

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Béjaïa



Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

Mémoire de Master

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

*Optimisation du processus de surfacage (fraisage) à l'aide de
plan d'expériences multifactoriels*

Présenté par :

MECHOUCHE Fehmi & HAFSAOUI Abderraouf

Soutenu devant le jury composé de :

Président

M^r BECHEUR Abdelhamid

Rapporteur

M^r HADJOU Madjid

Examinatrice

M^{me} HIMED Lynda

Promotion 2022 – 2023

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de loin à la réalisation de cette thèse de master. Leur soutien et leur encouragement ont été essentiels pour mener à bien ce projet.

Nous tenons d'abord à remercier très chaleureusement *M^r M.HADJOU* pour son encadrement attentif et ses précieux conseils tout au long de ce travail. Sa passion pour le domaine de la recherche et sa disponibilité ont été une source d'inspiration et nous ont grandement aidés à approfondir nos connaissances.

Nos remerciements vont également à *M^r A.BECHEUR*, d'avoir accepté de présider le jury de soutenance et *M^me L.HIMED* les membres du jury qui ont accepté de consacrer leur temps à évaluer ce travail. Leurs commentaires et suggestions constructives ont permis d'améliorer la qualité de cette thèse.

Nous sommes reconnaissants envers nos camarades de classe qui ont partagé leurs idées et leurs connaissances avec nous. Leur collaboration et leurs discussions stimulantes ont été une source d'enrichissement personnel.

Nous tenons à exprimer notre gratitude envers nos amis et notre famille pour leur soutien indéfectible tout au long de nos études. Leurs encouragements et leur compréhension nous ont aidés à surmonter les moments difficiles et à persévérer dans nos efforts.

Dédicace

À ma merveilleuse mère, source d'inspiration, En ce jour important, je te dédie cette déclaration. Tu es ma force et mon soutien, je te remercie jamais assez.

À mon père bien-aimé, source de ma fierté, Cette soutenance, je te la dédie avec gratitude. Merci d'être là, merci de croire en moi.

*À mon cher grand frère **Dada**, Je voudrais te dédier ces mots remplis d'amour et de gratitude. Depuis le jour où je suis né, tu as été une présence constante dans ma vie, un modèle à suivre et un soutien inébranlable. Tu es bien plus qu'un simple frère, tu es mon confident, mon ami et mon héros.*

*À mes frères bien-aimés "**Abdelhakim**" et "**Yacine**" compagnons de ma vie, Cette dédicace est pour vous, source de joie infinie.*

*À ma merveilleuse petite sœur **Chaima**, Je tiens à t'adresser cette dédicace emplie d'amour et de tendresse..*

*À mon binôme **Fehmi**, partenaire de confiance, Cette dédicace est pour toi.*

Abderraouf

Dédicaces

A ma très chère mère

Je dédie ce travail à ma très chère mère qui a été toujours à mes cotés.

Pour votre soutien, votre amour et tous les efforts conjugués dans mon instruction et mon épanouissement.

Trouver ici, chère mère, dans ce modeste travail, le fruit de tant de dévouement et de sacrifices ainsi que l'expression de ma gratitude et de mon profond amour.

Que dieu lui protège, lui accorde santé, bonheur, prospérité et longue vie afin que je puisse un jour combler de joie lui vieux jours.

A M.ANKI, Mes oncles et mes tantes.

Je dédie ce travail pour la famille **MECHOUCHE**, pour tous les sacrifices qu'ils n'ont cessé de m'apporter tout au long de mes années.

Que dieu leur apporte de bonheur, les aide à réaliser tous leurs vœux et leur offre un avenir plein de succès.

Ma sœur ISMAHAM, Mon frère MOULOUD et A.MELISSA

Pour le soutien moral.

A tous mes AMIS

Lesquels j'ai partagé les meilleurs moments de ma vie.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.



Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I Généralités sur le fraisage	
I.1. Introduction du chapitre	2
I.2. Usinage.....	2
I.2.1. Définition	2
I.3. Procédés de fraisage.....	3
I.4. Les opération de fraisage.....	3
I.4.1. Le surfaçage.....	3
I.4.2. Le rainurage.....	3
I.4.3. Le détournage de profils.....	3
I.4.4. Le profilage.....	3
I.5. Le fraiseur universelle.....	5
I.5.1. Les compositions de fraiseur universel	5
I.5.2. Les différents mouvements de fraiseur universel	6
I.6. Les fraisages	6
I.6.1. Définition.....	6
I.6.2. Caractéristiques de fraises.....	7
1) La taille.....	7
2) La forme.....	8
3) La denture.....	8
4) Le mouvement de fixation.....	9

Sommaire

I.6.3. Classification de fraises.....	9
1) Fraises monoblocs.....	9
2) Fraises à denture rapportée.....	9
3) Fraises rouleaux.....	10
I.6.4. Montage de l'arbre porte-fraise et de la fraise.....	10
I.6.5. Démontage de la fraise et de l'arbre porte-fraise	10
I.6.6. Description de la Fraise à surfacer.....	11
I.6.7. Matières utilisé pour les fraises et leurs caractéristiques.....	11
I.6.7. a) Acier rapide supérieure ARS.....	12
I.6.7. b) Carbure	13
I.6.8. L'affutage des fraises.....	15
I.7. Les principes généraux de fraisage.....	15
I.7.1. Les deux grands principes de fraisage	16
1.7.1.a) Fraisage de face ou fraisage en bout.....	16
1.7.1.b) Fraisage de profil ou fraisages en roulant.....	16
I.7.2. Temps d'usinage sur fraiseuse	17
I.8. Les éléments de coupe	18
I.8.1. La vitesse de coupe (V_c)	18
I.8.2. L'avance (A).....	18
I.8.3. Le temps de coupe (T_c).....	18
I.9. L'ablocage des pièces.....	18
I.9.1. Les Conditions à satisfaire d'ablocage	19
I.9.2. Le dispositif d'ablocage	19

Sommaire

I.9.2.a) Ablocage sur table.....	20
I.9.2.b) L'étaiu	20
I.9.2.c) Plateaux magnétiques	20
I.9.2.d) Plateau circulaire	20
I.9.2.e) Plateau diviseur	20
I.10. L'appareil diviseur.....	20
I.10.1. Les méthodes de division.....	21
I.11. Graissage.....	21
I.11.1. Graissage forcé.....	21
I.11.2. Graissage semi-automatique.....	21
I.11.3. Graissage par barbotage.....	21
I.11.4. Conclusion.....	21
Chapitre II Les plans d'expériences	
II.1. Introduction du chapitre.....	22
II.2. Les plans d'expérience.....	22
II.2.1. Domaines d'utilisations des plans d'expériences.....	23
II.2.2. Les avantages des plans d'expériences.....	24
II.2.3. Les grandes étapes d'une étude.....	25
II.2.3.1. La recherche des facteurs.....	25
1. Les différents types de facteurs.....	25
a. Les facteurs quantitatifs (facteurs continus).....	25
b. Les facteurs qualitatifs.....	25
i. Facteurs discrets	25
ii. Facteurs ordonnables	25

Sommaire

iii. Facteurs booléens	25
II.2.3.2. Modélisation.....	26
II.2.3.3. Optimisation.....	26
II.2.4. Notion d'espace expérimental.....	26
II.2.4.1. La réponse.....	28
II.2.4.2. Niveau d'un facteur.....	28
II.2.4.3. L'effet d'un facteur.....	29
II.2.4.4. Interaction.....	31
II.2.5. Les différents types de plans d'expériences.....	31
II.2.5.1. Plan factoriels à k facteurs.....	31
II.2.5.2. Plan de MOZZO.....	31
II.2.5.3. Plan de Rechtschaffine.....	32
II.2.5.4. Plan de Plackett et Burmann.....	32
II.2.5.5. Plans factoriels complets.....	32
II.2.5.6. Plans factoriels complets à deux niveaux.....	33
II.2.5.7. Plans à deux facteurs.....	33
II.2.5.8. Plans factoriels complets à trois niveaux.....	33
II.2.5.9. Plans fractionnaires.....	33
Plans fractionnaires (2^{k-p}).....	34
II.2.5.10. Plans de mélange.....	34
II.2.5.11. Les plans hybrides.....	35
II.2.6. Surface de réponse.....	35
II.3. Conclusion.....	36

Sommaire

Chapitre III

III.1. Introduction du chapitre.....	37
III.2 Procédure expérimentale.....	37
III.2.1 Moyens utilisés	37
III.2.1.1 Matériaux à usiner	37
III.2.1.2. Mesure de la dureté.....	39
III.2.1.3. Préparation des échantillons.....	40
III.2.1.4. Machine-outil.....	41
a)Description de la fraiseuse utilisée au niveau du hall technologie.....	41
III.2.1.5. Outil de coupe utilisé.....	42
III.2.1.6 Montage utilisé sur la machine.....	42
III.2.1.7. La lubrification.....	43
III.2.1.8. Mesure de la puissance de coupe.....	43
III.2.1.9. Mesure de la rugosité.....	44
III.2.2. Conditions expérimentales.....	45
III.3. Plan utilisé pour la méthode multifactorielle.....	46
III.4. Notions de statistique appliquée aux plans d'expériences.....	47
III.4.1. Erreur expérimentale.....	47
III.4.2. Moyenne.....	47
III.4.3. Écart- type.....	47
III.4.4. Analyse de la variance.....	48
III.4.5. Coefficient de détermination (R ²).....	48
III.4.6. Coefficient de détermination ajusté R ² ajusté.....	49
III.4.7. Résidus.....	49
III.4.8. P-value.....	49
III.4.9. Fisher.....	49

Sommaire

III.4.10. Test de Student.....	50
III.5. Présentation du logiciel STATISTICA.....	50
III.5.1. Philosophie Générale de l'Approche de STATISTICA.....	50
III.5.2. Spécificités.....	51
III.5.3. Fonctions Analytiques.....	51
III.6. Conclusion	52

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Introduction.....	53
IV.2 Choix d'un modèle	54
IV.3 Résultats statistiques.....	55
IV.4 Analyse de régression.....	56
IV.4.1 Les résultats.....	58
IV.4.1.1 Pour la puissance absorbée	58
IV.4.1.2 Pour la puissance de coupe (Puissance utile).....	64
IV.4.1.3 Pour l'effort de coupe F_c	68
IV.4.1.4 Pour la rugosité R_a	72
IV.5 Conclusion.....	77
Conclusion générale.....	78
Références bibliographiques.....	79

Sommaire

Liste des figures

Figure I.1 : Une fraiseuse universelle.....	5
Figure I.2 : La forme géométrique des taillants d'une fraise.....	7
Figure I.3 : Taille 1 et taille 3 de fraises.....	7
Figure I.4 : Taille 2 de fraises.....	8
Figure I.5 : Caractéristiques des fraises.....	9
Figure I.6 : Les fraises par ARS de taille 1 et 2.....	12
Figure I.7 : Les fraises par ARS de taille 2 et 3.....	13
Figure I.8 : Les fraises à plaquettes carbures.....	14
Figure I.9 : Dispositif d'ablocage	19
Figure II.10 : Représentation du système à étudier par la méthode des plans d'expérience.....	23
Figure II.11 : Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.....	26
Figure II.12 : Espace expérimental.....	27
Figure II.13 : Les niveaux des facteurs définissant des points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.....	28
Figure II.14 : Effet d'un facteur.....	30
Figure II.15 : Triangle de Férret.....	34
Figure II.16 : Surface de réponse tridimensionnelle.....	35
Figure III.17 : Duromètre type Qness 250 CS.....	39
Figure III.18 : Scie à métaux mécanique.....	40
Figure III.19 : Fraiseuse universelle Almo.....	41
Figure III.20 : Outil de coupe.....	42
Figure III.21 : Le montage sur étau métallique.....	42

Figure III.22 : Ampérométrie sans fil numérique PEAK METER MS2203EX.....	43
Figure III.23 : Ampérométrie sans fil numérique PEAK METER MS2203EX.....	44
Figure III.24 : Profil-mètre LITE SURF.....	45
Figure III.25 : Logiciel Statistica version 10.....	50
Figure IV. 1 : Diagramme expérimental	54
Figure IV. 2 : Modélisation de l'effet de (F) par rapport à la puissance absorbée P	61
Figure IV. 3 : Modélisation de l'effet de (a_p) par rapport à la puissance absorbée P.....	62
Figure IV. 4 : Graphe de surface de réponse de p en fonction de a_p et F	63
Figure IV. 5 : Modélisation de l'effet de (a_p) par rapport à la puissance de coupe P_c	66
Figure IV. 6 : Modélisation de l'effet de (F) par rapport à la puissance de coupe P_c	67
Figure IV. 7 : Graphe de surface de réponse de p_c en fonction de a_p et F	68
Figure IV. 8 : Modélisation de l'effet de (a_p) par rapport à l'effort de coupe F_c	70
Figure IV. 9 : Graphe de surface de réponse de F_c en fonction de H_v et a_p	71
Figure IV. 10 : Modélisation de l'effet de (H_v) par rapport à la rugosité R_a	74
Figure IV. 11 : Modélisation de l'effet de (F) par rapport à la rugosité R_a	75
Figure IV. 12 : Graphe de surface de réponse de R_a en fonction de H_v et F.....	76

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les opérations de fraisage.....	4
Tableau 2 : La différence entre fraisage de face et profil.....	16
Tableau 3 : La différence entre fraisage en opposition et fraisage en avalant.....	17
Tableau 4 : Composition chimique de l'acier XC 38.....	38
Tableau 5 : Composition chimique de l'acier XC 48.....	38
Tableau 6 : Composition chimique de l'acier 25 CD 4.....	38
Tableau 7 : Dureté Vickers Hv 0.5.....	40
Tableau 8 : caractéristiques de la fraise utilisée.....	42
Tableau 9 : Variation des conditions de coupe.....	46
Tableau 10 : Planification des expériences.....	47
Tableau IV. 1 : Résultats expérimentaux.....	55
Tableau IV. 2 : L'analyse de la variance.....	58
Tableau IV. 3 : Importance des coefficients du modèle.....	59
Tableau IV. 4 : L'analyse de la variance.....	64
Tableau IV. 5 : Importance des coefficients du modèle.....	64
Tableau IV. 6 :L'analyse de la variance.....	68
Tableau IV. 7 : Importance des coefficients du modèle.....	69
Tableau IV. 8 :L'analyse de la variance.....	72
Tableau IV. 9 : Importance des coefficients du modèle.....	72

Introduction générale

Chapitre I

Généralités sur le fraisage

I.1. Introduction du chapitre:

Dans tous les produits avec lesquels, l'homme facilite sa vie, du téléphone portable à l'électroménager en passant par l'automobile jusqu'à la bijouterie s'assemblent des pièces mécaniques. Ces pièces peuvent être réalisées avec différents matériaux (métal, polymère, bois...), mais dans la plupart des cas, la forme finale de ces pièces a nécessité au cours de leur fabrication au moins une ou plusieurs opérations d'usinage.

Parmi les principaux procédés de fabrication mécanique, il est indispensable d'en citer l'usinage par enlèvement de matière réalisé avec le déplacement d'un outil coupant par rapport à la pièce de vice versa. L'usinage est employé pour la finition des pièces.

Dans le cadre de ce mémoire nous nous intéresserons au procédé de fraisage, qui représente environ 15% du domaine d'usinage. On va présenter des généralités sur le fraisage, qui contient des définitions, la géométrie d'outil, les conditions de coupe et les différents matériaux de l'outil.

I.2. Usinage

I.2.1. Définition de l'usinage :

L'usinage est un procédé de fabrication par enlèvement de matière qui désigne l'ensemble des techniques qui permettent d'obtenir une surface par arrachement du copeau, cette technique est très importante dans la fabrication mécanique.

Les bases d'usinage sont de définir les différents modes d'obtention de pièces mécaniques. On distingue trois types d'opérations d'usinage (tournage ; fraisage ; rectification) qui mettent en jeu des outils de coupe possédant plusieurs arêtes tranchantes, par contre le dernier procédé, met en action l'outil meule.

L'usinage des métaux par enlèvement de matière est une méthode de production de composants mécaniques. Lors d'opération d'usinage d'une pièce mécanique, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil: le mouvement de coupe (vitesse de coupe V_c), le mouvement d'avance (vitesse d'avance V_a).

Si on compare les différentes opérations d'usinage réalisées au cours des travaux industriels, on remarque que la répartition s'effectue de la façon suivante : tournage 30%, fraisage 15%, perçage 15%, rectification 10%, alésage et brochage 15%, divers 15%.

I.3. Procédé de fraisage

Le fraisage est un procédé dans lequel un outil de fraisage enlève de la matière par un mouvement rotatif, comme pour le perçage, il est possible d'utiliser un large éventail d'outils de différents diamètres et différentes duretés.

L'obtention des surfaces de révolution dépend initialement du choix des conditions de coupe (V_c , f , V_f , AP). La réussite d'une opération de fraisage est évaluée à l'aide des paramètres technologiques et économique (effort de coupe, puissance de coupe, temps de coupe et le coût, etc.).

Différents types de fraiseuses :

Fraiseuse horizontale : la fraiseuse horizontale utilise des fraises montées sur un arbre porte-fraise horizontal.

Fraiseuse horizontale transformable : la fraiseuse horizontale peut se transformer occasionnellement en fraiseuse verticale grâce à l'utilisation d'une tête verticale rapportée.

Fraiseuse universelle : la broche ou arbre porte-fraise peut occuper toutes les inclinaisons possibles par rapport à la table porte-pièce de la machine.

Fraiseuse verticale : la broche est perpendiculaire à la surface de la table. Il en existe de différents types :

- à tête porte-broche fixe.
- à tête porte-broche inclinable dans le plan vertical parallèle à l'axe de la table.

I.4. Les opérations de fraisage :

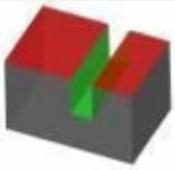
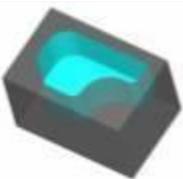
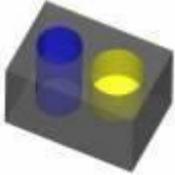
I.4.1. Le surfacage : Réalisation d'une surface plane à l'aide de fraises de face ou de profil.

I.4.2. Le rainurage : Consiste à réaliser une rainure à l'aide de fraises de profils adaptés au genre de rainures à exécuter.

I.4.3. Le détournage de profils : C'est une opération qui consiste à finir le profil d'une pièce à l'aide d'une fraise généralement cylindrique à une taille.

I.4.4. Le profilage : Lorsque les profils fraisés résultent directement de formes de la fraise et non des mouvements de la pièce.

Tableau 1: les opérations de fraisage.

Dessin	Operations	
	<p>Surfaçage Le surfaçage c'est l'usinage d'un plan par une fraise * (surface rouge).</p>	 <p>Fraise à surface</p>
	<p>Plans épaulés C'est l'association de 2 plans perpendiculaires (surfaces vertes)</p>	 <p>Fraise de tailles.</p>
	<p>Rainure C'est l'association de 3 plans. Le fond est perpendiculaire aux deux autres plans * (surfaces vertes).</p>	 <p>Fraise 2 tailles Fraise 3 tailles</p>
	<p>Poche La poche est délimitée par des surfaces verticales quel conque (cylindre et plan). C'est une forme creuse dans la pièce * (surface cyan).</p>	 <p>Fraise 2 tailles</p>
	<p>Perçage Ce sont des trous. Ils sont débouchants (surface bleu) ou borgnes (surface jaune).</p>	 <p>Foret Alésoir Fraise 2 tailles (pour le plastique)</p>

I.5. La fraiseuse Universelle :

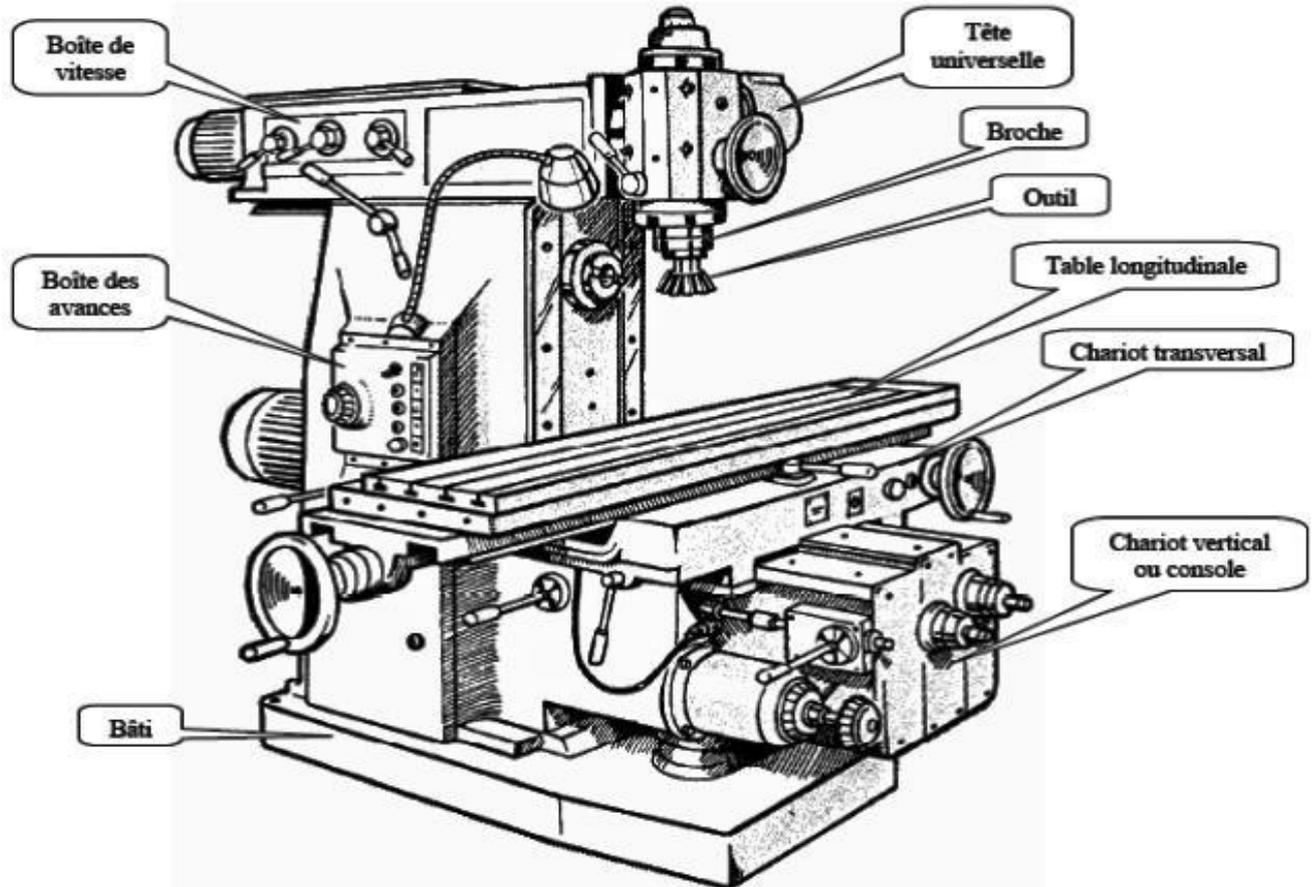


Figure I.1 : Une fraiseuse universelle.

I.5.1. Les compositions de fraiseuse universelle :

- Un bâti en fonte sert d'assise à la machine et supportant les différents organes.
- Une poupée fixe analogue à celle d'un tour qui transmet le mouvement à la fraise.
- L'arbre porte-fraise en acier spécial recevant son mouvement de la broche.
- Le support horizontal ou poutre en fonte de longueur réglable suivant les montages de fraises et pièces.
- Le support d'arbre : destiné à soutenir l'extrémité libre de l'arbre porte-fraises.
- Une console reliée au bâti par ses glissières et portant les différents chariots porte-pièces.
- Le chariot transversal coulissant sur les glissières transversales de la console.
- La table rectangulaire se déplace longitudinalement sur les glissières du chariot transversal.
- Le moteur électrique.
- La boîte des vitesses.
- La boîte des avances.

I.5.2. Les différents mouvements de fraiseuse universelle:

- **Mouvement de rotation de la fraise :** obtenue par le MR de l'arbre porte-fraise .Cetterotation produite par un moteur électrique.
- **Mouvement d'avance :** ce mouvement peut être communiqué à la table. Manuellement par la vis de la table actionnée par la fraiseuse qui agit sur la manivelle ou le volant. Automatiquement par la vis de la table qui est commandée par la boîte des avances .C'est l'avance par dent qui détermine l'épaisseur du copeau.
- **Mouvement de pénétration :** il est obtenu par le déplacement vertical de la console sur une fraiseuse horizontale ou par un déplacement latéral de la table sur une fraiseuse verticale c'est ce mouvement de positionnement qui permet de régler la profondeur de passe.

I.6. Les fraises :

I.6.1. Définition de fraise :

La fraise est un outil multiple, formé par plusieurs taillants disposés radialement sur une circonférence.

La forme géométrique des taillants d'une fraise est soumise à trois angles fondamentaux sont :

- angle de dépouille, α (alpha).
- angle de coupe, γ (gamma).
- angle de matière, β (beta).

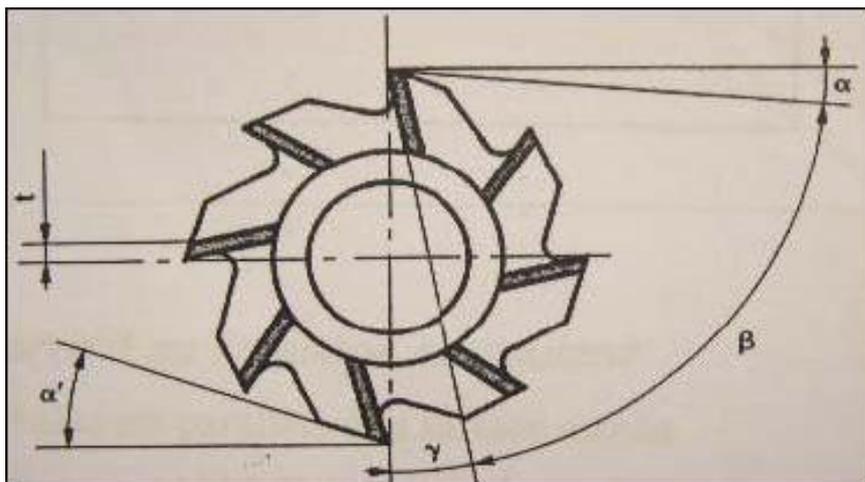


Figure I.2 : La forme géométrique des taillants d'une fraise.

I.6.2. Caractéristiques des fraises :

1) La **taille** : correspondant au nombre d'arêtes tranchantes par dent :

- fraises à une taille.
- fraises à deux tailles.
- fraises trois tailles.

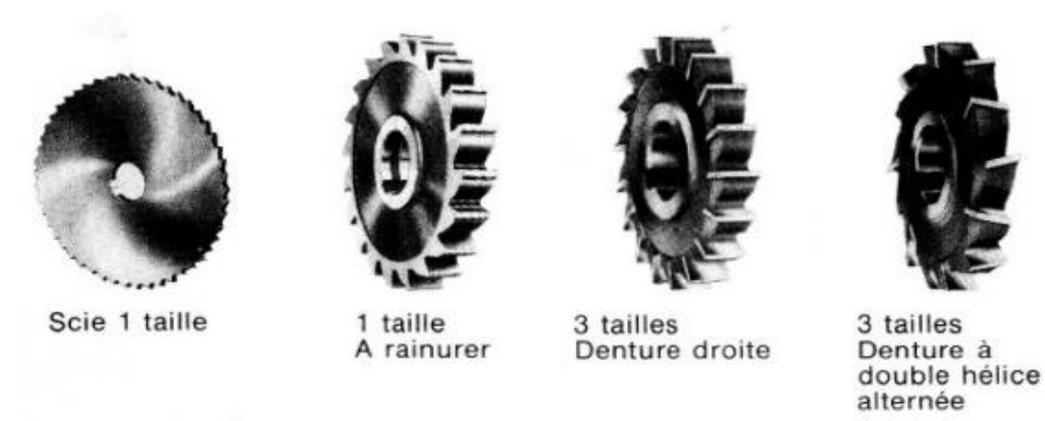


Figure I.3 : Taille 1 et taille 3 de fraises.

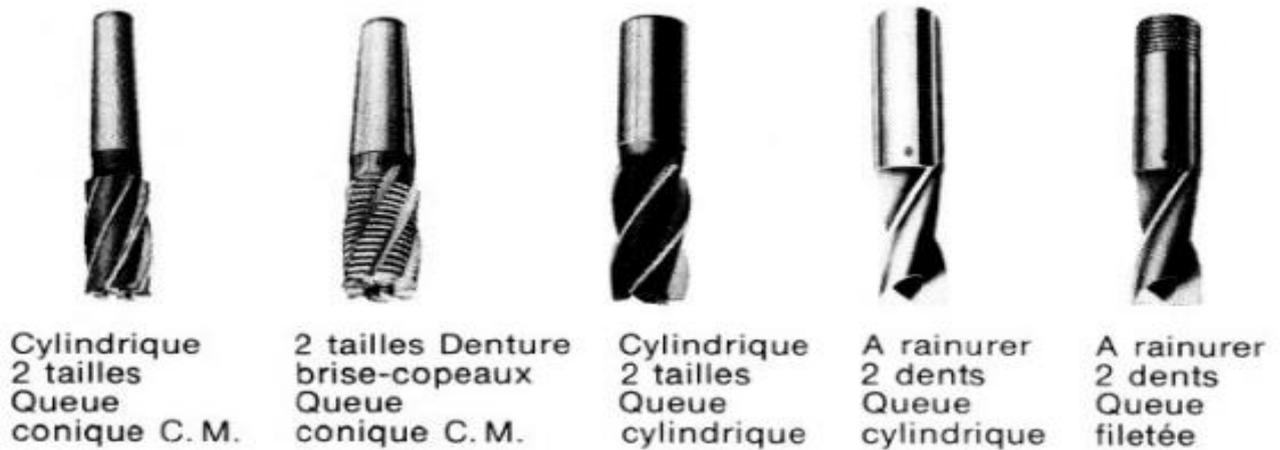


Figure I.4 : Taille 2 de fraises.

2) La forme :

- Fraises cylindriques.
- Fraises coniques.
- Fraise biconique.
- Fraise cloche.
- Fraises de forme.
- Fraises à lames ou à outils rapportés.

3) La denture :

- Si l'arête tranchante est parallèle à l'axe de la fraise,
on a : Une denture droite
- Si l'arête tranchante est inclinée par rapport à l'axe de la fraise, on a :
Une denture hélicoïdale à droite ou à gauche.
Une denture à double hélice alternée.

Une fraise est également caractérisée par son nombre de dents.

4) Le mode de fixation :

On distingue deux modes de fixation distincts :

- à trou : lisse, lisse rainurer ou taraudé.
- à queue : cylindrique ou conique.

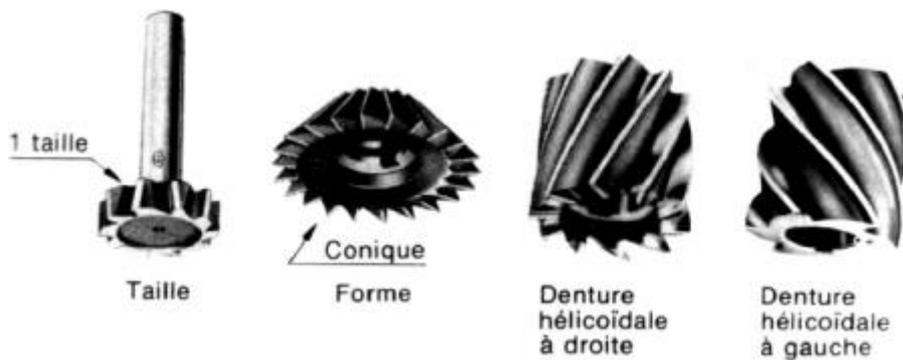


Figure I.5: Caractéristiques des fraises.

I.6.3. Classification des fraises :

- 1) Fraises monoblocs : Ce sont des fraises dont la denture est taillé dans la masse on rencontre 2 types de fraises monoblocs.
 - Fraise à denture taillée ou fraisée.
 - Fraise à profil constant.
- 2) Fraises à denture rapportée : Sont intéressantes du fait de la fabrication du corps de fraise en acier ordinaire au carbone et des dents en acier à coupe rapide ou alliage spécial.

Deux types se rencontrent souvent :

- fraises à outils rapportés.
- fraises à plaquettes rapide.

- 3) Fraises rouleaux : C'est une fraise monobloc cylindrique à trou lisse pourvu d'une rainure pour clavette d'entraînement. Les fraises plus larges possèdent un alésage chambré qui assure un meilleur guidage fraise/arbre.

I.6.4. Montage de l'arbre porte-fraise et de la fraise :

On veillera tout simplement :

- 1) Nettoyer le cône intérieur de la broche.
- 2) Placer l'arbre porte-fraise, l'orienter suivant les tenons d'entraînement.
- 3) Huiler légèrement le filet de la tige de rappel qui fixera l'arbre porte-fraise dans son logement.
- 4) Serrer l'écrou de blocage.
- 5) Placer les bagues intercalaires.
- 6) Situer la position de la fraise (porte-à-faux minimum).
- 7) Placer la fraise (cale, sens de rotation).
- 8) Placer les bagues intercalaires.
- 9) Situer la position de la bague de roulement.
- 10) Placer la bague guide.
- 11) Positionner et bloquer la poutre.
- 12) Placer le bras support.
- 13) Fixer celui-ci sur la poutre.
- 14) Placer les bagues intercalaires.
- 15) Visser et bloquer l'écrou de blocage.

I.6.5. Démontage de la fraise et de l'arbre porte-fraise :

- 1) Débloquer et desserrer l'écrou de blocage.
- 2) Enlever les bagues intercalaires.
- 3) Débloquer le bras support.
- 4) Enlever le bras support et la bague de roulement restée dans celui-ci.

- 5) Enlever les bagues intercalaires.
- 6) Enlever la fraise.
- 7) Replacer les bagues intercalaires ainsi que l'écrou de blocage.
- 8) Débloquer l'arbre porte-fraise et l'enlever.
- 9) Débloquer la tige de rappel et la desserrer de un tour maximum.
- 10) Chasser avec un maillet la tige de rappel pour décoller l'arbre de son logement conique.
- 11) Enlever l'arbre porte-fraise et la tige de rappel et les déposer sur la desserte.

I.6.6. Description de la Fraise à surfacer :

Fraise en bout à deux tailles à surfacer, à dents rapportées en acier rapide fixées dans le corps de la fraise à l'aide de broches introduites de force entre le corps et les dents, et qui agissent ainsi comme un coin. Le genre d'attache au mandrin de cette fraise est rarement utilisé.

I.6.7. Matières utilisés pour les fraises et leurs caractéristiques :

C'est l'acier à coupe rapide qui est utilisé sur un travail de production. Cette matière est la seule qui puisse en un outil monobloc, assurer des vitesses de coupes assez grandes.

L'alliage le plus utilisé est composé de : 18% de tungstène W, 4% de chrome (Cr), 1% de vanadium (Va), 1,2% de carbone (C). Le cobalt remplace aussi le tungstène pour environ 10 à 15%.

Ces aciers subissent :

- Une trempe à 1100/1300, refroidissement dans l'air soufflé.
- Un revenu entre 350/600 dans le plomb ou des sels fondus.

I.6.7. a) Acier rapide supérieure ARS :

Les outils en ARS sont constitués le plus souvent d'un barreau monobloc en acier rapide supérieur, l'arête de coupe est affûtée.

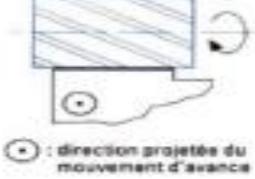
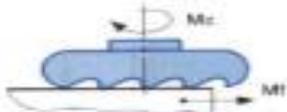
Visualisation	Identification de l'outil	Type d'opérations réalisées	Schéma d'usinage
	Fraise 1 taille à surfacer	Surfaçage en roulant ou de profil	 ⊙ : direction projetée du mouvement d'avance
	Fraise cloche à surfacer	Surfaçage en bout ou de face	 Mz, Mf
	Fraise 2 tailles à queue conique	Surfaçages combinés à prédominance en roulant Surfaçage en roulant	 ⊙ Direction projetée du mouvement d'avance

Figure I.6 : Les fraises par ARS de taille 1 et 2.

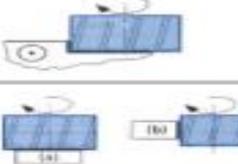
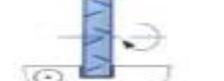
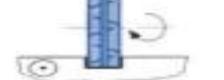
	<p>Fraise 2 tailles à alésages et à entraînement par tenon</p>	<p>Surfaçages combinés à prédominance en bout</p> <p>Restrictivement : - surfaçage en bout (a) - surfaçage en roulant (b)</p>	
	<p>Fraise 2 tailles à queue cylindrique</p>	<p>Rainurage de profil peu précis</p>	
	<p>Fraise à rainurer deux lèvres à coupe centrale</p>	<p><i>Rainurage de profil en pleine matière</i> Exemple : rainure de clavetage</p>	
	<p>Fraise 3 tailles à dentures alternées</p>	<p>Rainurage en bout Qualité usuelle obtenue /9</p>	
	<p>Fraise 3 tailles extensible à denture alternées</p>	<p>Rainurage en bout qualité usuelle obtenue : 7-8</p>	

Figure I.7 : Les fraises par ARS de taille 2 et 3.

I.6.7. b) Carbure :

Pour améliorer les performances des outils, l'arête de coupe est placée sur une plaquette amovible en carbure. Ce matériau est très résistant par rapport à ARS. La plaquette carbure est obtenue en compressant différentes poudres de carbure. Dès que l'arête de coupe est usée, il suffit de changer la plaquette.

