

Sélection optimale des paramètres de coupe pour les opérations de chariotage

Abderrahim BELLOUFI^{1,*}, Mekki ASSAS², Belkacem BARKAT² et Mustapha BOUAKBA¹

¹Univ Ouargla, Fac. des Sciences Appliquées, Dépt. Génie Mécanique, Ouargla 30 000, Algérie

²Laboratoire de Recherche en Productique (LRP), Département de Génie Mécanique, Université Hadj Lakhder, Batna, Algérie

* Email : belloufi.ab@univ-ouargla.dz

ملخص: يعتبر الاختيار الجيد لشروط القطع وسيلة فعالة لزيادة الإنتاج، ويفسر ذلك بالعلاقة المباشرة بين معدل الإنتاج و شروط القطع في عمليات التشغيل الميكانيكي.

في هذه المقالة، قمنا بحل مشكلة الإنتاجية باستعمال طريقة أمثلة غير خطية. الأمثلة تمت وفقا للمتطلبات في عمليات التخشين و التشطيب، و ذلك بهدف اقتراح إستراتيجية أمثلة تناسب عملية الخراطة بغية إيجاد شروط القطع المثلى معتمدين على معيار تدفق الجذاذة.

كلمات دالة : البرمجة غير الخطية , الأمثلة , الخراطة , شروط القطع , الإنتاجية.

RÉSUMÉ : La bonne sélection des paramètres de coupe est une méthode efficace pour augmenter la production à cause de la relation directe entre le taux de production et les paramètres de coupe dans les processus d'usinage.

Dans cet article, le problème de productivité dans les opérations de chariotage est résolu par une méthode d'optimisation non linéaire. L'optimisation se fait selon les différentes exigences dans le processus d'ébauche et de finition, l'objectif de notre étude est de proposer une stratégie d'optimisation adaptée au procédé de tournage, pour aboutir aux conditions optimales de coupe en se basant sur le critère du débit de copeaux.

MOTS-CLÉS : Programmation non linéaire, optimisation, tournage, paramètres de coupe, productivité.

ABSTRACT

The right selection of cutting parameters is an effective method to increase production because of the direct relation between the production rate and cutting parameters in machining processes.

In this article, the productivity problem in the turning operations is solved by a nonlinear optimization method. The optimization is done according to the different requirements in the process of roughing and finishing, the objective of our study is to propose an optimization strategy suitable for filming process, to achieve the optimum cutting conditions based on the criterion of chip flow.

KEYWORDS: Nonlinear programming, optimization, turning, cutting parameters, productivity.

1. Introduction

L'obtention des formes requises d'une pièce par enlèvement de matière est encore à ce jour le procédé de fabrication le plus répandu. Malgré les progrès réalisés par les procédés de mise en forme des matériaux (formage, fonderie...), l'usinage se révèle nécessaire pour l'obtention des produits finaux [1]. L'objectif principal de l'usinage est l'augmentation du taux de productivité par la diminution du temps et du coût de production. Pour atteindre cet objectif on utilise les méthodes d'optimisation des conditions de coupe [2].

La résolution du problème des conditions de coupe a un intérêt considérable dans le domaine de la production mécanique puisqu'elle permet l'utilisation rationnelle des moyens de fabrication (Machine-outil, outillage...) [3].

Le but de cet article est de proposer une méthode d'optimisation non linéaire permettant de rechercher les conditions de coupe optimales pour le processus de tournage telles que (la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passes). Assurant une maximisation de la fonction coût : débit de copeaux.

2. formulation mathématique du problème d'optimisation non linéaire

Un programme mathématique est un problème d'optimisation d'une fonction objectif de n variables, en présence de m contraintes. Si au moins une contrainte ou la fonction « objectif » est non linéaire, on a un programme non linéaire [4].

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser } f(x) \quad f \in R \\ \text{sous les contraintes:} \\ g_i(x) = 0 \quad i = 1, \dots, n \\ h_j(x) \leq 0 \quad j = 1, \dots, m \\ x \in S \subset R^n \end{array} \right. \quad (1)$$

Où :

$x \in R^n$: Vecteur de composantes $(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ qui sont les inconnues du problème.

$f(x)$: La fonction objectif ou critère économique.

$g_i(x) = 0$ ($i = 1, \dots, n$) : L'ensemble des contraintes d'égalité du problème.

