

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
LABORATOIRE DE RECHERCHE DES TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Parcours : Master Académique
Domaine : Sciences & Technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique

THÈME

**Modélisation et commande numérique
de l'effort de coupe en tournage**

Présenté par Monsieur : CHEROUIK Ahmed

Devant le Jury :

Nom & Prénom(s)	Grade	Qualité	Structure de rattachement
AISSAT Sahraoui	MCB	Président	Université de Tiaret
MADANI Ahmed	MAA	Examineur	Université de Tiaret
MAKHFI Souâd	MAA	Examineur	Université de Tiaret
HADDOUCHE Kamel	MCA	Encadreur	Université de Tiaret

PROMOTION 2016/2017

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

La mémoire de ma mère.

Ma femme.

Mes enfants.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire de Recherche des Technologies Industrielles (LRTI) de l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret, dirigé par Monsieur HADDOUCHE Kamel, Maître de Conférences au Département de Génie Mécanique, à qui j'exprime toute ma profonde reconnaissance et qui m'a témoigné de sa confiance et de son aide scientifique, et qui par son expérience, sa compétence, ses conseils avisés et ses encouragements m'a transmis sa passion dans la recherche scientifique.

Je suis également très reconnaissant envers le Jury pour l'honneur qu'il me fait d'avoir accepté d'examiner mon mémoire de Master, et je le remercie également pour le temps qu'il passe à évaluer mon manuscrit.

Enfin, je tiens à remercier ma femme et spécialement mon frère pour la patience et les encouragements qu'ils ont su me donner pendant les moments difficiles. Aussi, je remercie toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

LISTE DES ABREVIATIONS

Variable	Désignation
AAP	Algorithme d'Adaptation Paramétrique
A_c	Section du copeau
a_p	Profondeur de passe
A_s, B_s, C_s	Matrices du procédé dans la représentation d'état
A_u	Amplitude de la commande élaborée par le relais
A_y	Amplitude de la sortie oscillante
$A(\delta)$	Polynôme dénominateur du procédé
b	Coefficient de pondération du régulateur PID
B.O.Z	Bloqueur d'ordre zéro
$B(\delta)$	Polynôme numérateur du procédé
c	Constante des filtres pour l'identification
C.A.N.	Convertisseur Analogique Numérique
C.N.A.	Convertisseur Numérique Analogique
CNAC	Commande Numérique Adaptative avec Contraintes
CNAO	Commande Numérique Adaptative avec Optimisation
COM	Couple Outil-Matière
e	Erreur entre la consigne et la sortie
e_s	Erreur de saturation
f	Avance
F_c	Effort de coupe
F_{c0}	Effort de coupe initial
$F_{c \max}$	Effort de coupe maximal
F_f	Effort d'avance
F_p	Effort de pénétration
$H(\delta)$	Fonction de transfert du procédé
$k, \bar{\alpha}, \bar{\beta}$ et $\bar{\delta}$	Paramètres du modèle du processus de coupe
k_c	Paramètre du modèle du processus de coupe
k_{cr}	Gain critique
k_m	Paramètre du modèle du processus de coupe
k_p	Gain proportionnel du régulateur PID
K_s	Pression spécifique de coupe
k_s	Gain statique du servosystème
k_T	Gain total du processus
N	Fréquence de rotation de la broche
p	Variable de Laplace
P_c	Puissance de coupe
P_{c0}	Puissance de coupe initiale
$P_{c \max}$	Puissance de coupe maximale
P_e	Perturbation harmonique

PID	Régulateur Proportionnel Intégral Dérivatif
Po	Plan orthogonal à l'arête principale de coupe
q	Opérateur d'avance
q ⁻¹	Opérateur de retard
r	Signal de référence ou consigne
S _c	Sensibilité du capteur
T	Durée de vie de l'outil
t	Temps
T _{cr}	Période critique
T _e	Période d'échantillonnage
T _N	Temps d'intégration du régulateur PID
T _t	Temps de remise à zéro pendant la saturation
T _v	Temps de dérivation du régulateur PID
u	Signal de commande
U _s	Tension délivrée par le capteur
V _c	Vitesse de coupe
V _f	Vitesse d'avance
y	Sortie du procédé
y _{dy}	Signal de sortie du dynamomètre
α, β et γ	Angles de l'outil de coupe
δ	Opérateur de discrétisation par l'approche δ
ε	Erreur de prédiction
ζ	Coefficient d'amortissement du servosystème
ζ ₀	Coefficient d'amortissement du filtre anti-repliement
θ̂(t)	Vecteur des paramètres estimés
σ	Paramètre de réglage dans l'AAP
τ _G	Retard pur global du processus de tournage
τ _s	Retard pur du servosystème
φ(t)	Vecteur des mesures
Ω	Matrice de discrétisation par l'approche δ
ω ₀	Pulsation naturelle du filtre anti-repliement
ω _{cr}	Pulsation critique
ω _n	Pulsation naturelle du servosystème

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 : Opération de tournage	3
Figure 1.2 : Efforts de coupe en tournage	4
Figure 1.3 : Corps d'épreuve conçu	5
Figure 1.4 : Dimensions du corps d'épreuve conçu	6
Figure 1.5 : Forme simplifiée du corps d'épreuve	6
Figure 1.6 : Corps d'épreuve et chaîne de mesure	7
Figure 1.7 : Evolution de l'effort de coupe	9
Figure 1.8 : Evolution de la puissance de coupe	9
Figure 1.9 : Evolution de l'avance	10
Figure 1.10 : Pièce à différentes profondeurs	11
Figure 1.11 : Evolution de la puissance de coupe	11
Figure 1.12 : Modélisation du processus de tournage	12
Figure 1.13 : Relevé expérimental de l'effort de coupe	14
Figure 2.1 : Stratégie de commande adaptative par PID	17
Figure 2.2 : Boucle de régulation par PID	18
Figure 2.3 : Méthode du relais	19
Figure 2.4 : Structure anti-saturation de la commande	20
Figure 2.5 : Principe de l'estimation des paramètres d'un modèle échantillonné	23
Figure 2.6 : Filtrage en discret pour l'estimation	25
Figure 3.1 : Comparaison des efforts observés et prédits	28
Figure 3.2 : Intégration du bruit de mesure	31
Figure 3.3 : Comportement en boucle ouverte du procédé de tournage	31
Figure 3.4 : Réponse du système par la méthode du relais	32
Figure 3.5 : Régulation par PID à paramètres fixes	33
Figure 3.6 : Régulation par PID à paramètres fixes avec changement de a_p	34
Figure 3.7 : Commande adaptative du processus de tournage	35
Figure 3.8 : Résultats de la commande numérique adaptative	36
Figure 3.9 : Résultats de la commande adaptative avec changement de τ_G	37
Figure 3.10 : Résultats de la commande adaptative avec changement de τ_G et N	38

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 : Résultats d'essais dynamiques	7
Tableau 1.2 : Valeurs des efforts mesurés	8
Tableau 3.1 : Résultats de modélisation par RLM	27
Tableau 3.2 : Précision des coefficients estimés	28
Tableau 3.3 : Résidus studentisés non usuels	28
Tableau 3.4 : Résultats de modélisation par RLM sans l'effet de V_c	29
Tableau 3.5 : Valeurs des paramètres du modèle du processus de tournage	30
Tableau 3.6 : Valeurs des données pour la simulation	35

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Présentation et modélisation du processus de tournage	
1.1. DEFINITION D'UNE OPERATION DE TOURNAGE :	3
1.2. CHOIX DES CONDITIONS DE COUPE :	3
1.3. EFFORTS DE COUPE EN TOURNAGE :	4
1.4. APPORTS DE LA COMMANDE NUMERIQUE ADAPTATIVE :	8
1.5. MODELISATION DU PROCESSUS DE TOURNAGE :	12
1.5.1. Identification du servosystème :	13
1.5.2. Dynamique de l'avance :	13
1.5.3. Identification du processus de coupe :	13
1.5.4. Identification du gain du dynamomètre :	14
1.5.5. Choix du filtre anti-repliement :	14
Chapitre 2 : Commande numérique adaptative en tournage	
2.1. COMMANDE NUMERIQUE ADAPTATIVE EN USINAGE :	16
2.1.1. Commande numérique adaptative avec optimisation :	16
2.1.2. Commande numérique adaptative avec contraintes :	17
2.2. COMMANDE ADAPTATIVE PAR PID :	17
2.2.1. Méthode fréquentielle de Ziegler–Nichols :	19
2.2.2. Autoréglage des régulateurs PID par la méthode du relais :	19
2.3. IDENTIFICATION PARAMETRIQUE DU PROCESSUS :	21
Chapitre 3 : Résultats de simulation et interprétation	
3.1 IDENTIFICATION DES PARAMETRES DU PROCESSUS DE COUPE PAR REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE :	27
3.2. COMMANDE NUMERIQUE ADAPTATIVE PAR PID :	30
3.2.1. Détermination des paramètres de réglage du régulateur PID :	32
3.2.2. Résultats de la régulation par PID à paramètres fixes :	33
3.2.3. Résultats de la régulation par PID adaptatif :	34
3.2.4. Test de performances :	36
Conclusion générale	39

Introduction générale

Dans les pays développés, les industriels ont exprimé un besoin d'optimisation des processus de fabrication visant, d'une part, l'amélioration de la qualité des produits fabriqués et, d'autre part, la réduction des coûts de production. Cet objectif impose des systèmes de fabrication automatisés et en même temps flexibles. Les processus d'usinage tels que le tournage, le fraisage, le perçage et la rectification sont largement utilisés en fabrication. La tendance actuelle vers une automatisation de ces processus est manifestée par une augmentation de la productivité, l'amélioration de la qualité du produit fabriqué et la longévité des outils de coupe.

À ce jour, l'enlèvement de matière à l'outil coupant occupe toujours une place dominante parmi les procédés de mise en forme des matériaux métalliques. L'accroissement de performances des machines-outils, des outils de coupe et des logiciels de CAO/FAO a œuvré à garder ce procédé compétitif grâce aux gains de productivité et de qualité qu'il offre. L'usinage des métaux est une technique de mise en forme par enlèvement de matière qui est très répandue du point de vue pratique mais pas encore maîtrisée du point de vue modélisation et simulation, c'est l'empirisme qui est largement utilisé.

C'est ainsi que nous nous intéressons, dans cette étude, à une contribution à l'automatisation du processus de tournage en vue de son optimisation. Pour cela, nous avons étudié et testé en simulation le comportement du processus de tournage déjà identifié pour une machine cible [1]. Notre apport concerne, d'une part, la modélisation du processus de coupe basée sur des résultats expérimentaux que nous avons obtenus, et, d'autre part, l'étude du comportement de la boucle de régulation à effort de coupe constant utilisant un correcteur PID adaptatif qui devrait tenir en compte de la variation des conditions de coupe, du phénomène de saturation de la commande et du bruit de mesure. Ces développements vont sans doute améliorer les performances de la commande numérique adaptative de l'effort de coupe en tournage.

Le présent mémoire est organisé en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter la définition des grandeurs géométriques et cinématiques associées à une opération de tournage, et le choix des conditions de coupe. Puis, nous relaterons les efforts de coupe appliqués en tournage et la mesure de l'effort tangentiel par un capteur réalisé à base de jauges de déformations. Nous allons aussi évoquer les apports d'une commande numérique adaptative. Nous finirons le chapitre par une modélisation du processus de tournage.

Dans le second chapitre, nous allons évoquer les types de commande numérique adaptative en usinage. Puis, nous allons présenter une stratégie de commande adaptative par

PID. Nous clôturons le chapitre par une identification paramétrique appliquée au processus de tournage.

Dans le troisième chapitre, nous allons présenter tout d'abord les résultats d'identification des paramètres du processus de coupe par Régression Linéaire Multiple. Puis, nous allons relater les résultats de simulation relatifs à la commande par un régulateur PID.

Chapitre 1

Présentation et modélisation du processus de tournage

Dans le présent chapitre, nous allons présenter la définition des grandeurs géométriques et cinématiques associées à une opération de tournage, et le choix des conditions de coupe. Puis, nous relaterons les efforts de coupe appliqués en tournage et la mesure de l'effort tangentiel par un capteur réalisé à base de jauges de déformations. Nous allons aussi évoquer les apports d'une commande numérique adaptative. Nous finirons le chapitre par une modélisation du processus de tournage.

1.1. DEFINITION D'UNE OPERATION DE TOURNAGE :

Dans une opération de tournage, l'outil peut être animé de deux déplacements : un mouvement longitudinal appelé l'avance (f) et un mouvement transversal appelé profondeur de passe (a_p). La pièce est animée d'un mouvement de rotation auquel correspond une vitesse linéaire dite vitesse de coupe (V_c). Ces variables géométriques et cinématiques, qui conditionnent une opération de coupe, sont dites paramètres de coupe. Le vocable "condition de coupe" regroupe conventionnellement les paramètres de coupe, la géométrie de l'outil et la lubrification. Nous illustrons par le schéma de la figure qui suit une opération de tournage.

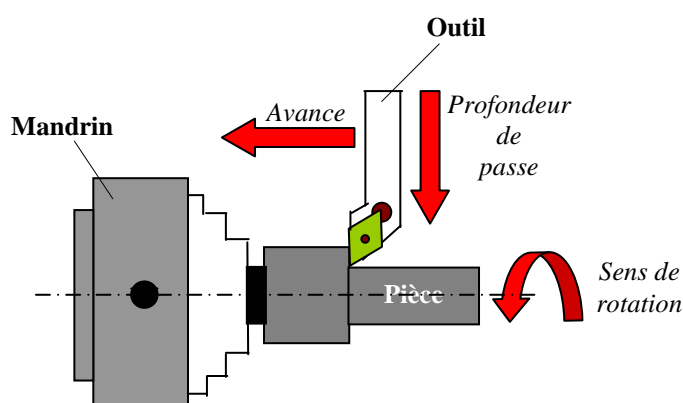


Figure 1.1 : Opération de tournage.

1.2. CHOIX DES CONDITIONS DE COUPE :

Actuellement, le choix des conditions de coupe est basé sur des expérimentations. Les campagnes d'essais menées pour assurer le bon choix des conditions de coupe sont souvent coûteuses. Ainsi, une modélisation théorique du processus d'usinage et sa commande sont nécessaires afin de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu par la coupe et d'assurer une conduite optimale de l'opération de tournage.

Le développement, l'utilisation des machines-outils à commande numérique et l'automatisation des cellules d'usinage ont beaucoup amélioré la productivité. Le développement d'une commande numérique pour une machine-outil était motivé par la

demande de précision dans la fabrication des pièces ayant une géométrie compliquée et aussi la diminution des temps de production.

Dans une opération de tournage, la machine-outil peut être commandée numériquement pour améliorer la productivité. Du point de vue de l'automaticien, le tour à commande numérique utilise des boucles internes de vitesse et de position pour chacun de ses axes moteurs. Par contre, il est considéré comme un système en boucle ouverte vis-à-vis des paramètres tels que les efforts, les températures et les vibrations. Ainsi, une prise en compte de ces derniers paramètres sera sans doute d'une importance pour améliorer les performances du processus d'usinage. C'est dans ce but que nous nous sommes intéressés, dans cette étude, au développement d'une stratégie de commande adaptative en tournage.

Rappelons que le choix des conditions de coupe tient compte de la puissance absorbée, de l'usure des outils de coupe, du temps de fabrication et du prix de revient des pièces fabriquées ainsi que du mode de travail (ébauche ou finition). En ébauche, nous recherchons un débit de copeaux maximal à un coût minimal, les principaux paramètres à considérer sont la durée de vie de l'arête de coupe (temps effectif de coupe avec la même arête) et l'effort de coupe (limites de puissance de la machine-outil). En finition, ce sont les qualités dimensionnelle et géométrique de la surface usinée qui sont recherchées ; le principal paramètre à prendre en compte étant la rugosité de la surface usinée.

1.3. EFFORTS DE COUPE EN TOURNAGE :

Lors d'une opération de tournage, l'action de la pièce sur un outil peut se décomposer, selon la forme de l'outil et l'opération à effectuer, en deux ou trois composantes.

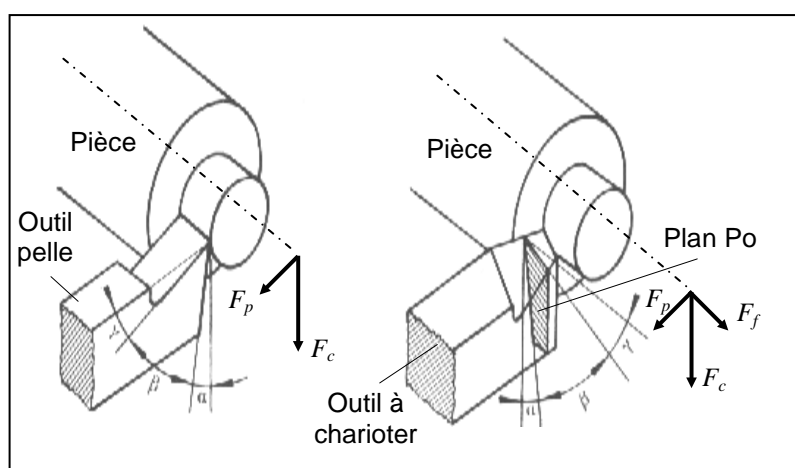


Figure 1.2 : Efforts de coupe en tournage.