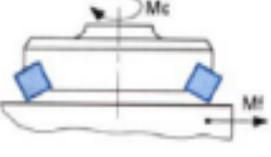
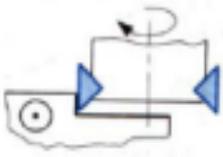
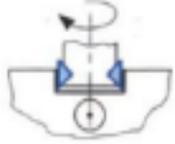
Visualisation	Identification de l'outil	Types d'opérations réalisées	Schéma d'usinage
	Fraise à surfacer	Surfaçage en bout	
	Fraise à surfacer et à dresser	Surfaçages combinés à prédominance en bout	
	Fraise à rainurer	Rainurage de profil	
	Fraise 3 tailles à dentures alternées	Rainurage en bout	

Figure I.8 : Les fraises à plaquettes carbures.

I.6.8. L'affûtage des fraises

Chaque outil s'use après une période de temps variable suivant la façon de l'employer et le travail à exécuter. L'outil doit être réaffûté afin de lui maintenir sa capacité de coupe.

L'affûtage est une opération d'enlèvement de matière. Elle doit être exécutée par un outil plus dur que la matière de l'outil à affûter. L'outil utilisé pour l'affûtage est une meule.

I.7. Les principes généraux de fraisage :

Les fraises peuvent présenter des arêtes tranchantes soit sur leur surface latérale, soit en bout, soit latéralement et en bout simultanément les fraises peuvent donc produire :

- Des surfaces planes parallèles à leur axe.
- Des surfaces planes obliques à l'axe de rotation.
- Des surfaces perpendiculaires à l'axe de la fraise.
- Des surfaces quelconques de forme indifféremment positionnées par rapport à l'axe.

Sur toutes les fraiseuses, la production de ces différentes surfaces est réalisée grâce à :

- La rotation de la fraise.
- L'avance de la pièce.

I.7.1. Les deux grands principes de fraisage

Ces différentes possibilités font apparaître 2 grands principes de fraisage :

1.7.1.a) Fraisage de face ou fraisage en bout

L'axe de rotation de l'outil est perpendiculaire au plan fraisé.

1.7.1.b) Fraisage de profil ou fraisages en roulant

L'axe de rotation de la fraise est parallèle à la surface usinée.

Tableau 2 : La différence entre fraisage de face et profil.

Fraisage de face	Fraisage de profil
<ul style="list-style-type: none"> - Série de courbes séquentes appelées cycloïde (traces laissées par les dents de la fraise sur la Pièce). - Intervalle compris entre deux cycloïdes représente l'épaisseur du copeau. - Bonnes conditions de coupe (état de surface bon). 	<ul style="list-style-type: none"> - Série d'ondulations (traces laissées par les dents de la fraise sur la pièce). - Chaque dent de la fraise taille un copeau d'épaisseur soit croissant, soit décroissant. - État de surface moins bon.

En conclusion, nous utiliserons donc le fraisage de face toutes les fois que ce sera possible.

Le choix du mode de fraisage dépend de :

- l'état de surface exigé ;
- la spécification géométrique ;
- la tolérance demandée sur la dimension ;
- la machine utilisée ; etc.

Tableau 3 : la différence entre fraisage en opposition et fraisage en avalant.

Fraisage en opposition	Fraisage en avalant
<ul style="list-style-type: none"> - Ma et Mc de sens contraire. - L'épaisseur du copeau est faible à l'attaque et maxi en fin de trajectoire. - Écrouissage de la matière (la matière n'est pas coupée mais plutôt repoussée) mauvais état de Surface. - Usure plus importante et rapide de l'outil dû au frottement. - Aucun dispositif de rattrapage de jeu n'est requis. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ma et Mc sont de même sens. - L'épaisseur du copeau est maxi à l'attaque de la matière (attention choc à l'entrée de la dent). - On utilise parfois un angle de coupe négatif (γ), qui augmente l'effort de coupe mais aussi la solidité de la dent (β plus grand). - requiert un dispositif de rattrapage de jeu afin de ne pas avoir un mouvement d'avance par saccades (par à-coups)

I.7.2. Temps d'usinage sur fraiseuse :

Ainsi que pour chaque travail sur machines-outils, il est utile, pour des raisons de production et de programmation de fabrication, de connaître le temps nécessaire à l'exécution d'un quelconque usinage sur fraiseuse. Le temps est calculé à partir des exigences du plan et de la pièce.

I.8. Les éléments de coupe :**I.8.1. La vitesse de coupe (Vc) :**

C'est la longueur de copeau débité pendant la durée d'une minute.

$$N = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d}$$

Vc : vitesses de coupe (m/min)

d : diamètre de la fraise (mm)

N : vitesse de rotation broche (tour/min)

I.8.2. L'avance (A)

C'est le déplacement accompli par la pièce pendant la course de travail.

$$A = a \cdot Z \cdot N$$

A : avance de l'outil de coupe (mm)

a : avance par dents (mm/dents)

Z : nombre de dents de l'outil (/)

N : vitesse de rotation broche (tour/min)

I.8.3. Le temps de coupe (Tc)

C'est le temps nécessaire à l'outil pour parcourir la pièce y compris son entrée et sa sortie de la matière.

$$T_c = \frac{L}{A}$$

Tc : temps de coupe (min)

L : longueur totale d'usinage (mm)

A : avance de l'outil de coupe (mm/min)

$$L = (l + d) \cdot n$$

I.9. L'ablocage des pièces :

Avant l'usinage des pièces, il faut s'assurer de :

- la mise en position de la surface usinée par rapport aux référentielles machines.
- l'immobilisation de la pièce en cours d'usinage.
- l'absence de déformation au moment de l'ablocage.

I.9.1. Les Conditions à satisfaire d'ablocage :

- Immobiliser la pièce en conservant la précision de la mise en position.
- Éviter les déformations au moment de l'ablocage et pendant l'usinage.
- Appliquez les efforts de serrage en face des appuis, dans une direction normale par rapport à la surface de contact, sauf dans le serrage par clame.
- Les outils et les copeaux doivent pouvoir se dégager facilement.
- Permettre un montage et démontage rapide de la pièce.
- Permettre le contrôle en cours d'usinage.

I.9.2. Le dispositif d'ablocage :



Figure I.9 : Dispositif d'ablocage.

I.9.2.a) Ablocage sur table

La table de la fraiseuse constitue la première référence de mise en place de tous les systèmes porte pièce. Elle comporte des rainures en T, calibrées qui permettent de recevoir des cales ou des boulons à tête rectangulaire pour le maintien des pièces.

I.9.2.b) L'étai

Cette porte pièce est très utile pour l'ablocage en fraisage. Le serrage peut être assuré de façon mécanique, par action hydraulique ou pneumatique.

L'utilisation de mots spéciaux permet l'immobilisation des pièces cylindriques en position axe horizontal, ou verticale, l'immobilisation de pièces minces, et le fraisage de surface oblique.

I.9.2.c) Plateaux magnétiques

Permet d'immobiliser des pièces magnétiques en libérant totalement la surface à usiner. Exige que la surface de contact de la matière avec le plateau soit usinée.

I.9.2.d) Plateau circulaire

Cette porte pièce est pourvue d'une table circulaire dont les rainures en T permettent le bridage des pièces de la même façon que sur la table de fraiseuse.

I.9.2.e) Plateau diviseur

C'est un appareil composé de la poupée diviseurs et d'une contrepointe. Il permet l'ablocage dans une position avec possibilités d'évolution angulaire. Le plateau diviseurs permet différents montages de pièces :

- Montage en l'air.
- Montage mixte.
- Montage entre-pointes.
- Montage sur mandrin de reprise.

I.10. L'appareil diviseur :

L'appareil diviseur va permettre la réalisation d'une succession d'usinage qui nécessitent la rotation de la pièce entre ses usinages.

Il est constitué d'une poupée diviseurs (d) et d'une contre-pointe (c). Les pièces se fixent sur la broche de la poupée diviseurs comme sur un tour.

La rotation de la pièce entre les usinages est assurée par la manivelle qui commande la vis sans fin qui peut engrener avec une roue à vis solidaire de la broche.

Un compas ou alidade à l'ouverture variable permet de régler une rotation déterminée de la manivelle.

I.10.1. Les méthodes de division

- La division directe.
- La division simple.
- La division composée.
- La division différentielle.

I.11. Graissage

Les fraiseuses demandent un graissage adéquat et constant de leurs organes mobiles.

I.11.1. Graissage forcé

C'est un graissage automatique, obtenu au moyen d'une pompe commandée par le moteur de la machine.

Il sert au graissage de la boîte de vitesses des avances et des engrenages de commande de la broche.

I.11.2. Graissage semi-automatique

Sert pour le graissage de l'ensemble de la console et des différents chariots.

I.11.3. Graissage par barbotage

Employé pour graisser la boîte de vitesse.

I.11.4. Conclusion : Ce chapitre de la recherche bibliographique nous a permis de mettre en évidence l'influence des paramètres de l'outil de coupe ainsi les nombreux paramètres technologiques sur le processus d'usinage en fraisage.

Chapitre II

Les plans d'expériences

II.1. Introduction du chapitre

Les plans d'expériences sont des outils précieux dans le domaine de la recherche et de l'analyse expérimentale. Ils permettent aux chercheurs de concevoir des expériences efficaces et informatives pour étudier l'effet des variables sur une réponse donnée. En organisant de manière systématique les essais expérimentaux et en analysant les données de manière rigoureuse, les plans d'expériences offrent des avantages significatifs en termes d'efficacité et de fiabilité des résultats.

Dans ce chapitre, nous explorerons les bases des plans d'expériences et leur utilité dans le processus de recherche. Nous découvrirons comment ces plans permettent de déterminer les facteurs clés qui influencent une réponse et comment les niveaux de ces facteurs sont sélectionnés. Nous comprendrons également comment les plans d'expériences contribuent à une meilleure compréhension des relations entre les variables et la réponse, en fournissant des informations essentielles pour la prise de décision.

II.2. Les plans d'expérience :

C'est un outil cinématique qui est utilisé pour organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ces études sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt Y et des variables (facteurs) X_i .

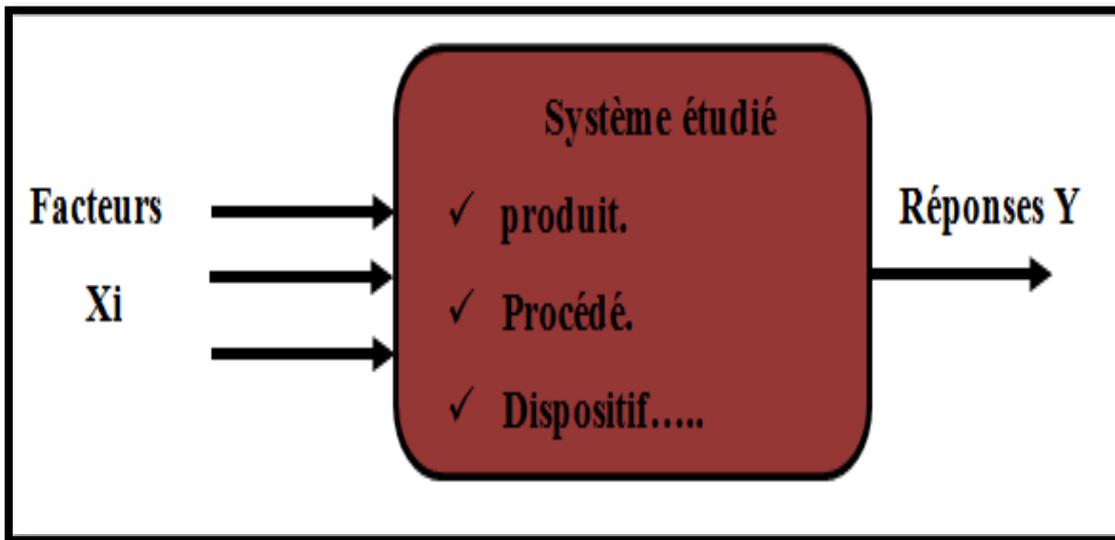


Figure II.10 : Représentation du système à étudier par la méthode des plans d'expériences.

Avant dans la méthodologie classique, on fixe le niveau de toutes les variables sauf une et l'on mesure la réponse du système pour différentes valeurs de cette variable. Si l'on veut étudier toutes les variables, il faut recommencer pour chacune, ce qui nous donne des chiffres des expériences représentant un travail gigantesque qui dépasse les limites du faisable (autrement dit perdre du temps et de l'argent). C'est pour ça que nous avons examiné la méthode des plans d'expériences.

II.2.1. Domaines d'utilisations des plans d'expériences :

Dans toutes les entreprises, et quel que soit le secteur d'activité, le technicien ou l'ingénieur est amené à comprendre comment réagit un système en fonction des différents facteurs qui sont susceptibles de le modifier. Pour vérifier l'évolution du processus, il mesure une réponse, et, à partir de différents essais, il va tenter d'établir des relations de cause à effet entre la (ou les) réponse(s) et les différents facteurs.

Parmi les facteurs on distinguera :

- Les facteurs contrôlables qui dépendent directement du choix du technicien (choix d'un matériau, d'une pression...);
- Les facteurs non contrôlables qui varient indépendamment des choix du technicien (conditions climatiques, environnement d'utilisation...);
- Les facteurs d'entrées telles que la matière première dans un processus de fabrication. Il n'est pas simple de réaliser de telles relations entre réponses et facteurs, surtout s'il existe des interactions entre les facteurs. Les plans d'expériences permettent de réaliser ce type

de relations, en minimisant le nombre d'expériences tout en maximisant la précision du résultat. Le domaine de validité est très vaste. On peut rapidement citer les applications les plus classiques dans le domaine de la conception des produits ;

- Test de différentes configurations de base ;
- Choix de matériaux pour l'amélioration des processus de production ;
- Détermination des tolérances de fonctionnement d'un produit. On l'applique aussi dans la conception et l'amélioration des processus de production ;
- Diminution de pourcentage de défectueux dans une ligne de production ;
- Diminution de la variabilité d'une machine ;
- Choix des outillages...etc.

II.2.2. Les avantages des plans d'expériences :

Avec la méthode de plan d'expérience, on fait varier les niveaux de tous les facteurs à la fois à chaque expérience, mais de manière programmée et raisonnée. Ce qui nous offre de nombreux avantages parmi lesquels :

- Réduire de façon considérable le nombre d'essais.
- Mettre en évidence les interactions entre variables (facteurs).
- Modéliser la réponse.
- Gain : temps et coût.
- Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs.

II.2.3. Les grandes étapes d'une étude :

II.2.3.1. La recherche des facteurs :

On cherche tous les facteurs susceptibles d'influer sur le phénomène étudié. Après une étude, on peut déterminer :

- Ceux qui ont une influence significative.
- La valeur de cette influence.
- L'existence d'interaction entre facteurs.

1. Les différents types de facteurs :

a. Les facteurs quantitatifs (facteurs continus) :

La pression, température, intensité sont des exemples de facteur continu. Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus. [11]

b. Les facteurs qualitatifs :

i. Facteurs discrets :

Contraire de tous facteurs quantitatifs, les facteurs discrets ne peuvent prendre que des valeurs particulières. Ces valeurs ne sont pas forcément numériques : on peut représenter un facteur discret par un nom, une lettre, une propriété ou même par un nombre qui n'a alors en soi aucune valeur numérique mais qu'une signification de repère. Par exemple, on peut s'intéresser aux couleurs d'un produit : bleu, rouge et jaune sont des facteurs discrets. [11]

ii. Facteurs ordonnables :

Il s'agit de facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit, ou encore premier, deuxième, troisième et quatrième. [11]

iii. Facteurs booléens :

Les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs : haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc. [11]

II.2.3.2. Modélisation :

- Identifier et quantifier les facteurs influents.
- Chercher la forme d'influence (linéaire ou courbe).

Chercher l'équation qui permet de décrire les variations du phénomène étudié en fonction des facteurs influents. $Y=f(x)$

II.2.3.3. Optimisation :

Recherche des conditions expérimentales qui donnent le meilleur résultat. La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

II.2.4. Notion d'espace expérimental :

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai, cette grandeur s'appelle la réponse. La valeur de la réponse dépend de plusieurs variables. Au lieu de terme variable on utilisera le mot facteur.

Dans les plans d'expériences pour chaque facteur il est représenté par un axe gradué et orienté. La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes (Domaine du facteur). La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

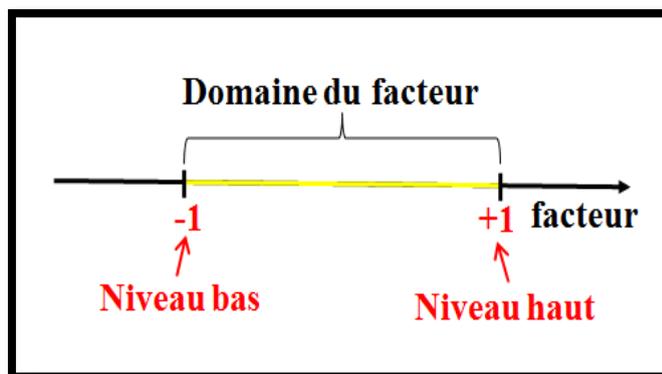


Figure II.11 : Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

Pour le cas où il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental. [12]

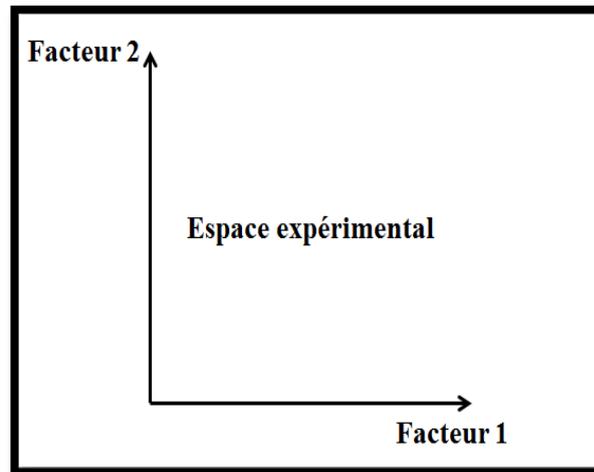


Figure II.12 : Espace expérimental.

Le niveau **X1** du facteur 1 et le niveau **X2** du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental. Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

Le regroupement des domaines des facteurs définit le «domaine d'étude». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude. Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.[12]

II.2.4.1. La réponse :

C'est la grandeur mesurée à chaque essai. Le plan vise à déterminer les facteurs influençant ou l'évolution de l'influence en fonction de ceux-ci. Cette grandeur est généralement mesurable, telle que la résistance à la compression, à l'affaissement et à l'emprisonnement d'air, mais elle peut également être qualitative, telle qu'une évaluation visuelle de l'état de surface.

II.2.4.2. Niveau d'un facteur :

La valeur que prend un facteur lors des essais, il est important d'attribuer au moins deux niveaux à chaque facteur : supérieur et inférieur. Pour les facteurs quantitatifs, la valeur est algébrique et donc numérique. Pour les facteurs qualitatifs, la valeur n'est pas mesurable, donc quelle que soit leur classification, il est important de fixer une borne inférieure et une borne supérieure (+1 et -1). Les niveaux extrêmes de chaque facteur définissent le domaine d'étude.

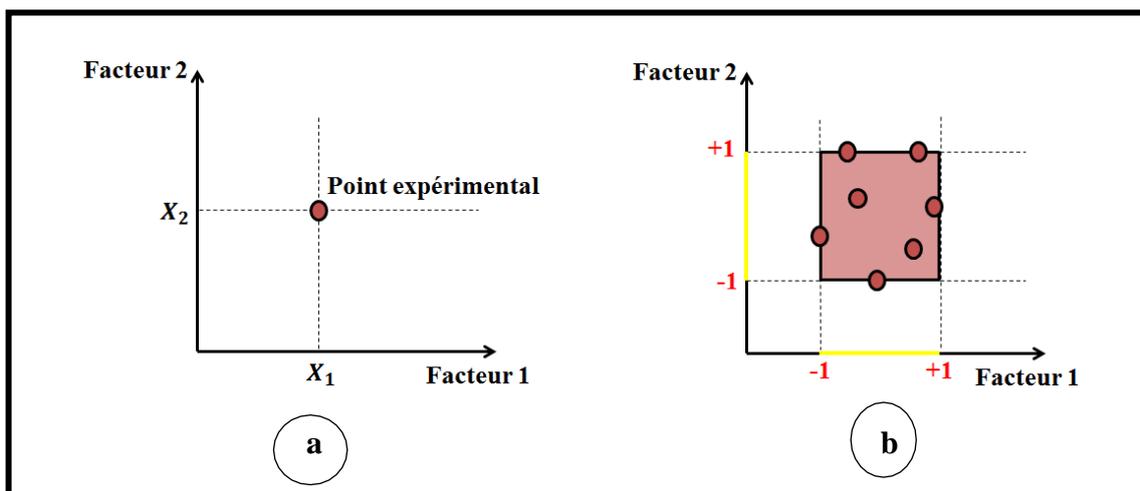


Figure II.13 : Les niveaux des facteurs définissant des points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.

Le passage des variables naturelles, aux variables codées est donné par la relation suivante :

$$X_{\text{codée}} = \frac{X_{\text{naturelle}} - X_m}{\Delta}$$

Et : $X_m = \frac{X_{\text{min}} + X_{\text{max}}}{2}$

Avec :

- $X_{\text{codée}}$: Niveau du facteur en valeur codée.
- $X_{\text{naturelle}}$: Niveau du facteur en valeur réelle.
- X_m : La moyenne.
- X_{max} : Niveau supérieur du facteur en valeur réelle.
- X_{min} : Niveau inférieur du facteur en valeur réelle.
- Δ : L'intervalle de variation.

II.2.4.3. L'effet d'un facteur :

L'effet d'un facteur [X_i] est la comparaison entre les valeurs prises par la réponse [Y] lorsque cette dernière passe du niveau (-1) au niveau (+1).

Il est caractérisé par une constante notée « E_i » qui sera :

- Positive si cette variation du facteur est favorable à l'accroissement de la réponse
- Négative si elle est favorable à la diminution de la valeur de la réponse.
- Nul si elle est sans influence sur le système.

Cette constante intervient dans le modèle mathématique décrivant cette réponse.

$$Y = M_0 + \sum_{i=1}^k (E_i X_i)$$

Avec :

- Y : Réponse prédite par le modèle.
- M_0 : La valeur de la réponse au centre du domaine d'étude.
- X_i : Le niveau attribué au facteur « i » par l'expérimentateur.
- E_i : Effet du facteur « i ».
- K : Nombre de facteurs étudiés.

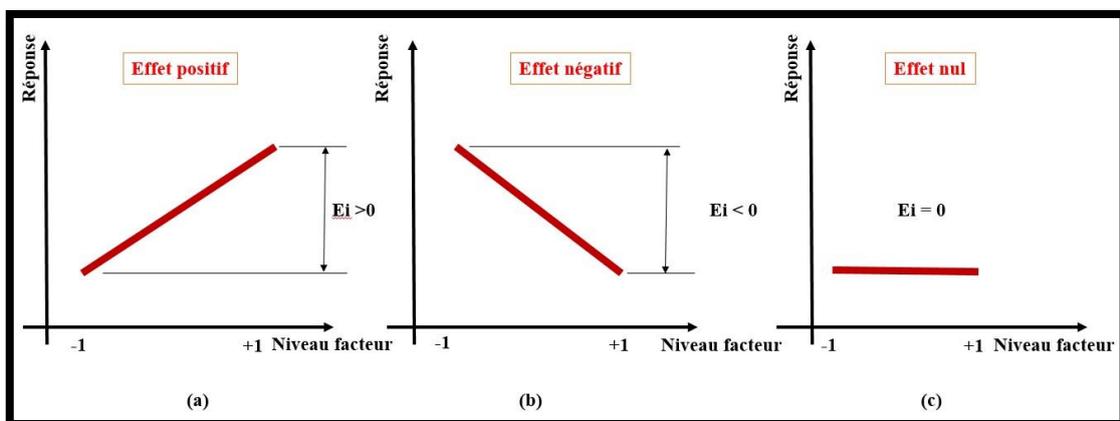


Figure II.14 : Effet d'un facteur.

II.2.4.4. Interaction :

Une notion importante est celle d'interaction entre deux facteurs d'entrées. On parle d'interaction entre deux facteurs X_i et X_j quand l'effet du facteur X_i sur la réponse va dépendre de la valeur du facteur X_j . Dans la plupart des cas, les études se limitent au premier ordre (interactions entre deux facteurs), noté « E_{ij} » l'interaction intervient dans le modèle de la manière suivante :

$$Y = M_0 + \sum_{i=1}^k (E_i X_i) + \sum_{i=1}^k (E_{ij} X_i X_j)$$

Avec :

- Y : Réponse prédite par le modèle.
- M_0 : La valeur de la réponse au centre du domaine d'étude.
- X : Le niveau attribué au facteur « i, j » par l'expérimentateur.
- E_i : Effet du facteur « i ».
- K : Nombre de facteurs étudiés.
- E_{ij} : Effet d'interaction $X_i X_j$.

II.2.5. Les différents types de plans d'expériences :

Il existe plusieurs types de plans d'expériences : les plans de mélange, les plans factoriels, les plans hybrides, les plans fractionnaires et les plans de Plackett et Burman. Pour pouvoir expliquer d'avantage cette méthode de plans d'expériences nous allons donner dans ce qui suit, quelques détails concernant les plans factoriels, les plans de mélanges et les plans hybrides.

II.2.5.1. Plan factoriels à k facteurs :

On peut augmenter le nombre de facteur. L'espace d'expérimental possède autant de dimension qu'il y a de facteurs et le modèle mathématique correspond à la relation.

II.2.5.2. Plan de MOZZO :

Les plans de MOZZO représentent deux avantages : ils sont séquentiels et le nombre de niveaux d'études est

restreint. On peut commencer par étudier deux facteurs en trois essais supplémentaires; Douze essais permettent d'étudier quatre facteurs.

II.2.5.3. Plan de Rechtschaffner :

Permettent de déterminer les effets des facteurs et les interactions d'ordre deux.

Toutes les autres interactions sont supposées nulles avant même l'expérimentation.

Il suffit de choisir un plan fractionnaire de résolution III pour obtenir un plan de Rechtschaffner. Mais l'idée de ne déterminer que les effets principaux et les interactions d'ordre deux a été étendue par Rechtschaffner au plan du second degré et aux facteurs prenant trois niveaux. Ces plans spéciaux sont indiqués dans des tables. Les plans de Rechtschaffner sont des plans factoriels fractionnaires simplifiés qui auxquelles il conviendra de référer en cas de besoin. Il y a les plans de Rechtschaffner pour seconde degré les plans de Rechtschaffner permettant d'établir un modèle du second degré sont les plans saturés. S'il y a k facteurs, il faut effectuer un nombre, n, d'essais égaux:

$$n = (1/2)*(2+3k+k^2)$$

II.2.5.4. Plan de Plackett et Burmann :

Les matrices de calculs des plans de Plackett et Burmann sont des matrices d'Hadamard. C'est-à-dire des matrices ayant 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36 lignes etc. Elles permettent donc des expériences ayant un nombre d'essais intermédiaire de celui des plans factoriels qui eux, ont seulement $2k$ lignes (4, 8, 16, 32, etc.).

Les plans de Plackett et Burmann sont les plus souvent saturés.

II.2.5.5. Plans factoriels complets :

L'étude d'un plan d'expérience complet consiste à étudier toutes les combinaisons possibles des facteurs pris en compte dans l'expérience. Ce sont les plus utilisés car ils sont les plus simples et les plus rapides à mettre en œuvre.

Dans un plan factoriel complet, toutes les expériences doivent être effectuées comme dans la méthode standard. Pour un plan factoriel complet optimal à k facteurs, il va donc falloir mener $2k$ expériences. Le principe consiste alors à répartir les essais dans le domaine expérimental de manière optimale.

II.2.5.6. Plans factoriels complets à deux niveaux :

Ces plans possèdent un nombre de niveaux limité à deux pour chaque facteur. Toutes les combinaisons de niveaux sont effectuées au cours de l'expérimentation. Ces plans peuvent être utilisés indistinctement pour les variables continues et pour les variables discrètes.

II.2.5.7. Plans à deux facteurs :

Pour deux facteurs, le domaine d'étude est un carré. Le modèle mathématique postulé est un modèle du premier degré par rapport à chaque facteur.

$$Y = M_0 + E_1X_1 + E_2X_2 + E_{12}X_1X_2 + \sigma$$

Avec :

- Y : est la réponse.
- X_1 : représente le niveau attribué au facteur 1,2.
- M_0 : est la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude.
- E_1 : est l'effet (ou effet principal) du facteur 1,2.
- E_{12} : est l'interaction entre les facteurs 1 et 2.
- σ : est l'écart type.

II.2.5.8. Plans factoriels complets à trois niveaux :

S'il y a deux facteurs prenant chacun trois niveaux, il faut exécuter 9 essais. On note ce plan (**32**). S'il y a trois facteurs prenant chacun trois niveaux plan (**33**), il faut exécuter (27 essais). En général s'il y a k facteurs prenant chacun trois niveaux, il faut exécuter (**3k** essais). Ce qui commence à faire beaucoup. C'est la raison pour laquelle il existe aussi les plans fractionnaires correspondants qui portent le nom de carrés latins.

II.2.5.9. Plans fractionnaires :

Pour les plans factoriels complets, le nombre croît de façon exponentielle ($N=nk$), à partir d'un certain nombre de facteurs et de niveaux, la charge expérimentale devient trop pénible à atteindre. Donc, une partie du plan où un plan partiel optimal est celui qui résulte d'un plan factoriel complet. Leur principal intérêt est de réduire cette charge expérimentale en se concentrant sur les effets les plus intéressants sans compromettre l'efficacité du schéma.

1. Plans fractionnaires (2^{k-p}) :

Ce plan consiste à utiliser pour l'étude de « k » facteurs la matrice d'effet d'un plan factoriel complet 2^k-1 , 2^k-2 , 2^k-3 ... Ce qui permet de réduire le nombre d'essais par 2^p . Nous remarquons que pour un plan factoriel complet les interactions d'ordre deux et plus sont le plus souvent négligeables. L'astuce est que les interactions les moins influentes sont remplacées par les facteurs « k - p » et « k », en suivant leurs mêmes alternances de signes. Le plan obtenu est dit fractionnaire (2^k-p).

II.2.5.10. Plans de mélange :

Un plan de mélange est une forme particulière d'un plan factoriel complet. Les propriétés d'un mélange dépendent généralement de sa composition et il est fréquent que l'on veuille traduire les variations d'une propriété en fonction de la concentration des divers constituants. C'est le cas du triangle de Féret ou l'on souhaite déterminer la compacité en tout point, caractérisée par les proportions du mélange qu'il représente. [13]

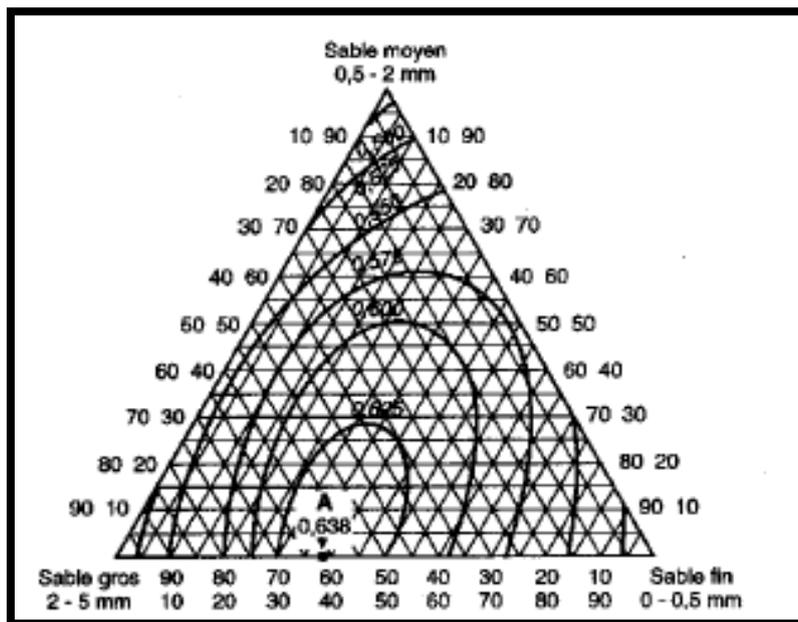


Figure II.15 : Triangle de Féret. [14]

Les sommets du triangle représentent chacun des facteurs. Les courbes d'iso-compacité sont représentées ici et la compacité maximale est obtenue.

II.2.5.11. Les plans hybrides :

Le but des plans hybrides est d'essayer d'approcher de deux critères optimaux, à savoir le critère d'orthogonalité et d'invariance rotationnelle. L'orthogonalité garantit la meilleure précision possible des coefficients du modèle, et l'iso variance pour chaque rotation entraîne la même erreur de prédiction à la même distance du centre du domaine. Si l'expérimentateur recherche les deux propriétés, il devrait envisager d'utiliser un plan hybride.

Les plans hybrides sont désignés comme suit : d'abord le nombre de facteurs, puis le nombre de points expérimentaux dont un seul point central, et enfin une lettre pour distinguer deux plans ayant le même nombre de facteurs et le même nombre de points expérimentaux.

II.2.6. Surface de réponse :

Chaque point du domaine de recherche correspond à une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se situent sur une surface appelée surface de réponse.

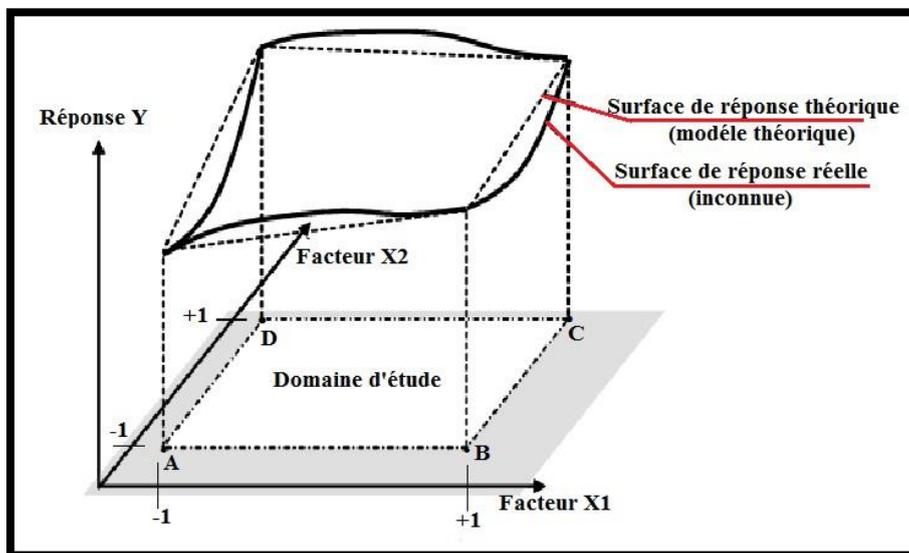


Figure II.16 : Surface de réponse tridimensionnelle.

Généralement, seules quelques réponses sont connues, c'est-à-dire celles correspondant à des points expérimentaux réservés par l'expérimentateur. Interpoler la réponse inconnue à l'aide d'un modèle mathématique pour obtenir une surface de réponse. Les points empiriques retenus par la conception de la théorie empirique garantissent que la forme et l'emplacement de la surface de réponse sont aussi précis que possible.

II.3. Conclusion :

Dans ce chapitre la méthode des plans d'expériences a été présentée en mettant l'accent sur les plans les plus spécifiques qui ont été utilisés pendant ce projet : il existe deux grandes familles de plans qui permettent de résoudre des problèmes différents, étudier les effets de différents paramètres sur un critère au moyen des plans factoriels fractionnaires et chercher un jeu de paramètres optimum pour un critère grâce à la surface de la réponse.

Cette méthodologie a été présentée pour l'étude d'un critère unique mais peut être généralisée à l'étude de plusieurs objectifs au moyen de la notion de désirabilité qui permet de réaliser des études multicritères avec ce même outil.

Les plans d'expériences offrent un simple et efficace de réduire le coût et d'augmenter la robustesse des études expérimentales effectuées lors de la conception ou de la variation d'un produit. Ils permettent d'utiliser toute la connaissance du produit dont le concepteur peut disposer a priori, offrent un cadre de modélisation rigoureux, et leur mise en œuvre ne nécessite que des connaissances mathématiques élémentaires.

Chapitre III

Préparation de l'étude et équipements utilisés

III.1. Introduction du chapitre

Dans ce chapitre, nous présentons l'essentiel des moyens exploités pour la réalisation des expériences à fin de caractériser le comportement du couple (outil-matière). Cela consiste à présenter les équipements utilisés qui servent à la détermination de l'effort de coupe généré, à travers la puissance absorbée de coupe ainsi que la rugosité de surface obtenue lors des essais.

On présente aussi la démarche utilisée pour réaliser les expériences et exploiter les résultats.

Le principe général du plan d'expérience consiste à étudier que certains points du domaine expérimental et cette méthode aide à améliorer la qualité des produits et des procédés, réduction du temps et de coûts de production.

En fin ce chapitre présente le logiciel (Stastica) pour les données statistiques et résultats des expériences.

III.2 Procédure expérimentale :**III.2.1 Moyens utilisés :****III.2.1.1 Matériaux à usiner :**

Au cours de ces expériences, nous avons utilisé trois types de matériaux différents (acier dur, mi-dur et doux), dont les dimensions sont :

Pour l'acier 1 :

- Longueur : 140 mm.
- Largeur : 40 mm.

Pour l'acier 2 :

- Longueur : 80 mm.
- Largeur : 40 mm.

