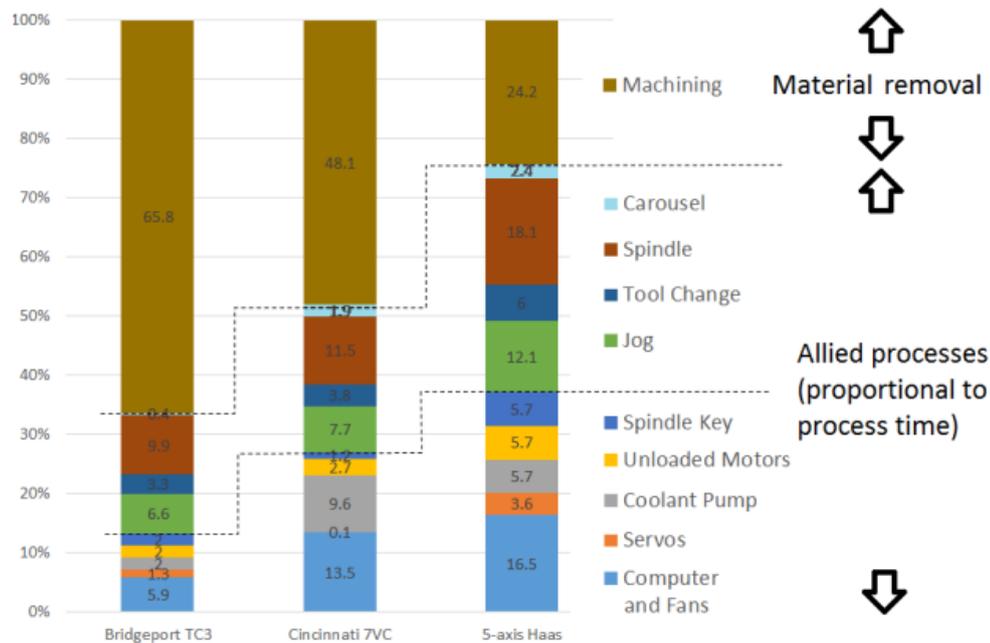


Figure 1.9. *Comparaison des énergies consommées par différentes types de fraiseuses*
 [Kordonowy, 2002]

4. Etat de l'art

4.1 Modélisation de l'énergie consommée par une machine-outil

Cette section présente différents modèles proposés par des chercheurs pour prédire l'énergie consommée par la machine-outil. Nous signalons l'existence dans la littérature de trois types de modélisations, une première modélisation qui est la plus utilisée, basé sur la puissance consommée par les composantes d'une machine-outil, une deuxième modélisation est basée sur le taux d'enlèvement de matière, dans ce cas le modèle est appelé modèle d'estimation de l'énergie spécifique de coupe, et finalement, une modélisation basée sur le processus d'usinage.

4.1.1 Modélisation basée sur les composantes d'une machine

La prévision de la consommation d'énergie durant le processus de fabrication se fait à l'aide de modèles mathématiques tel que celui de (Gutowski, 2006) qui fut le premier à scinder la puissance totale de l'usinage en une puissance P_0 au ralenti et une autre $k \cdot v$ de l'usinage. La puissance au ralenti est définie comme étant une puissance requise par la totalité des équipements de la machine outil.

Un modèle proposé par (Rajemi et al. 2010) permet la prédiction de la consommation d'énergie durant le processus de fabrication par tournage. Ce modèle permet d'optimiser le besoin en énergie

directe tout en offrant l'opportunité de sélectionner la vitesse de coupe tenant compte de la durée de vie de l'outil utilisé.

Un modèle énergétique est proposé par (Diaz et al. 2010) pour calculer la consommation totale d'énergie pendant le fonctionnement de la machine-outil pour le cas du fraisage avec différentes trajectoires de l'outil. Ce modèle tient compte de l'énergie durant les phases d'accélération, de stabilité et de décélération. Les paramètres de coupe tels que le taux d'avance et la vitesse de rotation de la broche sont considérés dans le modèle afin de prédire la consommation d'énergie nécessaire à l'enlèvement de matière. Ce modèle a permis de montrer que l'optimisation des trajectoires d'usinage permet de réduire le temps de traitement de la pièce usinée et donc de réduire la consommation d'énergie.

L'énergie consommée dans les opérations d'usinage a été modélisé par (He et al. 2012) en tenant compte de l'énergie de la broche, de l'énergie relative au mécanisme de changement d'outil, de l'énergie relative au fonctionnement des servomoteurs et des ventilateurs et de l'énergie relative à la pompe d'arrosage. Pour prédire la puissance consommée par la broche lors de l'enlèvement de matière, les auteurs ont multiplié l'effort de coupe nécessaire pour l'enlèvement de matière par les dimensions de la pièce.

Afin d'estimer les besoins en énergie d'une machine outil au cours d'un processus d'usinage, (Balogun et al. 2013) ont considéré que l'énergie consommée est la somme d'une énergie nécessaire pour le démarrage des unités auxiliaires (telles que les unités de pilotage, d'éclairage, de ventilation et de lubrification), d'une énergie consommée par la phase de préparation à la coupe (durant laquelle la broche tourne à vide), et d'une énergie consommée durant la phase de charge lorsqu' il y a effectivement usinage. Ce modèle tient aussi compte d'autres facteurs tels que l'épaisseur du copeau non déformé et la vitesse d'avance, pour effectuer une prévision de la consommation d'énergie. Cependant ni l'influence de l'état de l'outil ni celle de la variation de la vitesse de rotation de la broche sont tenues en considération. (Balogun et al. 2014) ont amélioré le modèle présenté précédemment en considérant la consommation d'énergie relative au changement d'outil. La durée de vie de l'outil ainsi que la variation de la vitesse de rotation de la broche sont tenus en compte. Une validation expérimentale des résultats obtenus est effectuée montrant la robustesse de leur modèle.

Un autre modèle proposé par (Calvanese et al. 2013) permet la prévision de la consommation d'énergie à l'aide des énergies consommées par les modules fonctionnels tels que la broche, les axes de mouvement, le système de refroidissement, le système de changement d'outil et les unités auxiliaires. Une étude de cas est réalisée pour une opération de surfçage. Un modèle calculant

l'énergie mécanique requise par un axe d'avance est développé tenant en compte les énergies consommées lors des phases d'approche et de coupe. Lors de la phase de coupe l'axe d'avance consomme une quantité d'énergie obtenue en multipliant l'effort de coupe par la vitesse d'avance. Cet effort de coupe est calculé en fonction d'une valeur moyenne de l'épaisseur du copeau. Dans leur modèle les auteurs supposent que l'énergie consommée par les mouvements de la table d'avance lors d'une opération de fraisage est indépendante du comportement dynamique du système d'usinage (effort de coupe).

Un autre modèle énergétique est proposé par (Surhurt et al. 2014) considère que la consommation d'énergie se compose d'une partie constante consommée par les unités de pilotage, les sources d'éclairage et les pompes de lubrification et d'une autre partie variable consommée par la rotation de la broche, les déplacements d'avance et l'opération d'enlèvement de matière. D'après ces auteurs, l'énergie nécessaire pour le mouvement des axes d'avances est directement proportionnelle à la vitesse d'avance. De même l'énergie, pour effectuer un enlèvement de matière, est proportionnelle au taux d'enlèvement de matière. Aussi, l'énergie nécessaire pour faire tourner la broche est proportionnelle à la vitesse de rotation programmée.

La puissance consommée par la broche a été estimée par (Deng et al. 2017) en sommant la puissance requise pour fonctionner la broche pendant le mouvement de déchargement (calculée en fonction de la vitesse de rotation de la broche) et la puissance requise par la broche pour effectuer la coupe du matériau lors d'un processus de fraisage. Cette dernière est calculée en tenant compte de la perte de puissance lors de l'enlèvement de matière. L'effort de coupe utilisé est déduit à partir d'une formule empirique.

Leur modèle a été utilisé par (Li et al. 2016) pour l'estimation de l'énergie consommée par la broche. La seule différence réside dans la compilation de la puissance due à la perte de charge supplémentaire où les auteurs ont utilisé une formule empirique définie comme étant une fonction quadratique de la puissance de coupe.

Une amélioration du modèle énergétique proposé par (Calvanese et al. 2013) est effectuée par (Alberteli et al. 2016). Le nouveau modèle considère un effort de coupe modélisé par l'introduction d'une position angulaire constante d'une dent et prend en compte la section réelle du copeau. Le calcul de la force de coupe est basé sur des intervalles de temps relatifs aux positions de l'outil. Cependant, le comportement dynamique des forces de coupe est négligé, et seule la composante statique de l'épaisseur du copeau, générée par le mouvement rigide du corps de la fraise, est

considérée, alors que la composante dynamique provoquée par la vibration de l'outil entre deux dents successives est négligée.

Une modélisation de l'énergie consommée par une machine outil est proposé par (Edem et Mativenga, 2017) qui ont introduit dans le modèle développé par (Balogun et al. 2014) l'énergie consommée par la table d'avance lors des phases d'approche et de coupe. Aussi ce modèle tient en compte de la masse de la table et de la pièce à usiner. Ce modèle montre l'importance d'intégrer l'énergie consommée par l'axe d'avance lors de la modélisation de l'énergie consommée par la machine-outil ainsi que la tenue en compte de la masse de la table (axe + pièce + étai).

Selon (Rief et al. 2017), la puissance requise par la broche est composée d'une puissance de repos (puissance de coupe dans l'air) et d'une puissance d'enlèvement de matière. La puissance consommée par la broche lors de la coupe est obtenue en multipliant la puissance des pertes mécaniques par la puissance requise pour l'enlèvement de matière. Cette dernière est obtenue en divisant le taux d'enlèvement de matière par le taux d'enlèvement de matière spécifique. Donc la puissance de coupe est modélisée sans tenir compte de la variation de la section du copeau en fonction du temps. On peut conclure que ce domaine statique qui néglige le paramètre temporel utilisé par les auteurs pour modéliser la force de coupe et prédire la puissance demandée ne convient que pour les opérations de tournage où la section du copeau et les conditions de contact entre l'outil et la pièce sont constantes au cours du temps.

4.1.2 Modélisation basée sur le taux d'enlèvement de matière

Des modèles empiriques sont développés pour estimer l'énergie spécifique de coupe dont la détermination est basée sur l'estimation de l'énergie consommée par la machine outil pour enlever 1 cm³ de matière. Cependant, tous ces modèles ne tiennent pas compte de l'énergie consommée par les sous-unités auxiliaires durant la phase de coupe. En réalité ces modèles permettent de trouver, pour un processus d'usinage, la relation entre la consommation d'énergie et le taux d'enlèvement de matière à travers une description exacte de l'utilisation de l'énergie au cours d'un processus d'usinage.

Un modèle basé sur cette technique d'estimation est développé par (Karra et al. 2011) pour étudier la relation entre la consommation d'énergie et les paramètres de coupe (la vitesse de rotation de la broche, l'avance par dent, la profondeur de passe axiale). Le modèle proposé montre que le taux de consommation d'énergie, durant un processus d'usinage, est inversement proportionnel au taux d'enlèvement de matière à cause de la réduction de la durée de l'usinage.

Un autre modèle empirique est proposé par (Guo et al. 2012). Il permet de déterminer, à l'aide des paramètres de coupe, les conditions optimales d'usinage conduisant à une consommation minimale d'énergie tout en garantissant un état de surface prédéfini. Ce modèle montre que la consommation spécifique d'énergie ne dépend pas uniquement des paramètres d'usinage, mais elle est aussi inversement proportionnelle à la taille de la pièce à usiner.

4.1.3 Modélisation basée sur le processus d'usinage

Un modèle pour la détermination de l'énergie spécifique de coupe est proposé par (Draganescuet et al. 2003). Ce modèle est obtenu en divisant la puissance relative à la coupe par l'efficacité de la machine. La puissance de coupe est calculée moyennant un effort de coupe tangentiel qui est exprimé par une fonction empirique polynomiale du second ordre dépendant des paramètres de coupe.

Un autre modèle de prévision de la consommation de l'énergie spécifique d'un centre d'usinage est proposé par (Rodrigues et Coelho, 2007). Ce modèle permet de montrer l'influence de la géométrie de l'outil ainsi que des paramètres d'usinage sur la consommation de l'énergie spécifique.

Un modèle d'estimation de la puissance consommée par une machine outil est proposé par (Avram et Xirouchakis, 2011). Dans leur travail, l'énergie consommée par la broche est calculée à partir des mouvements liés à l'outil de coupe. Par contre, l'énergie consommée par les axes est calculée à partir des mouvements de la pièce à usiner. Ces deux énergies sont calculées en multipliant le couple utile du moteur par la vitesse angulaire. Ce couple est calculé en fonction des efforts de coupe, considérés constants et déterminés directement à partir de mesures expérimentales. Une telle approche néglige le comportement dynamique du système d'usinage.

L'analyse des différents modèles existants a montré que la majorité des chercheurs ont modélisé l'énergie consommée par une machine outil en adoptant une échelle macroscopique. Cependant, il existe d'autres phénomènes, influents sur l'estimation de l'énergie consommée mais qui sont négligés par toutes ces études. Parmi ces phénomènes on peut citer :

- le comportement non linéaire et variable en fonction du temps des efforts de coupe lors d'une opération de fraisage, variable en fonction du temps,
- le comportement dynamique des roulements à billes,
- les défauts d'usure, de montages...

Les modèles de consommation d'énergie du système de la broche et des axes d'avance susmentionnés sont basés sur des données expérimentales. La précision des modèles empiriques

décrit ci-dessus se situe entre 87% et 85% (Zhong et al. 2016). Cependant, ils sont coûteux et nécessitent des expériences laborieuses pour collecter les données sur la puissance nécessaire à l'obtention des coefficients du modèle sur la base d'une analyse de régression. De plus, ils ne peuvent pas être appliqués facilement lorsque la conception de la machine outil ou les conditions d'usinage sont modifiées. Seuls (Avram et Xirouchakis, 2011) ont réalisé une modélisation mathématique détaillée de l'énergie consommée par un axe d'avance et par la broche. Mais cette étude est réalisée dans un cadre statique sans tenir compte du comportement dynamique des efforts de coupe lors de l'opération de fraisage.

4.2 Optimisation de l'énergie consommée par une machine-outil

Durant un processus d'usinage par une machine outil à commande numérique, sa consommation d'énergie est étroitement liée aux impacts environnementaux. Donc l'amélioration de l'environnement et de l'efficacité énergétique est associée au développement de la technologie industrielle. Par conséquent, il est important d'optimiser les paramètres de coupe pour réduire la consommation énergétique.

Les problèmes d'optimisation sont classifiés suivant la formulation du problème, le type de la fonction objectif et le nombre et le type de variables de décision. La résolution de ces problèmes d'optimisation peut être basée sur des algorithmes itératifs (méthode stochastiques) ou bien sur des méthodes exactes (méthodes déterministes). La littérature montre que l'optimisation est portée sur plusieurs niveaux tels que le contrôle des paramètres de coupe et le contrôle géométrique de l'outil. Tous ces types d'optimisation sont clarifiés dans la section suivante.

4.2.1 Optimisation basée sur le contrôle des paramètres de coupe

Des études expérimentales ont été effectuées par (Bhushan et al. 2013) pour étudier les effets de la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de coupe ainsi que le rayon du nez de l'outil lors d'un tournage d'un alliage d'aluminium type 7075. Les paramètres de coupe optimisés sont déterminés afin d'obtenir une puissance minimale et une durée de vie de l'outil maximale en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM). Une amélioration de 22% de la durée de vie de l'outil et une réduction de 13,5% de la consommation d'énergie sont obtenues.

Pour étudier l'influence des paramètres de coupe sur la consommation énergétique d'un procédé de surfacage, la RSM a été appliquée par (Luan et al. 2016) qui ont trouvé un compromis entre les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance par dent, profondeurs de passes axiale et radiale) pour minimiser l'énergie consommée et améliorer la rugosité de la surface. Ils ont trouvé que le

facteur le plus influant sur la puissance de la broche est la largeur de coupe alors que la profondeur de coupe est la plus influente sur la puissance de l'axe d'avance.

(Kulkarni et al. 2014) ont également étudié l'optimisation des paramètres de coupe pour une opération de tournage d'un acier type 1040 en utilisant la méthode Taguchi afin de minimiser la consommation d'énergie. Dans cette étude, les variables de décision sont le rayon du nez de l'outil et le fluide de coupe outre que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe.

(Bhattacharya et al. 2009) ont effectué une étude expérimentale d'un acier type 1045 basée sur les techniques Taguchi pour analyser les effets de la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe sur la rugosité et la consommation d'énergie lors de l'usinage à grande vitesse. Ils ont conclu que la vitesse de coupe a plus d'effet sur la puissance consommée ce qui les a orienté vers l'optimisation des paramètres de coupe pour réduire au minimum la consommation énergétique.

Une optimisation multi-objectifs a été présentée par (Hanafi et al. 2012) lors de l'usinage considérant à la fois l'empreinte énergétique et la qualité de la pièce par l'utilisation des techniques de Taguchi. L'approche expérimentale adoptée a impliqué plusieurs études de la puissance de coupe et de la rugosité pour chaque condition d'essai en adoptant la vitesse de coupe, le taux d'avance et la profondeur de coupe comme paramètres d'analyse. Ils ont conclu que la profondeur de coupe a plus d'effet sur la consommation d'énergie que la vitesse de coupe et le taux d'avance.

(Quintana et al. 2011) ont utilisé un réseau de neurones artificiels dans l'optimisation de l'énergie consommée par un processus d'usinage. Ils ont trouvé que l'augmentation du taux d'avance n'a pas une grande influence sur la consommation d'énergie et qu'il est possible d'augmenter la productivité en réduisant le temps du traitement et par conséquent réduire la puissance totale consommée. Ils ont suggéré aussi qu'une augmentation de la section de coupe transversale augmente le volume total de la matière enlevée pour une période de temps sans augmenter la consommation d'énergie totale. La section de coupe transversale peut être augmentée en augmentant les profondeurs de coupe radiale ou axiale ou en augmentant le rayon de la fraise. De plus les auteurs montrent que l'utilisation d'une faible vitesse de rotation associée avec une grande avance par dent est conseillée pour avoir une faible consommation d'énergie. On note que les auteurs n'ont pas envisagé la durée de vie de l'outil de coupe lors de la sélection des paramètres du processus.

(Li et al. 2014) ont effectué une optimisation multi-objectifs tenant en compte l'énergie consommée et le temps de production à travers une sélection appropriée des principaux paramètres de coupe. L'algorithme génétique est adopté pour l'optimisation du processus d'usinage.

(Wang et al. 2016) ont présenté une optimisation des paramètres de coupe à travers l'algorithme génétique pour un alliage d'aluminium dans le cas d'un procédé de fraisage à grande vitesse afin de sélectionner correctement les paramètres de coupe optimaux permettant d'obtenir l'efficacité maximale d'usinage.

(Klancnik et al. 2012) ont étudié un cas de fraisage pour réduire au minimum le temps de coupe ainsi que l'énergie consommée en utilisant l'algorithme d'optimisation essaim particulier (PSO) qui est l'une des techniques largement utilisée pour les problèmes fortement non linéaires et multidimensionnels.

(Jang et al. 2016) ont adopté l'algorithme d'optimisation PSO pour trouver les conditions de coupe optimales pour réduire au minimum l'énergie de coupe spécifique dans un processus de fraisage et dans des conditions d'arrosage minimales.

(Congbo et al. 2016) ont présenté une résolution des problèmes d'optimisation multi-objectifs de l'efficacité énergétique et de la durée minimale de production pour le cas d'un processus de fraisage à commande numérique en se basant sur l'algorithme de la recherche Tabou (TS). Les résultats expérimentaux montrent que la profondeur et la largeur de coupe sont les paramètres les plus influents sur la consommation d'énergie spécifique alors que la vitesse de rotation de la broche est la plus influente sur le temps de production.

(Alberteli et al. 2016) ont présenté une optimisation de l'énergie consommée et du temps de production d'une opération de surfacage à travers une optimisation mono-variable (vitesse de coupe) pour passer après à une optimisation multi-variables par une méthode d'énumération exhaustive multidimensionnelles qui permet d'obtenir l'avance par dent, la profondeur radiale de coupe et la vitesse de coupe optimales minimisant à la fois l'énergie consommée et le temps de traitement.

4.2.2 Optimisation basée sur le contrôle de l'outil

Plus de recherches sont effectuées à partir de la perspective de la durée de vie de l'outil, et son coût correspondant. (Mativenga et Rajemi, 2011) ont essayé de déterminer la durée de vie optimale pour parvenir à une empreinte énergétique minimale pendant une opération de tournage d'un acier (AISI 1040). La consommation totale d'énergie est estimée à l'aide d'un modèle énergétique empirique qui considère l'énergie lors de la mise en position de la pièce, lors de la coupe et lors des changements d'outils. Les auteurs ont trouvé des valeurs optimales de la profondeur de coupe, la vitesse d'avance et la vitesse de coupe. Selon cette étude, les valeurs élevées du taux d'avance et de la profondeur de coupe réduisent la consommation d'énergie spécifique.

(Neugebauer et al. 2011) ont étudié l'efficacité énergétique et la durée de vie de l'outil dans le cas d'une opération de forage en variant le type d'outil ainsi que son matériau de revêtement. Ils ont trouvé que l'efficacité énergétique variait de 4,3% à 17,3% avec différents types d'outils et que le coût de l'outil et l'efficacité énergétique sont en relation de compromis. En effet, l'évaluation du taux d'enlèvement de matière et l'usinage à sec assurent une meilleure efficacité énergétique.

(Yoon et al. 2012) ont collecté les données sur la vie de l'outil et la consommation d'énergie pour un processus de perçage et ils ont effectué une analyse intensifiée afin de trouver des conditions rentables assurant un haut rendement énergétique. En 2013 ils ont également souligné que le coût de l'outil et l'efficacité énergétique ont une relation de compromis et que le coût de l'outil est plus dominant dans la totalité du coût de l'opération par rapport au coût de l'énergie.

(Yoon et al. 2014) ont analysé la consommation d'énergie par rapport aux différents paramètres du procédé ainsi que les conditions d'usure de l'outil. Ils ont trouvé que la puissance de coupe augmente linéairement avec l'usure de l'outil. D'où le point de la consommation d'énergie optimale peut varier, en termes d'usure de l'outil.

(Balogun et al. 2016) ont établi la relation entre l'angle de coupe balayé et l'énergie de coupe spécifique dans le but de trouver la valeur optimale de l'angle de coupe balayé pour minimiser l'énergie consommée lors d'une opération de coupe.

5. Conclusion

Dans ce premier chapitre, on a présenté un aperçu sur le besoin énergétique de différents machines outils tel que les tours, les fraiseuses. Une comparaison est réalisée pour montrer la variation de ce besoin d'une machine à une autre et d'un processus à un autre. La deuxième partie de ce chapitre est consacré à un état de l'art. Un premier volet est consacré à un état de l'art sur les différents modèles d'estimation de l'énergie consommée. Ces modèles sont récapitulés en se basant sur les composantes de machines outils, sur le taux d'enlèvement de matière et sur le processus d'usinage. Un deuxième volet met l'accent sur les modèles d'optimisation de l'énergie consommée qui sont basés soit sur les paramètres de coupe soit sur la géométrie de l'outil de coupe.

Dans le chapitre 2 nous présenterons un modèle mathématique permettant d'estimer l'énergie et la puissance consommée par une machine outil. Ce modèle tient compte du comportement dynamique de l'effort de coupe lors de l'opération d'usinage.

Chapitre 2. Modélisation de l'Energie de Coupe Consommée par une Machine Outil

1. Introduction

L'évaluation précise de la consommation d'énergie d'une machine-outil (broche + table d'avance) est nécessaire pour étudier l'impact de la variation des paramètres de coupe sur cette consommation. L'étude bibliographique effectuée dans le 1^{er} chapitre montre la négligence de la variation du comportement dynamique des efforts de coupe ainsi que la négligence de la variation de la puissance consommée par les roulements qui supportent la broche d'une machine-outil. Dans ce chapitre, un modèle de calcul des puissances de coupe consommées respectivement par le système d'avance ainsi que la broche d'une machine outil, en tenant compte du comportement dynamique des efforts de coupe et des efforts exercés par les roulements, est proposé. Pour ce faire, une modélisation de la structure de la broche basée sur la méthode des éléments finis est effectuée. L'équation de mouvement est résolue pour déterminer l'effort de coupe et l'effort exercé par les roulements. L'énergie et la puissance consommée par la broche et le chariot sont par la suite déterminées. La puissance totale consommée est déduite en tenant compte du couplage ou non entre la broche et la table d'avance.

2. Modélisation de la broche

2.1 Modélisation de l'effort de coupe

Une dent réalisant une opération de coupe, génère un copeau sous forme d'un arc de trajet trochoïdal. L'épaisseur de ce copeau, variable en fonction du temps, est périodique et génère par la suite des composantes élémentaires d'efforts de coupe dF_x , dF_y et dF_z variables en fonction du temps (figure 2.1).