Sur la figure ci-dessus sont représentés un outil pelle et un outil à chariotier. Pour l'outil pelle, deux composantes apparaissent :

- l'effort de coupe tangentiel F_c ,
- et l'effort de pénétration F_p .

En général, pour un outil à charioter, trois composantes apparaissent :

- F_c est l'effort tangentiel de coupe,
- F_f représente l'effort d'avance,
- et F_p est l'effort de pénétration.

Plusieurs essais d'usinage de matériaux métalliques avec des outils en carbure ont montré que l'effort de coupe F_c est beaucoup plus important que F_f et F_p . Il peut être exprimé par la relation :

$$F_c = K_s \cdot A_c \quad (1.1)$$

Où K_s est un coefficient appelé pression spécifique de coupe (en N/mm^2) et A_c la section du copeau (en mm^2). Notons que cette pression spécifique intègre d'une manière grossière les phénomènes liés à la coupe tels que les échauffements, l'usure, l'hétérogénéité de la pièce, les vibrations, etc.

Nous allons dans ce qui suit exploiter des résultats de mesure de l'effort de coupe réalisés suite à la conception d'un corps d'épreuve qui lui même est un porte-plaquette. Ce corps d'épreuve a été conçu en aluminium selon une géométrie inspirée et liée à des conditions d'exploitation réelles [2]. Il servira comme capteur d'effort de coupe tangentiel à base de jauges de déformations. La figure qui suit montre le corps d'épreuve conçu.

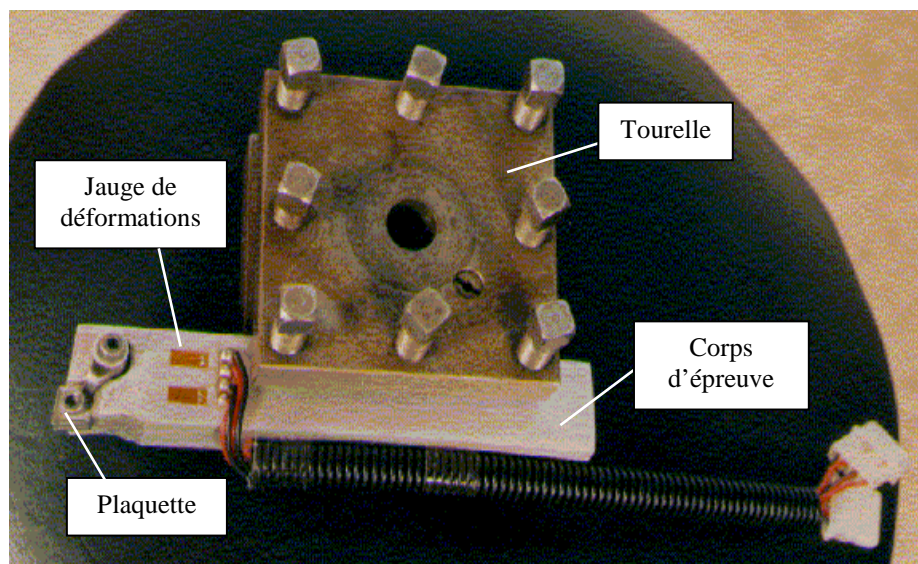


Figure 1.3 : Corps d'épreuve conçu [2].

Les dimensions du corps d'épreuve conçu sont reportées sur la figure ci-après.

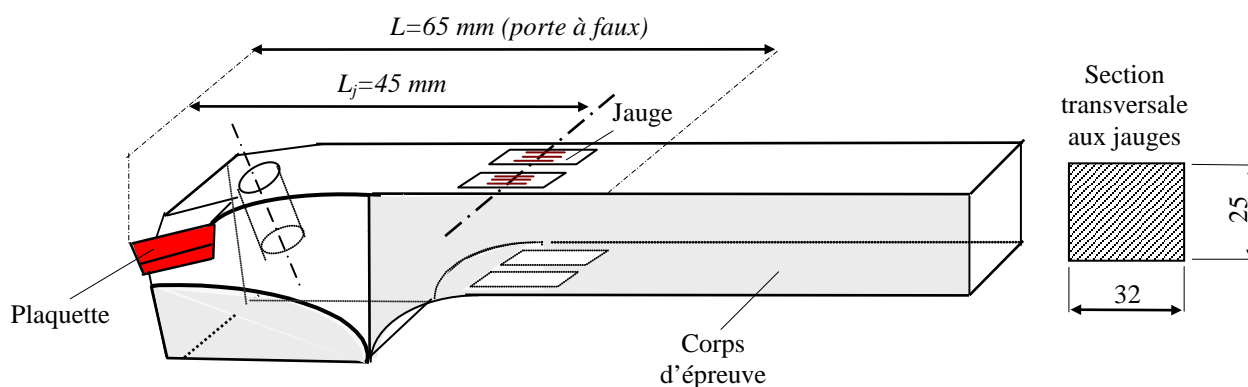


Figure 1.4 : Dimensions du corps d'épreuve conçu.

Les dimensions du corps d'épreuve sont obtenues à partir de la vérification des conditions de rigidité et de résistance et des conditions de travail souhaitées [2].

A priori pour l'étalonnage statique et pour des raisons simplificatrices, le corps d'épreuve a été assimilé à une barre prismatique dont l'extrémité libre supporte une charge. Cette situation est illustrée par la figure qui suit.

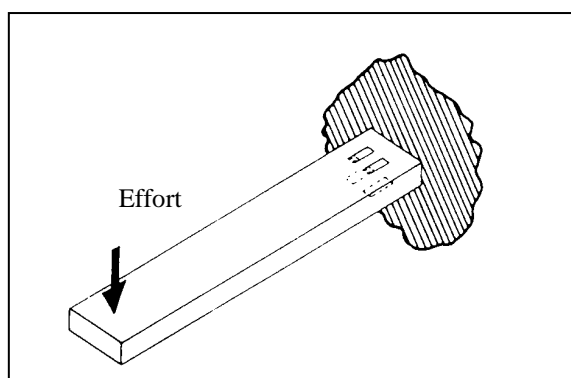


Figure 1.5 : Forme simplifiée du corps d'épreuve.

Les essais statiques ont permis d'obtenir une sensibilité du capteur $S_c = 0.013 \text{ V/kg}$. Ces essais ont été réalisés en accrochant différentes masses à l'extrémité libre du corps d'épreuve [2]. Quant aux essais dynamiques, ils étaient menés sur un tour industriel conventionnel ayant une puissance de 12 kW et une avance maximale de 0.32 mm/tr. La matière à usiner est un acier XC48 et l'opération considérée est un chariotage. Le corps d'épreuve a été conçu comme un outil à charioter portant une plaquette à carbure métallique amovible qui constitue l'élément essentiel de l'outil. La plaquette choisie est de type "CNMG" ayant pour longueur 12 mm.

Les essais ont pour objet de faire varier les paramètres de coupe pour obtenir différentes valeurs de l'effort de coupe. Ces valeurs sont déduites d'après la relation reliant l'effort de coupe à la tension mesurée et qui est délivrée par la sortie de la chaîne de mesure lors de

l'usinage. Rappelons que cette relation est établie des essais statiques. La figure qui suit montre le montage du corps d'épreuve ainsi que la chaîne de mesure.

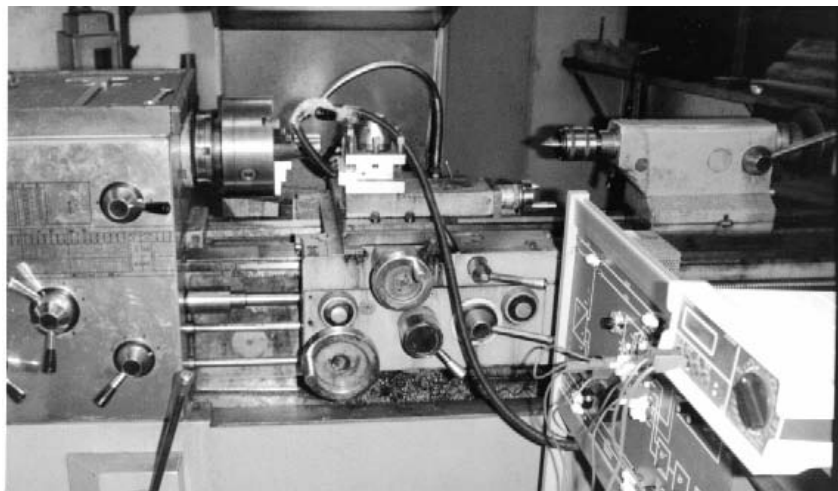


Figure 1.6 : Corps d'épreuve et chaîne de mesure [2].

Le tableau qui suit reporte certaines valeurs de tension mesurées pour différentes paramètres de coupe.

	f (mm/tr)	0.1	0.2	0.32
	a _p (mm)	U _s (V)		
V _c = 122.396 (m/min) D = 48.7 mm	1	0.59	0.86	1.25
	1.5	0.85	1.29	1.83
	2	1.05	1.6	2.31
V _c = 88.470 (m/min) D = 44.7 mm	1	0.56	0.83	1.22
	1.5	0.75	1.18	1.65
	2	1.03	1.6	2.3
V _c = 140.429 (m/min) D = 44.7 mm	1	0.5	0.79	1.1
	1.5	0.65	0.99	1.45
	2	1.1	1.73	2.4

Tableau 1.1 : Résultats d'essais dynamiques [2].

La relation qui détermine la valeur de l'effort de coupe F_c, exprimée en Newtons, à partir de la tension mesurée est donnée selon :

$$F_c = (U_s / S_c) \cdot 9.81 = 756.615 \cdot U_s \tag{1.2}$$

Aussi, les efforts doivent être majorés de 34 % pour la prise en compte des effets dynamiques [2] ; soit :

$$F_c (N) = 1011.184 \cdot U_s (V) \tag{1.3}$$

Le tableau qui suit reporte certaines valeurs de tension mesurées pour différentes paramètres de coupe.

	f (mm/tr)	0.1	0.2	0.32
	a_p (mm)	F_c (N)		
$V_c = 122.396$ (m/min) $D = 48.7$ mm	1	596.60	869.62	1263.98
	1.5	859.51	1304.43	1850.47
	2	1061.74	1617.90	2335.84
$V_c = 88.470$ (m/min) $D = 44.7$ mm	1	566.26	839.28	1233.65
	1.5	758.39	1193.20	1668.45
	2	1041.52	1617.90	2325.72
$V_c = 140.429$ (m/min) $D = 44.7$ mm	1	505.59	798.84	1112.30
	1.5	657.27	1001.07	1466.22
	2	1112.30	1749.35	2426.84

Tableau 1.2 : Valeurs des efforts mesurés.

Ces valeurs mesurées vont servir par la suite à l'élaboration du modèle relatif au processus de coupe tout en faisant appel à la modélisation par Régression Linéaire Multiple.

Notons que les efforts de coupe donnent une information significative de l'état du processus d'usinage. Ce sont les premières variables fiables utilisées en contre réaction (feedback) sur les machines-outils à commande numérique adaptative. À cet effet, nous citons quelques applications où la mesure de l'effort de coupe est utilisée. L'effort a été utilisé pour contrôler le niveau de vibrations de la machine-outil. La mesure en ligne de l'effort de coupe, du couple de la broche ou de la puissance de coupe est suffisante pour définir le degré d'exploitation de la machine-outil. Aussi, les efforts de coupe ont été utilisés pour améliorer la précision dimensionnelle de la pièce et pour contrôler l'usure de l'outil de coupe.

1.4. APPORTS DE LA COMMANDE NUMERIQUE ADAPTATIVE :

En se limitant au cas d'une ébauche où l'apport d'une commande numérique adaptative est plus remarquable ; à cet effet, l'opérateur choisit des paramètres de coupe garantissant le plus grand débit de copeaux possible. Il choisit des paramètres faisant travailler la machine à sa puissance maximale sur une certaine durée de vie de l'arête. Comme l'effort de coupe varie au cours de l'usinage par effet de l'usure de l'arête, l'opérateur prévoit l'augmentation de l'effort de coupe selon ses connaissances sur le matériau usiné, le matériau de coupe et la machine-outil. Nous montrons sur le schéma de la figure qui suit l'évolution de l'effort de coupe au cours de l'usinage.

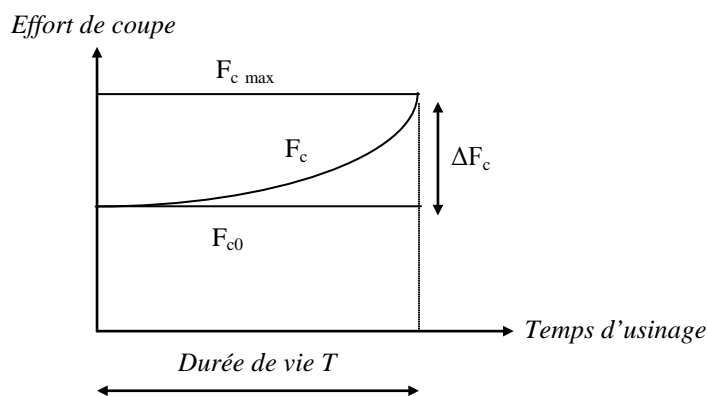


Figure 1.7 : Evolution de l'effort de coupe.

Où F_{c0} l'effort de coupe initial correspondant à l'effort calculé par l'opérateur pour des paramètres de coupe fixés et $F_{c \max}$ désigne l'effort de coupe maximal faisant travailler la machine-outil à sa puissance maximale et (T) étant la durée de vie de l'outil correspondant à un critère d'usure de l'outil qui définit la cessation de fonction de l'outil. Notons que pour une vitesse de coupe constante, la puissance de coupe est proportionnelle à l'effort de coupe. Nous illustrons cette évolution sur le schéma de la figure suivante.

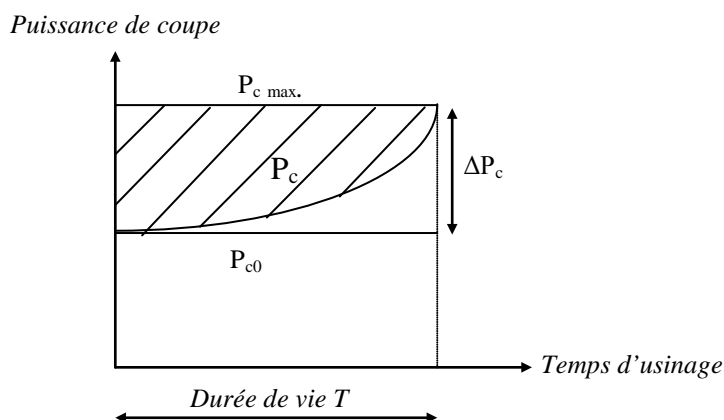


Figure 1.8 : Evolution de la puissance de coupe.

Avec P_c est la puissance de coupe, P_{c0} est la puissance de coupe initiale correspondante à la puissance calculée par l'opérateur pour des paramètres de coupe fixés, et $P_{c \max}$ désigne la puissance de coupe maximale.

Le domaine hachuré représente le travail perdu tout en considérant des paramètres de coupe fixes. Pour bien exploiter la machine-outil, il faudrait travailler à puissance maximale en faisant évoluer les paramètres de coupe au cours de l'usinage tout en mesurant l'importance de chaque paramètre sur la puissance de coupe.

Une machine-outil telle que le tour à commande numérique dispose de potentiomètres de réglage des vitesses de rotation de broche et d'avance permettant à l'opérateur une intervention au cours de l'usinage (en cas de vibration, échauffement, ...). La profondeur de passe n'est

généralement pas modifiée au cours de l'usinage et les paramètres qui peuvent varier, pour une profondeur de passe fixe, sont la vitesse de rotation de la broche et l'avance. La vitesse de coupe est choisie par l'opérateur de façon à garantir une durée de vie imposée pour des raisons économiques. L'effet de la vitesse de coupe est plus important sur la durée de vie de l'arête que sur l'effort de coupe (nous pouvons même négliger cet effet vis-à-vis de l'effort de coupe). Par contre, l'effet de l'avance est plus important sur l'effort de coupe que sur la durée de vie de l'arête. Par conséquent, nous considérons que seule l'avance sera modifiée au cours de l'usinage.

