

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M.Ing.

PAR
YOUCEF AMTOUT

ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES STRATÉGIES DE COUPE SUR LA
PERFORMANCE DE L'USINAGE EN 5 AXES PAR LA MÉTHODE DES
SURFACES DE RÉPONSES

MONTREAL, LE 17 DÉCEMBRE 2003

© droits réservés de Youcef AMTOUT

CE PROJET A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Jean François Châtelain, directeur de mémoire

Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Victor Songmene, Codirecteur de mémoire

Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Michel Rioux, président du jury

Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Marek Balazinski, membre du jury

Département de génie mécanique à l'École Polytechnique de Montréal

IL A FAIT L'OBJET D'UNE PRÉSENTATION DEVANT JURY

LE 8 DÉCEMBRE 2003

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES STRATÉGIES DE COUPE SUR LA PERFORMANCE DE L'USINAGE EN 5 AXES PAR LA MÉTHODE DES SURFACES DE RÉPONSES

Youcef AMTOUT

SOMMAIRE

Les industries d'usinage à commande numérique des moules et des pièces aéronautiques cherchent continuellement l'amélioration de leur productivité et la qualité de leurs pièces à usiner. Le processus d'usinage comprenant les opérations de finition représente une grande partie des coûts de fabrication des moules. Des gains significatifs en temps d'usinage et en qualité des pièces finies peuvent résulter de l'optimisation des paramètres de coupe. L'utilisation des stratégies intelligentes permet de générer des bénéfices significatifs en temps et en coûts liés à la fabrication des moules et des pièces pendant les opérations d'usinage.

Notre travail consiste à étudier et analyser les comportements et l'influence des paramètres de coupe, soit, l'avance par dent, la vitesse de coupe, la largeur de coupe, la profondeur de coupe axiale, les orientations d'outil et des stratégies de coupe sur les performances de l'usinage en 5 axes de l'acier à moule de type P20, ainsi que leurs interactions.

La démarche employée de façon intuitive par des expérimentateurs consiste à étudier séparément l'influence des grandeurs des paramètres de coupe sur la performance de l'usinage en 5 axes. Cette stratégie est coûteuse et ne détecte pas les interactions entre les différents paramètres de coupe. Ce projet propose une approche utilisant la théorie des surfaces de réponses des plans d'expérience. Elle consiste à planifier et à établir un plan d'expérimentation comportant le minimum d'essais, où l'ensemble de nos paramètres de coupe sera modifié simultanément lors des essais.

Les résultats permettront de modéliser et de développer des équations de prédictions du temps d'usinage et du fini de surface en fonction des paramètres les plus significatifs. Des techniques d'optimisation simultanée de plusieurs réponses du système seront utilisées afin de dégager des stratégies permettant le meilleur compromis des conditions de coupe et de générer des réglages combinatoires et optimaux des paramètres en tenant compte de tous les objectifs souhaités.

L'impact industriel vise les industries du moulage et l'industrie aérospatiale qui bénéficieront des résultats concernant les finis de surface ainsi que les résultats associés à la productivité.

**STUDY OF THE INFLUENCE OF THE CUT STRATEGIES ON THE
PERFORMANCE OF MACHINING IN 5 AXES BY THE RESPONSE SURFACE
METHODOLOGY**

Youcef AMTOUT

ABSTRACT

Industries of numerical control machining of the moulds and the aeronautical parts are continuously seeking for the improvement of the productivity and the part quality. The machining process, including the finishing operations represents most of the manufacturing costs of the moulds. Significant savings in machining time and quality of the finished parts can result from the optimization of the machining parameters. The use of the intelligent strategies makes it possible to generate significant benefit in time and costs related to the manufacture of the moulds and parts during the operations of machining.

Our work consists to study and analyse the behaviours and the influence of the parameters of cut, that is to say, the advance by tooth, the cutting speed, the cutting width, the depth of axial cutting, the orientations of tool and the tool path strategies on the performances of machining in 5 axes of steel mould of the P20 type, and their interactions.

The method most used by experimenters consists in separately studying the influence of the cut parameters on the performance of machining in 5 axes. This strategy is expensive and does not detect the interactions between the various machining parameters. This project proposes an approach using the theory of response surfaces of the experimental designs. It consists in planning and establishing an experimental design with the minimum of tests, where the whole parameters of cut will be modified simultaneously during the tests.

The results will make it possible to model and develop equations of predictions of the times of machining and finished of surface according to the most significant parameters. Techniques of simultaneous optimization of several responses of the system will be to use in order to release from the strategies allowing the best compromise of the cutting conditions and to generate combinative and optimal adjustments parameters by taking account of all the desired objectives.

The industrial impact aims at the industry of the moulding and the aerospace industry which will benefit from the results concerning finished of surface as well as the results associated with the productivity.

REMERCIEMENT

J'aimerais offrir mes sincères remerciements et ma parfaite gratitude à Monsieur Jean-François Châtelain et Monsieur Victor Songmene, respectivement directeur et codirecteur de ce mémoire, tous deux professeurs au département de Génie mécanique à l'École de technologie supérieure, pour leur soutien moral et pour leur encadrement tout au long de ce travail.

Mes remerciements vont également à l'École de technologie supérieure.

Nos remerciements vont également à Sorel Forge inc, pour les échantillons gratuits de l'acier P20 utilisés dans ce projet.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance à toute ma famille et en particulier à ma femme madame Safia Ferrioune pour ses encouragements et sa patience, mes enfants Melissa et Myriam-Yasmine.

Je ne saurais ne pas remercier mon père Mohamed Amtout et ma mère madame Louisa Chellouh pour leur soutien moral, malgré la distance qui nous sépare.

Par la suite, je me dois d'offrir mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce projet.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	iii
ABSTRACT	iv
REMERCIEMENT	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
INTRODUCTION	12
CHAPITRE 1 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	16
1.1 Introduction	16
1.2 Stratégies de coupe.....	16
1.3 Plan d'expérience.....	18
1.4 Modèles mathématiques.....	23
1.5 Formulation du problème.....	26
CHAPITRE 2 PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE	27
2.1 Introduction.....	27
2.2 Système technologique.....	28
2.2.1 Machine outil à commande numérique CNC.....	28
2.2.2 Pièce	31
2.2.3 Outil de coupe	32
2.3 Réponses du système	35
2.4 Choix de facteurs indépendants et leurs niveaux	35
2.5 Plan d'expériences	40
2.6 Planification des essais et matrice des expériences.....	42
2.7 Formulation du modèle mathématique.....	44
2.8 Simulation graphique sur CATIA V5	48
CHAPITRE 3 ÉTUDE DES TEMPS D'USINAGE	51
3.1 Introduction.....	51
3.2 Analyse des résultats et discussion	54
3.3 Écart entre les temps de cycle et d'usinage sur la machine MOCN	57
3.4 Écart dans les temps d'usinage entre la FAO et la MOCN.....	60
3.5 Modélisation des équations de prédiction.....	63
3.6 Surfaces des réponses à partir des équations de prédictions.....	64

3.7	Conclusion	66
CHAPITRE 4 PRÉDICTION DES FINIS DE SURFACES		67
4.1	Introduction.....	67
4.2	Réponses du système.....	74
4.3	Images des finis de surfaces.....	76
4.4	Résultats et Analyse	79
4.5	Modélisation des équations de prédiction des finis de surface	86
4.6	Surfaces de réponse pour Ra	87
4.7	Surfaces de réponse pour Rt.....	88
4.8	Surfaces de réponse pour Ra //.....	89
CHAPITRE 5 OPTIMISATION SIMULTANÉE DES RÉPONSES		90
5.1	Introduction.....	90
5.2	Développement	93
5.3	Égalité dans les poids des réponses.....	100
5.4	Désirabilité	101
5.5	Inégalité dans les poids des réponses	103
5.6	Désirabilité	107
5.7	Surfaces de réponse des désirabilités	108
5.8	Optimisation.....	112
CHAPITRE 6 VALIDATION DES RÉSULTATS		113
CONCLUSION		117
ANNEXE SIMULATION ET ÉTUDE DU TEMPS PAR FAO.....		121
BIBLIOGRAPHIE		144

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Spécification de la machine à commande numérique28
Tableau II	Caractéristiques dimensionnelles de l'outil de coupe32
Tableau III	Caractéristiques dimensionnelles des plaquettes33
Tableau IV	Condition de coupe des Plaquettes Minicut International.....34
Tableau V	Codage et Plage des variations des conditions de coupe38
Tableau VI	Codage des facteurs.....39
Tableau VII	Matrice des expériences42
Tableau VIII	Exemple de calcul des effets46
Tableau IX	Matrice des expériences et des résultats du temps sur MOCN53
Tableau X	Tableau des effets significatifs sur le temps de coupe54
Tableau XI	Matrice des expériences et résultats.....75
Tableau XII	Matrice des expériences et résultats expérimentaux des réponses.....98
Tableau XIII	Matrice des résultats de désirabilités globales.....99
Tableau XIV	Résultats de l'optimisation..... 102
Tableau XV	Résultats d'optimisation par programmation non linéaire 112
Tableau XVI	Conditions opératoires de coupe pour fin de validation..... 113
Tableau XVII	Résultats de la validation des temps..... 114
Tableau XVIII	Résultats de la validation des finis de surface..... 115

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1 Diagramme expérimental	27
Figure 2 Machine 5 axes à commande numérique utilisée	29
Figure 3 Approche d'outil	29
Figure 4 Retrait d'outil.....	30
Figure 5 Trajectoire Aller simple.....	30
Figure 6 Trajectoire horizontale en avalant vers le bas.....	31
Figure 7 Volume de la pièce à usiner.....	31
Figure 8 Outil de coupe à bout sphérique	32
Figure 9 Plaquette boule de marque Minicut	33
Figure 10 Profondeur de passe axiale (mm)	36
Figure 11 Émersion (mm).....	36
Figure 12 Angle d'engagement.....	37
Figure 13 Angle d'inclinaison.....	37
Figure 14 Plan de Box Wilson, central composite, tronqué aux faces.....	41
Figure 15 Sélection du plan de surface de réponse dans Statgraphics	41
Figure 16 Simulation de Trajectoire en Aller simple ($\alpha = \beta = 0^\circ$)	48
Figure 17 Simulation de Trajectoire en Aller simple ($\alpha = 0^\circ, \beta = 30^\circ$).....	48
Figure 18 Simulation de Trajectoire en Zigzag ($\alpha = 4.56^\circ, \beta = 0^\circ$).....	49
Figure 19 Simulation de Trajectoire en Zigzag ($\alpha = 4.56^\circ, \beta = 4.56^\circ$).....	49
Figure 20 Simulation de coupe ($\alpha = 0^\circ, \beta = 30^\circ$)	50
Figure 21 Simulation de coupe ($\alpha = \beta = 0^\circ$).....	50
Figure 22 Pareto des effets significatifs sur le temps d'usinage ($T_{USINAGE_MOCN}$).....	54
Figure 23 Pareto des effets significatifs sur le temps de cycle machine (T_{CYCLE_MOCN}).....	55
Figure 24 Graphique des effets directs sur le temps d'usinage ($T_{USINAGE_MOCN}$)	56
Figure 25 Graphique des effets directs sur le temps de cycle machine (T_{CYCLE_MOCN})	56
Figure 26 Comparaison entre les temps d'usinage et les temps de cycle sur MOCN.....	57

Figure 27	Pareto des effets significatifs sur les écarts usinage / cycle sur MOCN.....	58
Figure 28	Effets directs des facteurs sur l'écart usinage/ cycle sur MOCN	58
Figure 29	Effets des interactions des facteurs sur l'écart usinage / cycle sur MOCN ...	59
Figure 30	Écart entre les temps d'usinage de la FAO et les temps sur MOCN	60
Figure 31	Pareto des effets significatifs sur l'écart FAO/MOCN.....	61
Figure 32	Effets directs des facteurs sur l'écart FAO /MOCN.....	62
Figure 33	Interaction des facteurs sur l'écart FAO / MOCN.....	62
Figure 34	Surface de réponse des temps d'usinage FAO et MOCN	64
Figure 35	Surface de réponse écart de temps usinage / cycle de la MOCN	65
Figure 36	Directions de mesure des résultats de rugosité	74
Figure 37	Image optique du fini de surface (18 X).....	76
Figure 38	(Suite) Image optique du fini de surface (18 X).....	78
Figure 39	Pareto de la rugosité Ra linearisé.....	80
Figure 40	Pareto de la rugosité Rt linearisé	80
Figure 41	Pareto de la rugosité Ra // linearisé	80
Figure 42	Effet direct sur la rugosité Ra	83
Figure 43	Effet direct sur la rugosité Rt.....	83
Figure 44	Effet direct sur la rugosité Ra //.....	83
Figure 45	Effet des interactions sur la rugosité Ra	84
Figure 46	Effet des interactions sur la rugosité Rt.....	84
Figure 47	Effet des Interactions sur la rugosité Ra //.....	84
Figure 48	Graphe des résidus pour Ra	85
Figure 49	Graphe des résidus pour Rt.....	85
Figure 50	Graphe des résidus pour Ra//.....	85
Figure 51	Surfaces de réponse à partir de l'équation de prédiction de Ra.....	87
Figure 52	Surfaces de réponse à partir de l'équation de prédiction de Rt	88
Figure 53	Surfaces de réponse pour la rugosité Ra//.....	89
Figure 54	Fonction élémentaire de désirabilité pour une valeur cible	94
Figure 55	Fonction de désirabilité pour le cas d'une minimisation.....	94

Figure 56	Graphiques de Pareto des effets significatifs sur la désirabilité ($t=0,1$)	100
Figure 57	Pareto des effets significatifs sur la désirabilité, $t=1, w_5= 0,6$	104
Figure 58	Pareto des effets significatifs sur la désirabilité, $t=1, w_4= 0,6$	105
Figure 59	Pareto des effets significatifs sur la désirabilité, $t=1, w_3= 0,6$	105
Figure 60	Pareto des effets significatifs sur la désirabilité, $t=1, w_2= 0,6$	106
Figure 61	Pareto des effets significatifs sur la désirabilité, $t=1, w_1= 0,6$	106
Figure 62	Surfaces des réponses des fonctions de désirabilité ($R_a, W1=0.6$)	109
Figure 63	Surfaces des réponses des fonctions de désirabilité ($R_t, W2=0.6$).....	111

INTRODUCTION

L'industrie de fabrication des moules pour le moulage par injection de plastique ou sous-pression ne cesse de rechercher des moyens afin d'accroître la productivité, de réduire les temps de cycles et d'améliorer la qualité des moules usinés. Parmi les matériaux généralement utilisés comptent l'aluminium, les aciers à moules de type P20 et les aciers à outils utilisés pour la réalisation des inserts. L'acier P20 est depuis longtemps l'acier le plus utilisé en moulage par injection. Il est disponible en mi-dur de l'ordre de 32 RC et en dur avec une dureté de 40 RC. Ce type d'acier est un produit performant, mais son usinabilité varie et peut affecter la vie des outils, le temps de cycle, le temps de polissage pour la finition, la productivité et la structure même du métal suite à d'éventuels écrouissages dépendamment des conditions et des stratégies de coupe.

En plus du matériau, plusieurs autres facteurs affectent la performance d'usinage des moules tels que la vitesse de coupe, l'avance de l'outil, la profondeur de coupe, la largeur de coupe et l'orientation de l'outil par rapport aux pièces à usiner. L'objectif de ce travail est de développer, tester et valider les stratégies de coupe afin d'améliorer la performance lors de l'usinage. Compte tenu de la taille des entreprises concernées, des PME pour une grande part, les industries du moule et de la forge plus précisément, le développement de ce segment devait nécessiter un effort important d'optimisation et de validation technique des conditions d'usinage à commande numérique des aciers.

L'utilisation des stratégies intelligentes permet de réaliser des gains importants aussi bien quantitatifs que qualitatifs. Les temps et les coûts d'usinage diminuent surtout en finition et en demi-finition. Les temps et les coûts de polissage qui suivent les opérations de fraisage sont également réduits grâce à des réglages optimaux des paramètres de coupe.

L'usinage et la finition des moules représentent près de 70% du temps et des coûts associés à la fabrication des moules. Les temps d'usinage et de finition des moules sont conditionnés par le débit du copeau, le type et la géométrie de l'outil ainsi que du fini obtenu en passe de finition. Tous ces facteurs sont décidés lors de la génération automatique des trajectoires d'outil et des conditions de coupe dans le système de fabrication assistée par ordinateur, FAO. Des stratégies d'usinage non optimales peuvent nuire à la productivité, allonger le temps de cycle et également produire un fini de moule indésirable.

Une empreinte de moule de fini inapproprié nécessite un temps de polissage très long et affecte les performances des moules se traduisant par des pièces moulées de mauvaise qualité ou une durée de vie écourtée pour les moules (usure, défaillance par fatigue etc.) Des gains significatifs en temps de réalisation, en coûts d'usinage associés et en qualité des pièces finies peuvent être obtenus en optimisant les paramètres de coupe lors de l'usinage. La qualité des moules peut être évaluée à travers les profils de rugosité, les contraintes résiduelles générées et la profondeur de la couche écrouie obtenue après l'usinage.

L'objectif de ce travail est de développer des stratégies de coupe afin d'améliorer la productivité des opérations d'ébauche ainsi que la qualité des pièces usinées en 5 axes simultanés. Une approche combinée est utilisée pour obtenir une productivité maximale et des moules de meilleur fini de surface en optimisant les conditions de coupe. Les plans d'expériences permettent de déterminer les effets des paramètres de coupe et leurs éventuelles interactions, ils permettent également de réduire les coûts des essais en choisissant le plan approprié et de modéliser les réponses par l'entremise des équations de prédiction. Les facteurs influents sur les performances du système seront identifiés, analysés et des corrélations seront établies entre les réponses du système (productivité, qualité du fini, vie de l'outil, profondeur de la couche écrouie, etc....) et les conditions opératoires générées par le système de la FAO. Les réponses sont ensuite optimisées et

validées en cherchant le meilleur compromis entre elles pour obtenir une performance optimale de l'usinage en 5-axes.

La méthode des plans d'expériences sera utilisée dans ce projet. Elle consiste à planifier et à établir un plan d'expérimentation comportant le minimum d'essais, compte tenu des résultats souhaités. L'ensemble des paramètres de coupe sera modifié lors des essais. Le plan d'expérimentation sera choisi de telle manière à assurer une meilleure précision des résultats obtenus. Le projet permettra de dégager des stratégies permettant le meilleur compromis des conditions de coupe afin d'améliorer les performances de l'usinage en 5 axes, notamment la productivité ainsi que le fini de surface. Compte tenu de la construction du plan d'expérience, nous déterminerons des équations de prédiction à partir des équations générées. Cela permettra de prévoir ou de prédire les résultats pour un ensemble de réglages choisis. De même, il est facile de trouver les réglages correspondants aux réponses optimales. L'impact industriel vise l'industrie du moulage qui bénéficiera des résultats concernant les finis de surface alors que l'industrie aérospatiale profitera des résultats associés à la productivité des opérations d'ébauche.

La présente thèse est structurée comme suit:

- Le chapitre 1, bibliographie, dresse un aperçu général sur les stratégies de coupe et l'utilisation des surfaces de réponses des plans d'expériences par les chercheurs antérieurs ainsi que la modélisation empirique des équations de prédictions. Nous terminons ce chapitre par la formulation du problème en établissant la problématique de la recherche.
- Le chapitre 2, procédure expérimentale, établit le processus et la planification des essais d'usinage ainsi que le choix des facteurs de coupe à étudier et le plan d'expérience utilisé dans cette recherche.

- Le chapitre 3, étude des temps d'usinage, traite l'influence des paramètres de coupe sur le temps d'usinage et de cycle lors de l'usinage en finition sur machine à commande numérique en mode aller simple. Les temps sont par la suite modélisés et des équations de prédictions sont ainsi établies.
- Le chapitre 4, prédiction des finis de surface, présente l'étude et l'analyse des conditions de coupe qui influent le fini des pièces usinées, et la modélisation mathématique des équations de prédictions du fini de surface.
- Le chapitre 5, optimisation simultanée des réponses, traite l'application des fonctions de désirabilité pour l'optimisation simultanée de plusieurs réponses du système et par voie de conséquence la détermination des conditions de coupes optimales.
- Le chapitre 6, validation des résultats, dans ce chapitre une comparaison entre les résultats obtenus par les équations de prédictions et ceux obtenus sur machine à commande numérique s'impose.
- La conclusion, dresse les points essentiels de cette recherche et dégage des recommandations pour l'optimisation d'un système de réponse ainsi que des suggestions pour les travaux futures.
- L'annexe, simulation et étude du temps par FAO, est consacrée à l'étude, à l'analyse des facteurs de coupe qui influent le temps et à la modélisation des temps d'usinage par simulation graphique dans CATIA en semi-finition et en finition, pour finalement comparer les temps FAO à ceux obtenus réellement sur la machine-outil.

CHAPITRE 1

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

Le développement de connaissance passe souvent par l'expérimentation et cette dernière est coûteuse en efforts, en temps et en argent. Il faut prendre soin de bien expérimenter pour en retirer le maximum d'information et par voie de conséquence des bénéfices. Bon nombre de chercheurs ont travaillé sur les stratégies d'usinage, l'application des plans d'expériences aux procédés de fabrication et la modélisation des réponses des systèmes. Dans ce chapitre, nous analysons ceux des travaux qui ont une incidence sur le projet que nous traitons.

1.2 Stratégies de coupe

De nouvelles stratégies d'usinage en multi-axes à commande numérique allant du parcours et de l'orientation des outils à leur géométrie intrinsèque ne cessent d'évoluer. L'outil de coupe peut être incliné par rapport à un ou deux axes d'usinage dans la direction d'avance ou dans celle de la largeur de coupe, l'émersion ou la largeur de coupe peut varier ainsi que les vitesses d'avances et d'autres paramètres de coupe. Ces stratégies et paramètres peuvent être combinés pour générer les conditions optimales d'usinage à commande numérique des formes complexes incluant les moules. À partir des dix dernières années, l'impact de l'orientation outil-pièce sur le fini de surface et la vie de l'outil a fait l'objet de travaux par plusieurs chercheurs. Une bonne partie des recherches réfèrent à la trajectoire d'outil vers le bas ou en mode avalant dans l'usinage à commande numérique en 3 et 5 axes des aciers durs.

Une bonne majorité des chercheurs ont conclu que l'angle d'orientation de l'outil (tilt) entre 10^0 et 20^0 et une trajectoire en avalant, procure la meilleure rugosité de la pièce et la vie la plus longue de l'outil.

D'après Schulz et Hock [1], pendant l'usinage en bout avec une fraise à bout sphérique, les conditions de coupe et la durée de vie de l'outil sont influencées et optimisées par l'inclinaison de l'axe de l'outil. Il a été trouvé selon eux que la coupe en mode avalant avec une orientation de l'angle tilt comprise entre 10^0 et 20^0 génère la meilleure rugosité de la pièce et la vie la plus longue de l'outil. Cette plage de l'orientation de l'outil représente l'optimum de l'angle d'inclinaison de l'outil définissant la stratégie pour l'usinage en haute vitesse des aciers à moules.

Gani et al. [2], se sont intéressés à l'influence de l'orientation de l'outil de coupe, appelé aussi l'engagement ou inclinaison de l'axe d'outil dans la direction de l'avance sur la géométrie de la coupe en 5 axes. Leurs résultats démontrent que l'inclinaison de l'outil a un impact très important sur la section de coupe et par voie de conséquence sur les forces de coupes, les vibrations et la précision dimensionnelle du produit usiné. D'après eux, les vibrations apparaissent quand l'angle d'engagement (lead) atteint ou dépasse les 50 degrés.

Pour réduire le temps d'usinage, la FAO propose souvent la stratégie de coupe en zigzag. D'après Hock [3] et Takahashi et al. [4], l'usage d'une telle stratégie est déconseillé, car elle génère des finis à rugosité inappréciable associée à une courte durée de vie de l'outil.

D'après E-G Ng et al. [5], dans le domaine de l'industrie aérospatiale, spécifiquement l'usinage des formes complexes en Alliage de Titane et à base de Nickel, un intérêt est porté sur l'impact de l'orientation de l'outil de coupe, appelé aussi l'engagement ou encore (lead angle ou inclinaison de l'axe d'outil dans la direction de l'avance), sur les

performances des outils de coupe, en mode de fraisage en bout (end-milling) sur machines hautes vitesses (HSM). Leur recherche est axée principalement sur l'effet de l'orientation de l'outil sur sa durée de vie et le fini de la pièce. L'orientation de l'outil est réglée à 45° avec un outil fraise à bout sphérique de 8 mm de diamètre en PVD revêtu au nitrure de chrome (CrN) et en PVD revêtu au nitrure d'aluminium et titane (TiALN), la pièce à usiner est de nuance Inconel 718 en usinage à sec. Leurs résultats prouvent que l'usinage horizontal vers le bas, est la meilleure alternative concernant la durée de vie de l'outil et qu'avec ce choix de trajectoire, elle est de 50 % plus longue que toutes les autres alternatives de trajectoire. L'évaluation des forces de coupe démontre que l'utilisation des outils de coupe en trajectoire horizontale vers le bas, produit les plus faibles vibrations et améliore l'état de surface de la pièce usinée correspondant à une rugosité de l'ordre de $Ra = 0.4 \mu\text{m}$, contre un Ra de l'ordre de $1.25 \mu\text{m}$ pour un usinage en trajectoire verticale vers le bas. En résumé des tests, l'alternative de la trajectoire horizontale vers le bas procure donc la meilleure durée de vie réelle de l'outil et le meilleur état de surface. Selon eux, l'usage d'outils en PVD revêtu au nitrure d'aluminium et titane (TiALN) est plus performant que l'outil en PVD revêtu au nitrure de chrome (CrN) pour usiner la pièce de nuance Inconel 718 en usinage à sec, à cause de la haute résistance à l'oxydation, de la haute dureté et du faible coefficient de friction du (TiALN).

1.3 Plan d'expérience

Plusieurs auteurs ont déjà utilisé des plans d'expérience pour solutionner des problèmes manufacturiers, notamment pour étudier l'influence des conditions de coupe sur le fini de surface des pièces usinées en 5-axes ou sur la vie de l'outil de coupe. Des essais sont conduits sur une machine-outil à commande numérique 3 ou 5 axes, les trajectoires et les stratégies de coupe sont générées par un système de FAO. Ainsi, plusieurs facteurs pouvant influencer les performances de l'usinage sont pris en compte dans une stratégie globale se servant des plans d'expériences.

Par ailleurs, dans bien des cas d'optimisation, un bon modèle empirique définissant bien un comportement réel dans un domaine expérimental donné peut être autrement plus bénéfique qu'une équation universelle dont on ne connaît pas les paramètres. Dans tous les cas, comme le développement de connaissance passe par l'expérimentation et que cette dernière est souvent coûteuse en efforts, en temps et en argent, il faut prendre soin de bien expérimenter pour en retirer le maximum de bénéfices.

L'expérimentation peut prendre plusieurs formes. À une extrémité, nous retrouvons les expériences fortement improvisées; cette méthode consiste à tester un réglage et à décider ce qui devrait être testé par la suite. Cette pratique est de loin la moins efficace, en raison de la pauvreté de l'information retirée, et aussi la moins efficiente, compte tenu des efforts nécessaires pour retirer ce peu d'information. Un niveau un peu mieux organisé consiste à planifier les essais en choisissant soigneusement les variables de réponses (variables dépendantes) et les réglages des facteurs (variables indépendantes) à tester, mais en ne faisant varier qu'un facteur à la fois. Cette pratique est la plus répandue. Bien qu'elle soit préférable à la première, elle comporte tout de même plusieurs lacunes, dont la principale concerne son incapacité de quantifier les effets des interactions entre les facteurs.

La littérature statistique est très généreuse pour présenter des exemples où cette méthode fournie des résultats erronés ou encore, demande des efforts inutiles pour arriver aux même conclusions. À l'autre extrémité, nous trouvons les expériences structurées selon des plans d'expériences. Un plan d'expériences n'est rien d'autre qu'une liste de réglages, astucieusement choisis, à tester. Ces derniers outils, qui concernent une branche spécialisée de la statistique, visent justement à maximiser la précision et la justesse des résultats fournis. Évidemment, cette méthode est de loin supérieure aux deux autres, ce qui permet d'apprendre beaucoup plus efficacement et se veut une synthèse des meilleures pratiques d'expérimentation et de modélisation empirique.

L'application des plans d'expérience pour l'étude des procédés de coupe remonte à très loin:

Wu [6] a présenté une étude de la durée de vie des outils de coupe basée sur des surfaces de réponses des plans d'expérience. Il a utilisé cette technique pour mener une étude d'optimisation des conditions de coupe en se servant d'un plan composite pour étudier la durée de l'outil sous l'influence de trois variables indépendantes, l'avance, la vitesse de coupe et la profondeur de coupe axiale. Les tests sont conduits en usinage par tournage, le matériau est un acier au carbone SAE 1018, le matériau de l'outil de coupe est du 162P4 78B, tous les tests sont réalisés sans lubrification.

Kline et al.[7] ont étudié le fraisage en bout par le biais des plans d'expérience, il se sont intéressés à l'impact des forces de coupe qui se résument en la déflexion de l'outil par rapport à la pièce à usiner sur les écarts dimensionnels du fini de surface. Les équations de prédiction sont en fonction des conditions de coupe, des propriétés de l'outil et du matériau à usiner. L'usinage est fait pour l'aluminium 7075 sur une fraiseuse horizontale.

Chua et al. [8] se sont consacrés, quant à eux, à l'optimisation des conditions de coupe en utilisant des modèles mathématiques de durée de vie d'outil, des forces de coupe et de puissance consommée. Les modèles sont développés seulement en terme des facteurs jugés influents qui se résument en la vitesse de coupe, l'avance par dent et la profondeur de coupe axiale. L'expérimentation est conduite avec un plan complet en tournage pendant l'opération d'ébauche de la matière T4 (C0.45%, Si 0.25 %, Mn0.70%) avec un outil au carbure Sandvik 425 P25 TiN revêtu.

Astakhnov et al. [9] se sont penchés sur l'analyse et la méthodologie d'application des plans d'expériences dans le domaine de l'usinage des métaux.

Alauddin et El-Baradie [10] se sont intéressés, à travers les plans d'expériences, au développement d'un modèle de vie de l'outil en fraisage en bout de l'acier (190 HB) en mode d'usinage sans lubrification et en grande vitesse. Le modèle développé est fonction de la vitesse de coupe, de l'avance par dent et de la profondeur de coupe axiale.

Kuang-Hua et Hung-Yen [11] ont développé un modèle de précision dimensionnelle par la méthode des surfaces de réponse pour l'usinage en fraisage périphérique sans lubrification d'un alliage d'aluminium, sous l'influence de la dureté Brinell du matériau à usiner, de la vitesse de coupe, de l'avance par dent, de la profondeur de coupe axiale et de la profondeur de coupe radiale.

Darwish et El-Tamimi [12] ont présenté une étude concernant le développement d'un modèle de surface de réponse de la rugosité pour le tournage du super alliage au nickel 718 (300 BHN), utilisant différentes matières d'outil; CBN (nitrure de bore cubique), carbure et céramique sous les conditions d'usinage à sec avec un rayon d'outil à bout sphérique constant. Le modèle est développé en termes de vitesse de coupe, d'avance par dent et de profondeur de coupe axiale. Ils ont étudié ces variables à travers les plans d'expériences utilisant la méthodologie des surfaces de réponse (RSM). Un modèle du fini de surface correspondant à chaque type d'outil est présenté.

Songmene et al. [13] se sont servis de ce dernier modèle pour étudier l'influence de l'avance, de la vitesse de coupe et de la profondeur de coupe axiale sur la rugosité des pièces en composite d'aluminium GrA-Ni, usinées en tournage. Le matériau d'outil utilisé est le diamant polycristalin (PCD).

Choudhury et El-Baradie [14] ont utilisé cette technique pour étudier l'effet de l'avance, de la vitesse de coupe et de la profondeur de coupe axiale sur la durée de vie de l'outil, le fini de surface et les forces de coupe, pendant l'usinage en tournage de l'inconel 718. Leur étude porte sur le développement et la modélisation des surfaces de réponse du

ystème concernant la durée de vie de l'outil, le fini de surface et les forces de coupe à l'aide des plans d'expériences utilisant la méthodologie des surfaces de réponses.

Pour Paulo Davim [15], l'objectif d'une de ses recherches est l'établissement d'une corrélation entre la vitesse de coupe, l'avance par dent et la profondeur de coupe axiale avec l'évaluation de la rugosité R_a et R_t . Il présente une étude sur l'influence des conditions de coupe sur le fini de surface en tournage, le matériau usiné est l'acier 9SMnPb28k (DIN), sa technique se base sur le plan d'expériences de Taguchi.

1.4 Modèles mathématiques

• Durée de vie d'outil

Wu [6], Chua et al. [8], Alauddin et El-Baradie [10] et Choudhury et El-Baradie [14] ont utilisé pour la durée de vie de l'outil, le modèle mathématique suivant:

$$T = C V^k f^\alpha d^\beta \quad (1.1)$$

Avec :

T : durée de vie de l'outil (min)

C, k, α et β comme constantes.

V : vitesse de coupe (m/min).

f : avance (mm/rev).

d : profondeur de coupe (mm).

• Rugosité

Darwish et El-Tamimi [12] et Choudhury et El-Baradie [14] ont développé le modèle du fini de surface ayant la forme suivante :

$$R_a = C V^k f^l d^m \quad (1.2)$$

Avec :

R_a : fini de surface (μm).

C, k, l, m : constante.

V : vitesse de coupe (m/min).

f : avance (mm/rev).

d : profondeur de coupe (mm).

Quant à Kuang-Hua et Hung-Yen [11] leur modèle mathématique développé pour prédire l'erreur dimensionnelle :

$$\delta = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i X_i + \sum_{i=1}^5 b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 b_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (1.3)$$

Ou :

δ : erreur dimensionnelle (μm)

X_1 : dureté Brinell du matériel à usiner (HB)

X_2 : vitesse de coupe (m/min)

X_3 : avance (mm/rev)

X_4 : profondeur de coupe radiale (mm)

X_5 : profondeur de coupe axiale (mm)

$X_i X_j$: interactions des facteurs

b : constantes

ε : erreur expérimentale

Choudhury et El-Baradie [14] et Paulo Davim [15] se sont aussi servis du modèle mathématique de l'équation (1.3) pour $i = 3$.

Ou :

δ : Rugosité (μm).

X_1 : vitesse de coupe (m/min).

X_2 : avance (mm/rev).

X_3 : profondeur de coupe axiale (mm).

Songmene et al. [13] ont utilisé le modèle mathématique du fini de surface suivant, afin de prédire la rugosité R_a :

$$R_a = K_0 (\alpha_1 V^k + \alpha_2 f^l + \alpha_3 d^m) \quad (1.4)$$

Avec :

R_a : fini de surface (μm).

K_0, k, l, m, α_i : constante à déterminer.

V : vitesse de coupe (m/min).

f : avance (mm/rev).

d : profondeur de coupe (mm).

- **Forces de coupe**

Pour Chua et al. [8] et Choudhury et El-Baradie [14] le modèle mathématique utilisé pour les forces de coupes est représenté comme suit :

$$F_{total} = C_2 V^{k_2} f^{\alpha_2} d^{\beta_2} \quad (1.5)$$

Avec :

C_2, k, α et β comme constantes

V : vitesse de coupe (m/min)

f : avance (mm/rev)

d : profondeur de coupe (mm)

- **Puissance consommée**

Choudhury et El-Baradie [14] et Chua et al. [8] ont développé pour la puissance consommée, le modèle suivant :

$$P = C_3 V^{k_3} f^{\alpha_3} d^{\beta_3} \quad (1.6)$$

Avec :

C_3, k, α et β comme constantes.

V : vitesse de coupe (m/min)

f : avance (mm/rev)

d : profondeur de coupe (mm)

1.5 Formulation du problème

Les temps d'usinage et de finition des moules sont conditionnés par le débit du copeau. Des gains significatifs en temps de réalisation et en coûts d'usinage associés peuvent être obtenus en optimisant les paramètres de coupe lors de l'usinage. La plupart des recherches antérieures ne tiennent pas compte de l'effet de tous les facteurs en même temps, une grande majorité des chercheurs s'intéressent seulement à la vitesse de coupe, l'avance par dent, la profondeur de coupe axiale et parfois l'émersion de l'outil, alors que d'autres s'intéressent seulement aux inclinaisons des outils (angle d'engagement et ou angle d'inclinaison).

Contrairement aux travaux précédents, les modèles sont développés en termes de vitesse de coupe, d'avance par dent, de profondeur de coupe axiale, d'émersion de l'outil en largeur de coupe, d'angle d'engagement (lead) et d'angle d'inclinaison (tilt). Tous ces facteurs sont pris en considération sans exception et sont décidés lors de la génération automatique des trajectoires d'outils dans la FAO.

Dans ce travail, nous présentons une étude et nous modélisons des modèles de réponses du système, comprenant, le temps d'usinage réel, le temps de cycle, la rugosité R_a et la rugosité R_t , pendant le fraisage de l'acier à moules de type P20 (32HRC, 320 BHN).

Le système de fabrication assistée par ordinateur (FAO) du logiciel CATIA V5 R8 est utilisé. La méthode des plans d'expériences est utilisée dans ce travail pour l'investigation de ces variables utilisant la méthodologie des surfaces de réponses.

CHAPITRE 2

PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

2.1 Introduction

L'ensemble des paramètres d'usinage dont la vitesse de coupe, l'avance par dent, la profondeur de coupe, la largeur de coupe et les orientations de l'outil seront variées simultanément lors des essais. Un plan d'expérience est choisi de telle manière à assurer une meilleure précision des résultats. Une fois le modèle (polynôme) élaboré par modélisation, diverses options d'optimisation peuvent être envisagées, plusieurs applications standards de programmation linéaire et non linéaire le permettent. Les facteurs expérimentaux sont les variables indépendantes, ce sont elles qui sont reliées à la réponse par une équation de prédiction. Les facteurs maîtrisés sont à leur tour divisés en deux catégories, ceux modifiés durant les expériences et ceux maintenus constants. Les facteurs maintenus constants constituent notre système technologique et doivent être mentionnés, car les résultats trouvés seront conditionnels aux réglages de ces facteurs. Nous voulons tester l'influence de six facteurs (intrants) sur un certain processus dont nous avons des réponses numériques (extrants). Le diagramme expérimental ci-dessous représente cette situation.