Ces composantes élémentaires d'efforts de coupe peuvent être définies à partir des composantes élémentaires tangentielle, radiale et axiale telles que :

$$\begin{cases} dF_{x,i}(\Phi_i(t)) \\ dF_{y,i}(\Phi_i(t)) \\ dF_{z,i}(\Phi_i(t)) \end{cases} = \begin{bmatrix} \cos(\Phi_i(t)) & \sin(\Phi_i(t)) & 0 \\ \sin(\Phi_i(t)) & -\cos(\Phi_i(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} dF_{t,i}(\Phi_i(t)) \\ dF_{r,i}(\Phi_i(t)) \\ dF_{a,i}(\Phi_i(t)) \end{cases} \quad (2.1)$$

où,

$dF_{t,i}$ est la composante élémentaire tangentielle qui agit dans la direction de la vitesse de coupe et représente la composante principale de coupe,

$dF_{r,i}$ est la composante élémentaire radiale qui agit dans la direction de la vitesse d'avance,

$dF_{a,i}$ est la composante élémentaire axiale qui agit suivant la direction de l'axe de la fraise, et Φ_i représente la position angulaire instantanée du $i^{ème}$ dent. Elle peut être exprimée en fonction de l'angle entre deux arrêtes successives Φ_p et la vitesse angulaire de la broche Ω comme suit :

$$\Phi_i(t) = \Omega t + (i-1)\Phi_p \quad (2.2)$$

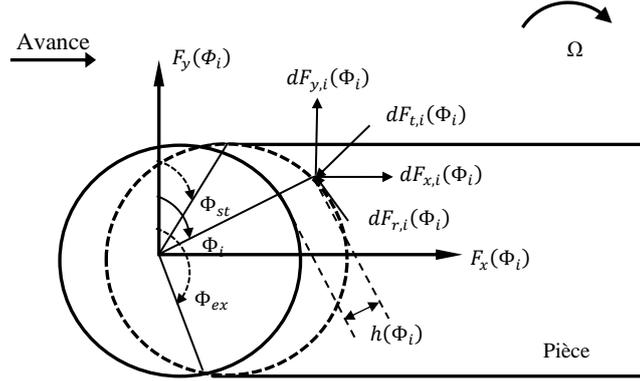


Figure 2.1. Efforts de coupe en fraisage

Les expressions des composantes élémentaires radiale, axiale et tangentielle de coupe sont fonction de l'expression de l'épaisseur du copeau $h(\Phi_i(t))$. Elles s'écrivent selon (Budak, 2006) comme suit :

$$\begin{cases} dF_{t,i} = g(\Phi_i(t))k_t a_p h(\Phi_i(t)) \\ dF_{r,i} = k_r g(\Phi_i(t))k_t a_p h(\Phi_i(t)) \\ dF_{a,i} = k_a g(\Phi_i(t))k_t a_p h(\Phi_i(t)) \end{cases} \quad (2.3)$$

où,

k_t, k_r et k_a sont les pressions spécifiques de coupe respectivement pour l'effort élémentaire tangential, radial et axial, dont leurs valeurs sont choisi égales à 2300, 0.8 et 0.7 N/mm².

a_p et f_z désignent respectivement la profondeur de passe et l'avance par dent,

$g(\Phi_i(t))$ est une fonction décrivant le contact entre la dent et la pièce et elle s'écrit :

$$g(\Phi_i(t)) = \begin{cases} 1, & \Phi_{st} \leq \Phi_i(t) \leq \Phi_{ex} \\ 0, & \text{sin on} \end{cases} \quad (2.4)$$

avec Φ_{st} et Φ_{ext} sont respectivement les angles d'entrée et de sortie de la fraise comme le montre la (figure 2.1).

En effet lorsque la dent est en contact avec la matière la fonction g prend la valeur 1 sinon elle prend la valeur 0.

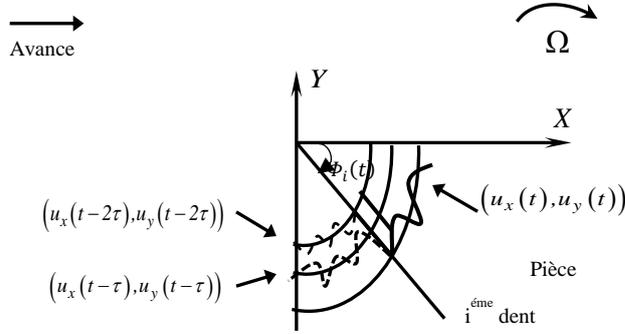


Figure 2.2. Epaisseur statique et dynamique du copeau

L'épaisseur du copeau $h(\Phi_i(t))$ pour une opération de surfacage s'écrit comme la somme d'une composante statique h_s et une autre dynamique h_d (Bouaziz, 2015) :

$$h(\Phi_i(t)) = \underbrace{f_z \sin(\Phi_i(t))}_{h_s} + \underbrace{(u_x(t) - u_x(t-\tau)) \sin(\Phi_i(t)) + (u_y(t) - u_y(t-\tau)) \cos(\Phi_i(t))}_{h_d} \quad (2.5)$$

où

$u_x(t)$ et $u_y(t)$ sont les déplacements de l'outil suivant les directions X et Y à l'instant t ,

et $u_x(t-\tau)$ et $u_y(t-\tau)$ sont les déplacements de l'outil suivant les directions X et Y à un instant $(t-\tau)$ (figure 2.2), où τ est la période de passage de deux dents exprimée en fonction de la vitesse angulaire de la broche Ω et du nombre de dent de l'outil comme suit :

$$\tau = \frac{2\pi}{\Omega N} \quad (2.6)$$

Lorsque la différence entre $(\Phi_{ext} - \Phi_{st})$ est supérieur à Φ_p , plus qu'une dent intervient lors de l'opération de coupe, dans ce cas, on doit sommer les efforts élémentaires exercés par tous les

dents pour trouver l'effort total exercé sur la pièce suivant les directions X , Y et Z qui s'écrivent :

$$\begin{cases} F_x(t) \\ F_y(t) \\ F_z(t) \end{cases} = \begin{cases} \sum_{i=1}^N dF_{x,i}(\Phi_i(t)) \\ \sum_{i=1}^N dF_{y,i}(\Phi_i(t)) \\ \sum_{i=1}^N dF_{z,i}(\Phi_i(t)) \end{cases} \quad (2.7)$$

2.2 Modélisation de l'effort des roulements

La rotation d'un élément roulant engendre un écrasement Δ_j entre la bille et les pistes de roulement des deux bagues intérieure et extérieure. Par la suite une charge normale F_j due au contact entre élément roulant – bagues est exercée par chaque bille qui s'écrit en utilisant la théorie de Hertz pour les contacts ponctuels (Hentati, 2008):

$$F_j = k_p \Delta_j^{1.5} \quad (2.8)$$

où k_p est la constante de Hertz. Le rapprochement total d'une bille numéro j , suivant la direction normale s'écrit:

$$\Delta_j = d(\psi_j) - d_0 \quad (2.9)$$

avec $d(\psi_j)$ et d_0 sont les distances entre les centres de courbure des bagues intérieure et extérieure respectivement sous charge et à vide. La distance $d(\psi_j)$ s'écrit:

$$d(\psi_j) = \sqrt{\Delta_{r,j}^{*2} + \Delta_{z,j}^{*2}} \quad (2.10)$$

où les déflexions radiales $\Delta_{r,j}^*$ et axiale $\Delta_{z,j}^*$ s'écrivent en fonction des déplacements u_x, u_y, u_z, θ_x et θ_y comme suit :

$$\Delta_{r,j}^* = u_x \cos(\psi_i) + u_y \sin(\psi_i) - a_j (\theta_x \sin(\psi_i) - \theta_y \cos(\psi_i)) + d_0 \cos(\alpha_0) \quad (2.11)$$

$$\Delta_{z,j}^* = R_j (\theta_x \sin(\psi_i) - \theta_y \cos(\psi_i)) + d_0 \sin(\alpha_0) \quad (2.12)$$

L'effort exercé par tous les éléments roulements des différents roulements supportant la broche est calculé en sommant sur le nombre de paliers et de billes l'effort élémentaire exercé par une seule bille.

$$F_{roulement} = \sum_{k=1}^{N_{paliers}} \sum_{j=1}^{N_{billes}} F_j \quad (2.13)$$

2.3 Modélisation de l'arbre de la broche par éléments finis

La modélisation de l'arbre est basée sur les petites déformations du mouvement élastiques. Le modèle éléments finis est obtenu par une discrétisation de la broche en 15 éléments finis de poutre de type Timoshenko tout tenant compte des effets de cisaillements. Les cinq degrés de libertés (3 déplacements u_x, u_y, u_z et 2 rotations θ_x et θ_y) sont considérés. Aussi, les effets gyroscopiques et les effets d'inertie (force centrifuge) sont inclus dans notre modélisation (Bouaziz, 2015). Les différentes matrices masse $[M_b]$, raideur $[K_b]$, gyroscopique $[G_b]$ et centrifuge $[C_b]$ sont alors déterminées (Voir annexe A).

2.4 Equation de mouvement

Les efforts des roulements et de coupe sont considérés comme des efforts d'excitation pour la broche et ils sont introduits dans le second membre de l'équation de mouvement (équation 2.14) comme suit :

$$[M_b]\{\ddot{q}\} + 2\Omega[G_b]\{\dot{q}\} + \left([K_b - \Omega^2[C_b]]\right)\{q\} = \{F_c(t, q)\} + \{F_{roulement}\} \quad (2.14)$$

où q , \dot{q} et \ddot{q} définissent respectivement les vecteurs déplacement, vitesse et accélération des différents nœuds de la structure.

3. Modélisation de l'énergie consommée par la table d'avance

La table d'avance est composée d'un moteur et d'une transmission mécanique comportant un engrenage simple étage (permettant la transmission de la rotation du moteur vers la glissière), une glissière (formé par un système vis-écrou permettant l'avance de la table) et un système de guidage en rotation assurée par les roulements (figure 2.3).

Le moteur est caractérisé par son moment d'inertie J_1 tandis que l'engrènement est caractérisé par son moment d'inertie J_2 , son rapport de transmission k_2 et son rendement η_2 . Le rendement de la vis est η_3 , son inertie est J_3 , son pas est p_3 et son diamètre est d_m . Un frottement entre la glissière

et la vis est tenue en compte et noté μ_g ainsi que le frottement entre la vis et les butés μ_b . La pièce fixée sur la table d'avance, sera soumise à un effort de coupe axial F_z et un effort d'avance F_x .

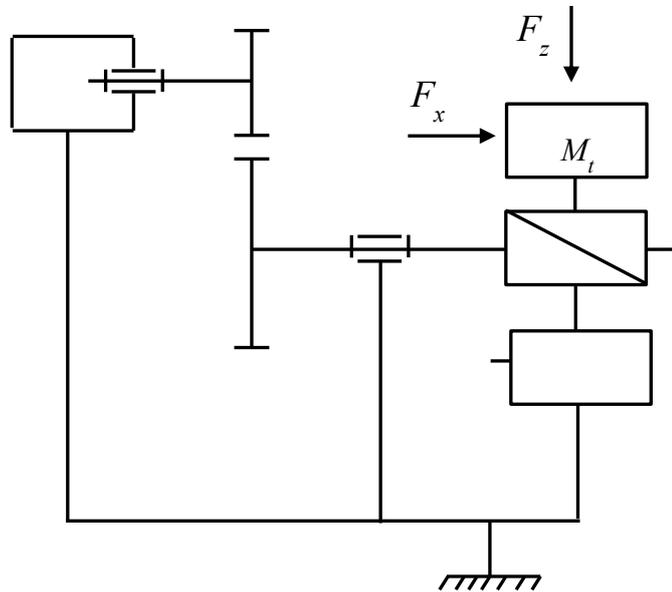


Figure 2.3. Description schématique de la table d'avance

L'énergie de coupe consommée peut être déterminée en multipliant la puissance mécanique requise P_{mn} par le temps de coupe comme suit:

$$E_{Tn} = P_{mn} \times t_c \quad (2.15)$$

où, t_c est le temps de coupe qui s'écrit sous :

$$t_c = \frac{L_p}{f_z \cdot \Omega N} \quad (2.16)$$

avec L_p la longueur de la pièce et N le nombre de dent de l'outil.

P_{mn} définit la puissance mécanique consommée par un axe d'avance suivant X calculée en tenant compte du comportement dynamique du couple de coupe comme suit :

$$P_{mn} = T_{coupe} \times \omega \quad (2.17)$$

où, ω définit la vitesse de rotation du moteur qui s'écrit :

$$\omega = \frac{\Omega f_z N}{p_3 k_2} \quad (2.18)$$

et T_{coupe} définie le couple de coupe variable au cours du temps (Avram et Xirouchakis, 2011) qui s'écrit comme la somme de trois composante de compensation : T_1 le couple de frottement causé par le guidage en translation, T_2 le couple de frottement causé par les roulements et T_3 le couple de l'enlèvement de matière :

$$T_{coupe}(t) = \underbrace{\mu_g \frac{p_3}{2\Pi\eta_3\eta_2k_2} (M_t g + F_z(t))}_{T_1} + \underbrace{\mu_b \frac{d_m}{2\eta_2k_2} (F_{pb} + F_{ps} + F_x(t))}_{T_2} + \underbrace{\frac{p_3}{2\Pi\eta_3\eta_2k_2} F_x(t)}_{T_3} \quad (2.19)$$

Notre modèle prend en compte l'impact du poids de la pièce et de la table M_t (Edem et al. 2017) et prend en compte aussi la précontrainte des butées F_{pb} et la précontrainte de la vis F_{ps} . Les efforts de coupe instantanés axial et radial notés respectivement $F_z(t)$ et $F_x(t)$ sont déduits à partir de la résolution de l'équation de mouvement de la broche (équation 2.14). Les différentes étapes du calcul de l'énergie mécanique consommée par un axe d'avance sont décrites dans l'organigramme de la figure 2.4. L'effort de coupe est déterminé à partir de la résolution de l'équation de mouvement non linéaire de la broche en utilisant la méthode de Newmark couplée avec celle de Newton Raphson. Ces efforts sont utilisés pour le calcul du couple de coupe et par la suite la puissance mécanique consommée. On peut déduire par la suite l'énergie consommée durant une phase de coupe. Cette énergie est variable en fonction du temps.

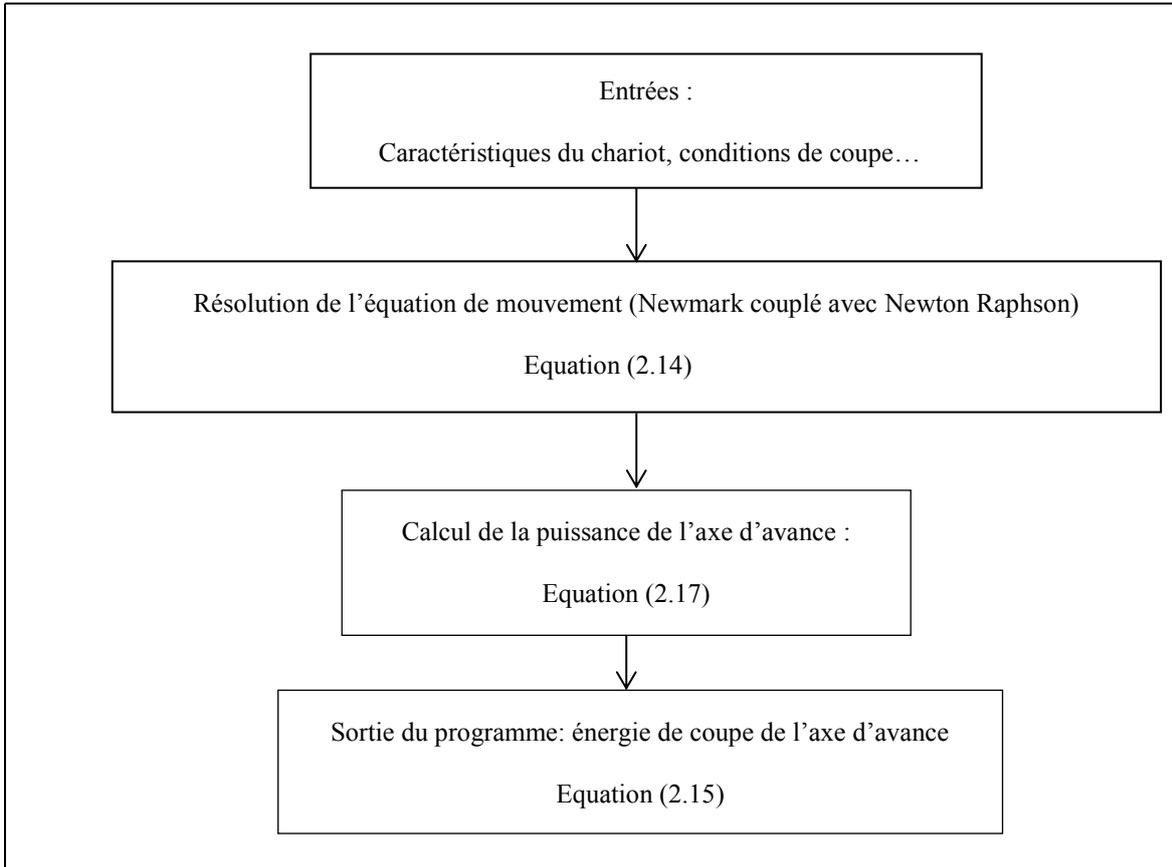


Figure 2.4. *Algorithme de calcul de l'énergie de coupe consommée par la table d'avance*

4. Modélisation de l'énergie consommée par la broche

Pour une broche, l'énergie mécanique de coupe consommée peut être calculée comme suit:

$$E_{Bn} = \int_0^{t_c} P_c(t) dt \quad (2.20)$$

où P_c est la puissance de coupe écrite sous la forme de la somme de la puissance de l'enlèvement du matériau P_{en} (la puissance consommée par l'opération de coupe) et la puissance nécessaire pour compenser les pertes de roulements P_{pr} telle que :

$$P_c(t) = P_{en}(t) + P_{pr}(t) \quad (2.21)$$

Dans les sections suivantes, nous définissons ces deux puissances.

4.1 Modélisation de la puissance de l'enlèvement de matière

La puissance d'enlèvement de matière est exprimée par (Avram et Xirouchakis, 2011) comme suit:

$$P_{en} = \frac{F_t V_c}{60} \quad (2.22)$$

avec V_c est la vitesse de coupe et F_t est l'effort de coupe tangentiel. Cet effort est considéré constant dans la modélisation développée par Avram et Xirouchakis. Pour notre approche, nous considérons un effort tangentiel variable en fonction du temps comme définit dans la section (2.1).

4.2 Modélisation de la puissance des roulements

La puissance nécessaire pour compenser les frictions pour un seul roulement est exprimée par (Avram and Xirouchakis, 2011) comme suit:

$$P_{pr} = 1.047 \times 10^{-4} \frac{30\Omega}{\Pi} (T_{charge} + T_{billes} + T_{viscosité}) \quad (2.23)$$

avec T_{charge} , T_{billes} et $T_{viscosité}$ sont respectivement le couple lié à la charge appliquée sur un roulement, le couple lié à la rotation des billes considérée dans notre approche variable en fonction du temps, et le couple lié à la viscosité.

Le couple lié à la charge T_{charge} est exprimé en fonction des efforts de coupe radial et axial comme suit:

$$T_{charge}(t) = z \left(\frac{x_s F_r(t) + y_s F_z(t)}{C_s} \right)^y \left(\max(0.9 F_z(t) \cot(\alpha)) - 0.1 F_r(t), F_r(t) \right) d_{mr} \quad (2.24)$$

où, d_{mr} est le diamètre moyen du roulement, C_s un facteur de charge, et x_s , y_s , z et y sont des constantes qui dépendent du type de roulement, dont les valeurs adoptées sont :

$x_s = 0.5$, $y_s = 0.33$, $z = 0.001$ et $y = 0.33$ (Avram et Xirouchakis).

Le couple lié à la rotation des billes T_{billes} peut être écrit comme suit:

$$T_{billes}(t) = \sum_{j=1}^{N_{billes}} \frac{3\mu_b F_j(t) a \varepsilon}{8} \quad (2.25)$$

avec,

$$a = 0.0236 a^* \left(\frac{F_j(t)}{\sum \rho} \right)^{1/3} \quad (2.26)$$

où, N_{billes} est le nombre des billes, μ_b un coefficient de frottement, a^* , ε et ρ sont des paramètres géométriques.

Selon (Avram et Xirouchakis, 2011) le couple lié à la viscosité $T_{viscosité}$ peut être exprimé comme suit:

$$\begin{cases} T_{viscosité} = 160 \times 10^{-7} f_0 d_m^3, & v_{oil} \frac{30\Omega}{\Pi} < 2000 \\ T_{viscosité} = 10^{-7} f_0 \left(v_{oil} \times \frac{30\Omega}{\Pi} \right)^{2/3} d_m^3, & v_{oil} \frac{30\Omega}{\Pi} \geq 2000 \end{cases} \quad (2.27)$$

où f_0 est un facteur qui dépend du type de roulement et v_{oil} est la viscosité cinématique. Nous choisissons $f_0=1.7$ et v_{oil} est une constante dépend de la vitesse de rotation (Avram et Xirouchakis, 2011).

Les différentes étapes pour calculer numériquement l'énergie de coupe de la broche sont résumées dans l'organigramme suivant de la figure 2.5. En résolvant l'équation de mouvement de la broche, on peut déterminer le vecteur déplacement $\{q\}$ ainsi que les vecteurs efforts de coupe et effort exercé par les roulements. Ces valeurs sont utilisées pour calculer la puissance d'enlèvement de matière donnée par la relation (2.24) et la puissance de compensation des frictions des roulements donnée par les équations (2.6) à (3.11). Nous pouvons estimer par la suite l'énergie mécanique de coupe consommée par une broche lors d'une opération de surfacage.

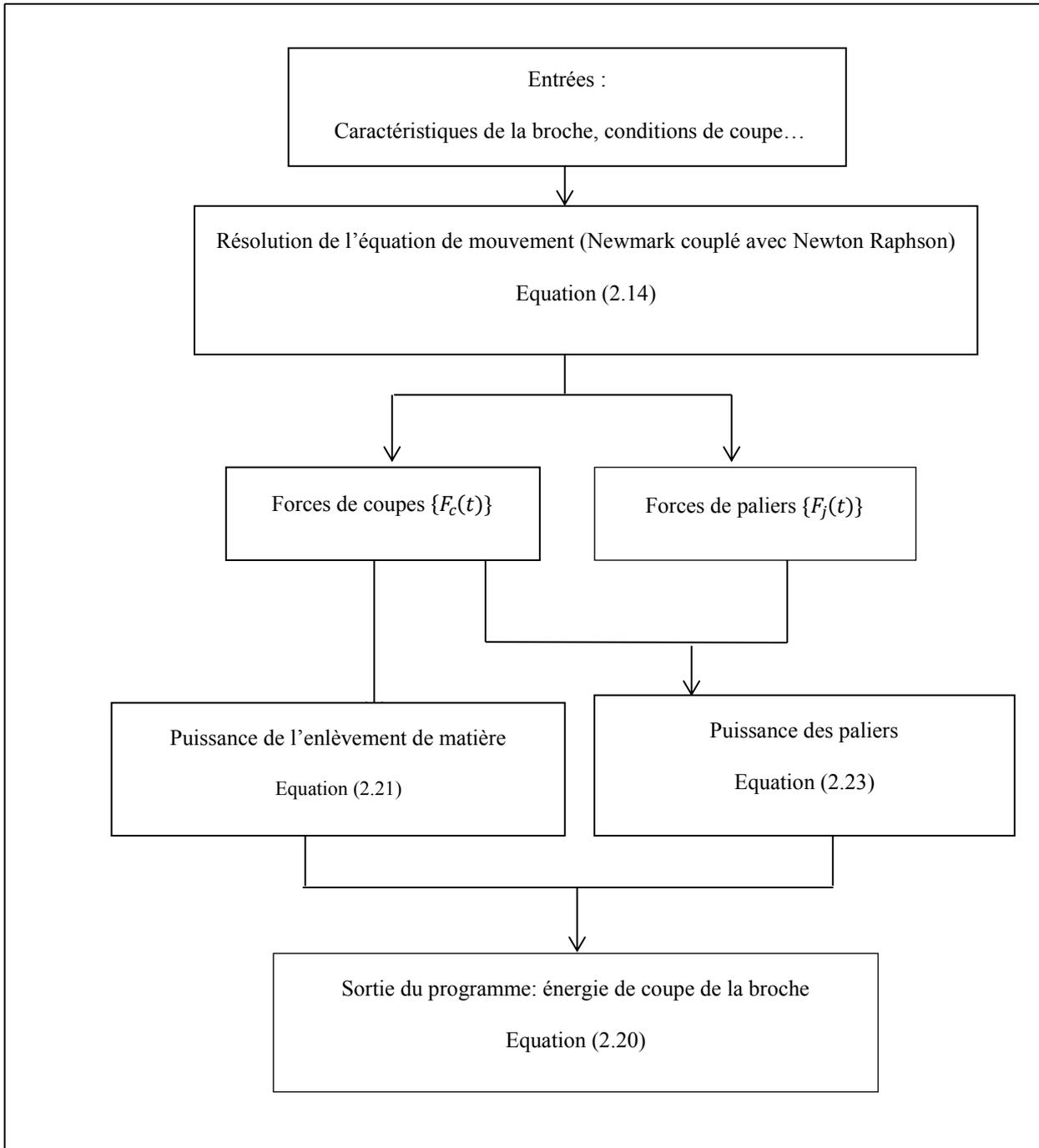


Figure 2.5. *Algorithme de calcul de l'énergie de coupe consommée par la broche*

5. Modélisation de l'énergie consommée par une machine-outil

La consommation d'énergie d'une machine-outil est causée généralement par les quatre actions suivantes :

- action de mise en marche nécessaire pour l'activation de la machine,
- action de coupe dans l'air comprenant la rotation de la broche et la translation des axes d'avances sans charge de coupe,

- action d'enlèvement de matière,
- action de changement d'outil.