$h_j(x) \leq 0$ ($j = 1, \dots, m$) : L'ensemble des contraintes d'inégalité du problème.

3. Problème d'optimisation non linéaire des conditions de coupe en tournage

Le tournage est un procédé d'usinage par enlèvement de matière très complexe (figure 1). Al modélisation de ce procédé revient toujours à un problème de programmation non linéaire. Ce qui conduit à la définition de la fonction « objectif » et des contraintes liées aux conditions et au comportement de la coupe.

3. 1. Fonction « objectif »

En tournage, les fonctions « objectif » diffèrent d'un problème à un autre [1].

L'optimisation peut prendre comme objectif de :

- Minimiser le coût de production unitaire,
- Minimiser le temps de production unitaire,
- Maximiser le débit de copeau,
- Minimiser la valeur de la rugosité,
- Minimiser les vibrations,
- Minimiser les efforts de coupe...

3. 2. Les contraintes

Plusieurs facteurs agissent sur le choix des conditions de coupe [5]. Ces facteurs sont pris comme des contraintes d'optimisation. Les principales contraintes prises en considération en tournage sont :

3. 2. 1. Limitation sur l'intervalle des vitesses d'avance :

La vitesse d'avance doit être comprise entre une valeur minimale et une valeur maximale pouvant être assurées par la cinématique de la machine :

$$v_{a \min} \leq v_a \leq v_{a \max} \quad (2)$$

3. 2. 2. Limitation sur l'intervalle des vitesses de coupe :

La vitesse de coupe doit être comprise dans les limites de validité du modèle de la loi de la durée de vie établie pour la couple outil-matière

$$v_{c \min} \leq v_c \leq v_{c \max} \quad (3)$$

3. 2. 3. Limitation sur la puissance nécessaire à la coupe

$$v_a v_c \leq \frac{60 p_m \eta}{Rak} \quad (4)$$

k : Coefficient qui tient compte de : l'usinabilité de matériau et de la géométrie de l'outil de coupe [6].

3. 2. 4. Limitation sur la résistance pratique de l'outil

La condition de résistance pratique s'écrit par :

$$R_p \geq \frac{M_f I_v}{I_x} \quad (5)$$

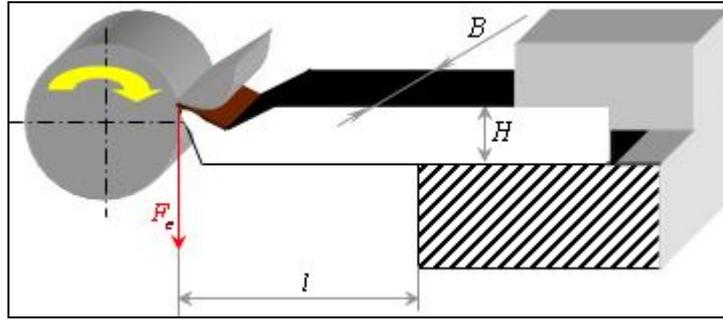


Figure 1 : Résistance pratique de l'outil

En tenant compte des paramètres géométriques de l'outil on trouve :

$$v_c \geq \frac{360 l p_m \eta}{R_p B H^2} \quad (6)$$

$$v_a \leq \frac{B H^2 R_p}{6 l R a k} \quad (7)$$

3. 2. 5. Limitation sur la résistance à la déformation de l'outil

La limitation sur la résistance à la déformation de l'outil est donnée par :

$$v_a \leq \frac{B H^3 E f}{4 l^3 R a k} \quad (8)$$

3. 2. 6. Limitation sur l'état de surface

La Limitation sur l'état de surface est donnée par :

$$v_a \leq \sqrt{\frac{R_t r_r}{125}} \quad (9)$$

3. 2. 7. Limitation sur l'intervalle de profondeur de passe

La profondeur de passe doit être aussi comprise entre une valeur minimale et une valeur maximale :

$$a_{\min} \leq a \leq a_{\max} \quad (10)$$

4. Expression du critère

Dans cette étude, nous considérons le critère de débit de copeaux maximal. La forme générale du critère "débit de copeau maximal" est donnée par une fonction de type:

$$Q = v_c v_a a \quad (11)$$

5. Algorithme de résolution du problème

L'algorithme utilisé pour la résolution de problème est l'algorithme COURNT [7].

