

Mise en œuvre de l'Algorithme NSGAI pour l'Optimisation Multi-Objectif des paramètres de coupe en Fraisage en bout

I. BELAÏDI^a, K. MOHAMMEDI^b, B. BRACHEMI^b

a. Chercheur Invité au LMSP, ENSAM Paris, 151, Boulevard de l'Hôpital, Paris 75013

b. Groupe de Recherche Modélisation en Mécanique et Productique, Université M'hamed Bougara de Boumerdes, 35000 Algérie

Résumé :

Cet article présente une application de l'algorithme génétique de type NSGAI pour l'optimisation multi-objectif d'une opération de fraisage en bout. Le modèle proposé et implémenté sous Matlab, permet, à partir d'un espace de recherche considéré (données de références), une optimisation des valeurs du couple "Vitesses de coupe-Avances de l'outil", pour une profondeur de passe imposée, en minimisant simultanément les coûts et les temps de coupe, sous contrainte des limitations techniques liées au système usinant "Pièce-Outil-Machine".

Abstract :

This article introduces an application of the genetic algorithm NSGAI for multi-objective optimization of an end milling operation. The implemented model under Matlab, allows, from a considered space research (reference cutting data), an optimization of " Speed and Feed rates ", for an imposed Depth, while the cutting cost and time are simultaneous minimized, under technical constraints of the cutting system.

Mots clefs : Optimisation Multi-objectif, Algorithme génétique, NSGAI, Paramètres de coupe, Fraisage en bout.

1 Introduction

La maîtrise du "Couple Outil-Matière" pour une fabrication optimisée de produits à fortes valeurs ajoutées est une nécessité qui n'est plus à démontrer. Dès lors, la mise au point de modèles fiables et robustes, basés sur une approche multi-phénomènes et multi-échelles des divers aspects de l'usinage est une exigence incontournable pour une détermination large et précise des points COM. Les algorithmes génétiques [1], [2], [3], [4], de part leurs performances avérées pour la résolution de problèmes complexes, représentent à cet effet un outil bien adapté pour l'optimisation des processus d'usinage, connus pour leur comportement non linéaire, grâce à leur facilité de mise en œuvre et leur capacité d'intégration d'un plus grand nombre de contraintes à différentes échelles (atelier, machine, pièce, outil, pointe d'outil...)

Après avoir montré une facette de l'intérêt de l'algorithme NSGAI pour l'optimisation multi-objectif d'une opération de tournage [5], nous présenterons dans cette contribution une mise en œuvre du même type d'algorithme pour l'optimisation multi-objectif d'une opération de fraisage en bout. Le modèle proposé est implémenté sous Matlab, et permet, à partir d'un espace de recherche considéré (données de références), une optimisation des valeurs du couple "Vitesses de coupe et Avances de l'outil", pour une Profondeur de passe imposée, en minimisant simultanément les coûts et les temps de coupe, sous contrainte des limitations techniques liées au système usinant "Pièce-Outil-Machine". L'extension à la détermination à large échelle des points COM optimaux dans le cadre industriel reste une opportunité envisageable.

2 Modèles d'optimisation multi-objectif en fraisage en bout

2.1 Identification des modèles proposés

Il s'agit de rechercher les valeurs optimales des vitesses de coupe et de l'avance de l'outil pour une profondeur de passe donnée à partir d'un espace de recherche, constitué de valeurs de références usuelles

(figure1) minimisant simultanément le temps et les coûts d'usinage. Le problème d'optimisation multi-objectif sera alors formulé comme suit [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser } f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)] ; f \in R \\ \text{telles que :} \\ h_j(x) \leq 0 ; \quad j=1, \dots, m ; \quad x \in S \subset R^n \end{array} \right. \quad (1)$$

Les fonctions objectif $f(x)$ à optimiser sont les fonctions "coûts" et "temps" d'usinage. L'ensemble des conditions: $h_j(x) \leq 0$ ($j=1, \dots, m$) sont les contraintes d'usinage, représentées par les limitations liées à l'outil, à la pièce et à la machine. Le vecteur $x \in R^n$ ayant pour composantes (x_1, x_2, \dots, x_n) , sont les inconnues, à savoir la vitesse de coupe V_c et l'avance de l'outil f ; S représente l'ensemble des solutions de x dans R^n . Les modèles proposés sont alors formulés comme suit :