Le modèle théorique proposé alors s'écrit sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{totale} = E_{fixes} + \sum_{i=1}^{n_{passes}} E_{variables} \\ E_{fixes} = E_{installation} + E_{mise\ en\ place} + E_{changement\ outil} \\ E_{variables} = E_{c\ seule\ passe} + E_{engagement} + E_{dégagement} \end{array} \right. \quad (2.28)$$

où E_{fixes} représente l'énergie constante qui ne dépend pas de l'opération d'usinage et s'écrit comme la somme des énergies telles que:

- $E_{installation}$ l'énergie nécessaire pour l'activation des unités auxiliaires de la machine (unité de calcul, éclairage, charger : le moteur, le ventilateur, le moteur de la pompe de lubrification, le moteur de la pompe hydraulique...),
- $E_{mise\ en\ place}$ l'énergie nécessaire lorsque la machine réalise un mouvement de coupe sans charge comme la descente de la broche vers la pièce et avance de la table vers le point de l'outil,
- $E_{changement\ outil}$ l'énergie requise pour changer les outils de coupe, qui tient compte du nombre de changements d'outil et elle s'écrit :

$$E_{changement\ outil} = P_{cho} t_{cho} \quad (2.29)$$

avec,

$$t_{cho} = N t_o \sum_{i=1}^{n_{passes}} \frac{t_c}{T} \quad (2.30)$$

où t_o est le temps nécessaire pour changer une plaquette défectueuse et T la durée de vie de l'outil,

- $E_{c\ seule\ passe}$ représente l'énergie nécessaire pour réaliser une passe d'enlèvement de matière. Cette énergie est variable et dépend fortement des paramètres de l'opération donnée à la machine-outil (surfaçage, périphérique...). D'où le besoin à une modélisation énergétique pour estimer cette énergie consommée. Nous présentons dans la section suivante l'expression de l'énergie de coupe consommée par la machine-outil en tenant compte ou non du couplage entre le chariot et la broche.

- $E_{engagement}$ l'énergie nécessaire pour l'approche de l'outil vers la pièce,
- $E_{dégagement}$ l'énergie nécessaire pour le dégagement de l'outil pour commencer une nouvelle passe de coupe.

5.1 Modèle découplé

Le modèle découplé est obtenu dans le cas où l'équation de mouvement est modélisée tenant en compte seulement des matrices raideur, masse, centrifuge et gyroscopique de la broche sans tenir compte de celles de la table d'avance comme mentionné dans l'équation (2.16). Dans ce cas la résolution des efforts de coupe et des roulements sera obtenue sans considération de la présence de la table d'avance. L'énergie consommée par la machine outil est la somme des énergies consommées par la table d'avance et la broche telle que :

$$E_{c\ seule\ passe} = E_{Bn} + E_{Tn} \quad (2.31)$$

5.2 Modèle couplé

On s'intéresse dans cette partie à modéliser le couplage entre la broche et la table d'avance. La première étape consiste à obtenir les matrices rigidité et masse de la table d'avance de la machine CNC Feeler FV 760 de dimensions 1100×600×140. Pour ce faire, une modélisation par élément finis volumiques est élaborée sur le logiciel ANSYS. La longueur de la table est discrétisée en 11 éléments finis et la largeur en 6 éléments finis (figure 2.5). L'énergie consommée par la machine outil est la somme des énergies consommées par la table d'avance et la broche (équation 2.31).

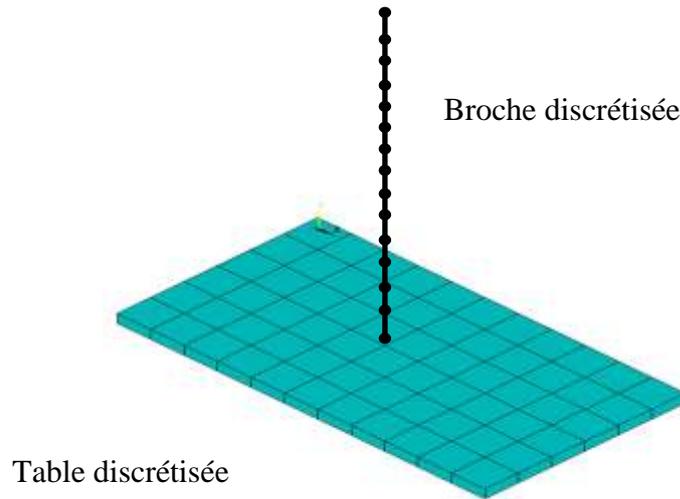


Figure 2.6. *Discrétisation de la table en éléments finis*

La broche est discrétisée en 15 éléments finis comme décrit dans la section 2.3. L'étiau et la pièce à usiner sont considérés rigides dans notre modèle et ils sont modélisés par une masse concentré au niveau du point de contact broche - pièce - table.

L'équation de mouvement du système couplé, s'écrit comme suit :

$$[M_{couplage}]\{\ddot{q}\} + [C_{couplage}]\{\dot{q}\} + [K_{couplage}]\{q\} = \begin{Bmatrix} F_c \\ -F_c \end{Bmatrix} \quad (2.32)$$

où :

- $[M_{couplage}]$ est défini à partir de la matrice masse respective de la broche $[M_{broche}]$ et de la table d'avance $[M_{chariot}]$,

- $[C_{couplage}]$ est la matrice d'amortissement modal du système couplé qui s'écrit :

$$[C_{couplage}] = \alpha [K_{couplage}] + \beta [M_{couplage}] \quad (2.33)$$

- $[K_{couplage}]$ est défini à partir de la matrice raideur respective de la broche $[K_{broche}]$ et de la table d'avance $[K_{chariot}]$,

où, α et β sont les coefficients d'amortissement et F_c l'effort de coupe appliqué au premier nœud définie comme le point d'action de l'outil (point de contact).

Le contact entre la table et de la broche est modélisé par une rigidité localisée k_g .

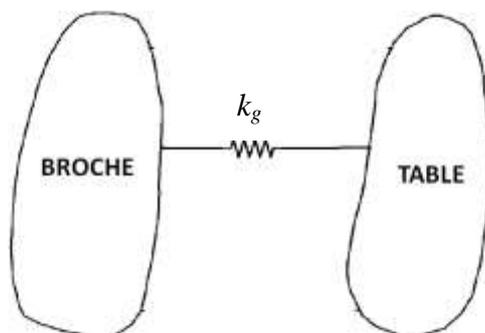


Figure 2.7. Modélisation du couplage entre la broche et la table d'avance

La matrice rigidité totale du système couplé s'écrit sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 [K_{couplage}] = & \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{K}_{Broche} & \\ \hline & \mathbf{K}_{Table} \end{array} \right] + \begin{array}{c} \text{col 1} \\ \downarrow \\ \left[\begin{array}{cccccc} \mathbf{K}_i & 0 & \cdot & \cdot & -\mathbf{K}_i & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 & \cdot \\ \cdot & \cdot & 0 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \cdot \\ -\mathbf{K}_i & \cdot & 0 & 0 & \mathbf{K}_i & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \end{array} \right] \\ \downarrow \\ \text{col 60} \end{array} \begin{array}{l} \leftarrow \text{ligne 1} \\ \\ \\ \\ \leftarrow \text{ligne 60} \end{array} \quad (2.34)
 \end{aligned}$$

$\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{Matrice rigidité sans couplage}}$
 $\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{Matrice de couplage}}$

où les nœuds 1 et 60 correspondant respectivement au point d'action de l'outil et au point de déplacement de la pièce.

\mathbf{K}_i définie une matrice diagonale qui s'écrit :

$$\mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} k_g & 0 & 0 \\ 0 & k_g & 0 \\ 0 & 0 & k_g \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Pour choisir la valeur de cette rigidité localisée une étude paramétrique est effectuée en changeant à chaque fois la valeur de k_g jusqu'à l'obtention d'une différence de déplacement entre les deux nœuds invariables comme le montre la figure 2.8.

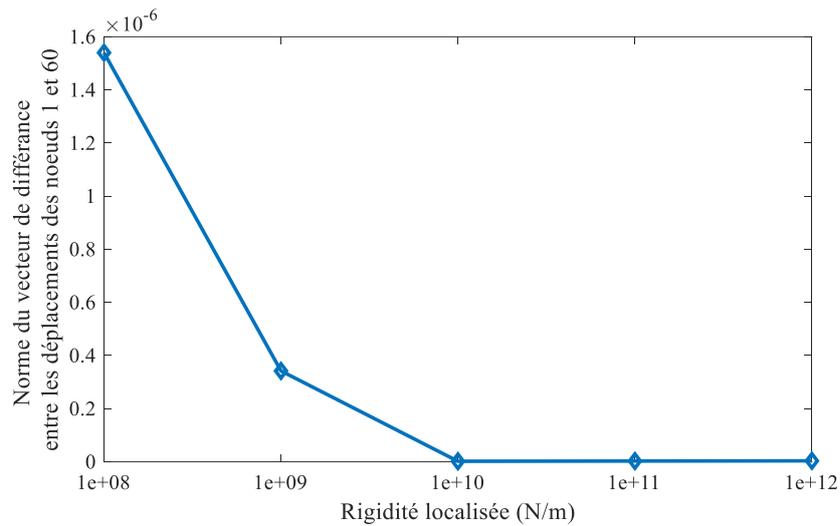


Figure 2.8. Norme de la différence entre les déplacements du nœud 1 de la broche et le nœud 60 de la table d'avance

L'équation de mouvement du système couplé est résolue en utilisant la méthode de Newmark couplée avec Newton Raphson. Les réponses temporelles des vecteur déplacements suivant les directions X , Y et Z du nœud 1 de la broche ainsi que le nœud 60 de la table sont présentées dans les figures suivantes.

A partir de ces figures on remarque que les déplacements respectivement des nœuds 1 et 60 de la broche et de la table suivant les 3 directions X , Y et Z sont identiques en terme de norme mais de sens opposés. Nous pouvons conclure donc que le couplage entre les deux systèmes est bien modélisé.

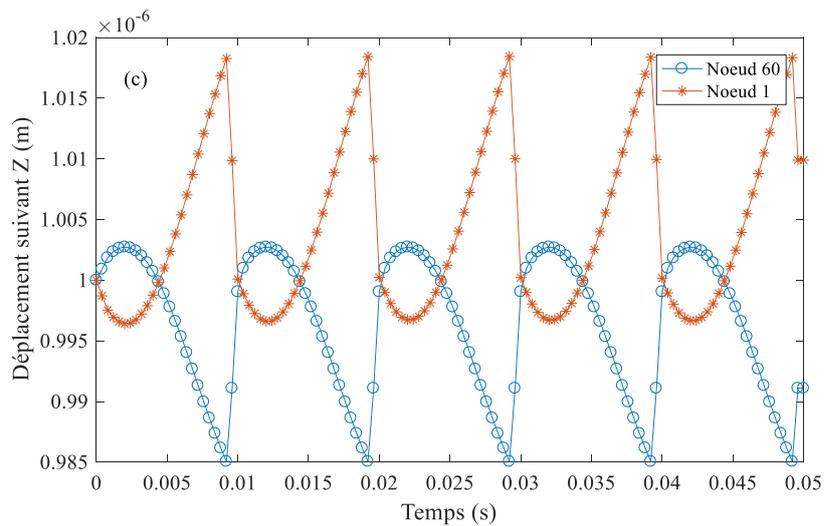
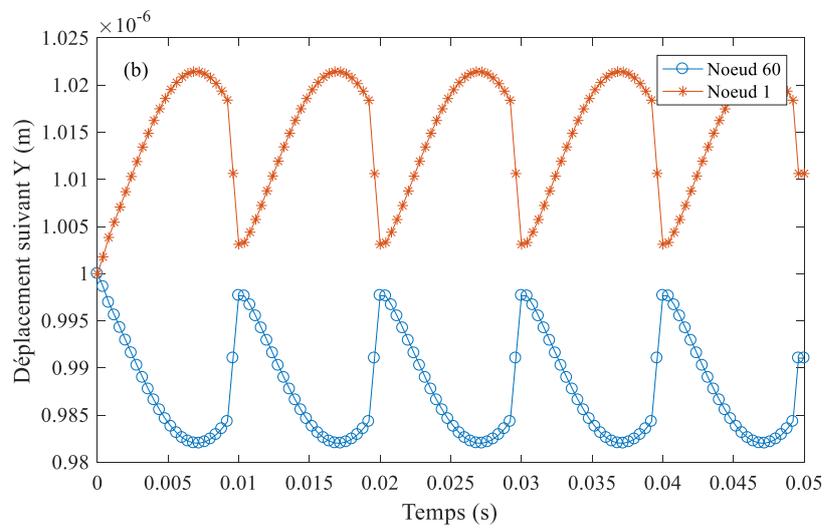
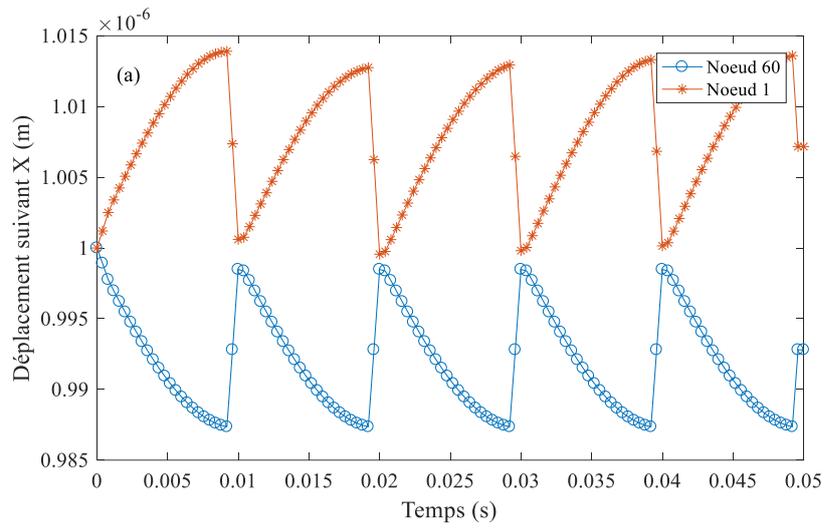


Figure 2.9. Evolution du déplacement du nœud 1 de la broche et du nœud 60 de la table d'avance suivant la direction X (a), direction Y (b) et la direction Z (c)

6. Conclusion

Dans ce chapitre nous proposons un modèle numérique appliqué à une fraiseuse afin d'estimer la puissance et l'énergie consommées par la broche et la table d'avance pendant la phase de coupe. Le modèle de coupe proposé prend en compte le caractère dynamique de la force de coupe ainsi que celle des roulements. Un intérêt est présenté pour modéliser le couplage entre la broche et la table d'avance.

L'énergie totale de coupe consommée par la broche et la table sera donc calculée en utilisant l'expression (2.31) en considérant un effort de coupe trouvé en tenant compte du couplage entre la broche et la table.

Chapitre 3. *Etude d'une fraiseuse CNC Feeler FV-760*

1. Introduction

Dans ce chapitre, une fraiseuse Feeler FV 760 est étudiée. Le modèle d'estimation de l'énergie et de la puissance de coupe développé dans le chapitre 2 est utilisé. Le modèle est validé par une étude expérimentale. Une étude paramétrique est effectuée en variant les paramètres de coupe pour étudier leurs impacts sur le comportement énergétique de la broche et de la table d'avance. Nous avons ajouté des défauts d'usure et de fabrication au niveau des roulements et nous avons tiré l'impact de ces défauts sur la puissance et l'énergie de la broche.

2. Présentation de l'étude expérimentale

Une fraiseuse Feeler CNC série Fv760 représentée par la figure 3.1 est utilisée pour réaliser les études expérimentales.

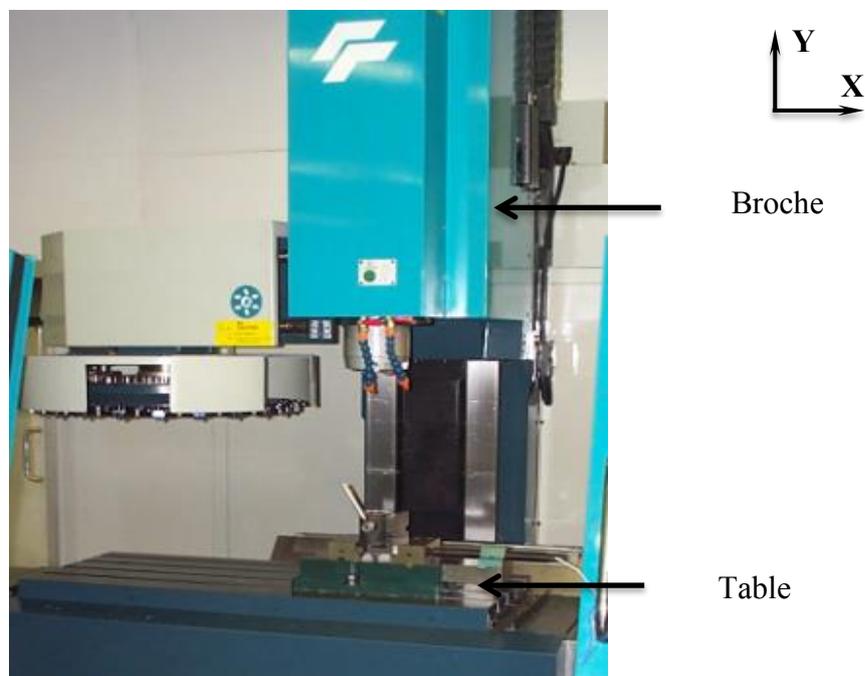


Figure 3.1. *Fraiseuse Feeler CNC Fv 760*

Les caractéristiques du système d'avance (chariot) étudié figurent dans le tableau 3-1. Une pièce en acier doux de dimension $150 \times 100 \times 50$ mm est utilisée (figure 3.1).

Tableau 3-1. *Caratéristiques du chariot d'une fraiseuse Feeler CNC Fv 760*

Course transversale maximale du système d'avance le long de l'axe Z	0.51 m
Avance rapide suivant les axes X, Y et Z	24 m/min
Course transversale maximale suivant l'axe X	0.76 m
Course transversale maximale suivant l'axe Y	0.42 m
Course transversale maximale suivant l'axe Z	0.51 m

Notre broche, supportée par 4 roulements de type SKF 6016-2Z, est présentée par la figure 3.2 et possède les caractéristiques données par le tableau 3-2.

Tableau 3-2. *Caractéristiques de la broche*

Diamètre de la broche	80 mm
Type de porte outil	BT 40
Vitesse de rotation de la machine	50-8000 tr/min
Longueur de la broche	665 mm

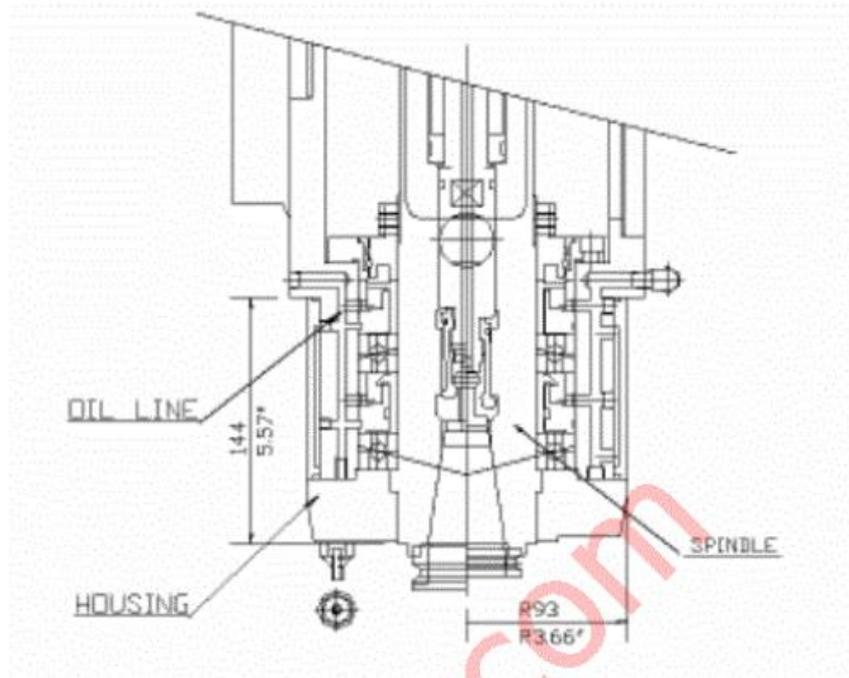


Figure 3.2. Représentation schématisation de la broche [<https://ekilavuz.com/feeler-fv-760-cnc-dik-isleme-merkezi--fdaef8f2919508ad>]

La commande de la vitesse de rotation de la broche ainsi que la vitesse d'avance de la table est assurée par deux variateurs comme l'indique la figure 3.3.

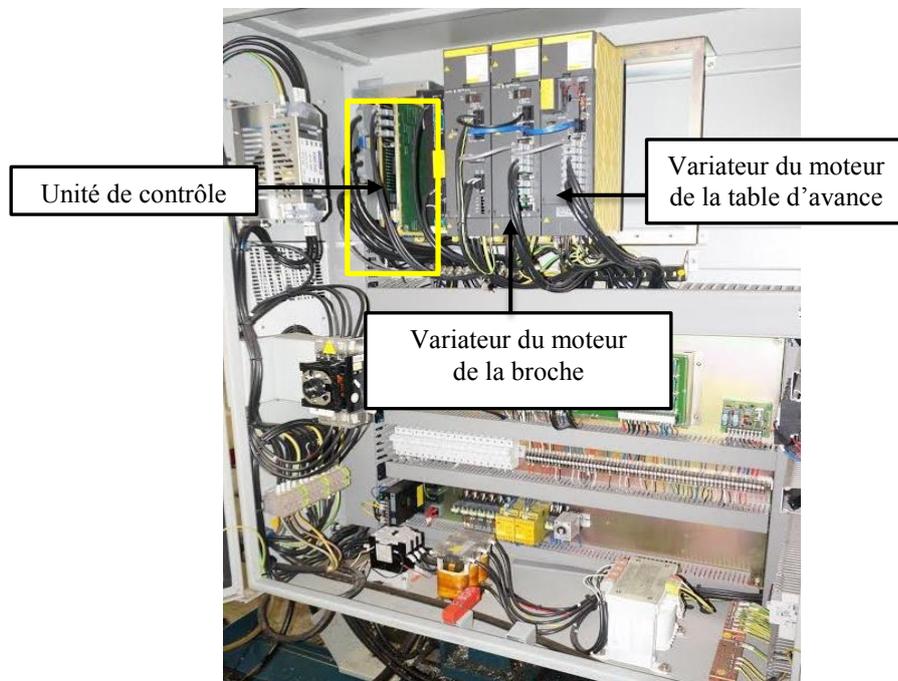


Figure 3.3. Armoire de la machine-outil Feeler Fv 760

Dans le but de mesurer la puissance de coupe lors de l'opération de fraisage pour plusieurs conditions de coupe, un branchement électrique est effectué comme l'indique la figure 3.4. Un premier branchement est effectué à la sortie du variateur du moteur de la broche et un deuxième à la sortie de variateur du moteur de l'axe d'avance X (figure 3.3).

Le schéma physique de ce câblage (figure 3.5) montre le branchement de trois sondes de tension et de courant avec le variateur du moteur de l'axe X dans une première étude et avec le moteur de la broche dans une deuxième étude pour mesurer les signaux en temps réel. Les valeurs de la tension et de l'intensité du courant sont enregistrées avec une fréquence d'échantillonnage de 1MHz sur deux cartes de collecte de données de type NI-9223. Ces dernières permettent la conversion des signaux obtenus en d'autres numériques, qui sont par la suite enregistrés sur le châssis compactDAQ-9174. Le traitement de ces données est effectué en utilisant l'interface LabVIEW afin de déterminer instantanément la puissance expérimentale absorbée par la machine.