Pour l'acier 3 :

- Longueur : 80 mm.
- Largeur : 40 mm.

La composition chimique de chaque acier est résumée dans ces tableaux suivants :

Tableau 4 : Composition chimique de l'acier XC 38.

XC 38	Hv (0.5)	C	Mn	Si	Traitements		
(Acier non allié spécial pour traitement thermique).	236	0.38	0.7	0.3	R (recuit) : 860 °C	RV (revenu) : 550 °C	TE (trempé à l'eau) : 850 °C

Tableau 5 : Composition chimique de l'acier XC 48.

XC 48	Hv (0.5)	C	Mn	Si	Traitements		
(Acier non allié).	330	0.48	0.7	0.3	R (recuit) : 855 °C	RV (revenu) : 550 °C	TH (trempé à l'huile) : -830 °C

Tableau 6 : Composition chimique de l'acier 25 CD 4.

25 CD 4	Hv (0.5)	C	Mo	Cr	TH
acier allié trempant ordinaire.	436	0.25	0.3	1	850 °C

III.2.1.2. Mesure de la dureté :

La dureté est déterminée par la mesure de la profondeur de pénétration du pénétrateur ou en mesurant la taille de l'empreinte qu'il laisse.

Après la préparation de trois aciers, les diverses mesures de dureté ont été réalisées sur l'appareil de contrôle de dureté de type : Qness 250 CS au niveau du hall technologie de l'université de Bejaia.



Figure III.17: Duromètre type Qness 250 CS.

Les résultats sont répertoriés dans le tableau suivant :

Tableau 7 : Dureté Vickers Hv 0.5.

Matériaux	Acier 1 XC 38	Acier 2 XC 48	Acier 3 25 CD 4
Dureté Hv 0.5	236	330	436

III.2.1.3 Préparation des échantillons :

Dimensions de chaque échantillon

Pour l'acier 1 : XC 38.

- Longueur : 140 mm.
- Largeur : 40 mm.

Pour l'acier 2 : XC 48.

- Longueur : 80 mm.
- Largeur : 40 mm.

Pour l'acier 3 : 25 CD 4.

- Longueur : 80 mm.
- Largeur : 40 mm.



Figure III.18 : Scie à métaux mécanique.

III.2.1.4. Machine-outil :**a) Description de la fraiseuse utilisée au niveau du hall technologie :**

La FH 1.6 est une machine à console à commande automatique des déplacements de la table, une machine outil pour usiner tous types de pièces par enlèvement de matière à partir de bloc ou parfois d'ébauche estampé à l'aide d'un outil coupant nommé la fraise.

La broche est entraînée par un moteur frein et au moyen d'un engrenage baladeur à 12 vitesses, sur les extrémités de la table et la partie supérieure du moteur se trouve des amortisseurs de vibrations pour éviter le broutage causé par les outils en prise.

Les déplacements de la table, de la console et du chariot transversal sont effectués par des vis-mères à filet. L'entraînement de la vis de table longitudinale se fait à l'aide d'un engrenage baladeur à 18 vitesses, commandé manuellement.

Le socle sert de bac à liquide d'arrosage. De large, un bac est à sort est prévu sur le socle et au niveau du chariot transversal.



Figure III.19 : Fraiseuse universelle Almo.

III.2.1.5. Outil de coupe utilisé

Une fraise de type à queue cylindrique utilisée comme outil de coupe, ses caractéristiques sont représentées dans le tableau suivant.

Tableau 8 : caractéristiques de la fraise utilisée.

Type de fraise :	Fraise à plaquettes en carbure amovibles.
Nombre de dents :	6 dents (plaquettes amovibles).
Dimension :	Une fraise de diamètre : 120 mm.
Mode de fixation :	Fraise à queue cylindrique.



Figure III.20 : Outil de coupe.

III.2.1.6 Montage utilisé sur la machine :

Au cours de nos expériences, nous avons choisi le montage sur étau métallique.



Figure III.21 : Le montage sur étau métallique.

III.2.1.7. La lubrification :

Durant nos expériences, nous avons utilisé **NAFTAL TASFALOUT 31T** comme un liquide d'arrosage.

III.2.1.8. Mesure de la puissance de coupe :

Au cours de chaque passe d'usinage, la valeur de la puissance absorbée de coupe a été relevée (exprimée en watts) en utilisant un wattmètre électrique d'un système triphasé de type : **PEAK METER (MS2203EX)**. "Intensité maxi : **1000A** ; Tension maxi : **600V** ; Puissance absorbée maxi : **600Kw**".

La figure suivante présente l'appareil et le montage suivi.

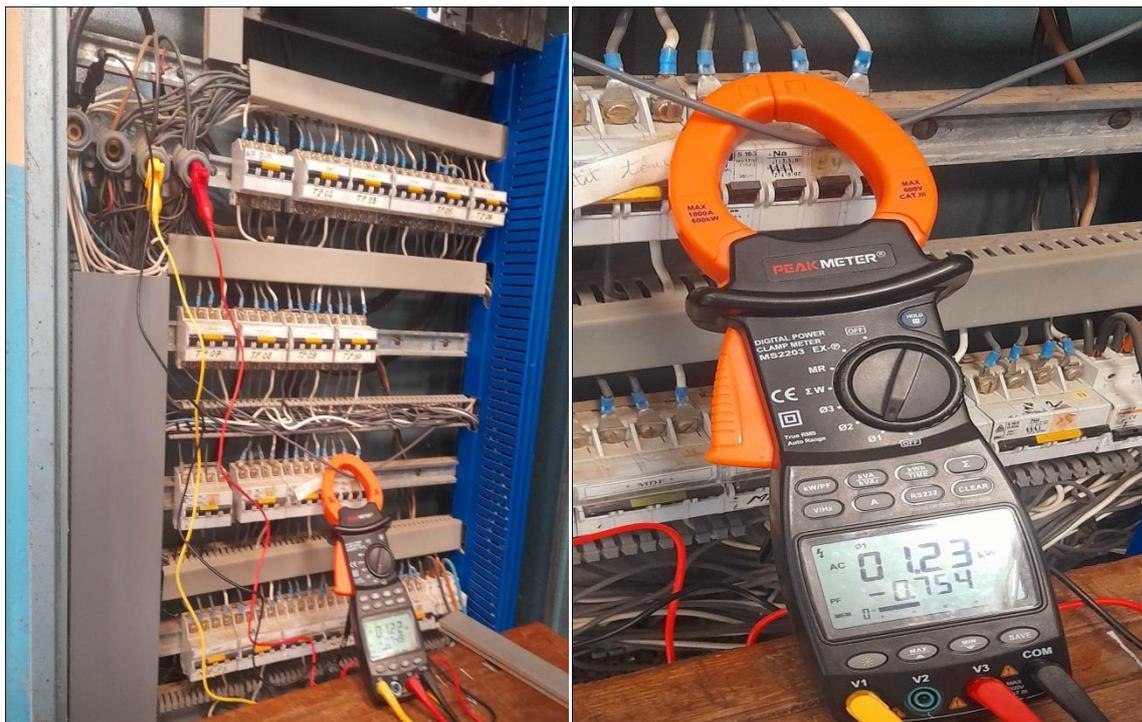


Figure III.22 : Ampérométrie sans fil numérique PEAK METER MS2203EX.



Figure III.23 : Ampérométrie sans fil numérique PEAK METER MS2203EX.

III.2.1.9. Mesure de la rugosité :

Afin d'évaluer la qualité de surface usinée, après chaque essai, en mesurant la moyenne arithmétique du profil de rugosité, notée **Ra**, à l'aide d'un profil-mètre de marque (LITE SURF), disponible au hall technologie à l'université de A.Mira de Bejaia.

Le contrôle est effectué à chaque fois sur une longueur de 20.1 mm et selon la direction parallèle à l'avance de l'outil de coupe.

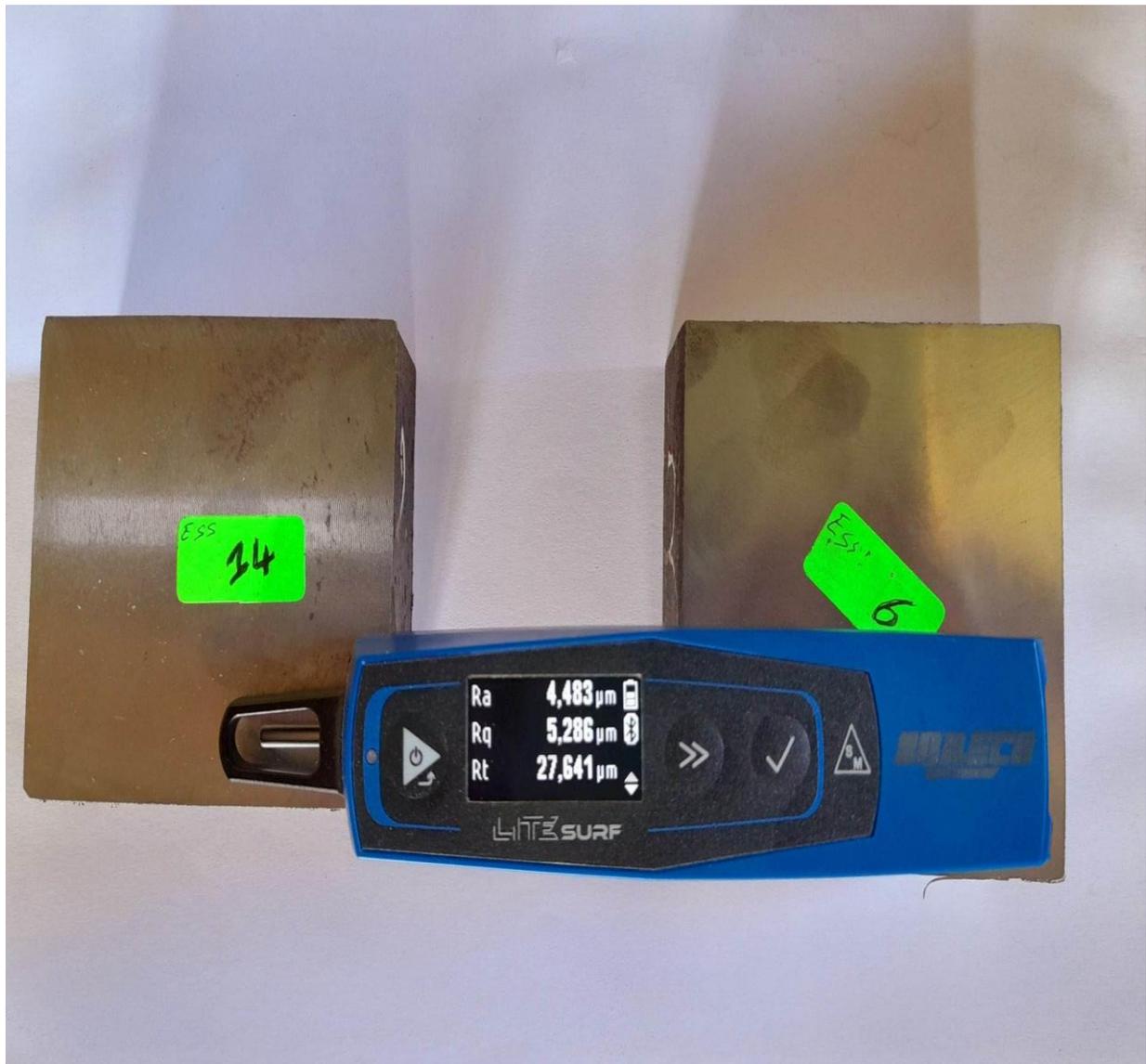


Figure III.24 : Profil-mètre LITE SURF.

III.2.2. Conditions expérimentales :

De la littérature et des études antérieures, l'effet de chaque paramètre sur l'effort de coupe, la puissance de coupe et sur la rugosité est connu. Pour cela, nous avons choisi les paramètres suivants :

Tableau 9 : Variation des conditions de coupe.

Code	Condition d'usinage (facteur)	unités	Niveau -1	Niveau 0	Niveau 1	Intervalle de variation
X1	La dureté	Hv	236	330	436	106
X2	L'avance(F)	mm/min	0.03	0.09	0.15	0.06
X3	Vitesse de coupe (Vc)	m/min	60	90	120	30
X4	ap=la profondeur de passe.	ap=mm	0.5	1	1.5	0.5

III.3. Plan utilisé pour la méthode multifactorielle :

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation des procédés des systèmes complexes. La stratégie de recherche expérimentale consiste d'abord à déterminer le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs.

Dans notre étude, nous avons considéré l'effet de quatre facteurs (**HV**, **f**, **Vc** et **ap**) sur diverses fonctions d'optimisation (puissance de coupe, efforts de coupe et rugosité) à trois niveaux de variation : un niveau supérieur (+1), un niveau moyen (0) et un niveau inférieur (-1). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante : $N=4^3=64$ (64 essais pour un plan factoriel complet). La technique des plans d'expériences réduit considérablement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés en détectant les interactions entre les facteurs à la réponse (c'est à dire une grandeur utilisée comme critère et en permettant de modéliser facilement les résultats).

Par conséquent, la clé de l'utilisation d'un plan expérimental est de minimiser le nombre d'expériences à effectuer sans sacrifier la précision des résultats.

Dans ce travail le plan expérimental utilisé est le plan optimal **B4** avec **24** essais :

Tableau 10 : Planification des expériences.

Essais	X1	X2	X3	X4
1	+1	+1	+1	+1
2	+1	+1	+1	-1
3	+1	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	-1
5	+1	-1	+1	+1
6	+1	-1	+1	-1
7	+1	-1	-1	+1
8	+1	-1	-1	-1
9	-1	+1	+1	+1
10	-1	+1	+1	-1
11	-1	+1	-1	+1
12	-1	+1	-1	-1

Essais	X1	X2	X3	X4
13	-1	-1	+1	+1
14	-1	-1	+1	-1
15	-1	-1	-1	+1
16	-1	-1	-1	-1
17	+1	0	0	0
18	-1	0	0	0
19	0	+1	0	0
20	0	-1	0	0
21	0	0	+1	0
22	0	0	-1	0
23	0	0	0	+1
24	0	0	0	-1

III.4. Notions de statistique appliquée aux plans d'expériences :

III.4.1. Erreur expérimentale :

En général, on prend la moyenne arithmétique comme valeur centrale et l'écart-type comme mesure de la dispersion.

III.4.2. Moyenne :

Par définition, la moyenne arithmétique d'un ensemble de valeurs est la somme de toutes les valeurs divisée par le nombre de valeurs.

III.4.3. Écart- type :

La définition de l'écart-type est un peu moins simple que celle de la moyenne. Nous allons décrire son calcul pas à pas :

- On commence par calculer les écarts à la moyenne, c'est-à-dire la différence entre chaque valeur et la moyenne.
- La variance est la somme des carrés des écarts à la moyenne divisée par le nombre de valeurs moins 1.
- Enfin l'écart-type est obtenu en prenant la racine carrée de la variance.

III.4.4. Analyse de la variance :

L'analyse de la variance consiste à rechercher les sources de variation des réponses. On suppose que les réponses ont été calculées avec le modèle postulé.

$$y = f(\mathbf{X1}, \mathbf{X2}, \dots, \mathbf{Xn}) + \mathbf{e}$$

En utilisant la méthode des moindres carrés c'est-à-dire en minimisant la somme des carrés des écarts. Dans ce cas, les réponses calculées s'écrivent \hat{Y} et les écarts e prennent des valeurs particulières r_i qui s'appellent les résidus. Les résidus sont donc des valeurs particulières des écarts. On a :

$$\hat{Y} = f(\mathbf{X1}, \mathbf{X2}, \dots, \mathbf{Xn})$$

Avec ces nouvelles notations, la relation donnant la réponse peut s'écrire :

$$y = \hat{Y} + r_i$$

III.4.5. Coefficient de détermination (R^2) :

L'analyse de la variance permet de calculer une statistique très utile : le R^2 ou R carré.

Cette statistique est le rapport de la somme des carrés des réponses calculées (corrigées de la moyenne) à la somme des carrés des réponses mesurées (corrigées de la moyenne) :

$$R^2 = \frac{\text{somme des carrés des réponses calculées corrigées de la moyenne}}{\text{somme des carrés des réponses mesurées corrigées de la moyenne}}$$

Si le modèle permet de retrouver exactement la valeur des réponses mesurées, la somme des carrés des réponses calculées est égale à la somme des carrés des réponses mesurées. Le

(R^2) est égal à 1.

Si le modèle fournit des réponses calculées égales à la moyenne, la somme des carrés des réponses calculées est égale à 0. Le (R^2) est égal à 0. On dit que le modèle n'a pas de puissance d'explication.

- Le (R^2) est donc une mesure de la qualité du modèle. S'il est égal à 1, le modèle permet de retrouver la valeur des réponses mesurées. S'il est égal à 0, le modèle n'en dit pas plus que la moyenne des réponses.
- Le (R^2) joue véritablement son rôle d'indicateur de la qualité du modèle à condition que les résidus ne soient pas nuls. Si les résidus sont nuls, le (R^2) est égal à 1 quelle que soit la qualité du modèle. On observe un tel cas lorsqu'il n'y a pas de degrés de liberté. Le (R^2) est donc un bon indicateur de la qualité du modèle s'il y a plus de points expérimentaux différents que de coefficients dans le modèle postulé.

III.4.6. Coefficient de détermination ajusté R^2 ajusté :

Le R au carré ajusté (ou coefficient de détermination ajusté) est utilisé dans une régression multiple pour voir le degré d'intensité ou d'efficacité des variables indépendantes pour expliquer la variable dépendante. En termes plus simples, le R au carré ajusté nous indique quel pourcentage de la variation de la variable dépendante est expliqué collectivement par toutes les variables indépendantes.

III.4.7. Résidus :

C'est la différence entre la réponse mesurée et la réponse calculée.

III.4.8. P-value :

La P-value est la probabilité qu'un coefficient soit négligeable. On calcule cette P-value à partir du rapport du coefficient à son écart-type (test de Student). La probabilité d'acceptation des coefficients à une p-value de 0,10.

III.4.9. Fisher :

Le F de Fisher qui est le rapport du carré moyen du modèle à celui des résidus. Ce rapport permet de calculer la probabilité que ces deux carrés ne soient pas égaux. En d'autres termes, si le F de Fisher est élevé (faible probabilité que le modèle soit celui de la moyenne), les variations des réponses mesurées sont bien dues aux variations des facteurs. Si le F de Fisher

est proche de **1** (forte probabilité que le modèle soit celui de la moyenne), les variations des réponses mesurées sont comparables à celles des résidus.

III.4.10. Test de Student :

La statistique **t** permet de tester l'hypothèse (nulle) selon laquelle la valeur des coefficients de régression ne sont pas significativement différents de **0** (en d'autres termes, qu'il existe bien une relation entre la variable dépendante et la variable indépendante en question). La valeur que doit atteindre le test de Student pour que l'on puisse rejeter l'hypothèse nulle dépend du nombre d'observations et du niveau de confiance recherché (de **90%** à **99%** en général). En pratique, la valeur critique oscille le plus souvent autour de **2**.

III.5. Présentation du logiciel STATISTICA:

STATISTICA est un portefeuille de logiciels qui offre la gestion des données, l'analyse des données, l'exploration de données et des solutions de visualisation de données. Il est un puissant programme avec des recettes intégrées, des assistants et smartes et peut accéder aux données de presque tous les formats de fichiers.



Figure III.25 : Logiciel Statistica version 10.

III.5.1. Philosophie Générale de l'Approche de STATISTICA :

La configuration par défaut de STATISTICA (les options générales de l'interface-utilisateur et du système) est l'aboutissement de nombreuses années passées à écouter les remarques et suggestions de nos utilisateurs. Plusieurs dizaines de milliers d'utilisateurs, issus de tous les continents et d'horizons professionnels différents, nous ont fait part de leurs remarques.

Le premier enseignement à tirer de tous ces commentaires est combien leurs besoins et leurs préférences sont différents. Pour répondre à tous ces besoins, STATISTICA s'est sans doute doté de l'interface-utilisateur la plus souple et la plus facilement personnalisable qu'aucune autre application actuellement disponible.

Bien que STATISTICA donne accès à un puissant arsenal de technologies, vous n'avez pas besoin de maîtriser ces technologies car elles ont été intégrées pour travailler de manière automatique et intuitive. Un utilisateur néophyte pourra se contenter d'utiliser les options par défaut. Mais les options plus avancées sont aisément accessibles dans des onglets ou par un simple clic. Pratiquement tous les aspects de STATISTICA (la configuration de départ...) peuvent être modifiés d'un simple clic. En outre, STATISTICA mémorise vos modifications jusqu'au moment où vous décidez de les annuler. La plupart des boîtes de dialogues utilisées pour spécifier une analyse ou réaliser une tâche routinière peuvent être facilement remplacées (par exemple, simplifiées, améliorées, ou combinées avec des procédures mises au point par les utilisateurs).

III.5.2. Spécificités :

Parmi les fonctionnalités exclusives de la gamme de produits **STATISTICA**, vous apprécierez :

Le choix et la richesse des procédures analytiques proposées, La gamme incomparable, la qualité et les possibilités de personnalisation des graphiques, intégrés de façon automatique à toutes les procédures de calcul, L'utilisation d'un grand nombre de nouvelles technologies informatiques de pointe (voir le paragraphe Technologie du Logiciel), qui sont l'origine des capacités quasi-illimitées de STATISTICA, de ses performances (rapidité, précision), et de ses possibilités étendues de personnalisation.

III.5.3. Fonctions Analytiques :

STATISTICA comprend non seulement des procédures généralistes pour les statistiques, les graphiques, et la gestion analytique des données, mais également un ensemble complet de méthodes spécialisées pour l'analyse des données (par exemple, pour des applications de data mining, ou autres applications commerciales, de sciences sociales, de recherche biomédicale, ou d'ingénierie). Tous les outils analytiques des produits de la gamme STATISTICA se présentent sous la forme d'un logiciel intégré. Ces outils peuvent être pilotés au travers de

diverses interfaces-utilisateur et d'un langage de programmation complet et universel (basé sur Visual Basic). Vous pouvez aisément personnaliser les interfaces-utilisateur et le langage (STATISTICA Visual Basic) vous permet d'automatiser vos tâches, quelle qu'en soit la complexité (des plus simples comme l'enregistrement de macros pour automatiser des opérations routinières, aux plus complexes comme la prise en charge de projets de grande envergure (par exemple, des extensions analytiques personnalisées intégrant STATISTICA à d'autres applications ou environnements, informatiques).

III.6. Conclusion

Les plans d'expériences sont un moyen efficace pour les études expérimentaux lors d'une conception ou la variation d'un produit.

Ils permettent d'acquérir de nouvelles connaissances en maîtrisant un ou plusieurs paramètres d'entrées, pour obtenir des résultats validant un modèle avec une bonne économie de moyens.

Dans ce chapitre nous avons présenté les équipements et les moyens utilisés dans notre projet (machine-outil, microscopie, wattmètre, duromètre, etc.) ainsi que les plans d'expériences choisis.

Nous avons défini les paramètres (variables) et leurs niveaux de variation ainsi que les réponses (puissance de coupe et l'état de surface, rugosité).

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1 Introduction :

Les essais de mise au point d'un produit ou d'un processus font partie intégrante du métier des ingénieurs. Ceux-ci sont souvent amenés à rechercher des valeurs des paramètres qui définissent les produits ou les paramètres de réglage des moyens de production afin d'obtenir les performances désirées.

Pour cela on utilise les techniques d'optimisation tel que les plans d'expériences qui est une suite d'essais entièrement organisée à l'avance de manière à déterminer, en un minimum d'essais et un maximum de précision, l'influence des différents paramètres possibles, pour optimiser les performances du système étudié. Les tables optimisées permettent une réduction considérable du temps et des ressources nécessaires pour réduire la variabilité de la réponse par rapport au plan d'expériences traditionnel.

Ce chapitre décrit les conditions et les procédures adoptées pour élaborer un modèle mathématique optimal représentant la relation de causalité entre la puissance absorbée **P**, la puissance de coupe **P_c**, l'effort de coupe **F_c**, la rugosité de surface **R_a** et les conditions de coupe. Les résultats atteints sont présentés et discutés.

IV.2 Choix d'un modèle :

La méthode des plans d'expériences repose essentiellement sur la création et l'exploitation de modèles de la fonction objective (réponse), tout en fournissant au moins un essai pour chaque combinaison de facteur. Il est donc naturel d'analyser dans les détails de cette composante primordiale, tout simplement par ce qu'elle permet une interprétation rapide.

Dans cette partie, on applique la méthode des plans d'expériences pour étudier le comportement des paramètres de coupe (un plan d'expérience optimal **B4** (présenté au chapitre **III**)) à **24** essais a été choisi de telle manière à assurer une meilleure précision des résultats.

Dans notre étude, on prend en considération quatre facteurs qui sont : la dureté (**HV**), l'avance (**F**), la vitesse de coupe (**Vc**) et la profondeur de passe (**ap**) comme des variables indépendantes, ce sont elles qui sont reliées à la réponse (variables dépendantes) par une équation de prédiction. Le diagramme expérimental ci-dessous représente tout ça :

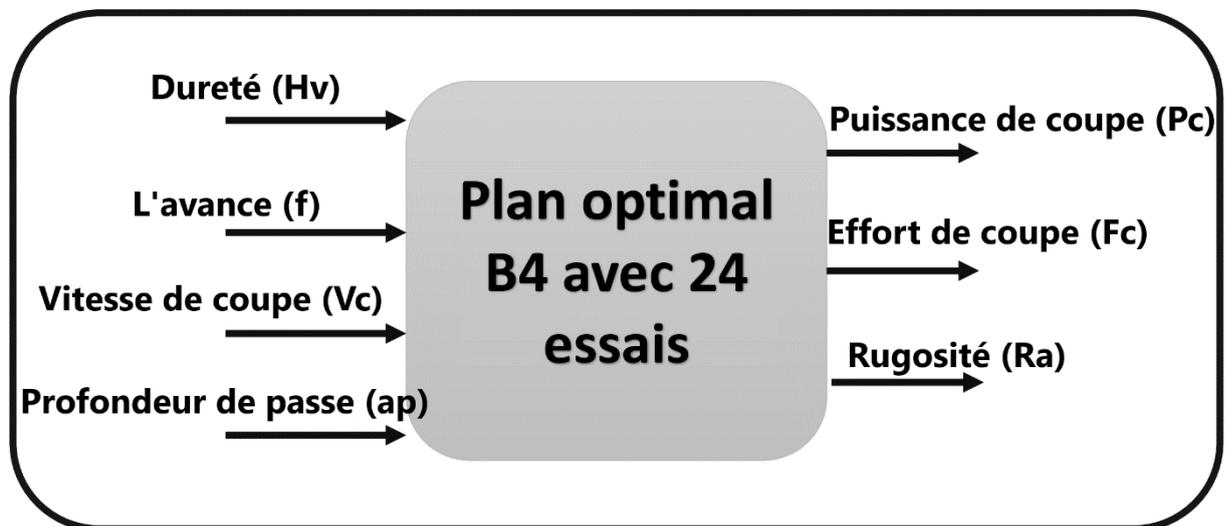


Figure IV. 1 : Diagramme expérimental.

IV.3 Résultats statistiques :

Un ensemble de **24 essais** a été fait et les résultats expérimentaux sont donnés dans le **tableau IV. 1**. Les traitements de données statistiques sont effectués en utilisant Multiple

régression (STATISTICA) et l'effet de chaque facteur et de ses interactions sont déterminés.

Tableau IV. 1 : Résultats expérimentaux.

Essais	X1	X2	X3	X4	P0	P	Pc	Fc	Ra
1	+1	+1	+1	+1	410	3650	1620	3240	15,8040
2	+1	+1	+1	-1	410	1300	445	890	10,4786
3	+1	+1	-1	+1	380	3440	3060	3060	27,6240
4	+1	+1	-1	-1	380	1360	980	980	6,3740
5	+1	-1	+1	+1	410	1210	400	800	0,5680
6	+1	-1	+1	-1	400	850	225	450	1,8543
7	+1	-1	-1	+1	360	1830	1470	1470	8,8685
8	+1	-1	-1	-1	360	1020	660	660	16,0070
9	-1	+1	+1	+1	1210	3000	895	1790	10,1346
10	-1	+1	+1	-1	1210	2700	745	1490	7,0930
11	-1	+1	-1	+1	700	1140	440	440	3,2690
12	-1	+1	-1	-1	700	1400	700	700	10,8016
13	-1	-1	+1	+1	710	1550	420	840	6,4130
14	-1	-1	+1	-1	710	1670	480	960	4,4596
15	-1	-1	-1	+1	700	1500	800	800	6,8986
16	-1	-1	-1	-1	700	1620	920	920	7,3910
17	+1	0	0	0	400	1650	833,33	1250	14,987
18	-1	0	0	0	410	1720	873,33	1310	6,7500
19	0	+1	0	0	720	1140	280	420	9,6373
20	0	-1	0	0	720	1350	420	630	3,6290
21	0	0	+1	0	710	1320	305	610	4,0400

22	0	0	-1	0	750	1140	390	390	6,4486
23	0	0	0	+1	730	1250	346,66	520	4,6020
24	0	0	0	-1	730	1310	386,66	580	4,4290

Avec :

- **X1** : Dureté Hv.
- **X2** : L'avance (mm/min).
- **X3** : Vitesse de coupe Vc (m/min).
- **X4** : La profondeur de passe (mm).
- **P0** : La puissance à vide (watt).
- **Pc** : La puissance de coupe (watt).
- **P** : La puissance absorbée (watt).
- **Fc** : L'effort de coupe (N).
- **La rugosité arithmétique (µm).**

Avant de commencer l'usinage, nous avons mesuré la puissance à vide (**P0**). La puissance absorbée pendant l'usinage (**P**) est également mesurée. D'après ces deux mesures nous avons calculé la puissance de coupe (**Pc**) à l'aide de la formule suivante : **Pc=P-P0**.

Et l'effort de coupe (**Fc**) est calculé selon l'équation donnée au **chapitre II**.

IV.4 Analyse de régression :

L'analyse de régression est utilisée pour la modélisation et l'analyse de plusieurs variables où il y a une relation entre une variable dépendante et un ou plusieurs variables indépendantes. Dans notre étude, les variables dépendantes sont la puissance de coupe (**Pc**), la puissance absorbée (**P**), l'effort tangentiel (**Fc**) et la rugosité (**Ra**), alors que les variables indépendantes sont la dureté (**Hv**), l'avance (**F**), la vitesse de coupe (**Vc**) et la Profondeur de passe (**ap**).

Pour l'obtention des modèles prédictifs de la puissance absorbée, la puissance de coupe, de l'effort de coupe et de la rugosité, l'équation de régression linéaire suivante a été utilisée :

$$Y = b_0 + \sum_{k=1}^k (b_k X_k) + \sum_{k=1}^k \sum_{j=1}^k (b_{kj} X_k X_j) + \sum_{k=1}^k \sum_{j=1}^k \sum_{w=1}^k (b_{kjw} X_k X_j X_w) + \sum_{k=1}^k (b_{kk} X_k^2)$$

Avec :

 $i=1$ $i=1$ $i=1$ $i=1$

- **Y** : La réponse.
- **b₀** : La valeur de la réponse au centre du domaine d'étude.
- **X_{i,j}** : Le niveau attribué au facteur i, j.
- **b_{i,j}** : L'effet du facteur i, j.
- **b_{ij}** : L'interaction entre les facteurs i et j.
- **b_{ijw}** : L'interaction entre les facteurs i et j et w.

IV.4.1 Les résultats :

IV.4.1.1 Pour la puissance absorbée :

Les significations statistiques des modèles ajustés ont été évaluées par les **P-values** de l'analyse de régression. Les valeurs sont données dans les tableaux **IV.2** et **IV.3**. Lorsque les **P-values** sont inférieures à **0,05** (ou **95%** confiance "niveau de signification"), les modèles obtenus sont considérés comme statistiquement significatifs (les valeurs en rouge). Elle démontre que les termes choisis dans le modèle ont des effets significatifs sur les réponses.

L'autre coefficient important est le coefficient de détermination **R²** qui est une mesure du degré d'ajustement du modèle. Lorsque **R²** se rapproche de l'unité, meilleure est la réponse du modèle qui correspond aux données réelles.

Le test de Fisher-Snedecor **F** avec (**F (15, 8)**) le chiffre **15** représente le degré de liberté d'un modèle et le chiffre **8** représente l'erreur expérimentale. Ce test nous permet d'avoir est-ce que le modèle est significatif ou pas.

Tableau IV. 2 : L'analyse de la variance.

Statistique	Value
Multiple R	0,96744759
Multiple R ²	0,93595485
R ² ajusté	0,70539229
F(15,8)	4,05943992
P	0,06375101
Estimation de l'erreur de t Student	404,866853

N° essai= 24		b*	Err Std.b*	B	Err Std.b	t(8)	P-value
Moyenne				545,625	195,9148	2,78501	0,021226
F	X2	0,361069	0,114403	304,444	96,4618	3,15611	0,011623
ap	X4	0,351186	0,114403	296,111	96,4618	3,06972	0,01336
Hv*ap	X1*X4	0,271854	0,114403	243,125	102,3132	2,37628	0,04148
Hv ²	X1 ²	0,404636	0,114403	361,875	102,3132	3,53693	0,006345
F ²	X2 ²	0,435482	0,152686	734,375	257,4825	2,85214	0,019023
Vc ²	X3 ²	-0,012231	0,152686	-20,625	257,4825	-0,0801	0,937909
ap ²	X4 ²	-0,027055	0,152686	-45,625	257,4825	-0,1772	0,863278
F*Vc*ap	X2*X3*X4	0,002594	0,152686	4,375	257,4825	0,01699	0,986814
Hv*F*Vc*ap	X1*X2*X3*X4	0,211753	0,114403	189,375	102,3132	1,85093	0,097206
Hv*F*ap	X1*X2*X4	0,248093	0,114403	221,875	102,3132	2,16859	0,058247
Hv*F*Vc	X1*X2*X3	0,025858	0,114403	23,125	102,3132	0,22602	0,826234
Vc*ap	X3*X4	-0,210355	0,114403	-188,125	102,3132	-1,83872	0,099113
F*ap	X2*X4	0,108716	0,114403	91,667	96,4618	0,95029	0,366784
F*Vc	X2*X3	0,233904	0,114403	197,222	96,4618	2,04456	0,071237
Hv	X1	-0,210793	0,291551	-1,51989	2,102185	-0,72300	0,490272

Tableau IV. 3 : Importance des coefficients du modèle.

Avec :

- **b*** : Bêta standardisé.
- **Err std. b*** : Erreur type de bêta.
- **b** : Effet des facteurs sur la réponse.
- **Err std. b** : Erreur type de b.

($F(15,8)=4.06$; $p<0.001$) : le model de régression est significatif.

→ L'avance **F**, la profondeur de passe **ap**, **Hv*ap** et **Hv²** et **F²** prédisent significativement la puissance absorbée.

R² : coefficient de détermination :

→ **R²=0.94** : l'ensemble de ces quatre variables expliquent **94%** de la variance de la puissance absorbée.

b* : Bêta standardisé :

- **(b* de l'avance (Vc)= 0.36 ; t(8)=3.16 ; p<0.001)** : l'avance un impact significatif sur la puissance absorbée.
- **(b* de la profondeur de passe (ap)= 0.35 ; t(8)=3.07 ; p<0.001)** : la profondeur de passe un impact significatif sur la puissance absorbée.
- **(b* de (F²)= 0.44 ; t(8)=2.85 ; p<0.05)** : (F²) a un impact significatif sur la puissance absorbée.

L'analyse initiale des réponses obtenues inclut tous les paramètres et leurs interactions. Les modèles sont réduits en éliminant les termes n'ayant aucun effet significatif sur les réponses (Quelques valeurs en noir ayant un niveau inférieur à l'intervalle de confiance sont négligeables et ne sont pas pris en compte). Après élimination de tous les facteurs non significatifs, la puissance absorbée est donc exprimée par le modèle suivant :

$$\begin{aligned}
 P = & 545.6 + 3045.4 X_2 + 296.1 X_4 + 243.1 X_1 * X_4 + 361.87 X_1^2 + 734.37 X_2^2 + \\
 & 189.37 X_1 * X_2 * X_3 + 221.87 X_1 * X_2 * X_4 + 197.2 X_2 * X_3 + 91.66 X_2 * X_4 + \\
 & 23.1 X_1 * X_2 * X_3
 \end{aligned}$$

Pour $X_3 = -1$ et $X_4 = 0$, la puissance absorbée (**P**) est minimisée.