Pour une profondeur de passe a donnée, le problème consiste à déterminer le couple de valeurs optimales $\{V_c, f\}$ minimisant simultanément le temps et les coûts d'usinage, sous contrainte des limitations liées à:

1. la machine (puissance de coupe maximale et couple disponible sur la broche) et l'outil (durée de vie, diagramme-brise copeaux et déflexion radiale maximale admissible) pour les opérations d'ébauche.
2. la pièce (rugosité théorique imposée) et l'outil (diagramme-brise copeaux et déflexion radiale maximale admissible) pour les opérations de finition.

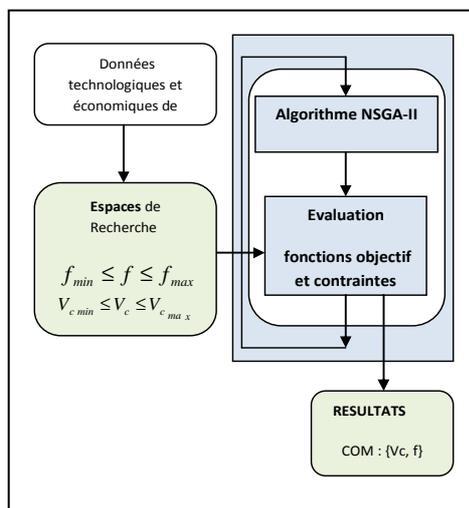


FIG. 1 – Principe général du modèle d'optimisation proposé.

2.2 Fonctions objectifs

Les coûts P_u et les temps d'usinage T_u peuvent être exprimés de façon simplifiée par les relations :

$$P_u = P_o t_a + P_o t_c + P_a + P_l \left(\frac{t_c}{T} \right) \quad (2)$$

$$T_u = t_c + t_a + t_{co} \left(\frac{t_c}{T} \right) \quad (3)$$

2.3 Espaces de Recherche

L'espace de recherche est le domaine des valeurs de V_c et de f , définies à partir des données technologiques de référence, en fonction du couple « Outil-Matière » considéré, telles que: $f_{min} \leq f \leq f_{max}$ et

$$V_{c\ min} \leq V_c \leq V_{c\ Max}$$

2.4 Contraintes de production

• Limitation liée à la Puissance de la machine

La puissance absorbée par la coupe P_c doit être inférieure à la puissance utile disponible sur la broche P_{utile} .

En fraisage, cette puissance peut s'exprimer par : $P_c = \frac{\pi}{60} D e_m a_r F_{cs} z_e N \leq P_{utile}$, soit donc :

$$P_c = \frac{\pi}{60} D e_m a_r F_{cs} z_e N - P_{utile} \leq 0 \quad (4)$$

• Limitation liée au couple de coupe disponible sur la broche

Le couple appliquée sur la broche de la machine est limité par C_{pmax} , telle que : $C_p = F_c \frac{D}{2} z_e \leq C_{pMax}$.

En remplaçant dans cette inéquation l'effort de coupe moyen par dent F_{cm} par la relation : $F_{Cm} = e_m a_r F_{cs}$, on obtient l'expression:

$$C_p = \frac{D}{2} e_m a_r z_e F_{cs} - C_{pMax} \leq 0 \quad (5)$$

• Limitation liée à l'endurance de l'outil

Le modèle de la loi d'usure de Taylor étant : $V_c = k T^n f^p a_p^q$ pour une durée de vie de référence T_{ref} imposée, l'expression de la contrainte liée à l'endurance de l'outil est alors:

$$T = k^n V_c^n f^{-\frac{p}{n}} a_p^{-\frac{q}{n}} - T_{ref} \leq 0 \quad (6)$$

• Limitation liée à la déflexion maximale de l'outil

La déflexion f_L de la fraise induite par l'effort de coupe F_c ne doit pas dépasser une valeur f_{LMax} admissible.