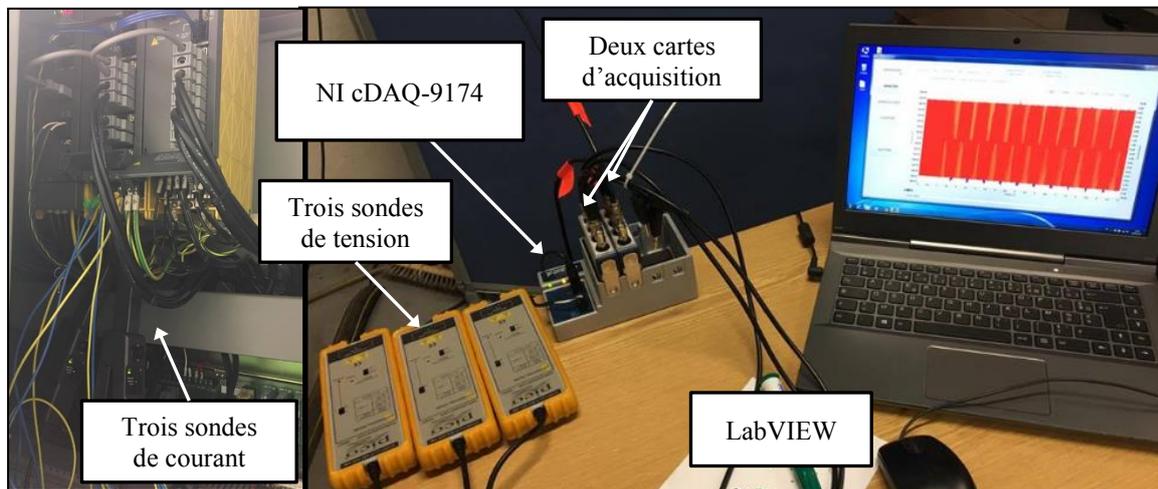


Figure 3.4. Mise en place des instruments de mesure sur la machine outil

Lors d'une opération de fraisage, la puissance expérimentale absorbée par un axe d'avance peut être déterminée comme suit:

$$P_{\text{absorbée expérimentale}} = \frac{U_0}{\sqrt{3}} I_0 + \frac{U_1}{\sqrt{3}} I_1 + \frac{U_2}{\sqrt{3}} I_2 \quad (3.3)$$

où U_0 , U_1 et U_2 sont les tensions mesurés entre deux phases et I_0 , I_1 et I_2 sont les intensités mesurés par phase.

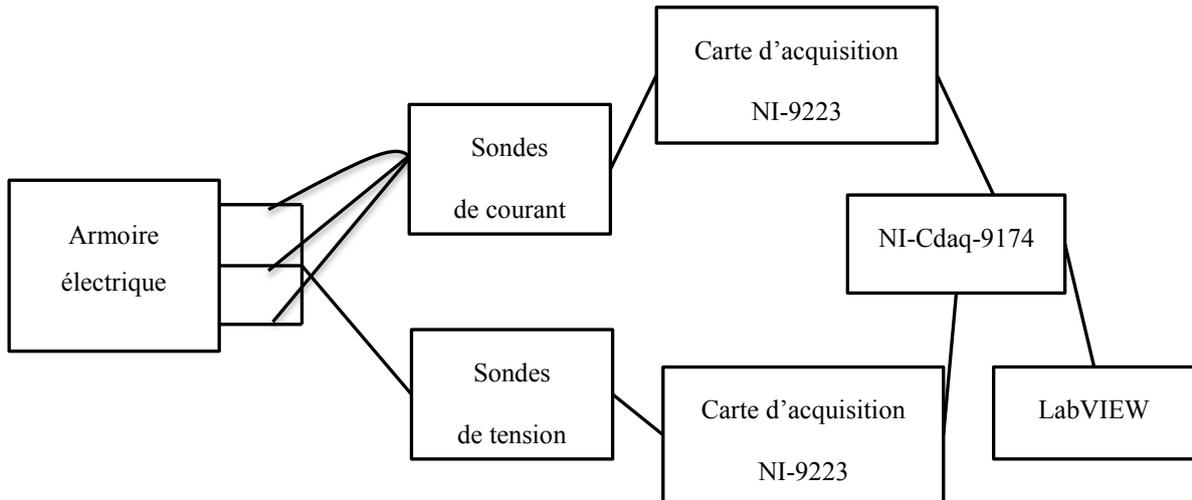


Figure 3.5. Schéma physique du branchement

La puissance mécanique mesurée est alors définie par soustraction de la puissance dissipée par effet Joule de la puissance totale absorbée comme suit:

$$P_{\text{mécanique expérimentale}} = P_{\text{absorbée expérimentale}} - R(I_0^2 + I_1^2 + I_2^2) \quad (3.4)$$

où $R = 0,29 \Omega$ est la résistance mesurée du moteur de l'axe X et $R=2.42 \Omega$ est la résistance mesurée du moteur de la broche. Pour obtenir l'énergie mécanique expérimentale, une intégration suivant le temps est réalisée.

$$E_{\text{mécanique expérimentale}} = \int_0^t P_{\text{mécanique expérimentale}} dt \quad (3.5)$$

3. Puissance et énergie consommées par la table d'avance

3.1 Résultats expérimentaux

L'évolution de la puissance expérimentale mécanique consommée par l'axe d'avance X de la machine lors d'un aller simple de surfacage à une vitesse de coupe égale à 90 m/min, une profondeur de passe égale à 1 mm et une avance par dent égale à 0,2 mm/dent est illustrée par la figure 3.6.

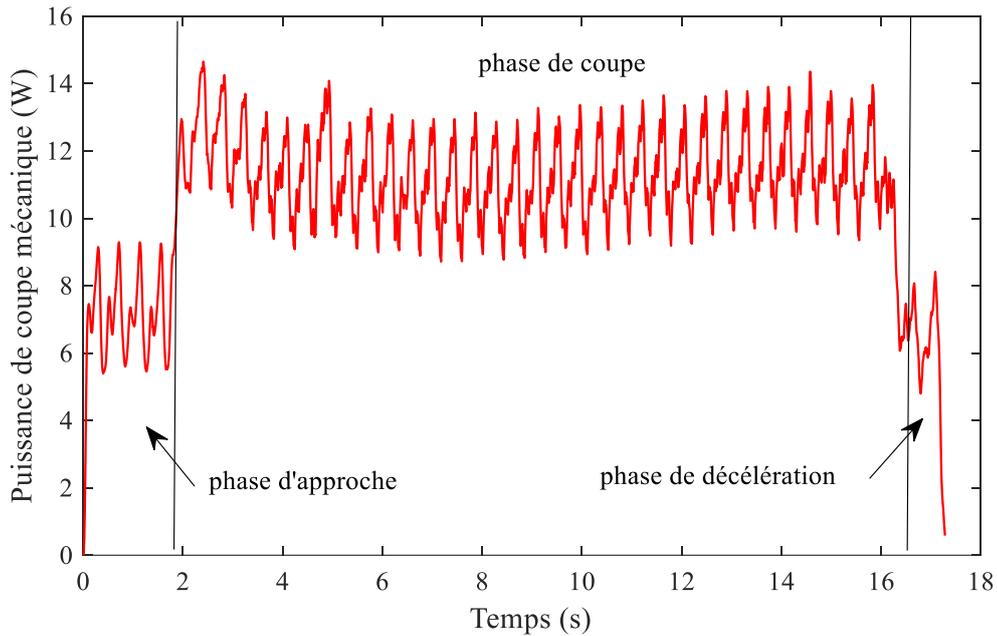


Figure 3.6. *Mesure de la puissance mécanique consommée par l'axe d'avance X pour une opération de surfacage*

La courbe de puissance expérimentale est composée de trois phases: phase d'approche, phase de coupe et phase de décélération. Durant la phase d'approche, l'axe X commence à avancer avec un mouvement rapide. On note que le moteur consomme une puissance appelée puissance de mise en place $P_{mise\ en\ place}$ servant à surmonter l'inertie du moteur et les frottements causés par la glissière ainsi que les roulements. Lors de la phase de coupe, caractérisé par une vitesse d'avance constante, l'outil est en contact complet avec la pièce à usiner pour enlever la matière. La puissance consommée par le moteur lors de cette phase notée par P_{coupe} a une intensité plus élevée que celle de $P_{mise\ en\ place}$. On note encore un comportement variable en fonction du temps provenant de la variation de l'effort de coupe en fonction du temps et la vibration de l'outil durant la phase de coupe. Un tel comportement influe sur la prédiction précise de la consommation d'énergie, d'où l'utilité de bien modéliser ce comportement. Finalement, on peut observer que lors de la phase de décélération la puissance consommée diminue jusqu'à atteindre la puissance $P_{mise\ en\ place}$.

3.2 Résultats numériques

Pour effectuer la simulation nous avons adoptés les paramètres du tableau 3.3 qui sont déterminés à l'aide de la méthode des moindres carrés.

Tableau 3-3. Paramètres de la simulation

Paramètres de la simulation	Symbole	Valeurs
Coefficient de réduction du réducteur	k_2	2
Coefficient de frottement de la glissière	μ_g	0.1
Coefficient de frottement de la butée	μ_b	0.04
Précontrainte appliquée sur la butée (N)	F_{pb}	1375
Précontrainte appliquée sur la vis (N)	F_{ps}	3600
Pas de la vis (mm)	P_3	2
Rendement de la vis	η_3	0.9
Rendement du réducteur	η_2	0.9
Masse totale de la table et de la pièce (kg)	M_t	960

3.2.1 Comparaison entre le modèle statique, quasi statique et dynamique

Pour vérifier l'efficacité de notre modèle de calcul d'énergie de coupe, une comparaison est effectuée entre l'énergie expérimentale et les énergies numériques calculées à partir d'un modèle dynamique, d'un modèle quasi statique et d'un modèle statique. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau 3.4

Il convient de rappeler que l'approche statique adoptée par (Calvanese et al. 2013) repose sur un modèle d'effort de coupe sans tenir compte de la position angulaire de la dent ϕ_j . L'expression de l'énergie consommée par un axe d'avance est déduite en utilisant l'équation (3.3) où la puissance mécanique s'écrit :

$$P_{calvanese} = \left(C_s \sin g(v_t) + C_d v_t + \frac{1}{3} F_{coupe} \right) v_t \quad (3.6)$$

L'effort de coupe suivant la direction d'avance est écrit :

$$F_{coupe} = k_{cs} (h_m)^{-\omega} \frac{a_p a_e f_z z}{60 \Pi D} \quad (3.7)$$

Afin de déterminer les coefficients de frottement statique C_s et visqueux C_d , la méthode des moindres carrés est utilisée en considérant $P_{calvanese} = P_{expérimentale}$, ce qui conduit à $C_s = -0.032$ et $C_d = 0.37$. On peut déduire la puissance $P_{calvanese}$ en considérant les valeurs de coefficients de frottement et l'effort de coupe calculés en utilisant la relation (3.4).

Le même procédé est utilisé par (Alberteli et al. 2016) qui utilise un effort de coupe quasi statique en considérant la composante statique de l'épaisseur du copeau qui s'écrit :

$$\bar{F}_x = n_{dents effective} \left(\frac{k_t (f_z) f_z P}{\phi} \left(\frac{-1}{4} + \frac{1}{4} \cos(2\phi) \right) - \frac{k_r (f_z) f_z P}{\phi} \left(\frac{1}{2} \phi - \frac{1}{2} \sin(2\phi) \right) \right) \quad (3.8)$$

$$P_{Alberteli} = (C_s \sin g(v_t) + C_d v_t + \bar{F}_x) v_t \quad (3.9)$$

Les coefficients de frottement statique et visqueux sont respectivement $C_s = -0.39$ et $C_d = -0.1$. La puissance $P_{Alberteli}$ est calculée en utilisant l'équation (3.6) et l'énergie consommée est déduite à partir de l'équation (2.17).

Dans notre modèle, le comportement dynamique des efforts de coupe est causé par la variation de la position angulaire de la dent $\Phi_i(t)$ en tenant compte de la composante statique et dynamique de l'épaisseur du copeau.

Tableau 3-4. *Energie consommée par la table pour une seule passe de surfacage*

	Expérimentale	Numérique		
		Modèle dynamique	Modèle quasi-statique	Modèle statique
Energie (J)	105.46	101.07	92.12	85.37
Erreur(%)	-	4.16	12.6	19.04

$$Erreur(\%) = \left(\frac{E_{mécanique expérimentale} - E_{Tn}}{E_{mécanique expérimentale}} \right) \times 100 \quad (3.10)$$

Les valeurs des écarts entre les mesures expérimentales de la consommation d'énergie et la prédiction de celle-ci, montrent que la tenue en compte des masses de la table et de la pièce à usiner et ainsi du comportement dynamique de l'épaisseur instantanée du coupeau favorisent le modèle dynamique proposé par rapports aux modèles quasi statique et statique.

3.2.2 Comparaison entre l'énergie et la puissance numériques et expérimentales

Les conditions de coupe du cas de référence sont utilisées pour une caractérisation de l'énergie et de la puissance consommées pour deux stratégies de surfacage, telles que la stratégie d'aller-retour et la stratégie spirale vers l'intérieure (figure 3.7).

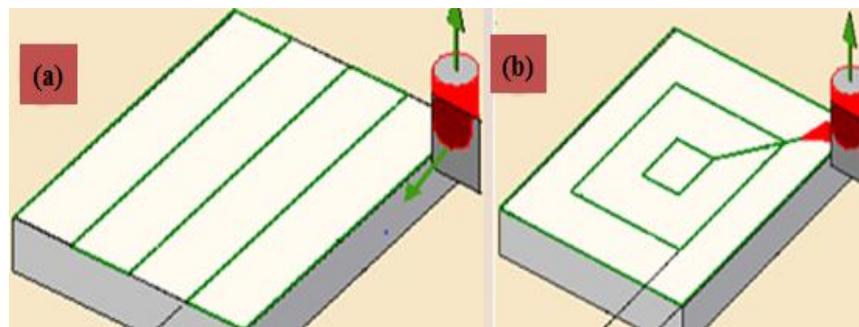


Figure 3.7. Trajectoire de l'outil (a) aller-retour (b) spirale vers l'intérieur

Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau 3.5 et montrent que la spirale vers l'intérieur est la meilleure car elle conduit à une consommation d'énergie et de puissance plus faible à cause du temps de coupe plus réduit dû à une trajectoire d'outil plus rapide.

Tableau 3-5. Puissance et énergie de coupe consommées par la table expérimentales

	Aller-retour	Spirale
Puissance de coupe mécanique (W)	15.16	11.60
Energie de coupe mécanique (J)	105.46	70.15

On s'intéresse par la suite à une opération de surfacage pour une seule passe d'enlèvement de matière. Quatre expériences de surfacage d'aller simple sont effectuées en utilisant une fraise à surfacer de type APKT, de diamètre de 20 mm et composée de 3 dents.

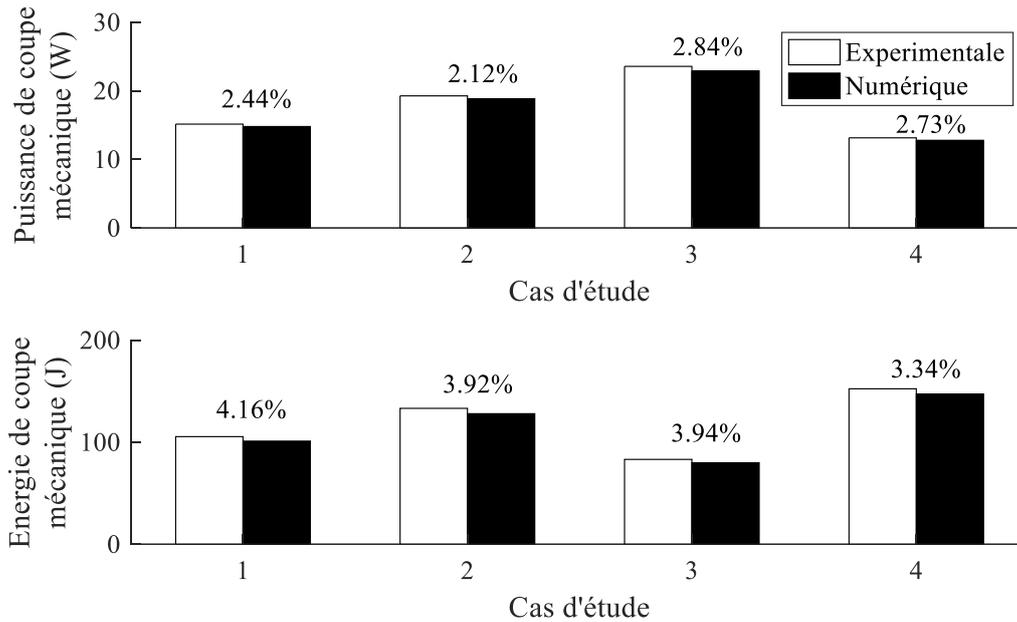


Figure 3.8. Consommation de l'énergie et de la puissance par la table avec 4 conditions de coupe

Notre cas de référence correspond à la vitesse de coupe de 140 m/min avec une profondeur de passe axiale égale à 1mm et une avance par dent égale à 0,1 mm/dent. Dans le second cas, nous augmentons la profondeur de passe axiale à 2mm. Une augmentation de l'énergie et de la puissance de coupe est observée, comme le montre la figure 3.8.

En effet, l'effort de coupe tangentiel est proportionnel à la profondeur de passe axiale. L'augmentation de ce paramètre produit une augmentation de la largeur et de l'épaisseur du copeau. Ce résultat met l'accent sur l'utilité de la considération d'une épaisseur du copeau variable lors de l'opération de coupe puisqu'il provoque une variation de la puissance consommée et par la suite de l'énergie consommée.

Le troisième cas d'étude correspond à une avance par dent égale à 0,2mm. Il en résulte une augmentation de la puissance de coupe mais une diminution des valeurs de l'énergie de coupe. Ces résultats s'expliquent par la proportionnalité entre l'effort de coupe tangentiel et l'avance par dent, comme le montre l'équation (2.3). Si l'avance par dent augmente, la section du copeau augmente et par la suite l'effort de coupe tangentiel augmente également. Nous pouvons conclure que cette variation est relative à l'effet de la taille instantanée de l'épaisseur du copeau. Dans ce cas d'étude, le temps de coupe est inversement proportionnel à l'avance par dent, ce qui entraîne une diminution de la valeur de l'énergie de coupe consommée. Ces résultats sont validés avec des résultats expérimentaux où l'erreur est comprise entre 2,84% et 3,94% respectivement pour la puissance de coupe et de l'énergie.

Le dernier cas d'étude est obtenu pour une vitesse de coupe égale à 90m/min. Une légère diminution par rapport au premier cas d'étude est obtenue pour la puissance de coupe qui chute de 7% en raison de la faible influence de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe. Cependant, la variation de l'énergie de coupe est plus importante en raison de l'augmentation du temps de coupe. Ces résultats sont validés par des résultats expérimentaux où un bon accord est observé entre les valeurs expérimentales et numériques de l'énergie et de la puissance. En fait, l'erreur maximale atteint environ 4,16% et 2,84% respectivement pour l'énergie et la puissance. Cette légère déviation, est à notre avis, due à la progression de l'usure de l'outil, entraînant l'augmentation de la consommation d'énergie de coupe. En effet, lorsque le même outil de coupe est utilisé pour plusieurs essais d'usinage, son usure entraîne une augmentation des efforts de coupe et la consommation d'énergie accrue par conséquent. Cet écart peut également être justifié par le dispositif expérimental qui n'est pas parfaitement rigide.

Afin de montrer l'influence du diamètre ainsi que du nombre de dents de l'outil sur la puissance et l'énergie de coupe consommées, la figure 3.9 présente deux expériences dans lesquelles deux outils sont utilisés. Le premier outil est de type APKT à 3 dents et un diamètre de 20mm et ayant. Le deuxième outil est de type BDMT070304ERML avec un diamètre de 40mm et présente 4 dents.

On observe que l'utilisation de l'outil de petite taille avec un nombre de dents réduit entraîne une augmentation de 17% de la puissance de coupe consommée. Cependant, une réduction de 32% de l'énergie de coupe consommée est obtenue. Cette diminution est causée par la proportionnalité entre le temps de coupe et le rapport entre le diamètre et le nombre de dents de l'outil. Ces résultats sont validés par des essais expérimentaux et un bon accord est constaté entre l'énergie et la puissance expérimentales et numériques où l'erreur maximale atteint respectivement environ 4,29% et 2,59% montrant ainsi la validité de notre modèle.

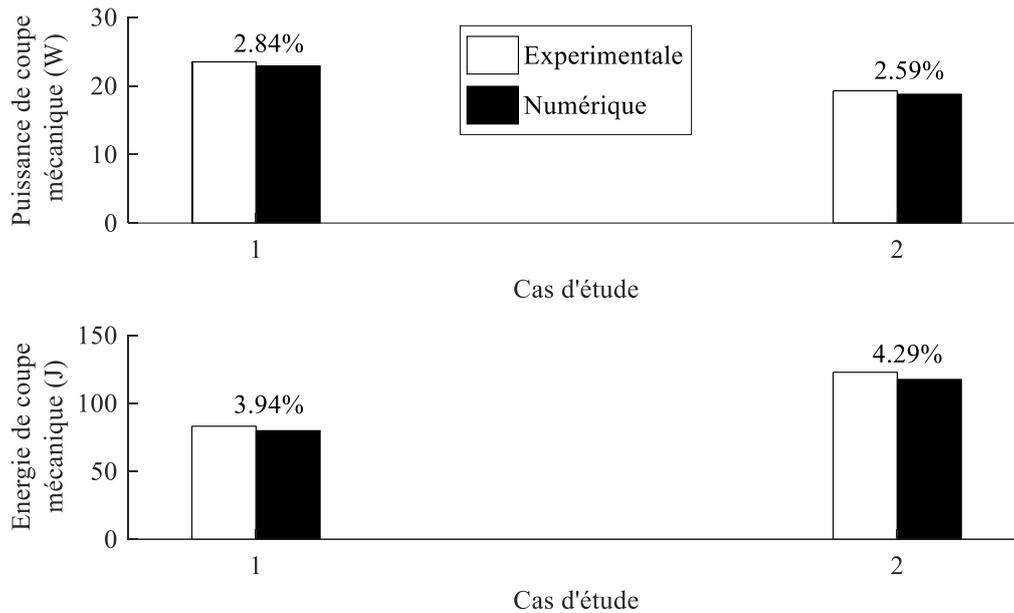


Figure 3.9. Puissance et énergie consommée par la table pour deux types d'outil de coupe

3.2.3 Impact de la masse de la table sur la consommation d'énergie

Afin d'étudier l'effet de la prise en compte de la masse de la pièce et de la table (étau et axe), l'énergie de coupe mécanique est calculée pour différents cas d'études.

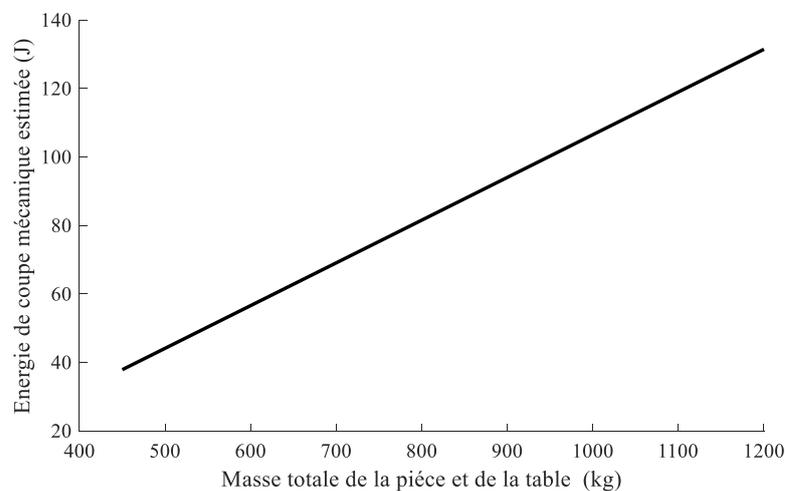


Figure 3.10. Influence du poids de la table et de la pièce sur l'énergie consommée par la table

Les résultats obtenus sont donnés par la figure 3.10 où la masse est augmentée de 150 kg pour chaque échelon. Une augmentation de la masse totale de la pièce et de la table entraîne une augmentation importante de l'énergie de coupe. Ces résultats sont en accord avec les résultats

obtenus par (Edem et al. 2017). Il est alors évident que la réduction de la masse du système de l'axe d'avance contribue à la diminution de la consommation d'énergie.

4. Puissance et énergie consommées par la broche

4.1 Résultats expérimentaux

La puissance mécanique consommée par la broche est obtenue en utilisant les deux équations (3.1) et (3.2). En examinant la courbe donnant l'évolution de cette puissance (figure 3.11), nous constatons la présence de trois phases : la première phase est caractérisée par son état transitoire dont la durée est très courte. Un pic de puissance consommant beaucoup d'énergie représente le démarrage de la broche de zéro à une vitesse de rotation donnée.