L'idée est de débiter avec une valeur de l'avance supérieure à celle fixée par l'opérateur qui permettra de travailler avec la puissance maximale de la machine, puis de diminuer progressivement cette avance en fonction de l'usure pour maintenir la puissance maximale. Nous montrons sur le schéma de la figure qui suit l'évolution de l'avance pour les cas d'une commande numérique simple et d'une commande numérique adaptative qui permettra ce changement de l'avance au cours de l'usinage.

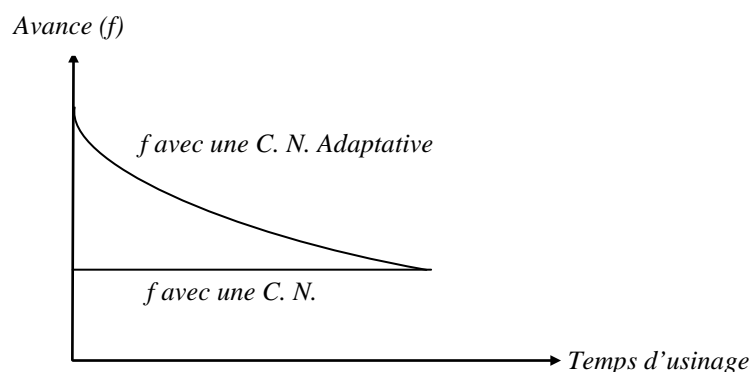


Figure 1.9 : Evolution de l'avance.

La loi d'évolution de l'avance au cours de l'usinage n'est plus régie par une fonction constante dans le temps (cas des paramètres de coupe fixes) mais par une fonction variable dans le temps. Pour agir efficacement sur l'avance, il faudra mesurer des paramètres décrivant l'évolution du processus de coupe, par exemple, l'effort de coupe (la puissance ou le couple).

Une solution envisagée est de travailler à effort de coupe constant pour une vitesse de coupe constante. La valeur de l'avance sera diminuée au cours de l'usinage pour compenser l'augmentation de l'effort de coupe due à l'usure ou à une variation de la profondeur de passe. L'apport d'une commande numérique adaptative sera justifié si la pièce à charioter présente différentes profondeurs de passe. Le cas d'une pièce à usiner à différentes profondeurs de passe est illustré sur le schéma de la figure qui suit.

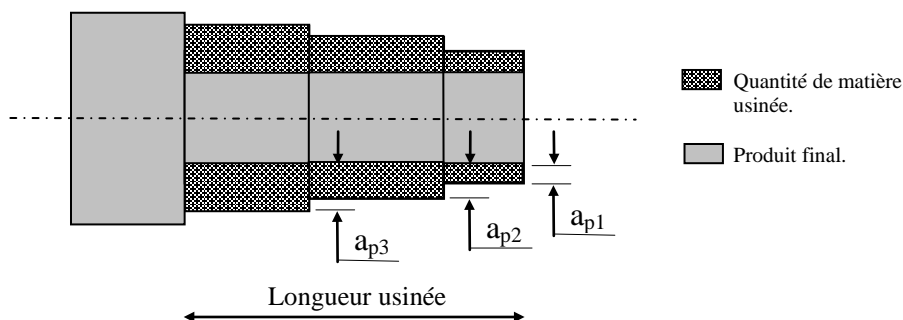


Figure 1.10 : Pièce à différentes profondeurs.

Pour ce cas, l'opérateur choisit les paramètres de coupe correspondant à la plus grande profondeur de passe, c'est à dire a_3 . L'évolution des puissances de coupe au cours de l'usinage pour une pièce ayant une profondeur de passe a_3 et une pièce à différentes profondeurs est illustrée par le schéma de la figure suivante.

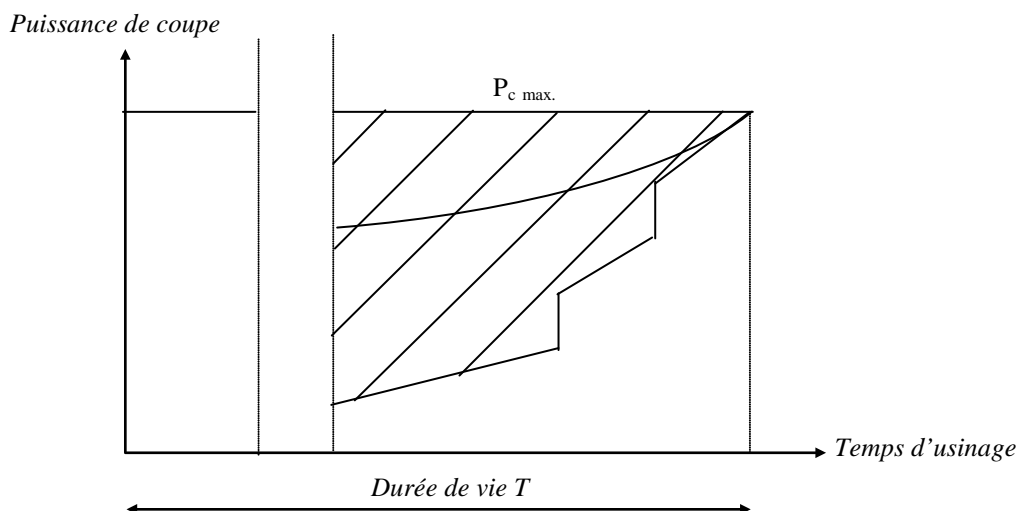


Figure 1.11 : Evolution de la puissance de coupe.

Le calcul fait par l'opérateur à la profondeur de passe a_3 est faux car la durée de vie correspondant à la plus grande profondeur de passe est plus petite. Or, la profondeur de passe varie et l'outil ne travaille pas uniquement à la plus grande profondeur de passe. Pour le choix des conditions de coupe, l'opérateur choisit ces dernières en considérant la plus grande profondeur de passe. Le travail perdu devient plus important avec l'augmentation de la profondeur de passe (voir l'aire hachurée de la figure 1.11).

Avec une commande numérique adaptative à effort de coupe constant, la productivité sera nettement augmentée en programmant la machine à sa puissance maximale. Même sur une machine-outil à commande numérique classique, l'opérateur peut programmer des avances variables mais ne peut garantir à 100 % un travail à puissance maximale.

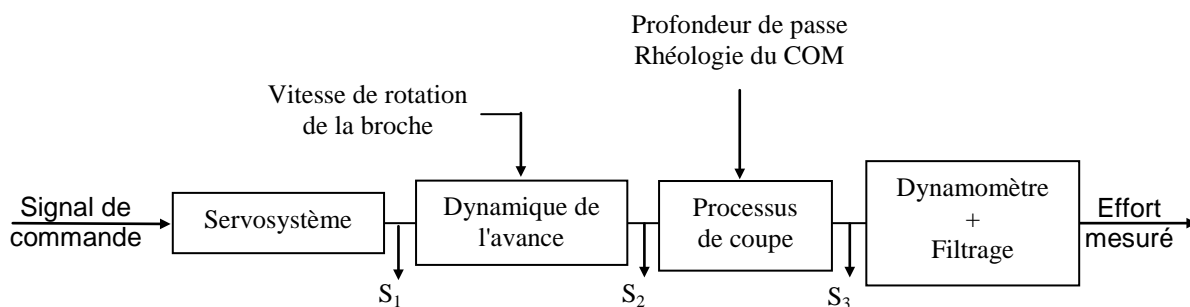
Tout en restant dans le cadre d'une commande adaptative à effort constant, la valeur de cet effort peut porter sur :

- l'effort maximal poussant la machine à sa puissance maximale,
- un effort inférieur à l'effort de coupe maximal pour limiter l'effort appliqué sur l'outil.

La mise en œuvre d'une commande numérique adaptative conduit à chercher un schéma de commande adaptative pour la conduite de l'opération d'usinage considérée basé sur un modèle dynamique de comportement du processus d'usinage liant les variables d'entrée (paramètres de coupe) et les variables de sortie (effort de coupe, température, vibrations, ...). Ce modèle sert aussi à l'identification des paramètres variables du processus d'usinage. Plusieurs stratégies de commande adaptative ont été développées [1] ; elles utilisent deux algorithmes principaux : l'un pour la commande du processus, l'autre pour l'identification des paramètres variables. Ces algorithmes utilisent, généralement, le modèle de comportement du processus à identifier et à commander.

1.5. MODELISATION DU PROCESSUS DE TOURNAGE :

La modélisation des éléments d'un système variant quelconque est fondamentale pour réaliser sa commande. Le schéma de la figure qui suit illustre les différents éléments constituant le processus de tournage [1].



- COM : couple outil-matière
- S_i : signaux de sortie
- S₁ : vitesse d'avance (V_f)
- S₂ : avance (f)
- S₃ : effort de coupe (F_c)

Figure 1.12 : Modélisation du processus de tournage.

Nous allons maintenant écrire directement la fonction de transfert de chacun des éléments constitutifs du modèle dynamique du processus de tournage. Pour plus de détails, le lecteur pourrait consulter la référence [1]. Notons que les essais d'identification des éléments du processus de tournage ont été menés sur un tour industriel du fabricant H. ERNAUT-SOMUA (450 NCS) doté d'une commande numérique NUM 460.

1.5.1. Identification du servosystème : En pratique, la vitesse mesurée est la vitesse de rotation du moteur d'avance ; cette dernière est liée à la vitesse d'avance qui correspond à la vitesse linéaire de déplacement du chariot porte-outil. Le mouvement de rotation de la vis d'entraînement du chariot, accouplée à l'arbre du moteur d'avance, est transformé en un mouvement linéaire par un système vis-écrou à billes. Après relevé de la réponse de la vitesse de rotation du moteur d'avance à un échelon de commande (u) et une prise en compte du système d'entraînement [1], la réponse de la vitesse d'avance (V_f) était modélisée par un système du second ordre avec retard pur écrit comme suit :

$$\frac{V_f}{u} = \frac{k_s \omega_n^2}{p^2 + 2\zeta \omega_n p + \omega_n^2} e^{-\tau_s p} \quad (1.4)$$

Où k_s est le gain statique, ζ le coefficient d'amortissement, ω_n la pulsation naturelle et τ_s le retard pur du servosystème.

1.5.2. Dynamique de l'avance : Les réponses simultanées de l'effort de coupe et de la vitesse de rotation du moteur d'avance montrent que l'effort de coupe est retardé par rapport à la vitesse de rotation du moteur d'avance. Cette dynamique correspond à celle de l'avance [1]. En pratique, l'avance (f) n'est pas accessible mais d'après les travaux de Tomizuka et Zhang [3], ce comportement peut être modélisé en utilisant l'approximation de Padé [4] par un système du premier ordre :

$$\frac{f}{V_f} = \frac{(60/N)}{\left(1 + \frac{60}{2N} p\right)} \quad (1.5)$$

Où N est la vitesse de rotation de la broche.

1.5.3. Identification du processus de coupe : Le modèle de prédiction de l'effort de coupe (F_c) en tournage peut être écrit selon :

$$F_c = k f^{\bar{\alpha}} a_p^{\bar{\beta}} V_c^{\bar{\delta}} \quad (1.6)$$

Où k , $\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$ et $\bar{\delta}$ sont les paramètres du modèle qui peuvent être influencés par l'usure de l'outil, la nature du matériau usiné, le matériau de coupe, la géométrie de l'outil et la rigidité de la machine. Ces paramètres seront déterminés à partir des mesures présentés dans la section 1.3 du présent chapitre.

Si la profondeur de passe et la vitesse de coupe sont fixées durant la passe d'usinage, nous pouvons exprimer F_c par :

$$F_c = k_c f^{\bar{\alpha}} \quad (1.7)$$

1.5.4. Identification du gain du dynamomètre : En pratique, le gain k_d correspond au gain fixé par l'amplificateur de charge. Ce dernier lié à un capteur piézo-électrique fournit une tension proportionnelle à l'effort de coupe appliqué ; soit :

$$y_{dy} = k_d F_c \quad (1.8)$$

1.5.5. Choix du filtre anti-repliement : La commande du processus doit être assurée par un ordinateur et il est donc nécessaire d'avoir une version discrète du régulateur. Afin d'éviter des problèmes de repliement du spectre et donc de distorsions, il faut que les signaux analogiques soit filtrés avant échantillonnage. Donc, l'effort de coupe mesuré sera filtré par un filtre anti-repliement du second ordre dont la fonction de transfert est donnée par :

$$\frac{y}{y_{dy}} = \frac{\omega_0^2}{p^2 + 2\zeta_0 \omega_0 p + \omega_0^2} \quad (1.9)$$

Le choix de ω_0 est fait de façon à satisfaire le théorème de Shannon, c'est à dire de façon à ce que la fréquence d'échantillonnage (f_e) soit au moins le double de la fréquence maximale (f_{max}) du signal continu.

Le relevé expérimental de l'effort de coupe en réponse à un échelon de vitesse d'avance permet deux constatations : l'existence d'un retard pur et celle d'une perturbation harmonique. Cette situation est illustrée sur le schéma de la figure qui suit.

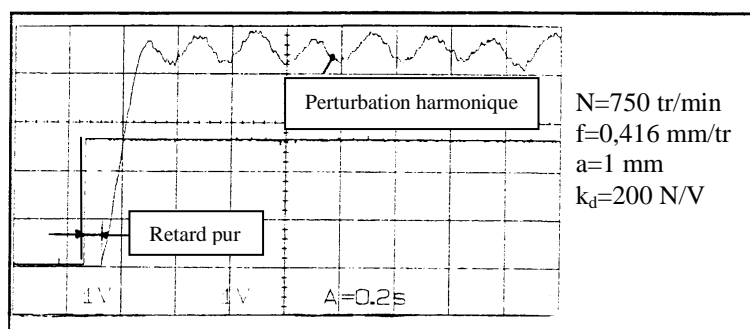


Figure 1.13 : Relevé expérimental de l'effort de coupe [1].

Pratiquement, différents cas d'usinage ont été considérés en faisant varier la vitesse de rotation de la broche, l'avance, la géométrie de la plaquette et la nature du copeau [1]. Un seul paramètre était changé à la fois pour analyser les origines du retard pur et de la perturbation harmonique. Les résultats indiquent que le retard pur est fonction de l'avance pour une vitesse de rotation de la broche constante et une profondeur de passe fixée. Ce retard est plus important pour de faibles avances et varie entre 0.06 et 0.12 s. Par contre, la perturbation harmonique est indépendante des différentes variations et reste constante en amplitude et en

fréquence. Son amplitude et sa fréquence sont respectivement de 100 N et de 5 Hz. Notons que ce retard pur global inclut le retard pur de la dynamique du servosystème τ_s .

Ainsi, le modèle linéaire (pour $\bar{\alpha} = 1$) du processus de tournage est donné par :

$$y = \frac{k_T}{\left(\frac{p^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} p + 1\right) \left(1 + \frac{60}{2N} p\right) \left(\frac{p^2}{\omega_0^2} + \frac{2\zeta_0}{\omega_0} p + 1\right)} e^{-\tau_G p} u + P_e \quad (1.10)$$

où (y) est la sortie filtrée, P_e la perturbation harmonique, τ_G le retard pur global et k_T le gain total du processus de tournage exprimé par : $k_T = k_s (60/N) k_c k_d$. ζ_0 et ω_0 sont respectivement le coefficient d'amortissement et la pulsation naturelle du filtre pour la mesure de l'effort de coupe.

De l'équation (1.10), nous remarquons que pour une vitesse de rotation de la broche fixée, les variations dans le processus de tournage proviennent principalement du gain. Pour la validation de la stratégie proposée, nous allons considérer que les variations du gain total du processus proviennent principalement de la profondeur de passe et ceci par chariotage d'une pièce à différentes profondeurs de passe.

Chapitre 2

Commande numérique adaptative en tournage

Dans ce chapitre, nous allons évoquer les types de commande numérique adaptative en usinage. Puis, nous allons présenter une stratégie de commande adaptative par PID. Nous clôturons le chapitre par une identification paramétrique appliquée au processus de tournage.

2.1. COMMANDE NUMERIQUE ADAPTATIVE EN USINAGE :

Actuellement, la commande du processus d'usinage comprend trois niveaux [5]. Le premier niveau est lié à la commande des axes moteurs de la machine-outil (asservissement de vitesse et de position) ; la commande de ces axes est assurée par la commande numérique classique de la machine-outil. Le second niveau correspond à la commande du processus de coupe (asservissement d'effort de coupe, température et vibrations) qui est assuré par la commande adaptative du processus d'usinage. Le troisième niveau prend en compte les paramètres qui ne peuvent être pris en charge par les deux niveaux précédents. Ce niveau consiste en la supervision par mesure des variables liées au produit fabriqué (tolérances dimensionnelles et géométriques, et rugosité de la surface usinée).