5. 1. Principe de l'algorithme COURNT

On construit une suite de fonction de pénalité $P(x, R_k)$ dont on cherche les minima sans contraintes x_k . On montre que x_k tend vers x_{opt} et $P(x, R_k)$ tend vers $f(x_{opt})$ quand R_k tend vers l'infinie. La fonction de pénalité est de la forme :

$$P(x, R_k) = f(x) + R_k \sum_{i=1}^{m_1} [\inf(0, C_i(x))]^2 + R_k \sum_{i=m_1+1}^m [C_i(x)]^2 \quad (12)$$

Tel que :

- $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$: La fonction à minimiser,
- $C_i(x) \leq 0$ pour $i = 1, \dots, m_1$: Les contraintes d'inégalité,
- $C_i(x) \leq 0$ pour $i = m_1 + 1, \dots, m$: Les contraintes d'égalité.
- $x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}$: Les limites sur les variables.

5. 2. Les sous-programmes requis

- Sous programme sprocs : Effectue le produit scalaire de deux vecteurs.
- Sous programme orgopt : Effectue un pas de minimisation par la méthode de powell.
- Sous programme pnalit : Calcule à partir du
- Sous programme fec : La fonction à minimiser et le gradient de cette fonction
- Sous programme fec : Calcule la valeur de la fonction objectif $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.
- Sous programme cont : Calcule les contraintes $C_i(1), \dots, C_i(N_{in}, N_{eg})$ en fonction de : $x(1), \dots, x(n)$ et $(N_{in}, N_{eg}) \leq 100$.
- Sous programme gradfi (n) : Donne le gradient de la fonction économique.
- Sous programme jacob (n) Calcule le jacobien $A(i, j), i = 1, \dots, N_{in} + N_{eg}, j = 1, \dots, n$ des contraintes.

6. Exemple d'application

Maintenant, un exemple d'application est considéré a fin de valider l'algorithme COURENT dans le cas d'optimisation des conditions de coupe en tournage. Les paramètres utilisés dans cette application sont regroupés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Paramètres d'usinage [6, 8, 9]

Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs
$v_{a \min}$	0.1mm/tr	f	0.1mm
$v_{a \max}$	0.8mm/tr	D	70mm
$v_{c \min}$	80mm/tr	d	63mm
$v_{c \max}$	210mm/tr	R_p	2000N/mm ²
P_m	7360w	k	3
η	0.7	L	60mm
R	550 N/mm ²	B	20mm
R_t	é	H	40mm
	f		
r_r	0.6mm	l	60mm

7. Variation de la fonction « objectif » en fonction des paramètres de coupe

7. 1. La fonction « objectif »

Pour mieux voir l'allure des la fonction « objectif », elle est représentée en fonction des vitesses de coupe et d'avance avec une profondeur de passe constante