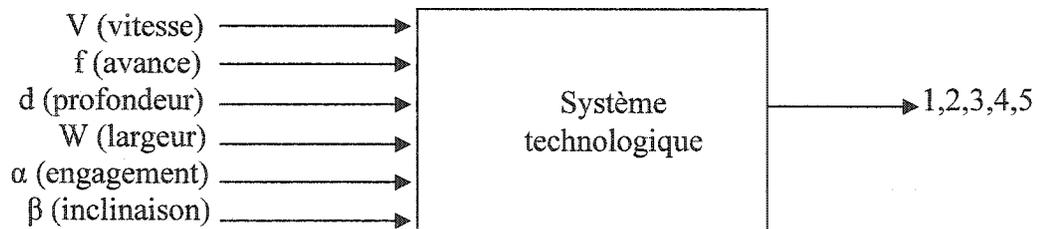


Figure 1 Diagramme expérimental

Pour raffiner le processus présenté à la figure 1, nous pouvons résumer les étapes proposées pour le déroulement des expériences comme suit:

- Choix des réponses
- Choix des facteurs et de leurs niveaux;
- Choix d'un plan d'expériences;
- Exécution des expériences;
- Analyse des résultats;
- Interprétation et recommandations;

2.2 Système technologique

Le système technologique renferme tous les facteurs maintenus constants pendant les essais, et est composé principalement de :

2.2.1 Machine outil à commande numérique CNC

La machine utilisée pendant les expériences est une machine à commande numérique 5 axes ayant les caractéristiques et les capacités suivantes :

Tableau I

Spécification de la machine à commande numérique

Marque	Hitachi Seiki 5 axes
Type	VS50
Axes linéaires	X, Y, Z
Axes Rotatifs	A' : angle de rotation de l'axe Z de 0° à 360° B' : angle de rotation de l'axe Y de 0° à -105°
Vitesse de Broche	100 à 12000 tr /min
Avances rapides (axes X, Y)	40 000 mm / min
Avance rapide (axe Z)	24 000 mm / min
Avance d'usinage	1 à 15 000 mm / min



Figure 2 Machine 5 axes à commande numérique utilisée

- **Approche et retrait d'outil**

L'approche d'outil est le mouvement que fait l'outil avant d'atteindre la pièce à usiner et ceci pour chaque essai.

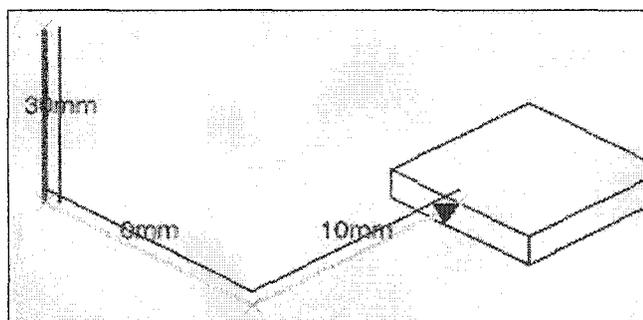


Figure 3 Approche d'outil ¹

¹ Tiré et adapté de CATIA V5 R8.

Le retrait d'outil est le mouvement que fait l'outil en quittant la pièce à usiner.

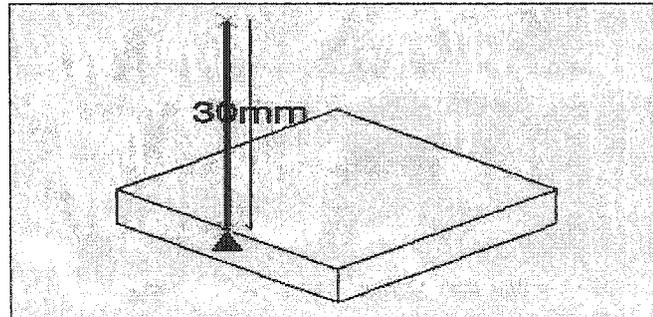


Figure 4 Retrait d'outil¹

- **Stratégies d'usinage**

L'usinage se fait en aller simple pendant les essais, la coupe est en avalant. La direction d'usinage est horizontale vers le bas comme la montre la figure suivante.

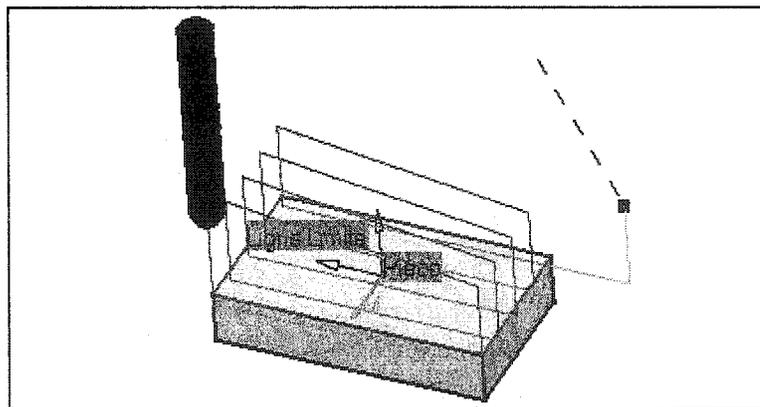


Figure 5 Trajectoire Aller simple

¹ Tiré et adapté de CATIA V5 R8

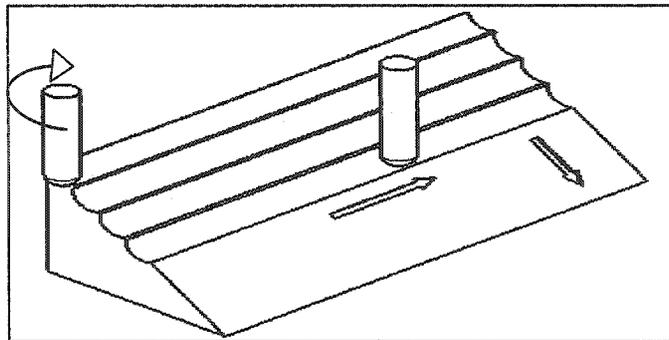


Figure 6 Trajectoire horizontale en avalant vers le bas

2.2.2 Pièce

- La pièce à usiner pendant les expériences est un acier à moule de type P20 d'une dureté de 30 HRC.
- Les dimensions des pièces à usiner constituent le volume de coupe et sont illustrées dans la figure 7.

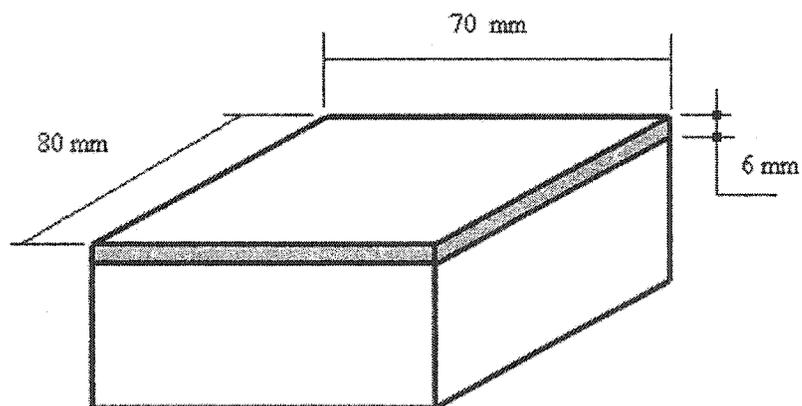


Figure 7 Volume de la pièce à usiner

- Le système d'arrosage est maintenu fonctionnel pendant l'usinage et est sous forme d'huile soluble.

2.2.3 Outil de coupe

- L'outil de coupe utilisé pendant les essais est un outil à bout sphérique (ballnose) de diamètre \varnothing 10 mm, à plaquette comme illustré dans la figure 8.

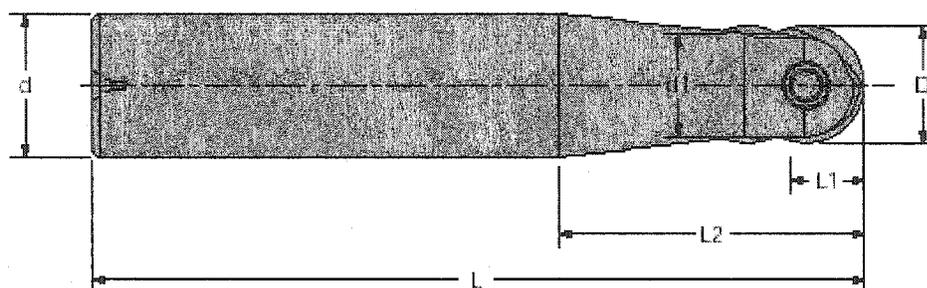


Figure 8 Outil de coupe à bout sphérique¹

Les caractéristiques dimensionnelles de l'outil de coupe utilisé pendant les essais sont illustrées dans le tableau II.

Tableau II

Caractéristiques dimensionnelles de l'outil de coupe

Diamètre plaquette D	Longueur de coupe L1	Longueur effective L2	Longueur totale L	Diamètre du corps d	Diamètre d 1
10 mm	6.00 mm	35.0 mm	150 mm	12 mm	8.50 mm

¹ Tiré et adapté de Minicut (2003).

- Les plaquettes utilisées sont des pastilles se composant de 2 dents en carbure K20 revêtu du nitrure d'aluminium et au titane (TiAlN).

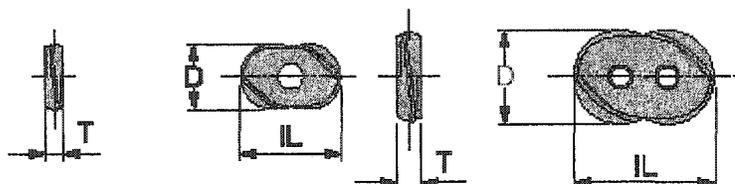


Figure 9 Plaquette boule de marque Minicut¹

Les caractéristiques dimensionnelles des plaquettes utilisées pendant les essais sont illustrés dans le tableau III.

Tableau III

Caractéristiques dimensionnelles des plaquettes

Diamètre plaquette D	Longueur plaquette IL	Épaisseur plaquette T	Revêtement plaquette
10 mm	13.20 mm	3 mm	TiAlN

Les recommandations de coupe du fabricant des pastilles sont illustrées dans le tableau suivant.

¹ Tiré et adapté de Minicut (2003).

Tableau IV

Condition de coupe des Plaquettes Minicut International¹

		CAST IRON		STEELS		
		GREY	NODULAR	LOW CARBON up to: 240 BHN 80 Kg / mm ²	HIGH CARBON MEDIUM TENSILE 240-300 BHN 105 Kg / mm ²	HIGH ALLOY TOOL STEEL 300-400 BHN 105 - 140 Kg / mm ²
MATERIALS	SPEEDS	INSERT GRADES ROUGHING		INSERT GRADES FINISHING		
		500-1000 SFM 150-300 M/min	400-800 SFM 120-240 M/min	500-1000 SFM 150-300 M/min	400-800 SFM 120-240 M/min	300-600 SFM 90-180 M/min
FIELD DATA	IPR	K-20	K-20	P-30	P-30	P-30
		K-10/K-20		K-10/K-20		
	INCH	.006 / .010 .15 / .25	.006 / .010 .15 / .25	.006 / .010 .15 / .25	.006 / .010 .15 / .25	.006 / .010 .15 / .25
	METRIC					

Selon le tableau, notre acier de dureté de l'ordre de 30 HRC (Rockwell), ce qui équivaut à une dureté brinell de 270 BHN, et en utilisant des plaquettes revêtues et au TiAlN (K20) la plage concernant la vitesse de coupe se situe de 90 à 300 m / min comme c'est indiqué dans le tableau ci-dessus.

Dans notre étude nous avons choisi un intervalle qui tient compte de ces recommandations. Pour la finition, nous avons opté pour la variation de la vitesse de coupe entre 90 à 300 m / min et de 0.1 à 0.3 mm concernant l'avance par dent.

¹ Tiré et adapté de Minicut (2003).

2.3 Réponses du système

Idéalement, les réponses doivent être quantitatives (numériques). Toutefois, dans plusieurs cas cette situation n'est pas applicable. Il faut donc transformer les données disponibles pour les rapprocher de cet idéal. En ce qui nous concerne, nos réponses sont toutes de types quantitatives et sont les suivantes :

- **Temps d'usinage et de cycle (réel)**

Le temps d'usinage réel représente le temps de coupe mesuré directement dans le contrôleur de la machine outil, excluant les déplacements en mode rapide, les approches et les retraits d'outil. Le temps de cycle réel représente le temps obtenu directement par chronométrage des opérations d'usinage sur la machine à commande numérique incluant les déplacements en mode rapide, les approches et les retraits d'outils.

- **Rugosité Ra et Rt**

Les rugosités se caractérisent en fini de surface de la pièce usinée, les crêtes sont mesurées à l'aide d'un dispositif appelé rugosimètre.

2.4 Choix de facteurs indépendants et leurs niveaux

Les facteurs qui seront variés durant les expériences sont ceux dont les effets seront quantifiés. Ils peuvent être quantitatifs ou qualitatifs. De façon générale, les plans d'expériences s'utilisent préférentiellement avec des facteurs quantitatifs.

Toutefois, l'usage de facteurs qualitatifs n'est pas exclu. Plusieurs plans d'expériences permettent d'analyser et de modéliser les effets de ces facteurs. Ces facteurs sont les suivants :

- **Vitesse de coupe, V** : vitesse (m / min)

C'est la vitesse résultante de la vitesse de rotation de l'outil combinée au diamètre.

- **Avance par dent, f :** Avance par dent (mm/dent)

- **Profondeur de coupe, d :** (mm)

C'est la profondeur de coupe correspondant à la profondeur de passe de l'outil dans le sens de l'axe vertical (mm).

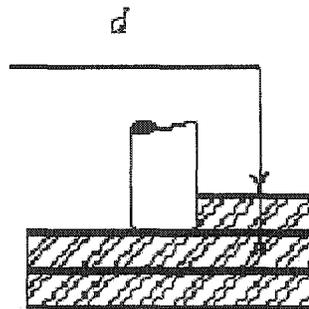


Figure 10 Profondeur de passe axiale (mm)¹

- **Largeur de coupe ou Émersion, W :** (mm)

C'est la largeur de coupe dans la direction radiale de la pièce à usiner.

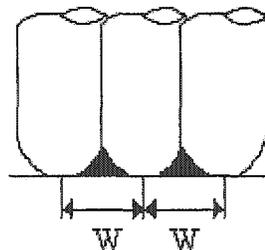


Figure 11 Émersion (mm)

¹ Tiré et adapté de Catia V5 R8.

- **Angle d'engagement**

C'est l'angle d'orientation (α) de l'outil par rapport à la pièce dans le sens de l'avance.

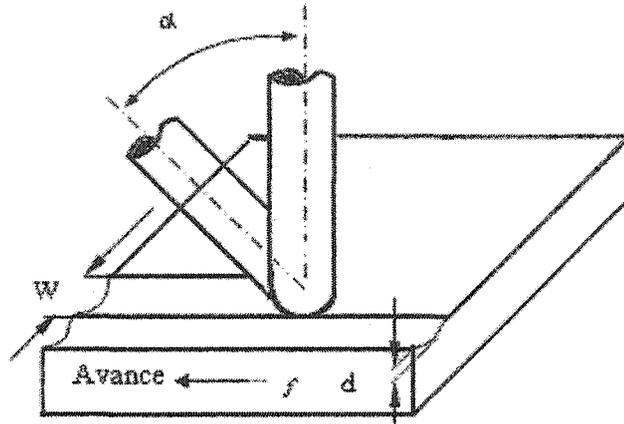


Figure 12 Angle d'engagement

- **Angle d'inclinaison**

C'est l'angle d'orientation (β) de l'outil par rapport à la pièce perpendiculairement au sens de l'avance.

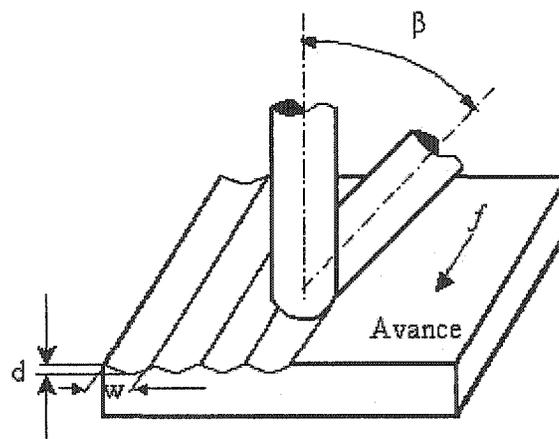


Figure 13 Angle d'inclinaison

Plage des variations des conditions de coupe

Dans la méthodologie des plans d'expériences les variables du processus sont appelées facteurs. Pour le plan de surface de réponse et la procédure d'analyse, 6 différents facteurs ont été identifiés comme étant importants dans le processus d'usinage multi-axes utilisant une machine à commande numérique de type 5 axes.

Dans l'identification des facteurs, toutes les variables possible pouvant influencer la qualité de surface usinée ainsi que le temps de réalisation des pièces sont prises en considération. Dans l'objet du plan de surface de réponse, chaque facteur a été évalué à trois différents niveaux. Les trois niveaux correspondent à trois valeurs différentes du facteur, le plus bas, le centre et le maximum constituant ainsi la plage de travail du facteur. Le tableau V illustre les facteurs considérés et leurs niveaux respectifs.

Tableau V

Codage et Plage des variations des conditions de coupe

Facteurs	Niveaux			
V : Vitesse de coupe	90	164,317	300	m /min
f : Avance par dent	0.1	0.173	0.3	mm/ dent
d : Profondeur de coupe	0.35	0.477	0.65	mm
W: Emersion	0.5	0.866	1.5	mm
α : Angle d'engagement	0	4.56	30	degré
β : Angle d'inclinaison	0	4.56	30	degré

Il à noter que les valeurs centrales des facteurs ne sont pas les valeurs médianes mais des valeurs obtenues par l'entremise de l'équation de décodage (2.9) et (2.10).

- **Codage des variables**

Pour mener les expériences, les facteurs doivent être codés du fait de leurs différence d'unités, Le codage des variables améliore ainsi la précision des calculs et permet de comparer un facteur par rapport aux autres sans l'influence de leurs grandeurs, ceci est intéressant pour déterminer l'importance relative de chaque facteur et le sens de sa contribution (+ ou -). Mentionnons que seules les valeurs extrêmes et centrales de chaque facteur seront testées. À cette fin, ces valeurs sont codées de la manière présentée dans le tableau VI ci-dessous.

Ainsi dans la matrice des expériences, les facteur prendrons toutes les valeurs codées. Les variables sont codées en tenant compte des conditions extrêmes de coupe de la machine à commande numérique et des recommandations du manufacturier de l'outil, pour éviter les vibrations et les éventuels incidents.

Tableau VI

Codage des facteurs

Facteur	V			f			d		
Valeur codée	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
Valeur réelle	90	164.317	300	0.1	0.173	0.3	0.35	0.477	0.65

W			α			β		
-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
0.5	0.866	1.5	0	4.56	30	0	4.56	30

2.5 Plan d'expériences

La conduite des expériences nécessite l'établissement des fiches d'expériences planifiées et contenant tous les réglages des facteurs pour chaque essai, cette fiche est appelée plan d'expériences. Le choix du plan d'expériences est une étape déterminante pour le succès de l'expérience. Deux grandes catégories de plans factoriels sont présentées, soit ceux pour tamiser un grand nombre de facteurs et ceux pour modéliser de façon raffinée :

- La première consiste à tester tous les facteurs retenus à leurs niveaux extrêmes dans le but de détecter les facteurs les plus influents et potentiellement leurs interactions, par la suite les facteurs qui n'ont pas d'influence sur le système seront éliminés; c'est le plan de tamisage.
- La deuxième catégorie consiste à tamiser les facteurs et à modéliser le système en même temps via le même plan d'expérience, c'est le plan de surface de réponse.

Généralement, pour la conduite d'une expérimentation on recommande deux étapes à suivre, soit l'établissement d'un premier plan d'expériences juste pour le tamisage de tous les facteurs jugés importants, par la suite élaborer un deuxième plan d'expérience pour modéliser avec seuls les facteurs qui restent en jeu après l'étape de tamisage. Cette démarche n'est pas toujours réalisable vue qu'elle peut être très coûteuse dépendamment du domaine à expérimenter, c'est le cas du domaine nous concernant. Pour cela nous avons opté pour un plan d'expérience de surface de réponse. Le plan d'expérience considéré dans ce travail est le plan de Box-Wilson utilisant les surfaces de réponse aussi dénommé central composite (Central Composite Design).

De base, ce plan possède un domaine hypersphérique, mais moyennant une légère distorsion au niveau de l'estimation des coefficients, il est possible de tronquer les axes

en étoile pour lui donner un domaine hypercubique. Dans ce cas, il se nomme le plan composite central tronqué aux faces (FCCD Face-Centered Central Composite Design). Pour des facteurs quantitatifs, ils sont normalement le meilleur choix selon les expérimentateurs. Un total de 46 essais a été nécessaire afin d'isoler l'effet des 6 variables indépendantes de notre étude.

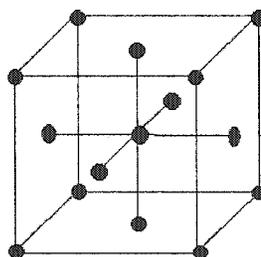


Figure 14 Plan de Box Wilson, central composite, tronqué aux faces

Le plan central composite à face centrée de Box-Wilson utilisé totalise 46 essais, ce nombre d'essai est proposé par des tables et des logiciels de statistiques, notamment le logiciel STATGRAPHICS comme le montre la figure suivante.

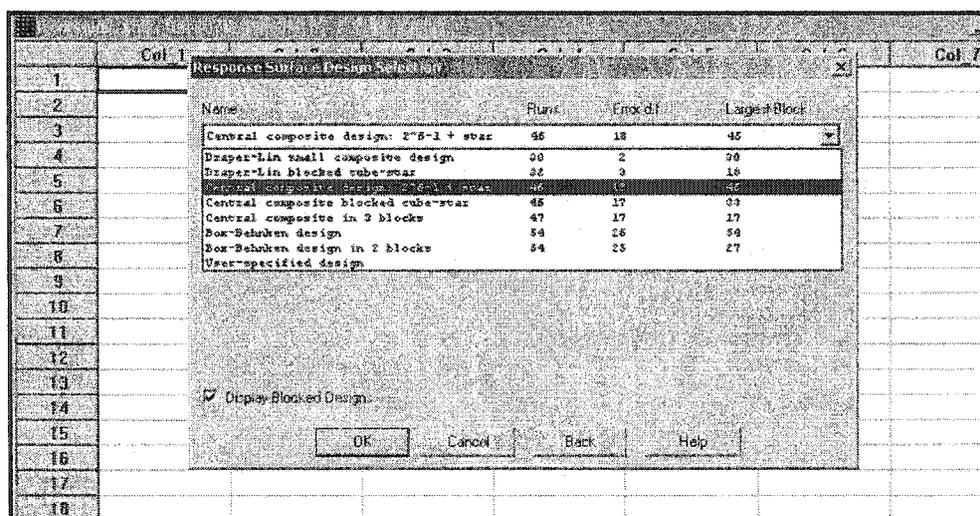


Figure 15 Sélection du plan de surface de réponse dans Statgraphics

2.6 Planification des essais et matrice des expériences

Le tableau VII ci-dessous illustre la méthodologie d'exécution des expériences. Il est à noter que ces réglages se font directement au niveau de la FAO du logiciel de CATIA V5 R8, par la suite un code machine est généré pour chaque essai et finalement l'exécution de l'usinage sur la machine à commande numérique.

Tableau VII

Matrice des expériences

Essai	block	Vitesse	Avance	Profondeur	Emersion	Engagement	Inclinaison
1	1	0	0	0	-1	0	0
2	1	-1	-1	-1	1	1	1
3	1	1	1	-1	-1	-1	-1
4	1	-1	0	0	0	0	0
5	1	-1	1	1	-1	-1	-1
6	1	0	0	0	0	0	-1
7	1	-1	1	1	1	-1	1
8	1	-1	-1	-1	1	1	-1
9	1	0	-1	0	0	0	0
10	1	0	0	0	0	1	0
11	1	-1	-1	1	1	1	1
12	1	1	-1	-1	1	1	1
13	1	1	-1	-1	-1	1	-1
14	1	-1	-1	-1	1	-1	1
15	1	-1	1	1	1	1	-1
16	1	1	1	1	-1	-1	1
17	1	-1	1	-1	1	-1	-1
18	1	0	0	-1	0	0	0
19	1	1	-1	-1	1	-1	-1
20	1	1	1	-1	-1	1	1

Essai	block	Vitesse	Avance	Profondeur	Emersion	Engagement	Inclinaison
21	1	-1	-1	1	-1	-1	1
22	1	1	1	1	1	-1	-1
23	1	1	1	1	1	1	1
24	1	0	0	0	0	0	0
25	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
26	1	-1	1	-1	1	1	1
27	1	0	0	0	1	0	0
28	1	0	0	1	0	0	0
29	1	1	-1	1	1	-1	1
30	1	1	-1	-1	-1	-1	1
31	1	-1	1	-1	-1	-1	1
32	1	1	-1	1	-1	-1	-1
33	1	0	0	0	0	0	1
34	1	1	1	-1	1	1	-1
35	1	1	-1	1	-1	1	1
36	1	1	0	0	0	0	0
37	1	-1	-1	1	-1	1	-1
38	1	-1	-1	1	1	-1	-1
39	1	-1	1	1	-1	1	1
40	1	0	1	0	0	0	0
41	1	0	0	0	0	0	0
42	1	-1	1	-1	-1	1	-1
43	1	1	1	-1	1	-1	1
44	1	1	-1	1	1	1	-1
45	1	0	0	0	0	-1	0
46	1	1	1	1	-1	1	-1

Code	Niveaux					
	V	f	d	W	α	β
-1	90	0.1	0.35	0.5	0	0
0	164.317	0.173	0.477	0.866	4.56	4.56
1	300	0.3	0.65	1.5	30	30

2.7 Formulation du modèle mathématique

Si on assume que toutes les variables indépendantes soient mesurables donc significatives, la réponse du système est exprimée comme :

$$Y = f (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) \quad (2.7)$$

Avec :

X_1, X_2, \dots, X_6 , les variables indépendantes, représentant respectivement la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de coupe, la largeur de coupe, l'angle d'engagement de l'outil et l'angle d'orientation de l'outil.

Y : réponse, modélisée d'après l'équation (2.8).

La relation qui relie les réponses du système de l'opération de fraisage à commande numérique en 5 axes simultanés et les variables indépendantes peut être représenté par l'équation généralement utilisée par bon nombre de chercheurs comme à l'équation (2.8).

D'après le plan d'expériences choisi (plan composite à faces centrées), les réponses sont étudiées et modélisées d'après l'équation linéarisée (2.8) :

$$\ln (Y_i) = K + \sum_{i=1}^6 b_i X_i + \sum_{i=1}^6 b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 b_{ij} X_i X_j \quad (2.8)$$

Avec :

Y_i : Réponse codée du système.

K : Moyenne arithmétique des réponses en échelle logarithmique.

b_i : Effet de chaque variable (facteur) sur la réponse.

b_{ii} : Effet du terme quadratique associé au facteur i sur la réponse.

b_{ij} : Effet de l'interaction entre les facteurs i et j sur la réponse.

$X_i X_j$: interactions entre les variables codées.

X_i : variable codée, peut être exprimé en variable naturelle par l'entremise de l'équation de décodage (2.9) pour V (vitesse), f (avance), d (profondeur) et W (largeur de coupe) :

$$X_i = \frac{\text{Ln}(X) - \frac{1}{2} (\text{Ln}(X_{\max}) + \text{Ln}(X_{\min}))}{\frac{1}{2} \text{Ln}(X_{\max} / X_{\min})} \quad (2.9)$$

Pour l'angle d'engagement α et l'angle d'inclinaison β , l'équation (2.9) s'écrira avec un décalage du fait que, α et β peuvent prendre la valeur 0 dans le cas où il n'y a pas d'orientation d'outil.

$$X_i = \frac{\text{Ln}(X+1) - \frac{1}{2} [\text{Ln}(X_{\max}+1) + \text{Ln}(X_{\min}+1)]}{\frac{1}{2} \text{Ln} \left[\frac{(X_{\max}+1)}{(X_{\min}+1)} \right]} \quad (2.10)$$

Avec :

X_i : variable codée.

X : variable naturelle (vitesse, avance, profondeur de coupe, émersion, angle d'engagement et angle d'inclinaison).

X_{\min} : variable naturelle à sa valeur minimale.

X_{\max} : variable naturelle à sa valeur maximale.

- Les effets des facteurs b_i et celui des interactions $b_{i,j}$ se calcule comme le montre l'exemple du tableau suivant, soit deux facteurs X et Y en variable codée:

Tableau VIII

Exemple de calcul des effets

Essai	Moyenne	Facteur		Intéraction	Réponse
		X	Y	XY	
1	1	-1	-1	1	0
2	1	-1	1	-1	10
3	1	1	-1	-1	80
4	1	0	1	1	30
Effet Standardisé	$[1*(0)+$ $1*(10)$ $+1*(80)+$ $1*(30)]/4$ $= 30$	$[-1*(0)-$ $1*(10)$ $+1*(80)+$ $0*(30)]/4$ $= 17.5$	$[-1*(0)+1$ $*(10) -$ $1*(80)+$ $1*(30)]/4$ $= -10$	$[1*(0)-$ $1*(10) -$ $1*(80)+$ $1*(30)]/4$ $= -15$	

- La réponse du système de l'exemple se modélise comme suit :

$$\text{Réponse} = 30 + 17.5 * X - 10 * Y - 15 * XY \quad (2.11)$$

Ou la réponse est bien évidemment exprimée en variable codées.

- Pour un modèle de 1^{er} degré sans interactions et le terme quadratique ne sont pas significatifs, l'équation (2.8) peut être transformée en une équation de degré 1 comme suit :

$$\text{Ln } Y = \text{Ln } C + \lambda \text{Ln } V + \delta \text{Ln } f + \zeta \text{Ln } P + \eta \text{Ln } W + \theta \text{Ln } \alpha + \mu \text{Ln } \beta \quad (2.12)$$

Par l'entremise des équations de décodage (2.9) et (2.10), l'équation (2.12) se transformera en réponse composée de variables naturelles et s'écrira comme suit :

$$Y = C V^\lambda f^\delta P^\zeta W^\eta (\alpha+1)^\theta (\beta+1)^\mu \quad (2.13)$$

Avec :

Y : réponse du système

C, λ , δ , ζ , η , θ et μ étant des constantes expérimentales à déterminer.

V : Vitesse de coupe $90 \leq V \leq 300$ m/min

f : Avance par dent $0.1 \leq f \leq 0.3$ mm

W: Emersion $0.35 \leq W \leq 0.65$ mm

α : Engagement $0 \leq \alpha \leq 30$ degrés.

β : Inclinaison $0 \leq \beta \leq 30$ degrés.

Si les angles d'engagements et les angles d'inclinaisons sont égaux à zéro, l'équation (2.12) se simplifiera comme suit :

$$Y = C V^\lambda f^\delta P^\zeta W^\eta \quad (2.14)$$

2.8 Simulation graphique sur CATIA V5

Les simulations graphiques sont générées par le module d'usinage du logiciel de FAO de CATIAV5 R8, après introduction des paramètres de coupe de chaque essai, les codes machine sont par la suite générés dans un post processeur et finalement l'usinage sur la machine à commande numérique.

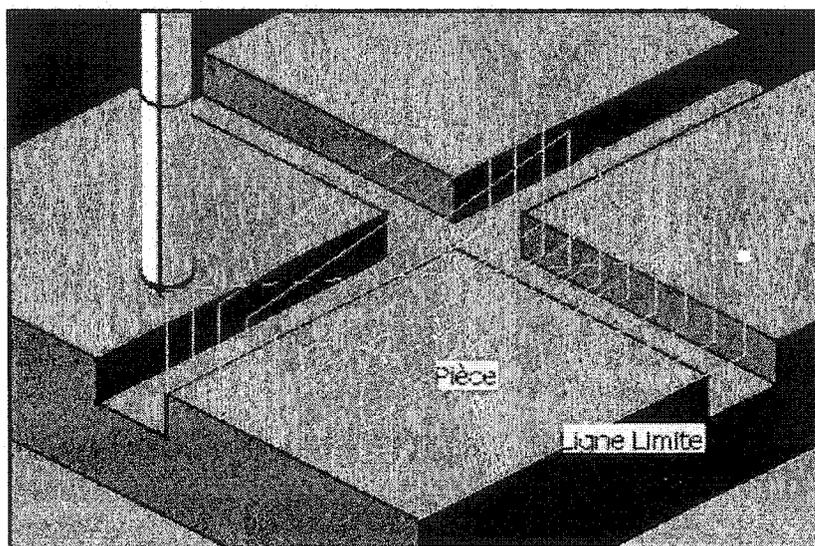


Figure 16 Simulation de Trajectoire en Aller simple ($\alpha = \beta = 0^\circ$)

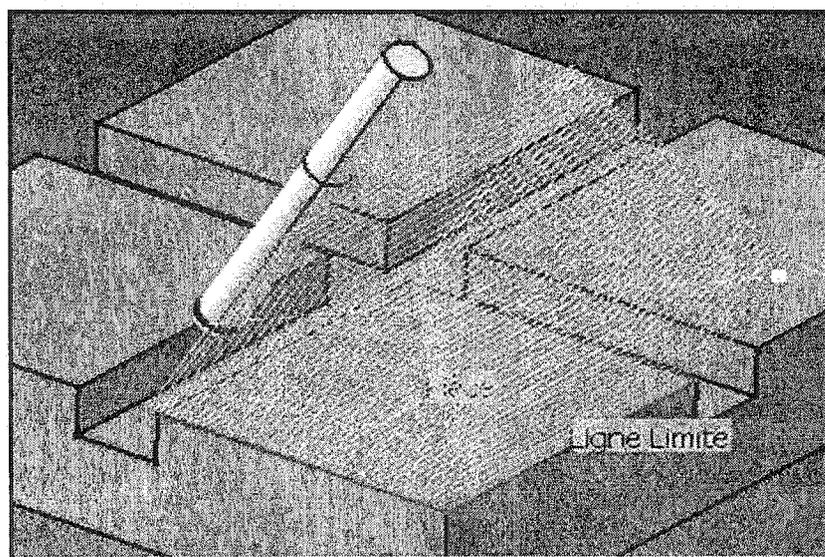


Figure 17 Simulation de Trajectoire en Aller simple ($\alpha = 0^\circ$, $\beta = 30^\circ$)

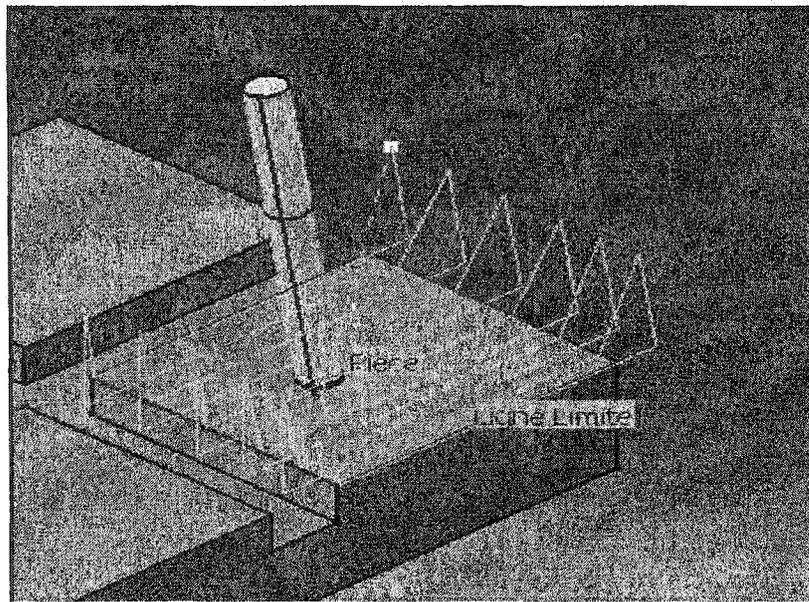


Figure 18 Simulation de Trajectoire en Zigzag ($\alpha = 4.56^\circ$, $\beta = 0^\circ$)

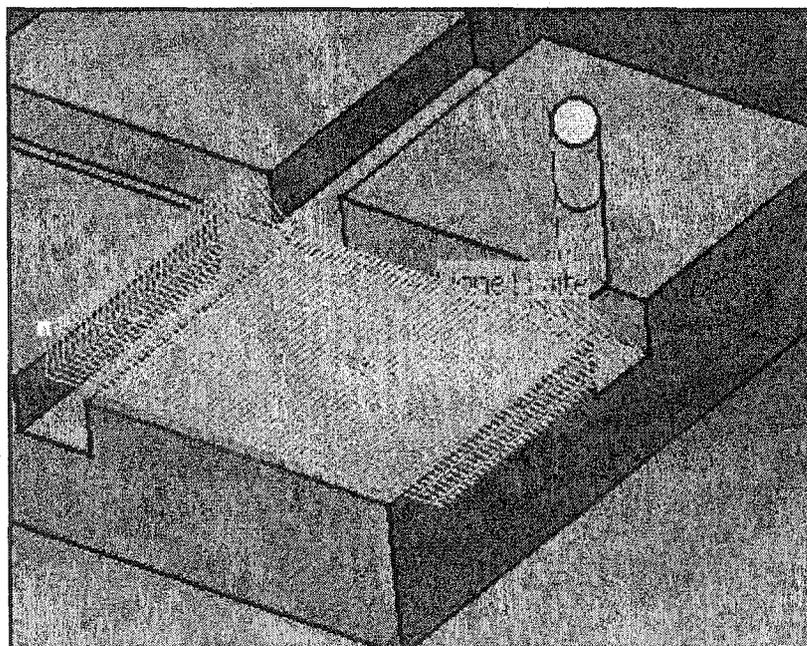


Figure 19 Simulation de Trajectoire en Zigzag ($\alpha = 4.56^\circ$, $\beta = 4.56^\circ$)

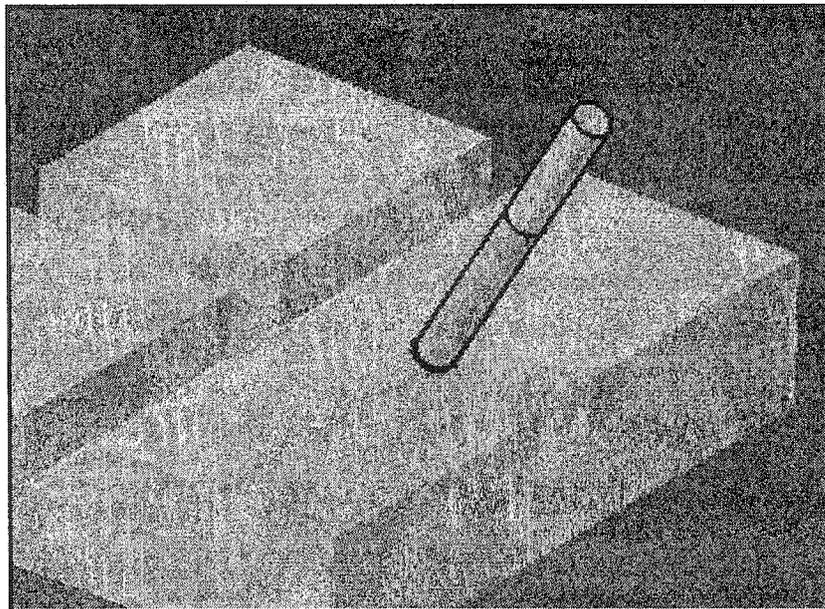


Figure 20 Simulation de coupe ($\alpha = 0^\circ$, $\beta = 30^\circ$)

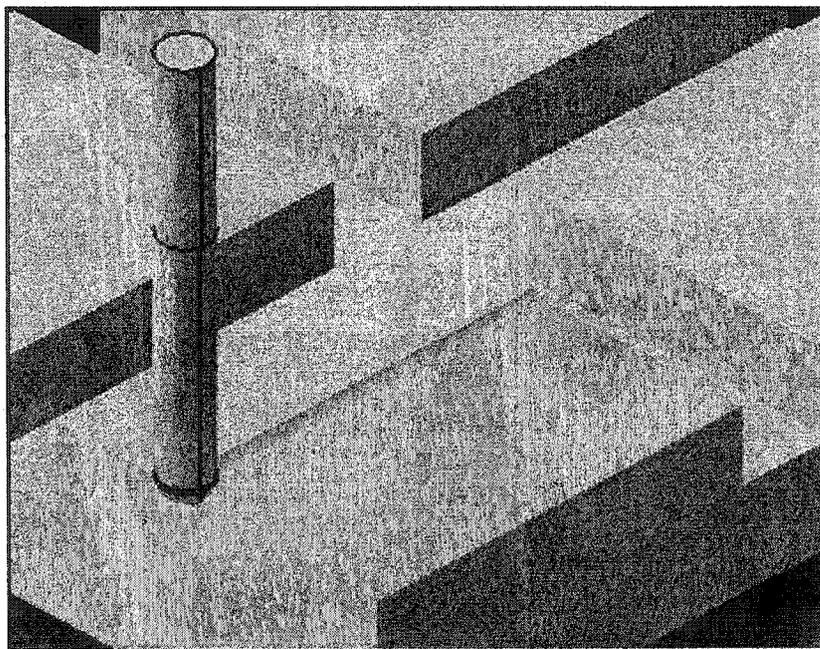


Figure 21 Simulation de coupe ($\alpha = \beta = 0^\circ$)

CHAPITRE 3

ÉTUDE DES TEMPS D'USINAGE

3.1 Introduction

L'acier P20 est depuis longtemps l'acier le plus utilisé pour la fabrication des moules à injection dans le domaine du plastique. Il est disponible en mi-dur de l'ordre de 32 HRC et en dur avec une dureté de 40 HRC. Ce type d'acier est un produit performant, mais son usinabilité varie et peut affecter les temps d'usinage, les temps de cycle et par voie de conséquence les temps de polissage pendant la finition, donc la productivité.