Dans cette étude, nous nous sommes axés sur le second niveau où nous considérons uniquement la régulation de l'effort de coupe qui dépend des paramètres de coupe : vitesses de coupe et d'avance et de la profondeur de passe, des propriétés rhéologiques du matériau à usiner et du matériau de coupe, de la géométrie de l'outil, de la rigidité de la machine-outil, de la lubrification et de l'usure de l'outil.

La commande adaptative du processus d'usinage est une extension de la commande numérique. Dans les machines-outils à commande numérique, on distingue deux types différents de commandes numériques adaptatives, les commandes numériques adaptatives avec optimisation (CNAO) et les commandes numériques adaptatives avec contraintes (CNAC).

2.1.1. Commande numérique adaptative avec optimisation :

Elle est conçue pour optimiser un critère de performance peut être une fonction économique combinant le débit d'enlèvement des copeaux, le taux d'usure de l'outil de coupe, et les coûts liés à la machine, à l'opérateur et aux outils de coupe. La formulation du critère de performance est donc relativement complexe et l'implantation de l'algorithme de réglage nécessite des équipements importants. La commande numérique adaptative avec optimisation engendre des problèmes résidant dans les difficultés de définir des indices de performance réalistes et dans le manque de capteurs permettant une mesure fiable des paramètres nécessaire à l'environnement de production.

2.1.2. Commande numérique adaptative avec contraintes :

Elle maximise un ou plusieurs paramètres d’usinage, par exemple, la vitesse d’avance dans la limites fixées. Cette commande est déjà utilisée sur certains types de machines (fraiseuse, tour, perceuse, ...). Une approche possible consiste à régler la machine avec une vitesse d’avance maximale en maintenant un effort de coupe constant quelles que soient les variations de section du copeau, ce qui permet d’accroître la vitesse d’usinage par rapport aux techniques classiques. L’objectif d’une CNAC est de travailler avec un débit maximal de copeaux pour des opérations d’ébauche.

Pour ce dernier type de commande numérique adaptative, plusieurs stratégies ont été développées, testées et améliorées [1]. Dans cette étude, nous nous intéressons plus particulièrement à améliorer une stratégie de commande numérique adaptative pour un processus de tournage par prise en compte du phénomène de saturation, par considération d’un modèle de poursuite et une intégration du bruit de mesure. Avant d’entamer ces développements, nous allons considérer a priori une commande adaptative par PID à travers la quelle nous dégagerons les limites pour ce type de régulateur et la proposition d’autres structures de commande.

2.2. COMMANDE ADAPTATIVE PAR PID :

La stratégie de commande adaptative par PID peut être représentée par le schéma de la figure 2.1. Cette stratégie est basée sur deux éléments principaux : l’algorithme de régulation PID et l’algorithme d’identification paramétrique.

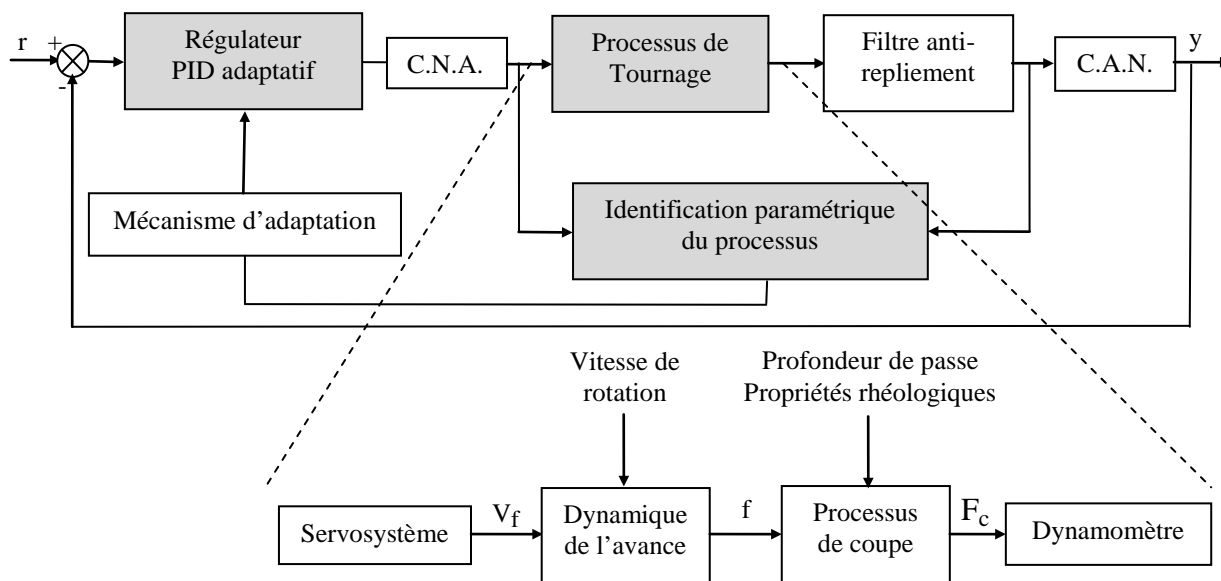


Figure 2.1 : Stratégie de commande adaptative par PID.

Parmi les régulateurs rencontrés dans l'industrie, le régulateur Proportionnel, Intégral et Dérivatif (PID) est le plus utilisé pour sa simplicité de réalisation et de réglage (algorithme simple) et sa robustesse. La loi de commande du régulateur PID est donnée par :

$$u(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_N} \int_0^t e(s) ds + T_V \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.1)$$

Cette équation est formée de trois actions : l'action proportionnelle (proportionnelle au signal d'erreur), l'action intégrale (proportionnelle à l'intégrale du signal d'erreur) et l'action dérivée (proportionnelle à la dérivée du signal d'erreur). Le signal d'erreur (e) est la différence entre le signal de référence (r) et la sortie mesurable (y). Les paramètres du régulateur sont le gain proportionnel (k_p), le temps d'intégration (T_N) et le temps de dérivation (T_V). Nous illustrons la boucle de régulation par PID sur le schéma de la figure suivante.

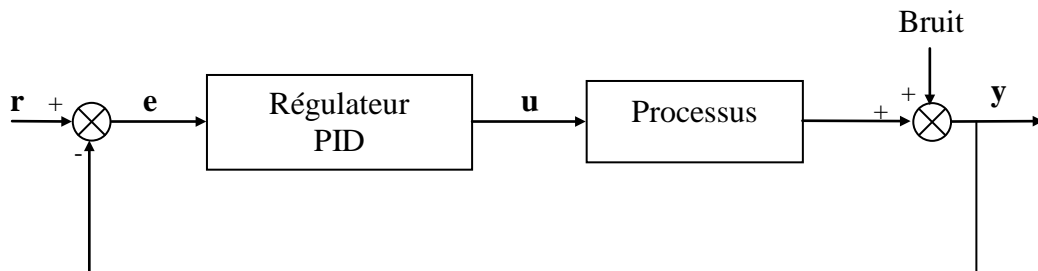


Figure 2.2 : Boucle de régulation par PID.

Le signal de référence (r) est normalement constant avec des changements brusques (type échelon). Le changement dans ce signal provoque des transitoires non souhaitables dans le terme dérivatif. Par conséquent, il est préférable de ne dériver que le signal de sortie du processus. Une autre modification peut être apportée au terme dérivatif pour éviter les problèmes liés au bruit de haute fréquence dans la mesure. Cette modification consiste au filtrage du signal de sortie par un élément du premier ordre. Aussi, la consigne est pondérée par un coefficient (b) pour améliorer la réponse transitoire du système bouclé.

L'équation de la régulation devient alors :

$$u(t) = k_p \left[(br - y) + \frac{1}{T_N} \int_0^t e(s) ds - T_V \frac{dy_d(t)}{dt} \right] \quad (2.2)$$

Avec : $y_d(p) = \frac{1}{1 + \frac{T_V}{N_V} p} y(p)$.

L'automaticien cherche toujours pour commander un processus par un régulateur PID les méthodes de réglage et de savoir quelles sont les valeurs des paramètres k_p , T_N et T_V qui donneront les meilleures performances en régulation du système bouclé. Nous commençons par évoquer dans ce qui suit les méthodes de réglage empiriques.

2.2.1. Méthode fréquentielle de Ziegler–Nichols :

Cette méthode permet d'obtenir deux paramètres dits : le gain critique (k_{cr}) et la période critique (T_{cr}). Le principe de la méthode consiste à utiliser un régulateur uniquement proportionnel dans la boucle de régulation et à faire varier k_p jusqu'à ce que la sortie du système commence à osciller avec une oscillation entretenue [6].

Le gain qui a conduit à l'oscillation et la période de l'oscillation obtenus servent à déterminer les paramètres du régulateur PID comme suit :

$$k_p = 0.6k_{cr} \quad T_N = 0.5T_{cr} \quad T_V = 0.125T_{cr} \quad (2.3)$$

L'inconvénient de cette méthode d'obtention du point critique est qu'elle n'est pas toujours facile à mettre en œuvre car l'amplitude de l'oscillation peut être importante et peut avoir, en pratique, des effets indésirables (saturation de la commande et endommagement ou fatigue des composants du système). En 1984, Aström et Hägglund [7] ont proposé une nouvelle méthode pratique permettant d'obtenir une bonne approximation du gain k_{cr} et de la période T_{cr} . Cette méthode est dite d'autoréglage des régulateurs PID.

2.2.2. Autoréglage des régulateurs PID par la méthode du relais :

Un régulateur "Tout ou Rien", permettant d'élaborer une action de commande discontinue et prenant deux positions ou deux états 0 et 1 (ou 0 et 100 %), est incorporé dans la boucle de régulation. Nous illustrons par le schéma de la figure qui suit le principe de fonctionnement de la méthode.

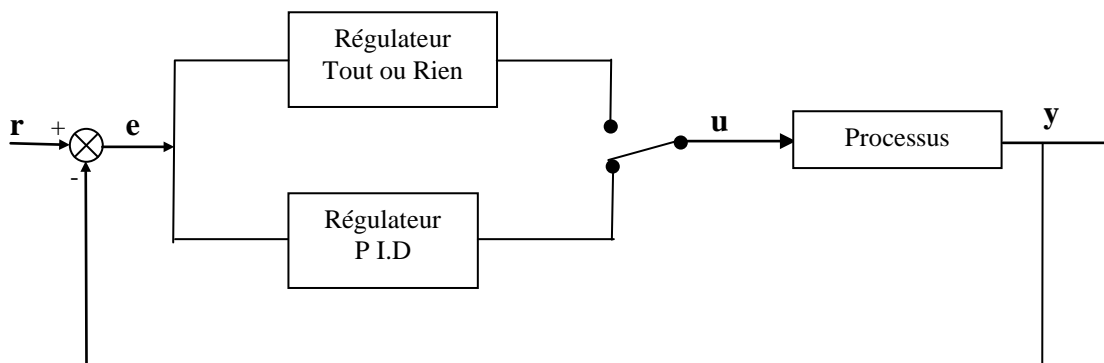


Figure 2.3 : Méthode du relais.

En pratique, il est toujours conseillé d'utiliser un relais avec hystérésis car, dans le cas contraire, le système bouclé deviendrait très sensible au bruit et donnerait des résultats incorrects.

Le gain critique est obtenu par calcul selon [1] :

$$k_{cr} = \frac{\pi A_y}{4 A_u} \tag{2.4}$$

La période critique est relevée du tracé de la sortie oscillante du processus. La détermination des paramètres du correcteur PID se fait de la même manière que dans la méthode fréquentielle de Ziegler–Nichols (voir équation (2.3)).

Un autre phénomène dont il faut tenir compte est la saturation de la commande. Pratiquement, tous les actionneurs ont des limitations. Quand le régulateur travaille dans un large champ de conditions opératoires, il arrive parfois que la commande atteigne la limitation de débattement de l'actionneur. Ce dernier reste positionné sur cette limite indépendamment de la sortie du processus et l'action intégrale ne cesse d'intégrer le signal d'erreur. Ainsi, le terme de l'action intégrale devient de plus en plus important. À cet effet, Aström et Hagglund [7] ont présenté une structure anti-saturation illustrée sur le schéma de la figure suivante.

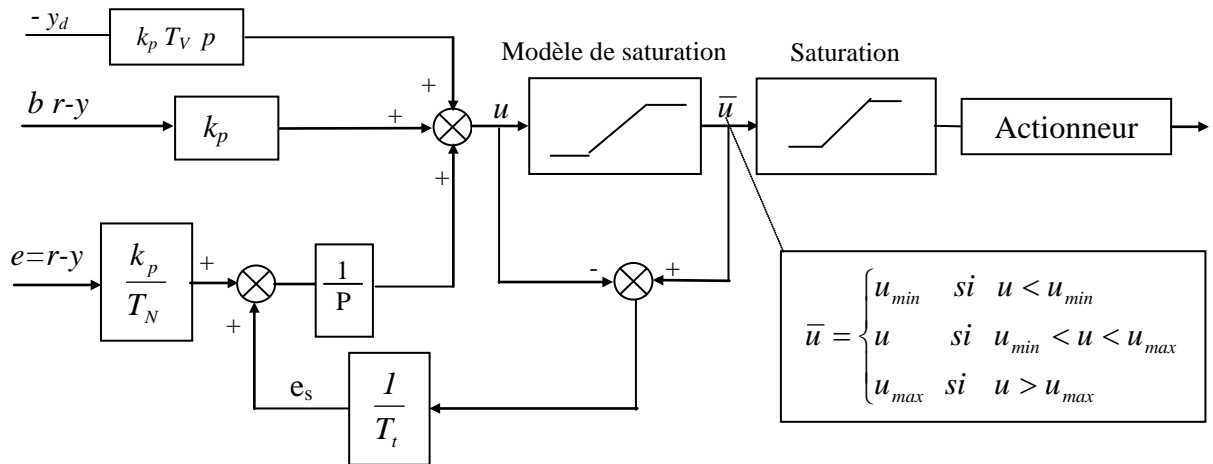


Figure 2.4 : Structure anti-saturation de la commande.

Un modèle mathématique de saturation de l'actionneur est utilisé pour la mise en œuvre de la commande. La constante de temps (T_i) permet de régler la vitesse de remise à zéro de l'action intégrale pendant la saturation. Alors, l'algorithme du correcteur PID avec anti-saturation devient :

$$u(t) = k_p \left[(br - y) + \frac{1}{T_N} \int_0^t e(s) ds + \int_0^t e_s(s) ds - T_v \frac{dy_d(t)}{dt} \right] \tag{2.5}$$

Soit :

$$u(p) = k_p \left[(br(p) - y(p)) + \left(\frac{e_s(p)}{k_p} + \frac{e(p)}{T_N} \right) \frac{1}{p} - \frac{T_V p}{1 + \frac{T_V}{N_V} p} y(p) \right] \quad (2.6)$$

Notons que les paramètres du régulateur PID peuvent aussi être calculés par un placement de pôles de la boucle fermée mais ceci oblige la connaissance du modèle dynamique du processus ; un détail de ces calculs est reporté dans la référence [8].

L'algorithme PID exprimé par l'équation (2.6) peut être formulé en mode discret ; à cet effet, il existe deux approches de discrétisation qui sont l'approche Z et l'approche δ .

Pour l'approche Z, nous trouvons différentes approximations d'Euler, de Tustin, etc. Comme l'approximation de Tustin présente de meilleures performances du fait qu'elle conserve les propriétés de stabilité indépendamment de la période d'échantillonnage, nous pouvons exprimer l'algorithme du correcteur PID tout en remplaçant la variable de Laplace (p) par l'équation de Tustin donnée par :

$$p \approx a_T \frac{1 - q^{-1}}{1 + q^{-1}} \quad (2.7)$$

$$\text{Avec : } a_T = \frac{\omega_{cr}}{\tan \frac{\omega_{cr} T_e}{2}}$$

L'algorithme du régulateur PID en mode discret est donné par les équations qui suivent :

$$u(t) = k_p (u_1(t) + u_2(t) + u_3(t)) \quad (2.8)$$

$$u_1(t) = br(t) - y(t) \quad (2.9)$$

$$u_2(t) = u_2(t-1) + \frac{1}{a_T} \left(\frac{e_s(t)}{k_p} + \frac{e(t)}{T_N} \right) + \frac{1}{a_T} \left(\frac{e_s(t-1)}{k_p} + \frac{e(t-1)}{T_N} \right) \quad (2.10)$$

$$u_3(t) = \frac{1}{1 + \frac{T_V}{N_V} a_T} \left[\left(\frac{T_V}{N_V} a_T - 1 \right) u_3(t-1) - T_V a_T (y(t) - y(t-1)) \right] \quad (2.11)$$

2.3. IDENTIFICATION PARAMETRIQUE DU PROCESSUS :

Pour le processus de tournage, il s'agit principalement d'une estimation du gain total [1]. Ce gain est identifié par un algorithme d'adaptation paramétrique (AAP) qui détermine sa valeur à chaque pas d'échantillonnage. Cet algorithme a une structure récursive,

c'est à dire que la nouvelle valeur des paramètres est égale à la valeur précédente augmentée d'un terme de correction qui dépendra des dernières mesures ; soit :

$$\begin{bmatrix} \text{Nouvelle estimation} \\ \text{des paramètres} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Estimation précédente} \\ \text{des paramètres} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Gain} \\ \text{d'adaptation} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \text{Fonction} \\ \text{de mesure} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \text{Fonction} \\ \text{de l'erreur} \end{bmatrix}$$

Nous considérons une identification qui utilise une approche (δ). L'opérateur (δ) est lié à l'opérateur d'avance (q) par :

$$\delta = \frac{q-1}{T_e} \quad (2.12)$$

Notons que l'approche (δ) présente a priori certains avantages par rapport à la transformée en Z [4]. Ces avantages se résument ainsi :

- L'approche (δ) assure une meilleure connexion entre les modèles en discret et les modèles en continu que celle donnée par la transformée en Z et, plus particulièrement, pour une petite période d'échantillonnage.