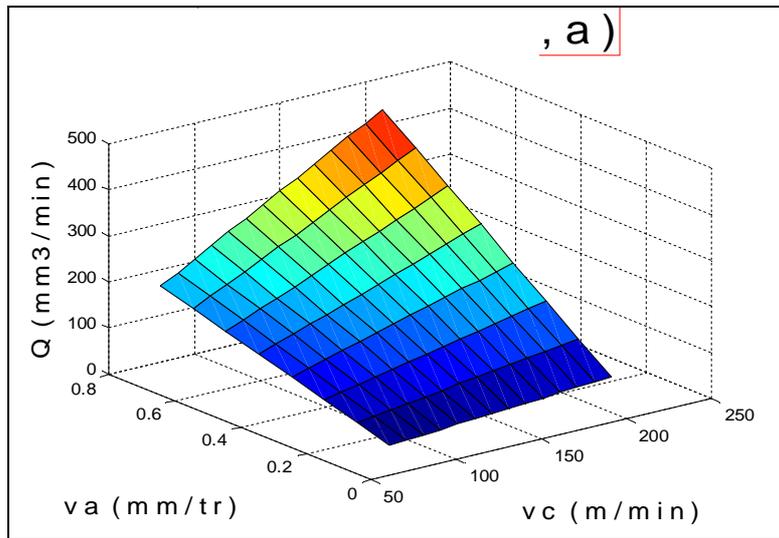


Figure 2 : Variation du débit de copeaux en fonction de V_a et V_c

7. 2. Le domaine des solutions

Le domaine des solutions faisable est donné par la figure 3

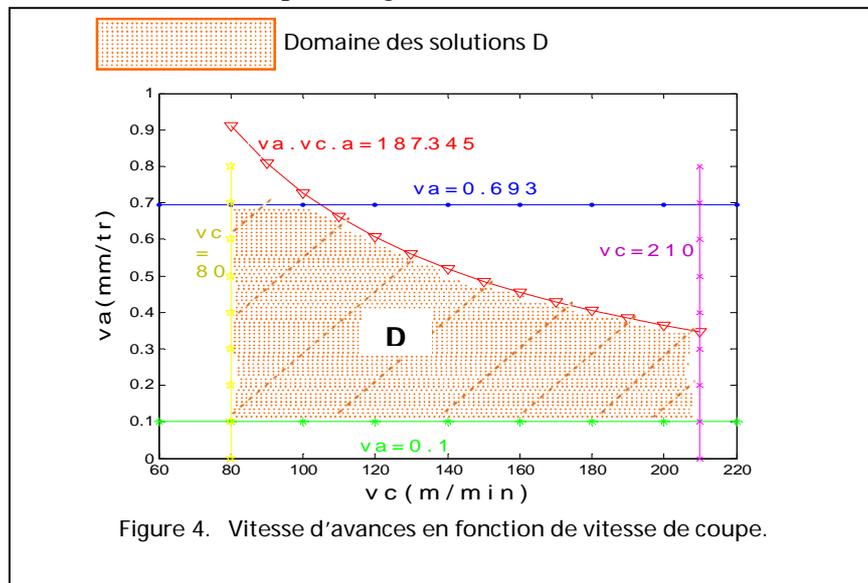


Figure 4. Vitesse d'avances en fonction de vitesse de coupe.