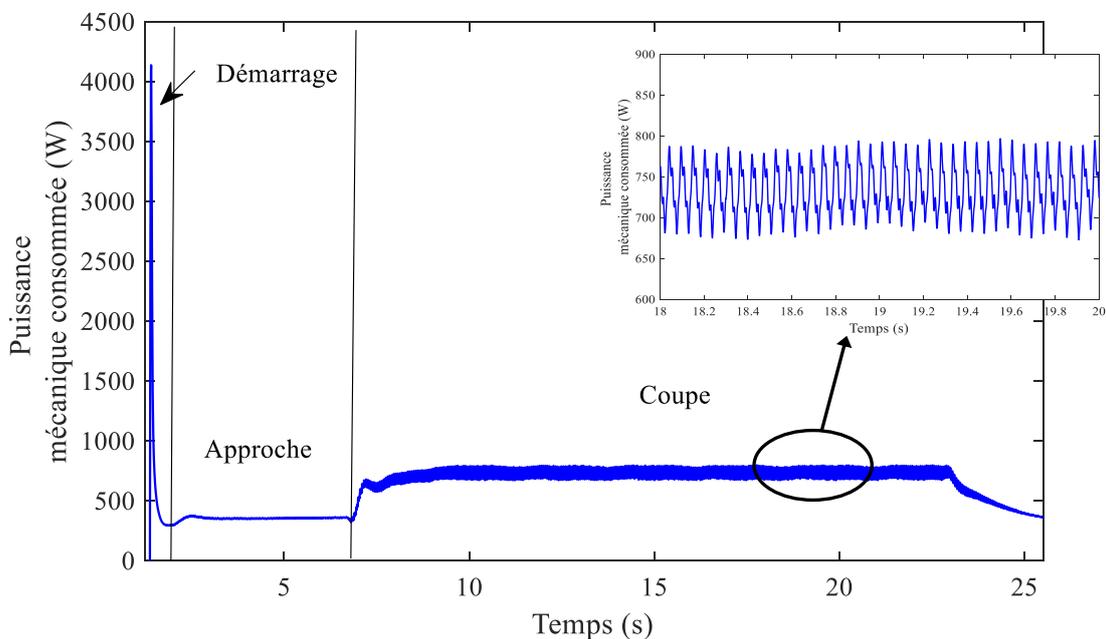


Figure 3.11. Evolution expérimentale de la puissance consommée par la broche

La deuxième zone appelée la phase d'approche représente la phase de mise en place où la transmission mécanique de la broche consomme une puissance de ralenti lorsqu'aucune charge n'est appliquée à l'outil de coupe.

La troisième phase décrit la phase de coupe. Elle est composée d'une première étape d'engagement de l'outil, où la puissance augmente jusqu'à atteindre la valeur de la puissance mécanique consommée par la broche lors de la phase de coupe. Cette puissance est variable en fonction du temps. Ce comportement dynamique est dû à la variation de la valeur de l'effort de coupe en fonction du temps. Ceci est dû essentiellement à la discontinuité lors du passage des dents hors de la matière ou inversement. Pendant cette phase, le moteur de la broche consomme une puissance de

coupe nette nécessaire pour l'enlèvement de la matière et la perte de charge supplémentaire causée par le guidage en rotation. La dernière étape correspond à la variation de la puissance lors du dégagement de l'outil où la valeur de la puissance diminue jusqu'à atteindre la valeur de la puissance de ralentie.

4.2 Résultats numériques

4.2.1 Impact de la variation des paramètres de coupe

Afin de valider notre modèle, des comparaisons entre la puissance et l'énergie de coupe expérimentales et numériques sont effectuées. L'énergie et la puissance de coupe sont calculées pour quatre cas d'étude cités dans le tableau 3.6. Pour chaque cas, nous modifions la vitesse de coupe, et la profondeur de passe axiale ou l'avance par dent. Les résultats obtenus sont comparés à des mesures effectués donnés pour une passe de surfacage en utilisant une fraise à surfacer BDMT070304ERML à quatre dents et de 40 mm de diamètre.

Tableau 3-6. Paramètres de coupe

Cas d'étude	Vitesse de coupe (m/min)	Profondeur de passe (mm)	Avance par dent (mm/dent)
1 ^{er} cas	140	2	0.2
2 ^{eme} cas	140	2	0.1
3 ^{eme} cas	140	1	0.2
4 ^{eme} cas	90	2	0.2

Le cas de référence correspond à une vitesse de coupe égale à 140 m/min avec une profondeur de passe axiale égale à 2 mm et une avance par dent égale à 0,2 mm/dent. Dans le second cas, nous diminuons l'avance par dent à 0,1 mm/dent, cette variation entraîne une diminution de la puissance de coupe mais en revanche une augmentation de l'énergie de coupe (figure 3.12). Ces résultats s'expliquent par la proportionnalité entre l'effort de coupe tangentiel et l'avance par dent comme le prouve l'équation (2.3). En effet, la variation de la section transversale dépend de la variation de l'avance par dent et par conséquent la diminution de la section de coupe. De plus, cette variation est relative à l'effet de la taille instantanée du l'épaisseur du copeau. À partir de ces résultats, on peut noter l'importance de prendre en compte l'épaisseur instantanée du copeau pour améliorer l'évaluation des efforts de coupe variables et par conséquent l'évaluation de la puissance de coupe consommée. Dans ce cas d'étude, le temps de coupe est inversement proportionnel à l'avance par dent, ce qui entraîne une augmentation de la valeur de l'énergie de coupe. Ces résultats sont validés

avec les expériences où l'erreur se situe entre 3,36% et 4,9% pour la puissance et l'énergie de coupe respectivement.

Le troisième cas d'étude correspond à une diminution de la profondeur de passe axiale à 1 mm et l'avance par dent est fixée à 0,2 mm/dent, ce qui entraîne une diminution de l'énergie et de la puissance de coupe, comme le montre la figure 3.12. En effet, l'effort de coupe tangentiel (équation 2.3) est proportionnel à la profondeur de passe axiale, causant une diminution de la largeur de l'épaisseur du copeau. Nous pouvons conclure que la considération de l'épaisseur variable du copeau pour estimer la puissance de coupe de la broche est utile pour développer des modèles plus robustes d'estimation de la puissance de coupe. Par contre le temps de coupe est indépendant de la profondeur de passe axiale. Ces résultats sont aussi validés avec l'expérience où l'erreur entre les valeurs expérimentales et numériques est comprise entre 3,13% et 3,11% pour la puissance et l'énergie de coupe respectivement.

Le dernier cas d'étude est obtenu pour une vitesse de coupe égale à 90 m/min, une avance par dent égale à 0,2 mm/dent et une profondeur de passe axiale égale à 2mm. Une diminution par rapport au premier cas d'étude est obtenue. Pour la puissance de coupe, nous notons que la valeur est diminuée de 13,5%, ce qui est dû à l'impact de la vitesse de coupe sur l'effort de coupe. Cependant, l'énergie de coupe est augmentée en raison de l'augmentation de la durée de coupe. Ces résultats sont validés par des expériences où un bon accord est constaté entre les valeurs expérimentales et numériques de l'énergie et de la puissance, où l'erreur atteint respectivement environ 3,31% et 4,76%.

Cette légère déviation est, à notre avis, causée par la progression de l'usure de l'outil ce qui augmente la consommation de l'énergie de coupe. En effet, lorsque le même outil de coupe est utilisé pour plusieurs essais d'usinage, son usure entraîne une augmentation des forces de coupe et par conséquent la consommation d'énergie. Cet écart peut également être impliqué par le dispositif expérimental qui n'est pas parfaitement rigide.

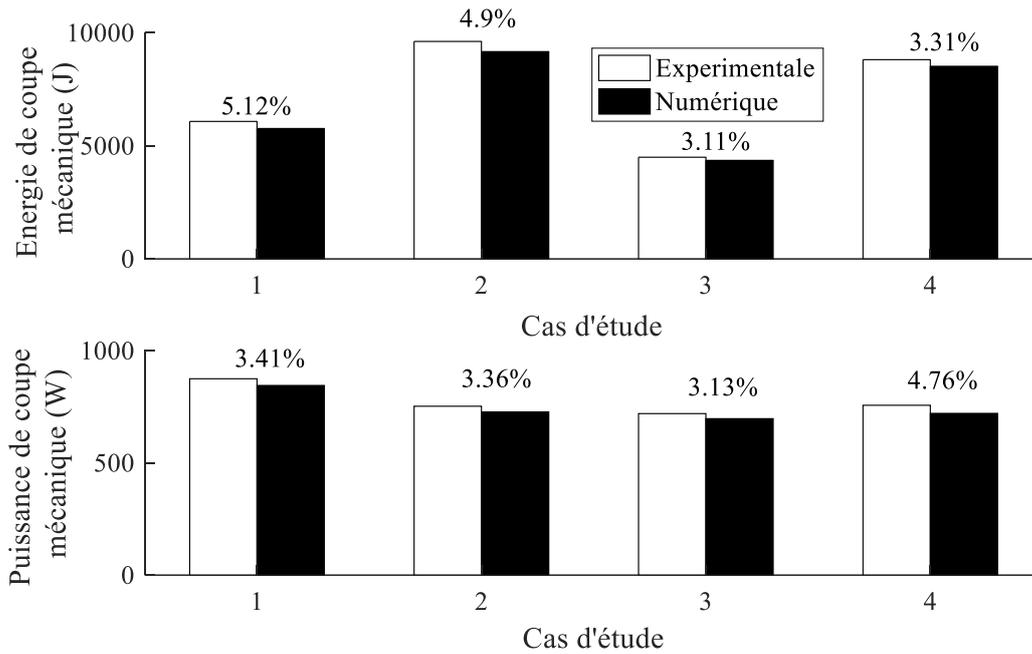


Figure 3.12. Comparaison entre l'énergie et la puissance consommée par la broche pour 4 conditions de coupe

4.2.2 Impact de la présence des défauts de roulement

Pour les machines à commande numérique, la perte de puissance des roulements domine la perte mécanique totale de la broche (Holkup, 2010). Nous avons donc pour objectif d'étudier l'impact des roulements et leurs défauts sur la puissance consommée de la broche et par la suite sur l'énergie consommée par la broche. Nous calculons numériquement l'énergie des roulements pendant la phase d'approche en tenant compte du fait que les forces de coupe sont égales à zéro car l'outil est dégagée de la matière. L'équation de mouvement est alors résolue et l'énergie est calculée à l'aide de l'organigramme de la figure 2.5. Afin de valider la valeur numérique de l'énergie du roulement, nous effectuons une comparaison avec la valeur expérimentale. Expérimentalement, l'énergie des roulements est obtenue par soustraction de l'énergie nécessaire à accélérer le moment d'inertie total de l'énergie totale absorbée pendant la phase d'approche. Le tableau 3.7 récapitule les résultats obtenus qui montrent la robustesse du modèle proposé. En effet, l'erreur entre les énergies numérique et expérimentale des roulements est de (3,75%) à (3,38%) lorsque la vitesse de rotation est respectivement égale à 1115 tr/min et 716 tr/min. Nous pouvons conclure aussi, de ces résultats, que l'énergie des roulements est proportionnelle à la vitesse de rotation.

Tableau 3-7. Puissance et énergie consommées par les roulements saints de la broche

		N=1115 (tr/min)	N=716 (tr/min)
Energie (J)	Numérique	587	362.5
	Expérimentale	609.9	375.2
Erreur1 (%)		3.75	3.38
Puissance(W)	Numérique	119.6	69.12
	Expérimentale	123.61	71.92
Erreur2 (%)		3.24	3.89

$$Erreur1(\%) = \left(\frac{E_{\text{expérimentale}} - E_{\text{numérique}}}{E_{\text{expérimentale}}} \right) \times 100 \quad (3.11)$$

$$Erreur2(\%) = \left(\frac{P_{\text{expérimentale}} - P_{\text{numérique}}}{P_{\text{expérimentale}}} \right) \times 100 \quad (3.12)$$

Ce résultat est illustré par la figure 3.14 et montre la variation de la puissance numérique des roulements en fonction la vitesse de rotation. Nous notons une augmentation de la puissance consommée par les roulements expliquée par l'impact de la vitesse de rotation sur le couple lié à la viscosité (équation 2.29). Nous notons encore un comportement non linéaire de l'augmentation de la puissance en fonction de la vitesse de rotation.

a. Impact du défaut d'écaillage

Nous introduisons dans notre modèle un défaut d'écaillage sur les bagues extérieure ou intérieure, comme le montre la figure 3.13.

Le défaut, défini comme la moitié d'un sinus (Hentati et al. 2016), a une largeur de $5\pi/23$ mm, une hauteur de $3 \mu\text{m}$ et une position initiale nulle (figure 3.13). La figure 3.14 montre clairement que le défaut d'écaillage de la bague extérieure du palier avant entraîne une augmentation des pertes de puissance de la broche pendant la phase d'approche, en particulier lorsque la vitesse de rotation du système devient élevée. En fait, la perte de puissance du roulement est multipliée par trois lorsque la vitesse de rotation varie de 4000 à 8000 tr/min.

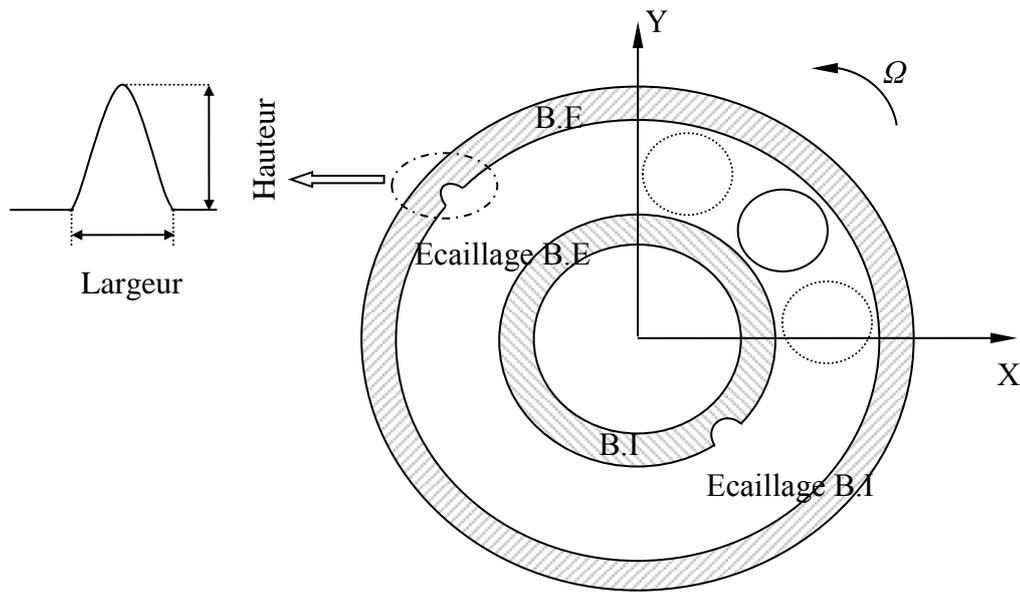


Figure 3.13. Défaut d'écaillage du roulement

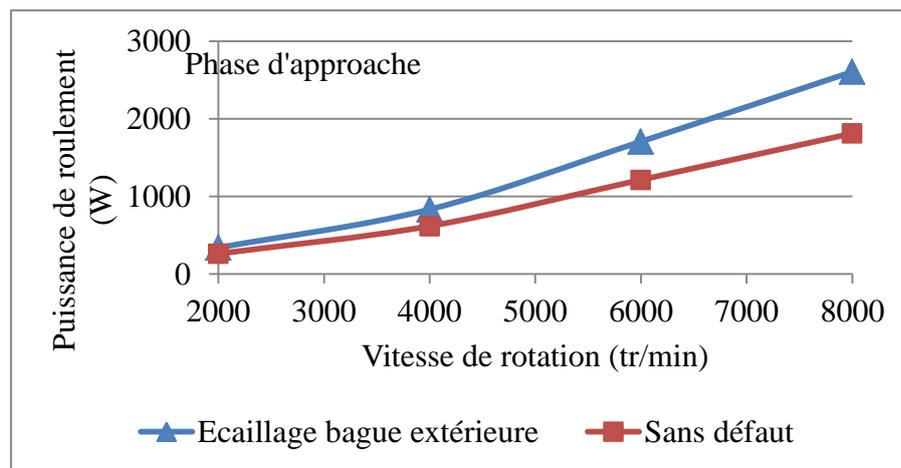


Figure 3.14. Impact de la vitesse de rotation sur l'énergie des roulements lors de la phase d'approche

Nous pouvons conclure qu'il est important de tenir en compte des défauts d'écaillage (s'ils existent) dans l'estimation de la puissance et de l'énergie consommée par la broche.

Afin de montrer l'impact du défaut de la bague extérieure sur la puissance consommée lors de la phase d'approche, une étude paramétrique est effectuée où on modifie la hauteur et la largeur du défaut. Les résultats obtenus pour une vitesse de rotation égale à 4000 tr /min sont donnés par le tableau 3.8.

Tableau 3-8. Influence de l'écaillage de la bague extérieure pendant la phase d'approche pour différentes valeurs du défaut d'écaillage

		Hauteur du défaut (μm)		
		2.5	3	3.5
Largeur du défaut (mm)	$4\pi/23$	701.8	740.2	789.7
	$5\pi/23$	755.5	822.8	881.4
	$6\pi/23$	837	917.6	1015

Les résultats montrent que durant la phase d'approche, une augmentation de la puissance consommée par la broche est constatée suite à l'augmentation de la hauteur et de la largeur du défaut. En effet, lorsque l'écaillage est plus étendu, le couple utile de la broche est augmenté afin de surmonter ce défaut.

Afin d'étudier l'impact de l'écaillage des bagues intérieure et extérieure sur la consommation de la puissance de la broche, une étude paramétrique est effectuée pour estimer la variation de la puissance de la broche en fonction du défaut de la bague extérieure seule, celui de la bague intérieure seule et des défauts combinés des deux bagues. La taille du défaut est fixée pour les deux bagues à $4\pi/23\text{mm}$. Les résultats obtenus pour une vitesse de rotation de 4000 tr/min, sont indiqués par la figure 3.15. Nous notons que la présence d'un défaut à la fois dans les bagues intérieure et extérieure entraîne une augmentation de la puissance consommée. Pour un défaut localisé sur la bague intérieure, l'augmentation de la puissance consommée est plus importante que lorsque le défaut est localisé dans la bague extérieure, malgré la similitude des dimensions du défaut. En effet, la bague extérieure est considérée comme fixe dans son logement mais la bague intérieure est en rotation. Ainsi pour un défaut d'écaillage de la bague intérieure la fréquence de passage des billes par ces défauts est plus importante que celle de passage des billes par l'écaillage de la bague extérieure entraînant par la suite une augmentation de l'énergie consommée dans le but de compenser le mal fonctionnement causé par ces défauts. De même ces défauts entraînent une vibration excessive du système comme le montre la figure 3.16.

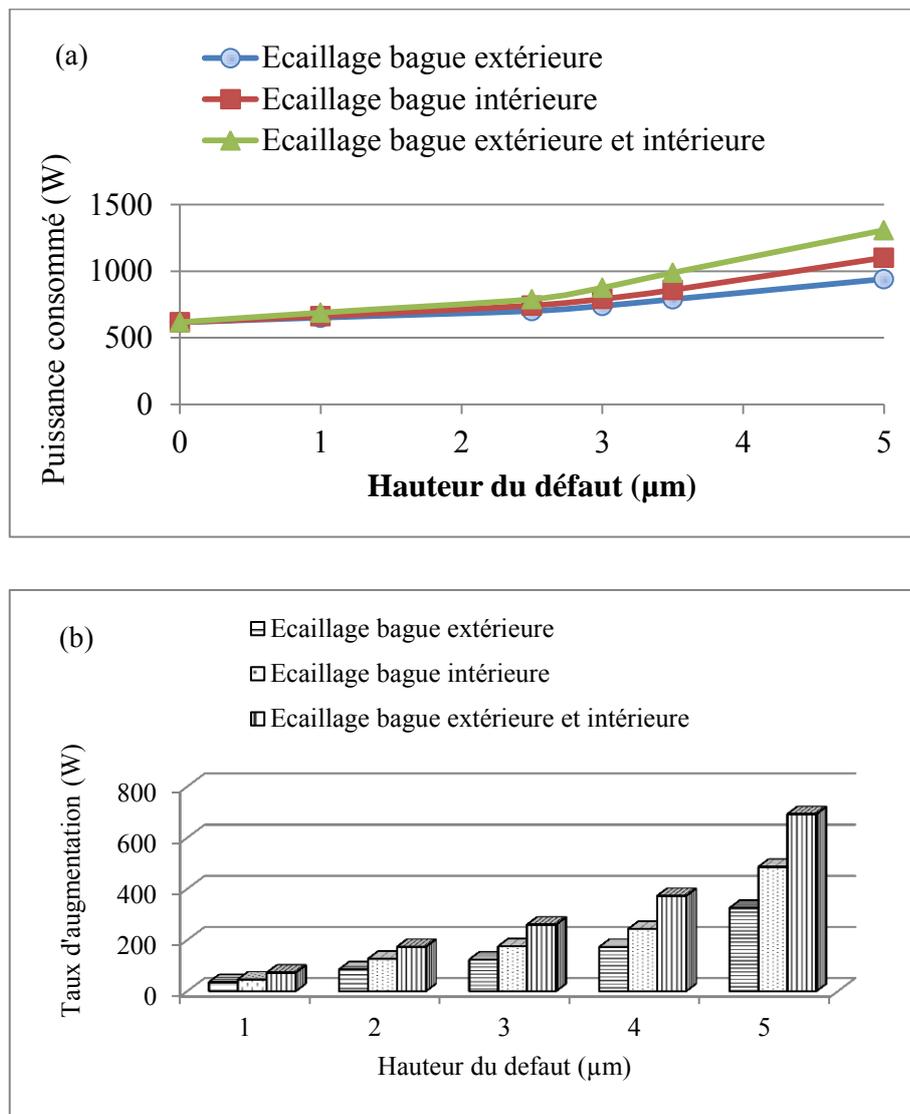


Figure 3.15. Variation de la puissance consommée par la broche (a) et du taux d'augmentation de la puissance consommée (b) en fonction de la hauteur du défaut pour trois types d'écaillages (Bague extérieure, Bague intérieure et deux bagues)

La figure 3.15 montre que la puissance consommée accroît suivant une loi exponentielle par rapport à la hauteur du défaut. En effet, pour une augmentation de 0,5 μm de la hauteur du défaut, nous passons d'un taux d'augmentation de 38,4% (la hauteur de défaut allant de 2,5 μm à 3 μm) dans un premier temps à un taux d'augmentation de 49,5% (la hauteur de défaut varie de 3 μm à 3,5 μm) dans un deuxième temps.

Lorsque nous examinons la FFT du déplacement radial du premier nœud (figure 3.16), nous notons la présence d'un pic à une fréquence égale à ($f_c = 30,93Hz$) qui constitue la fréquence de la cage correspondant à la variation temporelle de la charge externe qui varie périodiquement pour chaque tour. L'autre pic présente la fréquence de passage de la bille égale à ($f_{pb} = N_b f_c = 703Hz$) correspondant au passage des éléments roulants. Pour le spectre de défaut de la bague intérieure,

nous notons la présence de la fréquence caractéristique du défaut ($f_{id} = f_i - f_c$). Une augmentation du niveau vibratoire est notée lorsque nous passons du spectre du système sans défaut au spectre du système avec un défaut sur la bague extérieure dans un premier temps et au spectre du système avec un défaut sur la bague intérieure dans un second temps, ce qui explique l'augmentation de la puissance consommée.