L'utilisation des stratégies intelligentes permet de réaliser des gains importants en temps et en coûts associés à la fabrication des moules lors de l'usinage en finition. Les temps d'usinage et de finition des moules sont conditionnés par le débit du copeau, le type et la géométrie de l'outil ainsi que du fini obtenu en passe de finition. Tous ces facteurs sont décidés lors de la génération automatique des trajectoires d'outil et des conditions de coupe dans le système de fabrication assistée par ordinateur (FAO). Les prédictions erronées des temps de réalisation peuvent nuire considérablement à la productivité, allonger le temps de cycle. Des équations de prédiction du temps de coupe et de cycle sont développées, permettant la prédiction des temps d'usinage et de cycle en considérant comme paramètres de coupe : la vitesse de coupe et d'avance, les stratégies d'usinage et l'orientation des outils par rapport aux surfaces à usiner. L'objectif de ce travail est de développer, tester et comparer les temps de la machine à commande numérique selon les stratégies de coupe. Les plans d'expériences permettent de déterminer les effets des paramètres de coupe et leurs éventuelles interactions ainsi que de modéliser les réponses par le développement des équations de prédiction. Les facteurs influents sur les performances du système seront identifiés et analysés. Les modèles de prédiction des écarts existants entre les temps d'usinage et les temps de cycle obtenus sur la machine-outil à commande numérique constituent une information importante au programmeur, ces écarts sont commandés par le réglage des conditions de coupe.

Selon Monreal et Rodriguez [16], dans les opérations de fraisage à grande vitesse, les processus de planification et de choix de machine-outil sont altérés par l'anomalie entre la durée de cycle idéale et réelle. Dans ce contexte, l'influence de la stratégie de chemin d'outil et des avances élevées sur la durée de cycle a été démontrée avec des chemins d'outil en mode zigzag à différents angles d'orientation. Ces expériences, avec le centre d'usinage, montrent une réduction significative des avances moyennes réelles de l'outil comparativement aux avances programmées dans la FAO sous certaines conditions de coupe.

Les industries de l'usinage font face à des demandes de temps de cycle de plus en plus courts afin d'accélérer l'introduction des produits sur le marché (Altan. et Lilly [17]).

Les stratégies d'usinage pouvant permettre de réduire les temps de cycle regroupent tant les conditions que les paramètres de coupe et les outils. Par exemple, en sélectionnant de façon appropriée la vitesse de coupe et l'angle d'engagement de l'outil, il est possible d'économiser jusqu'à 30% des coûts d'usinage dans le cas de fraisage de pièces dures (Tönshoff et al. [18]).

De même, si on maintient la vitesse de coupe et l'avance constante lors du fraisage des moules, le temps de cycle réduit de 20 à 30% selon la géométrie du moule (Yagar et al [19]).

Les résultats des expériences sont illustrés dans le tableau IX, où :

$T_{\text{USINAGE_MOCN}}$: temps d'usinage obtenu sur la machine à commande numérique.

$T_{\text{CYCLE_MOCN}}$: temps de cycle obtenu sur la machine à commande numérique.

% : pourcentage d'écart entre les temps d'usinage et ceux du cycle obtenus par MOCN.

Tableau IX

Matrice des expériences et des résultats du temps sur MOCN

Essai no	Facteurs codés						Réponse (sec)		
	Vitesse V(m/min)	Avance f (mm/dent)	Prof. passe d (mm)	Emersion W(mm)	Engagement α (degré)	Inclinaison β (degré)	Temps d'usinage	Temps cycle	%
1	0	0	0	-1	0	0	293	432	32
2	-1	-1	-1	-1	1	1	871	1036	16
3	1	1	-1	-1	-1	-1	139	304	54
4	-1	0	0	0	0	0	297	387	23
5	-1	1	1	-1	-1	-1	306	469	35
6	0	0	0	0	0	-1	170	263	35
7	-1	1	1	1	-1	1	104	172	40
8	-1	-1	-1	1	1	-1	297	366	19
9	0	-1	0	0	0	0	282	374	25
10	0	0	0	0	1	0	170	275	38
11	-1	-1	1	1	1	1	297	369	20
12	1	-1	-1	1	1	1	95	168	43
13	1	-1	-1	-1	1	-1	279	440	37
14	-1	-1	-1	1	-1	1	297	365	19
15	-1	1	1	1	1	-1	104	173	40
16	1	1	1	-1	-1	1	140	296	53
17	-1	1	-1	1	-1	-1	104	173	40
18	0	0	-1	0	0	0	170	262	35
19	1	-1	-1	1	-1	-1	95	165	42
20	1	1	-1	-1	1	1	140	307	54
21	-1	-1	1	-1	-1	1	873	1026	15
22	1	1	1	1	-1	-1	47	118	60
23	1	1	1	1	1	1	47	121	61
24	0	0	0	0	0	0	170	261	35
25	-1	-1	-1	-1	-1	-1	873	1035	16
26	-1	1	-1	1	1	1	104	176	41
27	0	0	0	1	0	0	99	164	40
28	0	0	1	0	0	0	170	263	35
29	1	-1	1	1	-1	1	95	165	42
30	1	-1	-1	-1	-1	1	279	434	36
31	-1	1	-1	-1	-1	1	306	460	33
32	1	-1	1	-1	-1	-1	279	443	37
33	0	0	0	0	0	1	170	272	38
34	1	1	-1	1	1	-1	48	118	59
35	1	-1	1	-1	1	1	279	446	37
36	1	0	0	0	0	0	106	198	46
37	-1	-1	1	-1	1	-1	873	1031	15
38	-1	-1	1	1	-1	-1	297	366	19
39	-1	1	1	-1	1	1	305	470	35
40	0	1	0	0	0	0	109	200	46
41	0	0	0	0	0	0	170	262	35
42	-1	1	-1	-1	1	-1	307	466	34
43	1	1	-1	1	-1	1	47	117	60
44	1	-1	1	1	1	-1	95	165	42
45	0	0	0	0	-1	0	170	262	35
46	1	1	1	-1	1	-1	141	300	53

3.2 Analyse des résultats et discussion

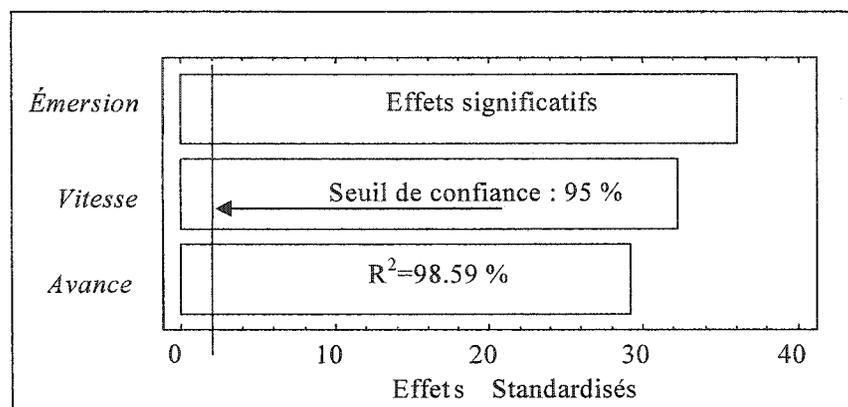
- Il faut être conscient que les effets représentés dans tous les diagrammes de Pareto de ce projet sont basés sur les effets standardisés des conditions de coupe; cela dit, les calculs utilisent les variables de coupe codées. L'effet d'un facteur se calcule comme le montre l'exemple cité dans le chapitre précédent. Chaque barre dans les diagrammes de Pareto illustre l'effet standardisé du facteur qui est l'effet calculé sur l'erreur; par exemple, le diagramme de Pareto de la figure 22 est basé sur les résultats suivants:

Tableau X

Tableau des effets significatifs sur le temps de coupe

Facteur	Effet	Erreur	Effet standardisé
V	-0.966	+/- 0.03	32.2
f	-0.875	+/- 0.03	29.16
W	-1.08	+/- 0.03	36

- Les graphiques de Pareto (figure 22 et 23) classent les facteurs et leurs interactions en fonction de leur influence sur la réponse. Tous les facteurs et interactions ayant un effet inférieur à la limite des facteurs significatifs (intervalle de confiance 95%) sont négligés et ne sont pas représentés.

Figure 22 Pareto des effets significatifs sur le temps d'usinage ($T_{USINAGE_MOCN}$)

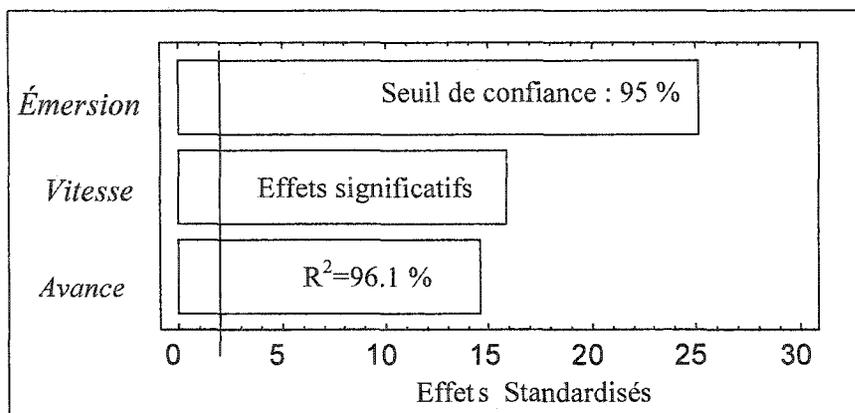


Figure 23 Pareto des effets significatifs sur le temps de cycle machine ($T_{\text{CYCLE_MOCN}}$)

Le diagramme de Pareto (figure 22) correspondant au temps de coupe est obtenu avec un coefficient de détermination de l'ordre de 98.59 % ce qui est très satisfaisant et il n'y a pas d'interaction à effet significatif entre les facteurs, ce qui allégera le modèle de prédiction. On remarque que l'émersion est le facteur de coupe le plus influent sur l'estimation des temps d'usinage (temps de coupe) suivit de la vitesse de coupe et finalement l'avance par dent.

Le diagramme de Pareto (figure 23) correspondant au temps de cycle est obtenu avec un coefficient de détermination de l'ordre de 96%, ce qui est très satisfaisant et il n'y a pas d'interaction à effet significatif entre les facteurs. On remarque que l'émersion est le facteur de coupe le plus influent sur l'estimation des temps de cycle (temps total) suivit de la vitesse de coupe et finalement l'avance par dent.

- Les figures 24 et 25 présentent les effets principaux des facteurs considérés. Les angles d'engagement et d'inclinaison n'ont pas d'influence sur les temps d'usinage et ceux du cycle lors de l'usinage sur la machine à commande numérique (MOCN). La profondeur de passe ne présente pas d'effet sur le temps. Ces résultats étaient prévisibles du fait qu'il n'y a pas de variation de la profondeur de coupe. La meilleure réponse s'obtient en réglant la vitesse, l'avance et l'émersion à leurs niveaux hauts. Par exemple, le temps d'usinage dans la figure 24 correspond à la valeur de 350 secondes pour une vitesse (-1) de 90 m/min, et plus la vitesse augmente plus le temps diminue.

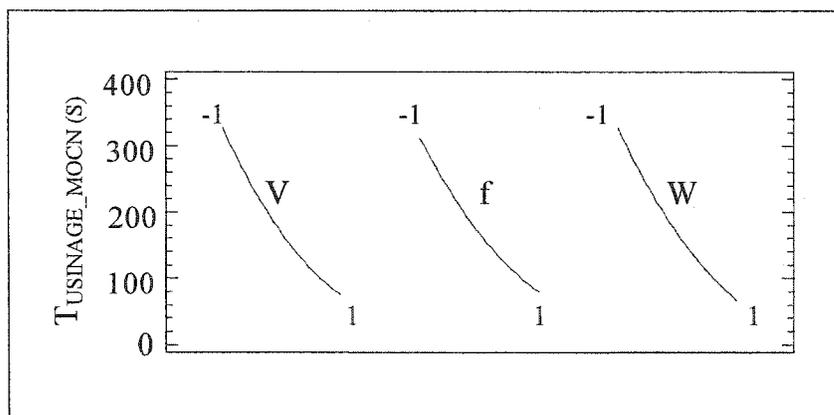


Figure 24 Graphique des effets directs sur le temps d'usinage ($T_{USINAGE_MOCN}$)

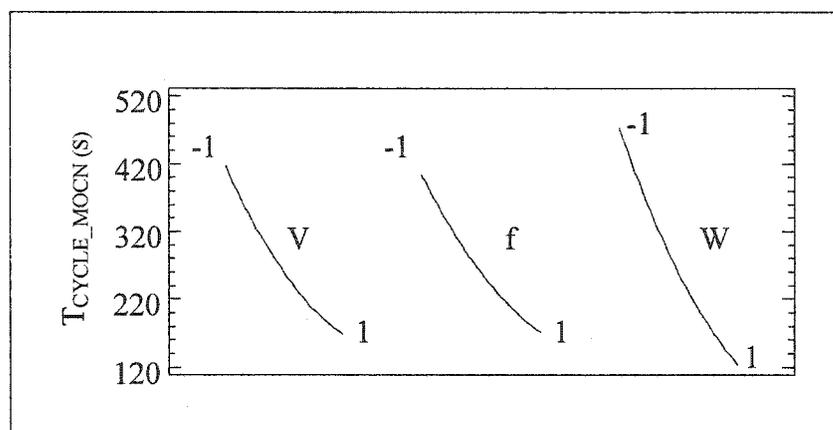


Figure 25 Graphique des effets directs sur le temps de cycle machine (T_{CYCLE_MOCN})

3.3 Écart entre les temps de cycle et d'usinage sur la machine MOCN

Le graphe de la figure 26 illustre l'écart existant entre les temps de cycle et les temps d'usinage obtenus avec la machine à commande numérique lors de l'usinage. Il est à noter que cet écart est parfois très important du fait qu'il peut atteindre dans certains cas jusqu'à 60 %.

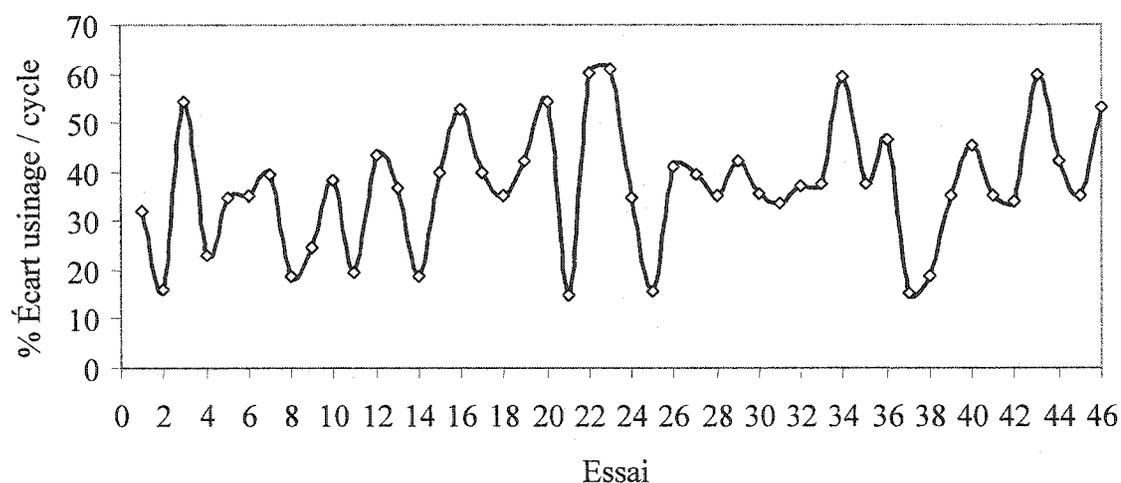


Figure 26 Comparaison entre les temps d'usinage et les temps de cycle sur MOCN

Une analyse statistique s'impose pour déterminer les facteurs influençant cet écart. Le graphique de Pareto de la figure 27 classe les facteurs et leurs interactions en fonction de leur influence sur la réponse. Tous les facteurs et interactions ayant un effet inférieur à la limite des facteurs significatifs (intervalle de confiance 95 %) sont négligés et ne sont pas représentés dans la figure.

Le graphe de Pareto correspondant montre que le coefficient de détermination de l'ordre de ($R^2 = 99.22\%$), ce qui est très satisfaisant. Le facteur le plus dominant est la vitesse suivie de l'avance, une interaction entre les deux, et finalement l'émersion ou la largeur de coupe.

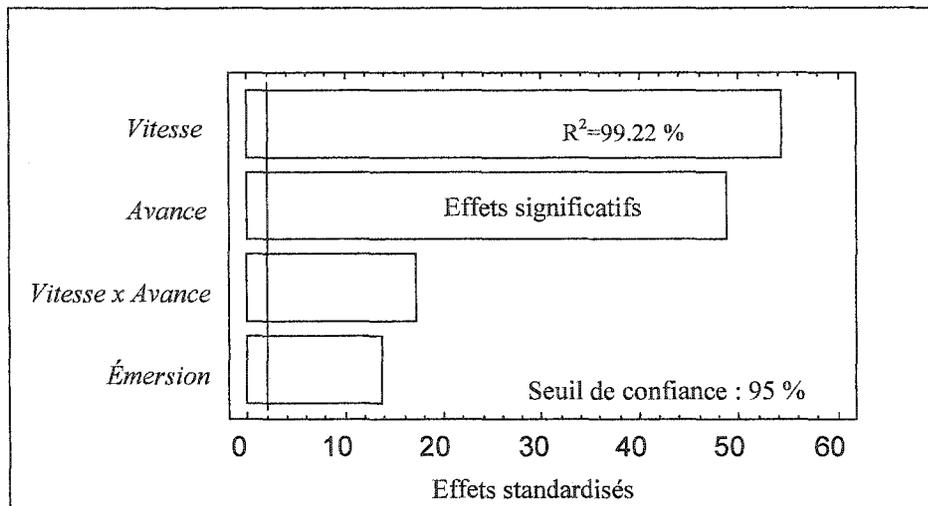


Figure 27 Pareto des effets significatifs sur les écarts usinage / cycle sur MOCN

La figure 28 illustre les effets directs des facteurs qui influent l'écart entre le temps de coupe et de cycle obtenu sur la machine-outil à commande numérique. Plus la vitesse augmente plus l'écart augmente et de même pour l'avance par dent et l'émersion.

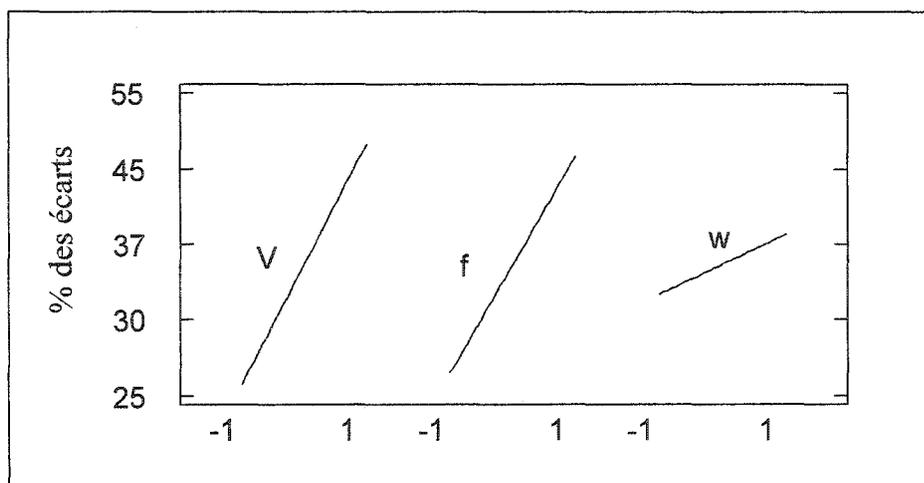


Figure 28 Effets directs des facteurs sur l'écart usinage/ cycle sur MOCN

L'interaction de deux paramètres de coupe (vitesse (m/min) et avance par dent (mm/dent), donc leur combinaison, influe aussi sur l'écart dans les temps, la figure 29 montre que la meilleure réponse s'obtient en réglant la vitesse et l'avance par dent à leur minimum; si maintenant l'avance est réglée à son minimum ($f = -1$) ou à son maximum ($f = 1$) plus la vitesse augmente plus l'écart augmente.

Il est à noter que le temps de coupe(usinage) est le temps excluant les approches, les retraits d'outil et les déplacements rapides. Le temps de cycle inclus les déplacements rapides et les approches de d'outil.

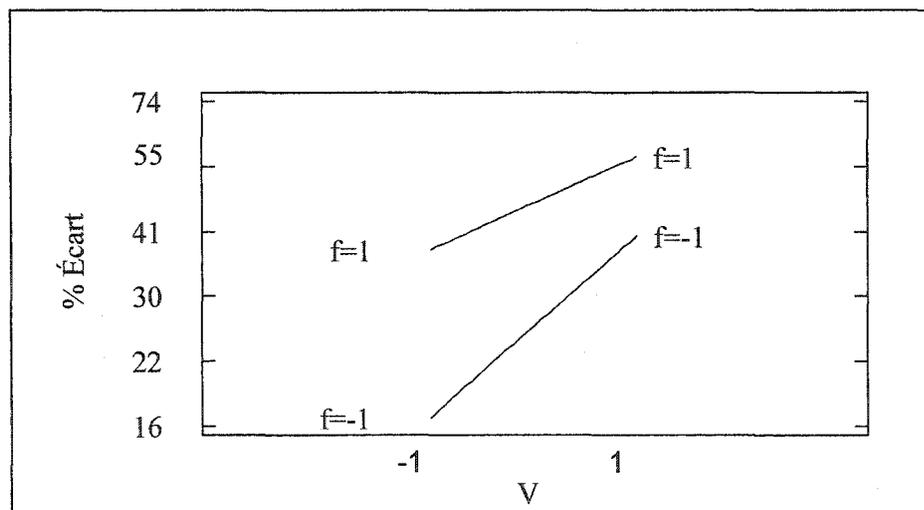


Figure 29 Effets des interactions des facteurs sur l'écart usinage / cycle sur MOCN

3.4 Écart dans les temps d'usinage entre la FAO et la MOCN

Dans cette partie nous avons été tentés de comparer les temps de la FAO de CATIA V5 et ceux de la machine à commande numérique MOCN pour mettre en évidence les éventuels écarts des temps, selon les réglages des conditions de coupe décidés lors de la programmation des trajectoires de l'outil. Il est prouvé que les écarts entre les temps machine MOCN et ceux prédits par la FAO dépendent fortement des conditions de coupe et peuvent atteindre jusqu'à 50 % dans certains cas.

On remarque que les temps d'usinage obtenus par FAO de CATIA V5 (voir annexe) sont inférieurs à ceux de la MOCN et représentent un écart entre 10 et 17 % par rapport aux temps d'usinage obtenus réellement sur la machine-outil à commande numérique. Cependant il existe des cas bien précis où les temps simulés ne représentent en effet que 46 %, soit environ la moitié du temps réel. Curieusement, ces cas sont ceux des essais où la vitesse de coupe (m/min) et l'avance par dent (mm/dent) de l'outil sont réglés à leur maximum et en même temps.

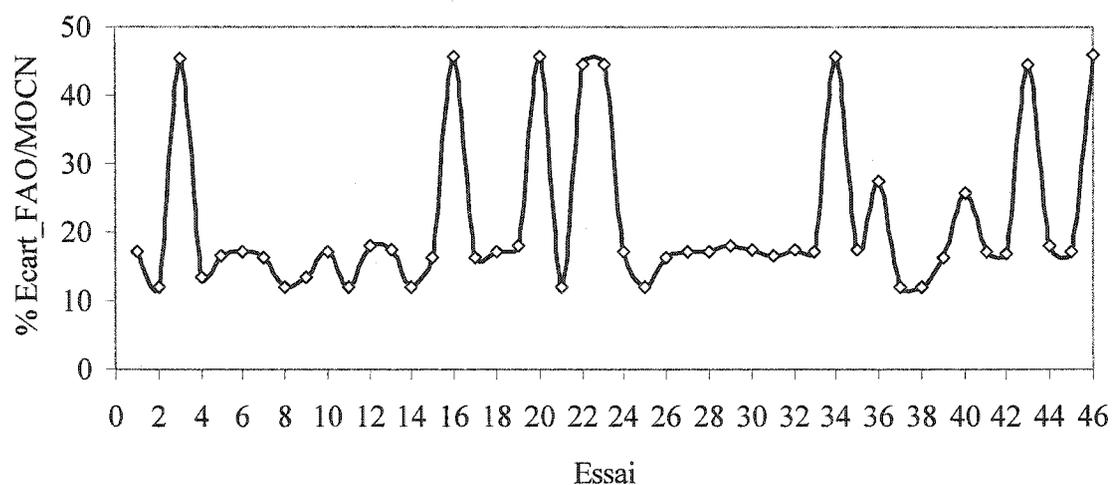


Figure 30 Écart entre les temps d'usinage de la FAO et les temps sur MOCN

La figure 30 illustre bien les essais en question (essai 3, 16, 20, 22, 23, 34, 43 et 46). Il serait donc judicieux d'analyser ce problème d'écart dans le temps par l'intermédiaire du

même plan d'expérience pour pouvoir isoler les facteurs qui influencent ce phénomène, et modéliser ainsi le problème d'écart pour pouvoir procéder à des ajustements dans la prédiction des temps d'usinage.

Le graphique de Pareto (figure 31) confirme bien que les facteurs les plus influents sur le problème d'écart entre les temps d'usinage de la FAO et ceux de la MOCN sont la vitesse de coupe, l'avance par dent et leurs interactions. La figure 32 illustre les effets des facteurs qui influence l'écart de temps; plus la vitesse augmente plus l'écart augmente et de même pour l'avance par dent. De même que dans le graphique des effets directs représentés par la figure 33 qui illustre le comportement des écarts dans le temps, il paraît clairement que plus la vitesse de coupe augmente plus l'écart entre la FAO et la machine augmente, de même que pour l'avance par dent. Ceci est dû à l'effet de l'accélération et de la décélération de la machine, car plus la vitesse et l'avance sont élevés plus le temps de décélération est important. Également, le temps mis par la machine pour réatteindre la vitesse et l'avance par dent programmées dans la FAO est d'autant plus considérable.

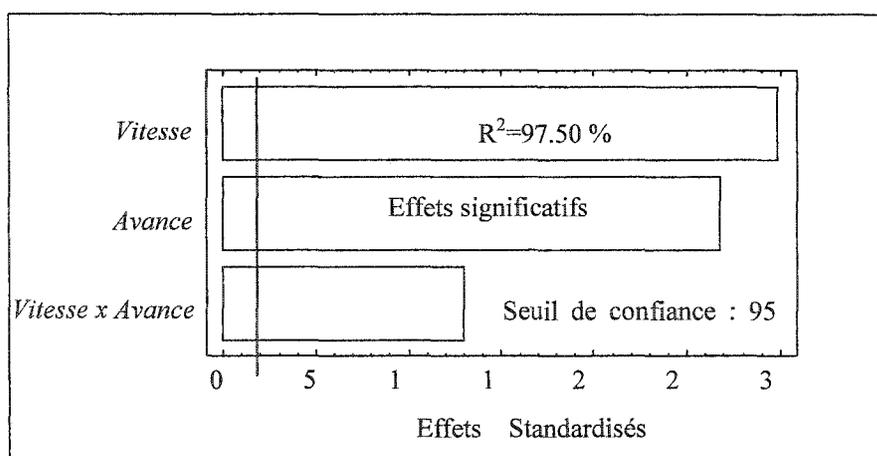


Figure 31 Pareto des effets significatifs sur l'écart FAO/MOCN

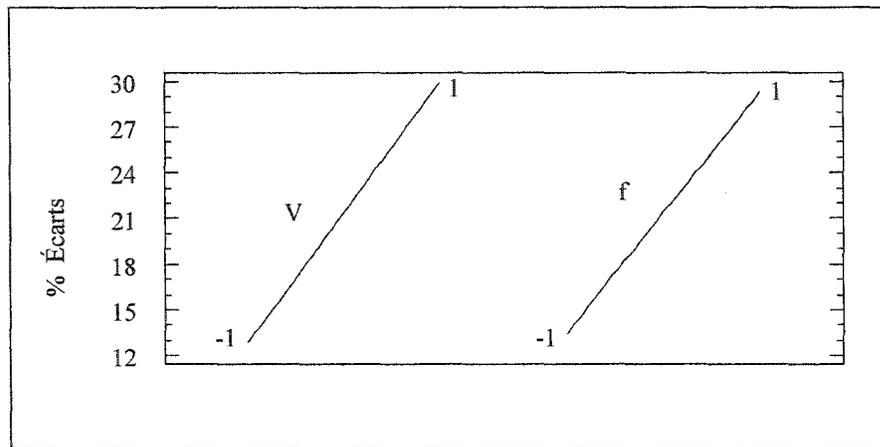


Figure 32 Effets directs des facteurs sur l'écart FAO / MOCN

Il n'est pas sans savoir que la combinaison de ces deux paramètres de coupe (vitesse (m/min) et avance par dent (mm/dent), donc leur interaction influe aussi sur l'écart. La figure 33 montre que la meilleure réponse s'obtient en réglant la vitesse et l'avance par dent à leur minimum.

Cependant, si dans le cas où l'avance est réglée à son minimum ($f = -1$) ou à son maximum ($f = 1$), plus la vitesse augmente plus l'écart augmente.

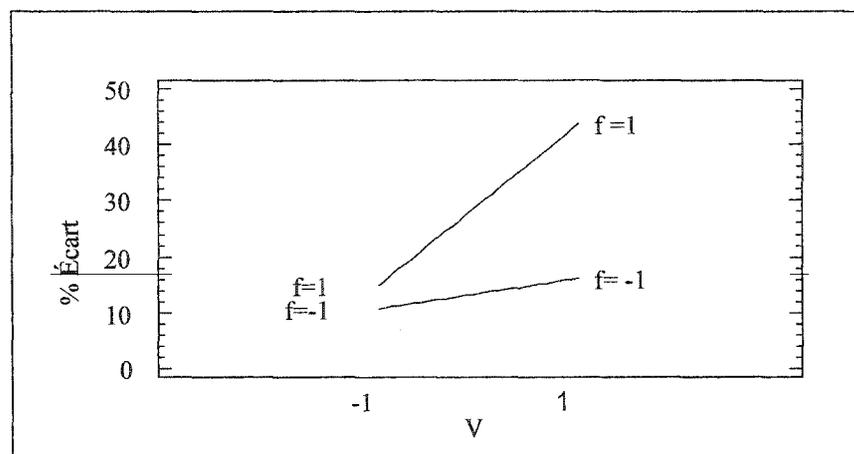


Figure 33 Interaction des facteurs sur l'écart FAO / MOCN

3.5 Modélisation des équations de prédiction

- Temps d'usinage et de cycle obtenus sur MOCN.

$$T_{\text{USINAGE_MOCN}} = 39 * V^{-0.8} * f^{-0.8} * W^{-0.98} \quad (3.15)$$

$$T_{\text{CYCLE_MOCN}} = 24 * V^{-0.51} * f^{-0.52} * W^{-0.89} \quad (3.16)$$

- % d'écart entre les temps d'usinage et de cycle MOCN.

$$\% = 97.214 * V^{-0.02} * W^{0.14} * f^{2-0.312 * \ln(V)} \quad (3.17)$$

- Relation entre le temps de cycle et le temps d'usinage sur la MOCN.

$$T_{\text{CYCLE_MOCN}} = T_{\text{USINAGE_MOCN}} + T_{\text{USINAGE_MOCN}} * \% \text{ d'écart usinage-cycle / MOCN} \quad (3.18)$$

Avec :

$T_{\text{USINAGE_MOCN}}$: (minute)

$T_{\text{CYCLE_MOCN}}$: (minute)

% d'écart usinage-cycle / MOCN : (%)

V : Vitesse de coupe $90 \leq V \leq 300$ m/min

f : Avance par dent $0.1 \leq f \leq 0.3$ mm

W: Emersion $0.35 \leq W \leq 0.65$ mm

3.6 Surfaces des réponses à partir des équations de prédictions

Dans la figure 34, les graphiques des surfaces de réponses donnent un aperçu sur les éventuels réglages optimaux des conditions de coupe dans le but de minimiser les temps d'usinage. Il en découle que : la vitesse de coupe à son maximum combinée au réglage de l'avance à son niveau haut procure des temps d'usinage minimum sur la machine à commande numérique. Ceci dit, plus la largeur de coupe augmente plus les temps sont réduits comme le montre les graphiques de la figure 34 (a, b, c, d, e, f).

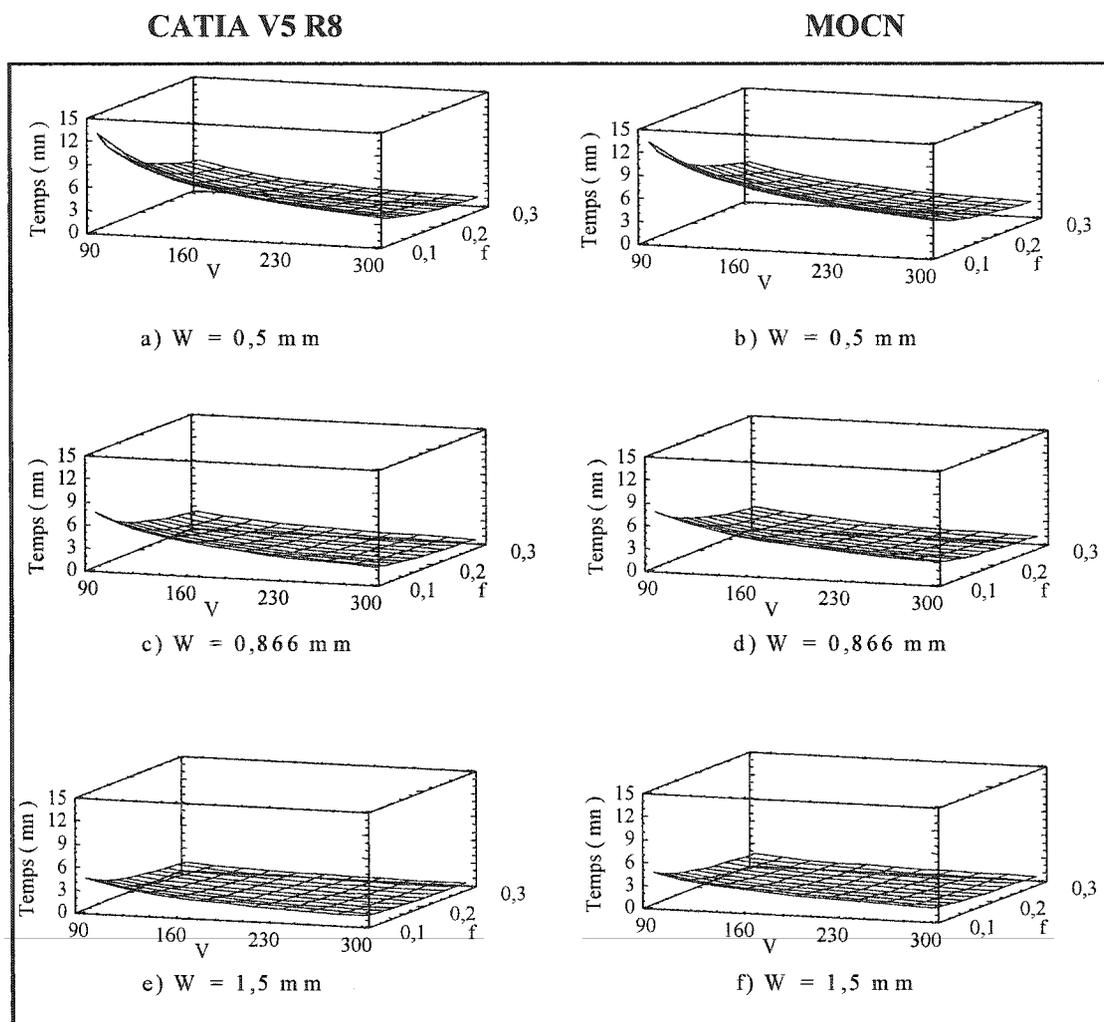


Figure 34 Surface de réponse des temps d'usinage FAO et MOCN

Concernant les écarts entre les temps d'usinage et les temps de cycles obtenus sur la machine à commande numérique (figure 35), il en découle que pour une largeur de coupe moyenne, l'écart est conditionné comme suit :

- si la vitesse de coupe est fixée à son niveau bas (90m/min), plus la valeur de l'avance de l'outil augmente, l'écart dans les temps augmente.
- si la vitesse de coupe est fixée à son niveau haut (300m/min), plus la valeur de l'avance de l'outil augmente, l'écart dans les temps augmente.
- si l'avance est fixée à son niveau bas (0.1mm/dent), plus la valeur de l'avance de l'outil augmente, l'écart dans les temps augmente.
- si l'avance est fixée à son niveau haut (0.3mm/dent), plus la valeur de l'avance de l'outil augmente, l'écart dans les temps augmente.