Figure 3 : Vitesse d'avances en fonction de la vitesse de coupe

7. 3. Débit de copeau en fonction de vitesse de coupe

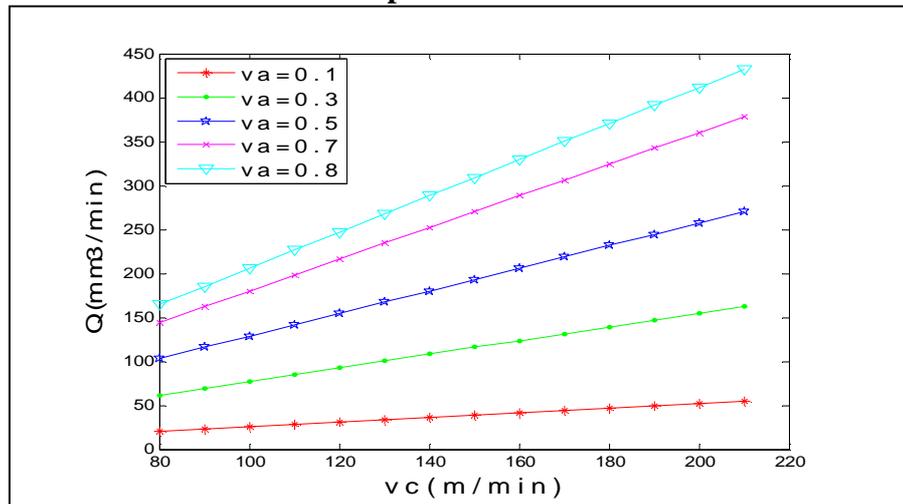


Figure 4 : Variation du débit de copeaux en fonction de la vitesse de coupe

7. 4. Débit de copeau en fonction de vitesse d’avance

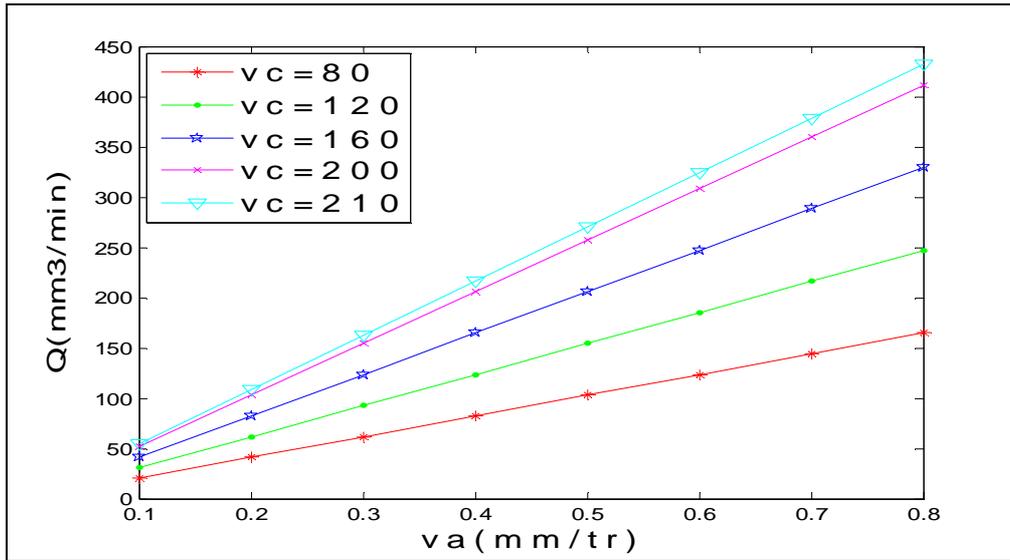


Figure 5 : Variation de débit de copeaux en fonction de la vitesse d’avance

7. 5. Débit de copeaux an fonction de profondeur de passe

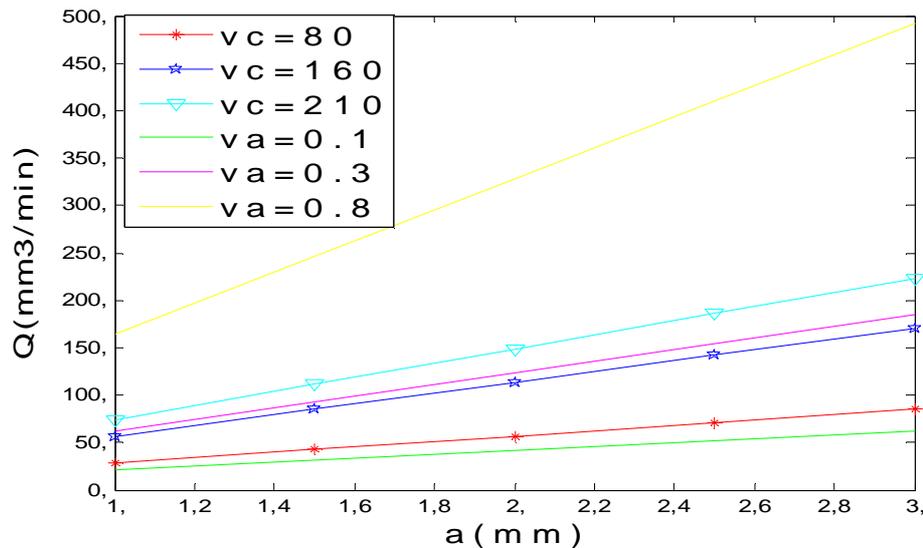


Figure 6 : Variation de débit de copeaux en fonction de profondeur de passe

- La valeur de la fonction « objectif » augmente si l’un des trois paramètres de coupe (vitesse de coupe, vitesse d’avance, profondeur de passe) augmente (figures : 2, 4, 5 et 6).
- Le domaine des solutions est limité par des différentes contraintes du problème. Si en fixe deux paramètres parmi les trois paramètres de coupe, la variation de la fonction « objectif » par rapport au troisième paramètre est linéaire.
- La valeur de $Q(a)$ pour une valeur maximale de vitesse d’avance est plus grande que la valeur de $Q(a)$ pour une valeur maximale de vitesse de coupe (figures 4, 5).
- La valeur de $Q(v_c)$ pour une valeur minimale de la vitesse d’avance est plus petite que la valeur de $Q(v_a)$ pour une valeur minimale de vitesse de coupe (figures 4, 5).
- La présence des contraintes nous oblige à trouver les valeurs optimales des paramètres de coupe (v_c, v_a, a) dans le domaine limité par ces contraintes (domaine des solutions) (figure 3).

