

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Facultés des sciences et de la technologie.

Département Génie Mécanique.

Mémoire de Fin de Cycle

En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction mécanique

Présentée par

Chaoui Abdeldjalil

Intitulée

***Comparaison des performances des méthodes
MCDM lors du tournage à sec de l'acier inoxydable***

Sous la direction :

Pr. Boucherit Sebti

Dr. Kaddeche Mounia

Année Universitaire : 2024/ 2025

DÉDICACE

*À mon Dieu, pour Sa guidance, Sa force et Sa bénédiction qui m'ont
accompagné tout au long de ce parcours.*

*À mon père, pour son soutien constant, ses conseils et son exemple de
persévérance.*

*À ma chère mère, pour son amour inconditionnel, ses prières et sa
patience infinie.*

*À ma famille, pour leur présence réconfortante et leurs encouragements
de chaque instant.*

*À mes amis, pour leur amitié sincère, leur soutien et les moments de
partage qui ont rendu ce chemin plus doux.*

*Je vous dédie ce mémoire avec tout mon amour, ma gratitude et mon
respect.*

REMERCIEMENTS

À la fin de ce travail, je tiens tout d'abord à remercier Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir donné la foi et de m'avoir permis d'en arriver là.

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Mécanique et de Structures (LMS) du département de Génie mécanique de l'Université du 08 Mai 1945 Guelma.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Pr Boucherit Sebti et à Mme Kaddeche Mouria, pour la patience et la confiance qu'ils m'ont accordées, pour leurs pertinentes remarques et précieux conseils, ainsi que pour leur disponibilité et leur bienveillance tout au long de ce travail.

Je remercie également l'ensemble de mes enseignants du département de Génie mécanique, pour les efforts qu'ils ont consacrés à ma formation tout au long de mon cursus universitaire.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les membres du jury, pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour leurs remarques constructives. Qu'ils trouvent ici le témoignage de mon profond respect.

Enfin, j'exprime ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont encouragé et soutenu, de près ou de loin, tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Résumé

Une étude comparative a été menée sur les performances de différentes méthodes d'aide à la décision multicritères (MCDM) appliquées à l'usinage à sec de l'acier inoxydable AISI 304. L'objectif principal est d'évaluer l'efficacité des méthodes VIKOR, TOPSIS, MARCOS et CoCoSo, en intégrant plusieurs critères décisionnels liés à la qualité de surface, au coût de fabrication et au temps d'usinage.

L'approche expérimentale repose sur un plan d'expériences de type Taguchi L18. Les essais d'usinage ont été réalisés sur des éprouvettes en acier inoxydable AISI 304 avec différentes configurations de coupe. Les résultats expérimentaux ont ensuite été traités à l'aide des méthodes MCDM retenues, en utilisant des pondérations déterminées par la méthode AHP.

Une analyse de sensibilité a permis d'évaluer la robustesse des différentes approches vis-à-vis des critères sélectionnés. Les résultats obtenus offrent des recommandations concrètes pour optimiser le tournage à sec de l'acier inoxydable AISI 304, tout en guidant le choix des méthodes MCDM les plus adaptées au contexte de l'usinage.

Mots-clés : MCDM, usinage à sec, acier inoxydable AISI 304, TOPSIS, VIKOR, MARCOS, CoCoSo, AHP.

Abstract

A comparative study was conducted on the performance of various Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods applied to the dry machining of AISI 304 stainless steel. The main objective is to evaluate the effectiveness of the VIKOR, TOPSIS, MARCOS, and CoCoSo methods, by integrating several decision criteria related to surface quality, manufacturing cost, and machining time.

The experimental approach is based on a Taguchi L18 design of experiments. Machining tests were carried out on AISI 304 stainless steel specimens using different cutting configurations. The experimental results were then processed using the selected MCDM methods, with weights determined by the AHP method.

A sensitivity analysis was performed to assess the robustness of the different approaches with respect to the selected criteria. The results provide concrete recommendations for optimizing the dry turning of AISI 304 stainless steel, while guiding the choice of the most suitable MCDM methods in the machining context.

Keywords: MCDM, dry machining, AISI 304 stainless steel, TOPSIS, VIKOR, MARCOS, CoCoSo, AHP.