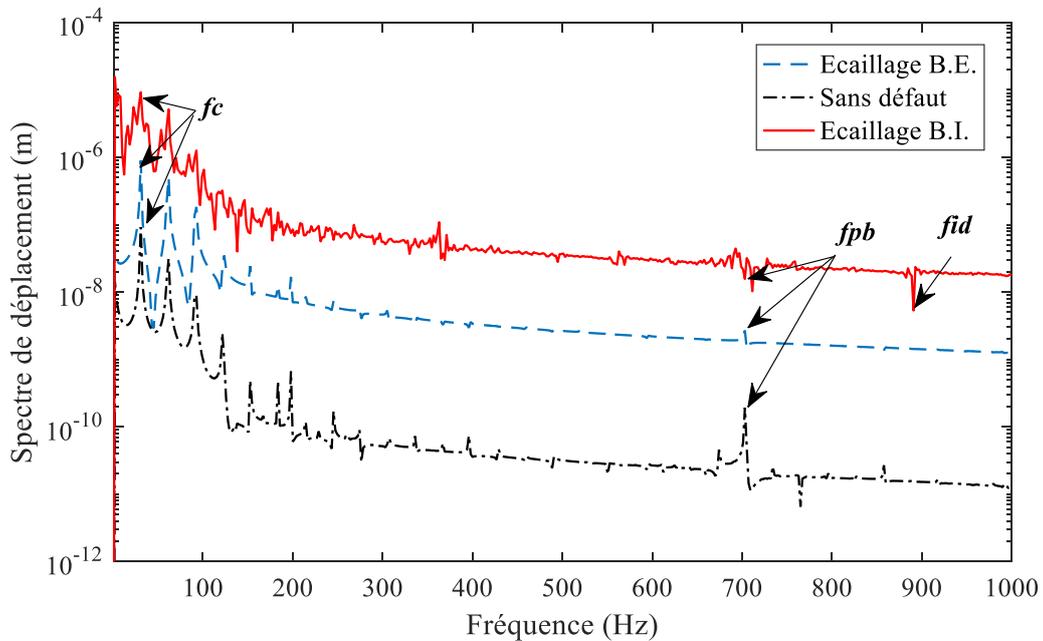


Figure 3.16. Spectre du déplacement radial du 1er nœud avec et sans défaut

b. Impact du défaut d'excentricité des roulements

Nous introduisons également un défaut d'excentricité sur le palier avant. Ce défaut est caractérisé par le rayon d'excentricité ε comme le montre la figure 3.17 (Hentati, 2008). En effet un défaut d'excentricité de la cage engendre une répartition non uniforme des billes à cause de la non superposition des centres d'inertie de la cage et les centres d'inerties des bagues.

Une étude paramétrique est effectuée pour ce type de défaut et les résultats figurent dans le tableau 3.9. Lorsque nous examinons ces résultats, nous notons une augmentation de la puissance consommée avec l'augmentation de l'excentricité. En fait, la valeur du couple utile produit par le moteur de la broche accroit pour surmonter le mal fonctionnement de la broche provoqué par le défaut de l'excentricité.

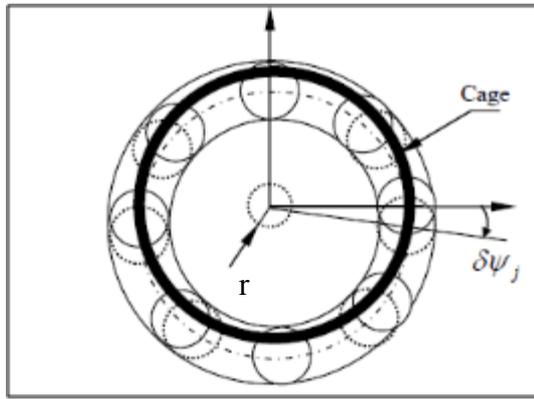


Figure 3.17. Défaut d'excentricité de la cage (Hentati, 2008)

Tableau 3-9. Variation de la puissance consommée par la broche lors de la phase d'approche en présence d'un défaut d'excentricité de la cage

Rayon d'excentricité (mm)	Puissance consommée (W)	Taux d'augmentation (%)
0	617.38	-
1	708.7	12.88
2	724.5	14.78
3	752.3	17.93

$$\text{Taux d'augmentation}(\%) = \left(\frac{P_{\text{avec défaut}} - P_{\text{sans défaut}}}{P_{\text{avec défaut}}} \right) \times 100 \quad (3.13)$$

c. Impact du défaut de balourd

Un défaut de balourd est introduit dans notre modèle défini comme une force d'excitation ajoutée dans le second membre de l'équation du mouvement (Hentati et al. 2016). Ce type de défaut est défini comme une non-coïncidence entre l'axe d'inertie et l'axe de rotation de la broche. Une comparaison de la puissance numérique consommée par la broche pour différents types de défauts présentés ci-dessus pendant les phases d'approche et de coupe pour une vitesse de rotation égale à 4000 tr/min, une avance égale à 0,2 mm/dent et une profondeur de passe axiale égale à 1 mm, est effectuée dans le tableau 3.10. Nous notons, à partir de ce tableau, que le taux d'augmentation de la puissance consommée par la broche est plus important pour le cas du défaut d'écaillage que pour d'autres défauts.

Tableau 3-10. Puissance numérique consommée par la broche pour différents types de défauts lors des phases d'approche et de coupe

		Sans défaut	Écaillage B.I.	Écaillage B.E.	Excentricité	Balourd
Approche	Puissance (W)	617.38	868.1	822.8	708.7	762.8
	Taux d'augmentation (%)	-	28.88	24.96	12.88	19.06
coupe	Puissance (W)	2022	2894	2761	2496.1	2648
	Taux d'augmentation (%)	-	30.13	26.76	18.99	23.64

$$\text{Taux d'augmentation}(\%) = \left(\frac{P_{\text{avec défaut}} - P_{\text{sans défaut}}}{P_{\text{avec défaut}}} \right) \times 100 \quad (3.14)$$

Nous pouvons en conclure que les défauts de montage (excentricité et balourd) ont un impact relativement bas sur la puissance consommée. En revanche, les défauts d'usure (écaillages des bagues intérieure et extérieure) entraînent une augmentation significative de la puissance consommée qui dépend des dimensions de l'écaillage. Ces résultats sont constatés pour les phases d'approche et de coupe. En particulier pour une broche en phase de coupe le taux d'augmentation de la puissance consommée causée par un défaut d'écaillage au niveau de la bague intérieure peut atteindre une valeur de 30%.

5. Puissance et énergie consommées par une fraiseuse type Feeler CNC 760

Une étude paramétrique, en changeant le type d'usinage ainsi que la vitesse de rotation, est développée pour comparer la puissance totale du système couplé avec celle du système non couplé. On a choisit pour l'étude comparative un outil de coupe de diamètre 40 mm ayant 4 dents. Nous avons choisi les deux modes d'usinage de surfaçage et périphérique. Pour un usinage de surfaçage, le vecteur effort de coupe est donné par l'équation (2.9), et pour un usinage périphérique, le vecteur effort élémentaire de coupe est donné par l'équation suivante :

$$\begin{cases} dF_{x,i}(\Phi_i(t,z)) \\ dF_{y,i}(\Phi_i(t,z)) \\ dF_{z,i}(\Phi_i(t,z)) \end{cases} = \begin{bmatrix} -\cos(\Phi_i(t,z)) & -\sin(\Phi_i(t,z)) & 0 \\ \sin(\Phi_i(t,z)) & -\cos(\Phi_i(t,z)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} dF_{t,i}(\Phi_i(t,z)) \\ dF_{r,i}(\Phi_i(t,z)) \\ dF_{a,i}(\Phi_i(t,z)) \end{cases} \quad (3.15)$$

où, $\Phi_i(t)$ définie la position angulaire variable en fonction du temps (figure 3.18) qui s'écrit :

$$\Phi_i(t,z) = \Omega t + \Phi_{p,z}(z) - \psi(z) \quad (3.16)$$

avec $\Phi_{p,i}(z)$ l'angle séparant deux arrête succesives et $\psi(z)$ l'angle d'attaque.

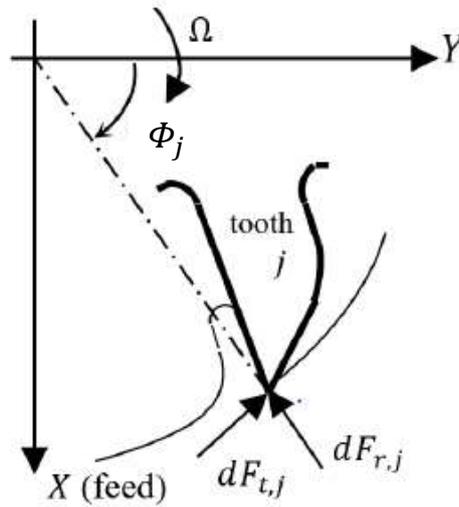


Figure 3.18. Répartition des efforts de coupe dans le cas d'un usinage périphérique
(Hentati et al., 2016)

et $dF_{t,i}$, $dF_{r,i}$ et $dF_{a,i}$ définissent respectivement les efforts elementaires tangentiel, radial et axial avec :

$$\begin{cases} dF_{t,i}(\Phi_i(t,z)) = g(\Phi_i(t,z)) k_t a_p h(\Phi_i(t,z)) dz \\ dF_{r,i}(\Phi_i(t,z)) = k_r g(\Phi_i(t,z)) k_t a_p h(\Phi_i(t,z)) dz \\ dF_{a,i}(\Phi_i(t,z)) = k_a g(\Phi_i(t,z)) k_t a_p h(\Phi_i(t,z)) dz \end{cases} \quad (3.17)$$

où, $h(\Phi_i(t,z))$ représente l'épaisseur du coupeau qui s'écrit :

$$h(\Phi_i(t, z)) = h_s(\Phi_i(t, z)) + h_d(\Phi_i(t, z)) \quad (3.18)$$

avec,

$$h_d(\Phi_i(t, z)) = (u_x(t, z) - u_x(t - \tau)) \sin(\Phi_i(t, z)) - (u_y(t, z) - u_y(t - \tau)) \cos(\Phi_i(t, z)) \quad (3.19)$$

L'effort de coupe total généré par la totalité des dents et exercé sur la pièce à usiner est donné comme suit :

$$\begin{Bmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \\ F_z(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{N_f} dF_{x,i}(\Phi_i(t)) \\ \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{N_f} dF_{y,i}(\Phi_i(t)) \\ \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{N_f} dF_{y,i}(\Phi_i(t)) \end{Bmatrix} \quad (3.20)$$

Une comparaison entre les valeurs de la puissance estimée en utilisant un usinage de surfacage et périphérique pour une vitesse de rotation (1500 tr/min et 2000 tr/min) et pour les deux modélisations couplé et non couplé est réalisée. Ces résultats sont récapitulés dans le tableau 3.11.

Les résultats obtenus montrent en premier temps que l'erreur entre la puissance totale du système couplé et non couplé est comprise entre 0.7 et 1.18% pour les différentes vitesses de rotation. On remarque que la puissance mécanique consommée par le système couplé est légèrement inférieure à celle du système non couplé. Cela est expliqué par la tenue en compte des matrices masse, rigidité et amortissement de la table d'avance dans l'équation de mouvement qui jouent le rôle d'un amortisseur ce qui influe les sorties de l'équation de mouvement c'est-à-dire la valeur de l'effort de coupe. D'après les résultats obtenus, nous concluons que le fraisage périphérique consomme plus de puissance que le fraisage surfacique. Nous notons dans le cas du système non couplé une augmentation de 26.86% pour la vitesse de rotation 1500 tr/min et une augmentation de 29.7% pour une vitesse de rotation 2000 tr/min. Cette variation peut être expliquée par l'augmentation de la répartition de contrainte dans le cas d'usinage périphérique où la zone de contact sera linéique tandis que dans le cas d'usinage surfacique, la zone de contact sera toute la surface de contact outil-pièce et la répartition de contrainte sera tout le long de cette surface.

Tableau 3-11. Puissance consommée (W) par une machine outil utilisant un modèle couplé et non couplé pour différents types d'usinage et différentes vitesses de rotation

	N=1500 (tr/min)		N=2000 (tr/min)	
	Périphérique	Surfacique	Périphérique	Surfacique
Avec couplage	866,9	606.26	1147.93	862.71
Sans couplage	872,8	613.5	1188	868.8
Erreur1 (%)	0,7	1,18	1,10	0,7
Erreur2 (%)	29.7		26.86	

$$Erreur1(\%) = \left(\frac{P_{non\ couplé} - P_{couplé}}{P_{non\ couplé}} \right) \times 100 \quad (3.21)$$

$$Erreur2(\%) = \left(\frac{P_{périphérique} - P_{surfacique}}{P_{périphérique}} \right) \times 100 \quad (3.22)$$

6. Conclusion

Ce chapitre est ciblé pour prouver l'efficacité du modèle de consommation d'énergie de la broche et de la table d'avance, une étude paramétrique est effectuée pour montrer la variation de la puissance consommée en fonction des paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe, la profondeur de coupe axiale et l'avance par dent. Les résultats obtenus sont comparés avec les résultats expérimentaux pour valider le modèle proposé. Nous pouvons en conclure qu'une bonne sélection des paramètres de coupe conduit à réduire la puissance consommée par la broche et la table d'avance.

Nous nous sommes également intéressés à l'étude de l'impact des poids de la table et de la pièce sur le comportement énergétique de l'axe d'avance, où une augmentation de ce paramètre entraîne une augmentation de l'énergie de coupe consommée. De plus, l'étude considère aussi les défauts de montage tels que l'excentricité et le balourd et des défauts d'usure comme l'écaillage des bagues intérieure et extérieure sur l'énergie consommée pendant les phases d'approche et de coupe. Les résultats obtenus montrent que le défaut d'usure conduit à une augmentation plus importante de la puissance consommée que celui du montage, en particulier pour le cas de défaut d'écaillage de la bague intérieure et pour une vitesse de rotation importante où le taux d'augmentation peut atteindre 30%. Ces résultats mettent l'accent sur l'importance de la maintenance préventive qui conduit à une réduction importante de la puissance consommée. De même, pour une broche de fraisage tournant à

une vitesse de rotation élevée, nous pouvons conclure que le guidage en rotation est certainement meilleur lorsqu'il est assuré par des paliers magnétiques au lieu des roulements à billes.

Chapitre 4. Optimisation de l'Energie Consommée par une Machine Outil

1. Introduction

Le fraisage est l'un des processus les plus utilisés dans le secteur de fabrication où le besoin industriel est en augmentation permanente et rapide en termes de qualité économique ou technique. Dans le but d'accomplir ce besoin, et en consommant le minimum d'énergie un choix judicieux des paramètres de coupe doit être réalisé. En effet, le processus de fraisage doit réaliser un taux de rentabilité acceptable en profitant au maximum des moyens disponibles tel que les performances des outils de coupe ou du type de la machine utilisée. Ce chapitre s'inscrit dans ce cadre, où nous présentons un modèle d'optimisation d'énergie consommée par la machine outil en se basant sur le contrôle des paramètres de coupe. Le problème est résolu au moyen de l'algorithme des essais de particules (PSO).

2. Optimisation de l'énergie consommée par une opération de surfacage

Dans le but d'assurer une optimisation de l'énergie consommée par une machine outil, une formulation de la fonction objective est présentée ci-dessous. Notre fonction objectif minimise à la fois le temps de production f_1 , le coût de l'opération f_2 , l'énergie consommée f_3 et la rugosité f_4 . L'objectif est la détermination des paramètres de coupe (vitesse de rotation Ω , avance par dent f_z , profondeur de passe axiale a_p et nombre de passe nécessaire pour réaliser l'opération d'usinage n_{passes}) optimaux.

2.1 Fonctions objectifs

2.1.1 Temps de production

Le temps d'usinage pour une opération de surfacage s'exprime comme la somme des temps nécessaires pour faire un enlèvement de matière t_c , le temps nécessaire pour réaliser un changement d'outil t_{cho} , le temps de coupe dans l'air consommée par la broche pour l'engagement et le dégagement avec la pièce à usiner, t_{air} , le temps requis pour la descente de la broche vers la pièce et l'avance de la table vers la position de coupe t_{mp} et le temps auxiliaire pour l'installation de la machine-outil t_i comme montre la formule suivante:

$$f_1 = t_{total} = \sum_{i=1}^{n_{passes}} (t_{air} + t_c) + t_i + t_{cho} + t_{mp} \quad (4.1)$$

où, T la durée de vie de l'outil, exprimée suivant le loi de Taylor comme suit :

$$T = \left(\frac{C_T D^{b_v}}{V_c f_z^{u_v} a_p^{e_v} a_e^{r_v} N^{n_v}} \right)^{1/x_v} \quad (4.2)$$

avec, a_e est la profondeur de passe radiale et x_v , b_v , e_v , r_v , n_v et C_T sont des coefficients qui dépendent de la nuance de l'outil.

Pour une seule passe de surfacage, le temps de coupe est :

$$t_c = \frac{L + d_a}{\Omega f_z N} \quad (4.3)$$

où, L est la longueur de la pièce, et d_a la longueur d'approche calculé par :

$$d_a = D/2 - \sqrt{(D/2)^2 - (a_e/2)^2} \quad (4.4)$$

Le temps de changement d'outil durant l'opération de coupe est donné par la formule suivante :

$$t_{\text{changement outil}} = N t_o \sum_{i=1}^{n_{\text{passes}}} \frac{t_c}{T} \quad (4.5)$$

où t_o est le temps nécessaire pour changer une plaquette défectueuse.

Le temps de la coupe dans l'air est donné comme suit :

$$t_{\text{air}} = \frac{2a + D - d_a}{\Omega f_z N} \quad (4.6)$$

où a est la distance à maintenir entre la pièce à usiner et l'outil généralement choisi entre 2 et 5mm afin d'éviter tout risque d'endommagement.

2.1.2 Coût de production

Le coût de production est calculé en fonction du coût de machine, coût de l'outil et coût de l'énergie comme suit :

$$f_2 = C_{\text{total}} = k_0 t_{\text{total}} + k_e E_{\text{totale}} + k_t \sum_{i=1}^{n_{\text{passes}}} \frac{t_c}{T} \quad (4.7)$$

où,

k_0 est le coût auxiliaire,

k_e est le coût de production de l'énergie électrique,

k_t est le prix de revient d'une arrête de coupe.

et E_{totale} est l'énergie consommée par la machine outil décrite dans la section suivante.

2.1.3 Energie consommée

L'énergie totale consommée par une machine durant l'opération de surfacage s'écrit comme définit dans la section (5) du chapitre 2 comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{totale} = f_3 = E_{fixes} + \sum_{i=1}^{n_{passes}} E_{variables} \\ E_{fixes} = E_{installation} + E_{mise\ en\ place} + E_{changement\ outil} \\ E_{variables} = E_{c\ seule\ passe} + E_{engagement} + E_{dégagement} \end{array} \right. \quad (4.8)$$

2.1.4 Rugosité

L'état de surface est défini par des irrégularités de la surface (rugosité et ondulation) générées lors de l'élaboration de la pièce. Le plus souvent elles sont mesurées avec des profilmètres qui sont des appareils qui relèvent le profil de la surface. Dans notre cas d'étude, la rugosité est adoptée comme objectif qui englobe la qualité de la surface. Elle est exprimée comme suit (Hassine, 2015):

$$f_4 = kv_c^{x_1} f_z^{x_2} a_p^{x_3} \quad (4.9)$$

où x_1 , x_2 , x_3 et k sont des constantes qui dépendent du matériau de la pièce à usiner et de l'outil de coupe.

2.2 Contraintes

Durant une opération de fraisage, plusieurs paramètres changent tel que l'état de l'outil qui change sous l'effet de l'usure. Donc, les contraintes physiques liées à l'opération de coupe doivent être tenue en compte pour avoir une optimisation globale du processus de fraisage. De même, les limitations pratiques des conditions de coupe tels que la puissance de coupe, la résistance de l'outil, les gammes des avances et des vitesses, etc.. sont nécessaires lors l'optimisation d'une fonction objectif. Les limitations additionnelles sont aussi nécessaires telles que le respect de la qualité de la pièce à usiner et la stabilité du processus de coupe doivent être tenus en compte.

2.2.1 Contrainte liée à l'effort de coupe

Lors d'une opération de fraisage, la résultante des efforts de coupe exercés par l'outil ne doit pas dépasser une valeur maximale autorisée F_{max} , que l'outil peut supporter, donnée par les fabricants

d'outils, amenant à éviter la déviation, le broutage et la torsion de l'outil. Donc une contrainte à la force de coupe peut s'écrire comme suit :

$$g_1 = \frac{k_s a_p a_e f_z N}{\Pi D} \leq F_{max} \quad (4.10)$$

où k_s est la pression spécifique de coupe.

2.2.2 Contrainte liée à la puissance de coupe

La puissance de coupe ne doit pas dépasser la puissance maximale délivrée par la machine qui s'écrit :

$$g_2 = \frac{k_s a_p a_e f_z N V_c}{60000 \Pi D} \leq P_{max} \quad (4.11)$$

2.2.3 Contrainte liée à la résistance pratique à la rupture

Le moment de torsion M_z est le moment le plus important durant l'opération de fraisage. On peut déduire donc la contrainte maximale τ qui s'écrit comme suit :

$$\tau = \frac{16 M_z}{\Pi D^3} \quad (4.12)$$

En écrivant la condition de résistance à la rupture d'une fraise, on aura la contrainte suivante :

$$g_3 = \frac{8 k_s a_p a_e f_z N V_c}{\Pi^2 D^3} \leq \tau_{max} \quad (4.13)$$

où τ_{max} est la contrainte admissible à la rupture.

3. Formulation mathématique

Notre problème d'optimisation peut s'écrire comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min(F) = \frac{f_1}{f_1^*} + \frac{f_2}{f_2^*} + \frac{f_3}{f_3^*} + \frac{f_4}{f_4^*} \\ s.c : \left\{ \begin{array}{l} g_1 \leq f_{max} \\ g_2 \leq P_{max} \\ g_3 \leq \tau_{max} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (4.14)$$

où f_1^* , f_2^* , f_3^* , et f_4^* sont les valeurs optimaux des fonctions f_1 , f_2 , f_3 et f_4 .

On doit tenir compte dans notre formulation des limites de notre machine outil qui s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega_{min} \leq \Omega \leq \Omega_{max} \\ f_{zmin} \leq f_z \leq f_{zmax} \\ a_{pmin} \leq a_p \leq a_{pmax} \\ \frac{\Delta}{a_{pmin}} \leq n_{passes} \leq \frac{\Delta}{a_{pmax}} \end{array} \right. \quad (4.15)$$

où Δ définit la valeur de l'épaisseur du matériau à usiner.

4. Optimisation à l'aide de l'algorithme PSO

Afin de résoudre notre problème d'optimisation donné par l'équation (4.12), on a utilisé l'algorithme essaim particulaire dont le principe de fonctionnement repose sur le partage de l'information entre les solutions (particules). Chaque particule représente une solution potentielle de notre problème. L'ensemble des particules est appelé population. Les particules sont divisées en 4 segments. Chaque segment est associé à une variable de décision. Donc, chaque particule notée x_i est représentée comme suit :

$$x_i = [\Omega_i, f_{zi}, a_{pi}, n_{passes_i}] \quad (4.16)$$

où i représente l'indice de la particule. Chaque particule est caractérisée par un vecteur position $X_i^k(j)$ et vitesse $V_i^k(j)$ représenté comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} X_i^k(j) = (x_1^k(j), x_2^k(j), x_3^k(j), \dots, x_N^k(j)) \quad 1 \leq j \leq 4 \\ V_i^k(j) = (v_1^k(j), v_2^k(j), v_3^k(j), \dots, v_N^k(j)) \quad 1 \leq k \leq 150 \end{array} \right. \quad \text{avec } 1 \leq N \leq 50 \quad (4.17)$$

où N est le nombre de particules choisi égal à 50 particules dans notre cas d'étude, k est le nombre d'itération égale à 150 dans notre cas et j est le nombre de variables de décision.

On doit respecter les limitations de l'espace de recherche avec :

$$x_{imin} \leq x_i^k \leq x_{imax} \quad (4.18)$$

x_{imin} et x_{imax} sont les bornes de chaque variable. Pour modéliser convenablement la méthode d'optimisation, certains paramètres doivent être bien définis tels que :

- la taille de l'essaim : le nombre de particules attribuées dépend essentiellement de deux facteurs qui sont le rapport entre le temps maximum de recherche et la capacité de calcul de la machine et la taille de l'espace de définition. Pour affiner ce coefficient, le meilleur moyen est de faire plusieurs tests.

- l'initialisation de l'essaim : généralement elle est faite d'une façon aléatoire suivant une loi uniforme sur $[0,1]$. Lors de la phase d'initialisation, les particules sont générées aléatoirement en respectant les contraintes susmentionnées. L'initialisation des particules concerne l'initialisation des vecteurs position $X_i^k(j)$ et vitesse $V_i^k(j)$ qui caractérisent chaque particule.

$$\begin{cases} x_j = x_{jmin} + (x_{jmax} - x_{jmin})U(0,1) & j = 1,2,3 \\ x_4 = x_{4min} + U_{\in} (x_{4min}-1, x_{4max}-1) \end{cases} \quad (4.19)$$

avec $U(0,1)$ génère une valeur aléatoire réelle comprise entre 0 et 1 et U_{\in} génère une valeur aléatoire entière comprise entre la valeur minimale et maximale de passe autorisée par l'opération d'usinage. Après initiation, pour la première itération, la meilleure solution de chaque particule P_{besti} est calculée. La meilleure solution de la population P_{bestg} est alors déduite et mémorisée. En effet, à chaque itération, la nouvelle position et vitesse de chaque particule seront calculées en considérant la meilleure position déjà mémorisée à partir de l'itération précédente. Une nouvelle meilleure solution de particules de la population sera mise à jour. En effet, le nouveau vecteur vitesse de chaque particule pour une itération k s'écrit en fonction d'un facteur adaptatif d'inertie w qui s'écrivent :

$$v_i^{k+1} = wv_i^{(k)} + c_1r_1(P_{besti} - X_i^{(k)}) + c_2r_2(P_{bestg} - X_i^{(k)}) \quad (4.20)$$

$$w^{(k)} = w_{max} - \left(\frac{w_{max} - w_{min}}{M} \right) . k \quad (4.21)$$

avec,

c_1 et c_2 des constantes d'accélération qui accordent une pondération des tendances des particules à suivre leur panurgisme. Généralement, ces variables sont aléatoires et elles sont estimées à chaque itération sur le domaine de définition suivant une loi uniforme, r_1 et r_2 sont des nombres aléatoires prise entre 0 et 1, w est un coefficient d'inertie qui permet de définir la capacité d'utilisation de chaque particule dans le but d'améliorer la convergence de la méthode. La fixation de ce coefficient revient à trouver un compromis entre une exploration locale ($w < 1$) et une exploration globale ($w > 1$).