Le point optimal se situe où la vitesse et l'avance sont toutes les deux à leur bas niveau.

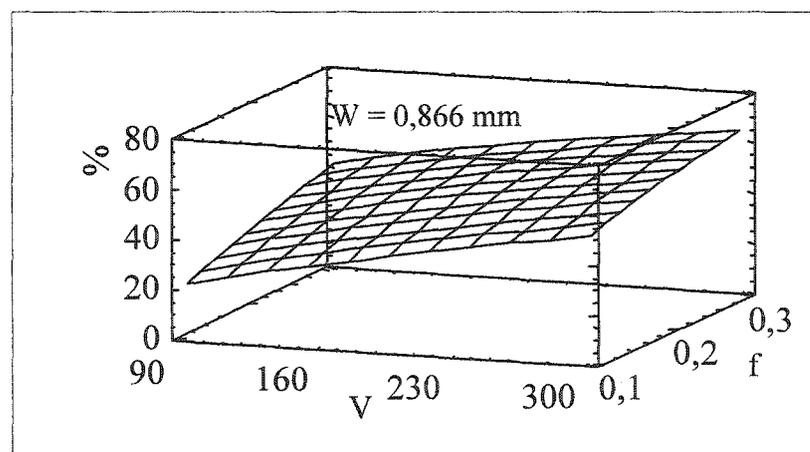


Figure 35 Surface de réponse écart de temps usinage / cycle de la MOCN

3.7 Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié l'influence des paramètres de coupe, de l'orientation de l'outil en trajectoire aller simple sur le temps de coupe et de cycle obtenus réellement sur la machine-outil à commande numérique (MOCN).

Il en découle que l'orientation d'outil (engagement et inclinaison) n'influe pas les temps de même que la profondeur de coupe vue qu'on est en mode finition et qu'il n'y a qu'une seule passe à enlever.

Les modèles de prédiction développés permettent l'estimation directe et rapide du temps prévu d'usinage et de cycle selon les montages (setups) des facteurs de coupe.

Les modèles de prédictions des écarts existants entre les temps d'usinage et les temps de cycle, obtenus sur la machine-outil à commande numérique, constituent une information importante au programmeur; ces écarts sont commandés par le réglage des conditions de coupe. Dans notre étude, nous avons démontré que ces écarts sont parfois très importants et que les temps réels de l'usinage ne constituaient que seulement 50 % du temps de cycle, le programmeur doit tenir compte de cette information afin de réduire cet écart. Les solutions sont nombreuses, parmi les plus importantes mentionnons les engagements et les retraits d'outils.

CHAPITRE 4

PRÉDICTION DES FINIS DE SURFACES

4.1 Introduction

Une empreinte de moule de fini inapproprié nécessite un temps de polissage long et affecte les performances des moules, ce qui se traduit par des pièces moulées de mauvaise qualité ou une durée de vie amoindrie des moules (usure, défaillance par fatigue). Des gains significatifs en temps de réalisation, coûts d'usinage et en qualité de la pièce finie peuvent être obtenus en optimisant les paramètres de coupe lors de l'usinage. Plusieurs paramètres d'usinage tels que l'avance, la vitesse, les profondeurs, les angles d'engagement et d'inclinaison de l'outil peuvent influencer la qualité des moules. Dans ce travail nous étudions l'influence de ces paramètres sur le fini des moules en se servant des plans d'expérience. La qualité des moules peut être évaluée à travers les profils de rugosité, les contraintes résiduelles générées et la profondeur de la couche écrouie obtenue après l'usinage. Le plan d'expérimentation sera choisi de telle manière à assurer une meilleure précision des résultats obtenus.

La globalisation et la mondialisation des marchés poussent les manufacturiers d'aujourd'hui à faire plus en des temps relativement courts pour demeurer compétitifs. Pour être performant dans un tel contexte, il est essentiel de pouvoir développer des connaissances. Idéalement, il faut en venir à découvrir des lois universelles. Ceci dit, il est souvent nécessaire de développer plusieurs lois intermédiaires, qui ne sont applicables que dans un contexte donné; il s'agit alors de modèles empiriques. De nouvelles stratégies d'usinage en multiaxes à commande numérique allant du parcours et de l'orientation des outils à la définition de leur géométrie ne cessent d'évoluer. L'outil de coupe peut être incliné par rapport à un ou deux axes d'usinage dans la direction d'avance ou dans celle de la largeur de coupe. L'émersion ou la largeur de coupe peut

varier ainsi que les vitesses d'avances et d'autres paramètres de coupe. Ces stratégies et paramètres de coupe peuvent être combinés pour générer des conditions optimales d'usinage à commande numérique des formes complexe comme les moules. La plupart des recherches antérieures ne tiennent pas compte de l'effet de tous les facteurs en même temps; une grande majorité des chercheurs s'intéressent seulement à la vitesse de coupe, à l'avance par dent, à la profondeur de coupe axiale et parfois à l'émersion de l'outil, alors que d'autres s'intéressent seulement aux inclinaisons et orientations des outils (angle d'engagement et angle d'inclinaison).

La démarche employée de façon intuitive par les expérimentateurs consiste à étudier séparément l'influence des grandeurs des paramètres de coupe sur la performance de l'usinage en 5 axes. Cette stratégie est coûteuse et ne détecte pas l'interaction entre les facteurs sur le fini des surfaces usinées. La méthode des plans d'expérience sera utilisée dans ce projet. Elle consiste à planifier et à établir un plan d'expérience comportant le minimum d'essais, ces expériences seront développées en terme de vitesse de coupe, d'avance par dent, de profondeur de coupe, d'émersion ou largeur de coupe, d'angle d'engagement et d'angle d'inclinaison de l'outil de coupe par rapport aux surfaces à usiner. L'ensemble des paramètres de coupe sera modifié lors des essais.

Contrairement aux travaux souvent rencontrés, les modèles sont développés en termes de vitesse de coupe, d'avance par dent, de profondeur de coupe axiale, d'émersion de l'outil en largeur de coupe, d'angle d'engagement (lead) et d'angle d'inclinaison (tilt). Tous ces facteurs sont pris en considération sans exception et sont décidés lors de la génération automatique des trajectoires d'outils dans la FAO.

Ce projet présente une étude de développement et de modélisation des modèles de fini de surface comprenant, la rugosité moyenne (R_a) et la rugosité maximale (R_t) perpendiculaire à l'avance et la rugosité moyenne ($R_a//$) dans le sens de l'avance. L'acier à usiner pendant les expériences est un acier à moules de type P20 (32HRC, 320

BHN). Le système de fabrication assistée par ordinateur (FAO) du logiciel CATIA V5 R8 est utilisé pour générer les trajectoires d'outil. La méthode des plans d'expérience est utilisée dans ce travail pour l'investigation de ces variables utilisant la méthodologie des surfaces de réponses.

D'après Schulz et Hock [1], l'usinage avec une fraise à bout sphérique en mode avalant avec une orientation de l'angle d'inclinaison comprise entre 10^0 et 20^0 génère la meilleure rugosité de la pièce et la vie la plus longue de l'outil. Cette plage de l'orientation de l'outil représente l'optimum de l'angle d'inclinaison définissant la stratégie pour l'usinage en haute vitesse des aciers à moules.

L'angle d'engagement de l'outil a un impact très important sur la section de coupe, et par voie de conséquence, sur les forces de coupes, les vibrations et la précision dimensionnelle de la pièce produite. Les vibrations apparaissent quand l'angle d'engagement (lead) atteint ou dépasse les 50 degrés selon Gani et al. [2].

Pour réduire le temps d'usinage, la FAO propose souvent la stratégie de coupe en zigzag. D'après Takahashi et al. [4], l'usage d'une telle stratégie est déconseillé car elle génère des finis à rugosité inappréciable associée à une courte durée de vie de l'outil.

Un intérêt est porté sur l'impact de l'orientation de l'outil de coupe (angle d'engagement), sur la durée de vie de l'outil et le fini de la pièce à usiner dans le domaine de l'industrie aérospatiale, spécifiquement l'usinage des formes complexes en alliage de Titane et à base de Nickel. Il a été trouvé que l'orientation de l'outil à 45^0 en usinage horizontal vers le bas est la meilleure alternative pour obtenir un bon fini de surface. La rugosité des pièces dans ce cas est de l'ordre de $0.4 \mu\text{m}$, contre $1.25 \mu\text{m}$ pour un usinage en trajectoire verticale vers le haut selon Ng et al. [5].

Plusieurs auteurs ont déjà utilisé les plans d'expérience pour solutionner des problèmes manufacturiers, notamment pour étudier l'influence des conditions de coupe sur le fini de surface des pièces usinées en 5 axes, ou sur la vie de l'outil de coupe. Des essais sont conduits sur une machine-outil à commande numérique 3 ou 5 axes, les trajectoires et les stratégies de coupe sont générées par un système de FAO. Ainsi, plusieurs facteurs pouvant influencer les performances de l'usinage sont pris en compte dans une stratégie globale se servant des plans d'expériences. Dans tous les cas, comme le développement de connaissance passe par l'expérimentation et que cette dernière est souvent coûteuse en efforts, en temps et en argent, il faut prendre soin de bien expérimenter pour en retirer le maximum de bénéfices. La démarche mieux organisée consiste à planifier les essais en choisissant soigneusement les variables de réponses (variables dépendantes) et les réglages des facteurs (variables indépendantes) à tester. Mais en ne faisant varier qu'un facteur à la fois, cette pratique est la plus répandue, elle comporte tout de même plusieurs lacunes, dont la principale concerne son incapacité de quantifier les effets des interactions entre les facteurs.

La littérature statistique est très généreuse pour présenter des exemples où cette méthode fournit des résultats erronés ou encore, demande des efforts inutiles pour arriver aux mêmes conclusions. À l'autre extrémité, nous trouvons les expériences structurées selon des plans d'expérience. Un plan d'expériences n'est rien d'autre qu'une liste de réglages, astucieusement choisis, à tester. Ces derniers outils, qui concernent une branche spécialisée de la statistique, visent justement à maximiser la précision et la justesse des résultats fournis. Évidemment, cette méthode est de loin supérieure aux deux autres, ce qui permet d'apprendre beaucoup plus efficacement et se veut une synthèse des meilleures pratiques d'expérimentation et de modélisation empirique. L'application des plans d'expérience pour l'étude des procédés de coupe remonte à très loin :

Wu [6] a utilisé cette technique pour mener une étude d'optimisation des conditions de coupe en se servant d'un plan composite pour étudier la durée de l'outil sous l'influence de trois variables indépendantes, l'avance, la vitesse de coupe et la profondeur de coupe axiale.

Kline et al. [7] ont étudié pendant l'usinage en fraisage en bout, à l'aide des plans d'expérimentations, l'impact des forces de coupe qui se résument en la déflexion de l'outil par rapport à la pièce à usiner sur les écarts dimensionnels et le fini de surface.

Chua et al. [8] se sont consacrés quant à eux à l'optimisation des conditions de coupe utilisant des modèles mathématiques de durée de vie d'outil, des forces de coupe et la puissance consommée. Les modèles sont développés seulement en terme de trois facteurs jugés influents d'après eux qui se résument en la vitesse de coupe, l'avance par dent et la profondeur de coupe axiale.

Astakhnov et al. [9] se sont penchés sur l'analyse et la méthodologie d'application des plans d'expériences dans le domaine de l'usinage des métaux.

Alauddin et El-Baradie [10] ont étudié à travers les plans d'expériences, le développement d'un modèle de vie de l'outil en fraisage en bout de l'acier (190 HB) en mode d'usinage sans lubrification et en grande vitesse. Le modèle est développé en terme de vitesse de coupe, d'avance par dent et de profondeur de coupe axiale. Ces variables sont investiguées dans le plan d'expérience utilisant la méthodologie des surfaces de réponses. Des équations de prédictions sont mises en valeurs pour prédire la vie de l'outil.

Kuang-Hua et Hung-Yen [11] ont développé un modèle de précision dimensionnelle pour l'usinage en fraisage périphérique sans lubrification d'un alliage d'aluminium, sous l'influence de la dureté Brinell du matériel à usiner, de la vitesse de coupe, de l'avance

par dent, de la profondeur de coupe axiale et de la profondeur de coupe radiale. La méthodologie des surfaces de réponse (Response surface methodology RSM) avec le plan d'expérience composite design est utilisé.

Darwish et El-Tamimi [12] ont présenté une étude concernant le développement d'un modèle de surface de réponse de la rugosité pour le tournage du super alliage au nickel. Le modèle est développé en termes de vitesse de coupe, d'avance par dent et de profondeur de coupe axiale. Ils ont étudié ces variables à travers les plans d'expériences utilisant la méthodologie des surfaces de réponse (RSM). Un modèle du fini de surface correspondant a été établi est testé.

Songmene et al.[13] s'en sont servis pour étudier l'influence de l'avance, de la vitesse de coupe et de la profondeur de coupe axiale sur la rugosité des pièces en composite d'aluminium.

Choudhury et El-Baradie [14] ont utilisé cette technique pour étudier l'effet de l'avance, de la vitesse de coupe et de la profondeur de coupe axiale sur la durée de vie de l'outil, le fini de surface et les forces de coupe, pendant l'usinage en tournage.

Pour Davim [15], l'objectif est l'établissement d'une corrélation entre la vitesse de coupe, l'avance par dent et la profondeur de coupe axiale avec l'évaluation de la rugosité R_a et R_t . Il présente une étude sur l'influence des conditions de coupe sur le fini de surface en tournage, sa technique s'est basée sur le plan d'expérience de Taguchi.

En raison du grand nombre des facteurs pouvant influencer la performance d'usinage, il est nécessaire de développer des stratégies optimales en se servant des méthodes des plans d'expériences qui ont déjà fait leur preuve dans ce genre d'étude. On les retrouve dans des études de durée de vie de l'outil [6,8, 10,14], des forces de coupe [7, 8,14] et du fini de surface de la pièce [11, 12, 13, 14, 15], en fonction des paramètres de coupe. Les

modèles de type puissance, similaires à la loi de Taylor reliant la vie de l'outil aux paramètres de coupe, sont souvent utilisés pour modéliser la vie [6, 8, 10,14], le fini de surface [11, 12, 13, 14,15], les forces de coupe [7, 8,14] et la puissance consommée [8,14]. Le modèle type est présenté sous forme de l'équation (5.59).

$$T = C V^k f^\alpha d^\beta \quad (5.53)$$

Avec :

C, k, α et β comme constantes.

V : vitesse de coupe (m/min).

f : avance (mm/rev).

d : profondeur de coupe (mm).

Les plans d'expériences permettent de déterminer les effets des paramètres et des éventuelles interactions, et de modéliser la réponse par l'entremise des équations de prédiction. La réponse est ensuite optimisée et validée. Contrairement aux travaux précédents, nos modèles sont développés en termes de vitesse de coupe, d'avance par dent, de profondeur de coupe axiale, d'émersion de l'outil ou largeur de coupe, d'angle d'engagement et d'angle d'inclinaison. Tous ces facteurs sont décidés dans la FAO, les parcours de l'outil sont ensuite générés et enfin des essais d'usinage sont conduits sur la machine-outil. Le fini de surface des pièces produites est relevé pour fins d'analyse.

4.2 Réponses du système

Les rugosités se caractérisent par le fini de surface de la pièce usinée. Les crêtes sont mesurées à l'aide d'un dispositif appelé rugosimètre.

Avec :

- R_a : rugosité moyenne mesurée perpendiculairement au sens de l'avance.
- R_t : rugosité maximale mesurée perpendiculairement au sens de l'avance.
- $R_a //$: rugosité moyenne mesurée parallèlement au sens de l'avance.

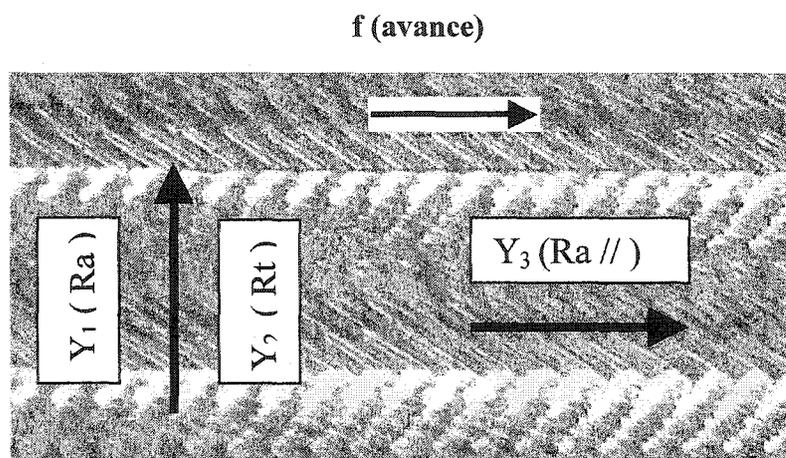


Figure 36 Directions de mesure des résultats de rugosité

Pour chaque réponse de rugosité, 5 mesures ont été recueillies et par la suite la moyenne a été prise pour l'étude.

Le tableau XI illustre les résultats des différentes rugosités relevées à l'aide d'un profilomètre à des fins d'analyse.

Tableau XI
Matrice des expériences et résultats

Essai no	Variables						Réponse		
	Vitesse V(m/min)	Avance f (mm/dent)	Prof. passe d (mm)	Émersion W(mm)	Engagement α (degré)	Inclinaison β (degré)	Ra (μm)	Rt (μm)	Ra // (μm)
1	0	0	0	-1	0	0	1,7	9	1,04
2	-1	-1	-1	-1	1	1	2,06	12	0,46
3	1	1	-1	-1	-1	-1	2,07	8,93	1,3
4	-1	0	0	0	0	0	4	16	1,07
5	-1	1	1	-1	-1	-1	1,46	7,84	1
6	0	0	0	0	0	-1	4,72	17	1,65
7	-1	1	1	1	-1	1	8,78	32,96	1,87
8	-1	-1	-1	1	1	-1	8	36	1,81
9	0	-1	0	0	0	0	3,44	16	0,95
10	0	0	0	0	1	0	5,16	17,22	1,54
11	-1	-1	1	1	1	1	7,17	32,56	0,63
12	1	-1	-1	1	1	1	8,42	34,4	0,96
13	1	-1	-1	-1	1	-1	1,97	9,6	1,68
14	-1	-1	-1	1	-1	1	8,53	37,82	0,57
15	-1	1	1	1	1	-1	8,58	32,24	2,7
16	1	1	1	-1	-1	1	3,4	21,2	1,57
17	-1	1	-1	1	-1	-1	7,34	36,56	1,89
18	0	0	-1	0	0	0	3,71	17	1,31
19	1	-1	-1	1	-1	-1	9,02	37	1,7
20	1	1	-1	-1	1	1	2,21	11,22	2,31
21	-1	-1	1	-1	-1	1	2,25	11,14	0,45
22	1	1	1	1	-1	-1	8,24	36,5	2,37
23	1	1	1	1	1	1	13,63	52,06	4
24	0	0	0	0	0	0	3,92	19,98	1,46
25	-1	-1	-1	-1	-1	-1	5	24	1,02
26	-1	1	-1	1	1	1	8,25	34,12	2,32
27	0	0	0	1	0	0	8,42	33,85	1,4
28	0	0	1	0	0	0	4,34	19,57	1,68
29	1	-1	1	1	-1	1	8,68	34,32	0,62
30	1	-1	-1	-1	-1	1	1,36	6,88	0,55
31	-1	1	-1	-1	-1	1	1,94	11	1,2
32	1	-1	1	-1	-1	-1	2,38	15,8	1,32
33	0	0	0	0	0	1	4	17,4	1,1
34	1	1	-1	1	1	-1	8,55	37,67	3,29
35	1	-1	1	-1	1	1	1,86	9,55	0,64
36	1	0	0	0	0	0	4,47	24,87	1,9
37	-1	-1	1	-1	1	-1	1,99	10	1,05
38	-1	-1	1	1	-1	-1	8,4	42,19	1,18
39	-1	1	1	-1	1	1	2,3	11,87	1,7
40	0	1	0	0	0	0	4,49	21,74	2,4
41	0	0	0	0	0	0	3,83	19,44	1,34
42	-1	1	-1	-1	1	-1	1,3	8,8	1,8
43	1	1	-1	1	-1	1	6,82	35,01	3
44	1	-1	1	1	1	-1	9,24	48,39	2,4
45	0	0	0	0	-1	0	3,68	17,6	1,04
46	1	1	1	-1	1	-1	2,4	18	2,76

4.3 Images des finis de surfaces

Il faut être conscient que 2 finis de surface peuvent être de finis différents et avoir une même valeur de rugosité R_a ou R_t , cette différence de propriétés de surface est dictée par le réglage des conditions de coupe.

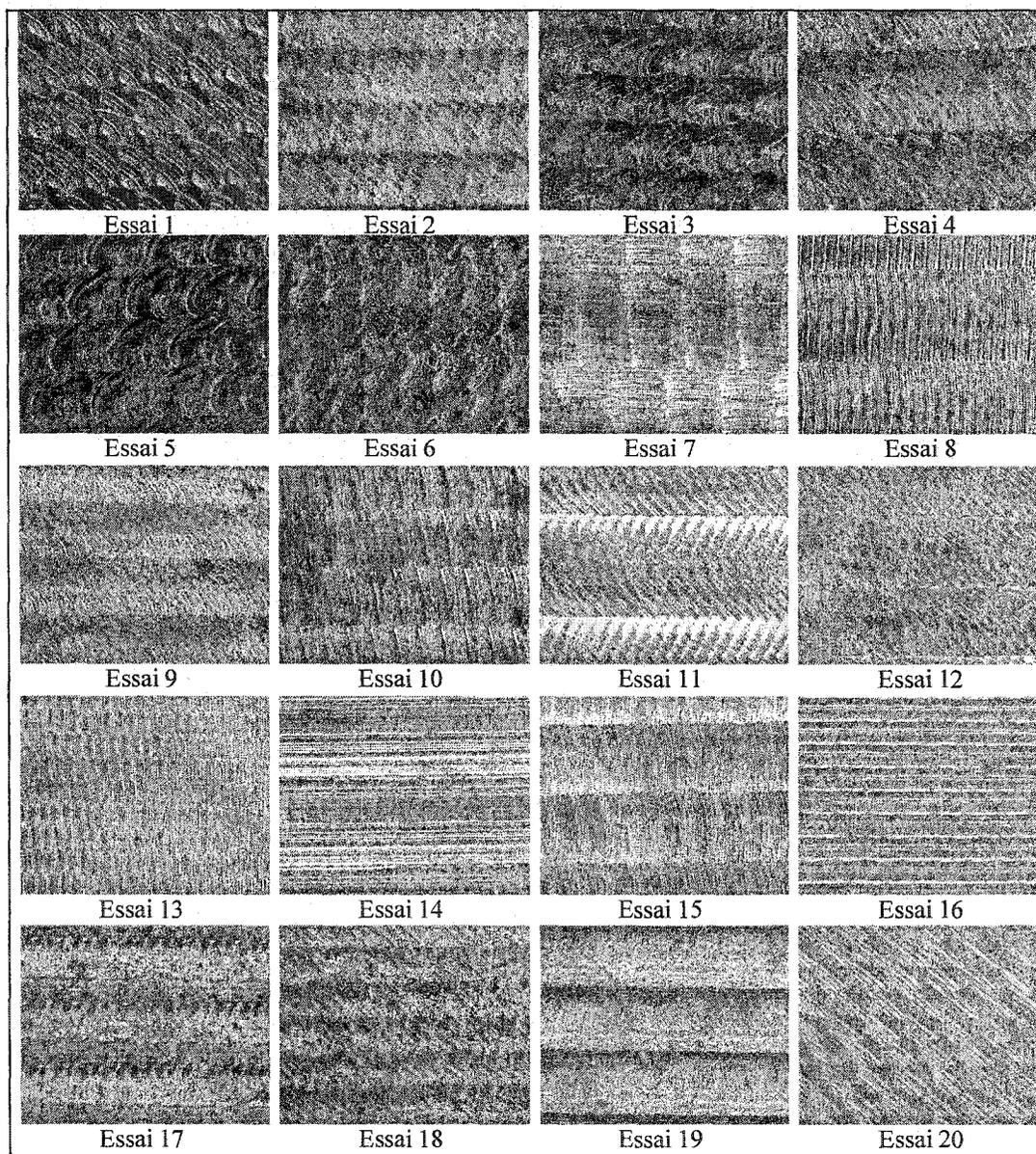
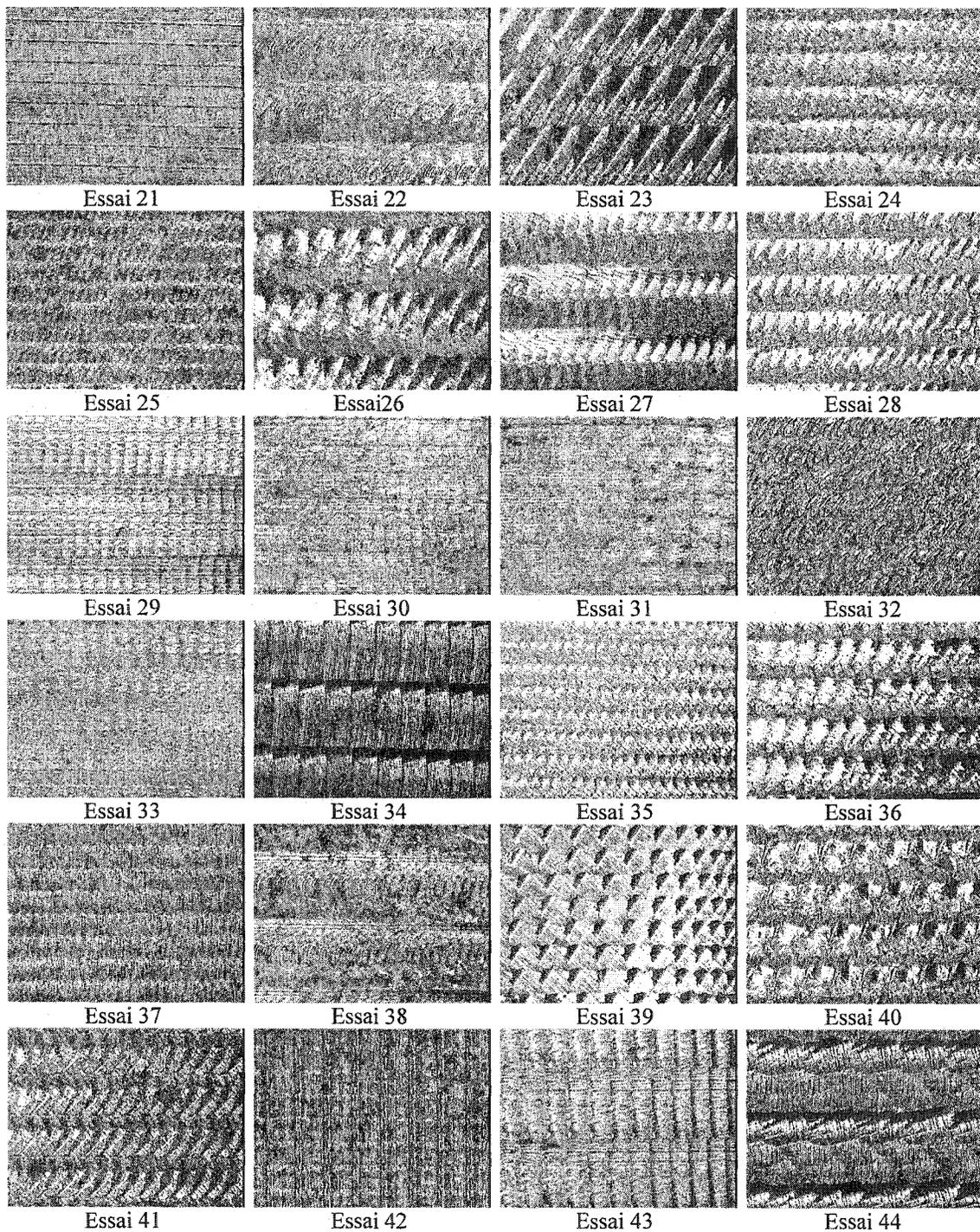


Figure 37 Image optique du fini de surface (18 X)



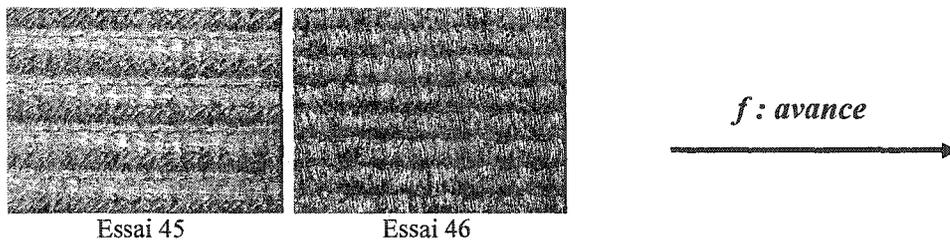


Figure 38 (Suite) Image optique du fini de surface (18 X)

4.4 Résultats et Analyse

Le graphique de Pareto (figures 39) classe les facteurs et leurs interactions en fonction de leur influence sur la rugosité moyenne (R_a). Tous les facteurs et interactions ayant un effet inférieur à la limite des facteurs significatifs (intervalle de confiance 95 %) sont négligés et ne sont pas représentés. Le graphe montre bien que les coefficients de détermination sont de l'ordre de 91 %, ce qui est très satisfaisant et qu'en plus du facteur émergence qui se voit le facteur le plus influent sur l'estimation de la rugosité, il y a interaction à effet significatif entre les facteurs avance – inclinaison suivie de l'interaction avance – vitesse de coupe.

Le graphique de Pareto (figure 40) classe les facteurs et leurs interactions en fonction de leur influence sur la rugosité maximale R_t . Tous les facteurs et interactions ayant un effet inférieur à la limite des facteurs significatifs (intervalle de confiance de 95 %) sont négligés et ne sont pas représentés. Le graphe de Pareto correspondant montre bien que le coefficient de détermination est de l'ordre de 90 %, ce qui est très satisfaisant et qu'en plus du facteur émergence qui est le facteur le plus influent sur l'estimation de la rugosité, il y a interaction à effet significatif entre les facteurs avance – inclinaison vitesse-profondeur et finalement avance – vitesse de coupe.

Le graphique de Pareto (figure 41) classe les facteurs et leurs interactions en fonction de leur influence sur la rugosité moyenne parallèle $R_{a//}$. Tous les facteurs et interactions ayant un effet inférieur à la limite des facteurs significatifs (intervalle de confiance de 95 %) sont négligés et ne sont pas représentés. Le graphe de Pareto correspondant montre bien que le coefficient de détermination est de l'ordre de 95 %, ce qui est très satisfaisant; le facteur avance est le facteur le plus influent sur l'estimation de la rugosité $R_{a//}$, il y a une seule interaction à effet significatif entre les facteurs avance – inclinaison suivis de l'inclinaison, émergence, vitesse et finalement le facteur angle d'engagement.

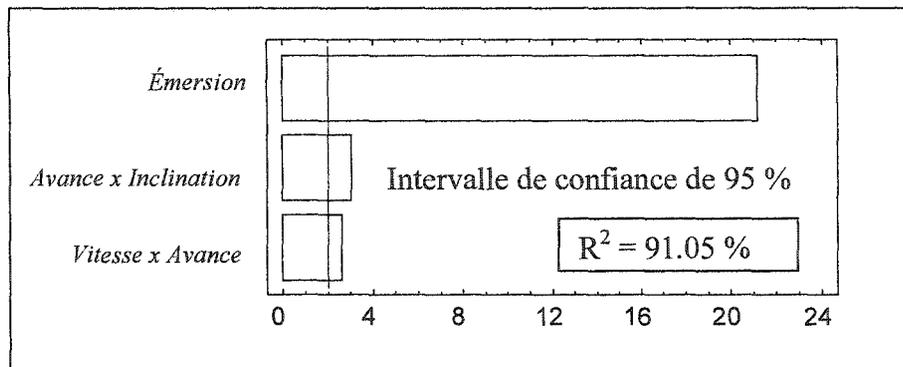


Figure 39 Pareto de la rugosité Ra linearisé

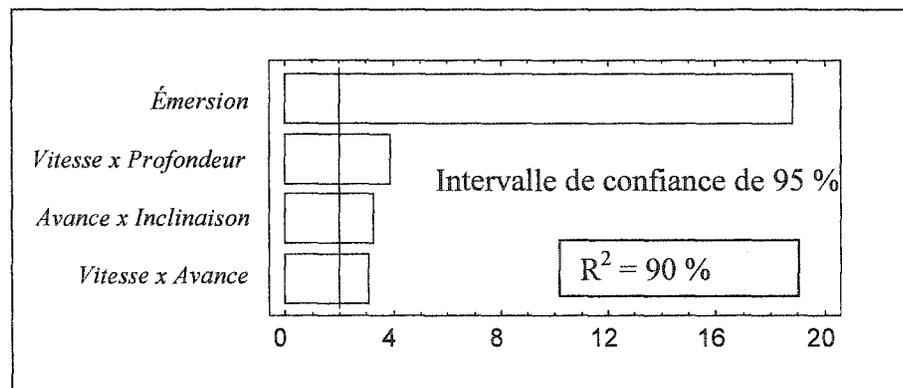


Figure 40 Pareto de la rugosité Rt linearisé

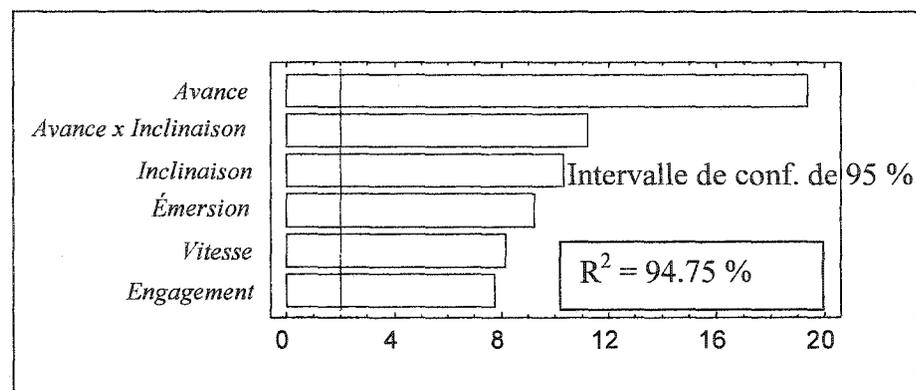


Figure 41 Pareto de la rugosité Ra // linearisé

Les figures 42, 43 et 44 présentent les effets principaux des facteurs considérés influençant respectivement la rugosité moyenne R_a , la rugosité maximale R_t et finalement la rugosité moyenne parallèle $R_{a//}$.

L'émersion ou largeur de coupe présente un effet direct sur le fini de surface, ainsi plus l'émersion augmente plus le fini est de moindre qualité. La meilleure réponse s'obtient en réglant le facteur émersion à son niveau le plus bas, comme le montre les figures 42 et 43.

La figure 44, présente les effets principaux des facteurs qui influent la rugosité moyenne parallèle $R_{a//}$. Il en découle que plus la vitesse de coupe augmente plus la rugosité augmente, ainsi que pour l'avance, l'émersion et l'angle d'engagement. Cependant, plus l'angle d'inclinaison augmente plus la rugosité diminue.

Les figures 45, 46 et 47 illustrent les effets des interactions existantes qui influent respectivement la rugosité moyenne R_a , la rugosité maximale R_t et finalement la rugosité moyenne parallèle $R_{a//}$.

Selon la figure 45, la combinaison des deux paramètres de coupe, soit la vitesse (m/min) et l'avance par dent (mm/dent), donc leur interaction influe aussi sur la rugosité R_a de même que l'interaction avance- angle d'inclinaison.

- si le facteur avance par dent est à son minimum ($f = -1$), plus la vitesse de coupe augmente plus la rugosité diminue.
- si l'avance est réglée à son maximum ($f = 1$), plus la vitesse augmente plus la rugosité augmente.
- si le facteur angle d'inclinaison est à son minimum ($\beta = -1$), plus l'avance par dent augmente plus la rugosité diminue.
- Si l'angle d'inclinaison est réglé à son maximum ($\beta = 1$), plus l'avance par dent augmente plus la rugosité augmente.