1) **Les graphes des effets des facteurs et les surfaces de réponses obtenues :**

Pour visualiser l'influence des facteurs sur la puissance absorbée (**P**), les graphes des effets et les surfaces de réponse (**3D**) sont présentées dans les figures suivantes :

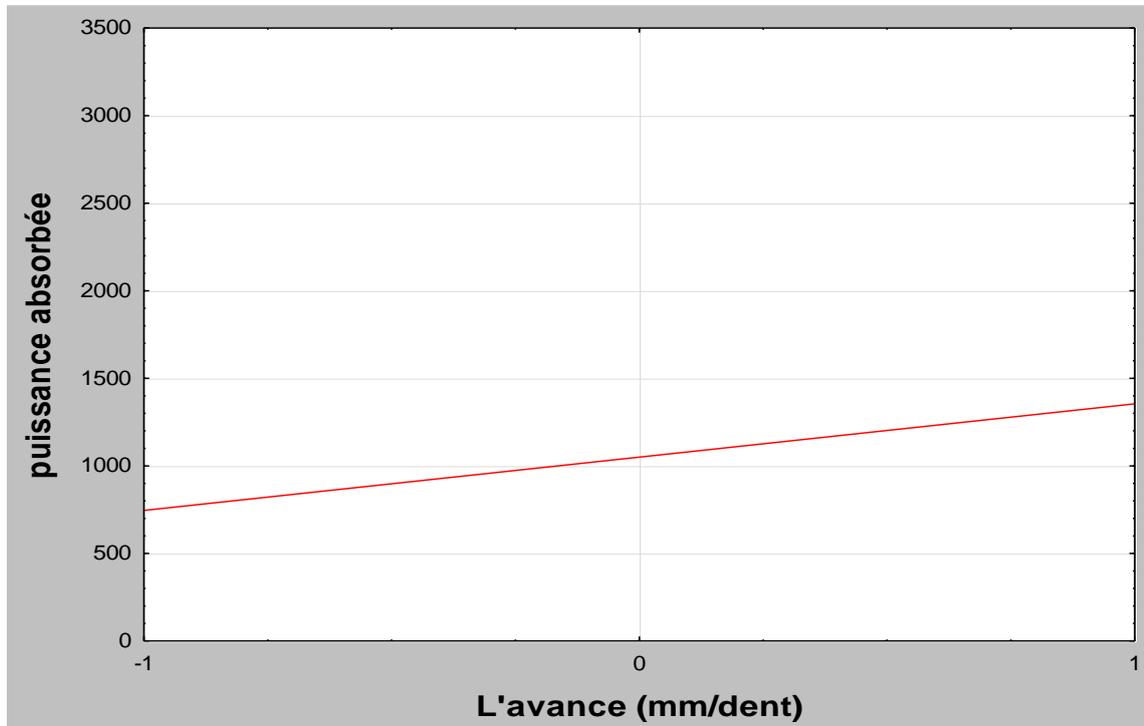


Figure IV. 2 : Modélisation de l'effet de l'avance (F) par rapport à la puissance absorbée P (en watt)

❖ Discussion :

Ce premier graphe illustre l'évolution de la puissance absorbée en fonction de l'avance [0.03 ; 0.09 ; 0.15] en **mm/dent**. Ces résultats montrent qu'avec l'augmentation de l'avance, la puissance absorbée **P** devient très importante.

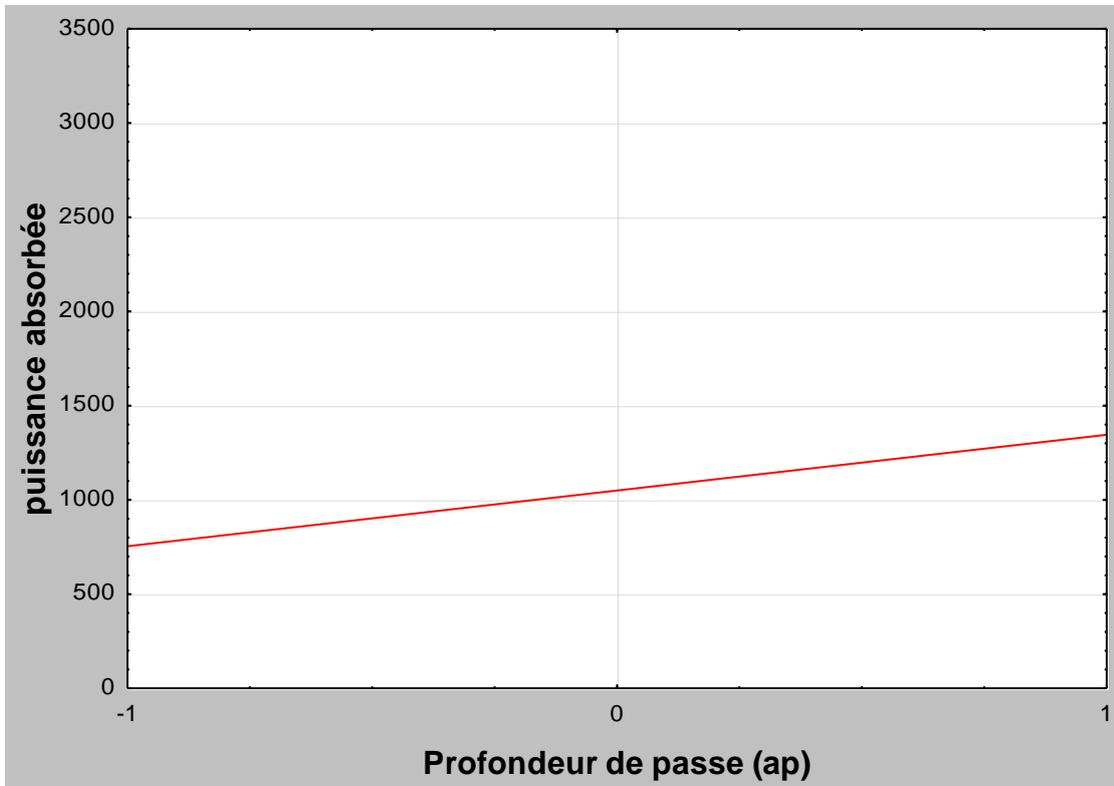


Figure IV. 3 : Modélisation de l'effet de (ap) par rapport à la puissance absorbée P.

❖ **Discussion :**

La courbe que représente la **figure IV.3** indique que la puissance absorbée est sensiblement affectée par l'avance et la profondeur de passe. À cause de l'augmentation de la profondeur de passe et de l'avance, la surface de la zone de contact outil-copeau augmente ce qui rend la puissance absorbée croissante.

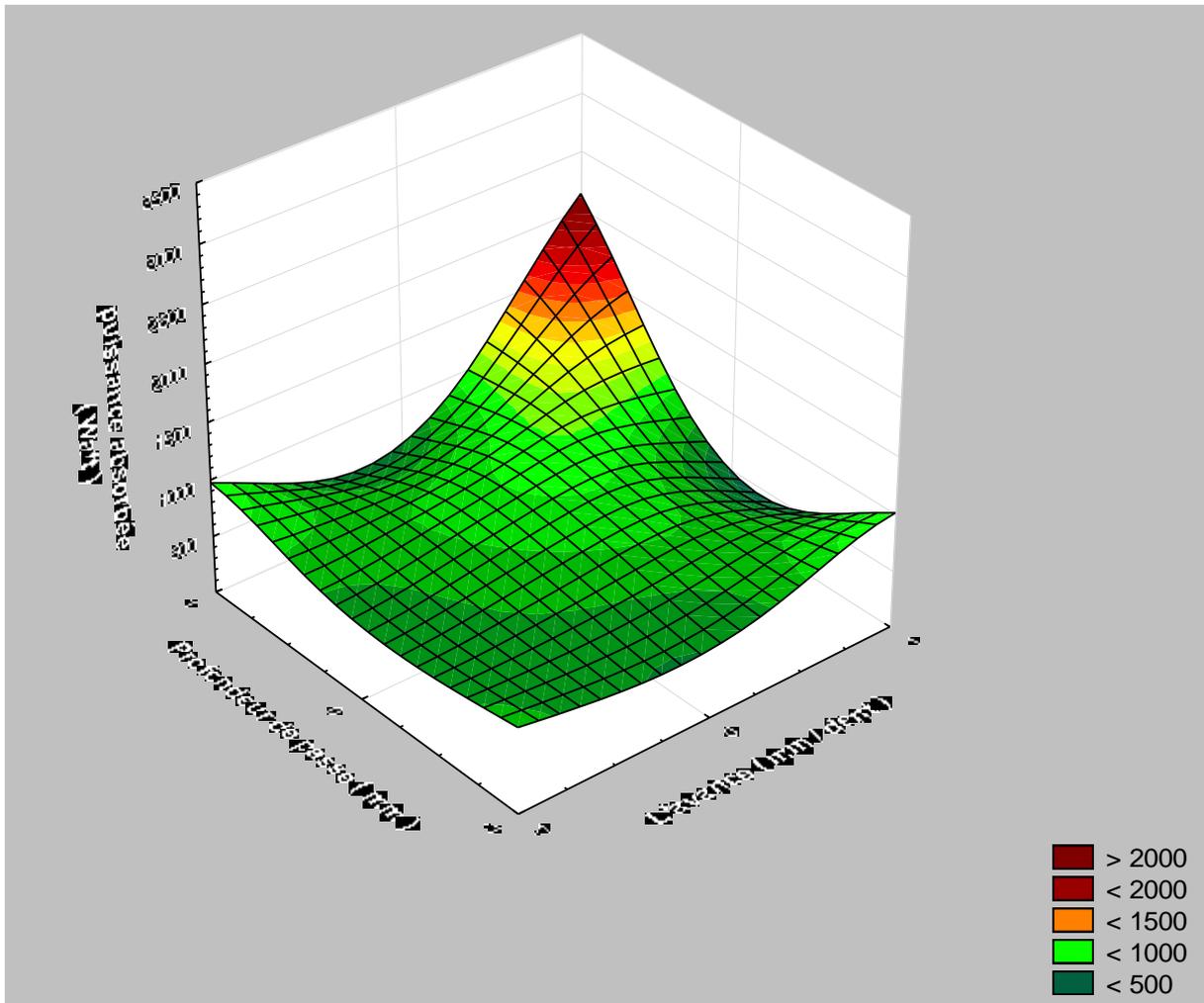


Figure IV. 4 : Graphe de surface de réponse de P en fonction de a_p et F .

❖ Discussion :

La figure IV.4 nous permet d'apprécier l'influence de la profondeur de passe (a_p) et l'avance (F). L'analyse de la courbe montre que la profondeur de passe et l'avance ont un effet important sur la puissance absorbée (P). On remarque que la puissance absorbée (P) augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe et l'avance.

La valeur minimale de la puissance absorbée (P)=390w est observée avec la plus basse d'avance **0.03mm/dent**, et la section du copeau. La valeur maximale P =3060w atteint la valeur maximale de F =**0.15mm/dent**.

IV.4.1.2 Pour la puissance de coupe (Puissance utile) :

Statistique	Value
Multiple R	0,952138922
Multiple R ²	0,906568526
R ² ajusté	0,820923009
F(15,8)	10,5851252
P	0,000144447302
Estimation de l'erreur de t Student	317,452714

Les valeurs sont données dans les tableaux IV.4 et IV.5. Lorsque les **P-values** sont inférieures à **0,05** (ou **90%** confiance "niveau de signification")

Tableau IV. 4 : L'analyse de la variance.

Tableau IV. 5 : Importance des coefficients du modèle.

N° essai= 24		b*	Err Std.b*	B	Err Std.b	t(8)	P-value
Moyenne				1251,667	129,5995	9,65796	0,000001
Hv*F*Vc	X1*X2*X3	0,397443	0,109234	369,705	101,6104	3,63846	0,003398
ap	X4	0,315572	0,089503	267,599	75,8970	3,52582	0,004178
Hv*F	X1*X2	0,342083	0,091012	307,676	81,8578	3,75867	0,002728

Hv *VC	X1*X3	-0,481508	0,097633	-433,078	87,8130	-4,93182	0,000347
F *ap	X2*X4	0,601498	0,164047	541,000	147,5472	3,66663	0,003227
F*Vc*ap	X2*X3*X4	-0,529133	0,109234	-492,205	101,6104	-4,84404	0,000402
Hv*F*Vc*ap	X1*X2*X3*X4	0,392279	0,097191	364,902	90,4085	4,03615	0,001651
Hv ²	X1 ²	0,347335	0,088556	589,067	150,1879	3,92220	0,002027
F*ap	X2*X4	0,028171	0,151893	26,205	141,2923	0,18547	0,855960
F*Vc*ap	X2*X3*X4	0,199116	0,096634	168,847	81,9440	2,06052	0,061714
Hv*ap	X1*X4	0,192537	0,097633	173,172	87,8130	1,97205	0,072099

➤ ($F(7,16)=33.55$; $p<0.001$) : le model de régression est significatif.

➔ La profondeur de passe **ap**, prédisent significativement la puissance de coupe.

➤ **R² : coefficient de détermination :**

➔ **R²=0.91** :l'ensemble de ces quatre variables expliquent **91%** de la variance de la puissance de coupe.

➤ **b*** : Bêta standardisé :

➔ (**b*** de la profondeur de passe (**ap**)= 0.32 ; **t(8)**=3.53 ; **p**<0.001) : la section du copeau a un impact significatif sur la puissance de coupe.

L'analyse initiale des réponses obtenues inclut tous les paramètres et leurs interactions. Les modèles sont réduits en éliminant les termes n'ayant aucun effet significatif sur les réponses (Quelques valeurs en noir ayant un niveau inférieur à l'intervalle de confiance sont négligeables et ne sont pas prises en compte). Après élimination de tous les facteurs non significatifs, la puissance de coupe est donc exprimée par le modèle suivant :

$$P_c = 1251.66 + 369.7 X_1 * X_2 * X_3 + 267.6 X_4 + 307.67 X_1 * X_2 - 433.1 X_1 * X_3 + 541 X_2 * X_4 - 492.2 X_2 * X_3 * X_4 + 364.9 X_1 * X_2 * X_3 * X_4 + 589.06 X_1^2$$

Pour **X4**=-1, la puissance utile (**Pc**) est minimisée.

2) Les graphes des effets des facteurs et les surfaces de réponses obtenus :

Pour visualiser l'influence des facteurs sur la puissance de coupe (**Pc**), les graphes des effets et les surfaces de réponse (**3D**) sont présentées sur les figures suivantes :

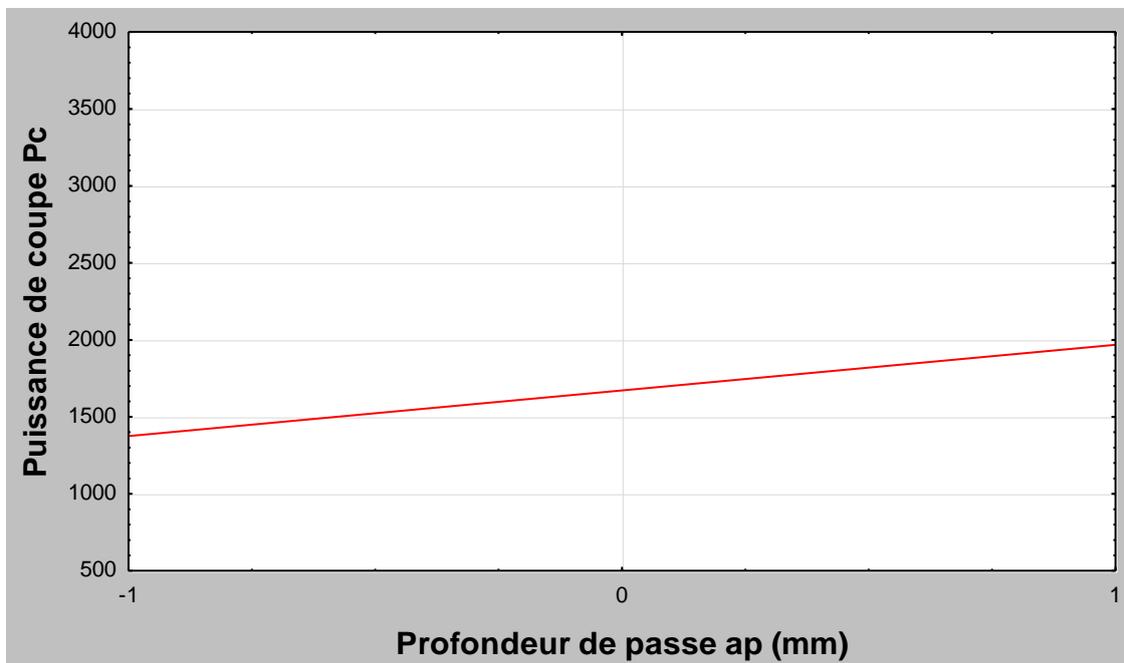


Figure IV. 5 : Modélisation de l'effet de (**ap**) par rapport à la puissance de coupe **Pc**.

❖ Discussion :

La **figure IV.5** indique que la puissance de coupe est affectée par sa vitesse. Ce graphe montre que l'augmentation de la profondeur de passe provoque l'augmentation de la puissance également.

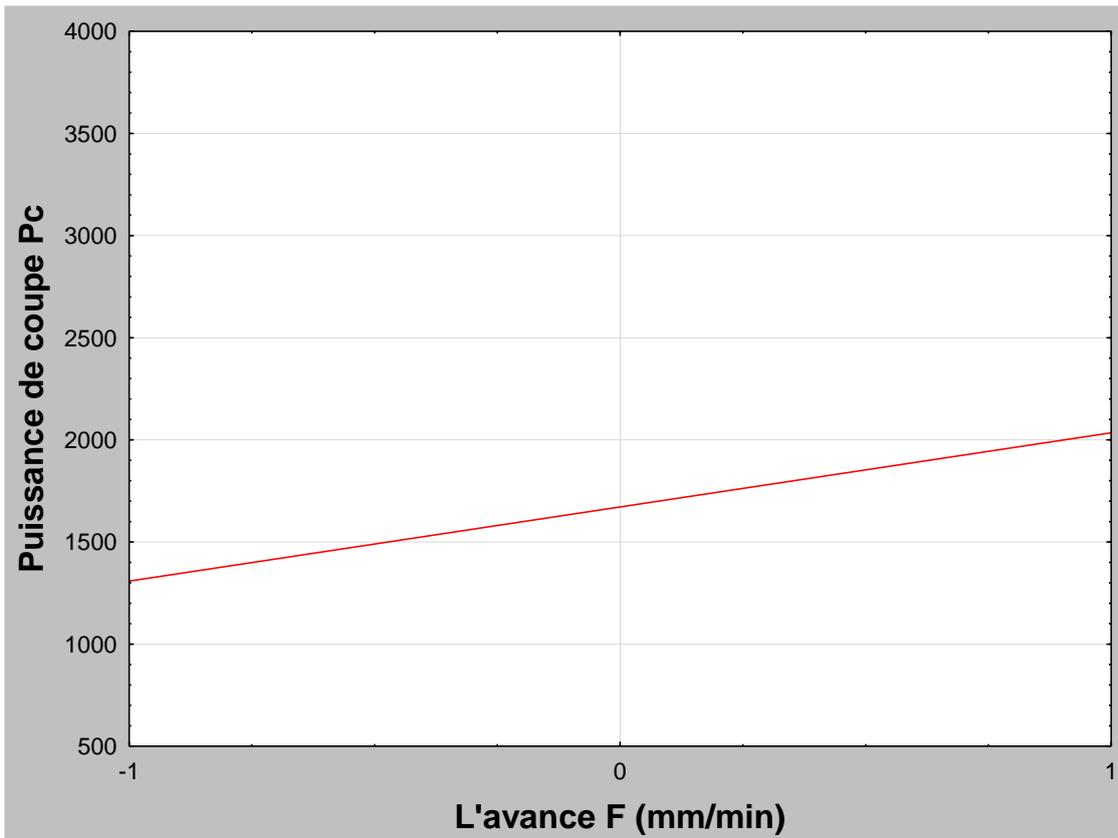


Figure IV. 6 : Modélisation de l'effet de (F) par rapport à la puissance de coupe P_c .

❖ Discussion :

La figure IV.6 montre que la puissance de coupe est fortement influencée par la profondeur de passe. À mesure que la profondeur de passe augmente, automatiquement l'avance augmente, ce qui entraîne une augmentation de la puissance de coupe.

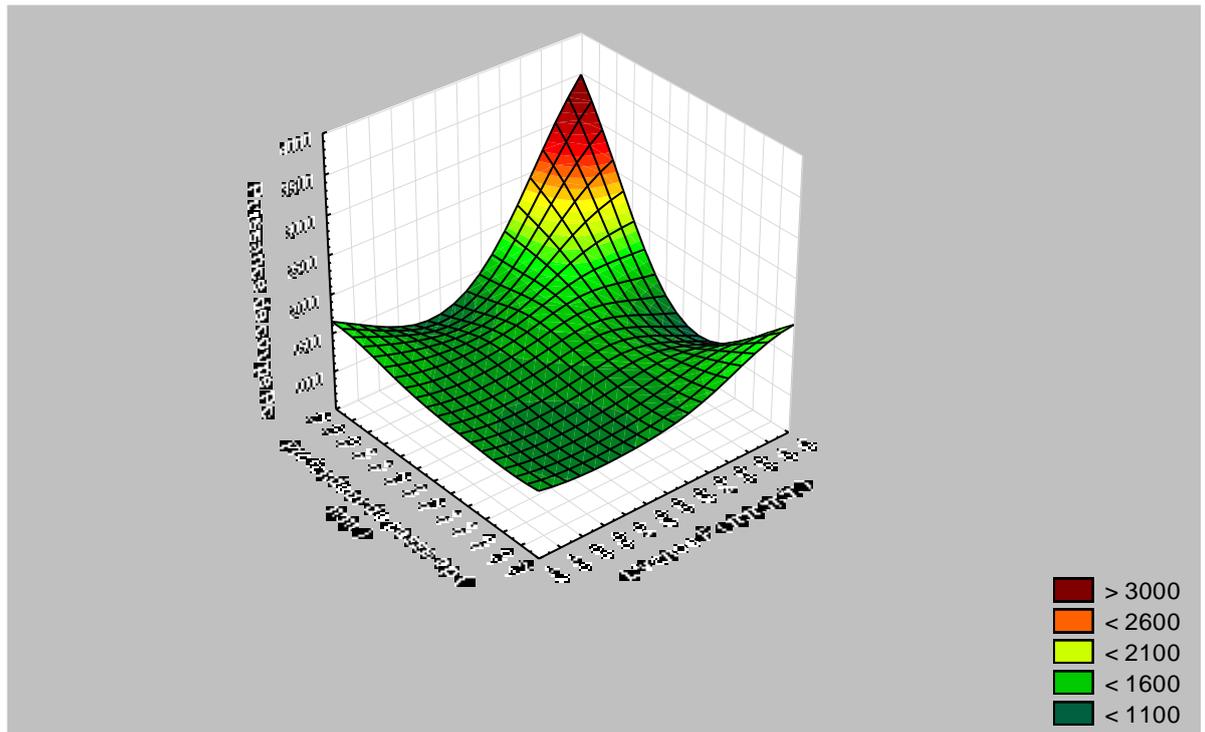


Figure IV. 7 : Graphe de surface de réponse de Pc en fonction de ap et F.

❖ Discussion :

La **figure IV.7** représente les influences de la profondeur de passe (**ap**) et de l'avance (**F**) sur la puissance de coupe. L'analyse de cette courbe montre que la profondeur de passe a un effet très significatif, l'avance à un effet important sur la puissance de coupe.

IV.4.1.3 Pour l'effort de coupe Fc :

Les valeurs sont données dans les tableaux **IV.6** et **IV.7**. Lorsque les **P-values** sont inférieures à **0,05** (ou **90%** confiance "niveau de signification").

Tableau IV. 6 :L'analyse de la variance.

Statistique	Value
Multiple R	0,980578
Multiple R ²	0,961533
R ² ajusté	0,873608
F(15,8)	10,93589
P	0,001834
Estimation de l'erreur de t Student	215,7469

Tableau IV. 7 : Importance des coefficients du modèle.

N° essai= 24		b*	Err Std.b*	b	Err Std.b	t(8)	P-value
Moyenne				354,720	88,0783	4,02733	0,005013
Hv*F	X1*X2	0,448513	0,087483	326,335	63,6521	5,12686	0,001358
Hv*ap	X1*X4	0,379905	0,128064	276,417	93,1785	2,96653	0,020910
Hv ²	X1 ²	0,371605	0,076311	509,829	104,6955	4,86963	0,001815
Hv*Vc	X1*X3	-0,472126	0,095179	-343,516	69,2519	-4,96039	0,001637
Ap	X4	0,349441	0,082507	239,710	56,5983	4,23529	0,003863
F*ap	X2*X4	0,807495	0,292075	587,529	212,5124	2,76468	0,027907
F*Vc*ap	X2*X3*X4	-0,457000	0,177805	-343,893	133,7984	-2,57024	0,036995
Hv*F*Vc*ap	X1*X2*X3*X4	0,439098	0,152362	330,422	114,6531	2,88193	0,023586
Vc	X3	-0,101338	0,150737	-69,516	103,4032	-0,67228	0,522967
Hv	X1	0,285668	0,123242	195,963	84,5420	2,31794	0,053557
F	X2	0,132501	0,146073	90,894	100,2036	0,90709	0,394512
F*Vc	X2*X3	-0,374243	0,189266	-272,297	137,7086	-1,97734	0,088528
Vc*ap	X3*X4	0,064780	0,105526	47,134	76,7800	0,61388	0,558710
Hv*F*Vc	X1*X2*X3	0,256834	0,177805	193,268	133,7984	1,44447	0,191834
Hv*F*ap	X1*X2*X4	-0,442403	0,293733	-332,909	221,0348	-1,50614	0,175754
Hv*Vc*ap	X1*X3*X4	-0,370252	0,203132	-278,615	152,8571	-1,82272	0,111125

➤ (F(15,8)=10.94 ; p<0.001) : le model de régression est significatif.

➔ La profondeur de passe **ap** et **Hv²** prédisent significativement l'effort de coupe.

➤ **R² : coefficient de détermination :**

➔ **R²=0.96** : l'ensemble de ces quatre variables expliquent **96%** de la variance de l'effort de coupe.

➤ **b* : Bêta standardisé :**

➔ (**b* de La profondeur de passe (ap)= 0.35 ; t(8)=4.24 ; p<0.001**) : la profondeur de passe a un impact significatif sur l'effort de coupe.

➔ (**b* de (Hv²)= 0.37 ; t(8)=4.87 ; p<0.05**) : **Hv²** a un impact significatif sur l'effort de coupe.

L'analyse initiale des réponses obtenues inclut tous les paramètres et leurs interactions. Les modèles sont réduits en éliminant les termes n'ayant aucun effet significatif sur les réponses (Quelques valeurs en noir ayant un niveau inférieur à l'intervalle de confiance sont négligeables et ne sont pas prises en compte). Après élimination de tous les facteurs non significatifs, l'effort de coupe est donc exprimé par le modèle suivant :

$$F_c = 354.7 + 326.3 x_1 * x_2 + 276.4 x_1 * x_4 + 509.8 x_1^2 - 343.5 x_1 * x_3 + 239.7 x_4 + 587.5 x_2 * x_4 - 343.89 x_2 * x_3 * x_4 + 330.4 x_1 * x_2 * x_3 * x_4 + 195.96 x_1 + 90.89 x_2 + 47.134 x_3 * x_4$$

Pour $X_1=1$ et $X_4=-1$, l'effort de coupe (F_c) est minimisé.

3) Les graphes des effets des facteurs et les surfaces de réponses obtenus :

Pour visualiser l'influence des facteurs sur l'effort de coupe (F_c), les graphes des effets et les surfaces de réponse (**3D**) sont présentées sur les figures suivantes :

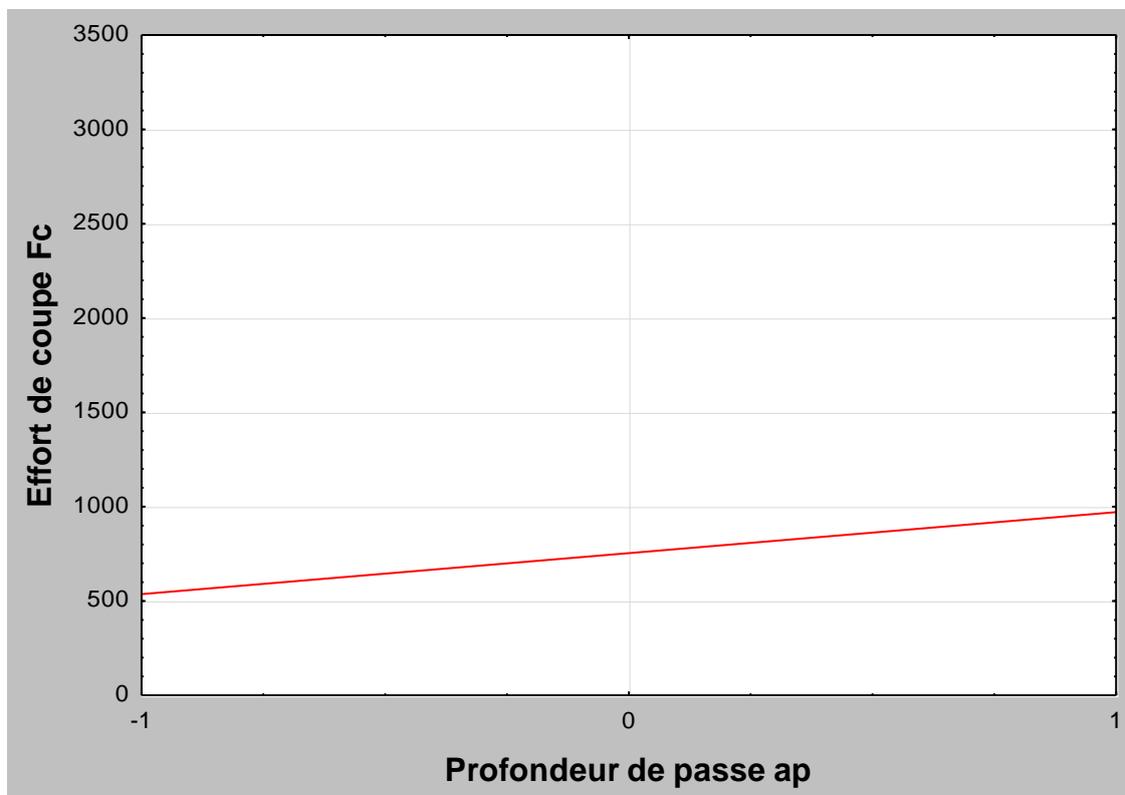


Figure IV. 8 : Modélisation de l'effet de (ap) par rapport à l'effort de coupe F_c (en N)

❖ Discussion :

Dans la **figure IV.8**, l'effet principal pour l'effort de coupe (F_c) est représenté par la courbe. Il est clairement observé que l'effet de l'avance sur les efforts de coupe a été significatif pour des avances supérieures à **0,15 mm/min**, tandis qu'à des valeurs inférieures on constate un léger changement des efforts de coupe.

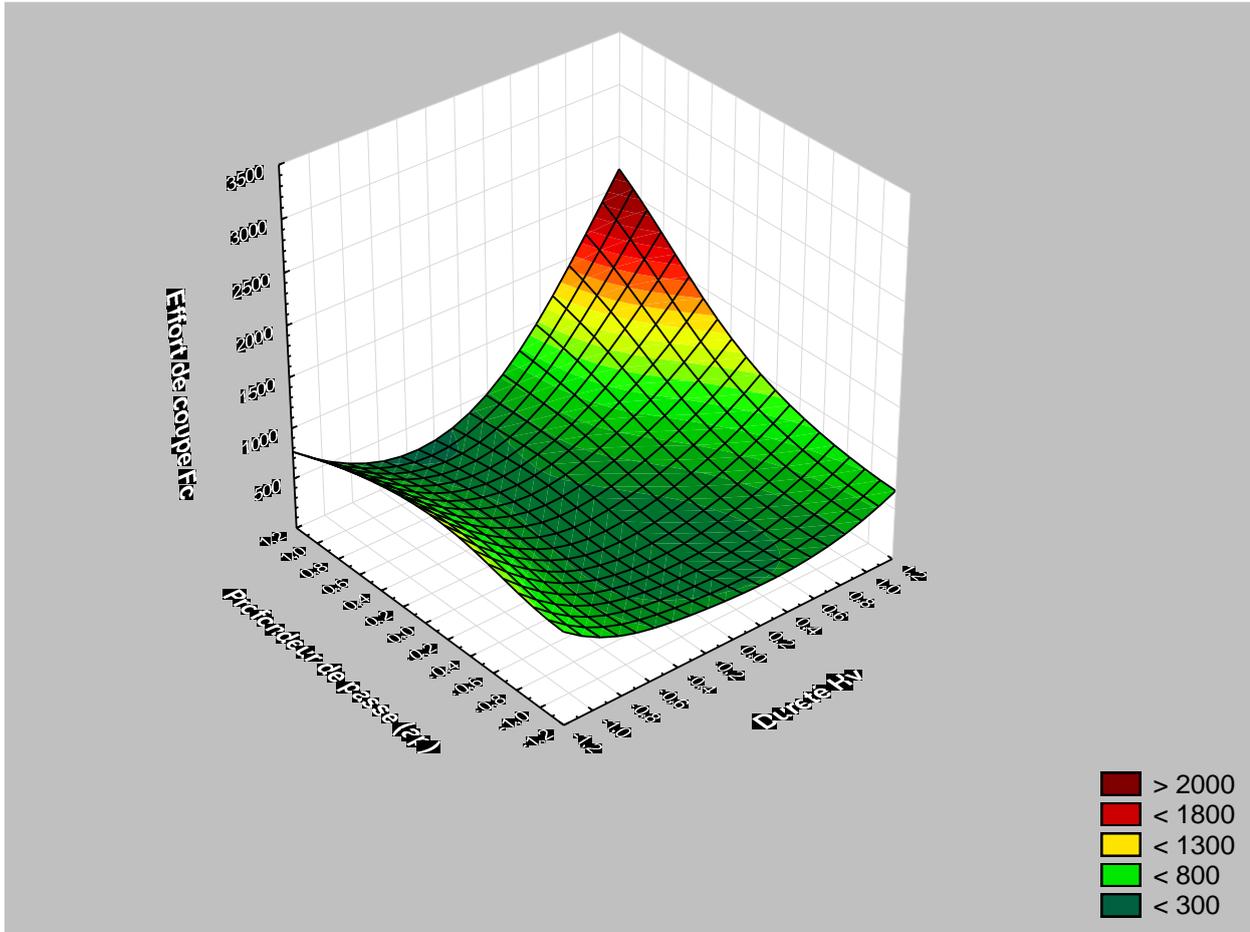


Figure IV. 9 : Graphe de surface de réponse de Fc en fonction de Hv et ap.

❖ Discussion :

La courbe en **3D** de la surface de réponse montre que l’effort de coupe est plus sensible à l’augmentation de la profondeur de passe (ap).

IV.4.1.4 Pour la rugosité Ra :

Les valeurs sont données dans les tableaux IV.8 et IV.9. Lorsque les **P-values** sont inférieures à **0,05** (ou **90%** confiance "niveau de signification").

Tableau IV. 8 :L'analyse de la variance.

Statistique	Value
Multiple R	0,930188
Multiple R ²	0,8652496
R ² ajusté	0,6556379
F(15,8)	4,1278691
P	0,0191143
Estimation de l'erreur de t Student	3,4122525

Tableau IV. 9 : Importance des coefficients du modèle.

N° essai= 24		b*	Err Std.b*	b	Err Std.b	t(8)	P-value
Moyenne				5,46432	1,393046	3,92257	0,003497
F	X2	0,526656	0,158542	3,46169	1,042089	3,32187	0,008914
Hv*Vc*ap	X1*X3*X4	-0,924854	0,257346	-6,66851	1,855553	-3,59381	0,005804
Vc*ap	X3*X4	0,420127	0,164232	2,92899	1,144975	2,55813	0,030782
Hv*ap	X1*X4	0,428746	0,151898	2,98908	1,058983	2,82259	0,019962
Hv*F	X1*X2	0,410052	0,135164	2,85875	0,942321	3,03373	0,014161
Hv*Vc	X1*X3	-0,507518	0,149331	-3,53825	1,041085	-3,39862	0,007891
Hv	X1	0,107430	0,148906	0,70613	0,978751	0,72146	0,488943
Hv ²	X1 ²	0,245054	0,123412	3,22146	1,622370	1,98565	0,078344
ap	X4	0,208983	0,126514	1,37364	0,831569	1,65186	0,132956
Hv*F*Vc*ap	X1*X2*X3*X4	0,057244	0,139216	0,41275	1,003797	0,41119	0,690552
Hv*F*ap	X1*X2*X4	-0,234350	0,250007	-1,68974	1,802638	-0,93737	0,373038
F*ap	X2*X4	0,348739	0,219713	2,43130	1,531766	1,58725	0,146918
Hv*F*Vc	X1*X2*X3	-0,091656	0,157120	-0,66087	1,132891	-0,58335	0,573984
Vc (X3)	X3	0,253080	0,194567	1,66349	1,278884	1,30073	0,225666

- (F(15,8)=4.13; p<0.001) : le model de régression est significatif.
 - ➔ L'avance F, la dureté Hv et Hv*Vc prédisent significativement la rugosité.
- R² : coefficient de détermination :
 - ➔ R²=0.87 : l'ensemble de ces quatre variables expliquent 87% de la variance de la rugosité.
- b* : Bêta standardisé :

→ (**b* de l'avance (F)= 0.53 ; t(8)=3.32 ; p<0.001**) : la dureté a un impact significatif sur la rugosité.

L'analyse initiale des réponses obtenues inclut tous les paramètres et leurs interactions. Les modèles sont réduits en éliminant les termes n'ayant aucun effet significatif sur les réponses (Quelques valeurs en noir ayant un niveau inférieur à l'intervalle de confiance sont négligeables et ne sont pas prises en compte). Après élimination de tous les facteurs non significatifs, l'effort de coupe est donc exprimé par le modèle suivant :

➤ (**F(8,15)=11.73 ; p<0.001**) : le model de régression est significatif.

→ La vitesse de coupe **Vc**, l'angle d'attaque **Kr**, **Kr²** et **Hv*Vc** prédisent significativement la rugosité.

➤ **R² : coefficient de détermination :**

→ **R²=0.86** : l'ensemble de ces quatre variables expliquent **86%** de la variance de la rugosité.

➤ **b* : Bêta standardisé :**

→ (**b* de la dureté (Hv)= 0.63 ; t(16)=6.62 ; p<0.001**) : la dureté a un impact significatif sur la rugosité.

→ (**b* d'angle d'attaque (Kr)= -0.42 ; t(16)=-4.43 ; p<0.001**) : l'angle d'attaque a un impact significatif sur la rugosité.