Avec : $K_F = F_{CS0} [1 - 0.02(\gamma - \gamma_0)] \left(\frac{\sin \kappa_r}{e_0} \right)^{-0.3}$ la déflexion de l'outil est donnée par :

$$f_L = \frac{K_F a_p f^{0.7} L_{outil}^3}{2.4 E D^4} - f_{Lmax} \leq 0 \quad (7)$$

• Limitation liée à la rugosité imposée à la surface usinée

La rugosité R_t prescrite ne doit pas dépasser la valeur R_{tMax} maximale, d'où :

$$R_t = \frac{f_z^2}{8 \left(\frac{D}{z} \pm \frac{f_z z}{\pi} \right)} - R_{tmax} \leq 0 \quad (8)$$

3 Mise en œuvre de l'algorithme NSGAI

Pour la résolution des problèmes d'optimisation multi-objectif, de nombreux algorithmes génétiques ont été développés [3], [4], [6]. Parmi les plus significatifs d'entre eux figurent : l'Algorithme Génétique à Évaluation Vectorielle ou VEGA présenté par Schaffer en 1985, l'algorithme NPGA ou Niched Pareto Genetic Algorithm, utilisant une sélection par tournoi, basée principalement sur la dominance de Pareto, l'algorithme NPGA2, basé sur le degré de domination d'un individu, l'algorithme NSGA ou Non Dominated Sorting Genetic Algorithm, l'algorithme **Micro-GA**, référant à des algorithmes avec de petites populations, et enfin l'algorithme **NSGA-II**, basé sur une classification des individus en plusieurs niveaux. Ce dernier utilise une procédure de tri plus rapide que son prédécesseur, basée sur la non dominance ou Pareto optimale, une approche élitiste qui permet de préserver la diversité des populations, en sauvegardant les meilleures solutions trouvées lors des générations précédentes d'une part, et d'autre part un opérateur de comparaison basé sur un calcul de la distance de *Crowding*. Sa mise en œuvre ne nécessite aucun réglage des paramètres.

3.1 Principe de fonctionnement

Les différentes étapes de fonctionnement général de l'algorithme NSGA-II (figure 2) sont :

- **Création** aléatoire de la première génération P_0 de taille N , à partir des espaces de recherche imposés)
- **Sélection** par tournoi basé sur la règle de préférence telle que définie ci-dessous et application des opérateurs de modification pour créer un ensemble d'enfants Q_t de taille N .
- **Mélange** de P_t et Q_t : $R_t = Q_t \cup P_t$.
- **Calcul** de toutes les frontières F_i de R_t et Ajout dans P_{t+1} jusqu'à ce que la taille de P_{t+1} soit égale à N .
- **Retours à Sélection.**

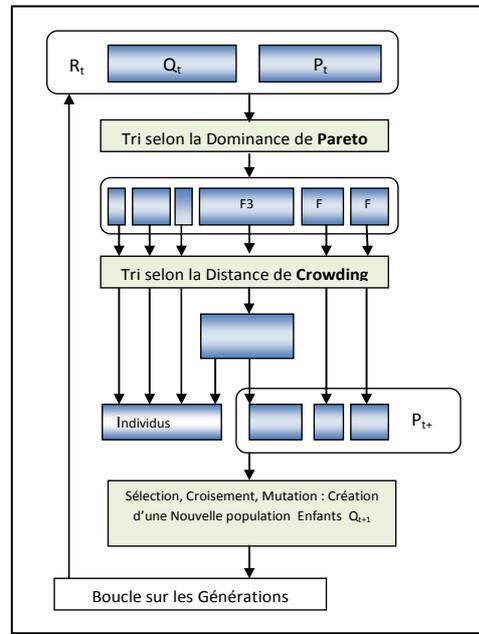


FIG. 2 – Principe de fonctionnement de l'algorithme NSGAII.

3.2 Paramétrage

On s'intéressera ici essentiellement au choix judicieux des paramètres, tels que présentés dans le tableau 1, sans détailler les procédures de notre démarche [6], [7].