Selon la figure 46, la combinaison des deux paramètres de coupe (vitesse (m/min) et avance par dent (mm/dent)) donc leur interaction influent sur la rugosité R_t de même que l'interaction avance- angle d'inclinaison et finalement l'interaction vitesse-profondeur de coupe. il en découle que :

- si le facteur avance par dent est à son minimum ($f = -1$), plus la vitesse de coupe augmente plus la rugosité diminue.
- si l'avance est réglée à son maximum ($f = 1$), plus la vitesse augmente plus la rugosité augmente.
- si le facteur profondeur de coupe est à son minimum ($d = -1$), plus la vitesse de coupe augmente plus la rugosité diminue.
- si la profondeur de coupe est réglée à son maximum ($d = 1$), plus la vitesse augmente plus la rugosité augmente.
- si le facteur angle d'inclinaison est à son minimum ($\beta = -1$), plus l'avance par dent augmente plus la rugosité diminue.
- si l'angle d'inclinaison est réglé à son maximum ($\beta = 1$), plus l'avance par dent augmente plus la rugosité augmente.

Selon la figure 47, l'interaction entre l'avance et l'angle d'inclinaison influe sur la rugosité R_a . Il en découle que :

La rugosité augmente lorsque l'avance par dent augmente, quel que soit le réglage du niveau de l'angle d'inclinaison ($\beta = 1$ ou $\beta = -1$). La meilleure réponse s'obtient en réglant l'inclinaison et l'avance à leur niveau minimum.

Concernant les graphiques des probabilités normales des résidus illustrés dans les figures 48, 49 et 50, et hormis quelques points se détachant de la normalité, ces points peuvent laisser sous-entendre que le domaine expérimental couvre une plage difficilement modélisable avec un polynôme du premier degré. La normalité semble acceptable en plus des coefficients de corrélation assez élevés.

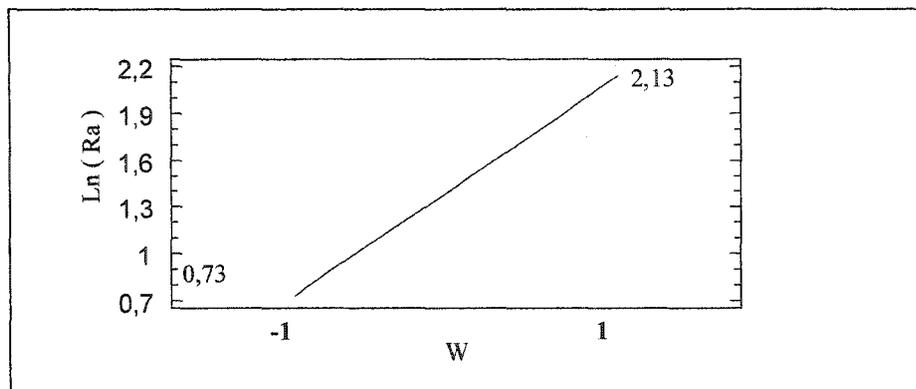


Figure 42 Effet direct sur la rugosité Ra

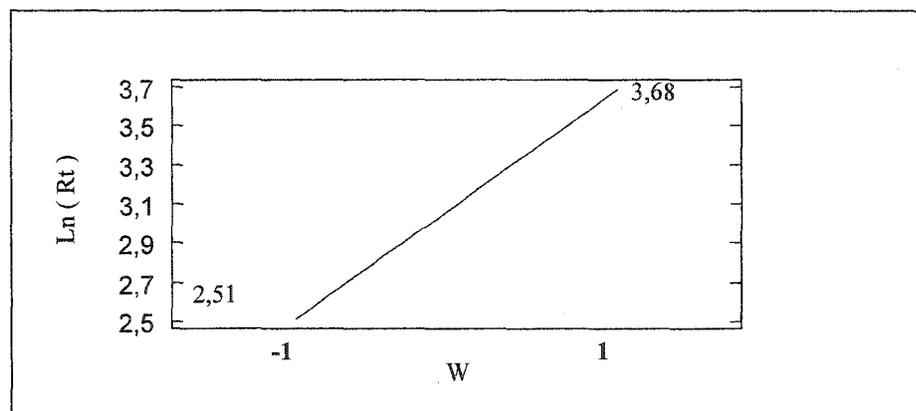


Figure 43 Effet direct sur la rugosité Rt

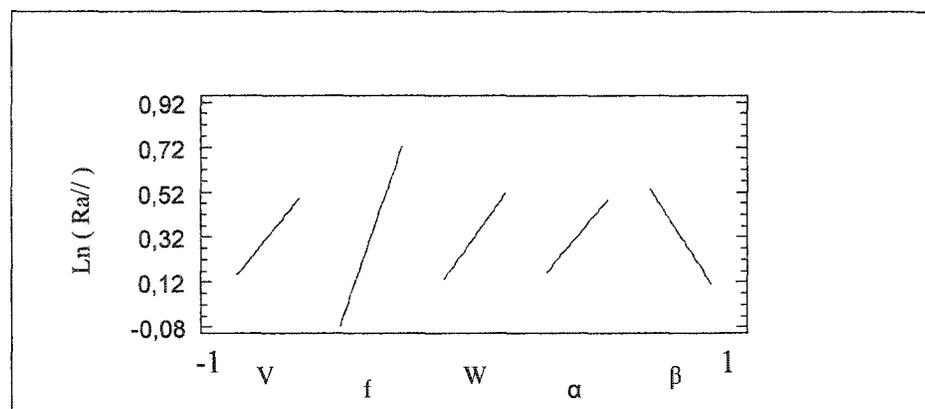


Figure 44 Effet direct sur la rugosité Ra //

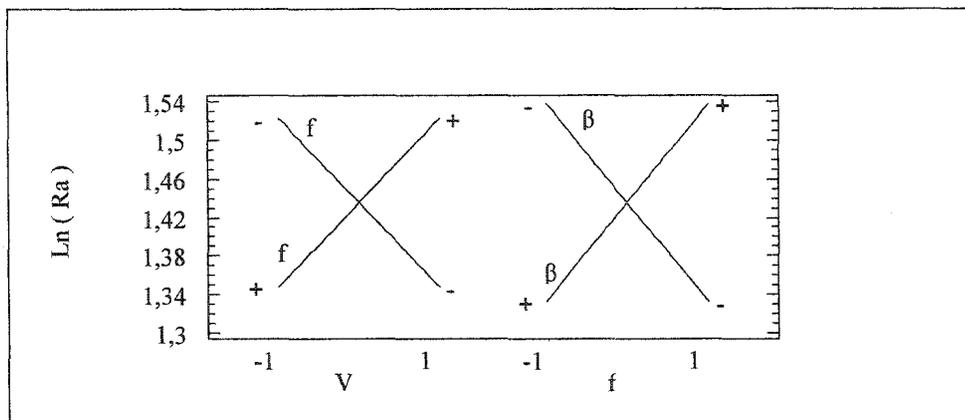


Figure 45 Effet des interactions sur la rugosité Ra

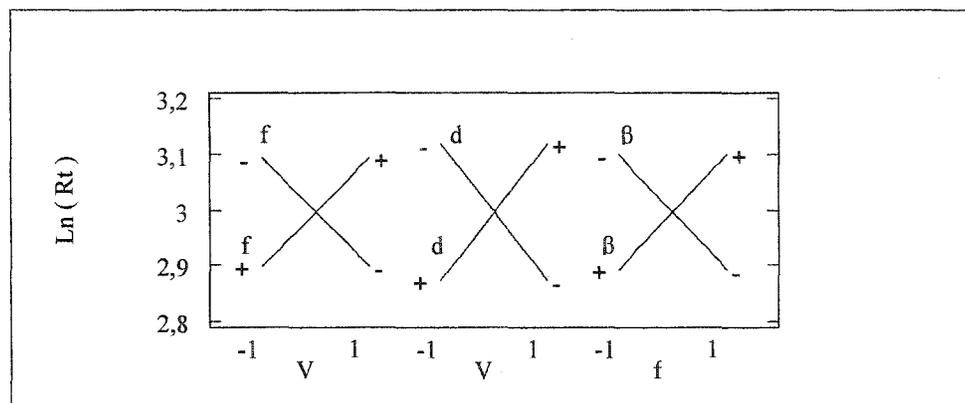


Figure 46 Effet des interactions sur la rugosité Rt

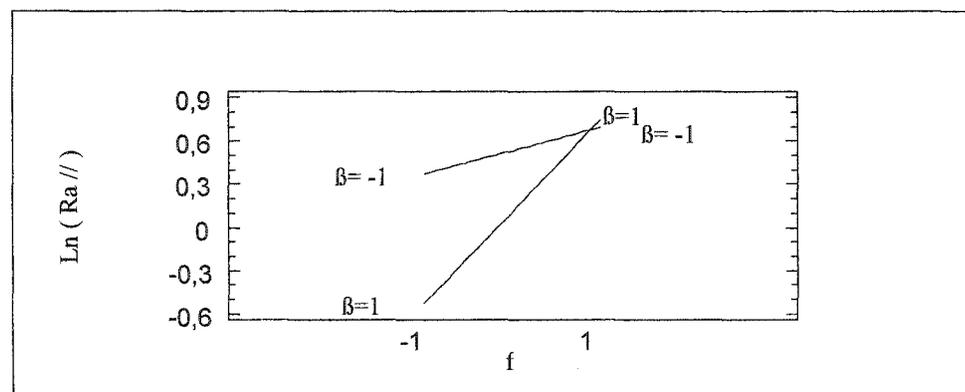


Figure 47 Effet des Interactions sur la rugosité Ra //

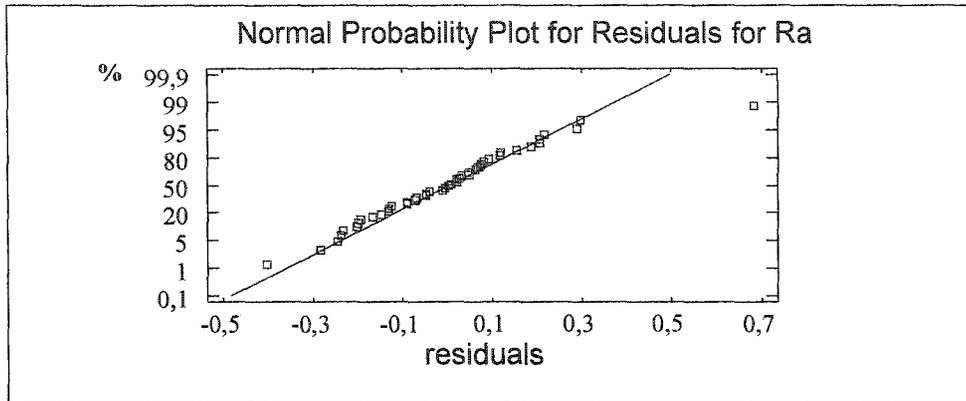


Figure 48 Graphe des résidus pour Ra

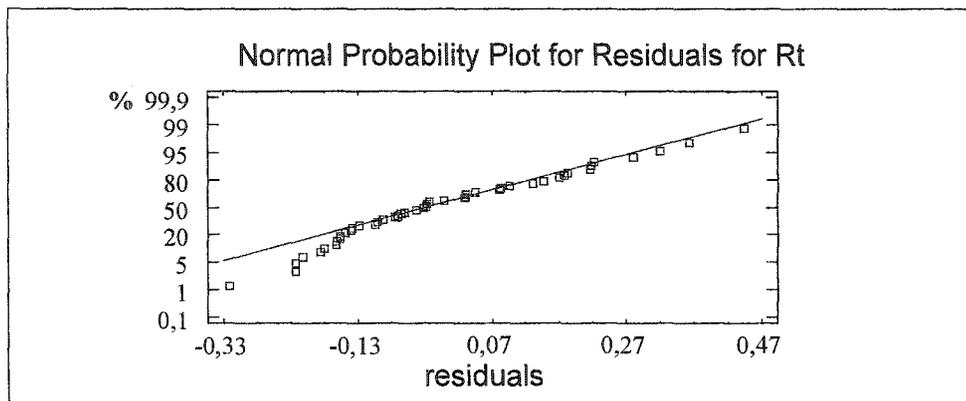


Figure 49 Graphe des résidus pour Rt

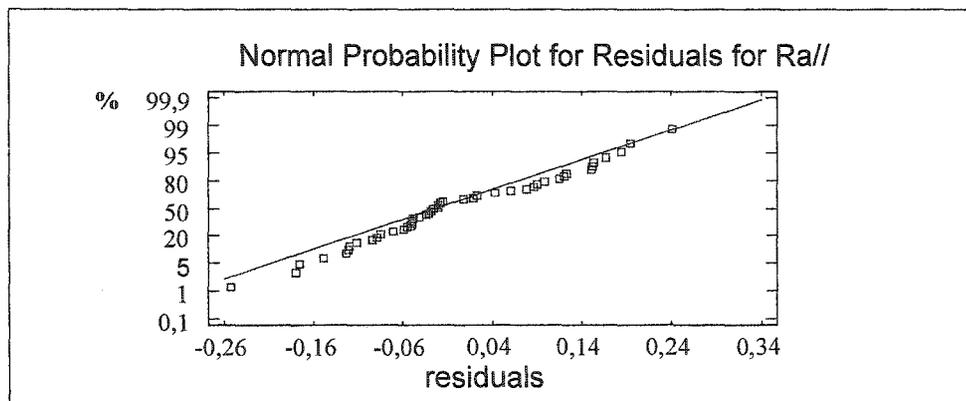


Figure 50 Graphe des résidus pour Ra//

4.5 Modélisation des équations de prédiction des finis de surface

$$\text{LOG}(Ra) = 1,435 + 0,7*w + 0,088*V*f + 0,102*f*\beta \quad (4.19)$$

$$\text{LOG}(Rt) = 3 + 0,58*w + 0,098*V*f + 0,123*V*d + 0,103*f*\beta \quad (4.20)$$

$$\text{LOG}(Ra//) = 0,323 + 0,17*V + 0,4*f + 0,19*w + 0,16*a - 0,21*\beta + 0,24*f*\beta \quad (4.21)$$

D'où:

$$Ra = 0.34 * V^{0.465} * W^{1.27} * (\beta + 1)^{0.109 * \ln(f) + 0.19} * f^{0.265 * \ln(V) - 1.54} \quad (4.22)$$

$$Rt = 0.1 * d^{0.66 * \ln(V) - 3.37} * (\beta + 1)^{0.192 + 0.11 * \ln(f)} * f^{0.296 * \ln(V) - 1.7} * V * W \quad (4.23)$$

$$Ra // = 0.62 * f^{0.294} * V^{0.278} * W^{0.345} * (\alpha + 1)^{0.093} * (\beta + 1)^{0.318 + 0.251 * \ln(f)} \quad (4.24)$$

Avec :

Ra : rugosité moyenne mesurées perpendiculairement au sens de l'avance.

Rt : rugosité maximale mesurée perpendiculairement au sens de l'avance.

Ra // : rugosité moyenne mesurées parallèlement au sens de l'avance.

V : vitesse de coupe, tel que : $90 \leq V \leq 300$ m/min

f : avance par dent $0.1 \leq f \leq 0.3$ mm/dent

d : profondeur de coupe $0.35 \leq d \leq 0.65$ mm

W: emersion $0.5 \leq W \leq 1.5$ mm

α : angle d'engagement $0 \leq \alpha \leq 300$

β : angle d'inclinaison $0 \leq \beta \leq 300$

4.6 Surfaces de réponse pour Ra

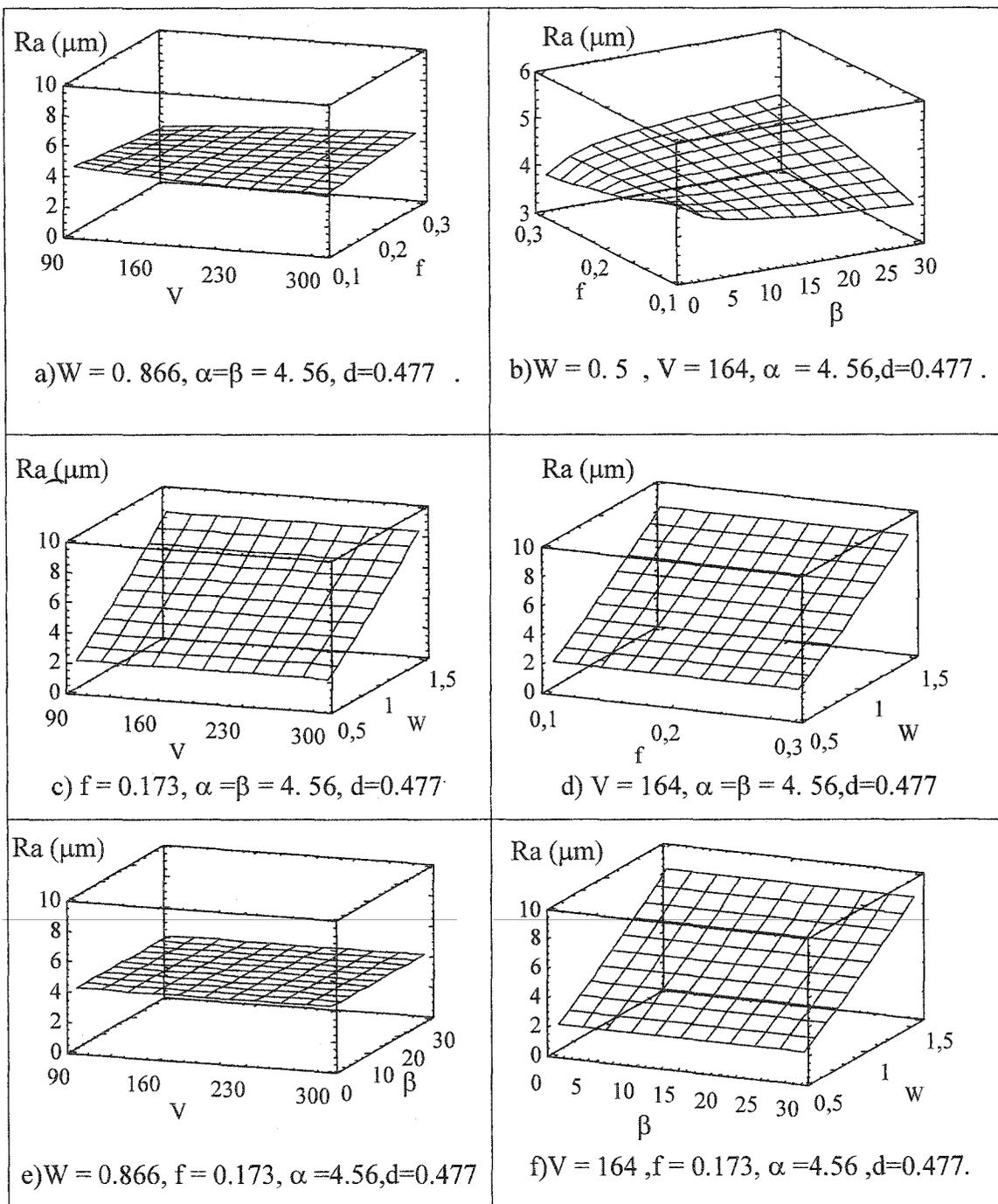


Figure 51 Surfaces de réponse à partir de l'équation de prédiction de Ra

4.7 Surfaces de réponse pour Rt

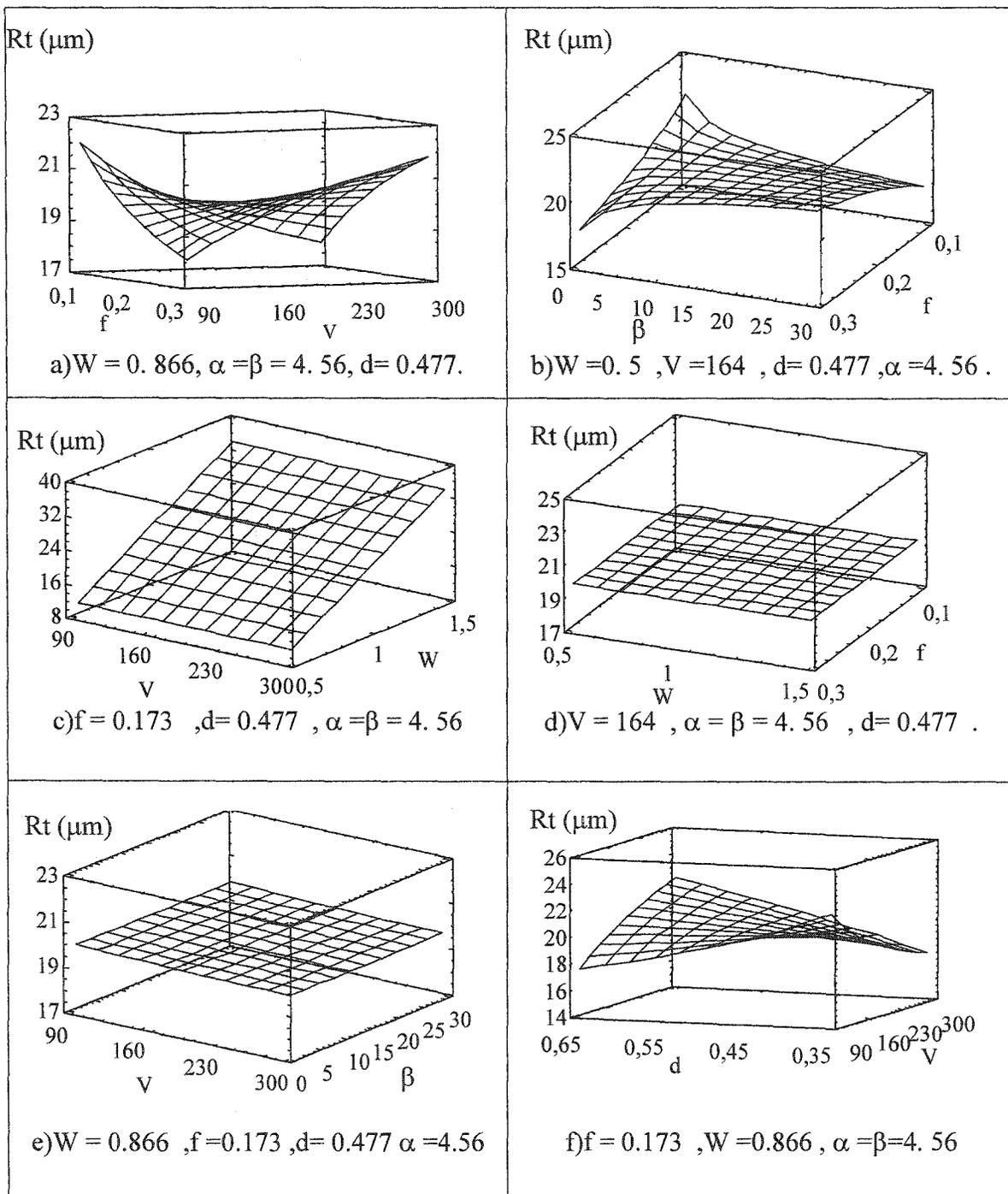


Figure 52 Surfaces de réponse à partir de l'équation de prédiction de Rt

4.8 Surfaces de réponse pour Ra //

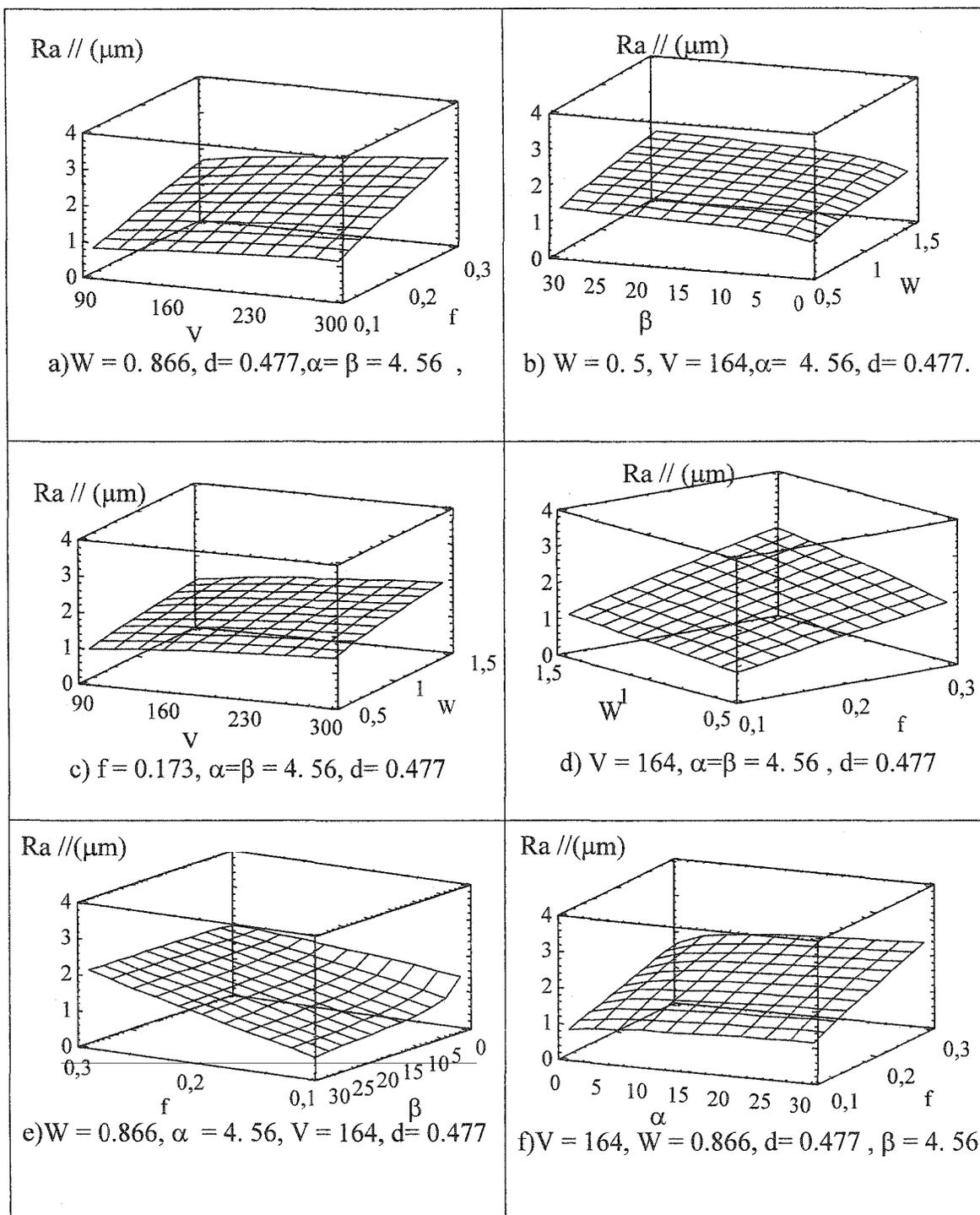


Figure 53 Surfaces de réponse pour la rugosité Ra//

CHAPITRE 5

OPTIMISATION SIMULTANÉE DES RÉPONSES

5.1 Introduction

Les stratégies de l'usinage utilisées dans de nombreuses compagnies peuvent ne pas être optimales. Les performances obtenues ne sont pas efficaces et ne permettent pas aux industries de demeurer concurrentielles. Un problème surgit, c'est le choix d'une totalité de conditions qui auront comme conséquence un produit avec une combinaison souhaitable des propriétés. C'est principalement un problème impliquant l'optimisation simultanée de plusieurs variables de réponse qui dépendent d'un certain nombre de variables ou d'ensembles indépendants de conditions. L'objectif de ce travail est de développer, d'examiner et de valider les stratégies optimales de l'usinage dans le but d'améliorer les performances de l'usinage. Dans ce chapitre une approche illustre comment plusieurs variables de réponse peuvent être transformées en une fonction de désirabilité, qui peut être optimisée par différentes techniques tout simplement. Son utilisation illustre le développement combiné de la qualité des finis de surface et du temps d'usinage sur une machine à commande numérique 5 axes, avec de l'acier à moule de type P20.

Dans ce travail, une approche combinée est utilisée pour obtenir une productivité maximale des aciers à moules et le meilleur fini de surface en optimisant les conditions de coupe. Qualitativement, le polissage manuel sera réduit, les risques de déformation de la surface seront minimisés. L'incertitude sur les temps de polissage est maîtrisée et, par voie de conséquences, les délais et les coûts au niveau des devis le sont également. Un problème se posant à la communauté de développement de produits est le choix d'un ensemble de conditions qui aura comme conséquence un produit avec une combinaison souhaitable des propriétés. C'est essentiellement un problème impliquant l'optimisation

simultanée de plusieurs variables de réponse (la combinaison souhaitable des propriétés) qui dépendent d'un certain nombre de variables ou d'ensembles indépendants de conditions.

Ce chapitre illustre comment plusieurs variables de réponse peuvent être transformées en fonction de désirabilité, qui peut être optimisée par la suite. Son utilisation sera illustrée dans le développement des performances de l'usinage 5 axes des aciers à moules de type P20. Les chercheurs dans l'industrie et dans beaucoup de secteurs scientifiques obtiennent souvent des données sur plusieurs réponses pour un arrangement donné d'un ensemble de variables contrôlables.

Hill et Hunter [20] ont cité plusieurs papiers dans lesquels des réponses multiples ont été étudiées. Dans un effort de résoudre le problème d'optimisation de réponses multiples, quelques chercheurs ont recouru à la superposition des surfaces de réponse pour arriver aux conditions de fonctionnement appropriées selon Hickman et al. [21]. Les tracés des surfaces de réponses fournissent une description graphique du comportement du système de réponses multiples. Cette méthode, bien que simple et franche, a ses limites dans de grands systèmes impliquant plusieurs variables contrôlables et plusieurs réponses, une situation typique dans laquelle une réponse de coût et une réponse de rendement est étudiée afin de trouver les conditions de fonctionnement optimums qui réduisent le coût et augmentent le rendement simultanément.

Ganadesiken [22] a présenté une discussion intéressante du fond général et la philosophie de certaines méthodes statistiques employées dans l'analyse des données expérimentales impliquant plusieurs réponses.

Harrington [23] a présenté une technique analytique pour l'optimisation de la fonction de réponses multiples basée sur le concept de l'utilité ou de désirabilité d'une propriété liée à une fonction donnée de réponse. Chaque réponse est transformée à une valeur désirée,

f , ($0 \leq f \leq 1$), telle que f augmente à mesure que la désirabilité de la propriété correspondante augmente en incorporant les différentes valeurs de désirabilité à une valeur globale simple de désirabilité, F , à savoir, leur moyenne géométrique. Le problème d'optimisation de plusieurs réponses est alors réduit à la maximisation d'une seule fonction globale, à savoir la fonction de désirabilité.

Dans un plus récent papier des chercheurs, Deringer et Suich [24] ont prolongé le procédé de Harrington [23] en présentant des transformations plus générales des réponses à l'aide des valeurs de désirabilité.

Dans ce travail nous proposons l'optimisation d'un système de réponses multiples. Nous supposons que toutes les fonctions de réponse dans le système dépendent du même ensemble de variables contrôlables et qu'elles peuvent être représentées par des modèles polynômes de régression du même degré dans une certaine région d'intérêt. La prochaine étape est d'obtenir différent optimum des réponses estimées dans la région expérimentale par l'entremise de la fonction de désirabilité. En maximisant cette fonction, nous pouvons arriver à un ensemble de conditions de fonctionnement appropriées à un optimum compromis.

L'objectif de ce travail est de développer des stratégies de coupe afin d'améliorer la productivité des opérations d'ébauche ainsi que la qualité des pièces usinées en 5 axes simultanés. Ce travail permettra de dégager des stratégies permettant le meilleur compromis des conditions de coupe afin d'améliorer les performances de l'usinage en 5 axes, notamment la productivité ainsi que le fini de surface. Compte tenu de la construction du plan d'expérience, nous déterminerons des équations de prédiction à partir des équations générées, qui permettent de prédire les résultats pour un ensemble de réglages choisis. De même, il est possible de trouver les réglages correspondants aux réponses optimales. Dans notre travail, ceci revient à la minimisation simultanée des réponses (Y_1 , Y_2 , Y_3 , Y_4 et de Y_5) illustré par le système suivant :

- Y1 : Rugosité moyenne dans la direction perpendiculaire à l'avance, (Ra).
- Y2 : Rugosité maximale dans la direction perpendiculaire à l'avance, (Rt).
- Y3 : Rugosité moyenne dans la direction de l'avance, (Ra //).
- Y4 : Temps de cycle réel (temps total des opérations du début à la fin), (Tc).
- Y5 : Temps d'usinage réel (ou temps de coupe), (Tu).

Sous l'effet des variables indépendantes (X1, X2, X3, X4 et X5) ou :

- X1 : Vitesse d'avance de l'outil.
- X2 : Avance par dent de l'outil.
- X3 : Profondeur de coupe.
- X4 : Largeur de coupe ou émersion.
- X5 : Angle d'engagement de l'outil par rapport à la pièce usinée.
- X6 : Angle d'inclinaison de l'outil par rapport à la pièce usinée.

5.2 Développement

La dernière technique d'optimisation simultanée de plusieurs réponses d'un système est la fonction de désirabilité. Cette fonction permet d'imposer des critères supplémentaires tels que les limites inacceptables et la sévérité avec laquelle la réponse doit rester près de la zone désirée. En partant de plusieurs équations exprimant des réponses différentes et ayant des facteurs communs, il s'agit de synthétiser ces fonctions en une seule, nommée la réponse composite ou désirabilité. Par la suite, il suffit de l'optimiser par les techniques habituelles de surface de réponse. Une telle méthode devient pratiquement nécessaire lorsque l'analyse comporte plus de trois facteurs selon Myers et Montgomery [25].

Cette méthode a été présentée la première fois par Harrington [23] et fut améliorée par Derringer et Suich [24]. Pour associer une relation de désirabilité à une réponse, il est proposé de spécifier les seuils d'acceptation et le paramètre de sévérité. La figure 54 illustre le cas pour une réponse dont on recherche une valeur cible: les seuils d'acceptation sont A et C. Toute valeur inférieure à A (fig. 54a) ou supérieure à C (fig. 54b) aura une désirabilité de zéro, ce qui indique une solution inacceptable. La valeur cible est B. Une valeur égale à B mérite une désirabilité de 1. Le paramètre de sévérité, s , restreint le domaine acceptable. Ainsi, avec un paramètre de 0.1, la tolérance est large autour de la cible, alors qu'avec un paramètre de 10, la restriction est très sévère au voisinage de la cible.

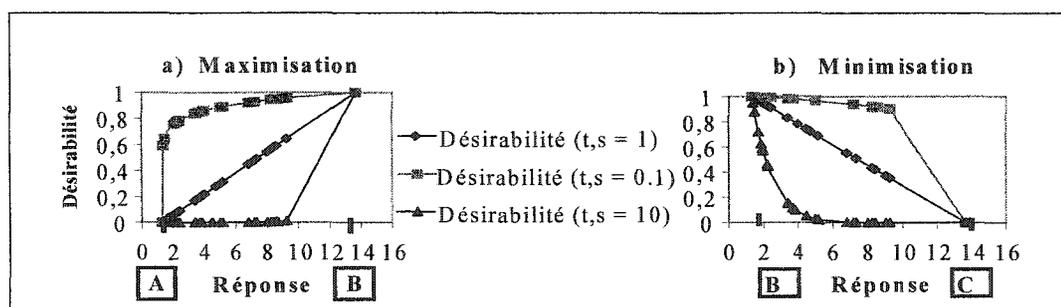


Figure 54 Fonction élémentaire de désirabilité pour une valeur cible

Évidemment, s'il s'agit d'un problème de minimisation ou de maximisation, seul un côté de la fonction de désirabilité est requis. Pour notre étude, le graphique suivant illustre le cas d'un problème de minimisation.

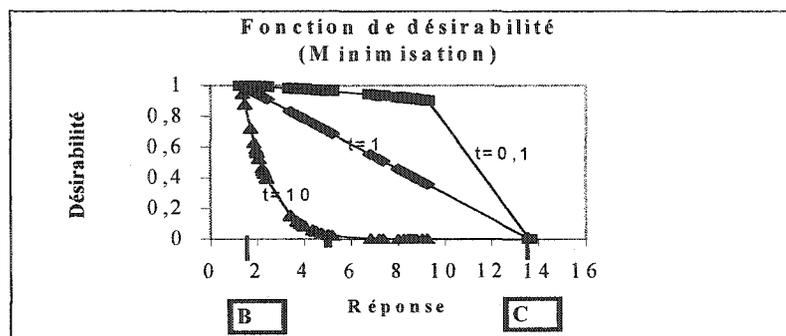


Figure 55 Fonction de désirabilité pour le cas d'une minimisation

Après le seuil supérieur, la désirabilité est considérée comme étant égale à 1. Les équations qui permettent ces transformations sont les suivantes :

$$d_i = \begin{cases} \left(\frac{\hat{Y} - A}{B - A} \right)^s, & A \leq \hat{Y} \leq B, \text{ Pour une maximisation.} \\ \left(\frac{\hat{Y} - C}{B - C} \right)^t, & B \leq \hat{Y} \leq C, \text{ Pour une minimisation.} \end{cases} \quad (5.25)$$

$$(5.26)$$

d_i , ($i=1, m$) : fonction élémentaire de désirabilité pour la réponse Y_i

\hat{Y} : Réponse du système à chaque point.

Avec d_i égale à 0, lorsque la réponse est hors du domaine permis. A, B et C représentent les limites critiques alors que s et t sont les paramètres de sévérité de chaque côté. Comme mentionné précédemment, les paramètres s et t peuvent être différents. C'est à l'analyste de déterminer ses seuils de sévérité. Une fois qu'une fonction de désirabilité est définie pour chaque réponse, l'agrégation de ces réponses se fait par une moyenne géométrique des d_i , $i=1, \dots, m$. L'équation utilisée est la suivante :

$$D = \left\{ d_1 * d_2 * d_3 * d_4 * d_5 * \dots * d_m \right\}^{\frac{1}{m}} \quad (5.27)$$

$$D = \left\{ \prod_{i=1}^m d_i \right\}^{\frac{1}{m}} \quad (5.28)$$

Cette approche suppose que toutes les réponses ont le même poids ($1/m$) et que les réglages des conditions optimales, après optimisation, vont tenir compte de toutes les réponses au même degré.

Cependant, elle peut être écrite sous la forme suivante selon Wu, jeff et Hamada [26] :

$$D = d_1^{w_1} * d_2^{w_2} * d_3^{w_3} * \dots * d_m^{w_m} \quad (5.29)$$

Équation de désirabilité globale.