L'analyse initiale des réponses obtenues inclut tous les paramètres et leurs interactions. Les modèles sont réduits en éliminant les termes n'ayant aucun effet significatif sur les réponses (les valeurs en noir ayant un niveau inférieur à l'intervalle de confiance sont négligeables et ne sont pas prises en compte). Après élimination de tous les facteurs non significatifs, l'effort de coupe est donc exprimé par le modèle suivant :

$$Ra = 5.46 + 3.46 x_2 - 6.668 x_1 * x_3 * x_4 + 2.9 x_3 * x_4 + 2.98 x_1 * x_4 + 2.86 x_1 * x_2 - 3.53 x_1 * x_3 + 3.22 x_1^2 + 2.43 x_2 * x_4$$

Pour $X_1=1$, $X_2=-1$ et $X_3=1$, la rugosité (R_a) est minimisée.

1) Les graphes des effets des facteurs et les surfaces de réponses obtenues :

Pour visualiser l'influence des facteurs sur la rugosité (**Ra**), les graphes des effets et les surfaces de réponse (**3D**) sont présentées sur les figures suivantes :

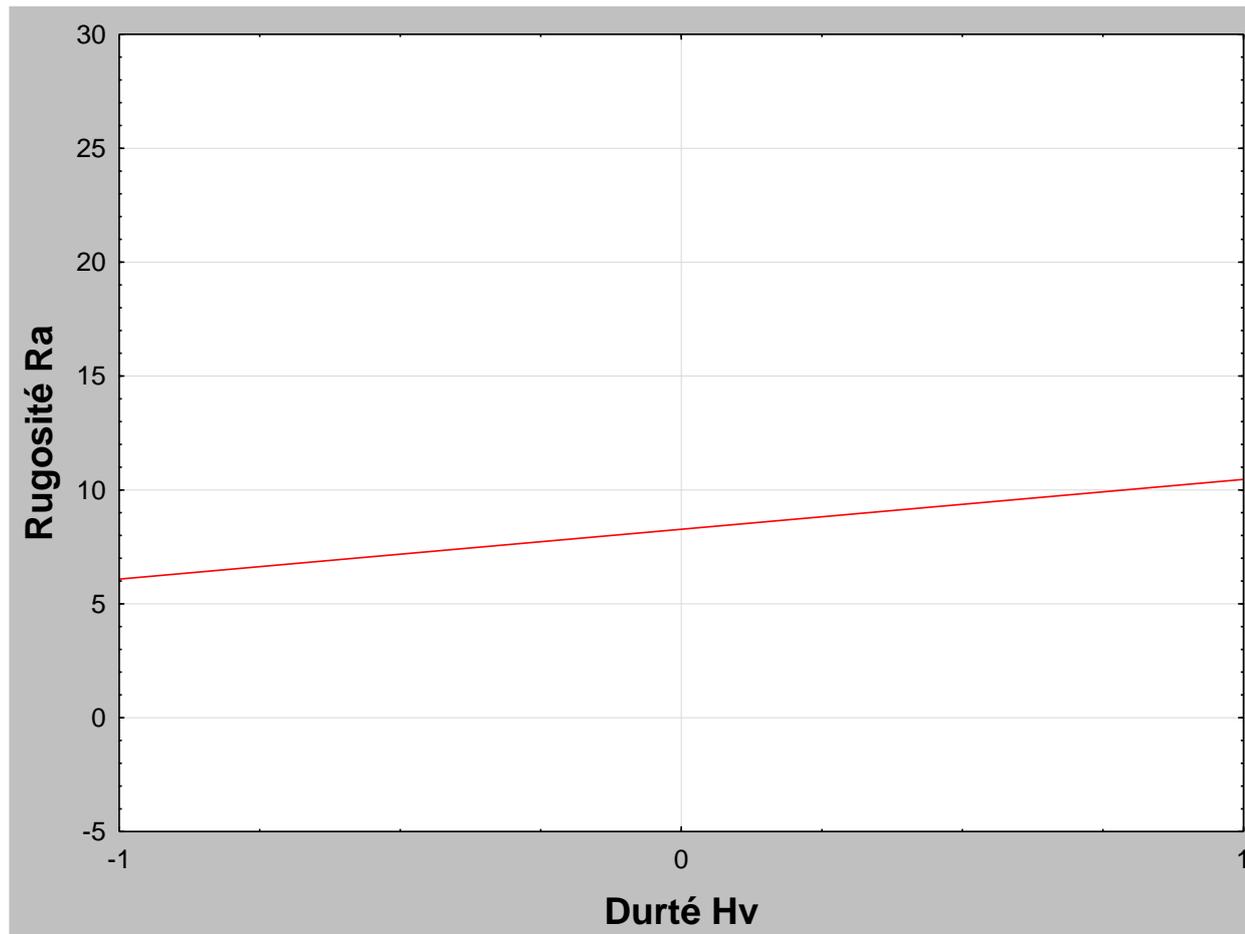


Figure IV. 10 : Modélisation de l'effet de (Hv) par rapport à la rugosité Ra.

❖ Discussion :

La **figure IV.11** indique que la rugosité est significativement affectée par la dureté, là où on voit que cet effet est plus important. Ce graphique montre qu'il est clairement observé que plus la dureté du matériau est élevée, plus l'état de surface est rugueux.

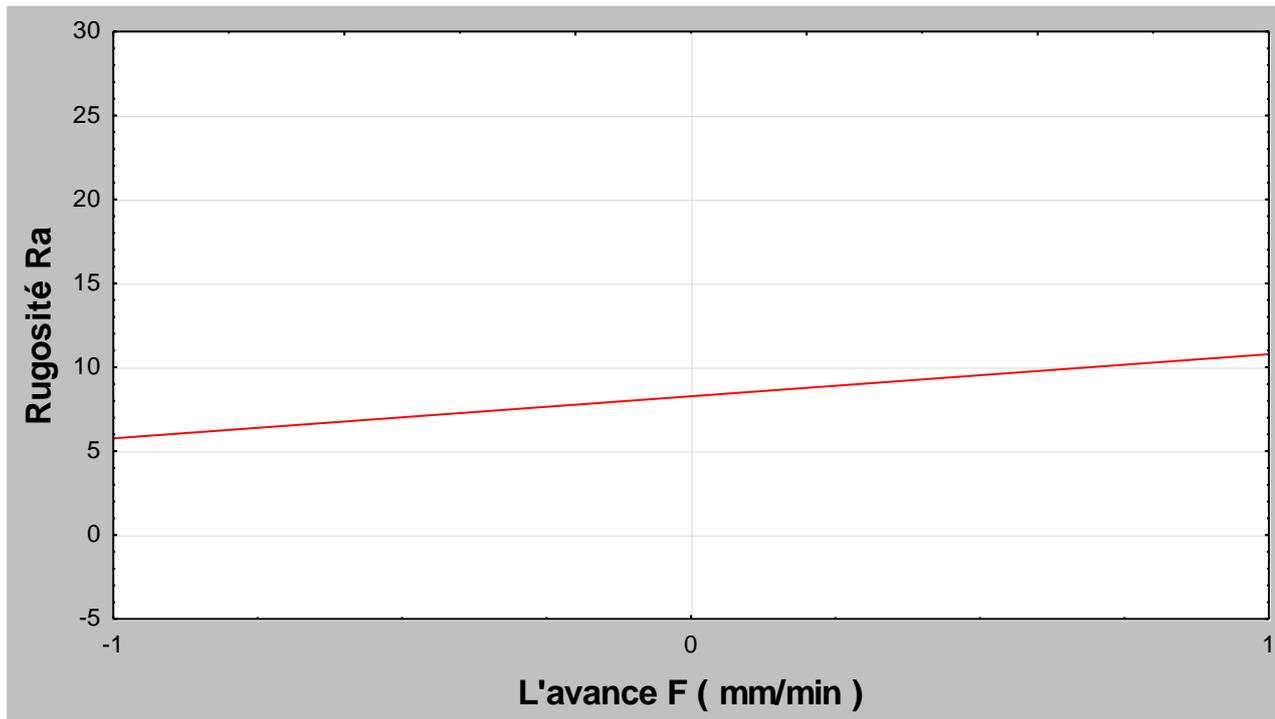


Figure IV. 11 : Modélisation de l'effet de (F) par rapport à la rugosité Ra (en micromètres)

❖ **Discussion :**

La **figure IV.12** indique que la rugosité est affectée par l'avance. Ce graphe montre que l'augmentation de la rugosité provoque l'augmentation de la puissance également.

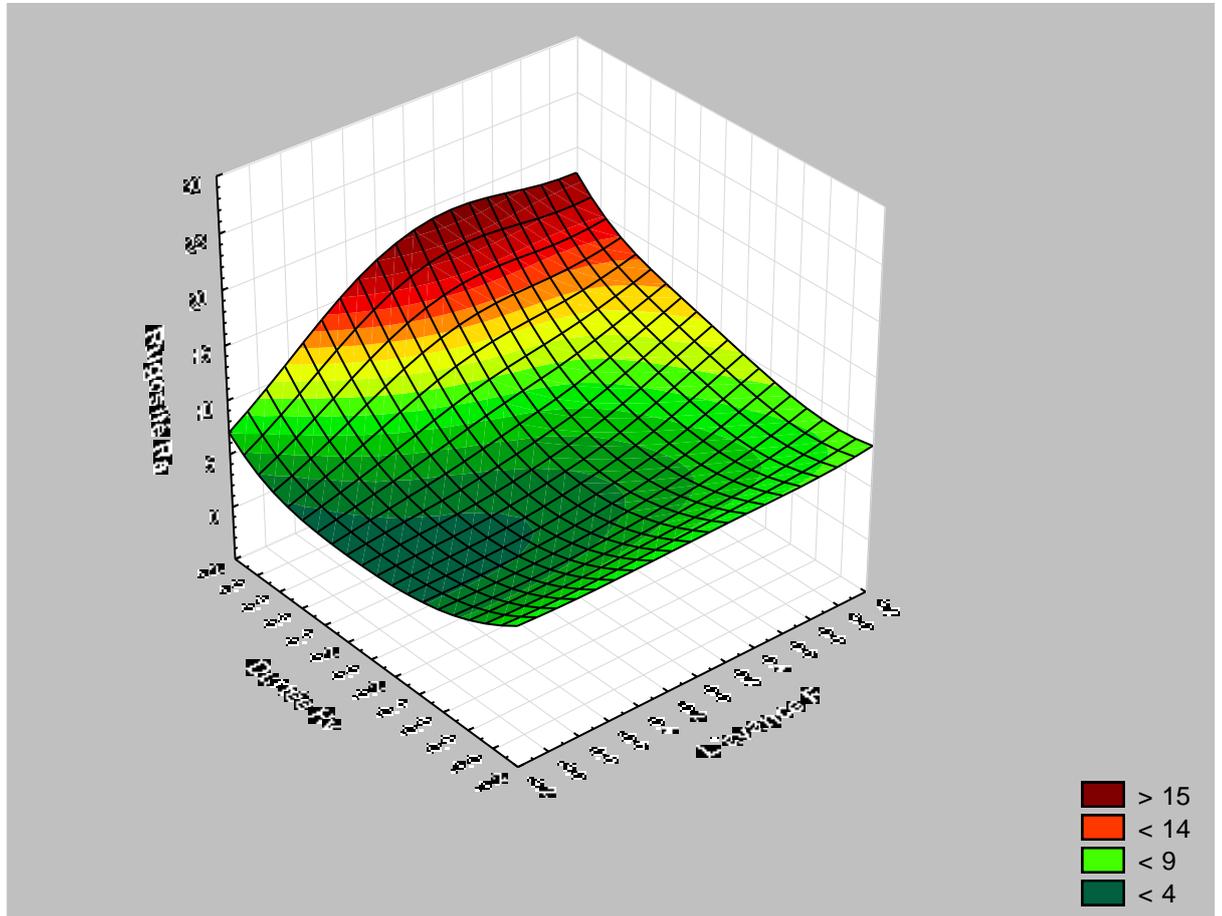


Figure IV. 12 : Graphe de surface de réponse de Ra en fonction de Hv et F.

❖ **Discussion :**

On remarque que les valeurs de la rugosité suivent la variation de l'avance, elles augmentent avec son augmentation et diminuent avec sa diminution, par contre on voit une légère augmentation avec la dureté.

IV.1 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre des différents résultats obtenus (expérimental et statiques) et leurs discussions. La modélisation par régression linéaire multiple nous a permis de déterminer l'influence des paramètres de coupe (la dureté, l'avance, vitesse de coupe, et la profondeur de passe) sur l'état de surface usinée, l'effort de coupe et la puissance de coupe.

Cette étude va ainsi permettre de choisir les conditions de coupe optimales en fonction de l'importance des critères de sélection définis par l'utilisateur entre état de surface, productivité, ou stabilité de l'usinage.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le but de cette étude expérimentale est d'étudier l'influence des paramètres d'usinage (la dureté, l'avance F , vitesse de coupe V_c et la profondeur de passe a_p) sur les principales performances d'usinage qui sont :

- La puissance absorbée (P).
- La puissance de coupe (P_c).
- L'effort de coupe (F_c).
- L'état de surface obtenu sur la pièce (la rugosité de surface R_a).

Nous nous sommes intéressés au fraisage et à l'utilisation de plans d'expérience afin d'optimiser et de proposer un modèle numérique permettant le calcul de la puissance et l'effort de coupe ainsi que la rugosité. Les résultats sont obtenus avec logiciel STATISTICA, pour l'analyse du modèle numérique nous sommes passés par un modèle de régression afin de converger les résultats.

Le modèle élaboré prend en considération les paramètres ayant un effet significatif sur les réponses, que nous avons vérifié grâce aux courbes d'effets, des surfaces de réponses.

La vitesse de coupe (V_c) et la profondeur de passe a_p sont les paramètres les plus influents sur la puissance absorbée (P) et la puissance de coupe (P_c).

La profondeur de passe a_p et la dureté (H_v) ont une influence importante sur l'effort de coupe (F_c).

La dureté (H_v), l'avance f , et la vitesse de coupe (V_c) semble être les plus influents sur la rugosité de la pièce (R_a).

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] <https://www.rueduverre.com/definitions/usinage.html>.
- [2] < Technologie des fabrications mécaniques > ENSEM Casablanca.
- [3] Brigitte REMACLE, Bld Reyers << Usinage Tournage Fraisage>> Bruxelles, 2014.
- [4] Izzeddine AOUASSA << Mémoire : Etude de la gamme d'usinage d'un support d'enrouleuse de tôles et étude de l'effet des paramètres de fraisage sur la rugosité >> Algérie, Université Badji Mokhtar Annaba, 2013-2014.
- [5] <https://www.otelo.fr/fraise-surfacer-ot4500-d100-mm/t-o-20145600/SF-ID-00050903/ref-1560248979859.html>.
- [6] Philippe DEPEYRE << fabrication mécanique >> Université de la Réunion, 2004-2005.
- [7] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/procedes-d-usinage-42190210/fraisage-bm7082/principes-de-base-du-fraisage-bm7082niv10001.html>.
- [8] Element de coupe John Wiley & Sons, Fundamentals of Modern Manufacturing, 2 nd edition Inc. M. P. Groover, 2002.
- [9] / ablocage des pieces <https://www.sous-traiter.fr/les-differents-dispositifs-dablocage-pour-lusinage-de-pieces/>.
- [10] Appareil diviseur https://dspace.univ_guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/14090/1/APPAREIL_%20DIVISEUR%20_Djamaa_2020.pdf.
- [11] : Jacques Goupy et Lee Creighton, Introduction aux plans d'expériences (3e édition, 2006). Dunod, pages 324.
- [12] : PILLET M, Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi, les éditions D'organisation Ed., Paris, 1992.
- [13] : SADO G, SADO M. C, Les plans d'expériences, De l'expérimentation à l'assurance qualité, Afnor Technique Ed., Paris, 1991.
- [14] : BARON J, OLLIVIER J.P, Les bétoins bases et données pour leur formulation, Edition Eyrolles, Paris, 522 p. 1996.
- [15] <https://www.statsoft.fr/pdf/STATISTICA-prise-en-main.pdf>.

Résumé

Le fraisage est l'un des procédés d'usinage le plus utilisé dans l'industrie mécanique. Par conséquent, le choix des paramètres de coupe optimaux est très important afin d'assurer un meilleur état de surface de la pièce usinée. Les résultats d'un bon choix de condition de coupe peuvent être constatés par une diminution des niveaux des efforts de coupe.

Nous nous sommes intéressés dans notre étude à l'utilisation des plans d'expériences multifactoriels pour l'optimisation des conditions de coupe en fraisage.

L'intérêt de notre étude réside dans l'amélioration de l'usinage en trouvant une corrélation entre les paramètres de coupe (vitesse de coupe, la profondeur de passe, l'avance et la dureté) et l'état de surface des pièces usinées, les efforts et les puissances de coupe.

Mots clés : fraisage, Surfaçage, Paramètres de Coupe, plans d'expériences, Optimisation, Effort de coupe, Puissance absorbée, Rugosité, Puissance de coupe.

Abstract

Milling is one of the most widely used machining processes in the mechanical industry. Therefore, the choice of optimal cutting parameters is very important to ensure a better surface finish of the machined part. The results of a good choice of cutting condition can be observed by a reduction in the levels of effort cutting

In our study, we are interested in the use of design of experiments for the optimization of cutting conditions in milling.

The interest of our study lies in the improvement of the machining by finding a correlation between the cutting parameters (cutting speed, , depth of pass, advance and hardness) and the surface condition of the machined parts, the cutting forces and the cutting powers.

Key words : Milling, Carting, Cutting parameters, experimental plans, Optimization, Cutting effort, Power consumption, roughness, Wear and tear, Cutting power.

IV.1 Introduction :

Les essais de mise au point d'un produit ou d'un processus font partie intégrante du métier des ingénieurs. Ceux-ci sont souvent amenés à rechercher des valeurs des paramètres qui définissent les produits ou les paramètres de réglage des moyens de production afin d'obtenir les performances désirées.

Pour cela on utilise les techniques d'optimisation tel que les plans d'expériences qui est une suite d'essais entièrement organisée à l'avance de manière à déterminer, en un minimum d'essais et un maximum de précision, l'influence des différents paramètres possibles, pour optimiser les performances du système étudié. Les tables optimisées permettent une réduction considérable du temps et des ressources nécessaires pour réduire la variabilité de la réponse par rapport au plan d'expériences traditionnel.

Ce chapitre décrit les conditions et les procédures adoptées pour élaborer un modèle mathématique optimal représentant la relation de causalité entre la puissance absorbée **P**, la puissance de coupe **P_c**, l'effort de coupe **F_c**, la rugosité de surface **R_a** et les conditions de coupe. Les résultats atteints sont présentés et discutés.

IV.2 Choix d'un modèle :

La méthode des plans d'expériences repose essentiellement sur la création et l'exploitation de modèles de la fonction objective (réponse), tout en fournissant au moins un essai pour chaque combinaison de facteur. Il est donc naturel d'analyser dans les détails de cette composante primordiale, tout simplement par ce qu'elle permet une interprétation rapide.

Dans cette partie, on applique la méthode des plans d'expériences pour étudier le comportement des paramètres de coupe (un plan d'expérience optimal **B4** (présenté au chapitre **III**)) à **24** essais a été choisi de telle manière à assurer une meilleure précision des résultats.

Dans notre étude, on prend en considération quatre facteurs qui sont : la dureté (**HV**), l'avance (**F**), la vitesse de coupe (**Vc**) et la profondeur de passe (**ap**) comme des variables indépendantes, ce sont elles qui sont reliées à la réponse (variables dépendantes) par une équation de prédiction. Le diagramme expérimental ci-dessous représente tout ça :

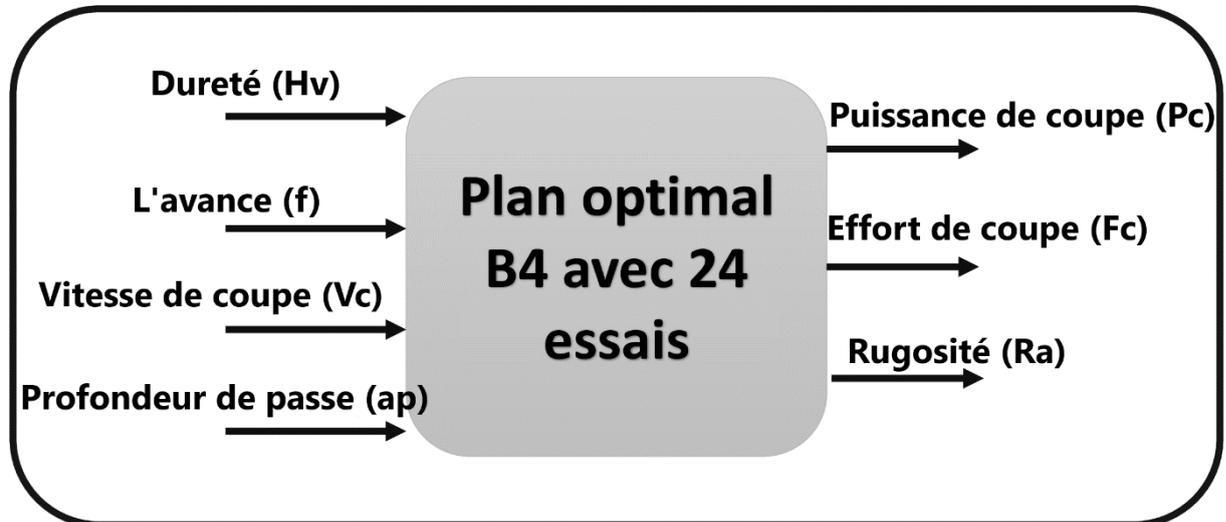


Figure IV. 1 : Diagramme expérimental.

IV.3 Résultats statistiques :

Un ensemble de **24 essais** a été fait et les résultats expérimentaux sont donnés dans le **tableau IV. 1**. Les traitements de données statistiques sont effectués en utilisant Multiple

régression (STATISTICA) et l'effet de chaque facteur et de ses interactions sont déterminés.

0

0.

Tableau IV. 1 : Résultats expérimentaux.

Essais	X1	X2	X3	X4	P0	P	Pc	Fc	Ra
1	+1	+1	+1	+1	410	3650	3240	1620	15,8040
2	+1	+1	+1	-1	410	1300	890	445	10,4786
3	+1	+1	-1	+1	380	3440	3060	3060	27,6240
4	+1	+1	-1	-1	380	1360	980	980	6,3740
5	+1	-1	+1	+1	410	1210	800	400	0,5680
6	+1	-1	+1	-1	400	850	450	225	1,8543
7	+1	-1	-1	+1	360	1830	1470	1470	8,8685
8	+1	-1	-1	-1	360	1020	660	660	16,0070
9	-1	+1	+1	+1	1210	3000	1790	895	10,1346
10	-1	+1	+1	-1	1210	2700	1490	745	7,0930
11	-1	+1	-1	+1	700	1140	440	440	3,2690
12	-1	+1	-1	-1	700	1400	700	700	10,8016
13	-1	-1	+1	+1	710	1550	840	420	6,4130
14	-1	-1	+1	-1	710	1670	960	480	4,4596
15	-1	-1	-1	+1	700	1500	800	800	6,8986
16	-1	-1	-1	-1	700	1620	920	920	7,3910
17	+1	0	0	0	400	1650	1250	833.33	14,987
18	-1	0	0	0	410	1720	1310	873.33	6,7500
19	0	+1	0	0	720	1140	420	280	9,6373
20	0	-1	0	0	720	1350	630	420	3,6290

21	0	0	+1	0	710	1320	610	305	4,0400
22	0	0	-1	0	750	1140	390	390	6,4486
23	0	0	0	+1	730	1250	520	346,66	4,6020
24	0	0	0	-1	730	1310	580	386,66	4,4290

Avec :

- **X1 : Dureté Hv.**
- **X2 : L'avance (mm/min).**
- **X3 : Vitesse de coupe Vc (m/min).**
- **X4 : La profondeur de passe (mm).**
- **P0 : La puissance à vide (watt).**
- **Pc : La puissance de coupe (watt).**
- **P : La puissance absorbée (watt).**
- **Fc : L'effort de coupe (N).**
- **La rugosité arithmétique (µm).**

Avant de commencer l'usinage, nous avons mesuré la puissance à vide (**P0**). La puissance absorbée pendant l'usinage (**P**) est également mesurée. D'après ces deux mesures nous avons calculé la puissance de coupe (**Pc**) à l'aide de la formule suivante : **Pc=P-P0**.

Et l'effort de coupe (**Fc**) est calculé selon l'équation donnée au **chapitre II**.

IV.4 Analyse de régression :

L'analyse de régression est utilisée pour la modélisation et l'analyse de plusieurs variables où il y a une relation entre une variable dépendante et un ou plusieurs variables indépendantes. Dans notre étude, les variables dépendantes sont la puissance de coupe (**Pc**), la puissance absorbée (**P**), l'effort tangentiel (**Fc**) et la rugosité (**Ra**), alors que les variables indépendantes sont la dureté (**Hv**), l'avance (**F**), la vitesse de coupe (**Vc**) et la Profondeur de passe (**ap**).

Pour l'obtention des modèles prédictifs de la puissance absorbée, la puissance de coupe, de l'effort de coupe et de la rugosité, l'équation de régression linéaire suivante a été utilisée :

$$K + k + k + k$$

$$Y = b_0 + \sum_{i=1} (b_i X_i) + \sum_{i=1} (b_{ij} X_i X_j) + \sum_{i=1} (b_{ijw} X_i X_j X_w) + \sum_{i=1} (b_{ii} X_i^2)$$

Avec :

- **Y** : La réponse.

- **b₀** : La valeur de la réponse au centre du domaine d'étude.

- **X_{i,j}** : Le niveau attribué au facteur i, j.
- **b_{i,j}** : L'effet du facteur i, j.
- **b_{ij}** : L'interaction entre les facteurs i et j.
- **b_{ijw}** : L'interaction entre les facteurs i et j et w.

IV.4.1 Les résultats :**IV.4.1.1 Pour la puissance absorbée :**

Les significations statistiques des modèles ajustés ont été évaluées par les **P-values** de l'analyse de régression. Les valeurs sont données dans les tableaux **IV.2** et **IV.3**. Lorsque les **P-values** sont inférieures à **0,05** (ou **95%** confiance "niveau de signification"), les modèles obtenus sont considérés comme statistiquement significatifs (les valeurs en rouge). Elle démontre que les termes choisis dans le modèle ont des effets significatifs sur les réponses.

L'autre coefficient important est le coefficient de détermination **R²** qui est une mesure du degré d'ajustement du modèle. Lorsque **R²** se rapproche de l'unité, meilleure est la réponse du modèle qui correspond aux données réelles.

Le test de Fisher-Snedecor **F** avec (**F (15, 8)**) le chiffre **15** représente le degré de liberté d'un modèle et le chiffre **8** représente l'erreur expérimentale. Ce test nous permet d'avoir est-ce que le modèle est significatif ou pas.

Tableau IV. 2 : L'analyse de la variance.

Statistique	Value
Multiple R	0,96744759
Multiple R²	0,93595485
R²ajusté	0,70539229
F(15,8)	4,05943992
P	0,06375101
Estimation de l'erreur de t Student	404,866853

N° essai= 24		b*	Err Std.b*	B	Err Std.b	t(8)	P-value
Moyenne				545,625	195,9148	2,78501	0,021226
F	X2	0,361069	0,114403	304,444	96,4618	3,15611	0,011623
ap	X4	0,351186	0,114403	296,111	96,4618	3,06972	0,01336
Hv*ap	X1*X4	0,271854	0,114403	243,125	102,3132	2,37628	0,04148
Hv ²	X1 ²	0,404636	0,114403	361,875	102,3132	3,53693	0,006345
F ²	X2 ²	0,435482	0,152686	734,375	257,4825	2,85214	0,019023
Vc ²	X3 ²	-0,012231	0,152686	-20,625	257,4825	-0,0801	0,937909
ap ²	X4 ²	-0,027055	0,152686	-45,625	257,4825	-0,1772	0,863278
F*Vc*ap	X2*X3*X4	0,002594	0,152686	4,375	257,4825	0,01699	0,986814
Hv*F*Vc*ap	X1*X2*X3*X4	0,211753	0,114403	189,375	102,3132	1,85093	0,097206
Hv*F*ap	X1*X2*X4	0,248093	0,114403	221,875	102,3132	2,16859	0,058247
Hv*F*Vc	X1*X2*X3	0,025858	0,114403	23,125	102,3132	0,22602	0,826234
Vc*ap	X3*X4	-0,210355	0,114403	-188,125	102,3132	-1,83872	0,099113
F*ap	X2*X4	0,108716	0,114403	91,667	96,4618	0,95029	0,366784
F*Vc	X2*X3	0,233904	0,114403	197,222	96,4618	2,04456	0,071237
Hv	X1	-0,210793	0,291551	-1,51989	2,102185	-0,72300	0,490272

Tableau IV. 3 : Importance des coefficients du modèle.

Avec :

- **b*** : Bêta standardisé.
- **Err std. b*** : Erreur type de bêta.
- **b** : Effet des facteurs sur la réponse.
- **Err std. b** : Erreur type de b.

($F(15,8)=4.06$; $p<0.001$) : le model de régression est significatif.

→ L'avance **F**, la profondeur de passe **ap**, **Hv*ap** et **Hv²** et **F²** prédisent significativement la puissance absorbée.

R² : coefficient de détermination :

→ **R²=0.94** : l'ensemble de ces quatre variables expliquent **94%** de la variance de la puissance absorbée.

b* : Bêta standardisé :

- **(b* de l'avance (Vc)= 0.36 ; t(8)=3.16 ; p<0.001)** : l'avance un impact significatif sur la puissance absorbée.
- **(b* de la profondeur de passe (ap)= 0.35 ; t(8)=3.07 ; p<0.001)** : la profondeur de passe un impact significatif sur la puissance absorbée.
- **(b* de (F²)= 0.44 ; t(8)=2.85 ; p<0.05)** : (F²) a un impact significatif sur la puissance absorbée.

L'analyse initiale des réponses obtenues inclut tous les paramètres et leurs interactions. Les modèles sont réduits en éliminant les termes n'ayant aucun effet significatif sur les réponses (Quelques valeurs en noir ayant un niveau inférieur à l'intervalle de confiance sont négligeables et ne sont pas pris en compte). Après élimination de tous les facteurs non significatifs, la puissance absorbée est donc exprimée par le modèle suivant :

$$\begin{aligned}
 P = & 545.6 + 3045.4 X_2 + 296.1 X_4 + 243.1 X_1 * X_4 + 361.87 X_1^2 + 734.37 X_2^2 + \\
 & 189.37 X_1 * X_2 * X_3 X_4 + 221.87 X_1 * X_2 * X_4 + 197.2 X_2 * X_3 + 91.66 X_2 * X_4 + \\
 & 23.1 X_1 * X_2 * X_3
 \end{aligned}$$

Pour $X_3 = -1$ et $X_4 = 0$, la puissance absorbée (**P**) est minimisée.

1) **Les graphes des effets des facteurs et les surfaces de réponses obtenues :**

Pour visualiser l'influence des facteurs sur la puissance absorbée (**P**), les graphes des effets et les surfaces de réponse (**3D**) sont présentées dans les figures suivantes :

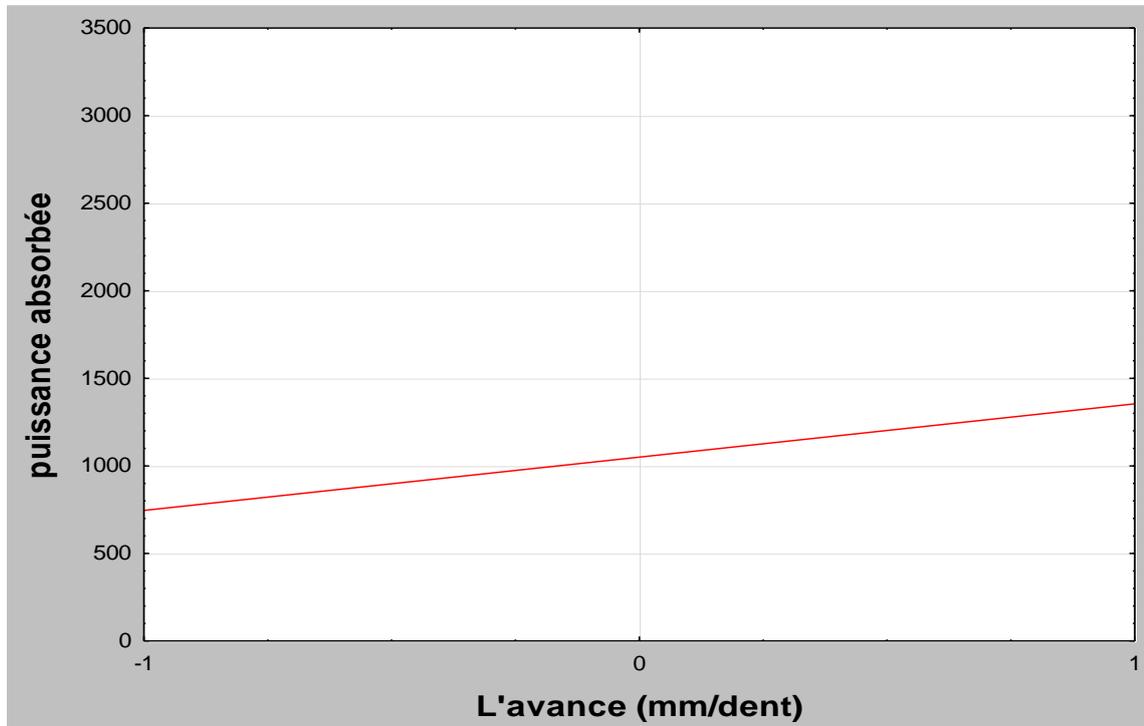


Figure IV. 2 : Modélisation de l'effet de l'avance (F) par rapport à la puissance absorbée P (en watt)

❖ Discussion :

Ce premier graphe illustre l'évolution de la puissance absorbée en fonction de l'avance [**0.03** ; **0.09** ; **0.15**] en **mm/dent**. Ces résultats montrent qu'avec l'augmentation de l'avance, la puissance absorbée **P** devient très importante.

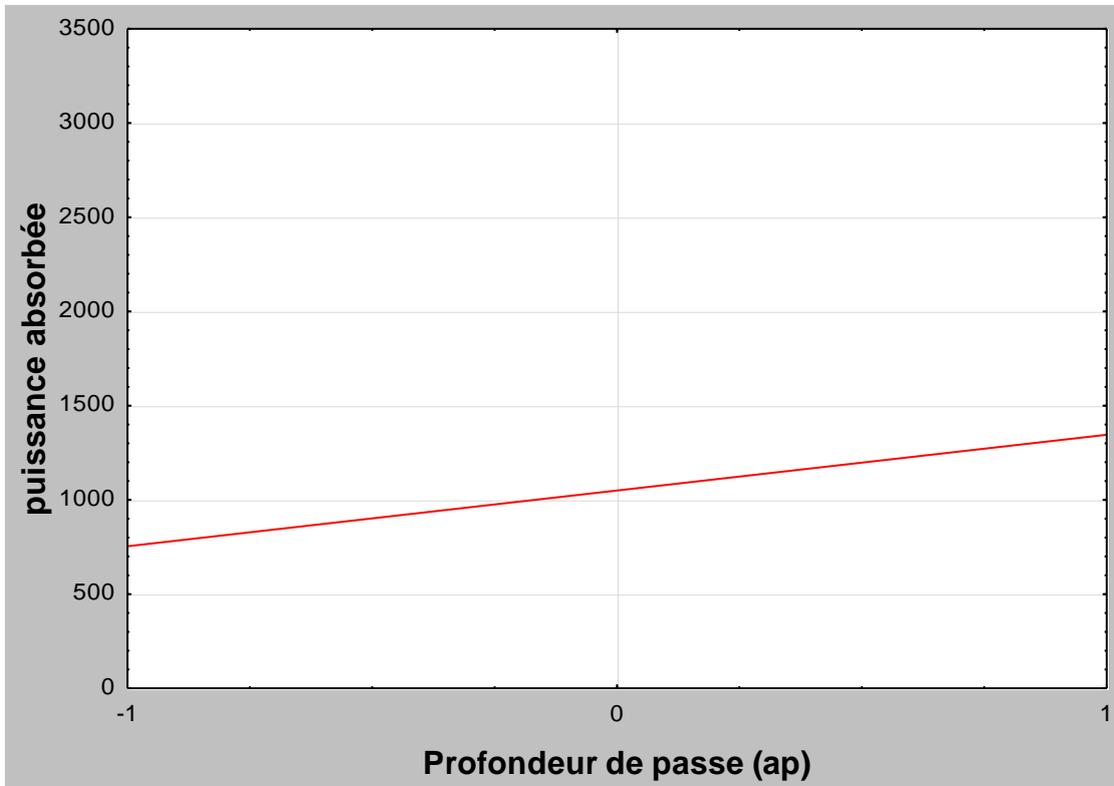


Figure IV. 3 : Modélisation de l'effet de (ap) par rapport à la puissance absorbée P.

❖ **Discussion :**

La courbe que représente la **figure IV.3** indique que la puissance absorbée est sensiblement affectée par l'avance et la profondeur de passe. À cause de l'augmentation de la profondeur de passe et de l'avance, la surface de la zone de contact outil-copeau augmente ce qui rend la puissance absorbée croissante.