Paramètres	Valeurs
Taille de la population	100 Individus
Sous population	5
Nombre de générations	200 générations
Nombre de fonctions objectives	02 fitness (coûts, temps)
Nombres de contraintes	04
Nombre de variable	2 variables : V_c et f

TAB. 1 – Valeurs des paramètres de l'Algorithme NSGAII.

4 Application à l'optimisation d'une opération de fraisage en bout

4.1 Données expérimentales relatives à l'opération de fraisage

Nous considérons une opération d'ébauche en fraisage en bout d'une pièce en XC 38, avec une fraise à surfacer en CM-P25 ($\gamma = -7^\circ$, $\gamma_r = 90^\circ$, $F_{CS0} = 2500 \text{ N/mm}^2$, $\gamma_0 = 10^\circ$, $e_m = 0.4 \text{ mm}$) sur une machine à CN (Tableau 2). Plusieurs essais ont été effectués avec une population de 50 individus évoluant pendant 100 générations

(1^{er} test), et respectivement avec une population de 100 individus évoluant pendant 200 générations (2^{ème} test), en imposant des valeurs de la profondeur de passe variant de 0.5 à 6 mm.

Espaces de recherche	f_{min} (mm/tr)	f_{max} (mm/tr)	$V_c min$ (m/min)	$V_c max$ (m/min)	a_p (mm)
valeurs	0.15	0.55	250	500	[0.5- 6]
Paramètres fraise	$L_{usinée}$ (mm)	D_{Outil} (mm)	Z (dents)	L_{outil} (mm)	a_r (mm)
valeurs	170	125	7	18	100
Contraintes d'usinage	C_{MAX} (Nm)	P_{CMAX} (KW)	f_{LMax} (mm)	R_{tMAX} (μ m)	T_{ref} (min)
valeurs	20.000	7.5	0.002	2	45
Paramètres économiques	P_f (€/arête)	P_d (€)	P_o (€/min)	t_{CO} (min)	t_l (min/pièce)
valeurs	14.17	0.18	0.26	0.20	0.05

TAB. 2 – Paramètres de coupe expérimentaux.

4.2 Résultats et discussion

La figure 3 reproduit l'espace de solutions (Front de Pareto) représentant l'ensemble des individus non dominés obtenus après plusieurs essais sur 200 générations et une population de 100 individus (à gauche), et l'espace de recherche représentant les individus pour $a_p=1$ mm (à droite). La figure 4 montre la variation des objectifs dans les sous-populations pour 200 générations (à gauche), et la variation des valeurs des individus pour un écoulement de 100 générations (à droite).

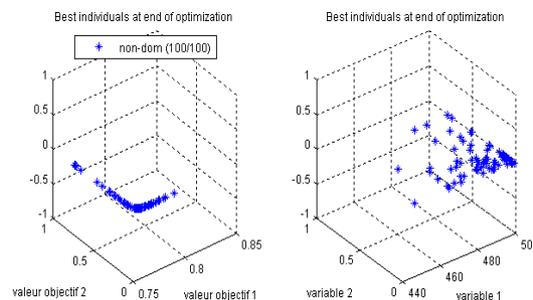


FIG.3 – Espaces de solutions Pareto optimale pour plusieurs essais après 200 générations et une population de 100 (à gauche); Espace de recherche des individus regroupés pour une vitesse de 500 mm/min (à droite).

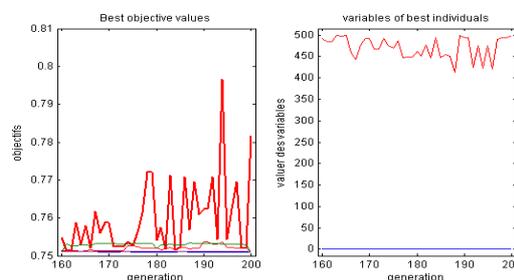


FIG.4 – Variation des objectifs dans les sous populations en fonction de nombre de générations (à gauche) et variation de la vitesse de coupe V_c et de l'avance par tour f en fonction de nombre de générations (à droite).