Pour refléter la différence possible dans l'importance des différentes réponses, la dernière innovation consiste à peser les réponses, et donc donner les poids correspondants à chaque réponse selon l'importance d'une réponse par rapport aux autres. Ainsi, dans notre étude la fonction de désirabilité globale sera évaluée par l'entremise de l'équation (5.29), où les poids W_i sont tels que :

$$\begin{cases} 0 < W_i < 1 & \text{et que,} \\ W_1 + W_2 + \dots + W_m = 1. \end{cases} \quad (5.30)$$

Voici une synthèse de la méthode employée dans notre étude :

- À partir des estimations, \hat{Y}_i , déterminer les fonctions élémentaires de désirabilité, d_i , en chaque point du plan d'expérimentation pour chaque réponse, selon qu'il s'agira d'un problème de maximisation ou d'une minimisation à l'aide des équations (5.25) ou (5.26).
- Évaluer la fonction de désirabilité globale en chaque point du plan expérimental, pour chaque réponse à l'aide de l'équation (5.29).

- Bâtir une surface de réponse de la fonction de désirabilité D en fonction des variables indépendantes (facteurs).

$$D = f(X_1, X_2, \dots, X_m). \quad (5.30)$$

- Trouver l'optimum de cette surface de réponse par une méthode appropriée, telle la programmation non linéaire, analyse canonique, solveur d'Excel ou Winqsb, etc.

La matrice des résultats dans le tableau XII illustre tout le système de réponses étudiées dans cette thèse et sont recueillis pour fin d'optimisation.

Tableau XII

Matrice des expériences et résultats expérimentaux des réponses

Essai no	Variables						Réponse				
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5
	Vitesse V(m/min)	Avance f (mm/dent)	Prof. passe d (mm)	Émersion W(mm)	Engagement α (degré)	Inclinaison β (degré)	Ra (μ m)	Rt (μ m)	Ra // (μ m)	Tc (sec)	Tu(sec)
1	0	0	0	-1	0	0	1,7	9	1,04	432	293
2	-1	-1	-1	-1	1	1	2,06	12	0,46	1036	871
3	1	1	-1	-1	-1	-1	2,07	8,93	1,3	304	139
4	-1	0	0	0	0	0	4	16	1,07	387	297
5	-1	1	1	-1	-1	-1	1,46	7,84	1	469	306
6	0	0	0	0	0	-1	4,72	17	1,65	263	170
7	-1	1	1	1	-1	1	8,78	32,96	1,87	172	104
8	-1	-1	-1	1	1	-1	8	36	1,81	365	296
9	0	-1	0	0	0	0	3,44	16	0,95	374	282
10	0	0	0	0	1	0	5,16	17,22	1,54	275	170
11	-1	-1	1	1	1	1	7,17	32,56	0,63	369	297
12	1	-1	-1	1	1	1	8,42	34,4	0,96	168	95
13	1	-1	-1	-1	1	-1	1,97	9,6	1,68	440	279
14	-1	-1	-1	1	-1	1	8,53	37,82	0,57	365	297
15	-1	1	1	1	1	-1	8,58	32,24	2,7	173	104
16	1	1	1	-1	-1	1	3,4	21,2	1,57	296	140
17	-1	1	-1	1	-1	-1	7,34	36,56	1,89	173	104
18	0	0	-1	0	0	0	3,71	17	1,31	262	170
19	1	-1	-1	1	-1	-1	9,02	37	1,7	165	95
20	1	1	-1	-1	1	1	2,21	11,22	2,31	307	140
21	-1	-1	1	-1	-1	1	2,25	11,14	0,45	1026	873
22	1	1	1	1	-1	-1	8,24	36,5	2,37	118	47
23	1	1	1	1	1	1	13,63	52,06	4	121	47
24	0	0	0	0	0	0	3,92	19,98	1,46	261	170
25	-1	-1	-1	-1	-1	-1	5	24	1,02	1035	873
26	-1	1	-1	1	1	1	8,25	34,12	2,32	176	104
27	0	0	0	1	0	0	8,42	33,85	1,4	164	99
28	0	0	1	0	0	0	4,34	19,57	1,68	263	170
29	1	-1	1	1	-1	1	8,68	34,32	0,62	165	95
30	1	-1	-1	-1	-1	1	1,36	6,88	0,55	434	279
31	-1	1	-1	-1	-1	1	1,94	11	1,2	460	306
32	1	-1	1	-1	-1	-1	2,38	15,8	1,32	443	279
33	0	0	0	0	0	1	4	17,4	1,1	272	170
34	1	1	-1	1	1	-1	8,55	37,67	3,29	118	48
35	1	-1	1	-1	1	1	1,86	9,55	0,64	446	279
36	1	0	0	0	0	0	4,47	24,87	1,9	198	106
37	-1	-1	1	-1	1	-1	1,99	10	1,05	1031	873
38	-1	-1	1	1	-1	-1	8,4	42,19	1,18	366	297
39	-1	1	1	-1	1	1	2,3	11,87	1,7	470	305
40	0	1	0	0	0	0	4,49	21,74	2,4	200	109
41	0	0	0	0	0	0	3,83	19,44	1,34	262	170
42	-1	1	-1	-1	1	-1	1,3	8,8	1,8	466	307
43	1	1	-1	1	-1	1	6,82	35,01	3	117	47
44	1	-1	1	1	1	-1	9,24	48,39	2,4	165	95
45	0	0	0	0	-1	0	3,68	17,6	1,04	262	170
46	1	1	1	-1	1	-1	2,4	18	2,76	300	141

Tableau XIII

Matrice des résultats de désirabilités globales

Essai	Facteurs codés						Désirabilités									
	V	f	d	W	α	β	W 1=W 2=W 3=W 4=W 5=0,2				t = 1					
							t=0,1	t=1	t=5	t=10	w5=0,6	w4=0,6	w3=0,6	w2=0,6	w1=0,6	
1	0	0	0	-1	0	0	0,98	0,81	0,35	0,13	0,76	0,73	0,82	0,88	0,89	
2	-1	-1	-1	-1	1	1	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3	1	1	-1	-1	-1	-1	0,99	0,86	0,48	0,23	0,88	0,83	0,81	0,91	0,90	
4	-1	0	0	0	0	0	0,97	0,76	0,25	0,06	0,73	0,73	0,79	0,78	0,77	
5	-1	1	1	-1	-1	-1	0,98	0,81	0,35	0,12	0,75	0,71	0,83	0,89	0,89	
6	0	0	0	0	0	-1	0,97	0,77	0,27	0,07	0,81	0,80	0,71	0,77	0,74	
7	-1	1	1	1	-1	1	0,95	0,61	0,09	0,01	0,76	0,76	0,61	0,51	0,49	
8	-1	-1	-1	1	1	-1	0,94	0,55	0,05	0	0,62	0,63	0,58	0,44	0,50	
9	0	-1	0	0	0	0	0,98	0,78	0,29	0,09	0,75	0,75	0,82	0,79	0,80	
10	0	0	0	0	1	0	0,97	0,76	0,26	0,07	0,81	0,79	0,73	0,77	0,72	
11	-1	-1	1	1	1	1	0,96	0,64	0,11	0,01	0,67	0,68	0,78	0,53	0,58	
12	1	-1	-1	1	1	1	0,96	0,66	0,13	0,02	0,79	0,79	0,75	0,51	0,53	
13	1	-1	-1	-1	1	-1	0,97	0,77	0,27	0,07	0,74	0,71	0,71	0,85	0,85	
14	-1	-1	-1	1	-1	1	0,95	0,58	0,06	0	0,63	0,65	0,75	0,43	0,49	
15	-1	1	1	1	1	-1	0,94	0,56	0,06	0	0,72	0,73	0,45	0,50	0,48	
16	1	1	1	-1	-1	1	0,97	0,77	0,28	0,08	0,83	0,79	0,73	0,73	0,80	
17	-1	1	-1	1	-1	-1	0,95	0,62	0,09	0,01	0,76	0,76	0,61	0,46	0,56	
18	0	0	-1	0	0	0	0,98	0,81	0,34	0,11	0,83	0,82	0,78	0,79	0,80	
19	1	-1	-1	1	-1	-1	0,95	0,59	0,07	0,01	0,75	0,75	0,62	0,44	0,47	
20	1	1	-1	-1	1	1	0,97	0,78	0,28	0,08	0,83	0,78	0,61	0,84	0,85	
21	-1	-1	1	-1	-1	1	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
22	1	1	1	1	-1	-1	0,95	0,59	0,07	0	0,77	0,77	0,52	0,45	0,51	
23	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
24	0	0	0	0	0	0	0,98	0,78	0,29	0,08	0,81	0,81	0,75	0,74	0,78	
25	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
26	-1	1	-1	1	1	1	0,95	0,59	0,07	0,01	0,74	0,74	0,53	0,48	0,51	
27	0	0	0	1	0	0	0,96	0,64	0,11	0,01	0,78	0,78	0,69	0,51	0,52	
28	0	0	1	0	0	0	0,97	0,76	0,25	0,06	0,80	0,80	0,70	0,74	0,76	
29	1	-1	1	1	-1	1	0,96	0,67	0,13	0,02	0,79	0,80	0,80	0,51	0,52	
30	1	-1	-1	-1	-1	1	0,98	0,85	0,45	0,21	0,78	0,75	0,91	0,92	0,92	
31	-1	1	-1	-1	-1	1	0,98	0,78	0,29	0,09	0,73	0,70	0,79	0,84	0,86	
32	1	-1	1	-1	-1	-1	0,97	0,76	0,26	0,07	0,74	0,70	0,76	0,78	0,83	
33	0	0	0	0	0	1	0,98	0,81	0,35	0,12	0,83	0,82	0,81	0,79	0,79	
34	1	1	-1	1	1	-1	0,93	0,48	0,03	0	0,69	0,69	0,31	0,39	0,45	
35	1	-1	1	-1	1	1	0,98	0,83	0,39	0,15	0,77	0,73	0,89	0,88	0,89	
36	1	0	0	0	0	0	0,97	0,74	0,22	0,05	0,83	0,82	0,66	0,67	0,74	
37	-1	-1	1	-1	1	-1	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
38	-1	-1	1	1	-1	-1	0,94	0,52	0,04	0	0,60	0,61	0,64	0,34	0,47	
39	-1	1	1	-1	1	1	0,97	0,74	0,22	0,05	0,71	0,68	0,69	0,81	0,83	
40	0	1	0	0	0	0	0,97	0,72	0,19	0,04	0,81	0,81	0,57	0,69	0,73	
41	0	0	0	0	0	0	0,98	0,79	0,31	0,09	0,82	0,82	0,77	0,76	0,79	
42	-1	1	-1	-1	1	-1	0,97	0,76	0,25	0,06	0,72	0,69	0,69	0,85	0,87	
43	1	1	-1	1	-1	1	0,94	0,57	0,06	0	0,75	0,75	0,40	0,46	0,56	
44	1	-1	1	1	1	-1	0,91	0,41	0,01	0	0,62	0,62	0,43	0,18	0,38	
45	0	0	0	0	-1	0	0,98	0,82	0,37	0,13	0,83	0,83	0,83	0,79	0,81	
46	1	1	1	-1	1	-1	0,97	0,7	0,17	0,03	0,79	0,75	0,49	0,73	0,80	

5.3 Égalité dans les poids des réponses

Selon les degrés de sévérité imposés aux fonctions de désirabilité élémentaires, donc les valeurs de t et de plus les poids w_i qui imposeront l'importance d'une réponse par rapport à une autre, nous commençons par le cas où toutes les réponses se valent en importance, donc les poids attribués à ces dernières sont identiques ($w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 = 0.2$). Le graphique de Pareto de la figure 56 illustre les facteurs qui influent la fonction de désirabilité avec un coefficient de détermination de 93.33 %. Tous les facteurs et interactions en bas du seuil de 5 % ne sont pas influents sur la fonction de désirabilité et ne sont donc pas reportés sur le graphique de Pareto. Ce graphe est valable pour ($t = 0.1, 1, 5$ et 10).

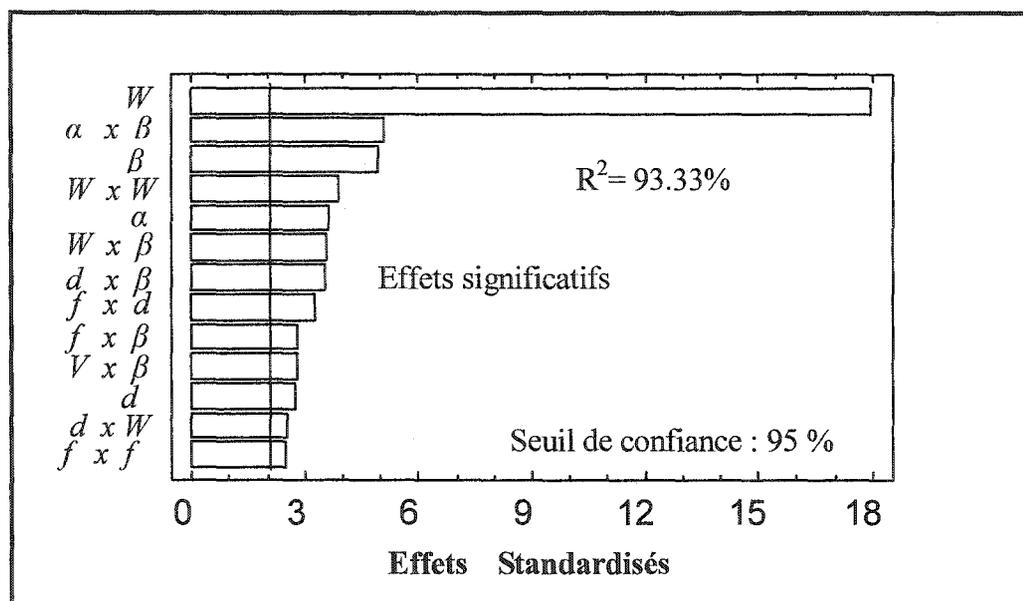


Figure 56 Graphiques de Pareto des effets significatifs sur la désirabilité ($t=0,1$)

L'étape suivante est la modélisation empirique des fonctions de désirabilité selon les valeurs des degrés de sévérité de t ($t = 0.1, 1, 5$ et 10). Finalement, on utilisera la programmation non linéaire pour résoudre le problème d'optimisation de la fonction-objectif (désirabilité), cela revient donc à la maximisation de la fonction-objectif et par la même occasion, l'obtention des réglages optimums des conditions de coupe.

5.4 Désirabilité

- $t = 0.1$

$$\begin{aligned} \text{Ln}(D) = & -0.0247 - 0.0023*d - 0.0150*W - 0.0030*\alpha + 0.0041*\beta + 0.0025*V*\beta - \\ & 0.0057*f^2 + 0.0029*f*d - 0.0025*f*\beta + 0.0023*d*W + 0.0030*d*\beta - 0.0091*W^2 + \\ & 0.0032*W*\beta + 0.0046*\alpha*\beta \end{aligned} \quad (5.31)$$

- $t = 1$

$$\begin{aligned} \text{Ln}(D) = & -0.2470 - 0.0230*d - 0.1501*W - 0.0300*\alpha + 0.0413*\beta + 0.0251*V*\beta - \\ & 0.0573*f^2 + 0.0296*f*d - 0.0254*f*\beta + 0.0230*d*W + 0.0301*d*\beta - 0.0910*W^2 + \\ & 0.0323*W*\beta + 0.0463*\alpha*\beta \end{aligned} \quad (5.32)$$

- $t = 5$

$$\begin{aligned} \text{Ln}(D) = & -1.2352 - 0.1150*d - 0.7506*W - 0.1500*\alpha + 0.2069*\beta + 0.1258*V*\beta - \\ & 0.2866*f^2 + 0.1483*f*d - 0.1274*f*\beta + 0.1150*d*W + 0.1509*d*\beta - 0.4550*W^2 + \\ & 0.1619*W*\beta + 0.2317*\alpha*\beta \end{aligned} \quad (5.33)$$

- $t = 10$

$$\begin{aligned} \text{Ln}(D) = & -2.4705 - 0.2301*d - 1.5013*W - 0.3001*\alpha + 0.4138*\beta + 0.2517*V*\beta - \\ & 0.5732*f^2 + 0.2966*f*d - 0.2549*f*\beta + 0.2301*d*W + 0.3018*d*\beta - 0.9101*W^2 + \\ & 0.3238*W*\beta + 0.4634*\alpha*\beta \end{aligned} \quad (5.34)$$

- **Optimisation**

Le problème revient à maximiser la fonction de désirabilité D qui est la fonction-objectif sous les contraintes des variables. Le tableau suivant illustre les réglages optimums des conditions de coupe obtenus par programmation non linéaire (logiciel Winqsb).

Tableau XIV

Résultats de l'optimisation

	V	f	d	W	α	β	D
t= 0.1	-1	-0.0364	-1	-1	-1	-1	0.998
t=1	-1	-0.0364	-1	-1	-1	-1	0.981
t= 5	-1	-0.0364	-1	-1	-1	-1	0.908
t= 10	-1	-0.0364	-1	-1	-1	-1	0.826

Par exemple pour le cas de $t = 1$, la valeur de la fonction de désirabilité est de 0.98, ce qui est très proche de 1, les réglages des conditions de coupe pour ce cas se font en réglant chaque facteur de coupe au niveau correspondant dans le tableau XIV, et par la suite un décodage par l'entremise des équations de décodage s'impose pour transformer ces facteurs de coupe en valeurs naturelles.

En ce qui concerne le reste de l'étude nous avons opté pour un facteur de sévérité $t = 1$, du fait que la désirabilité correspondante est très proche de 1.

Il n'est pas sans savoir que nous avons testé plusieurs valeurs initiales et différents pas de recherches pour déterminer l'optimum de chaque facteur de coupe.

5.5 Inégalité dans les poids des réponses

En partant du fait que le facteur de sévérité t est ($t = 1$), nous allons maintenant procéder à l'optimisation du système dans le cas où une réponse serait plus importante que toutes les autres. Cela est possible comme déjà mentionné plus haut par l'entremise des poids (W_i). Cette approche permettra de dégager d'autres réglages optimums des conditions de coupe selon les priorités et besoins de l'entreprise. Les cas traités dans notre recherche sont les suivants :

- La priorité est donnée au temps d'usinage réel (T_u).

$$\left\{ \begin{array}{l} w_1, w_2, w_3, w_4 = 0,1 \text{ et} \\ w_5 = 0,6 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (5.35) \\ (5.36) \end{array}$$

- La priorité est donnée au temps de cycle réel (T_c).

$$\left\{ \begin{array}{l} w_1, w_2, w_3, w_5 = 0,1 \text{ et} \\ w_4 = 0,6 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (5.37) \\ (5.38) \end{array}$$

- La priorité est donnée à la rugosité (R_a).

$$\left\{ \begin{array}{l} w_1, w_2, w_4, w_5 = 0,1 \text{ et} \\ w_3 = 0,6 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (5.39) \\ (5.40) \end{array}$$

- La priorité est donnée à la rugosité (R_t)

$$\left\{ \begin{array}{l} w_1, w_3, w_4, w_5 = 0,1 \text{ et} \\ w_2 = 0,6 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (5.41) \\ (5.42) \end{array}$$

- La priorité est donnée à la rugosité (R_a)

$$\left\{ \begin{array}{l} w_2, w_3, w_4, w_5 = 0,1 \text{ et} \\ w_1 = 0,6 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (5.43) \\ (5.44) \end{array}$$

Bien sûr, le jugement de l'importance des réponses repose sur la technicité et l'expérience de chacun, ceci est possible par le pesage des réponses; par conséquent, l'attribution d'un poids plus élevé à la réponse jugée imposante par rapport aux autres réponses.

Les graphiques de Pareto des figures (57, 58, 59, 60 et 61) illustrent les facteurs qui influent la fonction de désirabilité relativement aux poids attribués aux différentes réponses. Tous les facteurs et interactions en bas du seuil de 5 % ne sont pas influents sur la fonction de désirabilité et ne sont donc pas reportés sur le graphique de Pareto.

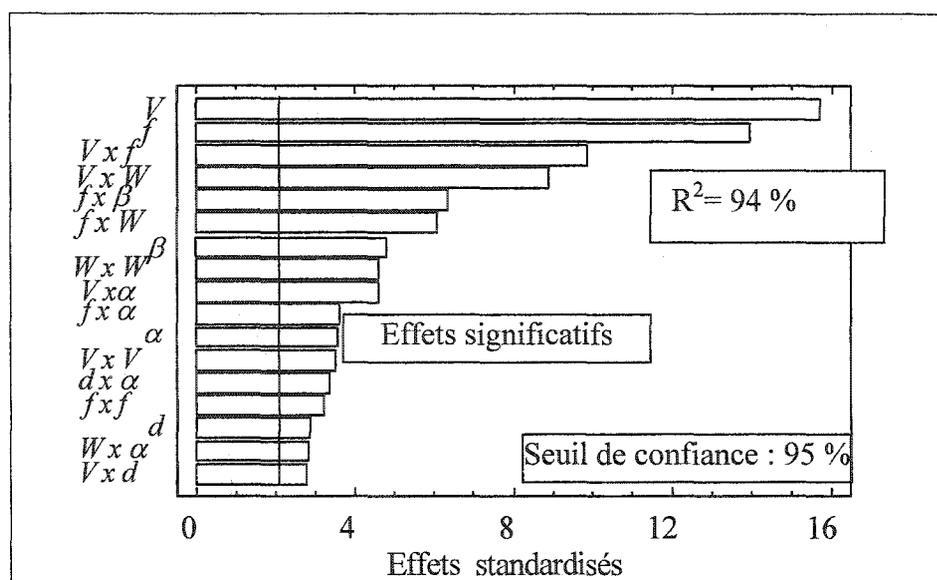


Figure 57 Pareto des effets significatifs sur la désirabilité, $t=1, w_5=0,6$

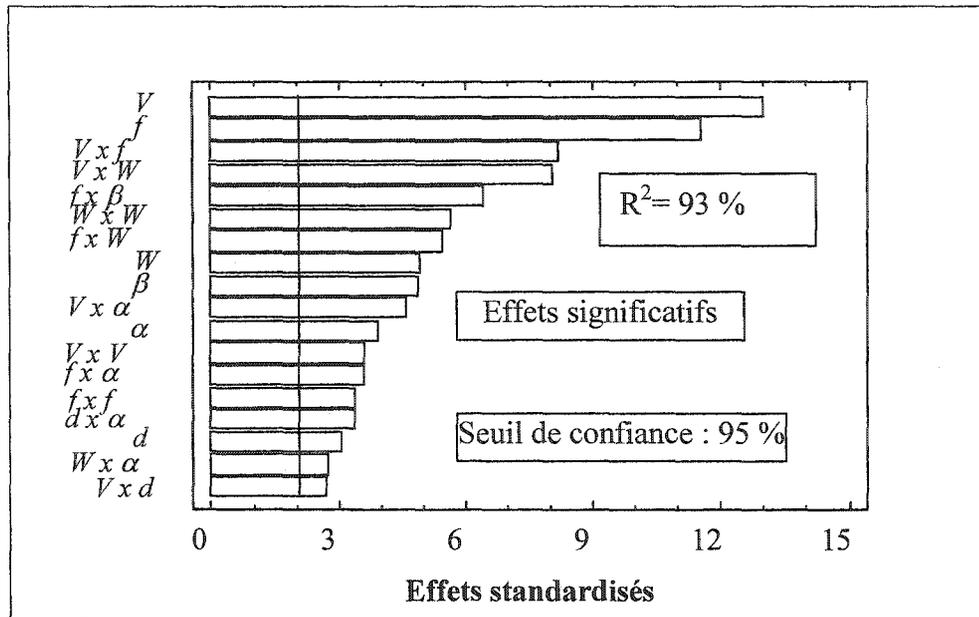


Figure 58 Pareto des effets significatifs sur la désirabilité, $t=1$, $w_4=0,6$

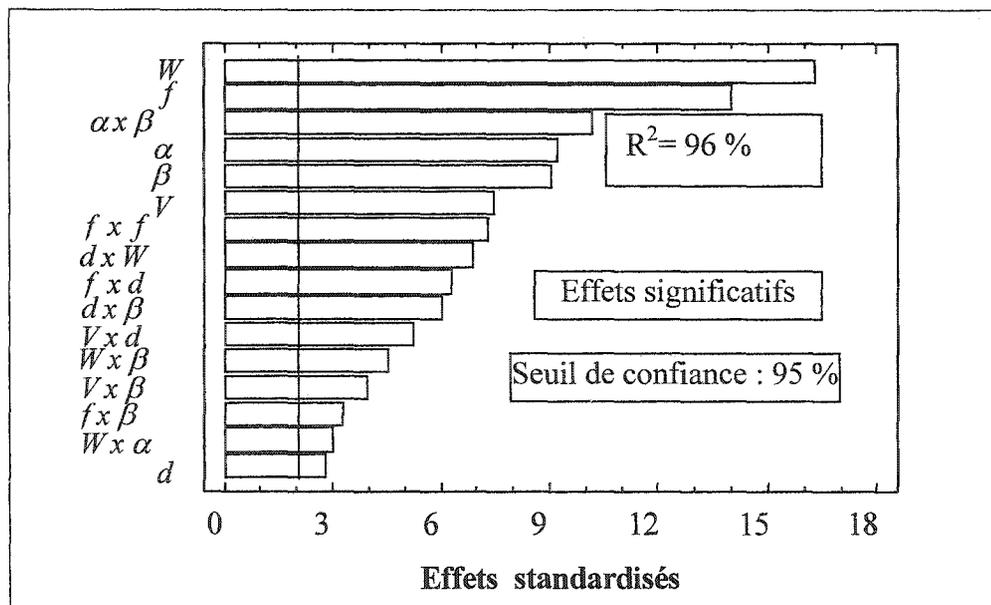


Figure 59 Pareto des effets significatifs sur la désirabilité, $t=1$, $w_3=0,6$

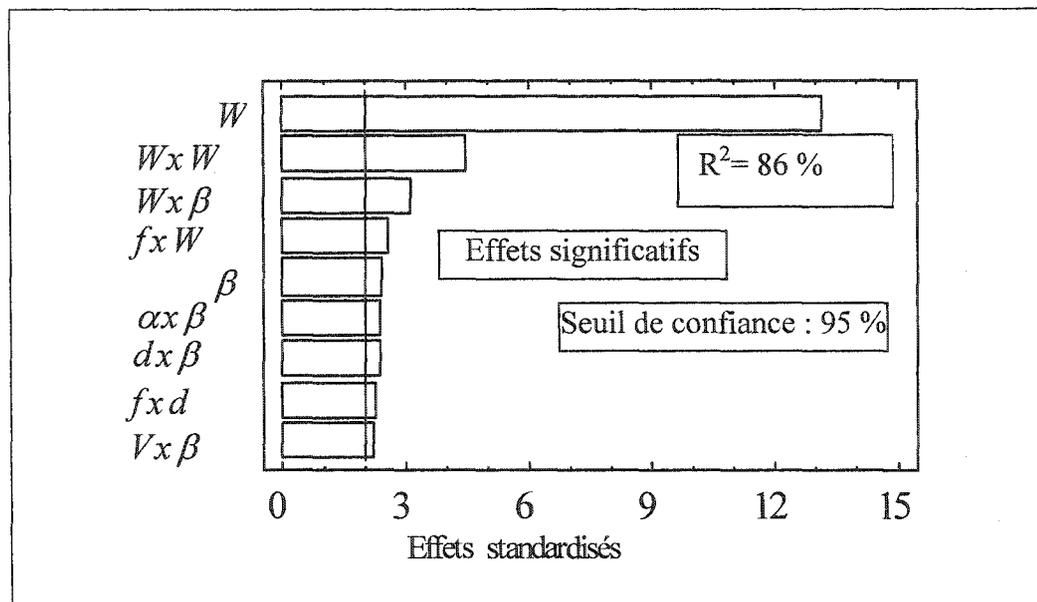


Figure 60 Pareto des effets significatifs sur la désirabilité, $t=1, w_2=0,6$

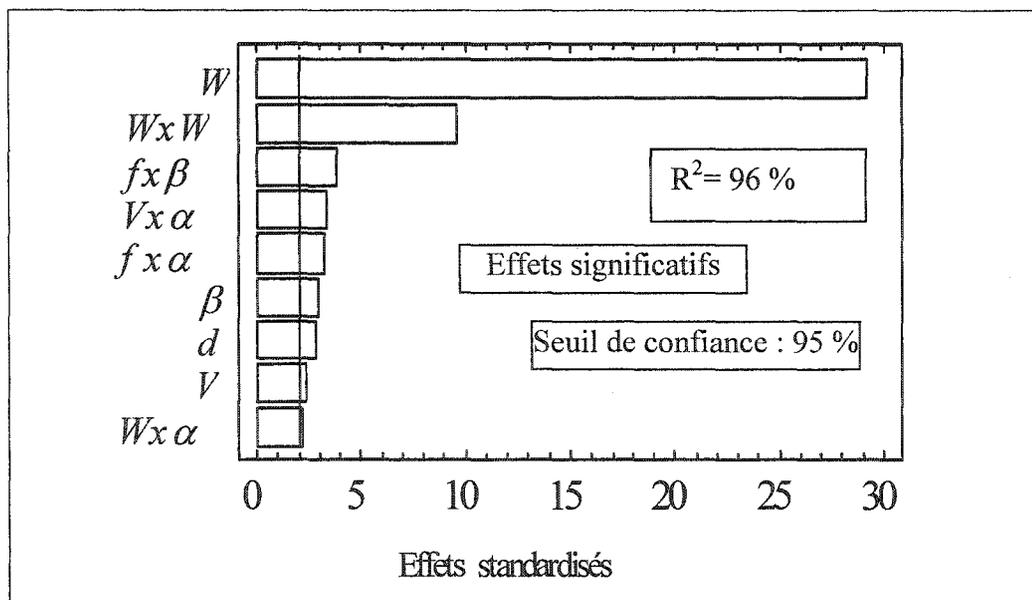


Figure 61 Pareto des effets significatifs sur la désirabilité, $t=1, w_1=0,6$

5.6 Désirabilité

- $W_5 = 0,6$.

$$\begin{aligned} \text{Ln}(D) = & -0.2028 + 0.0710*V + 0.0631*f - 0.012*d - 0.015*\alpha + 0.02*\beta - 0.0455*V^2 \\ & - 0.0507*V*f - 0.012*V*d - 0.0455*V*W - 0.021*V*\alpha - 0.0415*f^2 - 0.0312*f*W - \\ & 0.0164*f*\alpha - 0.028*f*\beta - 0.0147*d*\alpha - 0.06*W^2 - 0.0128*W*\alpha \end{aligned} \quad (5.45)$$

- $W_4 = 0,6$.

$$\begin{aligned} \text{Ln}(D) = & -0.2081 + 0.064*V + 0.057*f - 0.0123*d + 0.024*W - 0.0161*\alpha + 0.02*\beta - \\ & 0.0454*V^2 - 0.045*V*f - 0.0111*V*d - 0.0443*V*W - 0.0206*V*\alpha - 0.0426*f^2 - \\ & 0.03*f*W - 0.016*f*\alpha - 0.0276*f*\beta - 0.0144*d*\alpha - 0.072*W^2 - 0.0121*W*\alpha \end{aligned} \quad (5.46)$$

- $W_3 = 0,6$.

$$\begin{aligned} \text{Ln}(D) = & -0.2856 - 0.0685*V - 0.1292*f - 0.0243*d - 0.1503*W - 0.0797*\alpha + \\ & 0.0789*\beta + 0.0544*V*d + 0.038*V*\beta - 0.1143*f^2 + 0.0653*f*d - 0.0312*f*\beta \\ & + 0.0711*d*W + 0.0556*d*\beta + 0.0275*W*\alpha + 0.0436*W*\beta + 0.1059*\alpha*\beta \end{aligned} \quad (5.47)$$

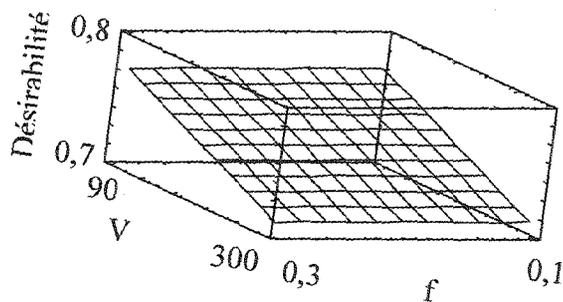
- $W_2 = 0,6$.

$$\begin{aligned} \text{Ln}(D) = & -0.2807 - 0.3237*W + 0.0581*\beta + 0.0570*V*\beta + 0.0581*f*d + 0.065*f*W \\ & + 0.0594*d*\beta - 0.2001*W^2 + 0.0794*W*\beta + 0.0607*\alpha*\beta \end{aligned} \quad (5.48)$$

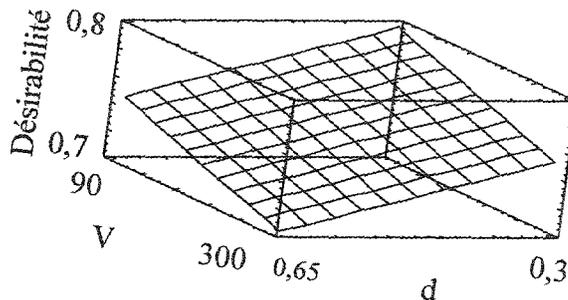
- $W_1 = 0,6$.

$$\begin{aligned} \text{Ln}(D) = & -0.2603 - 0.0216*V - 0.0254*d - 0.2802*w + 0.0263*bet - 0.0327*V*alf - \\ & 0.0322*f*alf - 0.0365*f*bet - 0.1647*w^2 - 0.0210*w*alf \end{aligned} \quad (5.49)$$

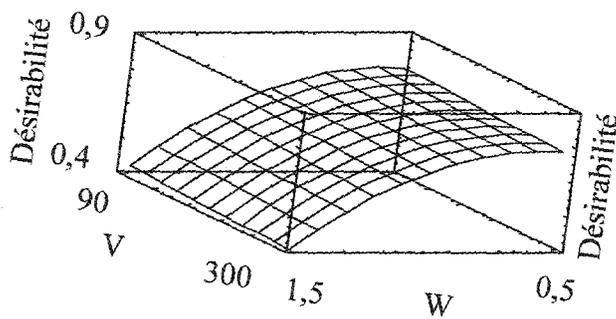
5.7 Surfaces de réponse des désirabilités



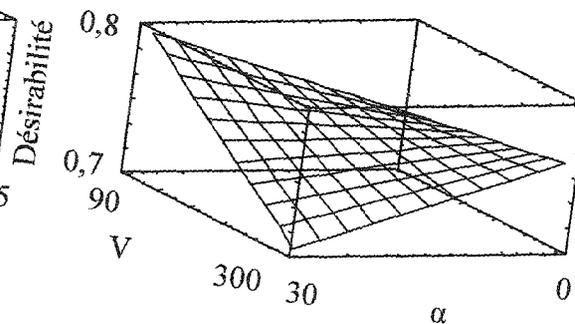
a)



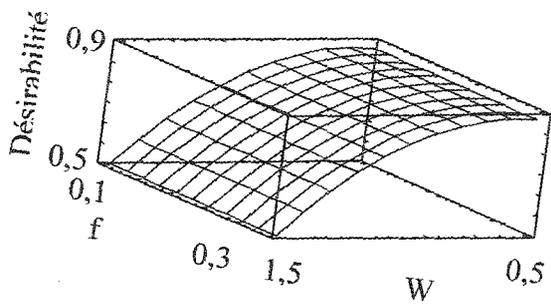
b)



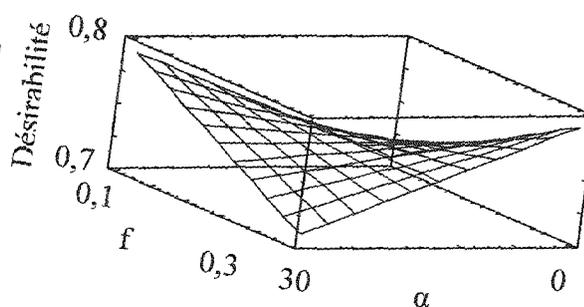
c)



d)



e)



f)

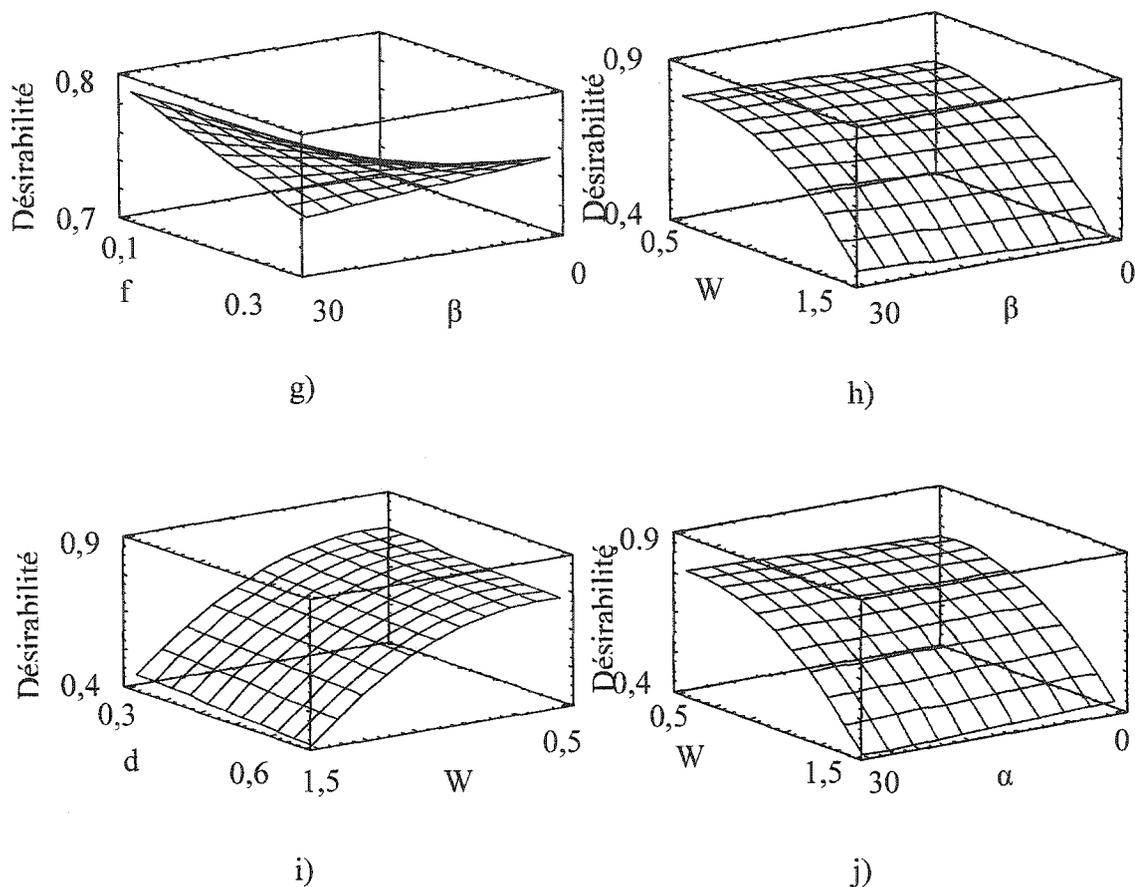
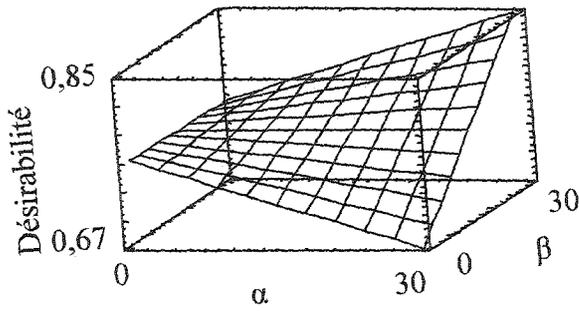


Figure 62 Surfaces des réponses des fonctions de désirabilité (R_a , $W1=0.6$)

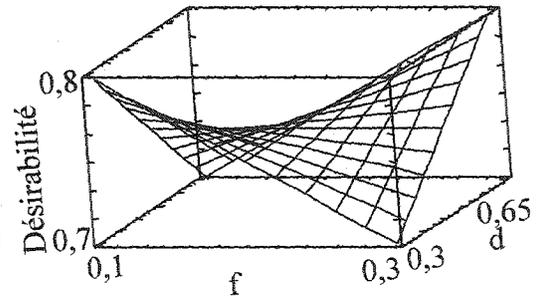
D'après les tracés des surfaces de réponses illustrées ci-dessus dans la figure 62, correspondant au cas où la rugosité R_a serait la réponse du système qui a le plus de poids, que :

Par exemple à la figure i) la désirabilité est maximale si l'émersion (W) est à son niveau bas, quelle que soit la profondeur de coupe (d).