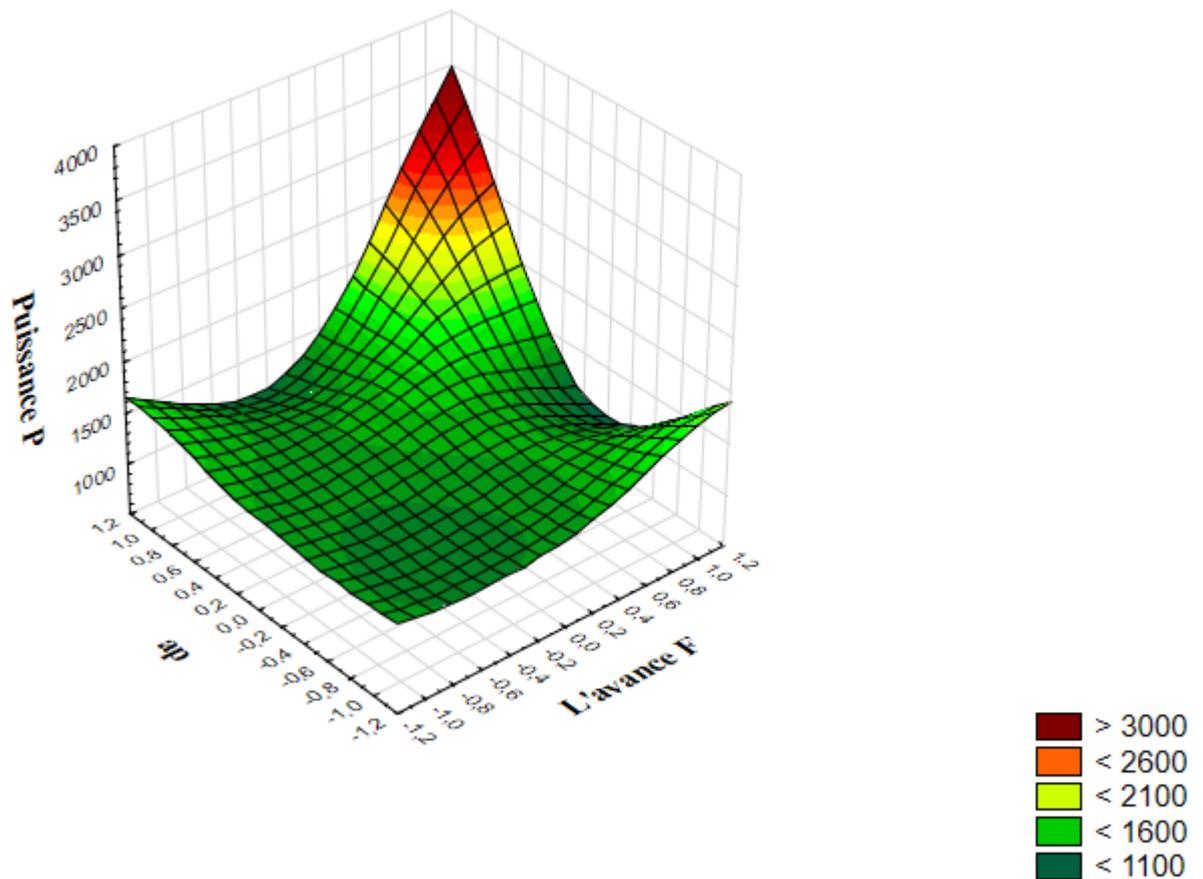


Figure IV. 4 : Graphe de surface de réponse de P en fonction de ap et F.

❖ Discussion :

La figure IV.4 nous permet d'apprécier l'influence de la profondeur de passe (**ap**) et l'avance (**F**). L'analyse de la courbe montre que la profondeur de passe et l'avance ont un effet important sur la puissance absorbée (**P**). On remarque que la puissance absorbée (**P**) augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe et l'avance.

La valeur minimale de la puissance absorbée (**P**)=390w est observée avec la plus basse d'avance **0.03mm/dent**, et la section du copeau. La valeur maximale **P=3060w** atteint la valeur maximale de **F=0.15mm/dent**.

IV.4.1.2 Pour la puissance de coupe (Puissance utile) :

Les valeurs sont données dans les tableaux IV.4 et IV.5. Lorsque les **P-values** sont

inférieures à **0,05** (ou **90%** confiance "niveau de signification")

Statistique	Value
Multiple R	0,952138922
Multiple R ²	0,906568526
R ² ajusté	0,820923009
F(15,8)	10,5851252
P	0,000144447302
Estimation de l'erreur de t Student	317,452714

Tableau IV. 4 : L'analyse de la variance.

Tableau IV. 5 : Importance des coefficients du modèle.

N° essai= 24		b*	Err Std.b*	B	Err Std.b	t(8)	P-value
Moyenne				1251,667	129,5995	9,65796	0,000001
Hv*F*Vc	X1*X2*X3	0,397443	0,109234	369,705	101,6104	3,63846	0,003398
ap	X4	0,315572	0,089503	267,599	75,8970	3,52582	0,004178
Hv*F	X1*X2	0,342083	0,091012	307,676	81,8578	3,75867	0,002728
Hv *VC	X1*X3	-0,481508	0,097633	-433,078	87,8130	-4,93182	0,000347
F *ap	X2*X4	0,601498	0,164047	541,000	147,5472	3,66663	0,003227
F*Vc*ap	X2*X3*X4	-0,529133	0,109234	-492,205	101,6104	-4,84404	0,000402
Hv*F*Vc*ap	X1*X2*X3*X4	0,392279	0,097191	364,902	90,4085	4,03615	0,001651
Hv ²	X1 ²	0,347335	0,088556	589,067	150,1879	3,92220	0,002027
F*ap	X2*X4	0,028171	0,151893	26,205	141,2923	0,18547	0,855960
F*Vc*ap	X2*X3*X4	0,199116	0,096634	168,847	81,9440	2,06052	0,061714
Hv*ap	X1*X4	0,192537	0,097633	173,172	87,8130	1,97205	0,072099

➤ (F(7,16)=33.55 ; p<0.001) : le model de régression est significatif.

➔ La profondeur de passe **ap**, prédisent significativement la puissance de coupe.

➤ **R²** : coefficient de détermination :

➔ **R²=0.91** : l'ensemble de ces quatre variables expliquent **91%** de la variance de la

puissance de coupe.

➤ **b*** : Bêta standardisé :

➔ (**b*** de la profondeur de passe (**ap**)= **0.32** ; **t(8)**=**3.53** ; **p**<**0.001**) : la section du copeau a un impact significatif sur la puissance de coupe.

L'analyse initiale des réponses obtenues inclut tous les paramètres et leurs interactions. Les modèles sont réduits en éliminant les termes n'ayant aucun effet significatif sur les réponses (Quelques valeurs en noir ayant un niveau inférieur à l'intervalle de confiance sont négligeables et ne sont pas prises en compte). Après élimination de tous les facteurs non significatifs, la puissance de coupe est donc exprimée par le modèle suivant :

$$P_c = 1251.66 + 369.7 X_1 * X_2 * X_3 + 267.6 X_4 + 307.67 X_1 * X_2 - 433.1 X_1 * X_3 + 541 X_2 * X_4 - 492.2 X_2 * X_3 * X_4 + 364.9 X_1 * X_2 * X_3 * X_4 + 589.06 X_1^2$$

Pour **X4**=-1, la puissance utile (**Pc**) est minimisée.

2) Les graphes des effets des facteurs et les surfaces de réponses obtenus :

Pour visualiser l'influence des facteurs sur la puissance de coupe (**Pc**), les graphes des effets et les surfaces de réponse (**3D**) sont présentées sur les figures suivantes :

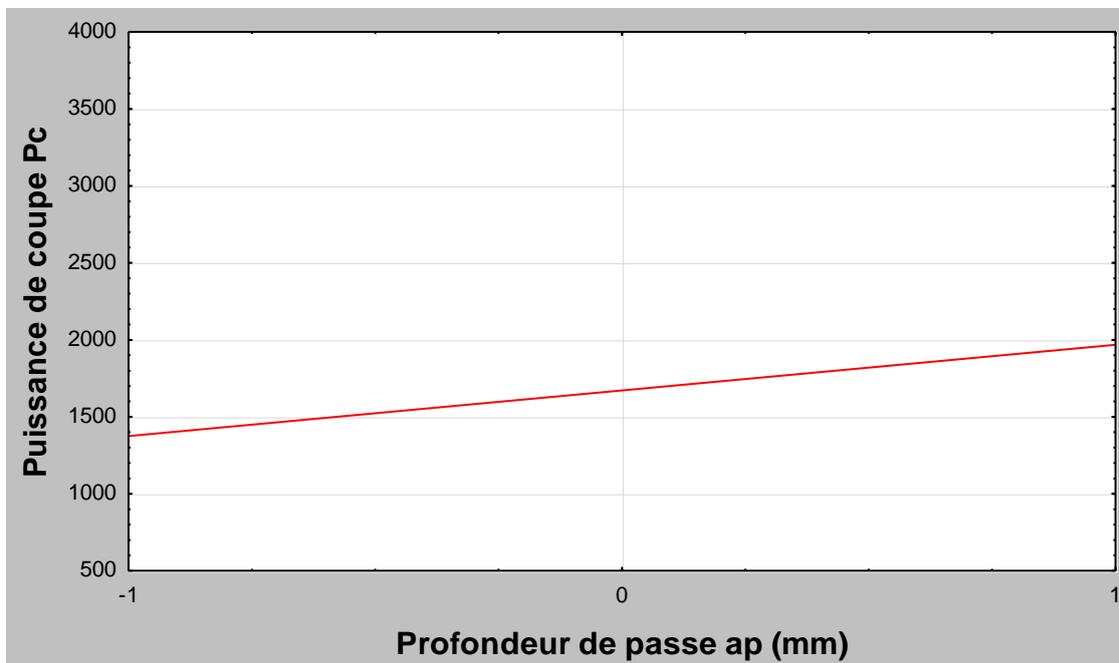


Figure IV. 5 : Modélisation de l'effet de (**ap**) par rapport à la puissance de coupe **Pc**.

❖ Discussion :

La figure IV.5 indique que la puissance de coupe est affectée par sa vitesse. Ce graphe montre que l'augmentation de la profondeur de passe provoque l'augmentation de la puissance également.

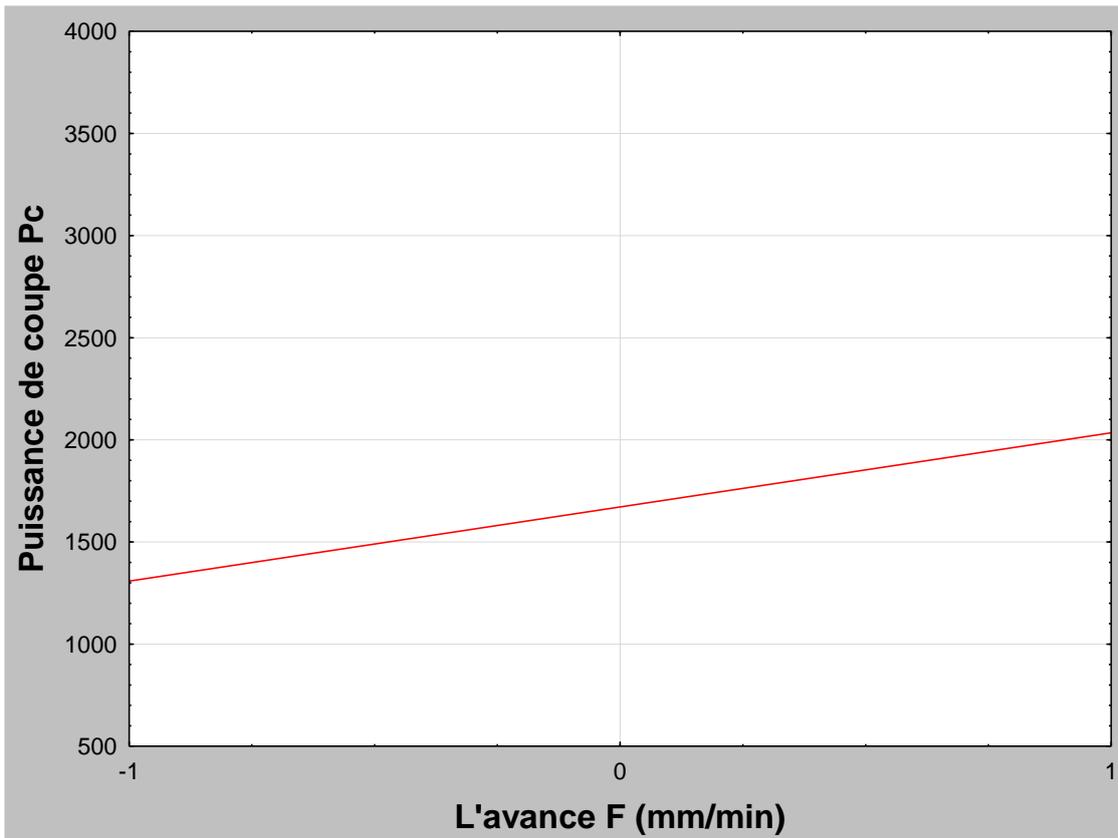


Figure IV. 6 : Modélisation de l'effet de (F) par rapport à la puissance de coupe P_c .

❖ Discussion :

La figure IV.6 montre que la puissance de coupe est fortement influencée par la profondeur de passe. À mesure que la profondeur de passe augmente, automatiquement l'avance augmente, ce qui entraîne une augmentation de la puissance de coupe.

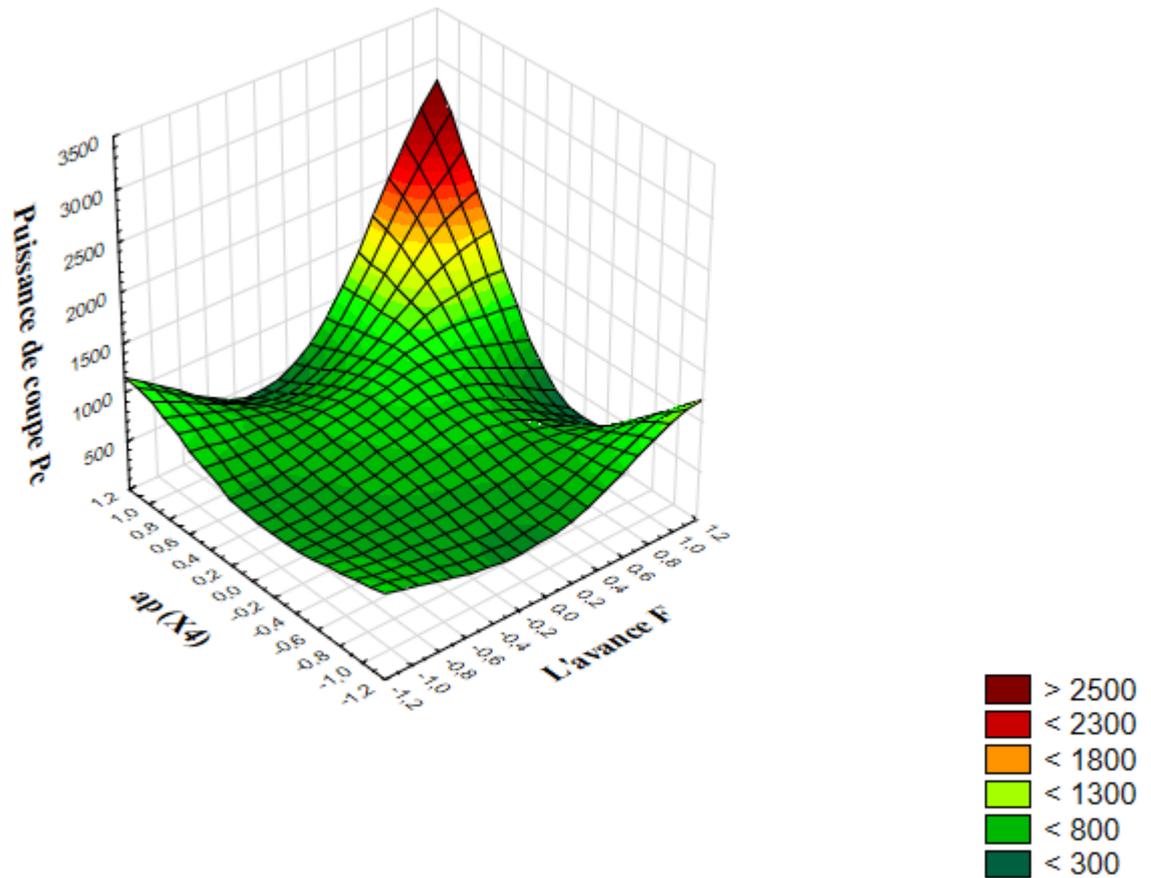


Figure IV. 7 : Graphe de surface de réponse de Pc en fonction de ap et F.

❖ Discussion :

La **figure IV.7** représente les influences de la profondeur de passe (**ap**) et de l’avance (**F**) sur la puissance de coupe. L’analyse de cette courbe montre que la profondeur de passe a un effet très significatif, l’avance à un effet important sur la puissance de coupe.

IV.4.1.3 Pour l’effort de coupe Fc :

Les valeurs sont données dans les tableaux **IV.6** et **IV.7**. Lorsque les **P-values** sont inférieures à **0,05** (ou **90%** confiance "niveau de signification").

Tableau IV. 6 :L'analyse de la variance.

Statistique	Value
Multiple R	0,980578
Multiple R ²	0,961533
R ² ajusté	0,873608
F(15,8)	10,93589
P	0,001834

Estimation de l'erreur de t Student

215,7469

Tableau IV. 7 : Importance des coefficients du modèle.

N° essai= 24		b*	Err Std.b*	b	Err Std.b	t(8)	P-value
Moyenne				354,720	88,0783	4,02733	0,005013
Hv*F	X1*X2	0,448513	0,087483	326,335	63,6521	5,12686	0,001358
Hv*ap	X1*X4	0,379905	0,128064	276,417	93,1785	2,96653	0,020910
Hv ²	X1 ²	0,371605	0,076311	509,829	104,6955	4,86963	0,001815
Hv*Vc	X1*X3	-0,472126	0,095179	-343,516	69,2519	-4,96039	0,001637
ap	X4	0,349441	0,082507	239,710	56,5983	4,23529	0,003863
F*ap	X2*X4	0,807495	0,292075	587,529	212,5124	2,76468	0,027907
F*Vc*ap	X2*X3*X4	-0,457000	0,177805	-343,893	133,7984	-2,57024	0,036995
Hv*F*Vc*ap	X1*X2*X3*X4	0,439098	0,152362	330,422	114,6531	2,88193	0,023586
Vc	X3	-0,101338	0,150737	-69,516	103,4032	-0,67228	0,522967
Hv	X1	0,285668	0,123242	195,963	84,5420	2,31794	0,053557
F	X2	0,132501	0,146073	90,894	100,2036	0,90709	0,394512
F*Vc	X2*X3	-0,374243	0,189266	-272,297	137,7086	-1,97734	0,088528
Vc*ap	X3*X4	0,064780	0,105526	47,134	76,7800	0,61388	0,558710
Hv*F*Vc	X1*X2*X3	0,256834	0,177805	193,268	133,7984	1,44447	0,191834
Hv*F*ap	X1*X2*X4	-0,442403	0,293733	-332,909	221,0348	-1,50614	0,175754
Hv*Vc*ap	X1*X3*X4	-0,370252	0,203132	-278,615	152,8571	-1,82272	0,111125

➤ (F(15,8)=10.94 ; p<0.001) : le model de régression est significatif.

➔ La profondeur de passe **ap** et **Hv²** prédisent significativement l'effort de coupe.

➤ **R² : coefficient de détermination :**

➔ **R²=0.96** : l'ensemble de ces quatre variables expliquent **96%** de la variance de l'effort de coupe.

➤ **b* : Bêta standardisé :**

➔ (**b* de La profondeur de passe (ap)= 0.35 ; t(8)=4.24 ; p<0.001**) : la profondeur de passe a un impact significatif sur l'effort de coupe.

➔ (**b* de (Hv²)= 0.37 ; t(8)=4.87 ; p<0.05**) : **Hv²** a un impact significatif sur l'effort de coupe.

L'analyse initiale des réponses obtenues inclut tous les paramètres et leurs interactions. Les modèles sont réduits en éliminant les termes n'ayant aucun effet significatif sur les réponses (Quelques valeurs en noir ayant un niveau inférieur à l'intervalle de confiance sont négligeables et ne sont pas prises en compte). Après élimination de tous les facteurs non significatifs, l'effort

de coupe est donc exprimé par le modèle suivant :

$$F_c = 354.7 + 326.3 x_1 * x_2 + 276.4 x_1 * x_4 + 509.8 x_1^2 - 343.5 x_1 * x_3 + 239.7 x_4 + 587.5 x_2 * x_4 - 343.89 x_2 * x_3 * x_4 + 330.4 x_1 * x_2 * x_3 * x_4 + 195.96 x_1 + 90.89 x_2 + 47.134 x_3 * x_4$$

Pour $X_1=1$ et $X_4=-1$, l'effort de coupe (F_c) est minimisé.

3) Les graphes des effets des facteurs et les surfaces de réponses obtenus :

Pour visualiser l'influence des facteurs sur l'effort de coupe (F_c), les graphes des effets et les surfaces de réponse (3D) sont présentées sur les figures suivantes :

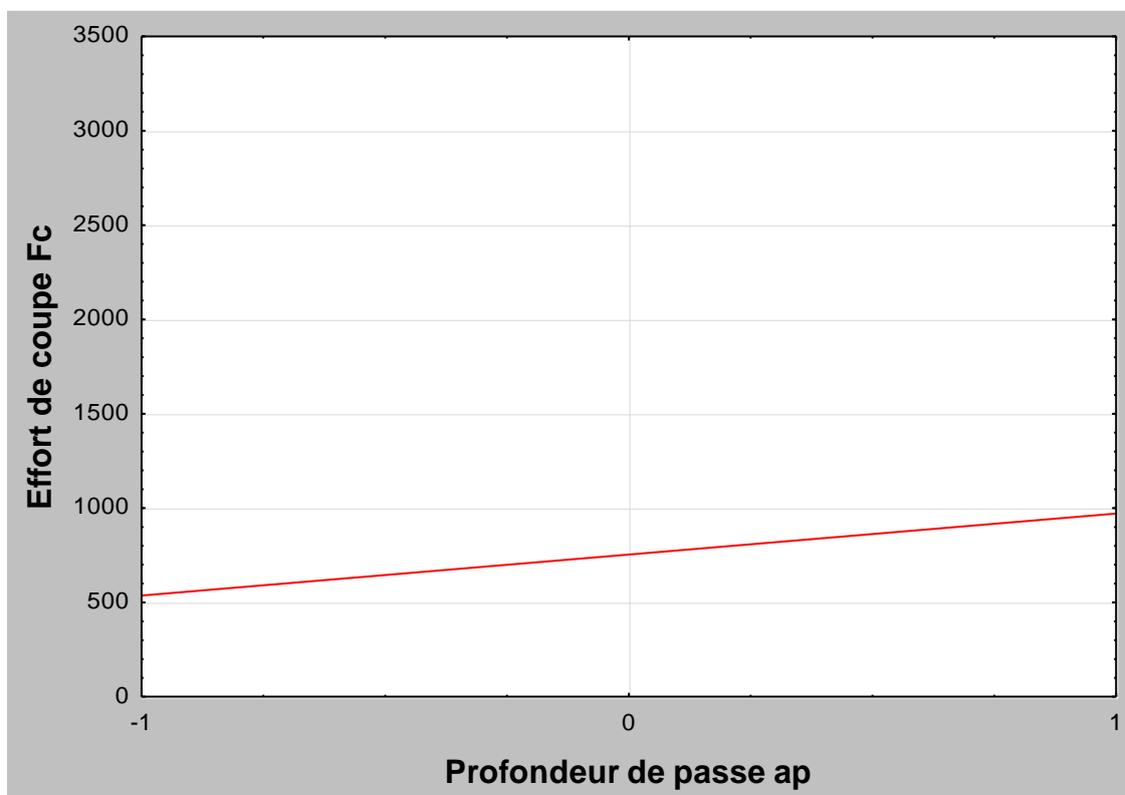


Figure IV. 8 : Modélisation de l'effet de (a_p) par rapport à l'effort de coupe F_c (en N)

❖ Discussion :

Dans la **figure IV.8**, l'effet principal pour l'effort de coupe (F_c) est représenté par la courbe. Il est clairement observé que l'effet de l'avance sur les efforts de coupe a été significatif pour des avances supérieures à **0,15 mm/min**, tandis qu'à des valeurs inférieures on constate un léger changement des efforts de coupe.

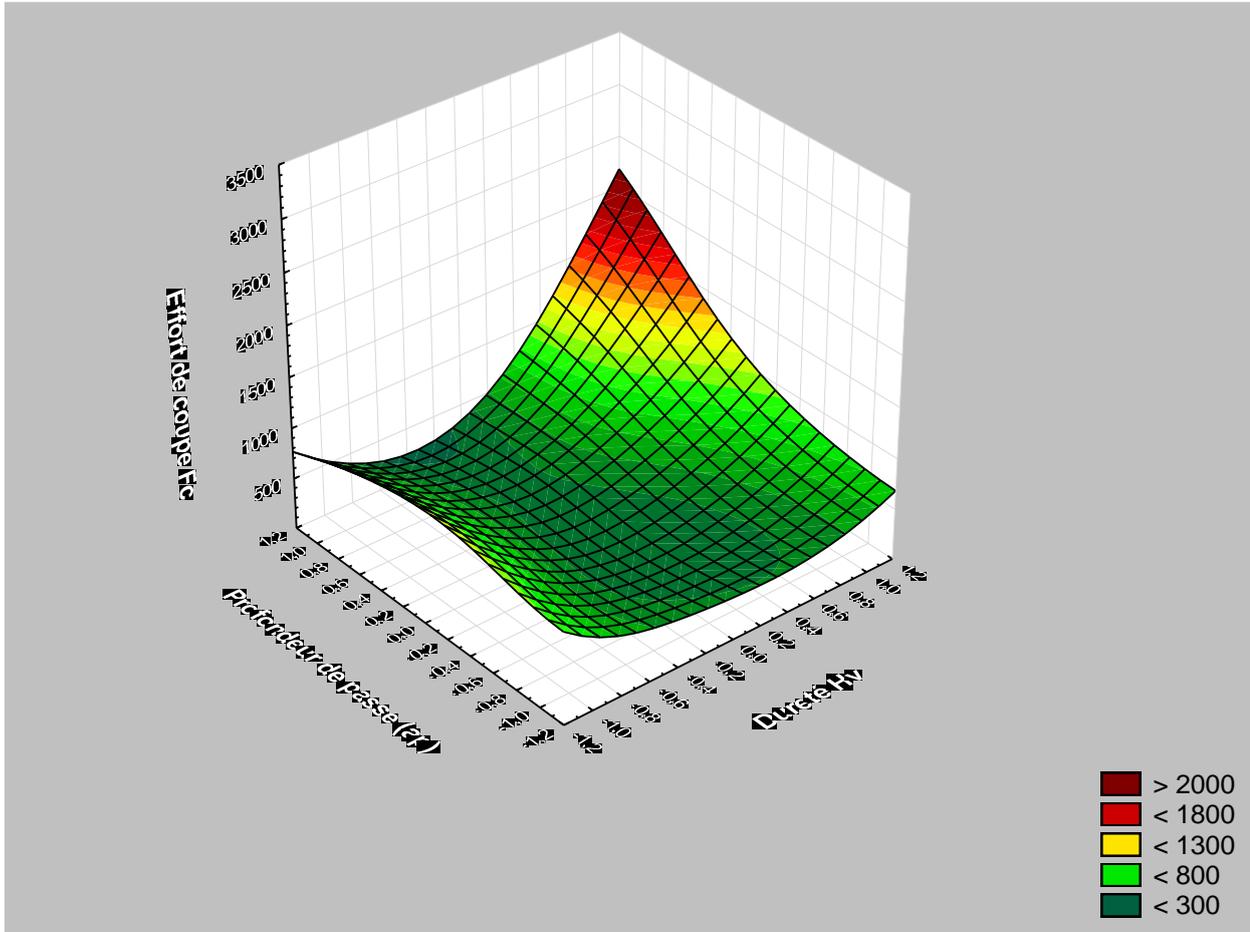


Figure IV. 9 : Graphe de surface de réponse de Fc en fonction de Hv et ap.

❖ **Discussion :**

La courbe en 3D de la surface de réponse montre que l’effort de coupe est plus sensible à l’augmentation de la profondeur de passe (ap).

IV.4.1.4 Pour la rugosité Ra :

Les valeurs sont données dans les tableaux IV.8 et IV.9. Lorsque les **P-values** sont inférieures à **0,05** (ou **90%** confiance "niveau de signification").

Tableau IV. 8 :L'analyse de la variance.

Statistique	Value
Multiple R	0,930188
Multiple R ²	0,8652496
R ² ajusté	0,6556379
F(15,8)	4,1278691
P	0,0191143
Estimation de l’erreur de t Student	3,4122525

Tableau IV. 9 : Importance des coefficients du modèle.

➤ ($F(15,8)=4.13$; $p<0.001$) : le model de régression est significatif.

N° essai= 24		b*	Err Std.b*	b	Err Std.b	t(8)	P-value
Moyenne				5,46432	1,393046	3,92257	0,003497
F	X2	0,526656	0,158542	3,46169	1,042089	3,32187	0,008914
Hv*Vc*ap	X1*X3*X4	-0,924854	0,257346	-6,66851	1,855553	-3,59381	0,005804
Vc*ap	X3*X4	0,420127	0,164232	2,92899	1,144975	2,55813	0,030782
Hv*ap	X1*X4	0,428746	0,151898	2,98908	1,058983	2,82259	0,019962
Hv*F	X1*X2	0,410052	0,135164	2,85875	0,942321	3,03373	0,014161
Hv*Vc	X1*X3	-0,507518	0,149331	-3,53825	1,041085	-3,39862	0,007891
Hv	X1	0,107430	0,148906	0,70613	0,978751	0,72146	0,488943
Hv ²	X1 ²	0,245054	0,123412	3,22146	1,622370	1,98565	0,078344
ap	X4	0,208983	0,126514	1,37364	0,831569	1,65186	0,132956
Hv*F*Vc*ap	X1*X2*X3*X4	0,057244	0,139216	0,41275	1,003797	0,41119	0,690552
Hv*F*ap	X1*X2*X4	-0,234350	0,250007	-1,68974	1,802638	-0,93737	0,373038
F*ap	X2*X4	0,348739	0,219713	2,43130	1,531766	1,58725	0,146918
Hv*F*Vc	X1*X2*X3	-0,091656	0,157120	-0,66087	1,132891	-0,58335	0,573984
Vc (X3)	X3	0,253080	0,194567	1,66349	1,278884	1,30073	0,225666

➔ L' avance F, la dureté Hv et Hv*Vc prédisent significativement la rugosité.

➤ **R² : coefficient de détermination :**

➔ **R²=0.87** : l'ensemble de ces quatre variables expliquent **87%** de la variance de la rugosité.

➤ **b* : Bêta standardisé :**

➔ (**b* de l'avance (F)= 0.53 ; t(8)=3.32 ; p<0.001**) : la dureté a un impact significatif sur la rugosité.

L'analyse initiale des réponses obtenues inclut tous les paramètres et leurs interactions. Les modèles sont réduits en éliminant les termes n'ayant aucun effet significatif sur les réponses (Quelques valeurs en noir ayant un niveau inférieur à l'intervalle de confiance sont négligeables et ne sont pas prises en compte). Après élimination de tous les facteurs non significatifs, l'effort de coupe est donc exprimé par le modèle suivant :

➤ ($F(8,15)=11.73$; $p<0.001$) : le model de régression est significatif.

➔ La vitesse de coupe Vc, l'angle d'attaque Kr, Kr² et Hv*Vc prédisent significativement la rugosité.

➤ **R² : coefficient de détermination :**

→ $R^2=0.86$: l'ensemble de ces quatre variables expliquent **86%** de la variance de la rugosité.

➤ **b* : Bêta standardisé :**

→ **(b* de la dureté (Hv)= 0.63 ; t(16)=6.62 ; p<0.001)** : la dureté a un impact significatif sur la rugosité.

→ **(b* d'angle d'attaque (Kr)= -0.42 ; t(16)=-4.43 ; p<0.001)** : l'angle d'attaque a un impact significatif sur la rugosité.

L'analyse initiale des réponses obtenues inclut tous les paramètres et leurs interactions. Les modèles sont réduits en éliminant les termes n'ayant aucun effet significatif sur les réponses (les valeurs en noir ayant un niveau inférieur à l'intervalle de confiance sont négligeables et ne sont pas prises en compte). Après élimination de tous les facteurs non significatifs, l'effort de coupe est donc exprimé par le modèle suivant :

$$\mathbf{Ra = 5.46 + 3.46 x_2 - 6.668 x_1 * x_3 * x_4 + 2.9 x_3 * x_4 + 2.98 x_1 * x_4 + 2.86 x_1 * x_2 - 3.53 x_1 * x_3 + 3.22 x_1^2 + 2.43 x_2 * x_4}$$

Pour $X_1=1$, $X_2=-1$ et $X_3=1$, la rugosité (**Ra**) est minimisée.

1) Les graphes des effets des facteurs et les surfaces de réponses obtenues :

Pour visualiser l'influence des facteurs sur la rugosité (**Ra**), les graphes des effets et les surfaces de réponse (**3D**) sont présentées sur les figures suivantes :

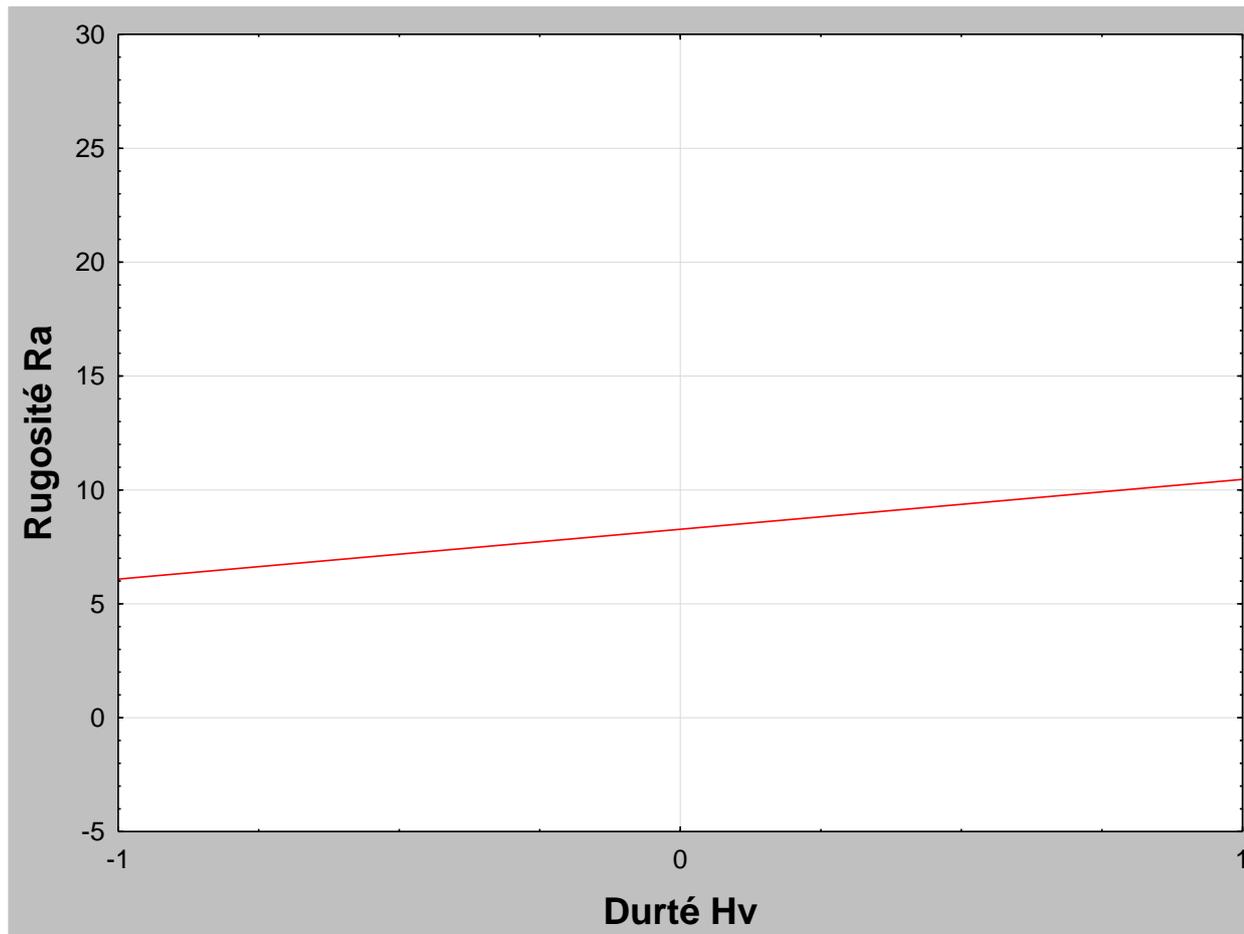


Figure IV. 10 : Modélisation de l'effet de (Hv) par rapport à la rugosité Ra.

❖ Discussion :

La **figure IV.11** indique que la rugosité est significativement affectée par la dureté, là où on voit que cet effet est plus important. Ce graphique montre qu'il est clairement observé que plus la dureté du matériau est élevée, plus l'état de surface est rugueux.