- L'approche (δ) présente sur la transformée en Z certains avantages numériques. Par exemple, pour des petites périodes d'échantillonnage, les calculs numériques en utilisant l'approche (δ) nécessite une précision plus faible que ceux pour l'approche Z.

- Les valeurs des coefficients du modèle en (δ) convergent vers ceux du modèle continu si la période d'échantillonnage décroît.

C'est donc à la base de ces avantages et des résultats obtenus et reportés dans la référence [9] que nous allons utiliser cette approche pour l'identification paramétrique du processus de tournage.

Du modèle d'état en continu, nous pouvons calculer le modèle d'état en mode discret (en (δ)) en utilisant un bloqueur d'ordre zéro à l'entrée du système comme suit :

Système en continu	Système discrétisé par l'approche δ	
$\begin{cases} \dot{x} = A_s x + B_s u \\ y = C_s x \end{cases}$	$\begin{cases} \delta x = \Omega A_s x + \Omega B_s u \\ y = C_s x \\ \Omega = (1/T_e) A_s^{-1} (e^{T_e A_s} - I) \end{cases}$	(2.13)

La fonction de transfert en boucle ouverte d'un système peut être exprimée en (δ) selon :

$$H(\delta) = \frac{B(\delta)}{A(\delta)} = \frac{b_{n_b} \delta^{n_b} + \dots + b_0}{\delta^{n_a} + \dots + a_1 \delta + a_0} \quad (2.14)$$

Avant d'écrire les équations relatives à l'identification du processus de tournage étudié, rappelons le principe de l'estimation des paramètres des modèles échantillonnés. Ce principe peut être sommairement illustré dans la figure qui suit.

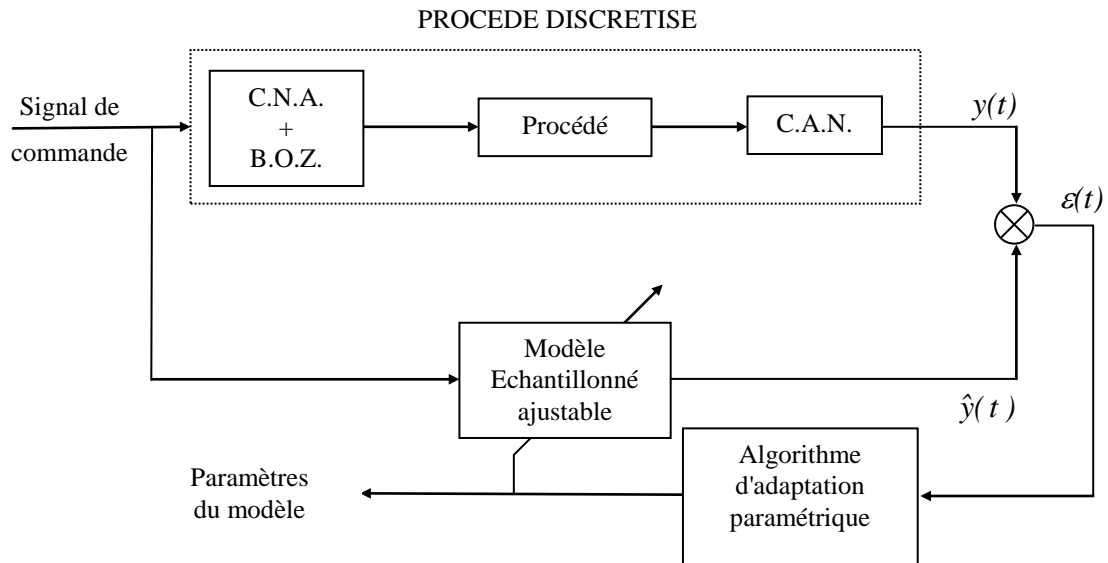


Figure 2.5 : Principe de l'estimation des paramètres d'un modèle échantillonné.

Un modèle échantillonné à paramètres ajustables est implanté sur le calculateur. L'erreur, entre la sortie du procédé à l'instant (t) et la sortie prédite par le modèle approché (erreur de prédiction $\varepsilon(t)$), est utilisée par un algorithme d'adaptation paramétrique (AAP) qui à chaque instant d'échantillonnage modifie les paramètres du modèle afin de minimiser cette erreur. Une fois le modèle obtenu, une validation objective peut être faite par des tests statistiques sur l'erreur de prédiction $\varepsilon(t)$ et la sortie prédite. Ce test permet pour un procédé donné de choisir le meilleur modèle, respectivement la meilleure structure et le meilleur algorithme pour l'estimation des paramètres.

Pour le processus de tournage, nous considérons que les variations proviennent principalement de la profondeur de passe. Donc, pour une vitesse de rotation de la broche constante, le seul paramètre variable est le gain du processus.

Rappelons que le modèle linéaire (pour $\bar{\alpha} = 1$) du processus de tournage (voir équation (1.10) du chapitre 1) est donné par :

$$y(p) = \frac{k_T}{\left(\frac{p^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} p + 1 \right) \left(1 + \frac{60}{2N} p \right) \left(\frac{p^2}{\omega_0^2} + \frac{2\zeta_0}{\omega_0} p + 1 \right)} e^{-\tau_{GP} p} u + P_e \quad (2.15)$$

Les équations en vue d'une identification paramétrique sont données dans ce qui suit. La fonction de transfert liant la sortie du système à sa commande est donnée ainsi :

$$y(t) = k_T \frac{B(\delta)}{A(\delta)} u(t) + P_e(t) \quad (2.16)$$

Afin d'éliminer le terme correspondant à la perturbation, nous multiplions les deux membres de cette équation par le polynôme $D(\delta)$ exprimé par :

$$D(\delta) = \delta^2 + D_1 \delta + D_0 \quad (2.17)$$

$$\text{Avec : } D_1 = \frac{2(1 - \cos \omega_p T_e)}{T_e} \quad D_0 = \frac{2(1 - \cos \omega_p T_e)}{T_e^2} \quad (2.18)$$

Donc, on obtient :

$$D(\delta)A(\delta)y(t) = y_s(t) = k_T D(\delta)B(\delta)u(t) = k_T u_s(t) \quad (2.19)$$

Donc, cette dernière équation sera maintenue pour l'identification du gain total du processus ; soit :

$$y_s(t) = \hat{\theta}(t) \phi(t) \quad (2.20)$$

$$\text{Avec : } \hat{\theta}(t) = k_T \quad \text{et} \quad \phi(t) = u_s(t) \quad (2.21)$$

L'algorithme d'identification paramétrique retenu est exprimé par [4] :

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + \frac{T_e \sigma \phi(t) (y_s(t) - \hat{\theta}(t) \phi(t))}{1 + \phi^T(t) T_e \sigma \phi(t)} \quad (2.22)$$

Alors, il suffit d'exprimer les valeurs de $y_s(t)$ et $\phi(t)$ pour solutionner le problème.

Dans l'équation (2.15), nous approchons le retard pur par une fonction rationnelle tout en négligeant la dynamique du filtre anti-repliement. L'approximation utilisée est celle de Padé [4] ; nous avons considéré une approximation du second ordre. La fonction de transfert du processus est exprimée par :

$$H(p) = \frac{k_T \left(\frac{\tau_G^2}{12} p^2 - \frac{\tau_G}{2} p + 1 \right)}{\left(\frac{p^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} p + 1 \right) \left(1 + \frac{60}{2N} p \right) \left(\frac{\tau_G^2}{12} p^2 + \frac{\tau_G}{2} p + 1 \right)} \quad (2.23)$$

Le modèle échantillonné avec bloqueur d'ordre zéro est exprimé en (δ) par :

$$y(t) = k_T \frac{b_4 \delta^4 + b_3 \delta^3 + b_2 \delta^2 + b_1 \delta + b_0}{\delta^5 + a_4 \delta^4 + a_3 \delta^3 + a_2 \delta^2 + a_1 \delta + a_0} u(t) + P_e(t) \quad (2.24)$$

Donc, les quantités $y_s(t)$ et $\phi(t)$ peuvent être exprimées par :

$$y_s(t) = (\delta^2 + D_1 \delta + D_0) (\delta^5 + a_4 \delta^4 + \dots + a_1 \delta + a_0) y(t) \quad (2.25)$$

$$u_s(t) = (\delta^2 + D_1 \delta + D_0) (b_4 \delta^4 + b_3 \delta^3 + b_2 \delta^2 + b_1 \delta + b_0) u(t) \quad (2.26)$$

Pour ce cas, nous devons produire les dérivées δ^7, \dots, δ ; ceci est possible en utilisant une cascade de filtres passe-bas ayant chacun la fonction de transfert exprimée par :

$$F(\delta) = \frac{1}{c + \delta} \tag{2.27}$$

Le schéma de la figure qui suit illustre le filtrage en mode discret pour l'estimation.

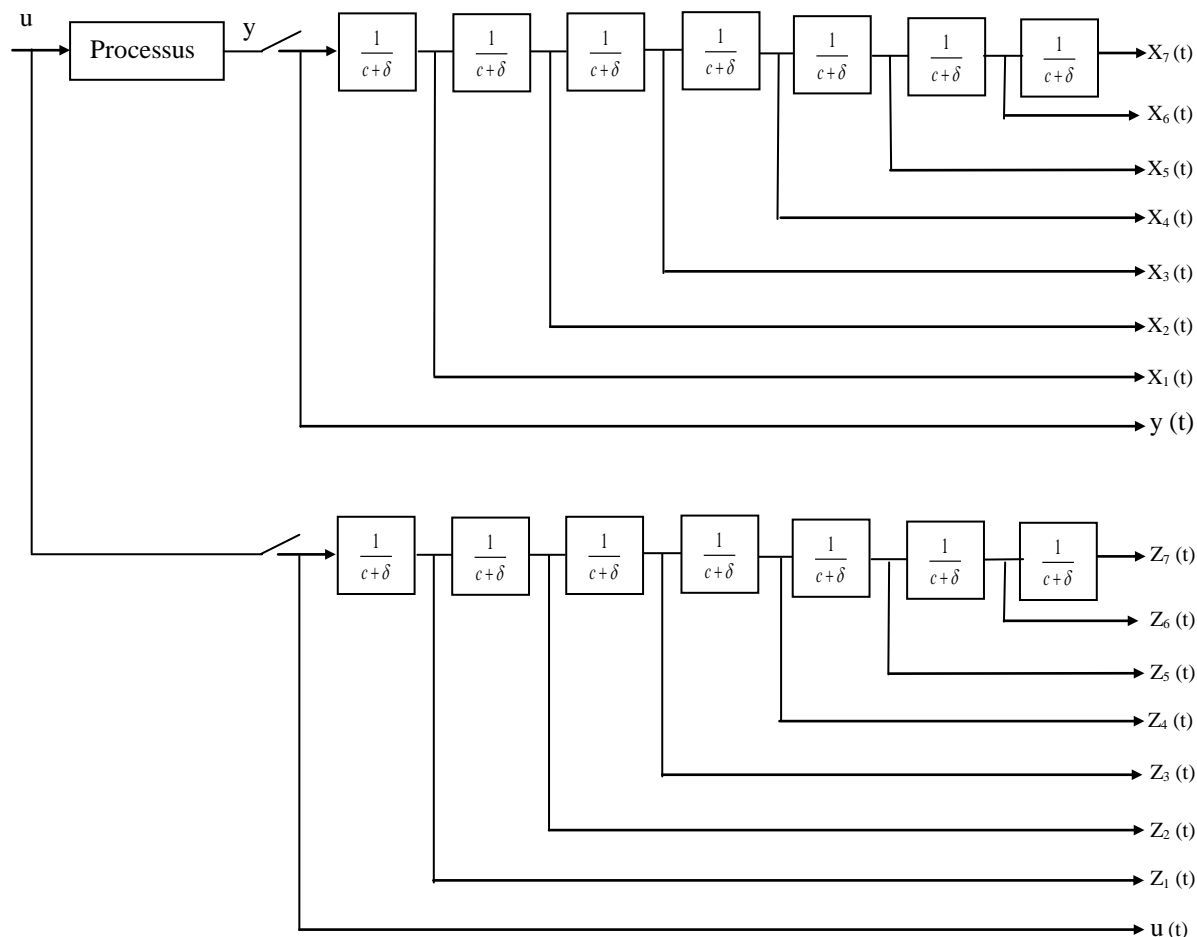


Figure 2.6 : Filtrage en discret pour l'estimation.

À partir de la fonction de transfert du filtre $F(\delta)$ pour l'estimation, nous pouvons aisément vérifier que la représentation en variables d'état du filtre de septième ordre peut s'obtenir comme suit pour la commande et la sortie filtrées :

- pour la commande :

$$\delta \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \\ Z_5 \\ Z_6 \\ Z_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \\ Z_5 \\ Z_6 \\ Z_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (2.28)$$

- pour la sortie :

$$\delta \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} y \quad (2.29)$$

Les dérivées, pour la commande et la sortie, sont obtenues à partir des états du filtre selon :

$$\begin{bmatrix} u_f \\ \delta u_f \\ \delta^2 u_f \\ \delta^3 u_f \\ \delta^4 u_f \\ \delta^5 u_f \\ \delta^6 u_f \\ \delta^7 u_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2c & c^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -3c & 3c^2 & -c^3 \\ 0 & 0 & 1 & -4c & 6c^2 & -4c^3 & c^4 \\ 0 & 1 & -5c & 10c^2 & -10c^3 & 5c^4 & -c^5 \\ 1 & -6c & 15c^2 & -20c^3 & 15c^4 & -6c^5 & c^6 \\ -7c & 21c^2 & -35c^3 & 35c^4 & -21c^5 & 7c^6 & -c^7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \\ Z_5 \\ Z_6 \\ Z_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (2.30)$$

$$\begin{bmatrix} y_f \\ \delta y_f \\ \delta^2 y_f \\ \delta^3 y_f \\ \delta^4 y_f \\ \delta^5 y_f \\ \delta^6 y_f \\ \delta^7 y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2c & c^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -3c & 3c^2 & -c^3 \\ 0 & 0 & 1 & -4c & 6c^2 & -4c^3 & c^4 \\ 0 & 1 & -5c & 10c^2 & -10c^3 & 5c^4 & -c^5 \\ 1 & -6c & 15c^2 & -20c^3 & 15c^4 & -6c^5 & c^6 \\ -7c & 21c^2 & -35c^3 & 35c^4 & -21c^5 & 7c^6 & -c^7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} y \quad (2.31)$$

Avec ces représentations, les équations (2.25) et (2.26) deviennent :

$$y_s(t) = (\delta^2 + D_1 \delta + D_0)(\delta^5 + a_4 \delta^4 + \dots + a_1 \delta + a_0) y_f(t) \quad (2.32)$$

$$u_s(t) = (\delta^2 + D_1 \delta + D_0)(b_4 \delta^4 + b_3 \delta^3 + b_2 \delta^2 + b_1 \delta + b_0) u_f(t) \quad (2.33)$$

Chapitre 3

Résultats de simulation et interprétation

Dans ce chapitre, nous allons présenter tout d'abord les résultats d'identification des paramètres du processus de coupe par Régression Linéaire Multiple. Puis, nous allons relater les résultats de simulation relatifs à la commande par un régulateur PID.

3.1 IDENTIFICATION DES PARAMETRES DU PROCESSUS DE COUPE PAR REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE :

Rappelons que le modèle du processus de coupe (voir équation 1.6 du chapitre 1) a été exprimé par l'équation :

$$F_c = k f^{\bar{\alpha}} a_p^{\bar{\beta}} V_c^{\bar{\delta}} \quad (3.1)$$

Cette équation est mise sous forme linéaire pour pouvoir utiliser la modélisation statistique par Régression Linéaire Multiple comme suit :

$$\ln F_c = \ln k + \bar{\alpha} \ln f + \bar{\beta} \ln a_p + \bar{\delta} \ln V_c \quad (3.2)$$

La variable à expliquer par le modèle est l'effort $\ln(F_c)$, et les variables explicatives sont : $\ln(f)$, $\ln(a_p)$ et $\ln(V_c)$.