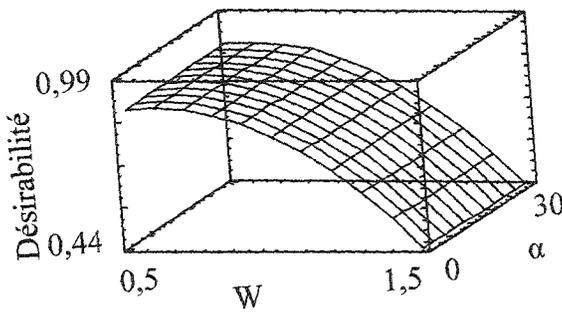
À la figure g), la désirabilité est maximale si l'avance (f) est à son niveau bas et que l'angle d'inclinaison (β) est réglé à son maximum.



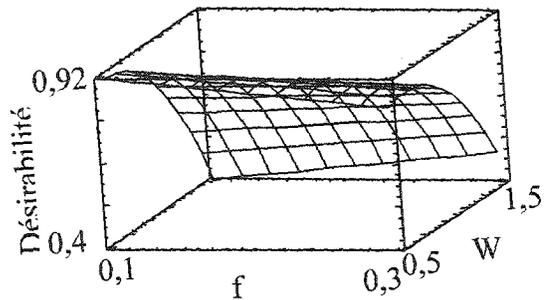
a)



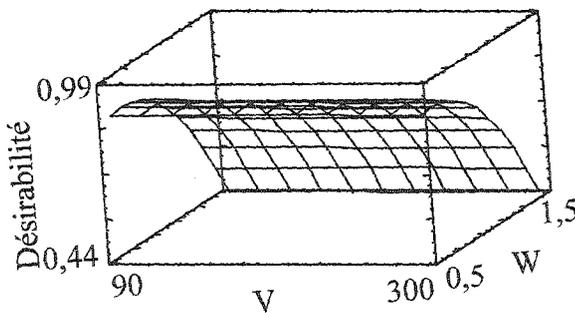
b)



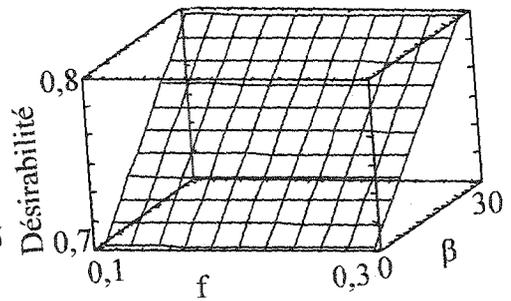
c)



d)



e)



f)

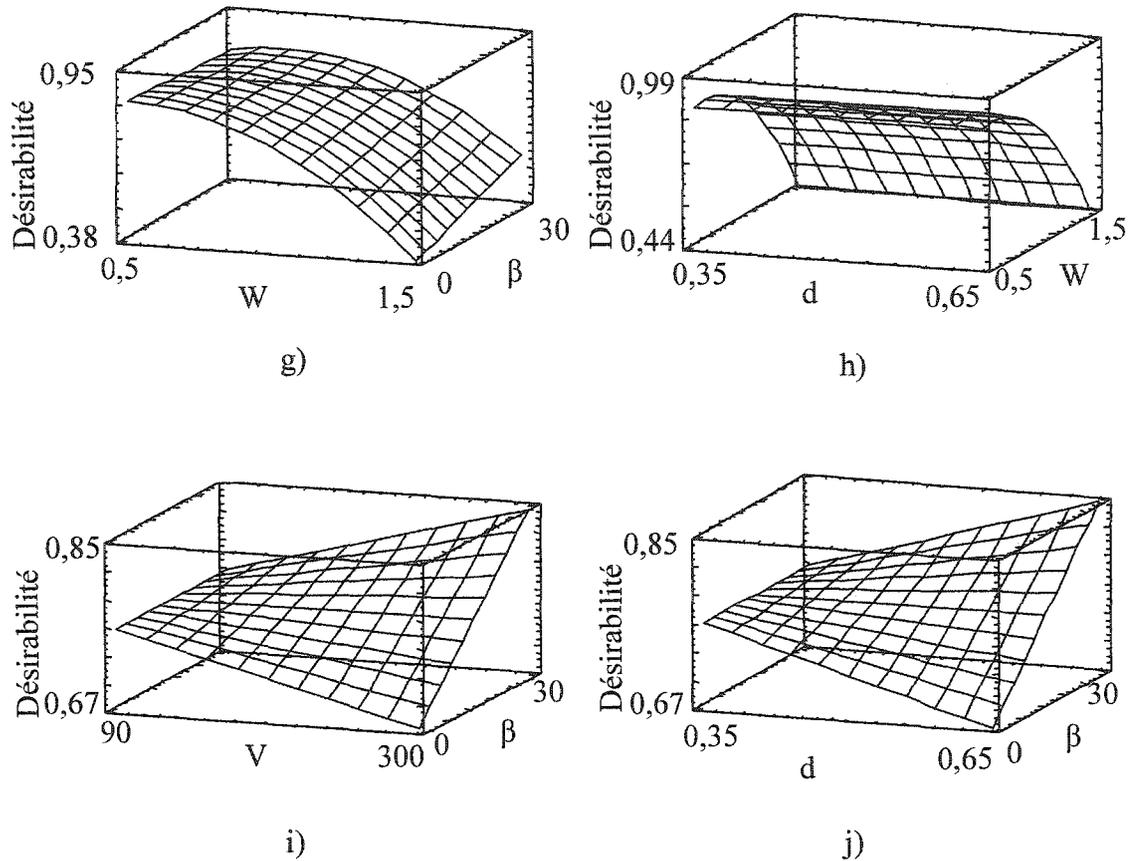


Figure 63 Surfaces des réponses des fonctions de desirabilité (R_t , $W_2=0.6$)

D'après les tracés des surfaces de réponses (figure 63), correspondant au cas où la rugosité R_t serait la réponse du système qui a le plus de poids, que :

- Par exemple à la figure i) la desirabilité est maximale si la vitesse (V) est à son niveau haut et l'angle d'inclinaison (β) est réglé à son maximum.
- À la figure g) la desirabilité est maximale si l'émergence (W) est à son niveau bas quel que soit le réglage de l'inclinaison (β).

5.8 Optimisation

Le tableau XV illustre les résultats d'optimisation obtenus par programmation non linéaire des fonctions de désirabilité respectivement selon où telle réponse est la plus importante par rapport aux autres. Les résultats comprennent les valeurs des conditions de coupe à leurs valeurs codées ainsi que les désirabilités correspondantes.

Tableau XV

Résultats d'optimisation par programmation non linéaire

Poids	V	f	d	W	α	β	D
W5=0.6	1	0.1258	-1	-0.3060	-1	1	0.898
W4=0.6	1	1	-1	-0.787	-1	-1	0.9238
W1=0.6	-1	1	-1	-0.9146	1	-1	0.9372

Prenant le cas où la rugosité Ra (W1=0.6) est la réponse la plus importante du système par rapport aux autres, mais qui comptent quand même (W2=W3=W4=W5=0.1), les facteurs de coupe doivent être réglés comme c'est indiqué dans le tableau ci dessus. Par exemple, il faut régler la vitesse, l'avance et la profondeur à leurs bas niveaux, l'émersion à (-0.9) et finalement l'engagement et l'inclinaison de l'outil à leurs valeurs maximales.

Ceci dit, dans l'industrie il faut peser les réponses du système et optimiser par la suite pour obtenir les meilleurs réglages possibles des conditions de coupe en tenant compte de toutes les autres réponses possibles du système spécifique.

CHAPITRE 6

VALIDATION DES RÉSULTATS

Les conditions de coupe utilisées dans cette section de validation, proviennent des résultats d'optimisation simultanée de plusieurs réponses par la fonction de désirabilité au chapitre 5 (optimisation). Ces conditions de coupe sont introduites dans le programme FAO de CATIA V5 R8 et un code machine est généré afin d'usiner deux pièces sur la machine-outil à commande numérique, correspondantes aux essais 47 et 48 pour fin de comparaison et validation. Les résultats réels concernant les rugosités, sont prise à l'aide d'un rugosimètre et sont la moyenne de 5 mesures. Le tableau suivant illustre les valeurs des paramètres de coupe en variables naturelles.

Tableau XVI

Conditions opératoires de coupe pour fin de validation

Facteur	Essai	
	47	48
V :vitesse de coupe (m/min)	90	300
f: avance par dent (mm/dent)	0.3	0.3
d: profondeur de coupe (mm)	0.35	0.35
W: largeur de coupe(mm)	0.524	0.56
α : angle d'engagement (degré)	30	0
β : angle d'inclinaison (degré)	0	0

- Validation pour les temps

Tableau XVII

Résultats de la validation des temps

Réponses du système	Essai	
	47	48
Temps usinage Prédiction (sec)	315	113
Temps usinage MOCN (sec)	298	120
%	95	94
Temps cycle Prédiction (sec)	482	246
Temps cycle MOCN (sec)	460	260
%	95.4	94.6
% écart usinage/cycle MOCN prédiction	65	46
% écart usinage/cycle MOCN réel	64	46
%	98.46	100

Nous remarquons, que :

- La précision des résultats concernant la prédiction des temps d'usinage est avoisinante de 95 % pour les deux cas de validation, soit l'essai 47 et 48, ce qui est très appréciable. Il est à noter que le temps d'usinage, concerne le temps de coupe excluant les mouvements en rapide de la machine, ainsi que les approches et retrait de l'outil.
- La prédiction des temps de cycle est de l'ordre de 95 % pour les deux cas de validation, soit l'essai 47 et 48, ce qui est très appréciable. Il est à noter que le temps

de cycle, concerne le temps de coupe incluant les mouvements en rapide de la machine, ainsi que les approches et retrait de l'outil.

- Validation pour les rugosités

Tableau XVIII

Résultats de la validation des finis de surface

Réponse du système	Essai	
	47	48
Rugosité moyenne Ra (μm) prédiction	1.84	2.39
Rugosité moyenne Ra (μm) mesurée	1.72	2.52
%	93.5	94.8
Rugosité maximale Rt (μm) prédiction	11.18	11.26
Rugosité maximale Rt (μm) mesurée	10.3	12.31
%	92.2	91.5
Rugosité moyenne parallèle Ra // (μm) prédiction	1.6	1.74
Rugosité moyenne parallèle Ra // (μm) mesurée	1.8	2.05
%	84	85

Nous constatons que :

- La précision des résultats concernant la prédiction de la rugosité moyenne R_a est de l'ordre de 93.5 % pour le cas de validation de l'essai 47, alors qu'elle est de l'ordre de 95 % pour l'essai 48, ce qui est très appréciable. Il est à noter que la rugosité moyenne R_a est mesurée perpendiculairement au sens de l'avance de l'outil.
- La prédiction de la rugosité maximale R_t est de l'ordre de 92.2 % pour le cas de validation de l'essai 47, alors qu'elle est de l'ordre de 91.5 % pour l'essai 48, ce qui est très appréciable. Il est à noter que la rugosité maximale R_t est mesurée perpendiculairement au sens de l'avance de l'outil
- La prédiction de la rugosité moyenne $R_{a//}$ est de l'ordre de 84 % pour le cas de validation de l'essai 47, alors qu'elle est de l'ordre de 85 % pour l'essai 48, ce qui est appréciable. Il est à noter que la rugosité moyenne $R_{a//}$ est mesurée dans le sens de l'avance de l'outil.

CONCLUSION

Dans ce projet, nous avons présenté nos travaux sur l'influence de la vitesse de coupe, de l'avance par dent, de la profondeur de coupe, de l'émersion et finalement de l'angle d'engagement et celui de l'angle d'inclinaison de l'outil de coupe par rapport à la pièce à usiner, sur les performances de l'usinage en 5 axes, lors du fraisage de l'acier à moule de type P20. Le mode avalant en aller simple est la stratégie adoptée pendant les investigations. Des modèles de prédictions sont élaborés en fonction des paramètres significatifs. Les points essentiels de ce travail et des recommandations pour l'optimisation d'un système de réponse ainsi que des suggestions pour les travaux futures sont présentés.

- **Points essentiels**

Dans le chapitre 3, nous avons étudié l'influence des paramètres de coupe, de l'orientation de l'outil en trajectoire aller simple sur le temps de coupe et de cycle obtenus réellement sur la machine-outil à commande numérique (MOCN). Il en découle que :

L'orientation d'outil (engagement et inclinaison) n'influence pas les temps de même que la profondeur de coupe vue qu'on est en mode finition et qu'il n'y a qu'une seule passe à enlever.

Nous avons démontré que parfois les temps réels de l'usinage (coupe) ne constituent que seulement 50 % du temps de cycle. Le programmeur doit tenir compte de cette information afin de réduire cet écart. Les explications sont nombreuses parmi les plus importantes les engagements et retraits d'outils.

Plus la vitesse et l'avance sont élevés, plus le temps de décélération est important, du fait que la machine décélère avant la fin de la trajectoire pour ne pas déborder, et par conséquent le temps mis par la machine pour accélérer afin de retrouver la vitesse et l'avance par dent programmées est important.

Dans le chapitre 4, nous avons étudié l'influence des paramètres de coupe, de l'orientation de l'outil en trajectoire aller simple sur le fini des pièces à usiner. Il en découle que :

L'émersion ou largeur de coupe présente un effet direct sur le fini de surface, ainsi plus l'émersion augmente plus le fini est de moindre qualité. Le meilleur fini s'obtient en réglant l'émersion au minimum.

Plus la vitesse de coupe augmente plus la rugosité moyenne parallèle $Ra//$ augmente, également pour l'avance, l'émersion et l'angle d'engagement. Cependant plus l'angle d'inclinaison augmente, plus la rugosité $Ra//$ diminue.

La rugosité Ra est commandée par l'interaction de la vitesse de coupe et l'avance par dent, de même que l'interaction avance/angle d'inclinaison. Il en découle que:

- si le facteur avance par dent est au minimum, plus la vitesse de coupe augmente plus la rugosité diminue.
- si l'avance est au maximum, plus la vitesse augmente plus la rugosité augmente.
- si l'angle d'inclinaison de l'outil est au minimum, plus l'avance par dent augmente plus la rugosité diminue.
- si l'angle d'inclinaison de l'outil est au maximum, plus l'avance par dent augmente plus la rugosité augmente.

La rugosité R_t est contrôlée par l'interaction de la vitesse de coupe et l'avance par dent, de même que l'interaction avance- angle d'inclinaison et finalement l'interaction vitesse- profondeur de coupe. il en découle que :

- si l'avance par dent est au minimum, plus la vitesse de coupe augmente plus la rugosité diminue.
- si l'avance est au maximum, plus la vitesse augmente plus la rugosité augmente.
- si la profondeur de coupe est au minimum, plus la vitesse de coupe augmente plus la rugosité diminue.
- si la profondeur de coupe est au maximum, plus la vitesse augmente plus la rugosité augmente.
- si l'angle d'inclinaison est au minimum, plus l'avance par dent augmente plus la rugosité diminue.
- si l'angle d'inclinaison est au maximum, plus l'avance par dent augmente plus la rugosité augmente.

La rugosité R_a est influencée par l'interaction entre l'avance et l'angle d'inclinaison. Il en découle que :

- la rugosité augmente lorsque l'avance par dent augmente quelque soit le réglage du niveau de l'angle d'inclinaison, la meilleure réponse s'obtient en réglant l'inclinaison et l'avance à leur niveau minimum.

Dans le chapitre 5, nous avons présenté une technique d'optimisation qui consiste à optimiser un système comprenant plusieurs réponses. Cette approche reflète bien la réalité des besoins des entreprises. En pratique, il faut souvent tenir compte de plusieurs contraintes afin d'être compétitifs, et de pouvoir survivre à une demande de plus en plus accrue en termes de qualité et de productivité. Les fonctions de désirabilité nous ont permis d'atteindre un semblant de cas réel, souvent rencontré dans l'industrie.

Suggestions pour les travaux futurs

- Tester les résultats sur un autre matériau, notamment l'aluminium.
- Tester les résultats sur une autre machine à commande numérique 5 axes.
- Modéliser des équations de prédiction des contraintes résiduelles.
- Modéliser des équations de prédiction de l'érouissage de la couche superficielle.

ANNEXE

SIMULATION ET ÉTUDE DU TEMPS PAR FAO

A.1 Temps d'usinage simulé en semi-finition

En utilisant les conditions de coupe générées suivant le plan d'expériences composite à face centrée choisit, 92 parcours d'outil ont été générés dans le logiciel CATIA V5 R8, les parcours sont par la suite simulés et les temps de coupe correspondant ont été recueillis pour analyse.

A. 1.1 Matrice des expériences

Les tests ont été effectués selon la planification illustrée dans le tableau A1 et on a obtenu les résultats recueillis dans la matrice du même tableau.

Tableau A1

Matrice des expériences (fiche de cueillette)

Ordre des essais	Variables naturelles (réelles)						Variables codées						Temps (Seconde).	
	Vitesse	Avance	Profondeur	Emersion	Engagement	Inclinaison	V (m/min)	F (mm/dent)	d (mm)	W (mm)	α (degré)	β (degré)	Aller simple	Zigzag
1	126	0.173	1.73	1	4.56	4.56	0	0	0	-1	0	0	1148	1120
2	80	0.1	1	1	30	30	-1	-1	-1	-1	1	1	4602	4530
3	200	0.3	1	1	0	0	1	1	-1	-1	-1	-1	690	624
4	80	0.173	1.73	1.73	4.56	4.56	-1	0	0	0	0	0	1052	1060
5	80	0.3	3	1	0	0	-1	1	1	-1	-1	-1	530	510
6	126	0.173	1.73	1.73	4.56	0	0	0	0	0	0	-1	676	676
7	80	0.3	3	3	0	30	-1	1	1	1	-1	1	186	178
8	80	0.1	1	3	30	0	-1	-1	-1	1	1	-1	1614	1596
9	126	0.1	1.73	1.73	4.56	4.56	0	-1	0	0	0	0	1156	1164
10	126	0.173	1.73	1.73	30	4.56	0	0	0	0	1	0	684	676
11	80	0.1	3	3	30	30	-1	-1	1	1	1	1	540	532
12	200	0.1	1	3	30	30	1	-1	-1	1	1	1	666	642
13	200	0.1	1	1	30	0	1	-1	-1	-1	1	-1	1884	1830
14	80	0.1	1	3	0	30	-1	-1	-1	1	-1	1	1614	1596
15	80	0.3	3	3	30	0	-1	1	1	1	1	-1	186	178

16	200	0.3	3	1	0	30	1	1	1	-1	-1	1	226	208
17	80	0.3	1	3	0	0	-1	1	-1	1	-1	-1	558	534
18	126	0.173	1	1.73	4.56	4.56	0	0	-1	0	0	0	1020	1014
19	200	0.1	1	3	0	0	1	-1	-1	1	-1	-1	666	642
20	200	0.3	1	1	30	30	1	1	-1	-1	1	1	696	624
21	80	0.1	3	1	0	30	-1	-1	1	-1	-1	1	1530	1512
22	200	0.3	3	3	0	0	1	1	1	1	-1	-1	80	72
23	200	0.3	3	3	30	30	1	1	1	1	1	1	80	72
24	126	0.173	1.73	1.73	4.56	4.56	0	0	0	0	0	0	680	676
25	80	0.1	1	1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	4596	4536
26	80	0.3	1	3	30	30	-1	1	-1	1	1	1	564	534
27	126	0.173	1.73	3	4.56	4.56	0	0	0	1	0	0	404	392
28	126	0.173	3	1.73	4.56	4.56	0	0	1	0	0	0	340	338
29	200	0.1	3	3	0	30	1	-1	1	1	-1	1	222	214
30	200	0.1	1	1	0	30	1	-1	-1	-1	-1	1	1884	1830
31	80	0.3	1	1	0	30	-1	1	-1	-1	-1	1	1584	1530
32	200	0.1	3	1	0	0	1	-1	1	-1	-1	-1	632	610
33	126	0.173	1.73	1.73	4.56	30	0	0	0	0	0	1	684	676
34	200	0.3	1	3	30	0	1	1	-1	1	1	-1	240	216
35	200	0.1	3	1	30	30	1	-1	1	-1	1	1	634	608
36	200	0.173	1.73	1.73	4.56	4.56	1	0	0	0	0	0	436	428
37	80	0.1	3	1	30	0	-1	-1	1	-1	1	-1	1530	1510
38	80	0.1	3	3	0	0	-1	-1	1	1	-1	-1	540	532
39	80	0.3	3	1	30	30	-1	1	1	-1	1	1	532	508
40	126	0.3	1.73	1.73	4.56	4.56	0	1	0	0	0	0	400	396
41	126	0.173	1.73	1.73	4.56	4.56	0	0	0	0	0	0	680	676
42	80	0.3	1	1	30	0	-1	1	-1	-1	1	-1	1584	1524
43	200	0.3	1	3	0	30	1	1	-1	1	-1	1	240	216
44	200	0.1	3	3	30	0	1	-1	1	1	1	-1	220	214
45	126	0.173	1.73	1.73	0	4.56	0	0	0	0	-1	0	676	676
46	200	0.3	3	1	30	0	1	1	1	-1	1	-1	226	208

Code	Niveaux					
	V	f	d	W	α	β
-1	80	0.1	1	1	0	0
0	126	0.173	1.73	1.73	4.56	4.56
1	200	0.3	3	3	30	30

A.1.2 Résultats et analyse

Le tableau A1 résume les réponses obtenues lors des essais par simulation graphique. L'analyse des variances des réponses et les estimations des effets de chaque paramètre de coupe a permis de déterminer les facteurs qui ont des effets significatifs sur la réponse. Une première analyse a été effectuée sur les temps d'usinage non linéarisés en vue d'évaluer les effets principaux des facteurs ainsi que ceux de leurs interactions sur la réponse étudiée. L'analyse de variance et les graphes de Pareto ont été construits.

Les graphiques de Pareto (figures 1 et 2) classent les facteurs et leurs interactions en fonction de leur influence sur la réponse. Tous les facteurs et interactions ayant un effet inférieur à la limite des facteurs significatifs (intervalle de confiance 95 %) sont négligés et ne sont pas représentés dans les figures 1, 2, 3 et 4. Le facteur de corrélation R^2 est de l'ordre de 90 % en mode aller simple et de 92 % en mode zigzag. Les modèles de prédiction obtenus (de type additif et comprenant des interactions) sont moins précis et sont lourds à exploiter. C'est pourquoi nous avons procédé à la linéarisation de la réponse pour une meilleure précision et pour obtenir un modèle de type multiplicatif.

Les graphes de Pareto correspondants (figures 2 et 4) montrent bien que les facteurs de corrélation sont nettement supérieurs dans les deux modes de coupe ($R^2 = 99\%$) ce qui est très satisfaisant. Il n'y a plus d'interaction à effet significatif, ce qui allégera notre modèle de prédiction. L'analyse des variances des réponses et les estimations des effets de chaque paramètre de coupe permettent de générer ceux d'entre eux qui sont significatifs donc influençant la réponse. L'intervalle de confiance utilisé pour limiter les effets significatifs est de 95 %. Tous les facteurs non significatifs sont exclus.

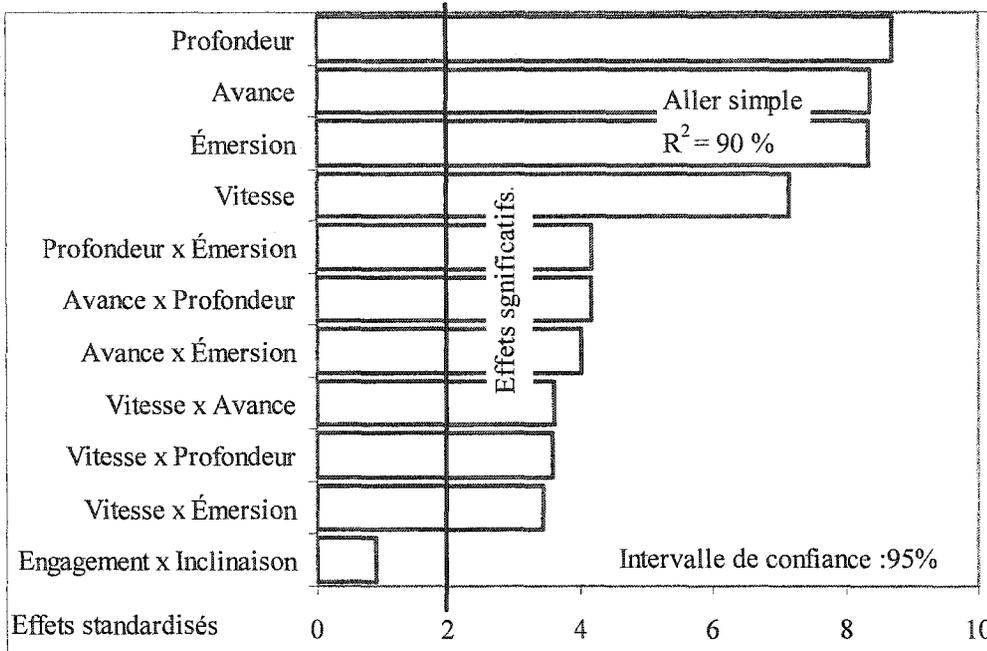


Figure 1 Pareto du temps simulé non linéarisé en aller simple

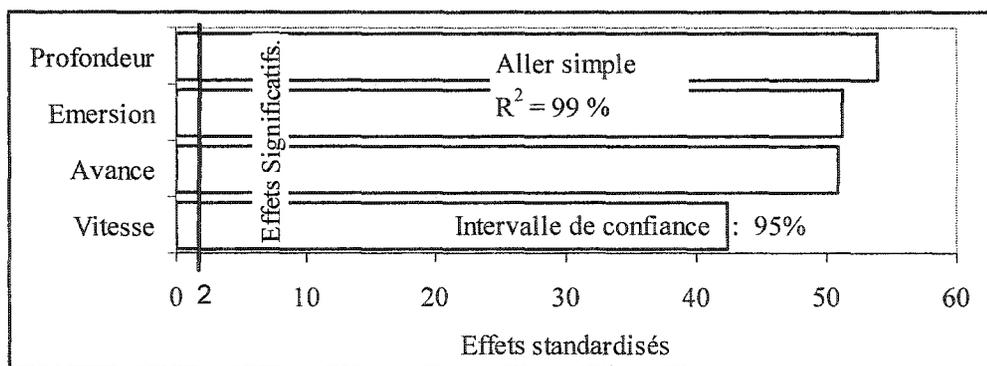


Figure 2 Pareto du temps linéarisé en aller simple

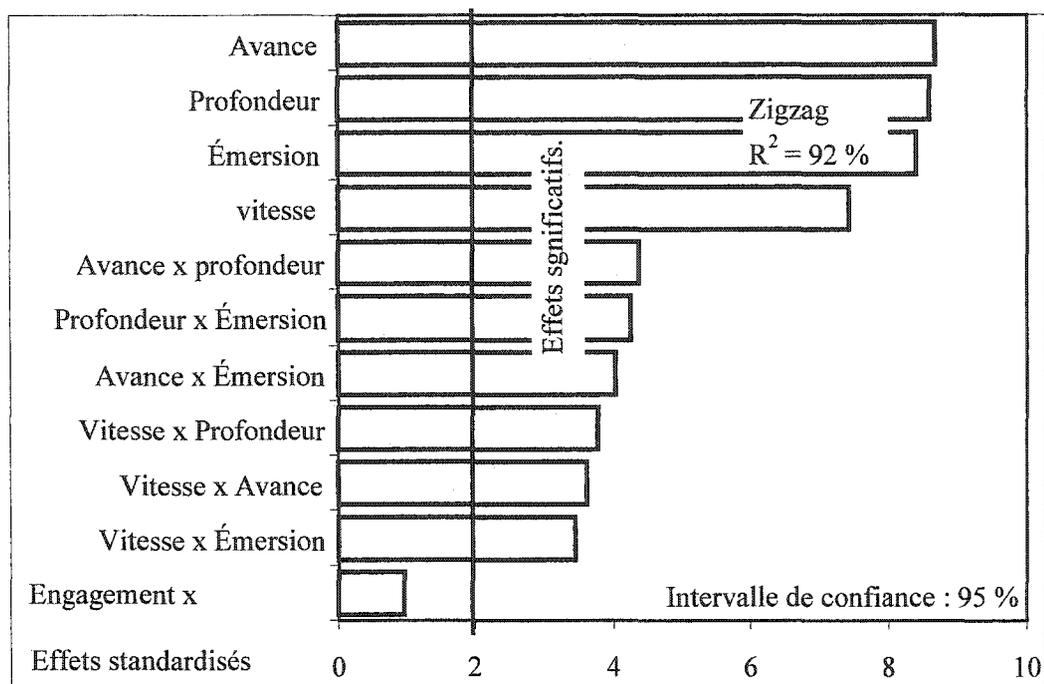


Figure 3 Pareto du temps simulé en zigzag

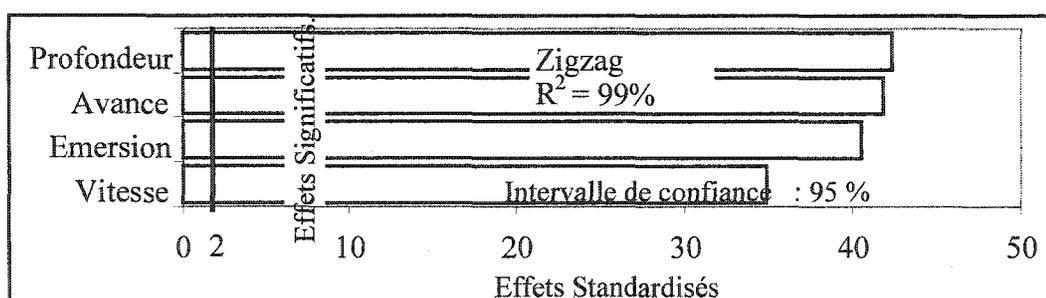


Figure 4 Pareto du temps linéarisé en zigzag

Les figures 5 et 6 présentent les effets principaux des facteurs considérés. Les angles d'engagement et d'inclinaison n'ont pas d'influence sur les temps d'usinage quel que soit le mode et le niveau de réglage. La meilleure réponse s'obtient en réglant la vitesse, la profondeur, l'avance et l'émerision à leurs niveaux hauts.

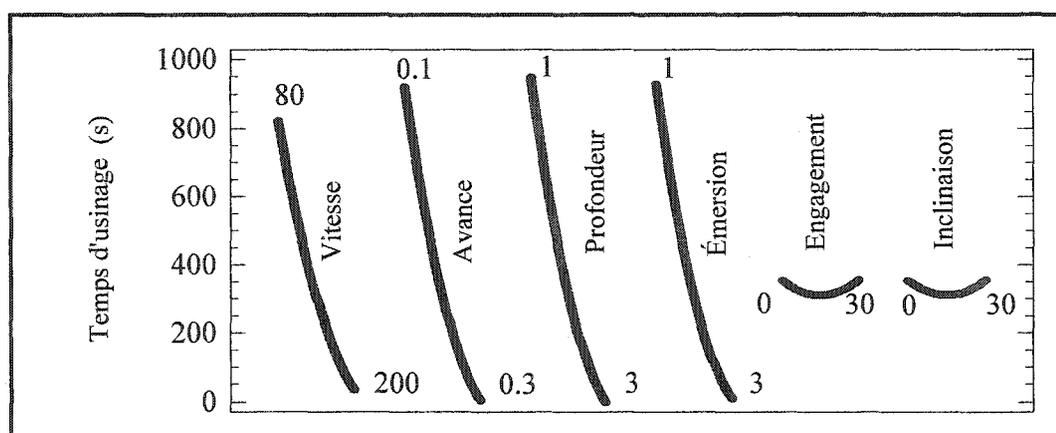


Figure 5 Effets directs des facteurs en aller simple

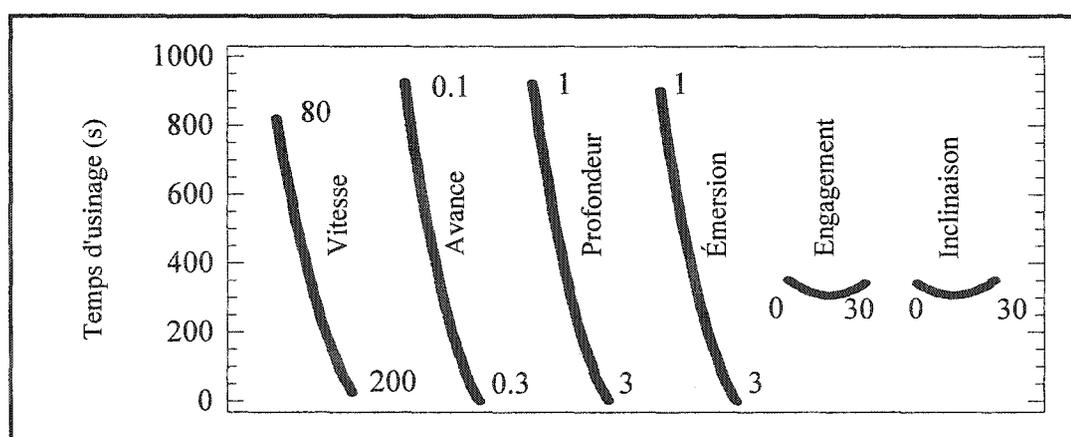


Figure 6 Effets directs des facteurs en zigzag

A.1.3 Modélisation du temps d'usinage simulé

D'après le plan d'expérience choisi (plan composite à faces centrées), les réponses sont modélisées comme suit.