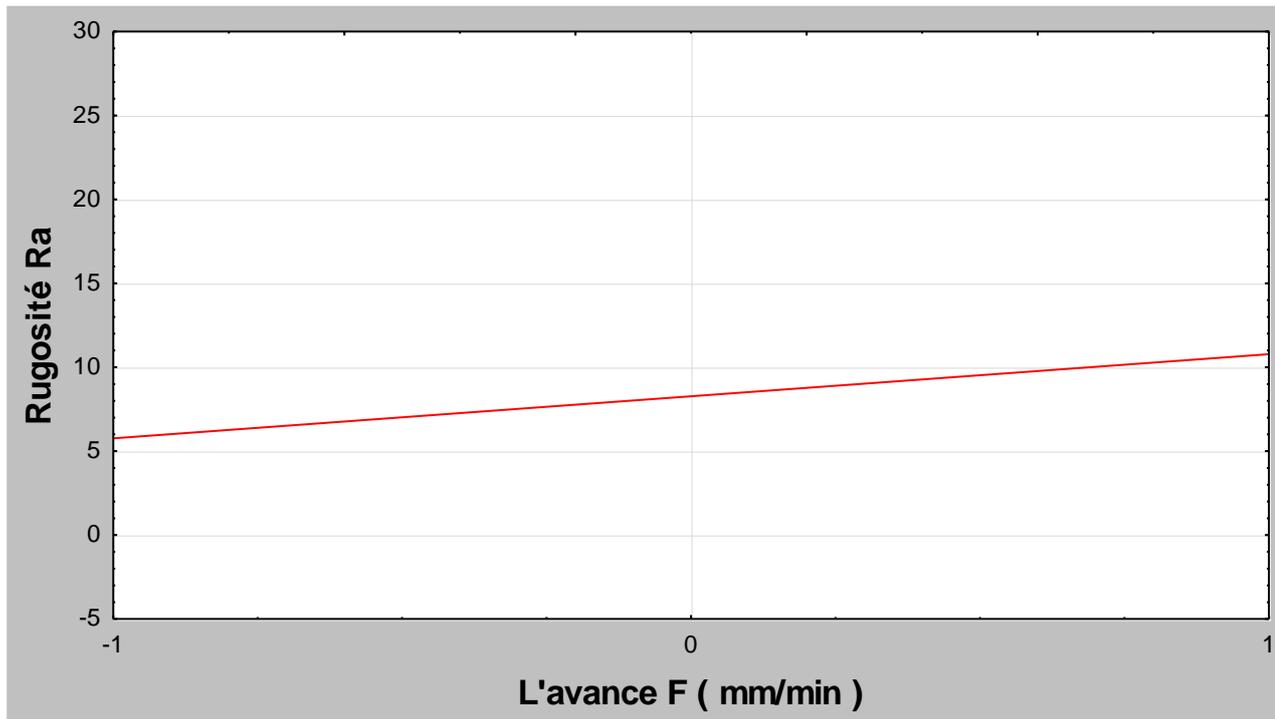


Figure IV. 11 : Modélisation de l'effet de (F) par rapport à la rugosité Ra (en micromètres)

❖ **Discussion :**

La **figure IV.12** indique que la rugosité est affectée par l'avance. Ce graphe montre que l'augmentation de la rugosité provoque l'augmentation de la puissance également.

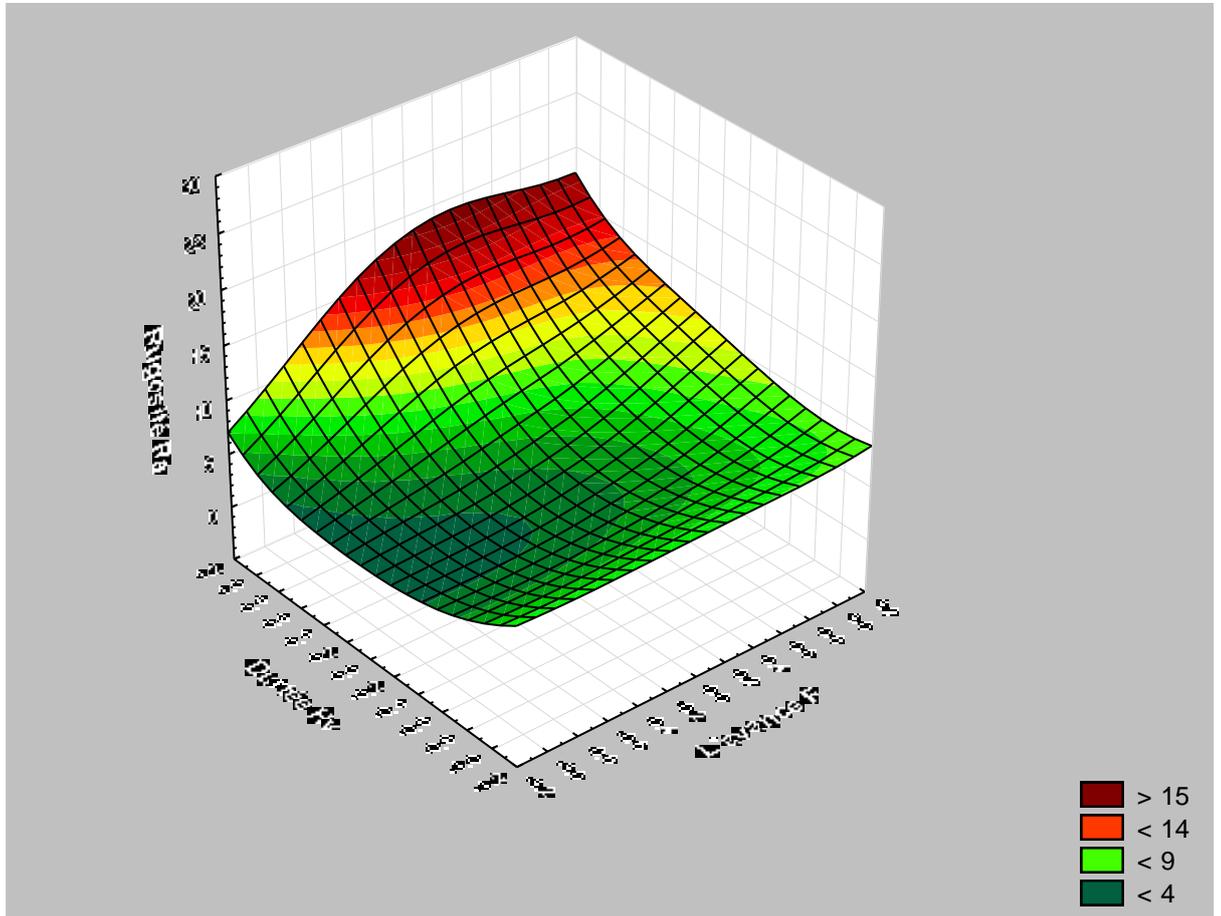


Figure IV. 12 : Graphe de surface de réponse de Ra en fonction de Hv et F.

❖ **Discussion :**

On remarque que les valeurs de la rugosité suivent la variation de l'avance, elles augmentent avec son augmentation et diminuent avec sa diminution, par contre on voit une légère augmentation avec la dureté.

IV.1 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre des différents résultats obtenus (expérimental et statiques) et leurs discussions. La modélisation par régression linéaire multiple nous a permis de déterminer l'influence des paramètres de coupe (la dureté, l'avance, vitesse de coupe, et la profondeur de passe) sur l'état de surface usinée, l'effort de coupe et la puissance de coupe.

Cette étude va ainsi permettre de choisir les conditions de coupe optimales en fonction de l'importance des critères de sélection définis par l'utilisateur entre état de surface, productivité, ou stabilité de l'usinage.

IV.1 Introduction :

Les essais de mise au point d'un produit ou d'un processus font partie intégrante du métier des ingénieurs. Ceux-ci sont souvent amenés à rechercher des valeurs des paramètres qui définissent les produits ou les paramètres de réglage des moyens de production afin d'obtenir les performances désirées.

Pour cela on utilise les techniques d'optimisation tel que les plans d'expériences qui est une suite d'essais entièrement organisée à l'avance de manière à déterminer, en un minimum d'essais et un maximum de précision, l'influence des différents paramètres possibles, pour optimiser les performances du système étudié. Les tables optimisées permettent une réduction considérable du temps et des ressources nécessaires pour réduire la variabilité de la réponse par rapport au plan d'expériences traditionnel.

Ce chapitre décrit les conditions et les procédures adoptées pour élaborer un modèle mathématique optimal représentant la relation de causalité entre la puissance absorbée **P**, la puissance de coupe **P_c**, l'effort de coupe **F_c**, la rugosité de surface **R_a** et les conditions de coupe. Les résultats atteints sont présentés et discutés.

IV.2 Choix d'un modèle :

La méthode des plans d'expériences repose essentiellement sur la création et l'exploitation de modèles de la fonction objective (réponse), tout en fournissant au moins un essai pour chaque combinaison de facteur. Il est donc naturel d'analyser dans les détails de cette composante primordiale, tout simplement par ce qu'elle permet une interprétation rapide.

Dans cette partie, on applique la méthode des plans d'expériences pour étudier le comportement des paramètres de coupe (un plan d'expérience optimal **B4** (présenté au chapitre **III**)) à **24** essais a été choisi de telle manière à assurer une meilleure précision des résultats.

Dans notre étude, on prend en considération quatre facteurs qui sont : la dureté (**HV**), l'avance (**F**), la vitesse de coupe (**Vc**) et la profondeur de passe (**ap**) comme des variables indépendantes, ce sont elles qui sont reliées à la réponse (variables dépendantes) par une équation de prédiction. Le diagramme expérimental ci-dessous représente tout ça :

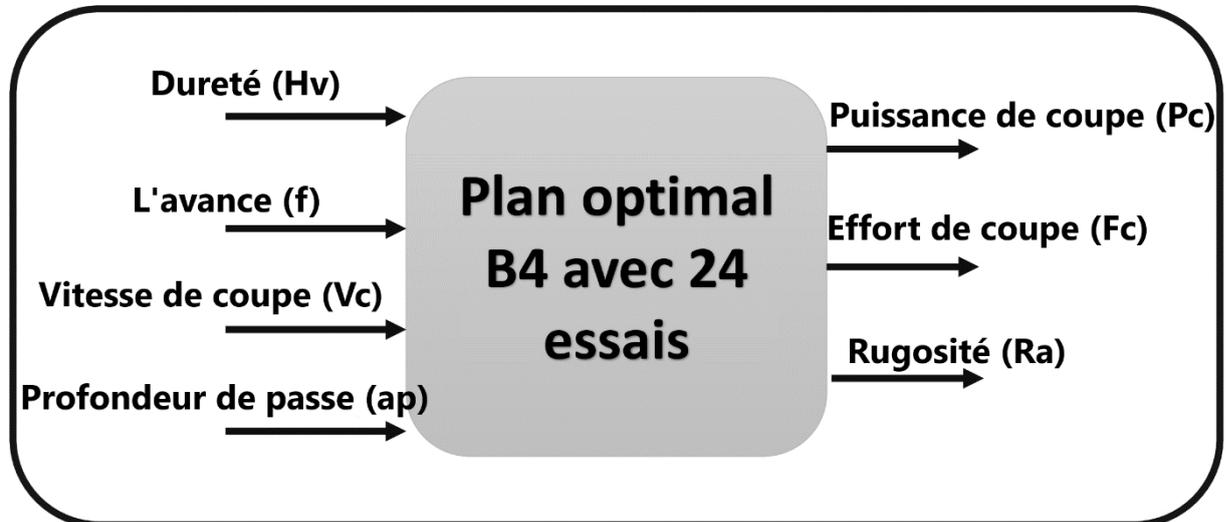


Figure IV. 1 : Diagramme expérimental.

IV.3 Résultats statistiques :

Un ensemble de **24 essais** a été fait et les résultats expérimentaux sont donnés dans le **tableau IV. 1**. Les traitements de données statistiques sont effectués en utilisant Multiple

régression (STATISTICA) et l'effet de chaque facteur et de ses interactions sont déterminés.

0

0.

Tableau IV. 1 : Résultats expérimentaux.

Essais	X1	X2	X3	X4	P0	P	Pc	Fc	Ra
1	+1	+1	+1	+1	410	3650	3240	1620	15,8040
2	+1	+1	+1	-1	410	1300	890	445	10,4786
3	+1	+1	-1	+1	380	3440	3060	3060	27,6240
4	+1	+1	-1	-1	380	1360	980	980	6,3740
5	+1	-1	+1	+1	410	1210	800	400	0,5680
6	+1	-1	+1	-1	400	850	450	225	1,8543
7	+1	-1	-1	+1	360	1830	1470	1470	8,8685
8	+1	-1	-1	-1	360	1020	660	660	16,0070
9	-1	+1	+1	+1	1210	3000	1790	895	10,1346
10	-1	+1	+1	-1	1210	2700	1490	745	7,0930
11	-1	+1	-1	+1	700	1140	440	440	3,2690
12	-1	+1	-1	-1	700	1400	700	700	10,8016
13	-1	-1	+1	+1	710	1550	840	420	6,4130
14	-1	-1	+1	-1	710	1670	960	480	4,4596
15	-1	-1	-1	+1	700	1500	800	800	6,8986
16	-1	-1	-1	-1	700	1620	920	920	7,3910
17	+1	0	0	0	400	1650	1250	833.33	14,987
18	-1	0	0	0	410	1720	1310	873.33	6,7500
19	0	+1	0	0	720	1140	420	280	9,6373
20	0	-1	0	0	720	1350	630	420	3,6290

21	0	0	+1	0	710	1320	610	305	4,0400
22	0	0	-1	0	750	1140	390	390	6,4486
23	0	0	0	+1	730	1250	520	346,66	4,6020
24	0	0	0	-1	730	1310	580	386,66	4,4290

Avec :

- **X1 : Dureté Hv.**
- **X2 : L'avance (mm/min).**
- **X3 : Vitesse de coupe Vc (m/min).**
- **X4 : La profondeur de passe (mm).**
- **P0 : La puissance à vide (watt).**
- **Pc : La puissance de coupe (watt).**
- **P : La puissance absorbée (watt).**
- **Fc : L'effort de coupe (N).**
- **La rugosité arithmétique (µm).**

Avant de commencer l'usinage, nous avons mesuré la puissance à vide (**P0**). La puissance absorbée pendant l'usinage (**P**) est également mesurée. D'après ces deux mesures nous avons calculé la puissance de coupe (**Pc**) à l'aide de la formule suivante : **Pc=P-P0**.

Et l'effort de coupe (**Fc**) est calculé selon l'équation donnée au **chapitre II**.

IV.4 Analyse de régression :

L'analyse de régression est utilisée pour la modélisation et l'analyse de plusieurs variables où il y a une relation entre une variable dépendante et un ou plusieurs variables indépendantes. Dans notre étude, les variables dépendantes sont la puissance de coupe (**Pc**), la puissance absorbée (**P**), l'effort tangentiel (**Fc**) et la rugosité (**Ra**), alors que les variables indépendantes sont la dureté (**Hv**), l'avance (**F**), la vitesse de coupe (**Vc**) et la Profondeur de passe (**ap**).

Pour l'obtention des modèles prédictifs de la puissance absorbée, la puissance de coupe, de l'effort de coupe et de la rugosité, l'équation de régression linéaire suivante a été utilisée :

$$k \quad k \quad k \quad k$$

$$Y = b_0 + \sum_{i=1} (b_i X_i) + \sum_{i=1} (b_{ij} X_i X_j) + \sum_{i=1} (b_{ijw} X_i X_j X_w) + \sum_{i=1} (b_{ii} X_i^2)$$

Avec :

- **Y** : La réponse.

- **b₀** : La valeur de la réponse au centre du domaine d'étude.

- **X_{i,j}** : Le niveau attribué au facteur i, j.

- **b_{i,j}** : L'effet du facteur i, j.

- **b_{ij}** : L'interaction entre les facteurs i et j.

- **b_{ijw}** : L'interaction entre les facteurs i et j et w.

IV.4.1 Les résultats :**IV.4.1.1 Pour la puissance absorbée :**

Les significations statistiques des modèles ajustés ont été évaluées par les **P-values** de l'analyse de régression. Les valeurs sont données dans les tableaux **IV.2** et **IV.3**. Lorsque les **P-values** sont inférieures à **0,05** (ou **95%** confiance "niveau de signification"), les modèles obtenus sont considérés comme statistiquement significatifs (les valeurs en rouge). Elle démontre que les termes choisis dans le modèle ont des effets significatifs sur les réponses.

L'autre coefficient important est le coefficient de détermination **R²** qui est une mesure du degré d'ajustement du modèle. Lorsque **R²** se rapproche de l'unité, meilleure est la réponse du modèle qui correspond aux données réelles.

Le test de Fisher-Snedecor **F** avec (**F (15, 8)**) le chiffre **15** représente le degré de liberté d'un modèle et le chiffre **8** représente l'erreur expérimentale. Ce test nous permet d'avoir est-ce que le modèle est significatif ou pas.

Tableau IV. 2 : L'analyse de la variance.

Statistique	Value
Multiple R	0,96744759
Multiple R²	0,93595485
R²ajusté	0,70539229
F(15,8)	4,05943992
P	0,06375101
Estimation de l'erreur de t Student	404,866853

N° essai= 24		b*	Err Std.b*	B	Err Std.b	t(8)	P-value
Moyenne				545,625	195,9148	2,78501	0,021226
F	X2	0,361069	0,114403	304,444	96,4618	3,15611	0,011623
ap	X4	0,351186	0,114403	296,111	96,4618	3,06972	0,01336
Hv*ap	X1*X4	0,271854	0,114403	243,125	102,3132	2,37628	0,04148
Hv ²	X1 ²	0,404636	0,114403	361,875	102,3132	3,53693	0,006345
F ²	X2 ²	0,435482	0,152686	734,375	257,4825	2,85214	0,019023
Vc ²	X3 ²	-0,012231	0,152686	-20,625	257,4825	-0,0801	0,937909
ap ²	X4 ²	-0,027055	0,152686	-45,625	257,4825	-0,1772	0,863278
F*Vc*ap	X2*X3*X4	0,002594	0,152686	4,375	257,4825	0,01699	0,986814
Hv*F*Vc*ap	X1*X2*X3*X4	0,211753	0,114403	189,375	102,3132	1,85093	0,097206
Hv*F*ap	X1*X2*X4	0,248093	0,114403	221,875	102,3132	2,16859	0,058247
Hv*F*Vc	X1*X2*X3	0,025858	0,114403	23,125	102,3132	0,22602	0,826234
Vc*ap	X3*X4	-0,210355	0,114403	-188,125	102,3132	-1,83872	0,099113
F*ap	X2*X4	0,108716	0,114403	91,667	96,4618	0,95029	0,366784
F*Vc	X2*X3	0,233904	0,114403	197,222	96,4618	2,04456	0,071237
Hv	X1	-0,210793	0,291551	-1,51989	2,102185	-0,72300	0,490272

Tableau IV. 3 : Importance des coefficients du modèle.

Avec :

- **b*** : Bêta standardisé.
- **Err std. b*** : Erreur type de bêta.
- **b** : Effet des facteurs sur la réponse.
- **Err std. b** : Erreur type de b.

($F(15,8)=4.06$; $p<0.001$) : le model de régression est significatif.

→ L'avance **F**, la profondeur de passe **ap**, **Hv*ap** et **Hv²** et **F²** prédisent significativement la puissance absorbée.

R² : coefficient de détermination :

→ **R²=0.94** : l'ensemble de ces quatre variables expliquent **94%** de la variance de la puissance absorbée.

b* : Bêta standardisé :

- **(b* de l'avance (Vc)= 0.36 ; t(8)=3.16 ; p<0.001)** : l'avance un impact significatif sur la puissance absorbée.
- **(b* de la profondeur de passe (ap)= 0.35 ; t(8)=3.07 ; p<0.001)** : la profondeur de passe un impact significatif sur la puissance absorbée.
- **(b* de (F²)= 0.44 ; t(8)=2.85 ; p<0.05)** : (F²) a un impact significatif sur la puissance absorbée.

L'analyse initiale des réponses obtenues inclut tous les paramètres et leurs interactions. Les modèles sont réduits en éliminant les termes n'ayant aucun effet significatif sur les réponses (Quelques valeurs en noir ayant un niveau inférieur à l'intervalle de confiance sont négligeables et ne sont pas pris en compte). Après élimination de tous les facteurs non significatifs, la puissance absorbée est donc exprimée par le modèle suivant :

$$\begin{aligned}
 P = & 545.6 + 3045.4 X_2 + 296.1 X_4 + 243.1 X_1 * X_4 + 361.87 X_1^2 + 734.37 X_2^2 + \\
 & 189.37 X_1 * X_2 * X_3 X_4 + 221.87 X_1 * X_2 * X_4 + 197.2 X_2 * X_3 + 91.66 X_2 * X_4 + \\
 & 23.1 X_1 * X_2 * X_3
 \end{aligned}$$

Pour $X_3 = -1$ et $X_4 = 0$, la puissance absorbée (**P**) est minimisée.

1) Les graphes des effets des facteurs et les surfaces de réponses obtenues :

Pour visualiser l'influence des facteurs sur la puissance absorbée (**P**), les graphes des effets et les surfaces de réponse (**3D**) sont présentées dans les figures suivantes :

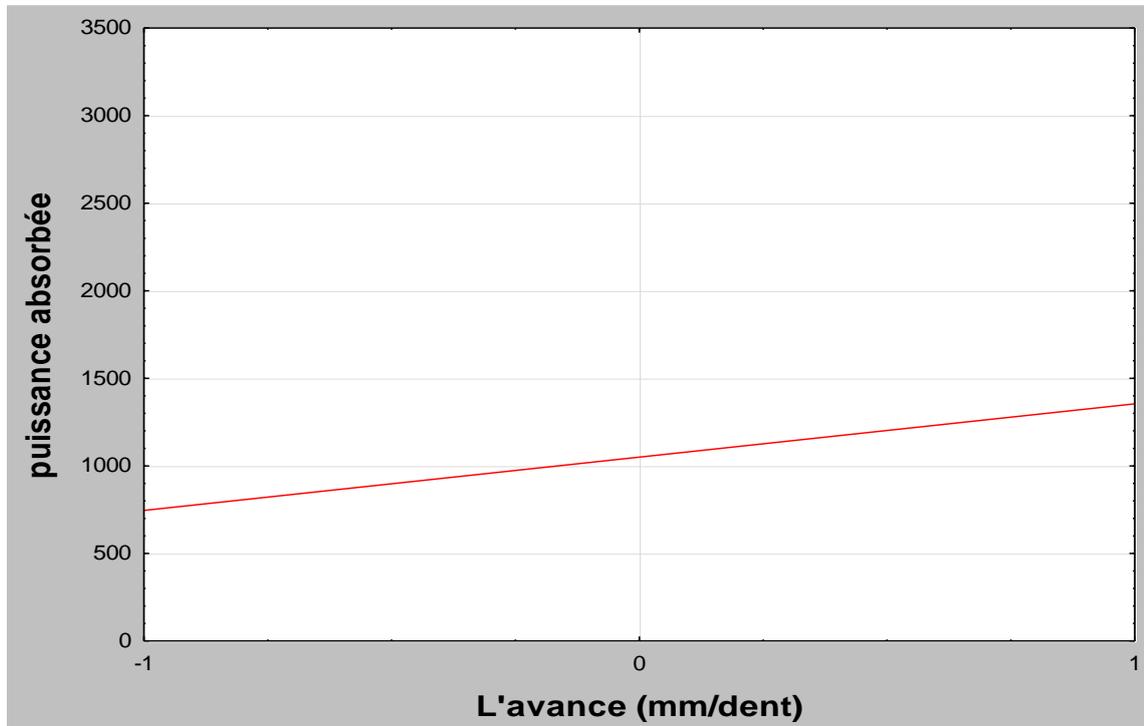


Figure IV. 2 : Modélisation de l'effet de l'avance (F) par rapport à la puissance absorbée P (en watt)

❖ Discussion :

Ce premier graphe illustre l'évolution de la puissance absorbée en fonction de l'avance [0.03 ; 0.09 ; 0.15] en mm/dent. Ces résultats montrent qu'avec l'augmentation de l'avance, la puissance absorbée P devient très importante.

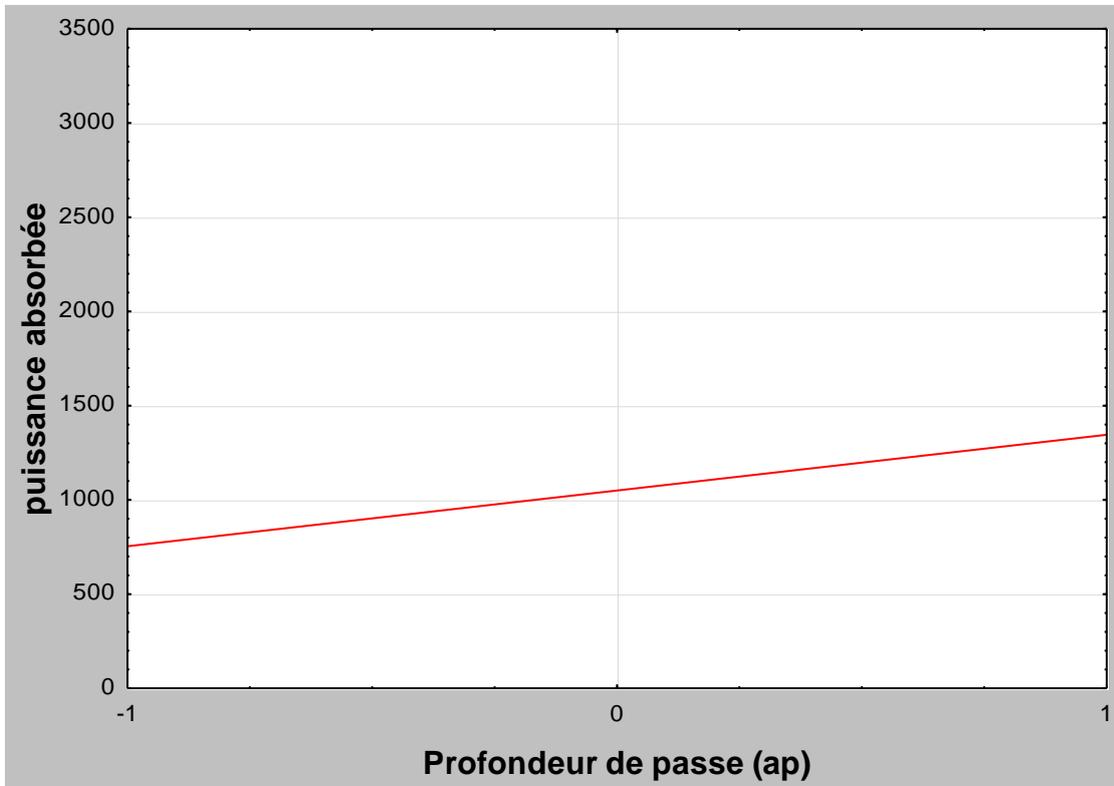


Figure IV. 3 : Modélisation de l'effet de (ap) par rapport à la puissance absorbée P.

❖ **Discussion :**

La courbe que représente la **figure IV.3** indique que la puissance absorbée est sensiblement affectée par l'avance et la profondeur de passe. À cause de l'augmentation de la profondeur de passe et de l'avance, la surface de la zone de contact outil-copeau augmente ce qui rend la puissance absorbée croissante.

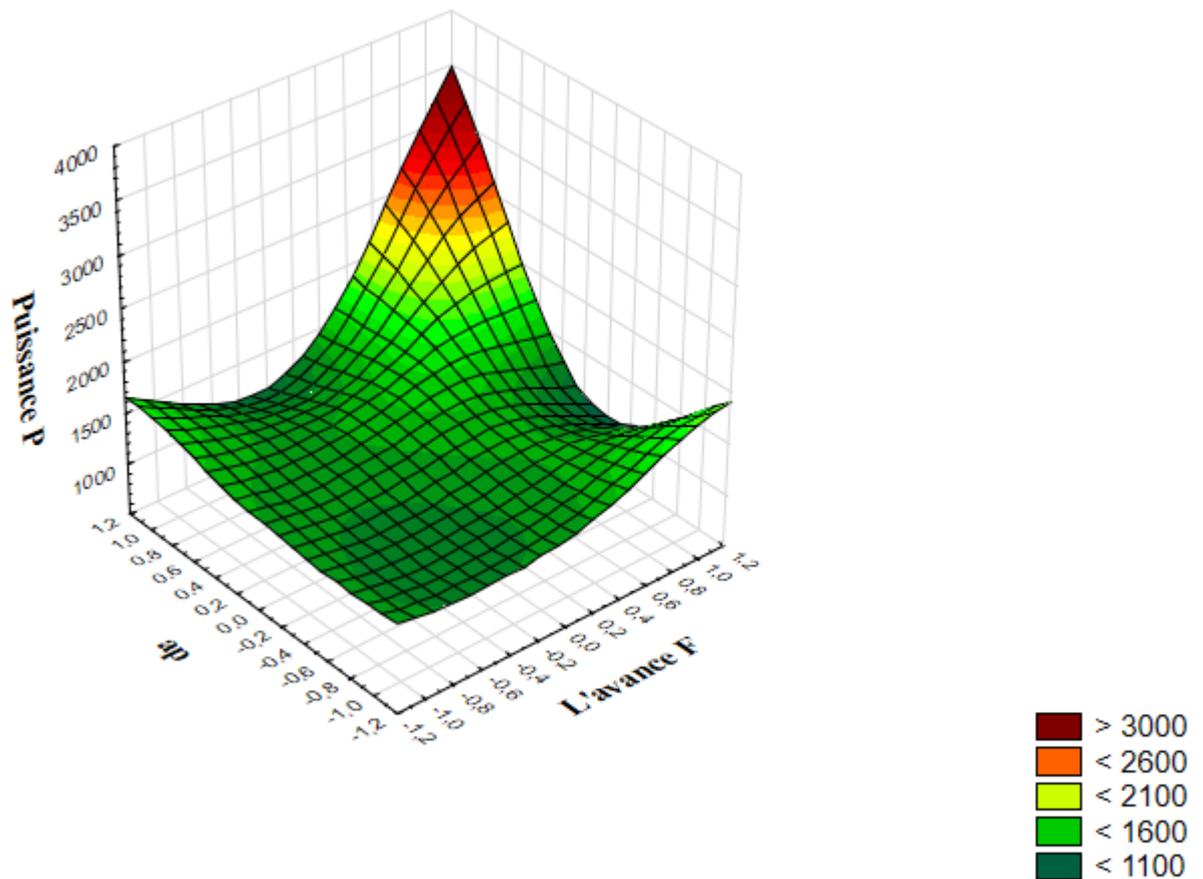


Figure IV. 4 : Graphe de surface de réponse de P en fonction de ap et F.

❖ Discussion :

La figure IV.4 nous permet d'apprécier l'influence de la profondeur de passe (**ap**) et l'avance (**F**). L'analyse de la courbe montre que la profondeur de passe et l'avance ont un effet important sur la puissance absorbée (**P**). On remarque que la puissance absorbée (**P**) augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe et l'avance.

La valeur minimale de la puissance absorbée (**P**)=390w est observée avec la plus basse d'avance **0.03mm/dent**, et la section du copeau. La valeur maximale **P=3060w** atteint la valeur maximale de **F=0.15mm/dent**.

IV.4.1.2 Pour la puissance de coupe (Puissance utile) :

Les valeurs sont données dans les tableaux IV.4 et IV.5. Lorsque les **P-values** sont

inférieures à **0,05** (ou **90%** confiance "niveau de signification")

Statistique	Value
Multiple R	0,952138922
Multiple R ²	0,906568526
R ² ajusté	0,820923009
F(15,8)	10,5851252
P	0,000144447302
Estimation de l'erreur de t Student	317,452714

Tableau IV. 4 : L'analyse de la variance.

Tableau IV. 5 : Importance des coefficients du modèle.

N° essai= 24		b*	Err Std.b*	B	Err Std.b	t(8)	P-value
Moyenne				1251,667	129,5995	9,65796	0,000001
Hv*F*Vc	X1*X2*X3	0,397443	0,109234	369,705	101,6104	3,63846	0,003398
ap	X4	0,315572	0,089503	267,599	75,8970	3,52582	0,004178
Hv*F	X1*X2	0,342083	0,091012	307,676	81,8578	3,75867	0,002728
Hv *VC	X1*X3	-0,481508	0,097633	-433,078	87,8130	-4,93182	0,000347
F *ap	X2*X4	0,601498	0,164047	541,000	147,5472	3,66663	0,003227
F*Vc*ap	X2*X3*X4	-0,529133	0,109234	-492,205	101,6104	-4,84404	0,000402
Hv*F*Vc*ap	X1*X2*X3*X4	0,392279	0,097191	364,902	90,4085	4,03615	0,001651
Hv ²	X1 ²	0,347335	0,088556	589,067	150,1879	3,92220	0,002027

F*ap	X2*X4	0,028171	0,151893	26,205	141,2923	0,18547	0,855960
F*Vc*ap	X2*X3*X4	0,199116	0,096634	168,847	81,9440	2,06052	0,061714
Hv*ap	X1*X4	0,192537	0,097633	173,172	87,8130	1,97205	0,072099

➤ ($F(7,16)=33.55$; $p<0.001$) : le model de régression est significatif.

➔ La profondeur de passe **ap**, prédisent significativement la puissance de coupe.

➤ **R² : coefficient de détermination :**

➔ **R²=0.91** : l'ensemble de ces quatre variables expliquent **91%** de la variance de la puissance de coupe.

➤ **b*** : Bêta standardisé :

➔ (**b*** de la profondeur de passe (**ap**)= **0.32** ; **t(8)**=**3.53** ; **p**<**0.001**) : la section du copeau a un impact significatif sur la puissance de coupe.

L'analyse initiale des réponses obtenues inclut tous les paramètres et leurs interactions. Les modèles sont réduits en éliminant les termes n'ayant aucun effet significatif sur les réponses (Quelques valeurs en noir ayant un niveau inférieur à l'intervalle de confiance sont négligeables et ne sont pas prises en compte). Après élimination de tous les facteurs non significatifs, la puissance de coupe est donc exprimée par le modèle suivant :

$$P_c = 1251.66 + 369.7 X_1 * X_2 * X_3 + 267.6 X_4 + 307.67 X_1 * X_2 - 433.1 X_1 * X_3 + 541 X_2 * X_4 - 492.2 X_2 * X_3 * X_4 + 364.9 X_1 * X_2 * X_3 * X_4 + 589.06 X_1^2$$

Pour **X4**=-1, la puissance utile (**Pc**) est minimisée.

2) Les graphes des effets des facteurs et les surfaces de réponses obtenus :

Pour visualiser l'influence des facteurs sur la puissance de coupe (**Pc**), les graphes des effets et les surfaces de réponse (**3D**) sont présentées sur les figures suivantes :

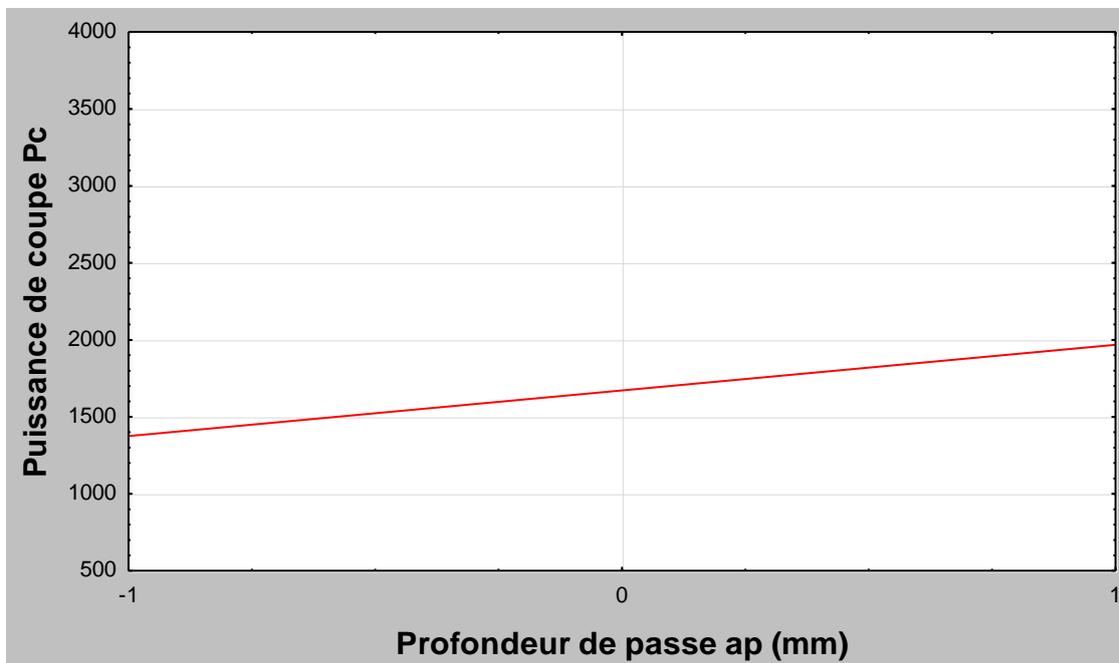


Figure IV. 5 : Modélisation de l'effet de (**ap**) par rapport à la puissance de coupe **Pc**.

❖ Discussion :

La figure IV.5 indique que la puissance de coupe est affectée par sa vitesse. Ce graphe montre que l'augmentation de la profondeur de passe provoque l'augmentation de la puissance également.