- le critère d'arrêt : Dans tous les cas la convergence vers la solution optimale globale n'est pas garantie. Donc, il est important de fournir à l'algorithme une porte de sortie en choisissant un nombre maximum d'itérations. C'est-à-dire que le programme s'arrête si le nombre maximum d'itérations est achevé ou bien la valeur des résultats obtenus est acceptable pour l'utilisateur.

Après l'ajustement des vitesses, la nouvelle position de chaque particule sera calculée comme suit:

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (4.22)$$

Après la mise à jour des vecteurs vitesse et position, $P_{best i}$ la meilleure position trouvée par la i^{eme} particule est comparé avec la précédente gardé en mémoire, tel que :

$$P_{best i} = \begin{cases} X_i, & F(X_i) < P_{best g} \\ P_{best i}, & F(X_i) \geq P_{best i} \end{cases} \quad (4.23)$$

$P_{best g}$ la meilleure solution trouvée par les particules de l'essaim, tel que

$$P_{best g} \in \{X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_N\} \quad (4.24)$$

$$f(P_{best g}) = \min\{f(X_1), f(X_2), \dots, f(X_i), \dots, f(X_N)\} \quad (4.25)$$

Les actions expliquées ci-dessus sont répétées jusqu'à atteindre le critère d'arrêt qui est choisi le nombre d'itération dans notre cas.

L'organigramme définissant les différentes étapes de calcul de la valeur optimisée de la fonction objectif est donné dans la figure 4.1.

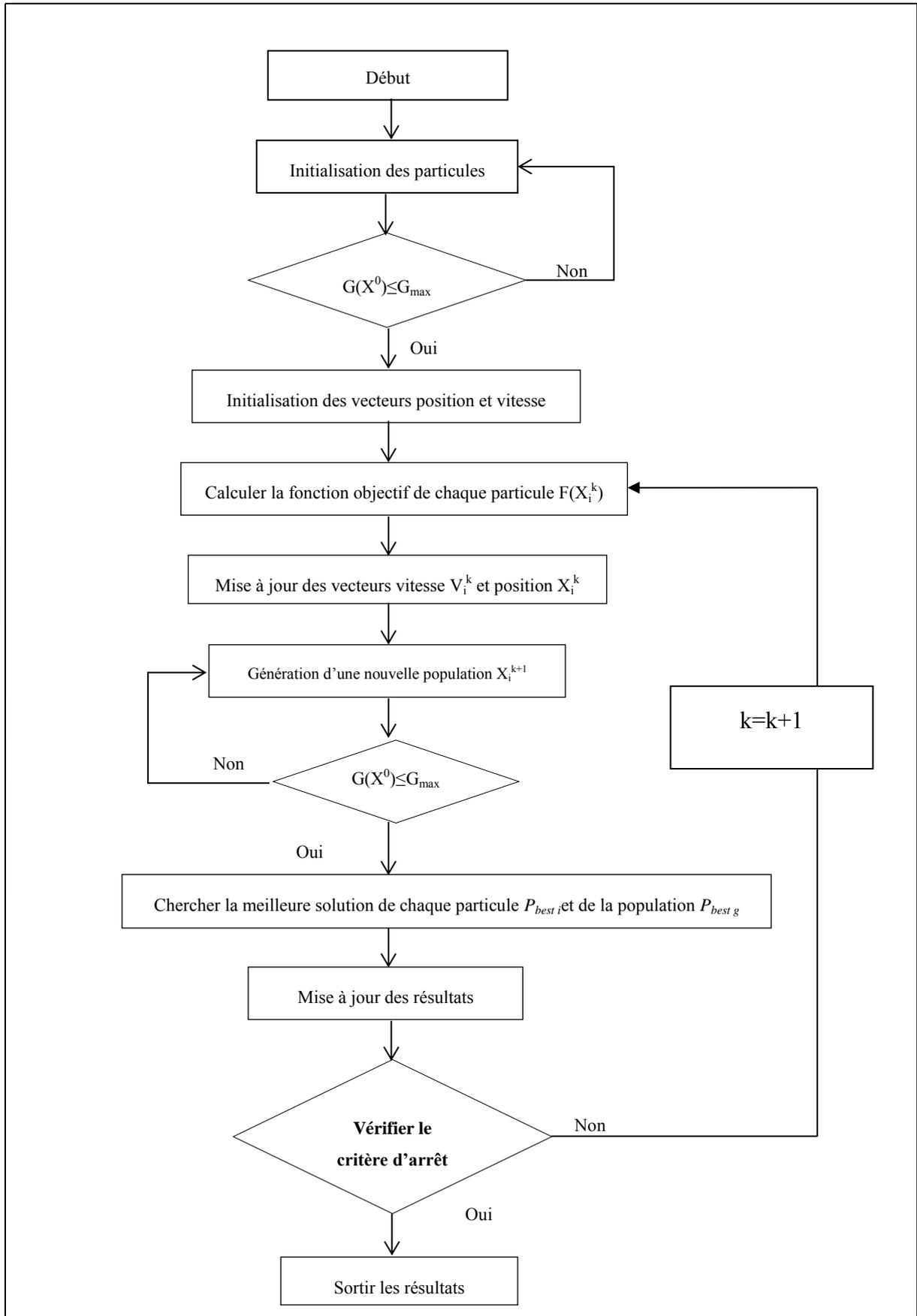


Figure 4.1. *Algorithme PSO*

5. Résultats et discussions

Tableau 4-1. Caractéristiques du cas d'étude

	Paramètres	Valeurs
Machine	Coût de la machine k_0 (\$/min)	0.3
	Coût de l'énergie k_e (\$/kwh)	0.13
	t_i (min)	5
	t_{mp} (min)	2.06
	Puissance de mise en place (W)	720
	Energie d'installation (J)	81630
Pièce	Matériau de la pièce	Acier
	Longueur de la pièce (mm)	100
	Paramètres de la rugosité	$k=1.001, x_1=0.0088, x_2=0.3232, x_3=0.3144$
outil	Diamètre de l'outil (mm)	40
	Puissance de changement d'outil (W)	1580
	Nombre de dent	4
	Coût du porte outil c_h (\$)	82.5
	Profondeur de passe radiale (mm)	20
	Matériau de l'outil	Carbure
	Paramètres de la durée de vie de l'outil	$C_T=285, e_v=0.3, u_v=0.4, r_v=0.1, n_v=0.1, x_v=0.33$
	t_o (min)	1.5
	Paramètre de sécurité a (mm)	2
	Coût d'une plaquette c_i (\$/plaquette)	2.5
Plage de variation	Vitesse de rotation (tr/min)	$[3.978 \times 10^2 \ 2.387 \times 10^3]$
	Avance par dent (mm/dent)	$[0.1 \ 0.6]$
	Profondeur de passe axiale (mm)	$[1 \ 4]$
	Nombre de passes nécessaires	$[1 \ \frac{A}{a_{pmin}}]$

Deux études de cas d'optimisation de surfacage respectivement mono-passe et multi-passes sont élaboré pour résoudre le problème d'optimisation présenté précédemment. Pour ce faire, les

caractéristiques d'une machine outil, d'une pièce et d'un outil sont adoptées des travaux réalisés par (Li et al. 2016). Les valeurs de ces spécifications sont présentées dans le tableau 4.1. Le problème d'optimisation choisi est résolu avec PSO avec une population de taille 50, le maximum d'itération est 150, les constantes d'accélération $c_1 = 0.9$ et $c_2 = 0.5$ et les paramètres d'inertie $w=0.95$. Dans ce qui suit, nous présentons les résultats obtenus pour le cas de surfacage mono passe et multi-passes.

5.1 Optimisation de l'énergie consommée lors d'une seule passe de surfacage

Nous avons résolu 4 problèmes mono-objectif pour déterminer le temps minimum f_1^* , le coût minimum f_2^* , l'énergie minimum f_3^* et la rugosité minimum f_4^* en utilisant l'algorithme PSO. Afin de minimiser le caractère aléatoire de l'algorithme PSO, dix résolutions sont effectuées. Les valeurs trouvées sont récapitulées dans le tableau 4.2.

Tableau 4-2. Résultats de l'optimisation de chaque fonction

f_1^* (min)	f_2^* (\$)	f_3^* (J)	f_4^* (mm)
7.09	3.71	$1.71 \cdot 10^5$	0.61

Ces valeurs seront par la suite utilisées pour calculer la fonction objectif F récapitulant le temps, le coût, l'énergie et la rugosité. Pour les valeurs des variables de décision (Ω , a_p , f_z et $n_{passes}=1$) retenue pour chaque optimisation effectuée dans le tableau 4.2, nous avons calculé les valeurs des autres fonctions objectives. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 4.3.

Tableau 4-3. Valeurs de chaque fonction

$f_1^*=7.09$ (min)			$f_2^*=3.71$ (\$)			$f_3^*=1.75 \cdot 10^5$ (J)			$f_4^*=0.61$ (mm)		
f_2 (\$)	f_3 (J)	f_4 (mm)	f_1 (min)	f_3 (J)	f_4 (mm)	f_1 (min)	f_2 (\$)	f_4 (mm)	f_1 (min)	f_2 (\$)	f_3 (J)
3.89	$1.80 \cdot 10^5$	1.38	7.22	$1.71 \cdot 10^5$	1.38	7.22	3.71	1.37	7.42	3.99	$1.84 \cdot 10^5$

Tableau 4-4. Résultats de l'optimisation mono-passe globale

Résol- ution	<i>Min</i> (<i>F</i>)	<i>f</i> ₁ (min)	<i>f</i> ₂ (\$)	<i>f</i> ₃ (J)	<i>f</i> ₄ (mm)	<i>Ω</i> (tr/min)	<i>f</i> _z (mm/dent)	<i>a</i> _p (mm)
1	4.10	7.41	3.83	1.76 10 ⁵	0.61	1072.6	0.1	1
2	4.10	7.51	3.78	1.75 10 ⁵	0.61	802.83	0.1	1
3	4.10	7.41	3.83	1.75 10 ⁵	0.61	1072.6	0.1	1
4	4.11	7.44	3.79	1.75 10 ⁵	0.62	937.3	0.1	1
5	4.11	7.44	3.79	1.75 10 ⁵	0.62	937.3	0.1	1
6	4.11	7.58	3.76	1.74 10 ⁵	0.62	666.9	0.1	1
7	4.10	7.41	3.83	1.76 10 ⁵	0.61	1072.6	0.1	1
8	4.11	7.44	3.79	1.75 10 ⁵	0.62	937.3	0.1	1
9	4.11	7.44	3.79	1.75 10 ⁵	0.62	937.3	0.1	1
10	4.13	7.33	3.80	1.76 10 ⁵	0.64	1207.9	0.1	1

Les résultats résumés dans le tableau 4.3 montrent que chaque fonction est minimisée pour des paramètres bien déterminés. D'où la nécessité de trouver un compromis entre ces quatre fonctions. C'est pourquoi, nous effectuons une optimisation de toutes les fonctions en même temps (équation 4.14). Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau 4.4. Les résultats montrent que le modèle d'optimisation proposé assure un équilibre entre le minimum de temps de production, le minimum de coût, le minimum d'énergie et de rugosité. En particulier lors de la deuxième résolution, nous trouvons la somme des fonctions objectifs égale à 4.10 qui représente la meilleure solution. Le temps est égal à 7.51 min, le coût est égal à 3.78, l'énergie est égale à 1.75 10⁵ et la rugosité est égale à 0.61mm. Ces valeurs sont légèrement supérieures à valeurs trouvées par une optimisation de chaque fonction seule. Nous calculons la valeur de la fonction *F* pour les paramètres de décision trouvés dans les quatre problèmes mono objectifs (tableau 4.3) et nous avons trouvé que la fonction mono objective globale est nettement supérieure à la valeur minimale trouvée dans le tableau 4.4. Par exemple, l'optimisation de la rugosité seule a conduit à obtenir une énergie égale à 1.84×10⁵ alors que l'optimisation combinée a conduit à une énergie de 1.75 10⁵, d'où 4.89% d'énergie sont économisés lors d'une opération mono passe de surfacage. Pour le coût, 5.26% sont économisés, le temps 4.44% sont économisés. Alors que pour l'optimisation du temps, du coût et de l'énergie seuls, la rugosité trouvée est égale à 1.38. Par contre l'optimisation combinée de toutes les fonctions a abouti à une rugosité égale à 0.61. D'où, 55% de la rugosité est améliorée. D'où la nécessité de tenir compte de toutes les fonctions objectifs ensemble.

5.2 Optimisation de l'énergie consommée pour le surfacage multi-passes

On a résolu 4 problèmes mono-objectif pour déterminer le temps minimum f_1^* , le coût minimum f_2^* , l'énergie minimum f_3^* et la rugosité minimum f_4^* utilisant l'algorithme PSO. Afin de minimiser le caractère aléatoire de l'algorithme PSO, dix résolutions sont effectuées. Les valeurs retenues de chaque fonction objectif figurent dans le tableau 4.5

Tableau 4-5. Résultats de l'optimisation de chaque fonction

f_1^* (min)	f_2^* (\$)	f_3^* (J)	f_4^* (mm)
7.27	4.74	$1.82 \cdot 10^5$	0.79

En utilisant les paramètres de coupes trouvés pour chaque fonction minimisée toute seule, nous avons calculé les valeurs des autres fonctions comme le montre le tableau 4.6.

Le tableau 4.6 montre que l'optimisation de chaque fonction seule n'aboutit pas à un équilibre entre les valeurs de différentes fonctions objectifs. Par exemple, l'optimisation du coût seul et du temps seul a causé une augmentation de l'énergie de 16.18% en la comparant avec le minimum obtenu lors de l'optimisation de l'énergie. Alors que l'optimisation de la qualité de surface seule a causé une augmentation de l'énergie de 19.8%, une augmentation de temps de 9.23% et une augmentation du coût de 19.95% en les comparant avec les valeurs minimales obtenus dans le tableau 4.5. D'où, la nécessité d'un modèle d'optimisation global de ces quatre fonctions objectifs en cas d'une opération de surfacage multi-passes.

Une optimisation globale est alors effectuée de toutes les fonctions comme l'indique l'équation (4.14). Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau 4.7. Les résultats montrent que le modèle d'optimisation proposé assure un équilibre entre le minimum de temps de production, le minimum de coût, le minimum d'énergie et de rugosité. En particulier la stratégie de coupe avec une vitesse de rotation de la broche de 1882.6 tr/min, une avance par dent égale à 0.19 mm/dent, une profondeur de passe égale à 1mm et un nombre de passe égal à 6 donne la meilleure solution telle que $\min(F)$ la somme des fonctions objectifs normalisé égale à 4.31.

Tableau 4-6. Résultats de chaque fonction

Modèle (a)			Modèle (b)			Modèle (c)			Modèle (e)		
$f_1^* = 7.27$ (min)			$f_2^* = 4.47$ (\$)			$f_3^* = 1.82 \cdot 10^5$ (J)			$f_4^* = 0.79$ (mm)		
f_2 (\$)	f_3 (J)	f_4 (mm)	f_1 (min)	f_3 (J)	f_4 (mm)	f_1 (min)	f_2 (\$)	f_4 (mm)	f_1 (min)	f_2 (\$)	f_3 (J)
4.74	$2.19 \cdot 10^5$	1.04	7.27	$2.19 \cdot 10^5$	1.04	7.72	4.74	0.99	8.01	4.91	$2.27 \cdot 10^5$

Nous comparons les résultats du modèle (a) représentés dans le tableau 4.6 avec la meilleure solution retenue de l'optimisation du modèle global, nous trouvons que notre modèle d'optimisation globale conduit à une diminution de 1.15% de temps, de 20.4% du coût, de 20.54% de l'énergie et de 27.8% de la rugosité de la surface. Une comparaison avec le modèle (b) a montré que le modèle d'optimisation globale a diminué le temps de 1.15%, le coût de 20.4%, l'énergie de 20.54 % et la rugosité de 27.8%. Par rapport au modèle (c), le modèle globale d'optimisation a diminué le temps de 7.12%, le coût de 4%, l'énergie de 4.3% et la rugosité de 24.24%. Finalement, une comparaison avec le modèle (d) prouve que le modèle global d'optimisation a diminué le temps de 10.61%, le coût de 23.21%, l'énergie de 23.34% et la rugosité de 5%. Ces résultats mettent en évidence que le modèle proposé pour l'optimisation globale de toutes les fonctions objectifs pour une opération de surfacage multi-passes est efficace en minimisant le temps, le coût, l'énergie et la rugosité.

Tableau 4-7. Résultats de l'optimisation multi-passes globale

Résolu- -tion	Min (F)	f_1 (min)	f_2 (\$)	f_3 (J)	f_4 (mm)	Ω (tr/min)	f_z (mm/dent)	a_p (mm)	n_{passes}
1	4.39	7.20	3.75	$1.73 \cdot 10^5$	0.8	1072.6	0.24	1	6
2	4.39	7.20	3.75	$1.73 \cdot 10^5$	0.8	1072.6	0.24	1	6
3	5.49	7.12	3.76	$1.74 \cdot 10^5$	1.4	1095.8	0.52	3	2
4	4.31	7.16	3.77	$1.74 \cdot 10^5$	0.75	1882.6	0.19	1	6
5	4.51	7.22	3.73	$1.72 \cdot 10^5$	0.85	802.18	0.29	1	6
6	4.58	7.14	3.73	$1.73 \cdot 10^5$	0.93	1207.9	0.37	1	6
7	4.47	7.15	3.75	$1.73 \cdot 10^5$	0.86	1477.9	0.29	1	6
8	4.33	7.28	3.74	$1.73 \cdot 10^5$	0.76	802.5	0.2	1	6
9	4.45	7.20	3.73	$1.73 \cdot 10^5$	0.84	937.3	0.28	1	6
10	4.55	7.12	3.74	$1.73 \cdot 10^5$	0.91	1747.78	0.34	1	6

5.3 Comparaison entre les deux modèles globales d'optimisation

Nous présentons dans le tableau 4.8 les valeurs de l'énergie et du temps optimisés obtenues lors de la phase de coupe par les deux types d'optimisation globale mono-passe et multi-passes.

Les résultats du tableau 4.8 montrent que lors de l'optimisation de l'opération de surfacage en multi-passes, la machine consomme une énergie minimale égale à $2.13 \cdot 10^4$ (J) et nécessite un temps minimal égale à 37.20 (s) pour enlever les 6 mm. Par contre l'optimisation de surfacage en mono-passe nécessite un temps minimal égale à 27.59 (s) et consomme une énergie minimale égale à $6.25 \cdot 10^3$ (J) pour enlever un millimètre. C'est-à-dire, pour enlever les 6 mm, la machine consomme 6 fois la quantité demandée pour enlever 1 mm en termes d'énergie et de temps. Nous comparons ces deux valeurs par rapport aux résultats obtenus par l'optimisation de surfacage en multi-passes.

Tableau 4-8. Comparaison entre l'énergie et le temps de coupe lors du surfaçage

		Energie consommée (J)		Temps consommé (s)	
		Totale	De coupe	Total	De coupe
		f_3	$E_{coupe} + E_{air}$	f_1	$t_{coupe} + t_{air}$
Nombre de passe	Mono-passe	$1.75 \cdot 10^5$	$6.25 \cdot 10^3$	450.6	27.57
	Multi-passes	$1.74 \cdot 10^5$	$2.13 \cdot 10^4$	429.6	37.20

D'après le tableau 4.9, nous pouvons conclure que le modèle d'optimisation de surfaçage en multi-passes a plus d'efficacité à réduire le temps et l'énergie consommés lors de l'enlèvement de matière. D'où, la nécessité de tenir compte du nombre de passe lors de l'optimisation de l'opération de coupe en plusieurs passes.

Tableau 4-9. Erreur entre les résultats de l'optimisation en mono-passe et multi-passes

		Energie de coupe (J)	Temps de coupe (s)
		$E_{coupe} + E_{air}$	$t_{coupe} + t_{air}$
Nombre de passes	(Mono-passe)×6	$3.75 \cdot 10^4$	165.42
	Multi-passes	$2.13 \cdot 10^4$	37.20
Erreur(%)		43.2	77.53

6. Conclusion

Une optimisation des conditions de coupe en fraisage à l'aide d'une optimisation mono objectif combiné de temps, coût, énergie et rugosité est présentée dans ce chapitre. Le modèle développé assure un couplage entre les objectifs écologiques et économiques. Nous notons aussi que la qualité de surface est modélisée comme un objectif. Les comparaisons entre les résultats de l'optimisation combiné de tous les fonctions avec ceux de l'optimisation de chaque fonction seule montre que le

modèle proposé pour l'optimisation combiné d'une opération mono passe de surfaçage et multi-passes est efficace et assure une réduction des fonctions objectifs.

Conclusions et Perspectives

Cette étude est conduite dans le but de fournir un outil d'aide à la décision lors de la génération des gammes d'usinage.

Dans une première étape, on a développé deux modélisations de consommation d'énergie pour la table d'avance et la broche d'une fraiseuse CNC. La première modélisation permet la détermination de l'énergie de coupe consommée par la table d'avance en considérant le comportement dynamique des efforts de coupe. La deuxième modélisation permet la détermination de l'énergie de coupe consommée par la broche considérant le comportement dynamique des efforts de coupe et les efforts des roulements. Dans le but de quantifier ces efforts, deux façons de modélisation de l'équation de mouvement en se basant sur la méthode des éléments finis sont proposées. Une première qui tient compte seulement des matrices masse, rigidité et amortissement de la broche. Dans ce cas on parle d'un modèle d'estimation d'énergie d'un système de coupe découplé. Une deuxième façon de modélisation de l'équation de mouvement qui fait inclure les matrices masse, rigidité et amortissement de la table d'avance avec celle de la broche. Dans ce cas on parle d'un modèle d'estimation d'énergie d'un système de coupe couplé. L'équation de mouvement est résolue pour quantifier les efforts de coupe et les efforts des roulements variables en fonction du temps. Les résultats montrent que le couplage entre la broche et la table d'avance est bien modélisé.

La deuxième étape est consacrée à la validation des deux modèles numériques proposés de la consommation d'énergie respectivement de la table et de la broche avec l'expérimental. Un bon accord est constaté entre les résultats expérimentaux et numériques. Cela prouve que l'approche développée est capable de prédire avec succès la consommation des puissances respectivement de l'axe d'avance et de la broche lors du processus de coupe et que le comportement dynamique des forces de coupe et des forces de roulement permettent une meilleure évaluation de l'énergie consommée. Une étude paramétrique pour les deux modèles numériques en variant les conditions de coupe telles que la profondeur de passe axiale, l'avance par dent, la vitesse de coupe et le type de stratégie est élaborée. Cette étude montre que l'avance par dent et la vitesse de coupe ont un impact significatif sur l'énergie de coupe de l'axe d'avance ainsi que de la broche où l'augmentation de ce paramètre entraîne une diminution de la consommation de l'énergie de coupe. De plus une augmentation de l'avance par dent entraîne une réduction de l'énergie de coupe consommée, et une augmentation de la vitesse de coupe entraîne une réduction de la consommation de l'énergie de coupe. La simulation numérique du modèle de l'axe d'avance a montré que la prise en compte de la masse totale de la table et de la pièce est importante lors de la modélisation de la puissance du système de l'axe d'avance, où une augmentation de ce paramètre entraîne une augmentation de l'énergie de coupe consommée. De plus, l'étude considère aussi les défauts de montage tels que l'excentricité et le balourd et des défauts d'usure comme l'écaillage des bagues intérieure et

extérieure du roulement à billes, et leurs impacts sur l'énergie consommée pendant les phases d'approche et de coupe. Les résultats obtenus montrent que le défaut d'usure conduit à une augmentation plus importante de la puissance consommée que celui du montage, en particulier pour le cas de défaut d'écaillage de la bague intérieure et pour une vitesse de rotation importante où le taux d'augmentation peut atteindre 30%. Ces résultats mettent l'accent sur l'importance de la maintenance préventive qui conduit à une réduction importante de la puissance consommée. De même, pour la broche d'une fraiseuse tournant à une vitesse de rotation élevée, nous pouvons conclure que le guidage en rotation est meilleur lorsqu'il est assuré par des paliers magnétiques plutôt que par des roulements à billes. En outre, les résultats expérimentaux ont montré que la stratégie hélicoïdale interne consomme 33% moins d'énergie que la stratégie d'aller-retour. Une comparaison entre les deux types de modélisation en cas de système d'usinage couplé et non couplé pour les mêmes conditions de fonctionnement a montré qu'il n'y a pas de différence entre les résultats de la puissance consommée par le système de coupe.