Après introduction des résultats, reportés sur le tableau 1.2 du chapitre 1, dans le logiciel Statgraphics, nous obtenons ce qui suit :

Paramètre	Estimation	Ecart-type	t –Student	Probabilité	
Constante a_0	8.17931	0.414169	21.1532	0.0000	
a_1 pour $\ln(f)$	0.6688	0.0349558	19.1327	0.0000	
a_2 pour $\ln(a_p)$	0.959675	0.0587351	16.339	0.0000	
a_3 pour $\ln(V_c)$	-0.0761673	0.0862108	-0.8835	0.3861	
Analyse de variance					
Source	Somme des carrés	Ddl	Carré moyen	F_{calc}	Probabilité
Modèle	4.77282	3	1.59094	211.27	0.0000
Résidu	0.1732	23	0.00753041		
Total (Corr.)	4.94602	26			
Analyse complémentaire de la variance					
$\ln(f)$	2.75659	1	2.75659	366.06	0.0000
$\ln(a_p)$	2.01035	1	2.01035	266.96	0.0000
$\ln(V_c)$	0.00587803	1	0.00587803	0.78	0.3861
R-carré = 96.4982 %					
R-carré (ajusté pour les ddl) = 96.0414 %					
Estimation de l'écart-type du résidu = 0.086778					
Erreur absolue moyenne = 0.065044					
Test de Durbin-Watson = 0.720637 (P = 0.0000)					
Auto-corrélation résiduelle d'ordre 1 = 0.576833					

Tableau 3.1 : Résultats de modélisation par RLM.

Le modèle déterminé par la Régression Linéaire Multiple est exprimé par l'équation qui suit :

$$F_c = 3566.393 \cdot f^{0.669} \cdot a_p^{0.959} \cdot V_c^{-0.076} \quad (3.3)$$

La statistique du R-carré indique que le modèle explique 96.49 % de la variabilité de $(\ln F_c)$. L'erreur absolue moyenne de 0.065044 est la valeur moyenne des résidus ; plus, cette dernière est faible, le modèle est très satisfaisant. Comme la valeur de la probabilité pour la vitesse de coupe est supérieure à 0.05 ; ce terme n'est pas statistiquement significatif au niveau de confiance de 95 %. Ainsi, on va supprimer ou négliger la variable explicative vitesse de coupe du modèle.

La figure qui suit montre les efforts $\ln(F_c)$ observés en fonction des efforts $\ln(F_c)$ prédits.

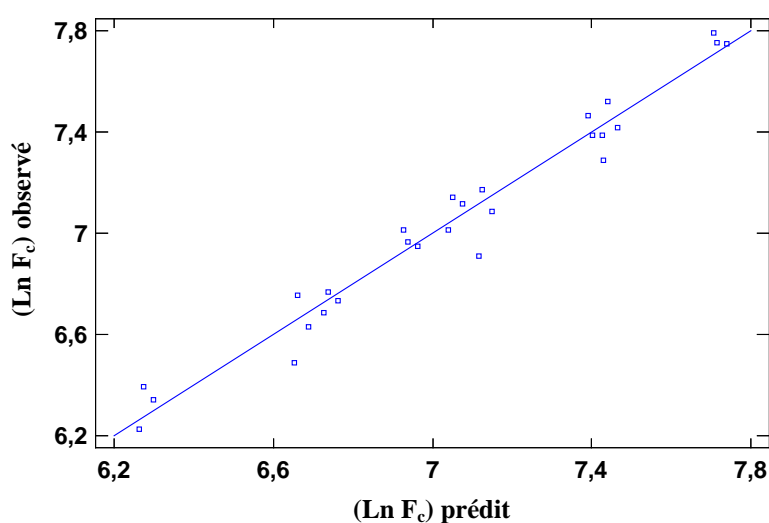


Figure 3.1 : Comparaison des efforts observés et prédits.

Pour l'évaluation de la précision des coefficients estimés, les limites inférieure et supérieure, pour des intervalles de confiance de 95 %, sont calculées par le logiciel Statgraphics et reportées dans le tableau qui suit.

Paramètre	Estimation	Ecart-type	Limite inférieure	Limite supérieure
Constante a_0	8,17931	0,414169	7,32254	9,03609
a_1 pour $\ln(f)$	0,6688	0,0349558	0,596488	0,741111
a_2 pour $\ln(a_p)$	0,959675	0,0587351	0,838172	1,08118
a_3 pour $\ln(V_c)$	-0,0761673	0,0862108	-0,254508	0,102174

Tableau 3.2 : Précision des coefficients estimés.

Le tableau qui suit reporte les résidus studentisés.

N° Essai	F_c mesuré	F_c prédit	Résidu	Résidu studentisé
22	6,48809	6,65183	-0,163738	-2,20
23	6,90882	7,11541	-0,206594	-2,83

Tableau 3.3 : Résidus studentisés non usuels.

À noter que les résidus studentisés mesurent de combien les écarts-types de chaque valeur observée de $(\ln F_c)$ varie si on ajuste un modèle utilisant toutes les observations sauf cette observation. Le tableau des résidus non usuels liste les observations qui ont des résidus studentisés supérieurs à 2 en valeur absolue. Dans ce cas, il y a deux résidus studentisés supérieurs à 2 ; à cet effet, les essais N° 22 et 23 peuvent être supprimés et la simulation sera relancée.

Après avoir relancé la simulation tout en négligeant, d'une part, l'effet de la vitesse de coupe et, d'autre part, avoir supprimé les essais présentant des résidus studentisés supérieurs à 3 ; à savoir : les essais N° 22, 23 et 24, les résultats sont relatés dans le tableau qui suit :

Paramètre	Estimation	Ecart-type	t –Student	Probabilité	
Constante a_0	7.83387	0.0423493	184.982	0.0000	
a_1 pour $\ln(f)$	0.666954	0.0229946	29.0048	0.0000	
a_2 pour $\ln(a_p)$	0.970938	0.0364709	26.6223	0.0000	
Analyse de variance					
Source	Somme des carrés	Ddl	Carré moyen	F_{calc}	Probabilité
Modèle	4.48971	2	2.24485	775.01	0.0000
Résidu	0.0608274	21	0.00289654		
Total (Corr.)	4.55053	23			
Analyse complémentaire de la variance					
$\ln(f)$	2.43679	1	2.43679	841,28	0.0000
$\ln(a_p)$	2.05291	1	2.05291	708,75	0.0000
R-carré = 98.6633 %					
R-carré (ajusté pour les ddl) = 98.536 %					
Estimation de l'écart-type du résidu = 0.0538195					
Erreur absolue moyenne = 0.0442549					
Test de Durbin-Watson = 1.0761 (P = 0.0084)					
Auto-corrélation résiduelle d'ordre 1 = 0.372231					

Tableau 3.4 : Résultats de modélisation par RLM sans l'effet de V_c .

Enfin, le modèle du processus de coupe est exprimé par :

$$\ln F_c = 7.83387 + 0.666954 \cdot \ln f + 0.970938 \cdot \ln a_p \quad (3.4)$$

Soit :

$$F_c = 2524.681 \cdot f^{0.667} \cdot a_p^{0.97} \quad (3.5)$$

Donc, les paramètres du modèle du processus de coupe sont : $k_m = 2524.681 \text{ N/mm}^2$, $\bar{\alpha} = 0.667$ et $\bar{\beta} = 0.97$.

Avec : k_m est la constante du modèle exprimée par $k_m = k \cdot V_c^{\bar{\delta}}$.

Nous allons dans ce qui suit présenter les résultats de simulation relatifs à la commande numérique adaptative développée.

3.2. COMMANDE NUMERIQUE ADAPTATIVE PAR PID :

Rappelons que le modèle du processus de tournage est non linéaire mais afin d'appliquer les lois de la théorie de la commande linéaire (régulateur PID), nous supposons a priori que le coefficient $\bar{\alpha} \approx 1$; par conséquent, la fonction de transfert du processus de tournage est exprimée par :

$$y = \frac{k_s (60/N) k_m a^{\bar{\beta}} k_d}{\left(\frac{p^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} p + 1 \right) \left(1 + \frac{60}{2N} p \right) \left(\frac{p^2}{\omega_0^2} + \frac{2\zeta_0}{\omega_0} p + 1 \right)} e^{-\tau_G p} u + P_e \quad (3.6)$$

Le tableau qui suit indique les valeurs des différents paramètres du modèle relatif au processus de tournage.

Servosystème		
$k_s = 1.248$	$\zeta = 0.625$	ω_n (rd/s) = 41
Dynamique de l'avance		
N (tr/min) = 450		
Processus de coupe		
k_m (N/mm ²) = 2524.681	a (mm) = 2 à 4	$\bar{\alpha} = 0.667$; $\bar{\beta} = 0.97$
Dynamomètre		
k_d (V/N) = 0.002		
Filtre anti-repliement		
$\zeta_0 = 0.7$	ω_0 (rd/s) = 105	

Tableau 3.5 : Valeurs des paramètres du modèle du processus de tournage.

Notons que les paramètres du servosystème, de la dynamique d'avance, du dynamomètre et du filtre anti-repliement sont pris de la référence [5]. Les paramètres du processus de coupe ont été identifiés suite à des essais expérimentaux réalisés dans le cadre de la référence [2].

Comparativement aux développements réalisés dans la référence [5], les dynamiques liées à la cinématique de la machine-outil (servosystème et dynamique d'avance) et au filtrage (filtre anti-repliement) seront conservées ; par contre, le modèle relatif au processus de coupe a été substitué suite à un développement original basé sur nos valeurs expérimentales.

Aussi, rappelons que le retard pur global (τ_G) du système varie de 0.06 à 0.12 s, et la fréquence de la perturbation harmonique est de 5 Hz.

L'implantation d'une stratégie de commande doit être précédée par une simulation, c'est ainsi

que nous allons effectuer des simulations du processus de tournage sur le logiciel Simnon (Simulation of non linear systems). Pour le retard pur, nous considérons a priori une valeur moyenne de 0.09 s. Aussi, pour se rapprocher plus de la pratique, nous avons considéré un bruit blanc Gaussien de variance 0.2 ; cette situation peut être illustrée par le schéma de la figure qui suit.

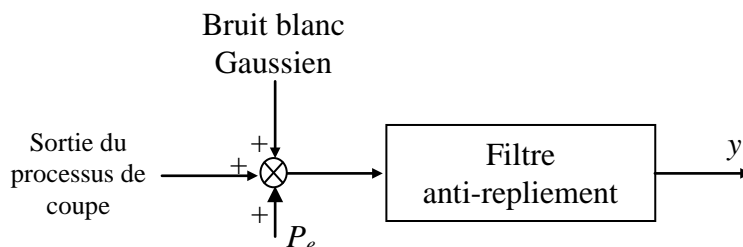


Figure 3.2 : Intégration du bruit de mesure.

Le schéma de la figure qui suit illustre la simulation en boucle ouverte du procédé de tournage pour un signal d’entrée de 2.5 V.

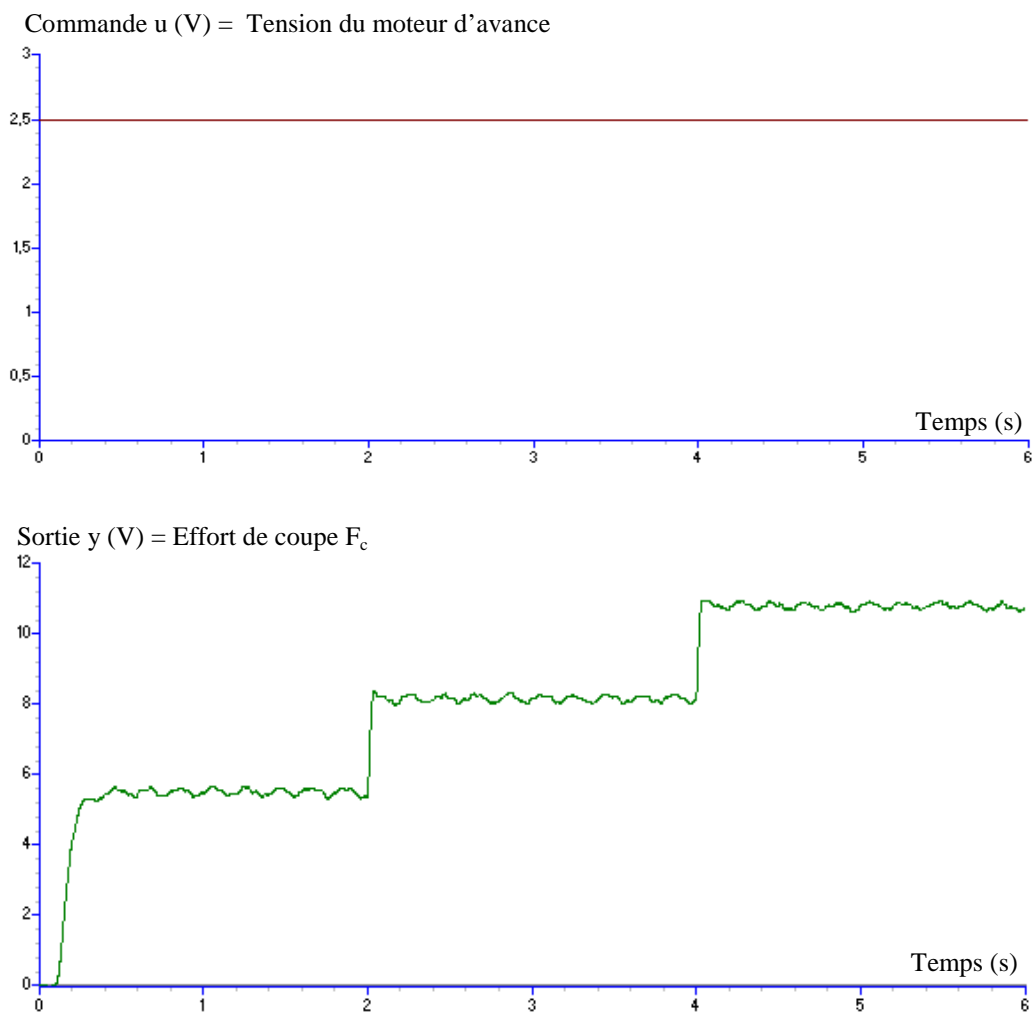


Figure 3.3 : Comportement en boucle ouverte du procédé de tournage.

Nous remarquons que l'effort de coupe présente des sauts suite au changement de la valeur de la profondeur de passe aux instants $t = 2$ s, $t = 4$ s et $t = 6$ s. Sur l'horizon de temps $0 \div 2$ s, la profondeur de passe est prise égale à 2 mm ; entre les temps 2 s et 4 s, la profondeur de passe est prise égale 3 mm. Enfin, pour une durée supérieure ou égale à 4 s, la profondeur de passe est égale à 4 mm.

Le point de fonctionnement considéré sera relatif à une sortie de 5,51 V, soit un effort de coupe de 2755 N. Ce dernier correspond à une profondeur de passe de 2 mm, une avance de 0.416 mm/tr et une vitesse de rotation de la broche égale 450 tr/min. Cet effort sera considéré par la suite comme une consigne pour la boucle de régulation.

3.2.1 Détermination des paramètres de réglage du régulateur PID :

Pour la détermination du point critique en se basant sur la méthode du relais (régulateur tout ou rien), nous pouvons déterminer le gain critique et relever la période critique du tracé de la sortie oscillante. Le schéma de la figure qui suit montre les tracés de la commande et de la sortie oscillante.