- **Trajectoire en aller simple**

Le modèle de prédiction du temps d'usinage en mode aller simple obtenu avec un facteur de corrélation de 99 % est sous forme d'équation codée :

$$\ln(T) = 6,42 - 0,44*V - 0,52*f - 0,55*d - 0,53*W \quad (\text{A.1})$$

Pour obtenir la forme d'équation en variables naturelles, un décodage des variables est nécessaire. Les transformations sont les suivantes :

Pour V, f, d, W

$$V = \frac{\ln(V) - \frac{1}{2}(\ln(200) + \ln(80))}{\frac{1}{2}\ln(200/80)} \quad (\text{A.2})$$

$$V = 2.182 * (\ln(V) - 4.84) \quad (\text{A.3})$$

$$f = \frac{\ln(f) - \frac{1}{2}(\ln(0.3) + \ln(0.1))}{\frac{1}{2}\ln(0.3/0.1)} \quad (\text{A.4})$$

$$f = 1.82 * (\ln(f) + 1.753) \quad (\text{A.5})$$

$$d = \frac{\ln(d) - \frac{1}{2}(\ln(3) + \ln(1))}{\frac{1}{2}\ln(3/1)} \quad (\text{A.6})$$

$$d = 1.82 * (\ln(d) - 0.5493) \quad (\text{A.7})$$

$$W = \frac{\ln(W) - \frac{1}{2}(\ln(3) + \ln(1))}{\frac{1}{2}\ln(3/1)} \quad (\text{A.8})$$

$$W = 1.82 * (\ln(W) - 0.5493) \quad (\text{A.9})$$

Finalement, le modèle de prédiction en variables réelles se simplifie comme suit :

$$T_{\text{Simulé}} = 33354 * V^{-0.95} * f^{-0.95} * d^{-1} * W^{-0.95} \quad (\text{A.10})$$

- **Trajectoire en zigzag**

Le modèle de prédiction du temps d'usinage en mode Zigzag obtenu avec un facteur de corrélation de 99 % sous forme codée est :

$$\ln(T) = 6.39337 - 0.452389 * \text{Vitesse de coupe} - 0.543165 * \text{Avance par dent} - 0.549403 * \text{Profondeur de passe axiale} - 0.525239 * \text{Émersion} \quad (\text{A.11})$$

$$\ln(T) = 6,4 - 0,45 * V - 0,54 * f - 0,55 * d - 0,53 * W \quad (\text{A.12})$$

Après changement de variable on obtient le modèle de prédiction en variables réelles se simplifiant comme suit :

$$T_{\text{Simulé}} = 36835 * V^{-1} * f^{-1} * d^{-1} * W^{-1} \quad (\text{A.13})$$

Avec :

- V : Vitesse de coupe [80 / 200 m/min]
- f : Avance par dent [0.1 / 0.3 mm]
- d et W : profondeur et Émersion [1/ 3mm]
- α et β : Engagement et inclinaison [0° / 30°]

A.1.4 Surfaces de réponse

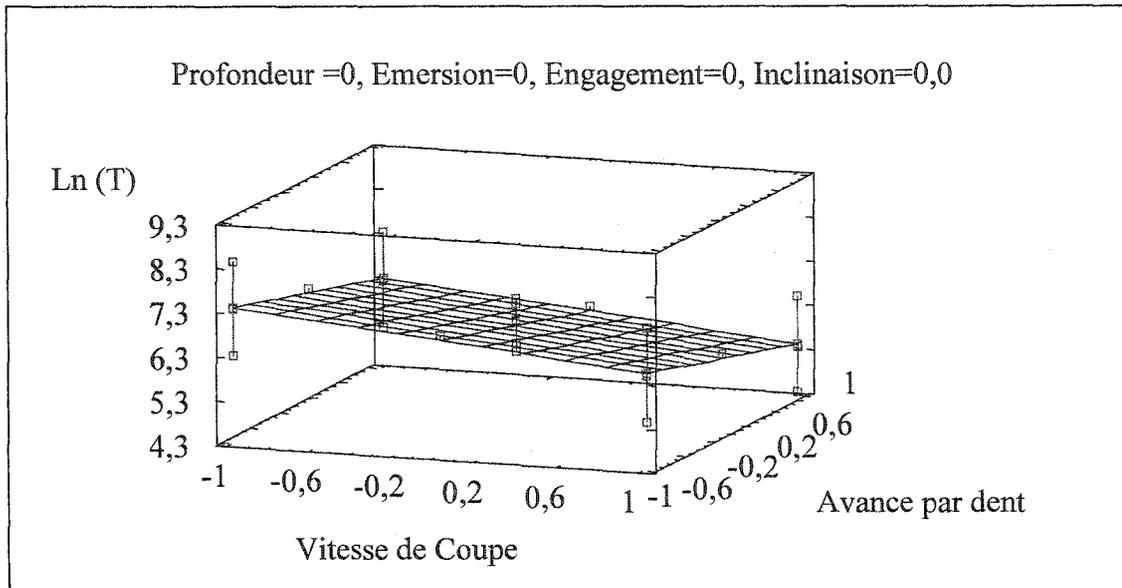


Figure 7 Surface de réponse en aller simple

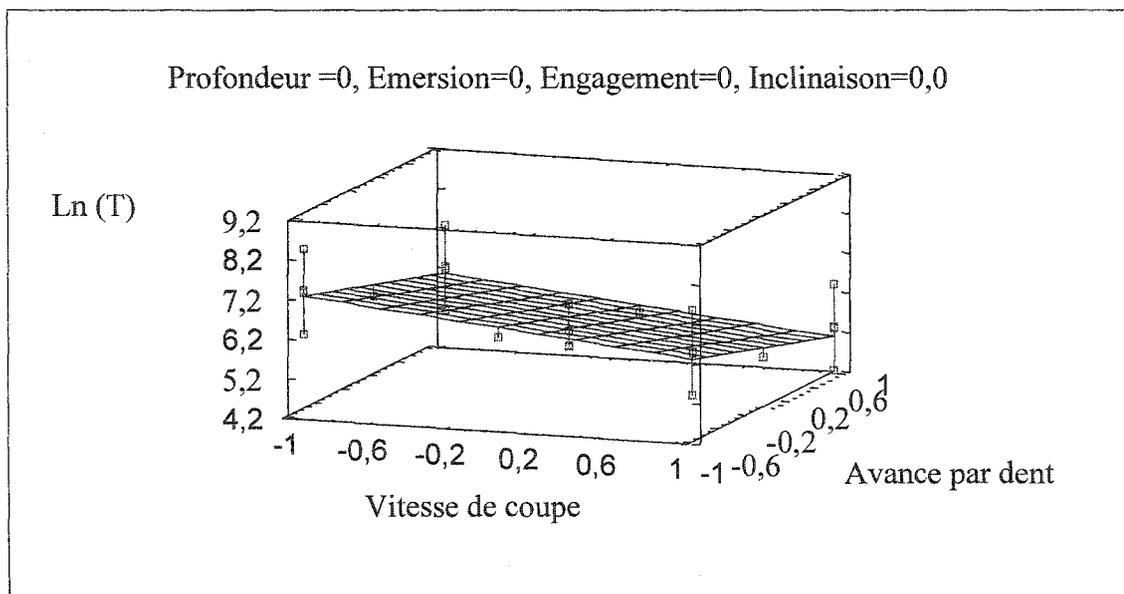


Figure 8 Surface de réponse en zigzag

A.1.5 Conclusion

Nous avons donc étudié l'influence des paramètres de coupe, de l'orientation de l'outil et des modes d'usinage sur le temps de coupe obtenu par simulation dans CATIA V5 R8. Il en découle que l'orientation d'outil (engagement et inclinaison) n'influence pas le temps simulé dans les deux modes, bien que nous entrevoyions qu'elle affecte le fini de surface, la vie de l'outil et les forces de coupe lors des expériences d'usinage.

La meilleure réponse s'obtient en réglant la vitesse, la profondeur, l'avance et l'émersion à leurs niveaux hauts.

Les modèles de prédiction développés permettent l'estimation directe et rapide du temps prévu d'usinage selon des paramètres donnés, ce qui constitue une information très utile pour le programmeur de trajectoires d'outils en FAO. Les essais d'usinage permettront le développement de modèles de prédiction additionnels directement associés au fini de surface résultant de l'usinage et à la durée de vie des outils pour les paramètres faisant l'objet de cette étude.

A.2 Temps d'usinage simulé en finition

De la même manière qu'en semi-finition on utilise la FAO du logiciel CATIA V5 selon le même plan d'expériences (tableau A1) composite à face centrée choisit. Un total de 92 parcours d'outil (2 x 46 essais) correspondant aux deux modes d'usinage, à savoir l'aller simple et le zigzag ont été générées. Les parcours ont été par la suite simulés et les temps de coupe correspondant recueillis pour analyse.

A.2.1 Résultats et analyse

Le tableau A2 résume les réponses obtenues lors des essais par simulation graphique. L'analyse des variances des réponses et les estimations des effets de chaque paramètre de coupe a permis de déterminer les facteurs qui ont des effets significatifs sur la réponse. Une première analyse a été effectuée sur les temps d'usinage non linéarisés en vue d'évaluer les effets principaux des facteurs ainsi que ceux de leurs interactions sur la réponse étudiée. L'analyse de variance et les graphes de Pareto ont été construits.

Tableau A2

Résultats de la simulation graphique en finition

Essai	Aller simple (seconde)		Zigzag (seconde)	
	Temps usinage	Temps cycle	Temps usinage	Temps cycle
1	243	296	243	281
2	767	893	767	871
3	76	115	76	95
4	257	303	261	298
5	255	317	255	296
6	141	172	143	166
7	87	106	88	103
8	261	303	266	303
9	244	288	247	283

10	141	174	143	165
11	261	304	266	303
12	78	98	80	92
13	230	285	230	266
14	261	303	266	303
15	87	106	88	102
16	76	112	76	94
17	87	107	88	103
18	141	172	143	165
19	78	98	80	93
20	76	117	76	94
21	768	890	768	872
22	26	39	26	33
23	26	39	26	32
24	141	172	143	165
25	768	893	768	872
26	87	108	88	102
27	82	100	84	97
28	141	172	143	165
29	78	97	80	93
30	230	285	230	267
31	255	314	255	296
32	230	288	230	267
33	141	174	143	165
34	26	38	26	32
35	230	289	230	267
36	77	100	78	93
37	768	890	768	872
38	261	304	266	303
39	255	317	255	294
40	81	105	82	97
41	141	172	143	165
42	255	314	255	295
43	26	38	26	32
44	78	97	80	92
45	141	171	143	166
46	76	112	76	94

A.2.2 Analyse de variances (ANOVA) des résultats

Tableau A3

Matrice des effets en temps de coupe

	Mode Aller simple	Mode Zigzag
	Effet	Effet
Moyenne	4.94934	4.9583
V : Vitesse	0.603865	0.604539
f : Avance	0.550877	0.554742
W : Emersion	0.538811	0.531546

Tableau A4

Matrice des effets sur le temps de cycle

	Mode Aller simple	Mode Zigzag
	Effet	Effet
Moyenne	5.18175	5.11438
V : Vitesse	0.539412	0.583548
f : Avance	0.492677	0.532751
W : Emersion	0.54079	0.530856

A.2.2.1 Temps de coupe

Ce temps représente uniquement les temps où l'outil est en contact avec la pièce, cela veut dire que les temps d'approche, les retraits et les passes à vide sont retranchés. Les effets des facteurs et leurs interactions sont illustrés dans la matrice des effets du tableau A3.

Les graphiques de Pareto (figures 9 et 11) classent les facteurs et leurs interactions en fonction de leur influence sur la réponse. Tous les facteurs et interactions ayant un effet inférieur à la limite des facteurs significatifs (intervalle de confiance 95 %) sont négligés et ne sont pas représentés dans les figures 9, 10, 11 et 12. Le facteur de corrélation R^2 est de l'ordre de 94 % en mode aller simple et de 97 % en mode zigzag.

Les modèles de prédiction obtenus (de type additif et comprenant des interactions) sont moins précis et sont lourds à exploiter. C'est pourquoi nous avons procédé à la linéarisation de la réponse pour une meilleure précision et pour obtenir un modèle de type multiplicatif.

Les graphes de Pareto correspondants (figures 10 et 12) montrent bien que les facteurs de corrélation sont nettement supérieurs dans les deux modes de coupe ($R^2 = 99.99\%$) ce qui est très satisfaisant et il n'y a plus d'interaction à effet significatif ce qui allégera notre modèle de prédiction.

L'analyse des variances des réponses et les estimations des effets de chaque paramètre de coupe permettent de générer ceux d'entre eux qui sont significatifs donc influençant la réponse.

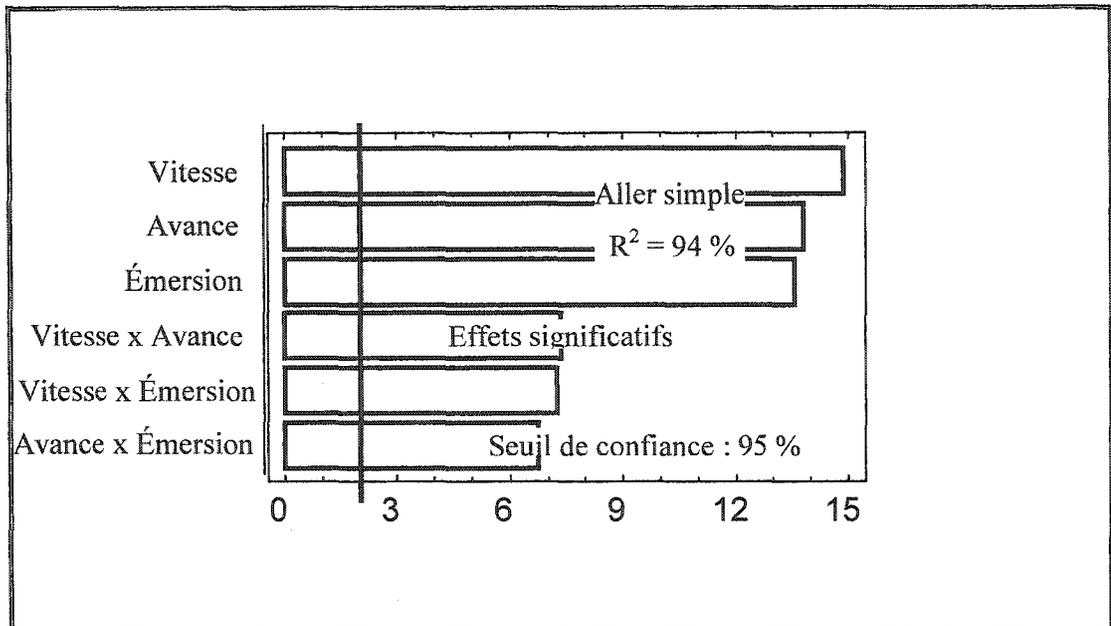


Figure 9 Pareto du temps de coupe non linéarisé en aller simple

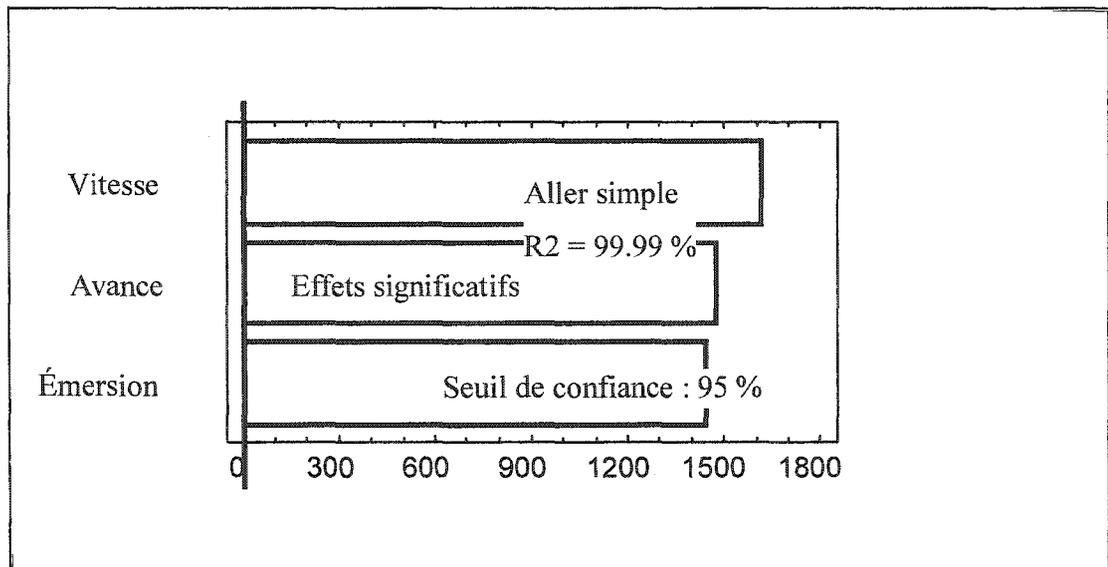


Figure 10 Pareto du temps de coupe linéarisé en aller simple

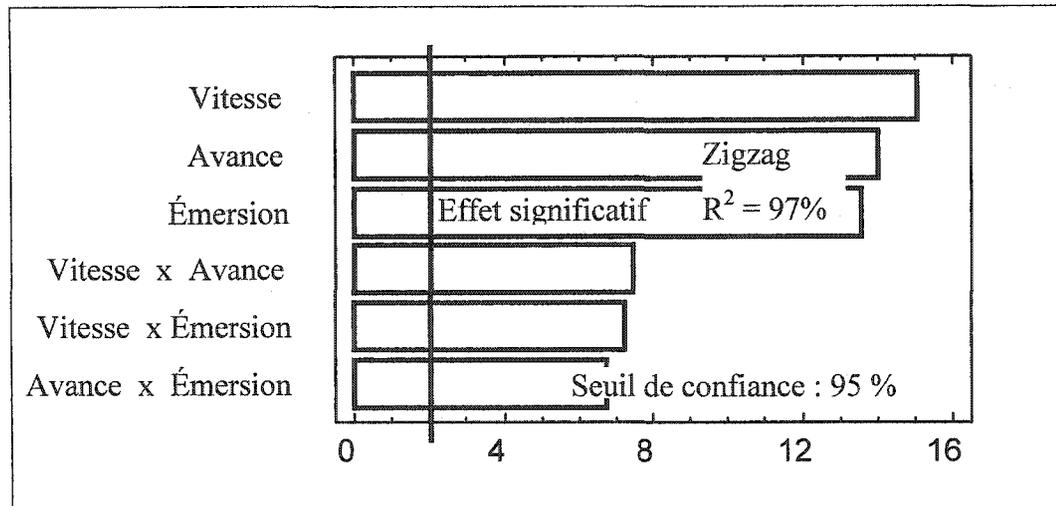


Figure 11 Pareto du temps de coupe non linéarisé en zigzag

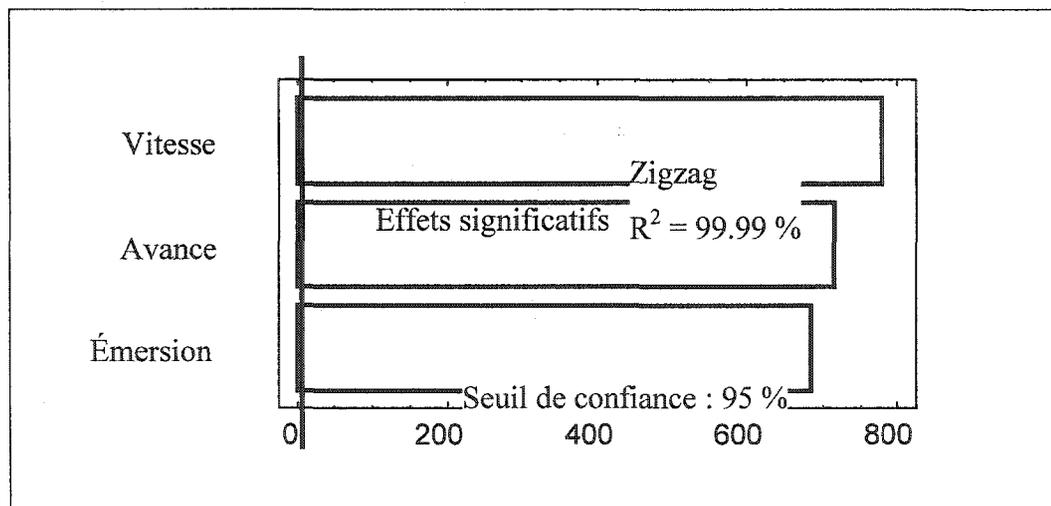


Figure 12 Pareto du temps de coupe linéarisé en zigzag

Les figures 13 et 14 présentent les effets principaux des facteurs considérés. Les angles d'engagement et d'inclinaison n'ont pas d'influence sur les temps d'usinage quel que soit le mode et le niveau de réglage. La profondeur de passe non plus ne présente pas d'effet sur le temps car, contrairement à la semi-finition, il y a juste une passe pour la finition. La meilleure réponse s'obtient en réglant la vitesse, l'avance et l'émerision à leurs niveaux hauts.

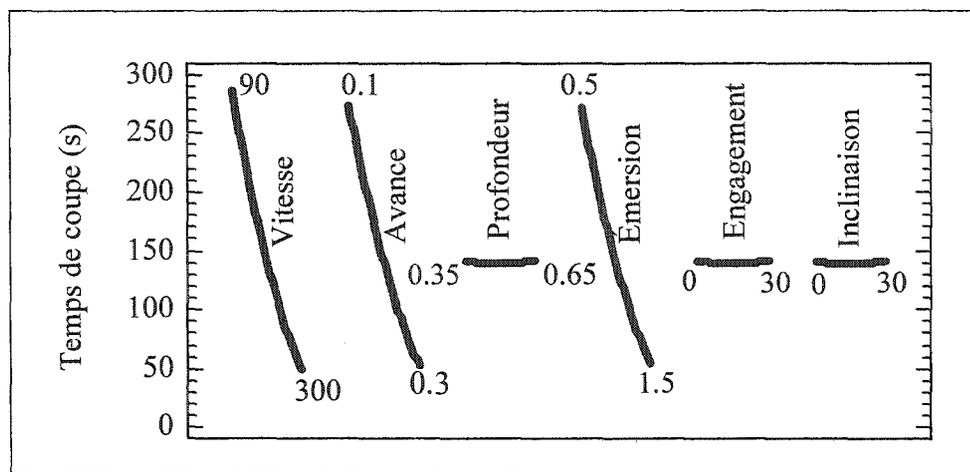


Figure 13 Effets directs des facteurs en aller simple

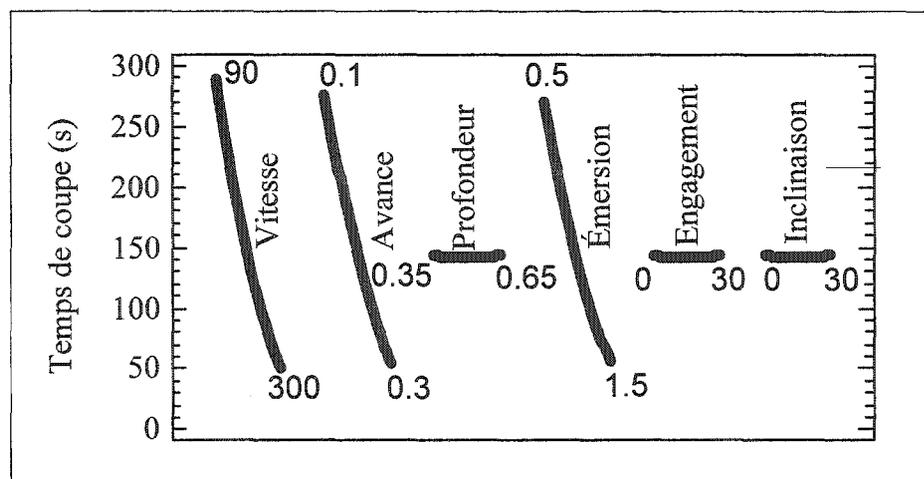


Figure 14 Effets directs des facteurs en zigzag

A.2.2.2 Temps de cycle

Ce temps exprime la période totale de l'usinage de la pièce incluant donc les temps d'approche de l'outil, les passes à vide et avidement les retraits. Ce temps est appelé aussi temps de cycle. Les effets des facteurs et leurs interactions sont illustrés dans la matrice des effets du tableau A4. Les graphiques de Pareto (figures 15 et 17) classent les facteurs et leurs interactions en fonction de leur influence sur la réponse. Tous les facteurs et interactions ayant un effet inférieur à la limite des facteurs significatifs (intervalle de confiance de 95 %) sont négligés et ne sont pas représentés dans les figures 15, 16, 17 et 18. Le facteur de corrélation R^2 est de l'ordre de 94 % en mode aller simple et en mode zigzag. Les modèles de prédiction obtenus (de type additif et comprenant des interactions) sont moins précis et sont lourds à exploiter. C'est pourquoi nous avons procédé à la linéarisation de la réponse pour une meilleure précision et pour obtenir un modèle de type multiplicatif.

Les graphes de Pareto correspondants (figures 16 et 18) montrent bien que les facteurs de corrélation sont nettement supérieurs dans les deux modes de coupe ($R^2 = 99.99\%$) ce qui est très satisfaisant, et il n'y a plus d'interaction à effet significatif ce qui allégera notre modèle de prédiction. L'analyse des variances des réponses et les estimations des effets de chaque paramètre de coupe permettent de générer ceux d'entre eux qui sont significatifs donc influencent la réponse.

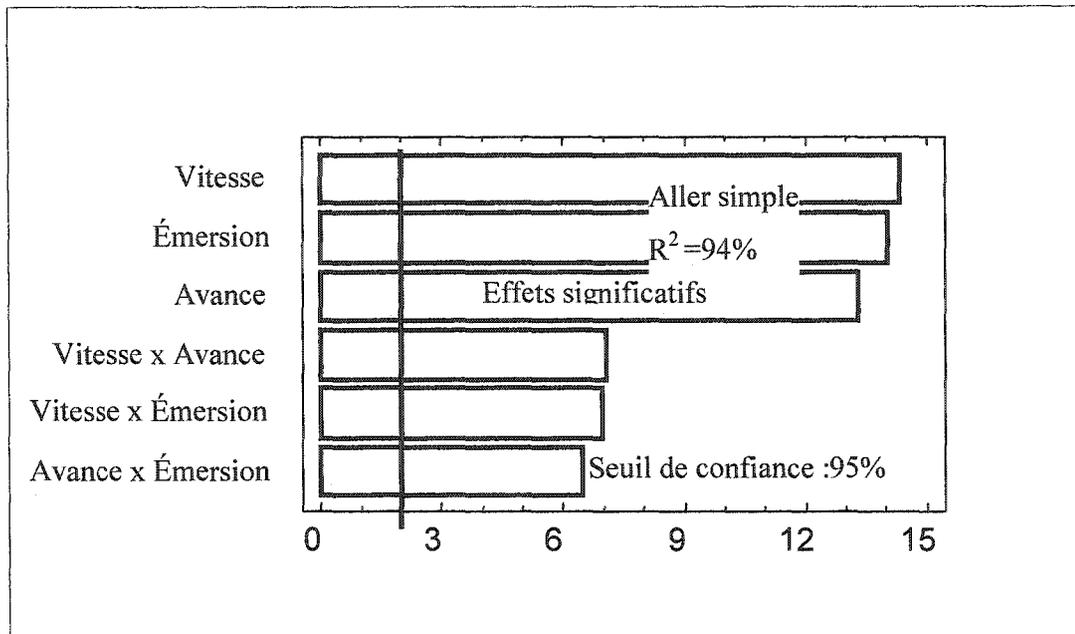


Figure 15 Pareto du temps de cycle en aller simple

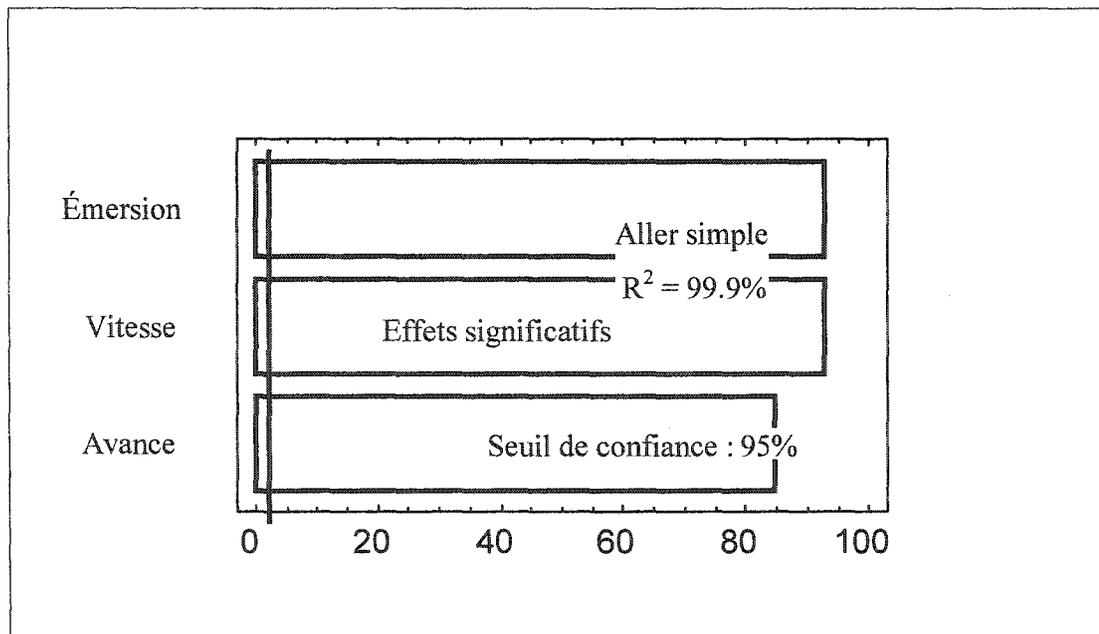


Figure 16 Pareto du temps de cycle linéarisé en aller simple

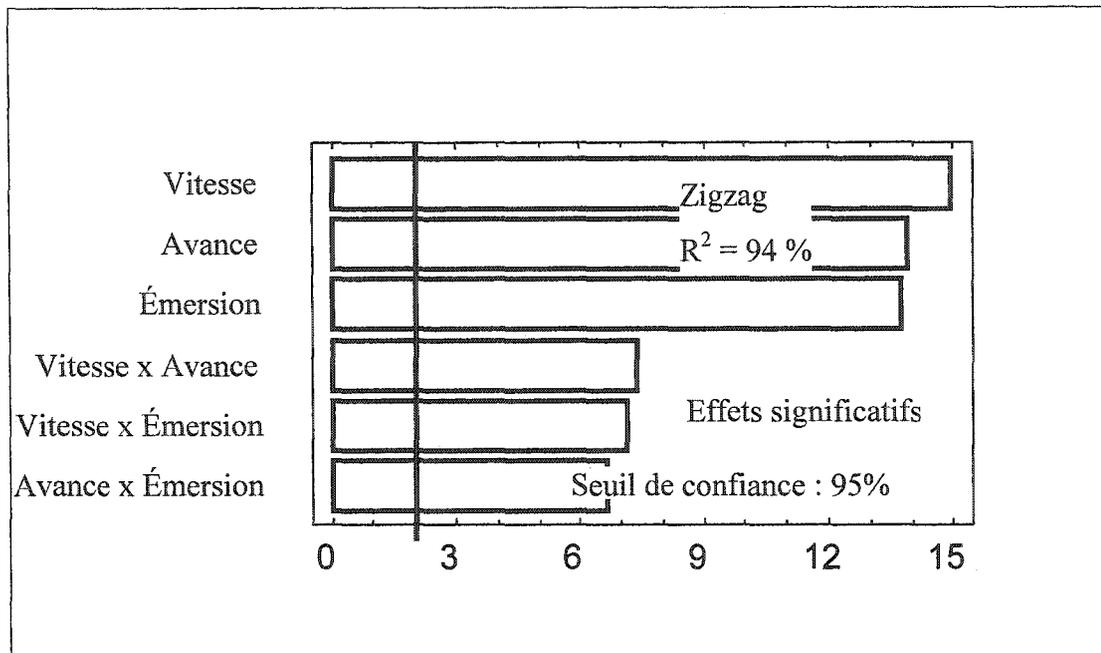


Figure 17 Pareto du temps de cycle simulé en zigzag

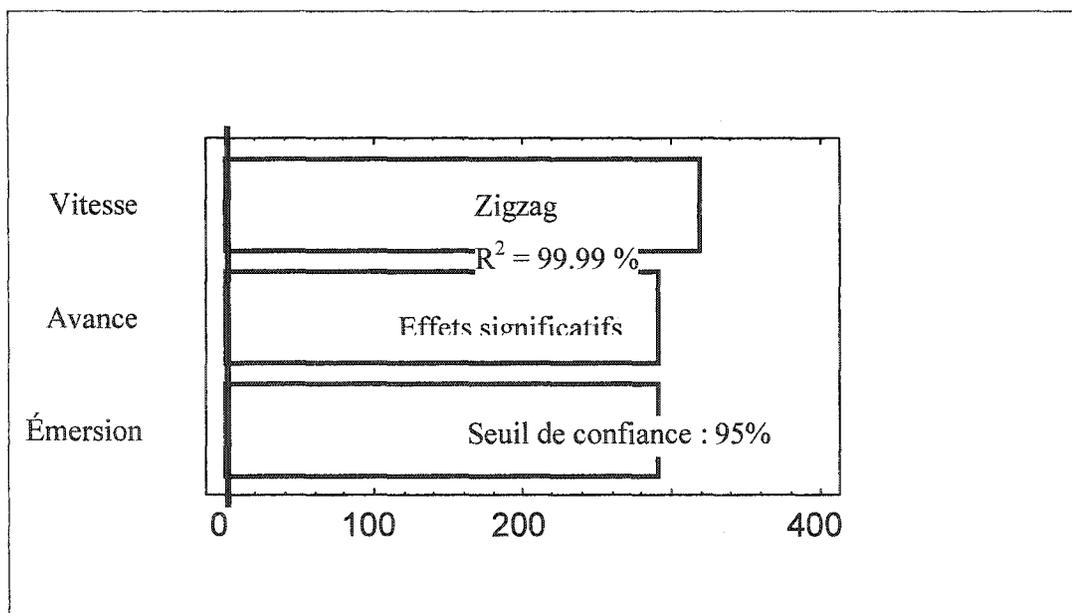


Figure 18 Pareto du temps de cycle linéarisé en zigzag

A.2.2.3 Modélisation du temps simulé

- Temps de coupe

- Trajectoire Aller simple

$$\ln(T_{\text{coupe}}) = 4,94934 - 0,603865 * \text{Vitesse} - 0,550877 * \text{Avance} - 0,538811 * \text{Émersion} \quad (\text{A.14})$$

$$T_{\text{coupe}} = 59 * V^{-1} * f^{-1} * W^{-0.98} \quad (\text{A.15})$$

- Trajectoire Zigzag

$$\ln(T_{\text{coupe}}) = 4,9583 - 0,604539 * \text{Vitesse} - 0,554742 * \text{Avance} - 0,531546 * \text{Emersion} \quad (\text{A.16})$$

$$T_{\text{coupe}} = 59 * V^{-1} * f^{-1} * W^{-0.96} \quad (\text{A.17})$$

- Temps de cycle

- Trajectoire Aller simple

$$\ln(T_{\text{cycle}}) = 5,18175 - 0,539412 * \text{Vitesse} - 0,492677 * \text{Avance} - 0,54079 * \text{Émersion} \quad (\text{A.18})$$

$$T_{\text{cycle}} = 52 * V^{-0.90} * f^{-0.9} * W^{-0.98} \quad (\text{A.19})$$

- Trajectoire Zigzag

$$\ln(T_{\text{cycle}}) = 5,11438 - 0,583548 * \text{Vitesse} - 0,532751 * \text{Avance} - 0,530856 * \text{Émersion} \quad (\text{A.20})$$

$$T_{\text{cycle}} = 62 * V^{-0.97} * f^{-0.97} * W^{-0.97} \quad (\text{A.21})$$

Avec :

- T_{cycle} : (minute)
- T_{coupe} : (minute)
- V : Vitesse de coupe $90 \leq V \leq 300$ m/min
- f : Avance par dent $0.1 \leq f \leq 0.3$ mm
- W : Émersion $0.35 \leq W \leq 0.65$ mm

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Schulz, H., Hock, St., (1995), High-Speed Milling of Dies and Moulds – Cutting Conditions and Technology, *Annals of the CIRP*, Vol.44, January 1995, pp.35-38.
- [2] Agson Gani, E., Kruth, J.P., Vanherck, P., Lauwers, B., (1997), A Geometrical Model of the Cut in Five-Axis Milling Accounting for the Influence of Tool Orientation , *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* vol. 13, 1997, pp. 677 – 684.
- [3] Hock, S., (1998), High Speed Cutting in Die and Mold Manufacture, *Proc. Of Machine Tool Technologies Association Conf.*, Warwick/Manchester, UK, 1998.
- [4] Takahashi, I., Anzai, M., Nagakawa, T., (1999), Development of Ultra High Speed Milling Machine Using Reciprocating Layer Cutter Path, *Journal of the Japan Society for Precision Engg.* (v65, 1999), pp 714-718.
- [5] E-G Ng, Lee, D.W., Dewes, R.C., Aspinwall, D.K., (2000), Experimental Evaluation of Cutter Orientation When Ball Nose End Milling Inconel 718, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 2, N° .2, 2000, pp. 108 – 115.
- [6] Wu, S. M., (1964), Tool – Life Testing by Response Surface Methodology – Part 1, *Journal of Engineering for Industry*, May 1964, pp.105-116.
- [7] Kline, W.A., Devor, R.E., Shareef, I.A., (1982), The Prediction of Surface Accuracy in End Milling, *Transactions of the ASME*, Vol . 104 , August 1982, pp 272 – 278.
- [8] Chua, M.S., Rahman, M., Wong, Y.S., Loh , H.T., (1991), Determination of optimal Cutting design of Experiments and Optimization Techniques, *Int. J. Mach. Tools Manufact.* vol. 33 , N° .2, 1993, pp. 297 – 305.
- [9] Astakhnov, V.P., Osman, M.O.M., Al-Ata, M., (1997), Statistical Design of Experiments in Metal Cutting – Part One: Methodology, *Journal of Testing and Evaluation*, *JTEVA*, Vol.25, N°.3, May 1997, pp. 322-327.
- [10] Alauddin, M., El-Baradie, M.A., (1997), Tool Life model for end milling steel (190BHN), *Journal of Materials Processing Technology* , Vol. 68, 1997, pp. 50 – 59.

- [11] Kuang-Hua, F., Hung-Yen, C., (1997), An accuracy model for the peripheral milling of aluminum alloys using response surface design, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 72 , 1997 , pp.42 – 47.
- [12] Darwish, S.M., El-Tamimi, A.M., (1997), Formulation of Surface Roughness Models for Machining Nickel Super Alloy With Different Tools, *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 12, N° .3, 1997, pp. 395 – 408.
- [13] Songmene, V., Stefan, M., Stephenson, T.F., Warner, A.E.M., (1998), Turning and Honing of GrA-Ni MMC Cylinder Liners: Experimental Investigation on Surface Texture, *Pro. CSME Forum SCGM 1998 Vol 4 Toronto, On, Canada, May 1998*, pp 186 – 193.
- [14] Choudhury, I.A., El-Baradie, M.A., (1999), Machinability assessment of inconel 718 by factorial design of experiment coupled with response surface methodology, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 95, 1999 , pp.30 – 39.
- [15] Paulo Davim, J., (2001), A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 116 , August 2001 , pp.305 – 308.
- [16] Monreal Manual. and Rodriguez Ciro. A., Influence of tool path strategy on the cycle time of high – speed milling, *Computer – Aided Design* 35 (2003),pp 395-401.
- [17] Altan T. and Lilly B., Manufacturing of Dies and Molds, Key Note Paper, CIRP 2001, *Annals of CIRP*, v.2, p 405-423.
- [18] Tönshoff, H.K. et al., Increased Availability of Large Stamping Dies, *Pro. Of the 2nd Int. Conf. On Design and Productions of Dies and Molds*, Kusadi, Turkey, june 21-23, 2001.
- [19] Yagar et al., Feed Rate Optimization based on Cutting Forces calculations in 3 axis Milling of Dies and Molds with Sculptured Surfaces, *International Journal of Machining Tools and Manufacturing.*, vol. 34, 1994, p 365-377.
- [20] Hill. W.J..and Hunter. W.G.(1966). A Review of response surface Methodology: A Literature Review. *Technometrics* , 8, 571-590.

- [21] LIND, E.E., GOLDIN, J.,and HICKMAN, J.B.(1960), Fitting Yield and Cost Response Surfaces , Chem.Eng.Prog.,56,62-68.
- [22] GANADESIKEN, R.(1963), Some Remarks on Multivariate Statistical Methods for Analysis of Experimental Data, Ind. Qual. Cont., 19,22-32.
- [23] HARINGTON, E.C.(1965), The Desirability Function , Ind. Qual. Cont., 21, 494- 498.
- [24] DERINGER, G., and SUICH, R.(1980), Simultaneous Optimization of Several Response Variables, journal Quality Technology., 12, 214-219.
- [25] Myers, Raymond.H., Montgomery, Douglas.C., 1995, Reponse Surface Methodology, Process and Product Optimisation Using Designed Experiments.p.cm.(Wiley series in probability and statistics. Applied probability section).
- [26] Wu, Chien-Fu Jeff and Hamada Michael 2000, Experiments: Planing, Analysis, and Parameter Design Optimisation p.cm.(Wiley series in probability and statistics).