8. Résultats d'optimisation avec la programmation non linéaire

Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux suivants :

Tableau 2 : Paramètres de coupe optimaux en ébauche

Passes N°	a (mm)	v_c (m/min)	v_a (mm/tr)	Q (mm ³ /min)
1 ^{ère} passe	2.574	205.113	0.355	187.345
2 ^{ème} passe	1.723	205.117	0.530	187.345
3 ^{ème} passe	1.203	210.000	0.693	175.073
valeurs moyennes	1.667	206.747	0.572	178.112

Tableau 3 : Paramètres de coupe optimaux en finition

Passes N°	a (mm)	v_c (m/min)	v_a (mm/tr)	Q (mm ³ /min)
1 ^{ère} passe	0.900	210.000	0.693	130.977
2 ^{ème} passe	0.600	210.000	0.693	87.318
valeurs moyennes	0.750	210.000	210.000	109.148

8. 1. Représentation graphique des résultats

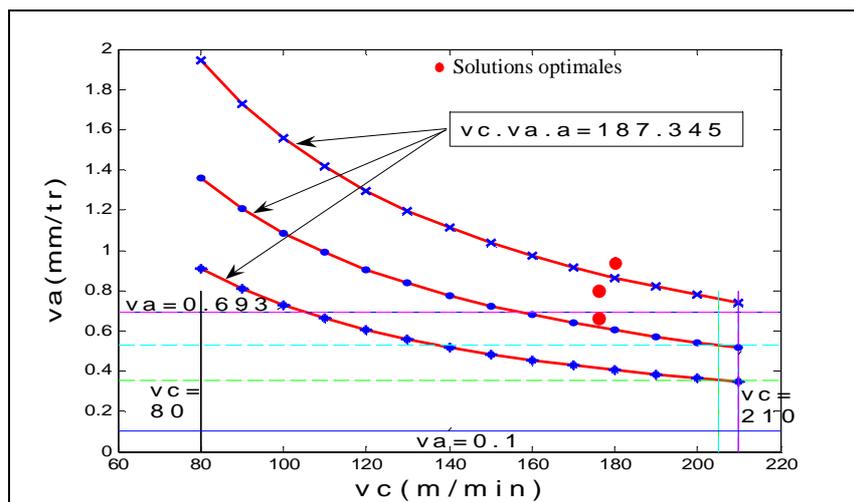


Figure 7 : Solutions optimales (v_c, v_a) en ébauche

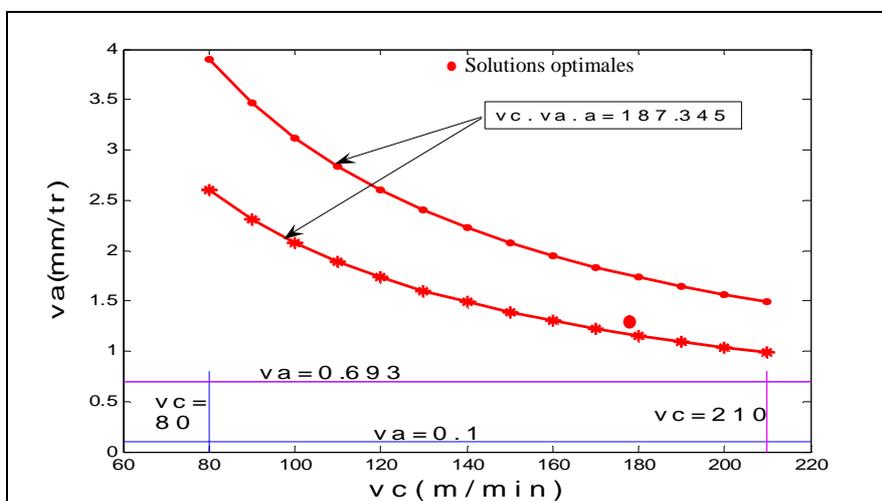


Figure 8 : Solutions optimales (v_c, v_a) en finition

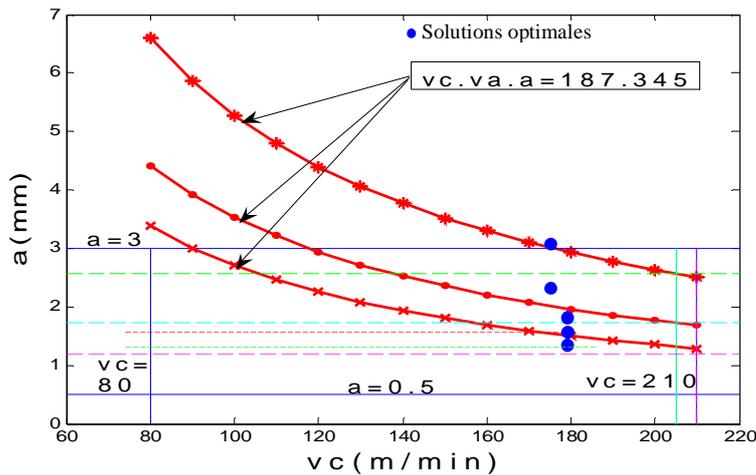


Figure 9 : Solutions optimales (v_c, a) en ébauche et en finition

8. 2. Discussion

L'examen des résultats précédents et les différentes représentations graphiques, nous permet de formuler quelques remarques :