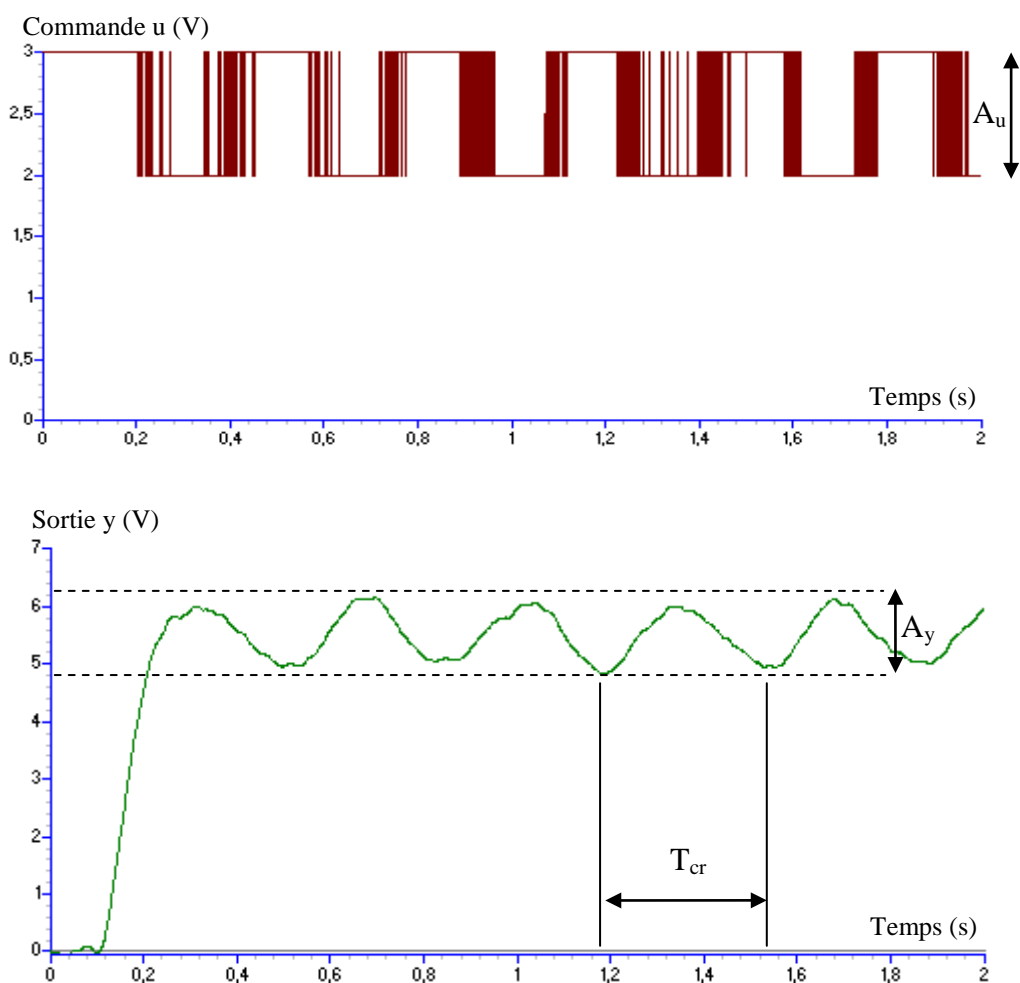


Figure 3.4 : Réponse du système par la méthode du relais.

En utilisant l'équation (2.4), nous pouvons déterminer le gain critique ; soit :

$$k_{cr} = \frac{\pi \times A_y}{4 \times A_u} = \frac{\pi \times (6.2 - 4.8)}{4 \times 1} = 1.099. \text{ La période critique relevée du tracé vaut : } T_{cr} = 0.36 \text{ s.}$$

Donc, les paramètres du régulateur PID sont déterminés selon :

$$k_p = 0.6 k_{cr} = 0.659 ; T_N = 0.5 T_{cr} = 0.18 \text{ s} ; T_V = 0.125 T_{cr} = 0.045 \text{ s} \quad (3.7)$$

Pour la simulation, les paramètres (b) et (N_V) (voir équation (2.2)) sont pris respectivement égaux à 0.72 et 5. Le choix de (b) a été guidé par un calcul empirique selon [6] :

$$b = \frac{15 - k_N}{15 + k_N} \quad (3.8)$$

Avec : $k_N = k_T k_{cr} = 2.204 \times 1.099 = 2.422$ et $k_T = 5.51/2.5 = 2.204$.

À noter que l'équation (3.8) est valable pour un gain $k_N > 2.25$. Le choix de (N_V) a été guidé par différents essais en simulation, et ce selon la dynamique de la boucle fermée.

3.2.2 Résultats de la régulation par PID à paramètres fixes :

La figure qui suit illustre les résultats de régulation par PID à paramètres fixes pour une profondeur de passe égale à 2 mm.

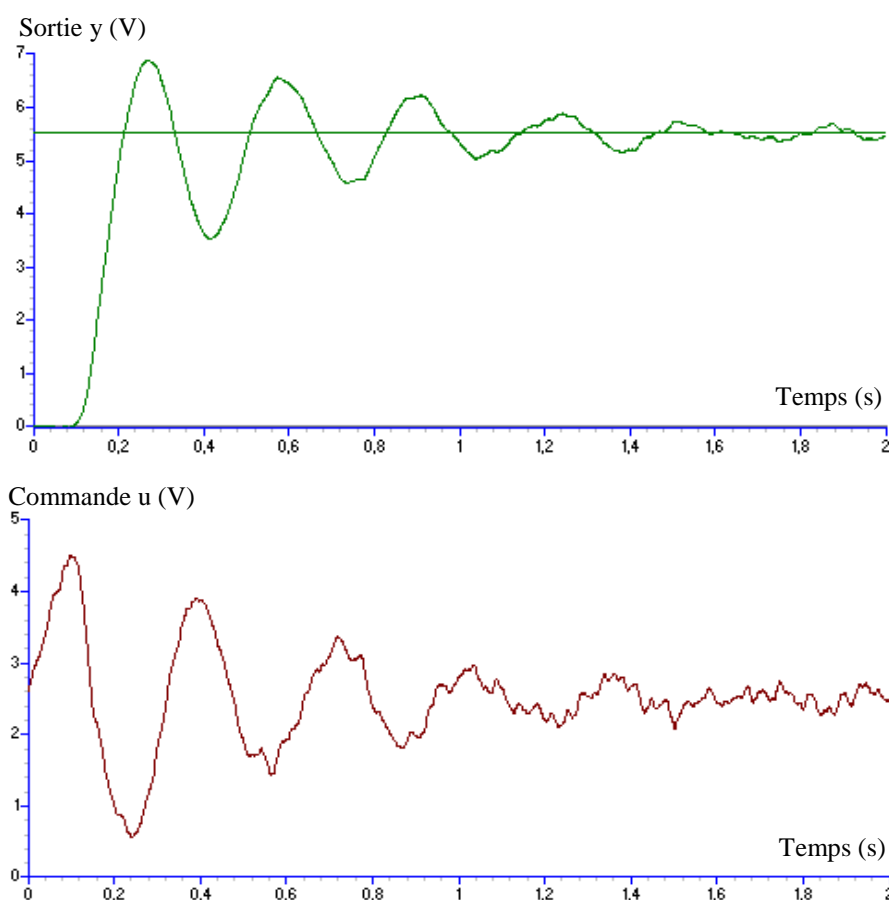


Figure 3.5 : Régulation par PID à paramètres fixes.

La figure qui suit montre le résultat de régulation de l'effort de coupe par PID à paramètres fixes en considérant le changement de la profondeur de passe.

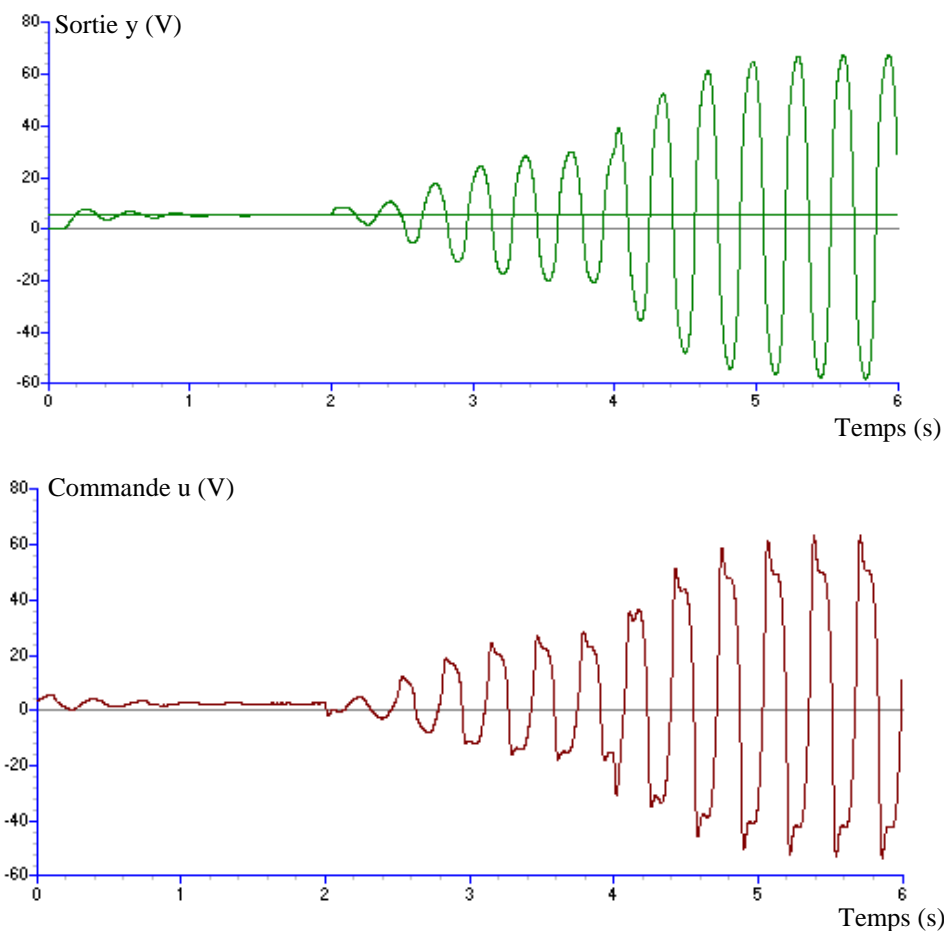


Figure 3.6 : Régulation par PID à paramètres fixes avec changement de a_p .

Nous remarquons que pour une profondeur de passe plus grande que 2 mm la régulation de l'effort de coupe n'est pas assurée. Par conséquent, le recours à une commande adaptative s'impose ; dans ce cas, le gain du régulateur PID sera corrigé à chaque changement de la profondeur de passe. À cet effet, la version numérique du régulateur PID sera utilisée.

3.2.3 Résultats de la régulation par PID adaptatif :

Rappelons que la version discrète du régulateur sera obtenue en utilisant l'approximation de Tustin (voir les équations (2.7) à (2.11) du chapitre 2).

La correction du gain du régulateur sera assurée par une identification en temps réel des variations du processus de tournage qui viennent principalement du changement de la profondeur de passe. À cet effet, le gain du processus de tournage (k_T) est identifié à chaque période d'échantillonnage, et il est envoyé au régulateur pour ajuster son gain proportionnel (k_p). Cette situation est illustrée par le schéma de la figure qui suit.

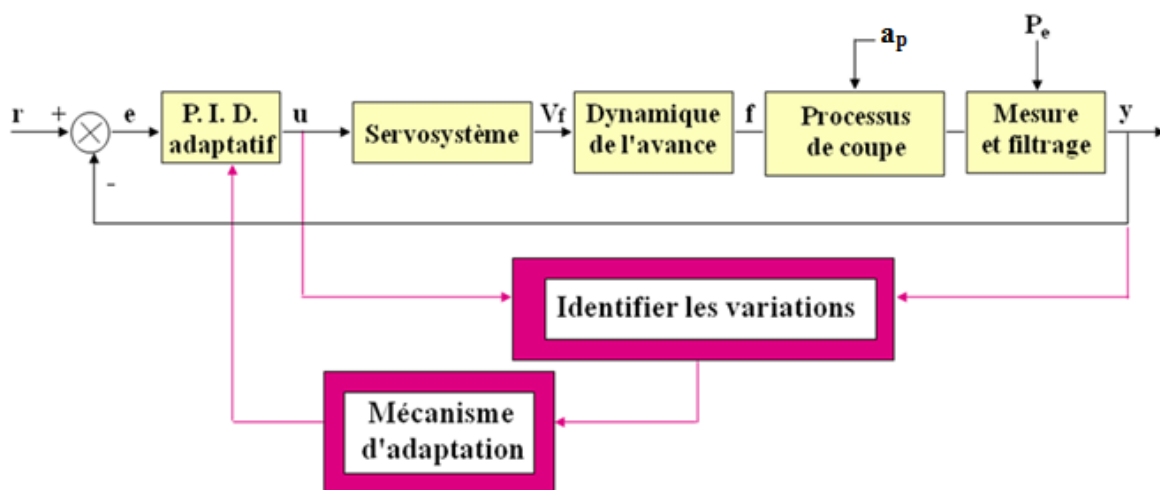


Figure 3.7 : Commande adaptative du processus de tournage.

Le tableau qui suit résume les valeurs des données nécessaires pour la simulation de la boucle de commande numérique adaptative.

c (rd/s)	σ	$\hat{k}_T(0)$	u_{\min} (V)	u_{\max} (V)
20	1	2,204	0	15

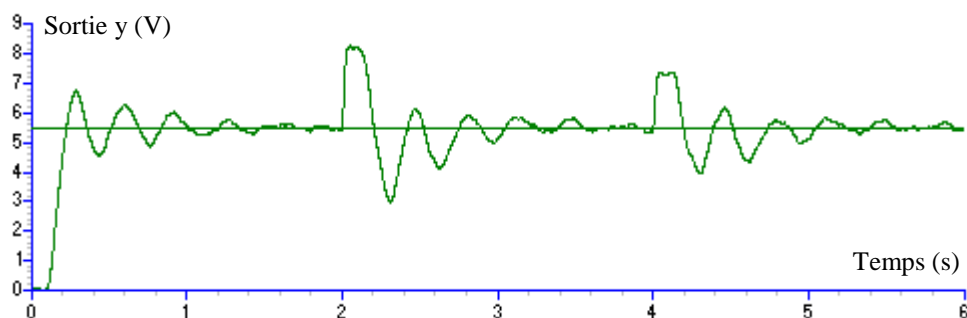
Tableau 3.6 : Valeurs des données pour la simulation.

Le gain du régulateur est ajusté comme suit :

$$k_p = 0.6 \cdot k_{cr} \cdot k_T(0) / \hat{k}_T \tag{3.9}$$

Le choix de la constante des filtres (c) utilisés par l’algorithme d’identification paramétrique a été guidé par la simulation. Pour des raisons simplificatrices, le paramètre σ est pris égal à 1. Le gain total initial est calculé selon : $k_T(0) = 5.51/2.5 = 2.204$. Les limites qui correspondent à la saturation sont prises égales à 0 et 15 V ; ces valeurs sont généralement utilisées par les potentiomètres de réglage sur la machine-outil. Le choix de la période d’échantillonnage (T_e) est fait selon la référence [5] ; sa valeur est prise égale à 0.03 s.

Le schéma de la figure qui suit montre les résultats de simulation obtenus par une commande numérique adaptative.



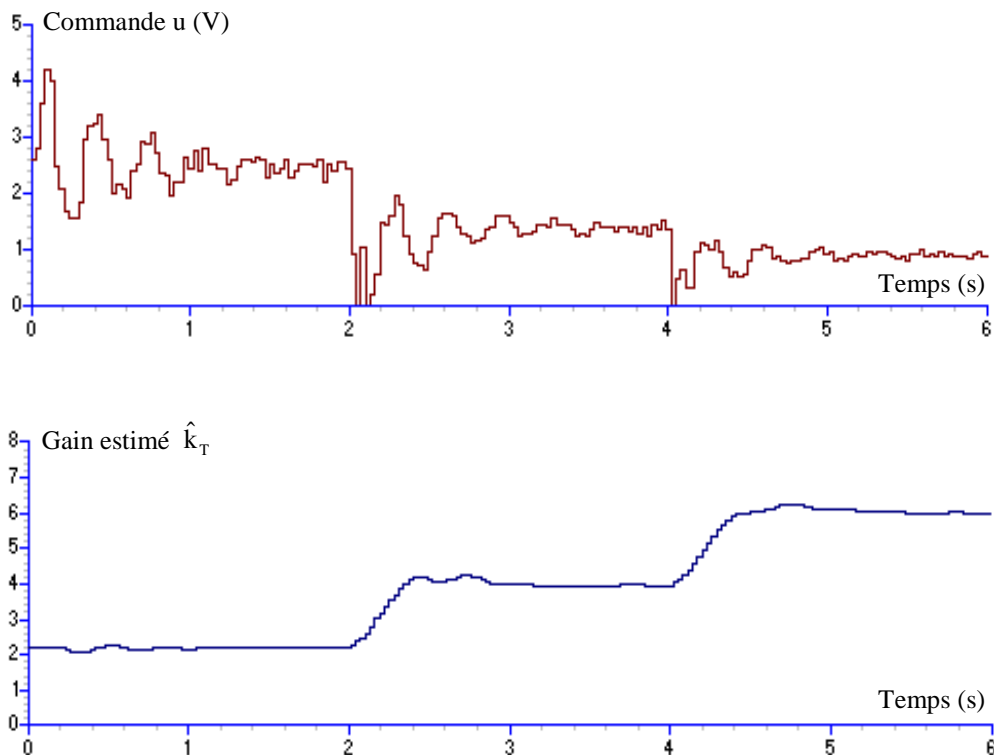
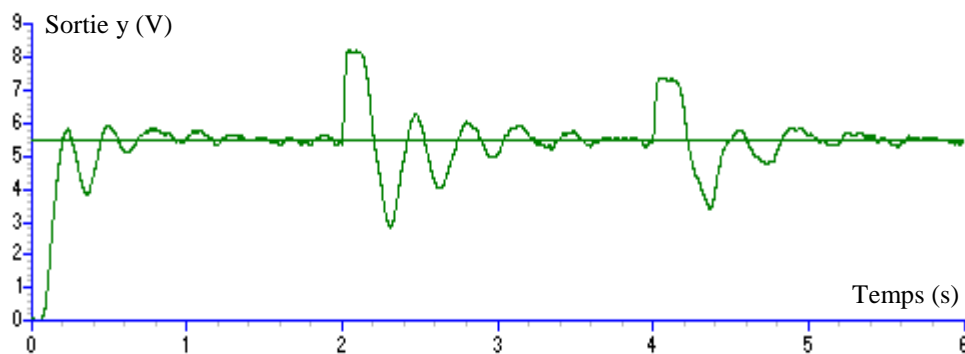


Figure 3.8 : Résultats de la commande numérique adaptative.