Tous les tests effectués ont montré que ce modèle implémenté est capable de converger très rapidement (en temps CPU) vers la surface de Pareto, en sélectionnant les meilleurs chromosomes rencontrés parmi les populations optimales. Ces chromosomes (meilleures générations) représentent les valeurs optimales pour des vitesses de coupe V_c et des avances f , à des coûts et temps de coupe minimisés.

a_p (mm)	$V_{c, optimal}$ (mm/s)	$f_{optimal}$ (mm/tr)	T_u (min)	P_u (€)	CPU (min)	Meilleures Générations
0.5	490.83	0.52603	0.050101	0.19300	2.20	91
1	492.84	0.51368	0.050102	0.19302	1.14	144
2.0	399.98	0.50277	0.050104	0.19303	1.30	192
3.0	399.49	0.26503	0.050198	0.19305	1.40	82
1.0	397.51	0.1988	0.050266	0.19307	1.36	166
5.0	399.91	0.16524	0.050318	0.19308	1.41	165
6.0	309.93	0.15210	0.050452	0.19312	1.48	90

TAB. 3 – Résultats obtenus sur une population de 100 individus après 200 générations.

5 Conclusion

La qualité des solutions obtenues laisse entrevoir de réelles possibilités d'application industrielle pour l'optimisation multi-objectif des opérations de fraisage multi-passes de produits à forte valeur ajoutée, et la détermination du « Couple Outil-Matière » optimal.

Les performances du modèle proposé demeurent perfectibles au niveau notamment de la précision et la rapidité de l'algorithme génétique lui-même par un choix plus affiné des paramètres de départ, par une parallélisation des calculs lors de l'évaluation des fonctions objectifs et des contraintes d'usinage pour chaque individu, et par une prise en compte d'autres contraintes d'usinage liées à l'interaction « Matière-Outil-Machine », basées sur des modèles géométriques et thermo-mécaniques plus fiables et robustes.

Nomenclature

F_{cs}	Pression spécifique de coupe [N.mm ⁻²]	γ	Angle de coupe [°]
F_{cs0}	FCS ₀ de Ref. [N.mm ⁻²]	α_r	Angle de direction de coupe [°]
E	Module d'élasticité long. [N.mm ⁻²]	f_z	Avance par dent [mm/dent]
A_r	Largeur fraisée [mm]	n, p, q, k	Exposants et Constante de Taylor
L_{outil}	Longueur efficace de la fraise [mm]	p_a	Coût auxiliaire de lancement de la série [€]
z_e	Nombre de dents z en prise	P_o	Coût machine [€·min ⁻¹]
N	Fréquence de rotation [t/min]	p_l	Prix de revient d'une arête de coupe [€·arête ⁻¹]
e_m	Épaisseur du copeau [mm]	t_a	Temps fixes, auxiliaires [min/pièce]
e_0	Épaisseur du copeau de Ref. [mm]	t_{co}	Temps de changement d'outil [min]
γ_0	Angle de coupe de Ref. [°]	t_c	Temps de coupe [min]

References

- [1] Wang Z.W., Rahman M., Wong Y.S., Sun J., Optimization of multi-pass milling using parallel genetic algorithm and parallel genetic simulated annealing. International of Machine Tools and Manufacture, 45, pp- 1725/1736, 2005.
- [2] Tandon V., H.el-mounayri, H.kishawy, NC end milling optimization using evolutionary computation. International journal of Machine Tools and manufacture 42, pp- 595/605, 2002.
- [3] Coello C. et al., 2004, Evolutionary algorithm, thèse de doctorat, Toolbox Introduction, Overview, Methods, 2004.
- [4] Ghali. K., Méthodologie de conception de systèmes à base de plateformes reconfigurables et programmables" Thèse de doctorat, université Paris XI, 2006.
- [5] Belaidi I, et al., Un modèle basé sur l'algorithme NSGA-II pour l'optimisation des paramètres de tournage, 10^{ème} colloque de l'innovation AIP-PPRIMECA, La Plagne 2007.
- [6] Hartemut P., Genetic and evolutionary algorithms for solving multi-objective problems" K.A. Publisher,
- [7] Muhlenbein H., The breeder Genetic Algorithm-approvable optimal search algorithm and its application". Colloquium on Applications of Genetic Algorithms, IEEE 94/067, London, 1994.