La troisième étape consiste à minimiser l'énergie consommée par une machine outil. Un modèle d'optimisation mono objectif tenant compte du temps de production, le coût de l'opération, l'énergie consommée et la qualité de surface est développé pour trouver les paramètres de coupe optimaux qui minimisent à la fois toutes ces fonctions. Deux scénarios d'optimisation sont développés pour des surfacages mono-passe et multi-passes. Les résultats montrent que le modèle d'optimisation en cas de multi-passes donne des résultats d'optimisation en termes de temps et d'énergie plus importantes que ceux obtenus par le modèle d'optimisation en mono-passe.

Comme perspectives de ce travail de recherche, il serait intéressant d'effectuer une validation expérimentale des résultats d'optimisation trouvés ou bien une validation numérique avec un autre algorithme compétitif comme l'algorithme génétique. Aussi, nous proposons d'effectuer une comparaison entre le taux de l'énergie consommée par les roulements à rouleaux coniques par rapport à celle consommée par les roulements à billes. Finalement, une généralisation du modèle d'estimation d'énergie développé pour d'autre opération pour aboutir à une optimisation d'une gamme d'usinage.

Références

- Albertelli, P., Keshari, A., and Matta, A. 2016. "Energy oriented multi cutting parameter optimization in face milling." *Journal of cleaner production* 137: 1602-1618.
- Amel BOUAZIZ, Contribution à l'étude du comportement dynamique d'une machine outil en présence des suspensions magnétiques, Thèse (2015).
- Avram, I. O. (2010). *Machine tool use phase: Modeling and analysis with environmental considerations* (Doctoral dissertation, Verlag nicht ermittelbar).
- Avram, O. I., & Xirouchakis, P. (2011). Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), 699-711.
- Balogun, V.A., Edem, I.F., Adekunle, A.A., Mativenga, P.T., 2016. Specific energy based evaluation of machining efficiency. *Journal of Cleaner Production*.
- Balogun, V.A., Mativenga, P.T., 2014. Impact of undeformed chip thickness on specific energy in mechanical machining processes. *J. Clean. Prod.* 69, 260e268.
- Bhattacharya, A., Das, S., Majumber, P., Batish, A., 2009. Estimating the effect of cutting parameters on surface finish and power consumption during high speed machining of AISI 1045 steel using Taguchi design and ANOVA. *Prod. Eng. Res. Dev.* 3, 31e40.
- Bhushan RK. Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites. *J Clean Prod* 2013;39:242–54.
- Budak, E. 2006. "Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46(12-13): 1478-1488.
- Calvanese, M. L., Albertelli, P., Matta, A., and Taisch, M. 2013. "Analysis of energy consumption in CNC machining centers and determination of optimal cutting conditions." *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*. Springer, Singapore, 227-232.
- D. Kordonowy. A power assessment of machining tools. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 2002.
- Dahmus, J. and Gutowski, T. (2004) An Environmental Analysis of Machining, Proceedings of the 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Exposition, Anaheim, California, USA.

- Deng, Z., Zhang, H., Fu, Y., Wan, L., & Liu, W. (2017). Optimization of process parameters for minimum energy consumption based on cutting specific energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 166, 1407-1414.
- Devoldere, T., Dewulf, W., Deprez, W., Willems, B., Duou, R.J. 2007, Improvement Potentials for Energy Consumption in Discrete Part Production Machines. Proceedings of the 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Tokyo, Japan. 311-316.
- Diaz, N., Redelsheimer, E., and Dornfeld, D. 2011. "Energy consumption characterization and reduction strategies for milling machine tool use." *Glocalized solutions for sustainability in manufacturing*. Springer, Berlin, Heidelberg. 263-267.
- Draganescu, F., Gheorghe, M., Doicin, C.V., 'Models of machine tool efficiency and specific consumed energy. *J. Mater', Process. Tech.* 141 (1), 9e15, 2003.
- Edem, I. F., & Mativenga, P. T. (2017). Modelling of energy demand from computer numerical control (CNC) toolpaths. *Journal of cleaner production*, 157, 310-321.
- Edem, I. F., and Mativenga, P. T. 2016. "Impact of feed axis on electrical energy demand in mechanical machining processes." *Journal of Cleaner Production* 137: 230-240.
- Guo, Y.S., Loenders, J., Duou, J., Lauwers, B., 'Optimization of energy consumption and surface quality in nish turning'. *Procedia CIRP* 1 (1), 512e517, 2012.
- Gutowski T, Dahmus J, Dalquist S. Measuring the Environmental Load of Manufacturing Processes. In : Proceedings of International Society for Industrial Ecology (ISIE), Stockholm, Sweden, June 1215, 2005.
- Gutowski, T., Dahmus, J., and Thiriez, A. 2006, May. "Electrical energy requirements for manufacturing processes." 13th CIRP international conference on life cycle engineering. Vol. 31. CIRP International Leuven, Belgium.
- Hanafi, I., Khamlichi, A., Mata Cabrera, F., Almansa, E., Jabbouri, A., 2012. Optimization of cutting conditions for sustainable machining of PEEK-CF30 using TiNntools. *J. Clean. Prod.* 33, 1e9.
- He, Y., Liu, F., Wu, T., Zhong, F. P., and Peng, B. 2012. "Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 226(2): 255-266.
- Hentati, T., Barkallah, M., Bouaziz, S., & Haddar, M. (2016). 1982. Dynamic modeling of spindle-rolling bearings systems in peripheral milling operations. *Journal of Vibroengineering*, 18(3).

Herzog, T., 2009. World Greenhouse Gas Emissions: 2005. World Resources Institute, Washington, D.C. Institution, B. S., 2007. Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles). Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission

Hichem Hassine, 2015. Modélisation, simulation et optimisation pour l'eco-fabrication. (thèse).

Holkup, T., Cao, H., Kolář, P., Altintas, Y., & Zelený, J. (2010). Thermo-mechanical model of spindles. *CIRP annals*, 59(1), 365-368

Jang, D. Y., Jung, J., & Seok, J. (2016). Modeling and parameter optimization for cutting energy reduction in MQL milling process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(1), 5-12.

Klancnik S, Brezocnik M, Balic J, Karabegovic I (2012) Programming of CNC milling machines using particle swarm optimization. *Mater Manuf Process* 28(7):811–815.

Kulkarni A, Mandave H and Sabnis V. Optimization of power consumption for CNC turning Of AISI 1040 steel using Taguchi approach. *Int J Innov Res Sci Eng Technol* 2014; 3(8): 15383–15390.

Li W, Kara W (2011) An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: a case of turning process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: J Eng Manuf* 225(9):1636–1646

Li, Congbo, et al. "Selection of optimum parameters in multi-pass face milling for maximum energy efficiency and minimum production cost." *Journal of Cleaner Production* 140 (2017): 1805-1818.

Li, J., Lu, Y., Zhao, H., Li, P., Yao, Y., 2014. Optimization of cutting parameters for energy saving, *Int J Adv Manuf Technol.* 70, 117-124.

Luan, X., Zhang, S., & Cai, G. (2016). Optimal Cutting Parameters to Reduce Power Consumption in Face Milling of a Cast Iron Alloy for Environmental Sustainability. In *Sustainable Design and Manufacturing 2016* (pp. 135-148). Springer, Cham.

Lv, J., Tang, R., Jia, S., & Liu, Y. (2016). Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3864-3874.

M.F. Rajemi et al, 'Sustainable machining : selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations', *Journal of Cleaner Production* 18 (2010) 10591065.

Mativenga PT, Rajemi MF. Calculation of optimum cutting parameters based on minimum energy footprint. *CIRP Annals –Manufacturing Technology*; 2011, Vol.60, No.1, pp.149 – 152.

Neugebauer, R., Wabner, M., Rentzsch, H., Ihlenfeldt, S., 2011. Structure principles of energy efficient machine tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 4 (2), 136e147.

Quintana G, Ciurana J, Ribatallada J. Modelling power consumption in ballend milling operations. *Mater Manuf Process* 2011;26:746–56.

Rief, M., Karpuschewski, B., & Kalhöfer, E. (2017). Evaluation and modeling of the energy demand during machining. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 19, 62-71.

Rodrigues, A.R., Coelho, R.T., 2007. 'Influence of the tool edge geometry on specific cutting energy at high-speed cutting'. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 29(3),279e283, (2007).

Sushrut S. Pavanaskar, 'Improving Energy Efficiency in CNC Machining'. University of California, Berkeley (2014).

Taissir HENTATI FKI, Contribution à l'étude dynamique d'un palier à roulement en présence de défaut, thèse (2008).

V.A. Balogun, Mativenga, 'Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes', *Journal of Cleaner Production* 41 (2013) 179e186.

Wang, Q., Liu, F., Wang, X., 2014. Multi-objective optimization of machining parameters considering energy consumption. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 71, 1133-1142.

Wang, Z., Yuan, J., Yin, Z., & Li, C. (2016). Study on high-speed cutting parameters optimization of AlMn1Cu based on neural network and genetic algorithm. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(4), 1687814016644126.

Yoon, H. S., Lee, J. Y., Kim, M. S., et al. (2014). Empirical power consumption model for material removal in three-axis milling. *Journal of Cleaner Production*, 78, 54–62

Yoon, H.S., Moon, J.S., Pham, M.Q., Lee, G.B., Ahn, S.H., 2013. Control of machining parameters for energy and cost savings in micro-scale drilling of PCBs. *J. Clean. Prod.* 54, 41e48.

Zhong, Q., Tang, R., & Peng, T. (2017). Decision rules for energy consumption minimization during material removal process in turning. *Journal of Cleaner Production*, 140, 1819-1827.

Zhou L, Li J, Li F, Meng Q, Li J, Xu X. Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review. *J Clean Prod* 2016;112:3721e34

Liste des publications et communications

- Liste des publications

Anoire BEN JDIDIA, Alain BELLACICO, Taissir HENTATI, Maher BARKALAH, Mohamed Taoufik KHABOU, Alain RIVIERE, Mohamed HADDAR “Consumed energy modelization of an axis feed system in case of sustainable manufacturing”, Journal of the Chinese Institute of Engineers, Octobre 2018. (accepted)

Anoire BEN JDIDIA, Taissir HENTATI, Alain BELLACICO, Mohamed Taoufik KHABOU, Alain RIVIERE, Mohamed HADDAR “Consumed energy by a bearing supported spindle in presence of dynamic cutting force and defects”, Comptes rendu des mécaniques. (soumis)

- Liste des communications orales

Anoire BEN JDIDIA, Alain BELLACICO, Maher BARKALAH, Hichem HASSINE, Mohamed Taoufik KHABOU, Alain RIVIERE, Mohamed HADDAR “Analytical method for the calculation of tool machine energy consumption”, The International Congress Design and Modelling of Mechanical Systems (CMSM’2017) 27th – 29th March, 2017, Hammamet, Tunisia.

Anoire BEN JDIDIA, Taissir HENTATI, Alain BELLACICO, Mohamed Taoufik KHABOU, Alain RIVIERE, Mohamed HADDAR “Influence of the milling cutting force dynamic behavior and some parts weight on axis feed power consumption”, ICAV 2018, 19th – 21th March, 2018, Hammamet, Tunisia.

Anoire BEN JDIDIA, Taissir HENTATI, Alain BELLACICO, Mohamed Taoufik KHABOU, Alain RIVIERE, Mohamed HADDAR “Optimizing cutting conditions in single pass face milling for minimum cutting energy, time, cost, and surface roughness”, A3M 2018, 17th – 19th December, 2018, Hammamet, Tunisia.

Annexe (A) : matrices élémentaires d'une poutre de Timoshenko

à deux nœuds et à cinq degrés de liberté.

La matrice masse élémentaire due à la translation :

$$[M_T^e] = [M_T^e]_1 + \Phi[M_T^e]_2 + \Phi^2[M_T^e]_3$$

$$[M_T^e]_1 = \frac{\rho AI}{420L(1 + \Phi)^2} \begin{bmatrix} 350 & 0 & 0 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 0 & 0 & 22L & 0 & 54 & 0 & 0 & -13L \\ 0 & 0 & 156 & -22L & 0 & 0 & 0 & 54 & 13L & 0 \\ 0 & 0 & -22L & 4L^2 & 0 & 0 & 0 & -13L & -3L^2 & 0 \\ 0 & 22L & 0 & 0 & 4L^2 & 0 & 13L & 0 & 0 & -3L^2 \\ 140 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 0 & 0 & 13L & 0 & 156 & 0 & 0 & -22L \\ 0 & 0 & 54 & -13L & 0 & 0 & 0 & 156 & 22L & 0 \\ 0 & 0 & 13L & -3L^2 & 0 & 0 & 0 & 22L & 4L^2 & 0 \\ 0 & -13L & 0 & 0 & -3L^2 & 0 & -22L & 0 & 0 & 4L^2 \end{bmatrix}$$

$$[M_T^e]_2 = \frac{\rho AI}{420L(1 + \Phi)^2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 249 & 0 & 0 & 38.5L & 0 & 126 & 0 & 0 & -31.5L \\ 0 & 0 & 249 & -38.5L & 0 & 0 & 0 & 126 & 31.5L & 0 \\ 0 & 0 & -38.5L & 7L^2 & 0 & 0 & 0 & -31.5L & -7L^2 & 0 \\ 0 & 38.5L & 0 & 0 & 7L^2 & 0 & 31.5L & 0 & 0 & -7L^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 126 & 0 & 0 & 31.5L & 0 & 249 & 0 & 0 & -38.5L \\ 0 & 0 & 126 & -31.5L & 0 & 0 & 0 & 249 & 38.5L & 0 \\ 0 & 0 & 31.5L & -7L^2 & 0 & 0 & 0 & 38.5L & 7L^2 & 0 \\ 0 & -31.5L & 0 & 0 & -7L^2 & 0 & -38.5L & 0 & 0 & 7L^2 \end{bmatrix}$$

$$[M_T^e]_3 = \frac{\rho AI}{420L(1 + \Phi)^2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 140 & 0 & 0 & 17.5L & 0 & 70 & 0 & 0 & -17.5L \\ 0 & 0 & 140 & -17.5L & 0 & 0 & 0 & 70 & 17.5L & 0 \\ 0 & 0 & -17.5L & 3.5L^2 & 0 & 0 & 0 & -17.5L & -3.5L^2 & 0 \\ 0 & 17.5L & 0 & 0 & 3.5L^2 & 0 & 17.5L & 0 & 0 & -3.5L^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 70 & 0 & 0 & 17.5L & 0 & 140 & 0 & 0 & -17.5L \\ 0 & 0 & 70 & -17.5L & 0 & 0 & 0 & 140 & 17.5L & 0 \\ 0 & 0 & 17.5L & -3.5L^2 & 0 & 0 & 0 & 17.5L & 3.5L^2 & 0 \\ 0 & -17.5L & 0 & 0 & -3.5L^2 & 0 & -17.5L & 0 & 0 & 3.5L^2 \end{bmatrix}$$

La matrice masse élémentaire due aux rotations par :

$$[M_R^e] = [M_R^e]_1 + \Phi[M_R^e]_2 + \Phi^2[M_R^e]_3$$

$$[M_R^e]_1 = \frac{\rho I}{30L(1 + \Phi)^2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 36 & 0 & 0 & 3L & 0 & -36 & 0 & 0 & 3L \\ 0 & 0 & 36 & -3L & 0 & 0 & 0 & -36 & -3L & 0 \\ 0 & 0 & -3L & 4L^2 & 0 & 0 & 0 & 3L & -L^2 & 0 \\ 0 & 3L & 0 & 0 & 4L^2 & 0 & -3L & 0 & 0 & -L^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -36 & 0 & 0 & -3L & 0 & 36 & 0 & 0 & -3L \\ 0 & 0 & -36 & 3L & 0 & 0 & 0 & 36 & 3L & 0 \\ 0 & 0 & -3L & -L^2 & 0 & 0 & 0 & 3L & 4L^2 & 0 \\ 0 & 3L & 0 & 0 & -L^2 & 0 & -3L & 0 & 0 & 4L^2 \end{bmatrix}$$

$$[M_R^e]_2 = \frac{\rho I}{30L(1 + \Phi)^2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -15L & 0 & 0 & 0 & 0 & -15L \\ 0 & 0 & 0 & 15L & 0 & 0 & 0 & 0 & 15L & 0 \\ 0 & 0 & 15L & 5L^2 & 0 & 0 & 0 & -15L & -5L^2 & 0 \\ 0 & -15L & 0 & 0 & 5L^2 & 0 & 15L & 0 & 0 & -5L^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 15L & 0 & 0 & 0 & 0 & 15L \\ 0 & 0 & 0 & -15L & 0 & 0 & 0 & 0 & -15L & 0 \\ 0 & 0 & 15L & -5L^2 & 0 & 0 & 0 & -15L & 5L^2 & 0 \\ 0 & -15L & 0 & 0 & -5L^2 & 0 & 15L & 0 & 0 & 5L^2 \end{bmatrix}$$

$$[M_R^e]_3 = \frac{\rho I}{30L(1 + \Phi)^2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10L^2 & 0 & 0 & 5L^2 & 0 \\ 0 & 0 & 10L^2 & 0 & 0 & 5L^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5L^2 & 0 & 0 & 10L^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5L^2 & 0 & 0 & 10L^2 & 0 \end{bmatrix}$$

La matrice des effets gyroscopiques élémentaire :

$$[G^e] = [G^e]_1 + \Phi[G^e]_2 + \Phi^2[G^e]_3$$

$$[G^e]_1 = \frac{\rho I}{30L(1 + \Phi)^2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -36 & 3L & 0 & 0 & 0 & 36 & 3L & 0 \\ 0 & 36 & 0 & 0 & 3L & 0 & -36 & 0 & 0 & 3L \\ 0 & -3L & 0 & 0 & -4L^2 & 0 & 3L & 0 & 0 & L^2 \\ 0 & 0 & -3L & 4L^2 & 0 & 0 & 0 & 3L & -L^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 36 & -3L & 0 & 0 & 0 & -36 & -3L & 0 \\ 0 & -36 & 0 & 0 & -3L^2 & 0 & 36 & 0 & 0 & -3L \\ 0 & -3L & 0 & 0 & L^2 & 0 & 3L & 0 & 0 & -4L^2 \\ 0 & 0 & -3L & -L^2 & 0 & 0 & 0 & 3L & 4L^2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[G^e]_2 = \frac{\rho I}{30L(1 + \Phi)^2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -15L & 0 & 0 & 0 & 0 & -15L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -15L & 0 & 0 & 0 & 0 & -15L \\ 0 & 15L & 0 & 0 & -5L^2 & 0 & -15L & 0 & 0 & 5L^2 \\ 0 & 0 & 15L & 5L^2 & 0 & 0 & 0 & 15L & -5L^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 15L & 0 & 0 & 0 & 0 & 15L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 15L & 0 & 0 & 0 & 15L & 0 \\ 0 & 15L & 0 & 0 & 5L^2 & 0 & -15L & 0 & 0 & -5L^2 \\ 0 & 0 & 15L & -5L^2 & 0 & 0 & 0 & -15L & 5L^2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[G^e]_3 = \frac{\rho I}{30L(1 + \Phi)^2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -10L^2 & 0 & 0 & 0 & -5L^2 \\ 0 & 0 & 10L^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -5L^2 & 0 & 0 & 0 & -10L^2 \\ 0 & 5L^2 & 0 & 0 & 0 & 10L^2 & 0 \end{bmatrix}$$

La matrice de rigidité élémentaire :

$$[K^e] = [K_f^e] + \Phi[K_c^e]$$

$$[K_f^e] = \frac{EI}{L^3(1 + \Phi)} \begin{bmatrix} 12 & 0 & 0 & 0 & 0 & -12 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 0 & 0 & 6L & 0 & -12 & 0 & 0 & 6L \\ 0 & 0 & 12 & -6L & 0 & 0 & 0 & -12 & -6L & 0 \\ 0 & 0 & -6L & 4L^2 & 0 & 0 & 0 & 6L & 2L^2 & 0 \\ 0 & 6L & 0 & 0 & 4L^2 & 0 & -6L & 0 & 0 & 2L^2 \\ -12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -12 & 0 & 0 & -6L & 0 & 12 & 0 & 0 & -6L \\ 0 & 0 & -12 & 6L & 0 & 0 & 0 & 12 & 6L & 0 \\ 0 & 0 & -6L & 2L^2 & 0 & 0 & 0 & 6L & 4L^2 & 0 \\ 0 & 6L & 0 & 0 & 2L^2 & 0 & -6L & 0 & 0 & 4L^2 \end{bmatrix}$$

$$[K_c^e] = \frac{EI}{L^3(1 + \Phi)} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L^2 & 0 & 0 & 0 & -L^2 & 0 \\ 0 & 0 & L^2 & 0 & 0 & 0 & -L^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L^2 & 0 & 0 & 0 & L^2 & 0 \\ 0 & 0 & -L^2 & 0 & 0 & 0 & L^2 \end{bmatrix}$$



Titre : Nouvelle méthode de génération des gammes d'usinages tenant en compte des paramètres économiques et environnementaux

Mots clés : consommation d'énergie, machine outil, comportement dynamique, efforts de coupe, efforts des roulements, éléments finis, défauts des roulements.

Résumé : Dans l'industrie manufacturière, la consommation d'énergie électrique est considérée comme l'un des problèmes majeurs qui est malheureusement liée systématiquement à l'émission de gaz contenant du dioxyde de carbone et amenant à l'effet de serre. Des études sur l'estimation de l'énergie électrique consommée par les machines outils sont développées par des chercheurs au cours des dernières décennies pour proposer des modèles d'estimation de cette énergie. Ces modèles sont soit empiriques soit théoriques et se limitent à tenir compte du comportement dynamique du système de coupe lors des opérations d'usinage. La contribution fondamentale de cette thèse de doctorat est la caractérisation du comportement non linéaire des efforts de coupe et du système de guidage lors de l'estimation de l'énergie consommée par une machine outil. La modélisation repose sur la détermination de l'effort de coupe et de l'effort des roulements qui sont variables en fonction du temps et qui sont déduites de l'écriture de l'équation de mouvement du système (broche ou machine-outil)

discretisé en éléments finis en utilisant la méthode de Newark couplée avec l'algorithme de Newton Raphson. Ces efforts de coupe et de roulements sont utilisés pour calculer la puissance puis l'énergie consommée par la table d'avance, la broche et par conséquent la machine outil. Afin de valider notre approche, la puissance et l'énergie obtenues à partir du modèle développé sont comparées avec la puissance et l'énergie obtenues avec un dispositif expérimental. Une étude paramétrique est réalisée pour mettre l'accent sur l'impact de la variation des paramètres de coupe sur la valeur de la puissance et de l'énergie consommées. On introduit par la suite des défauts d'usure et de montage au niveau des roulements et nous présentons leurs impacts sur le comportement énergétique de la machine. Une attention particulière a également été consacrée à développer un modèle d'optimisation des mouvements d'une machine outil globale minimisant à la fois l'énergie consommée, le temps de production, le coût et la rugosité de surface en respectant les consignes technologiques.

Title : New generation method of manufacturing ranges taking into account economic and environmental parameters.

Keywords : energy consumption, machine tool, dynamic behavior, cutting efforts, bearing efforts, finite elements, bearings defects.

Abstract In manufacturing, the electrical energy consumption is considered as one of the major problems which are systematically related to the gas emission containing carbon dioxide and leading to the greenhouse effect. Studies based on the estimation of the machine tools energy consumption become the interest of researchers in recent decades. As a result, different models for energy estimating are developed in order to minimize the quantity of consumed energy. These models are either empirical or theoretical and are limited to taking into account the dynamic behavior of the cutting system during machining operations. The fundamental contribution of this doctoral thesis is the characterization of the nonlinear behavior of cutting and rolling forces during estimating the consumed energy by a machine tool. The developed approach is based on the determination of the variable cutting forces and bearings forces which are function of time. These forces are deduced by solving the equation of motion based on finite element method using Newark's

method coupled with Newton Raphson's algorithm. These forces are used to calculate the power then the consumed energy by the axis feed, the spindle and therefore the machine tool. In order to validate our approach, the power and energy obtained from the model developed are compared with the power and energy obtained with an experimental device. A parametric study is carried out to focus on the impact of the variation of the cutting parameters on the value of the consumed power and energy. An interest is given for different types of defect (inner ring spalling, outer ring spalling, eccentricity and unbalance) in order to study their impact on the spindle consumed power during approach and cutting phases under different rotating conditions. Particular attention has also been devoted to develop a global model for optimizing machine tool movements that minimizes the consumed energy, the production time, the cost and the surface roughness with respect of the technological constraints.