Nous allons maintenant effectuer un test de performances pour pouvoir déceler la robustesse de la stratégie de commande adaptative développée.

3.2.4 Test de performances :

Autre que le changement de la profondeur de passe, le processus de tournage est sujet aussi à un changement de la vitesse de rotation de la broche et/ou une variation du retard pur. Nous allons considérer dans un premier temps la variation du retard pur. La figure qui suit montre le comportement de la régulation suite au changement du retard pur ; ce dernier est pris égal à 0.06 s pour un temps $t < 2$ s, puis égal à 0.09 sur l’horizon $2 \div 4$ s, et enfin égal à 0.12 s pour un temps supérieur ou égal à 4 s.



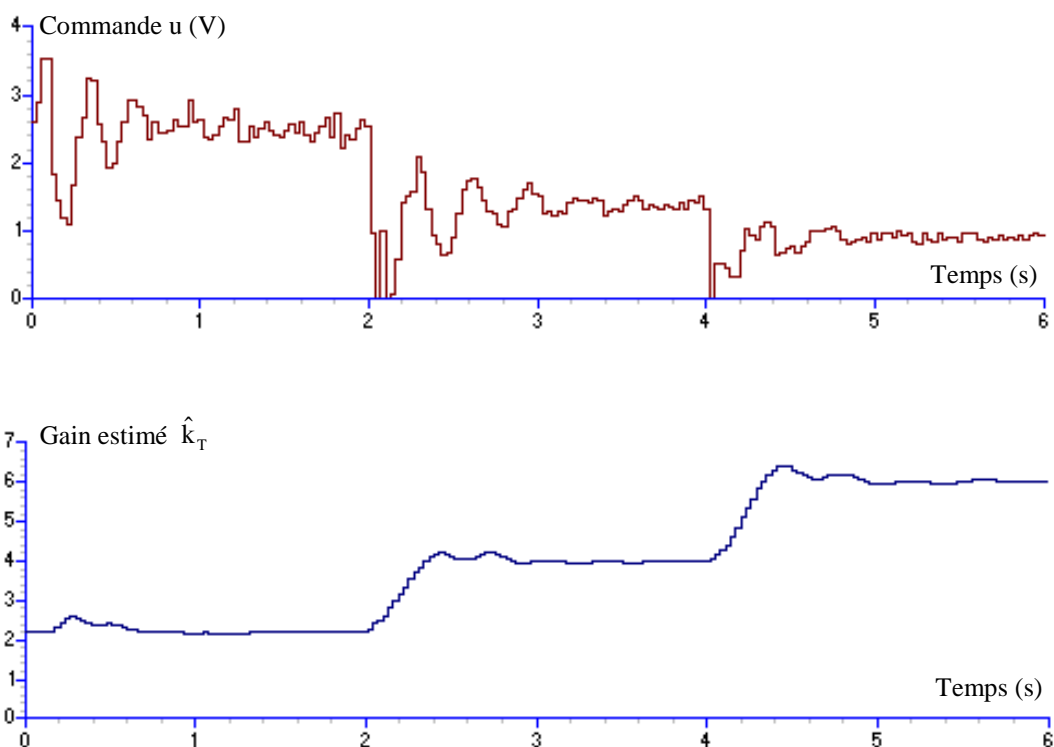
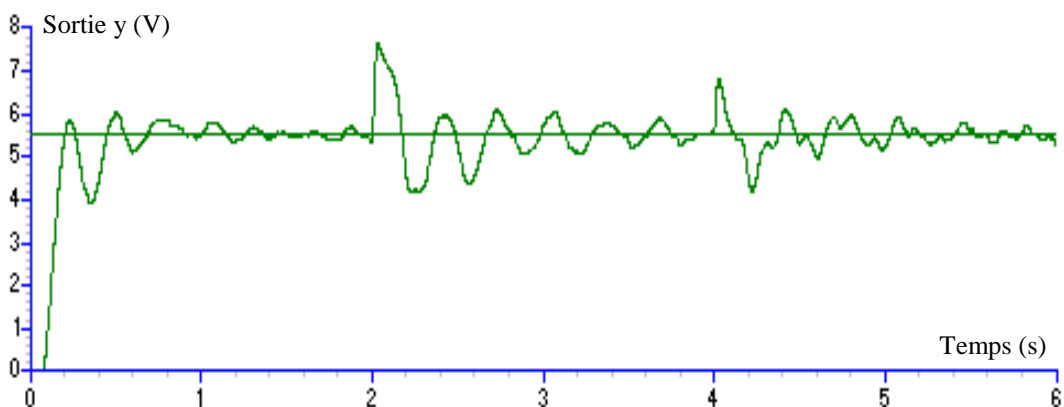


Figure 3.9 : Résultats de la commande adaptative avec changement de τ_G .

Nous remarquons que les performances se sont légèrement dégradées dans les régimes transitoires.

La figure qui suit montre le comportement de la régulation suite aux changements combinés du retard pur et de la vitesse de rotation de la broche. La variation du retard pur est conservée ; par contre, la vitesse de rotation de la broche présente les variations suivantes : pour un temps $t < 2$ s, la vitesse de la broche est prise égale à 450 tr/min, puis égale à 600 tr/min sur l’horizon $2 \div 4$ s, et enfin égale à 900 tr/min pour un temps supérieur ou égal à 4 s.



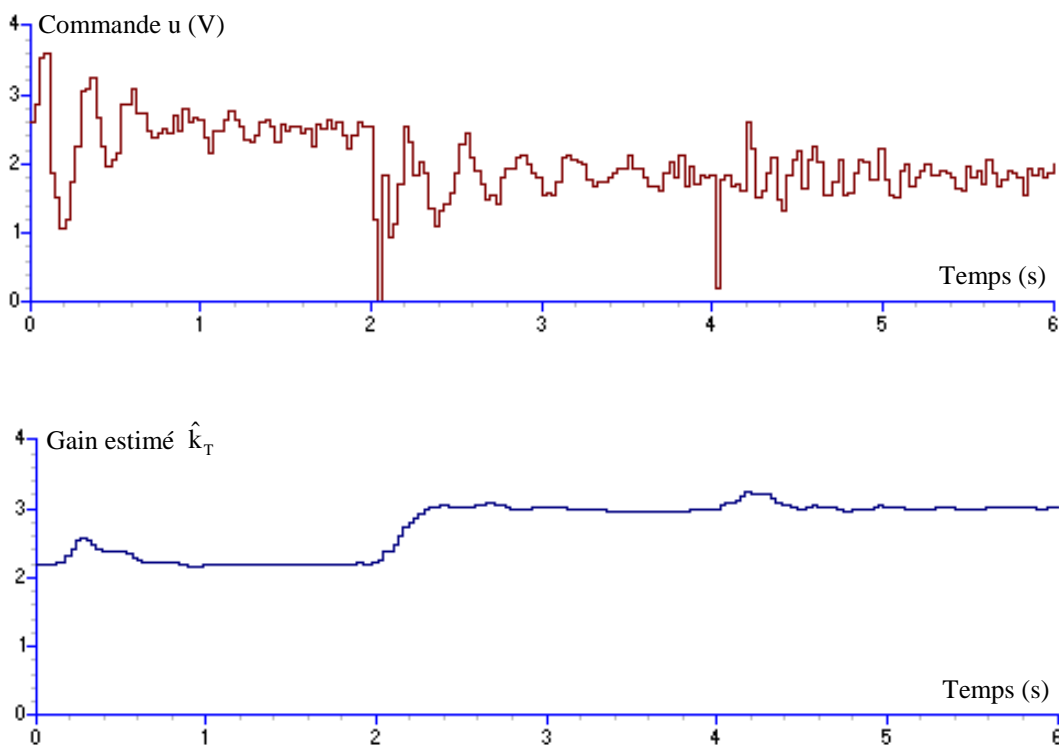


Figure 3.10 : Résultats de la commande adaptative avec changement de τ_G et N .

Nous remarquons qu’à travers ces résultats que la commande numérique adaptative développée et basée sur un régulateur PID est robuste. Néanmoins, cette commande ne permet pas la compensation de la perturbation harmonique. De plus, ce type de correcteur n’offre pas la possibilité d’avoir des performances indépendantes en poursuite ; d’où, nous devons penser à développer une stratégie de commande qui permet de prendre en compte et d’une manière simultanée la variation du retard pur du système et de la vitesse de rotation, la compensation de la perturbation harmonique et le changement de la profondeur de passe.

Le travail effectué dans ce mémoire a pour but de développer une stratégie de commande numérique adaptative permettant de maintenir un effort de coupe constant dans une opération de tournage sous des conditions d'usinage variables.

L'étude de modélisation du processus de tournage a permis de dégager qu'il est composé d'un système du second ordre décrivant le comportement de la vitesse d'avance, puis d'une dynamique variable fonction de la vitesse de rotation de la broche et relative à l'avance, et enfin d'une partie non linéaire décrivant sous forme simplifiée le comportement du processus de coupe. L'effort de coupe mesuré est filtré par un filtre anti-repliement et le procédé présente un retard pur et un gain variables et une perturbation harmonique.

Nous avons retenu comme modèle pour le processus de tournage un système du cinquième ordre relatif aux dynamiques du servosystème, de l'avance et du filtre anti-repliement avec un retard pur moyen de 0.09 s et une perturbation harmonique d'une fréquence de 5 Hz. Le processus de coupe, qui est une partie intégrante du procédé de tournage, a été identifié par une Régression Linéaire Multiple en se basant sur des résultats expérimentaux que nous avons effectués.

Nous avons ciblé un régulateur PID pour la commande du processus de tournage ; à cet effet, nous avons présenté comment déterminer les paramètres de ce régulateur sans recours à la modélisation du procédé ; à savoir : la méthode d'autoréglage par relais d'Aström et Hägglund. Pour la stratégie de commande par PID à paramètres fixes, les performances ont été dégradées pour un usinage à grandes profondeurs de passe ; d'où, un recours à une commande numérique adaptative.

La version numérique du régulateur PID a été obtenue en utilisant l'approximation de Tustin. Aussi, nous avons pris en compte le phénomène de saturation de la commande. Les variations qui proviennent principalement de la profondeur de passe sont identifiées par l'Algorithme d'Adaptation Paramétrique (AAP). La mise en œuvre de ce dernier est réalisée à la base d'un modèle linéaire du troisième ordre avec retard pur moyen valant trois fois la période d'échantillonnage (la dynamique du filtre anti-repliement était négligée). L'AAP utilise l'approche (δ) qui présente relativement des avantages numériques. Aussi, le retard pur moyen du système était approché par une fonction rationnelle en utilisant une approximation de Padé du second ordre.

Pour la stratégie de régulation par un correcteur PID adaptatif, nous avons remarqué qu'elle est robuste devant les changements issus de la profondeur de passe, du retard pur et de la vitesse de rotation de la broche. Néanmoins, cette commande ne permet pas la compensation

Conclusion générale

de la perturbation harmonique. De plus, ce type de correcteur n'offre pas la possibilité d'avoir des performances indépendantes en poursuite ; d'où, nous devons penser à développer une autre stratégie de commande adaptative pour pouvoir compenser la perturbation harmonique.

Perspectives : Nous souhaitons une implantation de la stratégie de commande numérique adaptative développée sur une machine cible. Ceci doit forcément passer une identification du processus de tournage après équipement de la machine-outil cible. Aussi, la stratégie implantée pourrait être étendue à d'autres processus d'usinage.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **K. HADDOUCHE**, " Apports d'automatique avancée dans la conduite d'un usinage ", Université Bordeaux I - E. N. I. de Tarbes, 1995.
- [2] **A. CHEROUIK & S. KHODJET KESBA**, " Réalisation d'un capteur d'effort en tournage et réflexion sur la capture en fraisage ", Mémoire d'Ingénieur, Département de Génie Mécanique, Université de Tiaret, 2000.
- [3] **M. TOMIZUKA & S. ZHANG**, " Modeling and conventional adaptive P.I. control of a lathe cutting process ", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 110, pp. 350-354, Dec.1988.
- [4] **R. H. MIDDLETON & G. C. GOODWIN**, " Digital control and estimation: A unified approach ", Prentice Hall, 1990.
- [5] **I. DJOUDA**, " Amélioration des performances d'une commande numérique adaptative de l'effort de coupe en tournage ", Mémoire d'Ingénieur, Département de Génie Mécanique, Université de Tiaret, 2001.
- [6] **J. G. ZIEGLER, N. B. NICHOLS & N. Y. ROCHESTER**, " Optimum settings for automatic controllers ", Transactions of the ASME, pp. 759-768, November 1942.
- [7] **K. J. ASTRÖM & T. HÄGGLUND**, " Automatic tuning of P.I.D. controllers ", Instrument Society of America, 1988.
- [8] **I. D. LANDAU**, "Identification et commande des systèmes", Hermès, 1993.
- [9] **A. OUNAS & C. CHAHIRI**, "Commande robuste adaptative appliquée au processus de tournage (utilisation de l'approche Delta)", Mémoire d'Ingénieur, Département de Génie Electrique, Université de Tiaret, 2000.

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو تطوير نظام تحكم رقمي متغير خلال الخراطة لتثبيت قوة القطع بالرغم من تغير بعض عناصر القطع. عملية المحاكاة باستعمال نظام تحكم PID ثابت أكدت حدود الأداء، مما أجبرنا على تطوير نظام تحكم PID رقمي متغير. هذا الأخير، اخذ بعين الاعتبار ظاهرة تشبع التحكم و التغيرات الواردة عن عمق القطع، التأخير الزمني و سرعة دوران القطعة. تم تحديد التغيرات الناجمة خلال الخراطة بواسطة طريقة الرقمه Delta المرتكزة على أساس نموذج خطي لعملية الخراطة. النتائج المحصل عليها من خلال المحاكاة جد ايجابية، مما يدعم التجسيد أو التفعيل الميداني لنظام التحكم الرقمي المتغير الذي تم تطويره .

مفاتيح: الخراطة، قوى القطع، التحكم المتغير، نظام تحكم PID، طريقة الرقمه Delta.

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire concerne le développement d'une stratégie de commande numérique adaptative en tournage à effort de coupe constant sous des conditions d'usinage variables.

Les tests effectués en simulation par utilisation d'un régulateur PID à paramètres fixes nous ont permis de savoir les limites en termes de performances. Puis, nous avons développé une stratégie de commande utilisant un régulateur PID adaptatif.

Cette dernière stratégie tient en compte du phénomène de saturation de la commande et des variations de la profondeur de passe, du retard pur et de la vitesse de rotation de la broche. L'identification du gain total du processus utilise l'approche Delta basée sur la discrétisation du modèle linéaire du processus de tournage.

Les résultats obtenus en simulation sont très concluants et motive l'implantation de la stratégie de commande adaptative développée.

Mots-clés : Tournage, efforts de coupe, commande adaptative, PID, approche Delta.

Abstract:

The work presented in this memory relates to the development of an adaptive numerical control strategy in turning with constant cutting force under variable machining conditions.

The tests carried out in simulation by using a PID regulator with fixed parameters enabled us to know the limits in term of performances. Then, we developed a control strategy using an adaptive PID regulator.

This last strategy takes into account the saturation phenomena of the command and the variations of the depth of cut, the pure delay and the spindle speed.

The identification of the total process gain uses the Delta approach based on the discretization of the linear model of the turning process.

The results obtained in simulation are very conclusive and justifies the implementation of the developed adaptive strategy.

Keywords: Turning, cutting forces, adaptive control, PID, Delta approach.