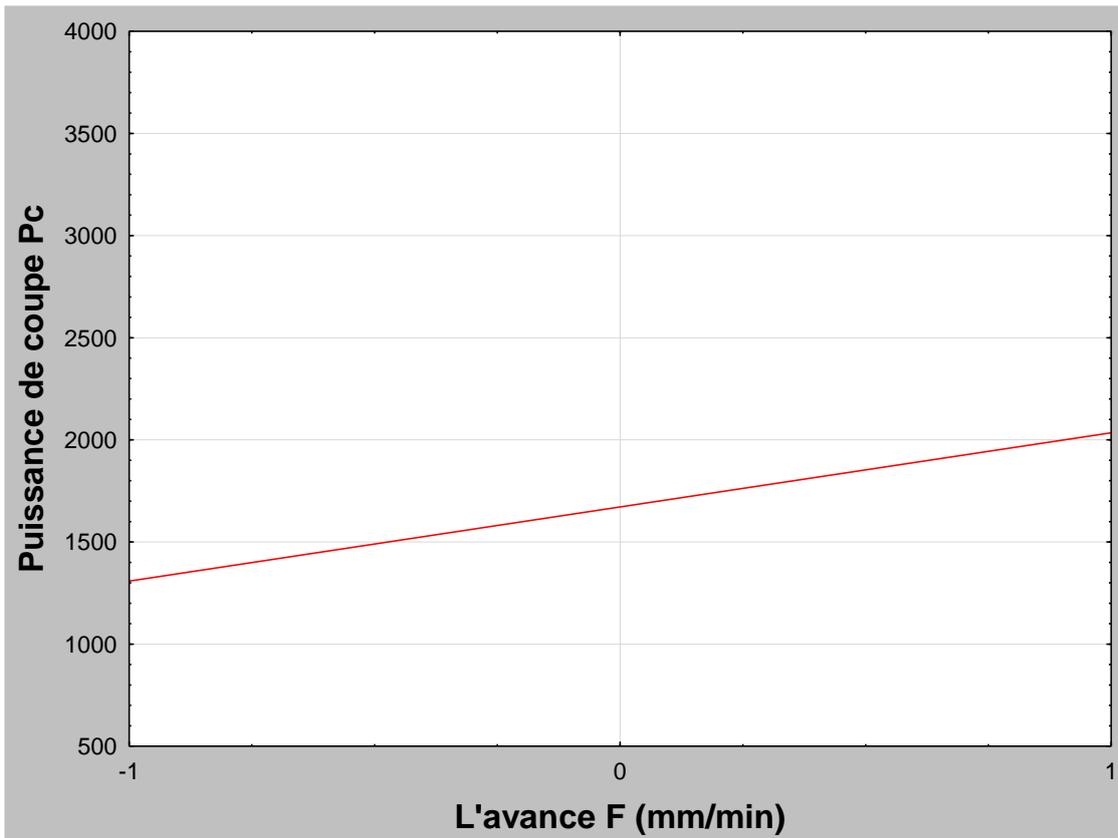


Figure IV. 6 : Modélisation de l'effet de (F) par rapport à la puissance de coupe P_c .

❖ Discussion :

La figure IV.6 montre que la puissance de coupe est fortement influencée par la profondeur de passe. À mesure que la profondeur de passe augmente, automatiquement l'avance augmente, ce qui entraîne une augmentation de la puissance de coupe.

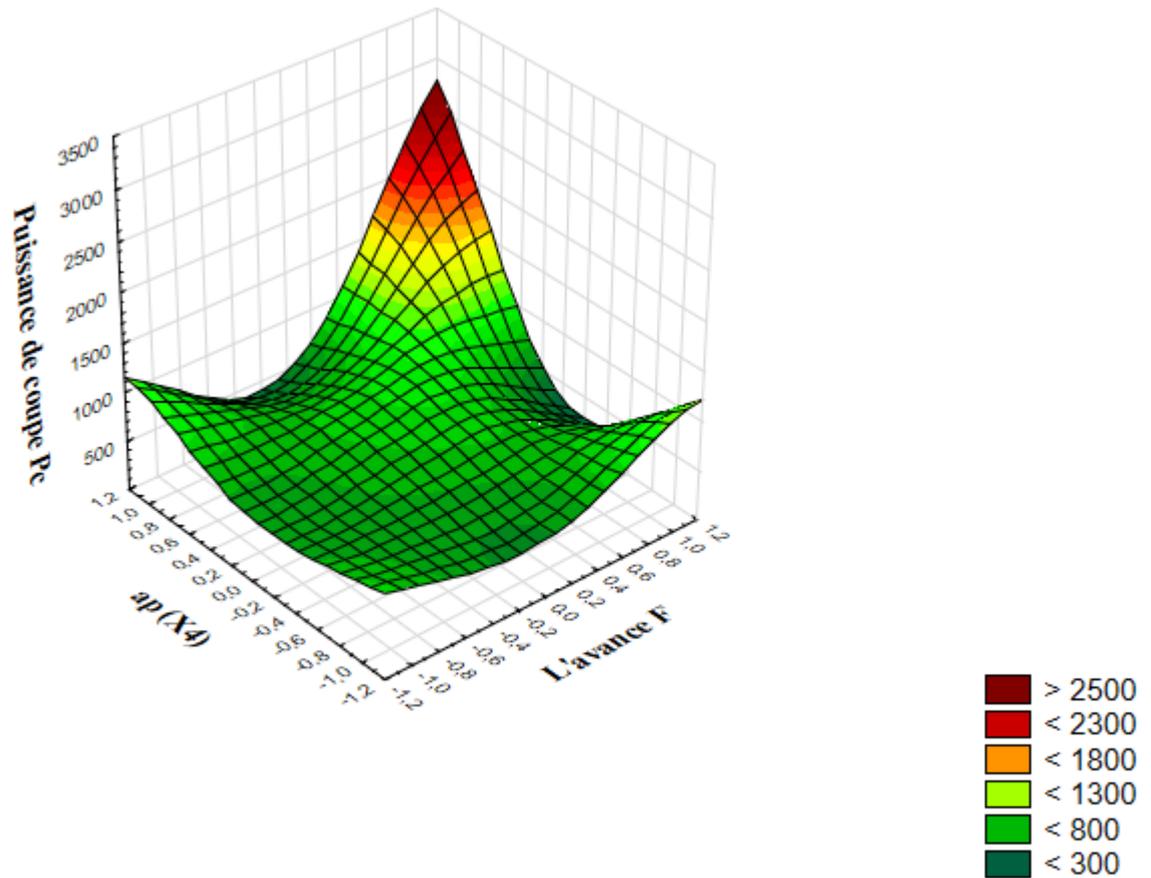


Figure IV. 7 : Graphe de surface de réponse de Pc en fonction de ap et F.

❖ Discussion :

La **figure IV.7** représente les influences de la profondeur de passe (**ap**) et de l’avance (**F**) sur la puissance de coupe. L’analyse de cette courbe montre que la profondeur de passe a un effet très significatif, l’avance à un effet important sur la puissance de coupe.

IV.4.1.3 Pour l’effort de coupe Fc :

Les valeurs sont données dans les tableaux **IV.6** et **IV.7**. Lorsque les **P-values** sont inférieures à **0,05** (ou **90%** confiance "niveau de signification").

Tableau IV. 6 :L'analyse de la variance.

Statistique	Value
Multiple R	0,980578
Multiple R ²	0,961533
R ² ajusté	0,873608
F(15,8)	10,93589
P	0,001834

Estimation de l'erreur de t Student

215,7469

Tableau IV. 7 : Importance des coefficients du modèle.

N° essai= 24		b*	Err Std.b*	b	Err Std.b	t(8)	P-value
Moyenne				354,720	88,0783	4,02733	0,005013
Hv*F	X1*X2	0,448513	0,087483	326,335	63,6521	5,12686	0,001358
Hv*ap	X1*X4	0,379905	0,128064	276,417	93,1785	2,96653	0,020910
Hv ²	X1 ²	0,371605	0,076311	509,829	104,6955	4,86963	0,001815
Hv*Vc	X1*X3	-0,472126	0,095179	-343,516	69,2519	-4,96039	0,001637
ap	X4	0,349441	0,082507	239,710	56,5983	4,23529	0,003863
F*ap	X2*X4	0,807495	0,292075	587,529	212,5124	2,76468	0,027907
F*Vc*ap	X2*X3*X4	-0,457000	0,177805	-343,893	133,7984	-2,57024	0,036995
Hv*F*Vc*ap	X1*X2*X3*X4	0,439098	0,152362	330,422	114,6531	2,88193	0,023586
Vc	X3	-0,101338	0,150737	-69,516	103,4032	-0,67228	0,522967
Hv	X1	0,285668	0,123242	195,963	84,5420	2,31794	0,053557
F	X2	0,132501	0,146073	90,894	100,2036	0,90709	0,394512
F*Vc	X2*X3	-0,374243	0,189266	-272,297	137,7086	-1,97734	0,088528
Vc*ap	X3*X4	0,064780	0,105526	47,134	76,7800	0,61388	0,558710
Hv*F*Vc	X1*X2*X3	0,256834	0,177805	193,268	133,7984	1,44447	0,191834
Hv*F*ap	X1*X2*X4	-0,442403	0,293733	-332,909	221,0348	-1,50614	0,175754
Hv*Vc*ap	X1*X3*X4	-0,370252	0,203132	-278,615	152,8571	-1,82272	0,111125

➤ (F(15,8)=10.94 ; p<0.001) : le model de régression est significatif.

➔ La profondeur de passe **ap** et **Hv²** prédisent significativement l'effort de coupe.

➤ **R² : coefficient de détermination :**

➔ **R²=0.96** : l'ensemble de ces quatre variables expliquent **96%** de la variance de l'effort de coupe.

➤ **b* : Bêta standardisé :**

➔ (**b* de La profondeur de passe (ap)= 0.35 ; t(8)=4.24 ; p<0.001**) : la profondeur de passe a un impact significatif sur l'effort de coupe.

➔ (**b* de (Hv²)= 0.37 ; t(8)=4.87 ; p<0.05**) : **Hv²** a un impact significatif sur l'effort de coupe.

L'analyse initiale des réponses obtenues inclut tous les paramètres et leurs interactions. Les modèles sont réduits en éliminant les termes n'ayant aucun effet significatif sur les réponses (Quelques valeurs en noir ayant un niveau inférieur à l'intervalle de confiance sont négligeables et ne sont pas prises en compte). Après élimination de tous les facteurs non significatifs, l'effort

de coupe est donc exprimé par le modèle suivant :

$$F_c = 354.7 + 326.3 x_1 * x_2 + 276.4 x_1 * x_4 + 509.8 x_1^2 - 343.5 x_1 * x_3 + 239.7 x_4 + 587.5 x_2 * x_4 - 343.89 x_2 * x_3 * x_4 + 330.4 x_1 * x_2 * x_3 * x_4 + 195.96 x_1 + 90.89 x_2 + 47.134 x_3 * x_4$$

Pour $X_1=1$ et $X_4=-1$, l'effort de coupe (F_c) est minimisé.

3) Les graphes des effets des facteurs et les surfaces de réponses obtenus :

Pour visualiser l'influence des facteurs sur l'effort de coupe (F_c), les graphes des effets et les surfaces de réponse (3D) sont présentées sur les figures suivantes :

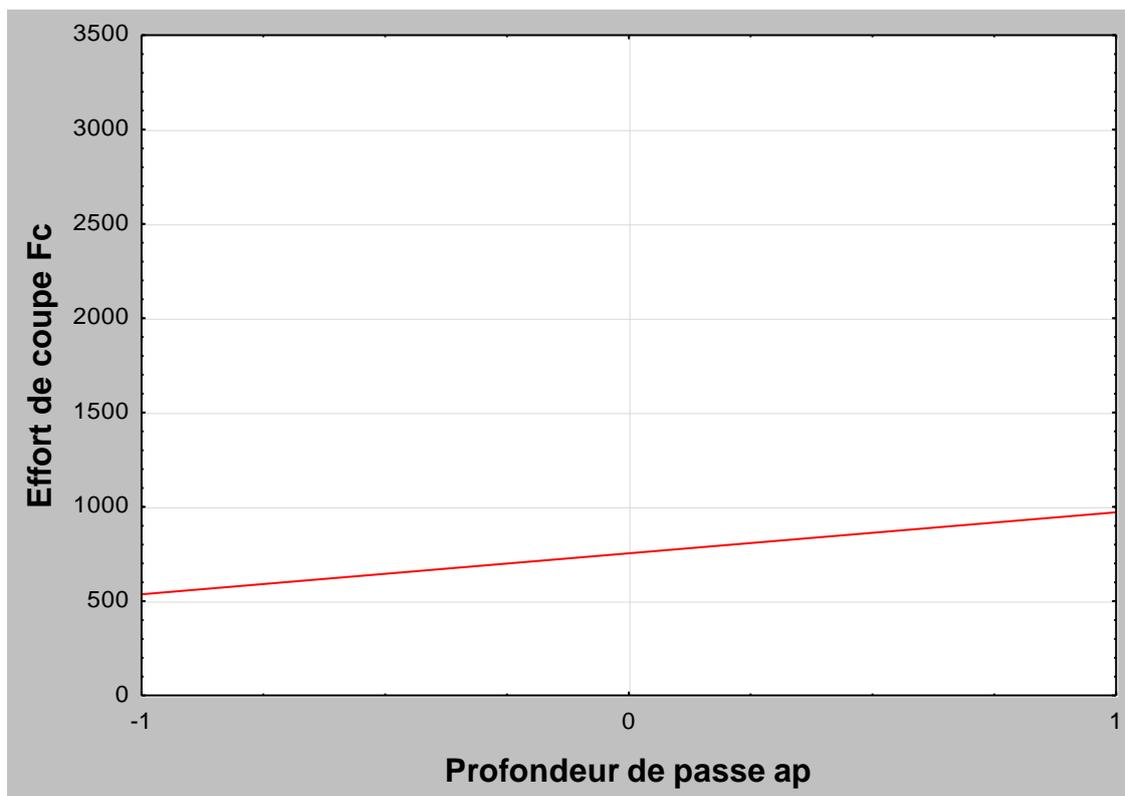


Figure IV. 8 : Modélisation de l'effet de (ap) par rapport à l'effort de coupe F_c (en N)

❖ Discussion :

Dans la **figure IV.8**, l'effet principal pour l'effort de coupe (F_c) est représenté par la courbe. Il est clairement observé que l'effet de l'avance sur les efforts de coupe a été significatif pour des avances supérieures à **0,15 mm/min**, tandis qu'à des valeurs inférieures on constate un léger changement des efforts de coupe.

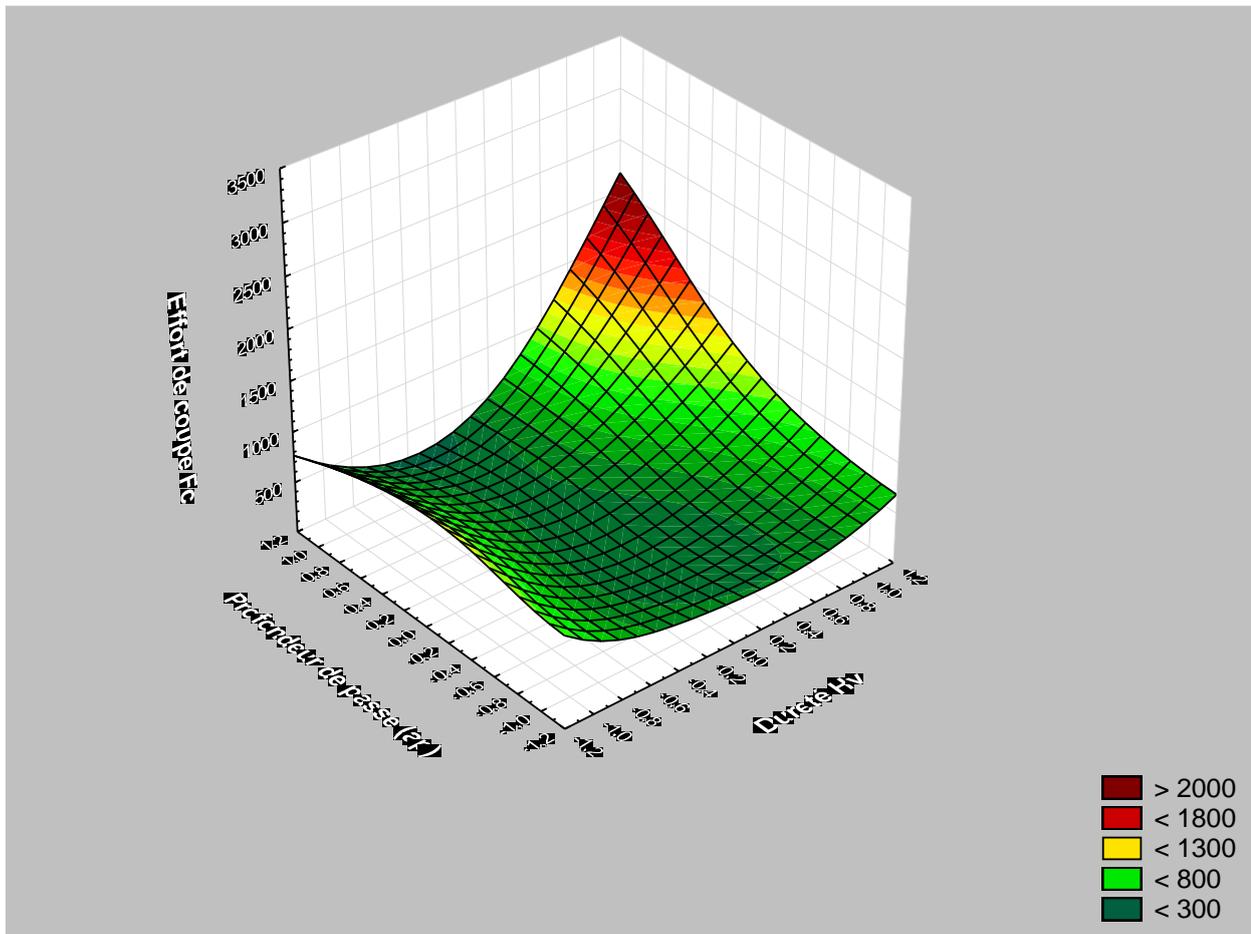


Figure IV. 9 : Graphe de surface de réponse de F_c en fonction de H_v et a_p .

❖ Discussion :

La courbe en **3D** de la surface de réponse montre que l'effort de coupe est plus sensible à l'augmentation de la profondeur de passe (a_p).

IV.4.1.4 Pour la rugosité Ra :

Les valeurs sont données dans les tableaux IV.8 et IV.9. Lorsque les **P-values** sont inférieures à **0,05** (ou **90%** confiance "niveau de signification").

Tableau IV. 8 :L'analyse de la variance.

Statistique	Value
Multiple R	0,930188
Multiple R ²	0,8652496
R ² ajusté	0,6556379
F(15,8)	4,1278691
P	0,0191143
Estimation de l'erreur de t Student	3,4122525

Tableau IV. 9 : Importance des coefficients du modèle.

N° essai= 24		b*	Err Std.b*	b	Err Std.b	t(8)	P-value
Moyenne				5,46432	1,393046	3,92257	0,003497
F	X2	0,526656	0,158542	3,46169	1,042089	3,32187	0,008914
Hv*Vc*ap	X1*X3*X4	-0,924854	0,257346	-6,66851	1,855553	-3,59381	0,005804
Vc*ap	X3*X4	0,420127	0,164232	2,92899	1,144975	2,55813	0,030782
Hv*ap	X1*X4	0,428746	0,151898	2,98908	1,058983	2,82259	0,019962
Hv*F	X1*X2	0,410052	0,135164	2,85875	0,942321	3,03373	0,014161
Hv*Vc	X1*X3	-0,507518	0,149331	-3,53825	1,041085	-3,39862	0,007891
Hv	X1	0,107430	0,148906	0,70613	0,978751	0,72146	0,488943
Hv ²	X1 ²	0,245054	0,123412	3,22146	1,622370	1,98565	0,078344
ap	X4	0,208983	0,126514	1,37364	0,831569	1,65186	0,132956
Hv*F*Vc*ap	X1*X2*X3*X4	0,057244	0,139216	0,41275	1,003797	0,41119	0,690552
Hv*F*ap	X1*X2*X4	-0,234350	0,250007	-1,68974	1,802638	-0,93737	0,373038
F*ap	X2*X4	0,348739	0,219713	2,43130	1,531766	1,58725	0,146918
Hv*F*Vc	X1*X2*X3	-0,091656	0,157120	-0,66087	1,132891	-0,58335	0,573984
Vc (X3)	X3	0,253080	0,194567	1,66349	1,278884	1,30073	0,225666

➤ (F(15,8)=4.13; p<0.001) : le model de régression est significatif.

➔ L' avance F, la dureté Hv et Hv*Vc prédisentsignificativement la rugosité.

➤ R² : coefficient de détermination :

➔ R²=0.87 :l'ensemble de ces quatre variables expliquent 87% de la variance de la rugosité.

➤ **b* : Bêta standardisé :**

➔ **(b* de l'avance (F)= 0.53 ; t(8)=3.32 ; p<0.001) :** la dureté a un impact significatif sur la rugosité.

L'analyse initiale des réponses obtenues inclut tous les paramètres et leurs interactions. Les modèles sont réduits en éliminant les termes n'ayant aucun effet significatif sur les réponses (Quelques valeurs en noir ayant un niveau inférieur à l'intervalle de confiance sont négligeables et ne sont pas prises en compte). Après élimination de tous les facteurs non significatifs, l'effort de coupe est donc exprimé par le modèle suivant :

➤ **(F(8,15)=11.73 ; p<0.001) :** le model de régression est significatif.

➔ La vitesse de coupe **Vc**, l'angle d'attaque **Kr**, **Kr²** et **Hv*Vc** prédisent significativement la rugosité.

➤ **R² : coefficient de détermination :**

➔ **R²=0.86 :** l'ensemble de ces quatre variables expliquent **86%** de la variance de la rugosité.

➤ **b* : Bêta standardisé :**

➔ **(b* de la dureté (Hv)= 0.63 ; t(16)=6.62 ; p<0.001) :** la dureté a un impact significatif sur la rugosité.

➔ **(b* d'angle d'attaque (Kr)= -0.42 ; t(16)=-4.43 ; p<0.001) :** l'angle d'attaque a un impact significatif sur la rugosité.

L'analyse initiale des réponses obtenues inclut tous les paramètres et leurs interactions. Les modèles sont réduits en éliminant les termes n'ayant aucun effet significatif sur les réponses (les valeurs en noir ayant un niveau inférieur à l'intervalle de confiance sont négligeables et ne sont pas prises en compte). Après élimination de tous les facteurs non significatifs, l'effort de coupe est donc exprimé par le modèle suivant :

$$Ra = 5.46 + 3.46 x_2 - 6.668 x_1 * x_3 * x_4 + 2.9 x_3 * x_4 + 2.98 x_1 * x_4 + 2.86 x_1 * x_2 - 3.53 x_1 * x_3 + 3.22 x_1^2 + 2.43 x_2 * x_4$$

Pour $X_1=1$, $X_2=-1$ et $X_3=1$, la rugosité (**Ra**) est minimisée.

1) Les graphes des effets des facteurs et les surfaces de réponses obtenues :

Pour visualiser l'influence des facteurs sur la rugosité (**Ra**), les graphes des effets et les surfaces de réponse (**3D**) sont présentées sur les figures suivantes :

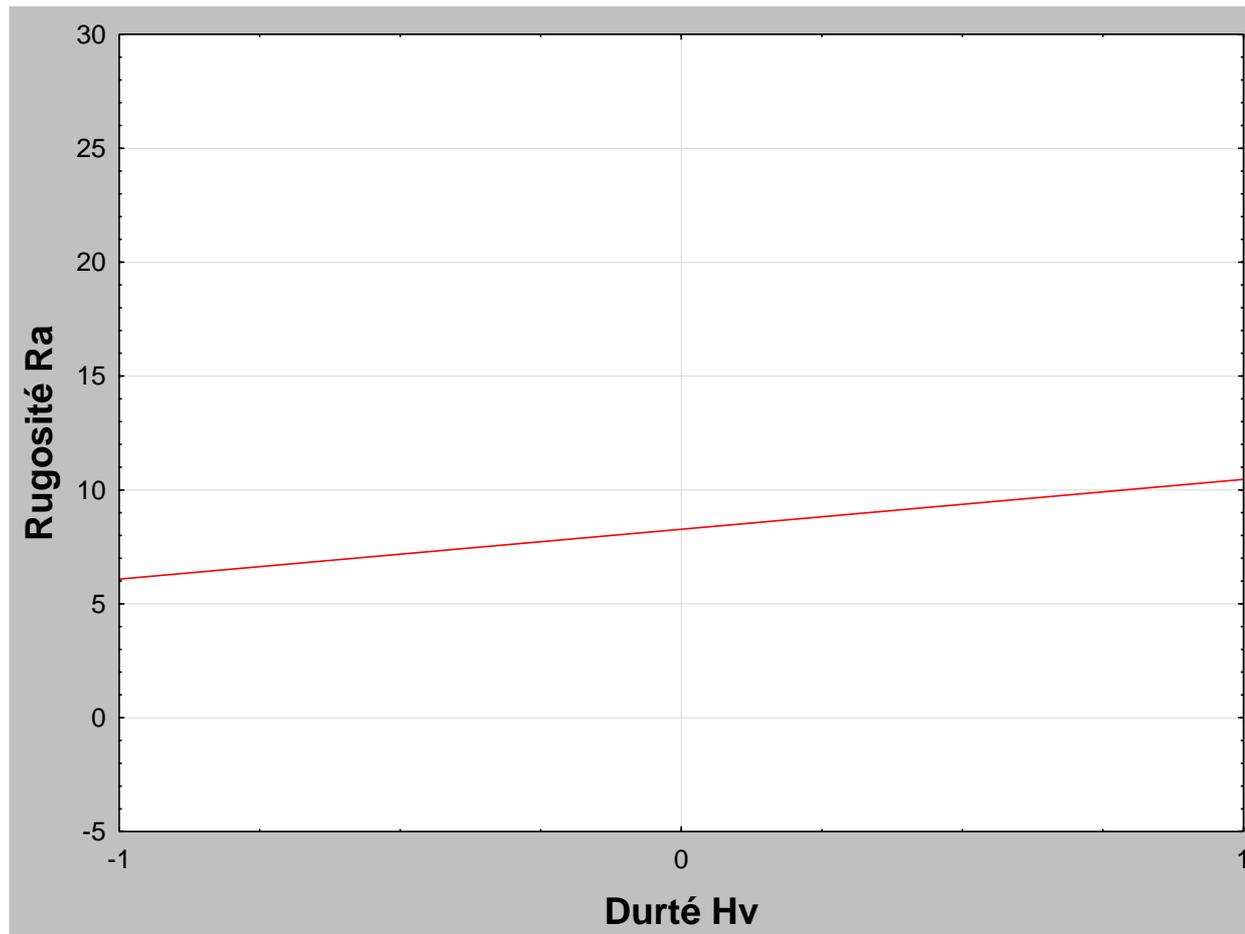


Figure IV. 10 : Modélisation de l'effet de (Hv) par rapport à la rugosité Ra.

❖ Discussion :

La **figure IV.11** indique que la rugosité est significativement affectée par la dureté, là où on voit que cet effet est plus important. Ce graphique montre qu'il est clairement observé que plus la dureté du matériau est élevée, plus l'état de surface est rugueux.

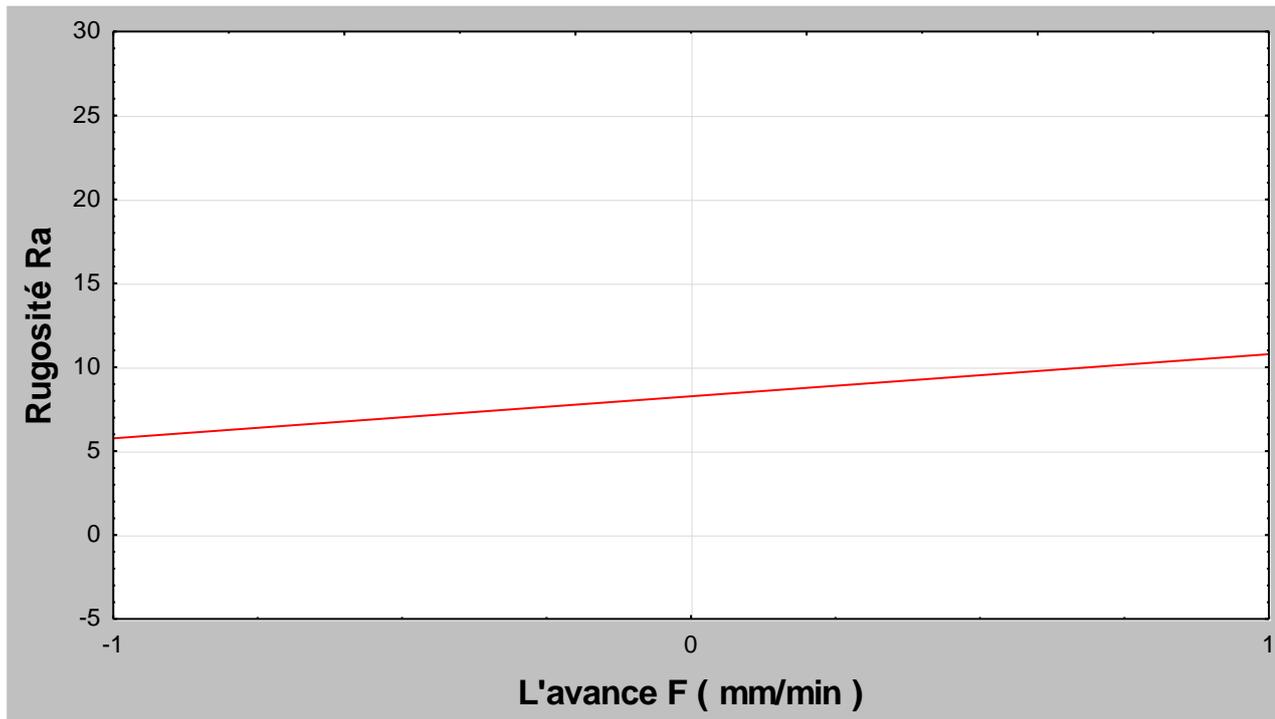


Figure IV. 11 : Modélisation de l'effet de (F) par rapport à la rugosité Ra (en micromètres)

❖ **Discussion :**

La **figure IV.12** indique que la rugosité est affectée par l'avance. Ce graphe montre que l'augmentation de la rugosité provoque l'augmentation de la puissance également.

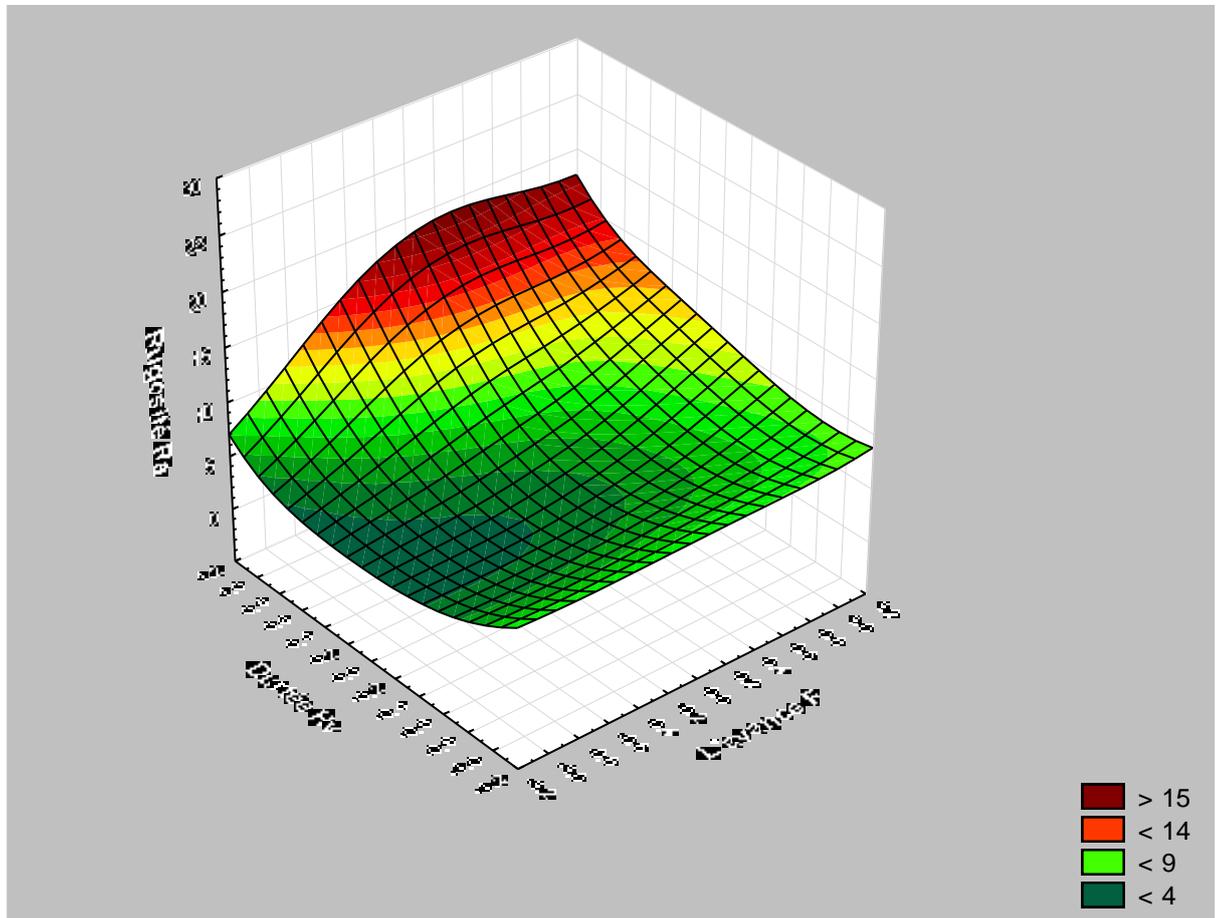


Figure IV. 12 : Graphe de surface de réponse de Ra en fonction de Hv et F.

❖ **Discussion :**

On remarque que les valeurs de la rugosité suivent la variation de l'avance, elles augmentent avec son augmentation et diminuent avec sa diminution, par contre on voit une légère augmentation avec la dureté.

IV.1 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre des différents résultats obtenus (expérimental et statiques) et leurs discussions. La modélisation par régression linéaire multiple nous a permis de déterminer l'influence des paramètres de coupe (la dureté, l'avance, vitesse de coupe, et la profondeur de passe) sur l'état de surface usinée, l'effort de coupe et la puissance de coupe.

Cette étude va ainsi permettre de choisir les conditions de coupe optimales en fonction de l'importance des critères de sélection définis par l'utilisateur entre état de surface, productivité, ou stabilité de l'usinage.

Conclusion générale

Le but de cette étude expérimentale est d'étudier l'influence des paramètres d'usinage (la dureté, l'avance F , vitesse de coupe V_c et la profondeur de passe a_p) sur les principales performances d'usinage qui sont :

- La puissance absorbée (P).
- La puissance de coupe (P_c).
- L'effort de coupe (F_c).
- L'état de surface obtenu sur la pièce (la rugosité de surface R_a).

Nous nous sommes intéressés au fraisage et à l'utilisation de plans d'expérience afin d'optimiser et de proposer un modèle numérique permettant le calcul de la puissance et l'effort de coupe ainsi que la rugosité. Les résultats sont obtenus avec logiciel STATISTICA, pour l'analyse du modèle numérique nous sommes passés par un modèle de régression afin de converger les résultats.

Le modèle élaboré prend en considération les paramètres ayant un effet significatif sur les réponses, que nous avons vérifié grâce aux courbes d'effets, des surfaces de réponses.

La vitesse de coupe (V_c) et la profondeur de passe a_p sont les paramètres les plus influents sur la puissance absorbée (P) et la puissance de coupe (P_c).

La profondeur de passe a_p et la dureté (H_v) ont une influence importante sur l'effort de coupe (F_c).

La dureté (H_v), l'avance f , et la vitesse de coupe (V_c) semble être les plus influents sur la rugosité de la pièce (R_a).

Références bibliographiques

- [1] <https://www.rueduverre.com/definitions/usinage.html>.
- [2] < Technologie des fabrications mécaniques > ENSEM Casablanca.
- [3] Brigitte REMACLE, Bld Reyers << Usinage Tournage Fraisage>> Bruxelles, 2014.
- [4] Izzeddine AOUASSA << Mémoire : Etude de la gamme d'usinage d'un support d'enrouleuse de tôles et étude de l'effet des paramètres de fraisage sur la rugosité >> Algérie, Université Badji Mokhtar Annaba, 2013-2014.
- [5] <https://www.otelo.fr/fraise-surfacer-ot4500-d100-mm/t-o-20145600/SF-ID-00050903/ref-1560248979859.html>.
- [6] Philippe DEPEYRE << fabrication mécanique >> Université de la Réunion, 2004-2005.
- [7] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/procedes-d-usinage-42190210/fraisage-bm7082/principes-de-base-du-fraisage-bm7082niv10001.html>.
- [8] Element de coupe John Wiley & Sons, Fundamentals of Modern Manufacturing, 2 nd edition Inc. M. P. Groover, 2002.
- [9] / ablocage des pieces <https://www.sous-traiter.fr/les-differents-dispositifs-dablocage-pour-lusinage-de-pieces/>.
- [10] Appareil diviseure https://dspace.univ_guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/14090/1/APPAREIL_%20DIVISEUR%20_Djamaa_2020.pdf.
- [11] : Jacques Goupy et Lee Creighton, Introduction aux plans d'expériences (3e édition, 2006). Dunod, pages 324.
- [12] : PILLET M, Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi, les éditions D'organisation Ed., Paris, 1992.
- [13] : SADO G, SADO M. C, Les plans d'expériences, De l'expérimentation à l'assurance qualité, Afnor Technique Ed., Paris, 1991.
- [14] : BARON J, OLLIVIER J.P, Les bétoins bases et données pour leur formulation, Edition Eyrolles, Paris, 522 p. 1996.
- [15] <https://www.statsoft.fr/pdf/STATISTICA-prise-en-main.pdf>.