- Le maximum de la fonction « objectif » n'est pas toujours situé dans le domaine faisable limité par les différentes contraintes.
- L'examen des résultats et des graphes schématisant la vitesse de coupe en fonction de vitesse d'avance et de profondeur de passe, nous permet de remarquer que les valeurs de vitesse de coupe et d'avance sont plus petites en opération d'ébauche que celles d'opérations de finition.
- L'examen des résultats et des graphes schématisant la profondeur de passe en fonction de vitesse de coupe, nous permet de remarquer que les valeurs de profondeur de passe sont plus grandes en opération d'ébauche que celles d'opérations de finition.

9. Conclusion

Ce travail concerne l'utilisation de la programmation non linéaire pour l'optimisation des conditions de coupe en tournage. Pour atteindre cet objectif nous avons utilisé un critère de maximisation de débit de copeau qui indique une productivité maximale. Nous avons résolu le problème d'optimisation par la méthode de pénalité et la méthode de Fletcher et Powell. Enfin on peut dire que la méthode de pénalité est efficace pour obtenir des solutions très satisfaisants et quelle peut traiter directement la fonction « objectif » et les contraintes sans recours préalable à la linéarisation.

Nomenclature

$a(mm)$	Profondeur de passe
$v_c(m/min)$	Vitesse de coupe
$v_a(mm/tour)$	Vitesse d'avance
$Q(mm^3/min)$	Débit de copeaux
$D(mm)$	Diamètre de la pièce brute
$d(mm)$	Diamètre de la pièce usinée
$L(mm)$	Longueur de la pièce
$b(mm)$	Largeur de corps de l'outil
$h(mm)$	Hauteur de corps de l'outil
$l(mm)$	Longueur de corps de l'outil
$F_c(N)$	Force de coupe

$R (N / mm^2)$	La résistance à la rupture du métal travaillé
$s (mm^2)$	Surface de la tranche cisailée
$p_m (w)$	Puissance effective d'un moteur
η	Rendement de la machine
C_s	Coefficient de sécurité
$I_x (mm^4)$	Le moment d'inertie par rapport à l'axe x
$R_p (N / mm^2)$	Résistance pratique de la rupture de l'outil
$f (mm)$	La flèche de l'outil
$E (N / mm^2)$	Module d'élasticité longitudinale (de Young)
$R_t (mm)$	La rugosité maximale
$r_r (mm)$	Rayon de la plaquette de l'outil
$T (min)$	La durée de vie de l'outil

Références

- [1]. Padila P. ; *Production mécanique*, Dunod, Paris (1986).
- [2]. Assas M., Belhattab N. et Djenane M.; *Revue Morskoy Vestnik*, Vol 2003 N°2 (2003)
- [3]. Assas M. et Djenane M.; " Optimisation des Conditions d'usinage basée sur un critère combiné ", Deuxièmes Journées de Mécanique EMP, Alger 23 et 24 Décembre (2001).
- [4]. Mottel S. ; *Optimisation non Linéaire*, Université de Technologie de Compiègne (2003).
- [5]. Assas M. et Djennane M.; " Optimisation des Conditions d'Usinage à l'aide d'un Critère Combiné pour les Opérations à Plusieurs Passes", SIGMA'02 Oran 28 et 29 Avril (2002).
- [6]. Alain P.; *Tournage*, Technique de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique, BM 7086, pp1.22, (1997).
- [7]. Barkat B.; *Contribution à l'Optimisation des Configurations de Prise et de la Fonction Préhension en Robotique*, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers 1992.
- [8]. Vergnas J.; *Usinage Technologie et Pratique*, Dunod, Paris (1982).
- [9]. Dietrich R., Garsaud D., Gentillon S., Nicolas M.; *Précis Méthodes d'Usinage*, AFNOR, Nathan (1985).
- [10]. Brahim M. et Hddouche K.; " Optimisation Non Linéaire des Paramètres de Coupe en Tournage", 1^{er} Congrès International de Mécanique - Constantine, Algérie, Décembre (2002)