ملخص

تم إجراء دراسة مقارنة لأداء طرق اتخاذ القرار متعددة المعايير (MCDM) عند تطبيقها على التشغيل الجاف للفولاذ المقاوم للصدأ AISI 304. يهدف البحث إلى تقييم فعالية طرق VIKOR و TOPSIS و MARCOS و CoCoSo، بالاعتماد على مجموعة من المعايير المتعلقة بجودة السطح، تكلفة التصنيع، وزمن التشغيل.

استند المنهج التجريبي إلى خطة تجارب من نوع Taguchi L18 وقد أُجريت تجارب التشغيل على عينات من الفولاذ المقاوم للصدأ AISI 304 باستخدام عدة إعدادات مختلفة لبارامترات القطع. بعد ذلك، تمت معالجة النتائج التجريبية باستخدام الطرق المختارة لـ MCDM، مع الاعتماد على أوزان المعايير المستخرجة بواسطة طريقة AHP.

كما أُجري تحليل الحساسية لتقييم مدى ثبات وموثوقية هذه الطرق المختلفة تجاه المعايير المُعتمدة. توفّر النتائج المتوصّل إليها توصيات عملية لتحسين عملية التشغيل الجاف لهذا النوع من الفولاذ، بالإضافة إلى توجيه اختيار أنسب طرق MCDM في سياق التصنيع.

الكلمات المفتاحية: MCDM، التشغيل الجاف، فولاذ مقاوم للصدأ AISI 304، TOPSIS، VIKOR، MARCOS،

AHP، CoCoSo

TABLE DE MATIÈRES

Dédicace	
Remerciements	
Résumé	I
Abstract	II
ملخص	III
TABLE DE MATIÈRES	IV
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX	VIII
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur l'usinage et état de l'art	
I.1. Usinabilité	4
I.1.1 Définitions de l'usinabilité	4
I.1.2 Facteurs influençant l'usinabilité	4
I.1.3 Critères d'évaluation de l'usinabilité	4
I.1.4 Le procédé de tournage	5
I.2. Les Aciers Inoxydables	7
I.2.1 Définition des aciers inoxydables	7
I.2.2 Types d'aciers inoxydables	7
I.2.3 Propriétés des aciers inoxydables	9
I.2.4 Domaines d'utilisations et applications des aciers inoxydables	9
I.3. Quelques propriétés des aciers inoxydables AISI 304	10
I.3.1. Composition chimique	11
I.3.2. Propriétés mécaniques	11

I.3.3. Propriétés physiques	11
I.3.4. Comparaison avec d'autres grades	11
I.4.ETAT DE L'ART	12
Chapitre II : Revue des Méthodes MCDM et des Critères d'Évaluation	
II.1. Présentation des méthodes MCDM	21
II.1.1 Introduction	21
II.2 Classification des méthodes MCDM	21
II.2.1. Méthodes de Compensation (Compensatory Methods)	21
II.2.2. Méthodes de Surclassement (Outranking Methods)	21
II.2.3. Méthodes Basées sur l'Utilité et la Valeur (Utility and Value-Based Methods)	22
II.2.4. Méthodes Hybrides et Intégrées	22
II.3 Revue des principales méthodes MCDM utilisées dans la littérature	22
II.3.1 TOPSIS	22
II.3.2 VIKOR (VIseKriterijumskaOptimizacija I KompromisnoResenje)	24
II.3.3 MOORA (Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis)	25
II.3.4 MARCOS	25
II.3.5 GRA (Grey RelationalAnalysis)	27
II.4 Critères d'Évaluation des Méthodes	30
II.4.1 Coefficient de corrélation de Spearman (Une Mesure de Corrélacion)	31
II.4.2 Entropie de Shannon (Une Mesure d'Incertitude)	31
II.4.3 Coefficient de Corrélacion de Pearson	32
II.4.4 Ranking Consistency Index (RCI)	33
II.4.5 Distance Euclidienne : Une Mesure de Similarité	35
II.4.6 Distance de Manhattan : (Une Mesure d'Écart Linéaire)	35
II.4.7 Méthode de Chebyshev	36
II.5 Application des Méthodes MCDM dans le Contexte de l'Usinage	37
II.5.1 Présentation du contexte industriel : usinage de l'acier inoxydable AISI 304	37

II.5.2 Identification des Critères de Décision Pertinents	38
II.6 Conclusion	40
Chapitre III : Méthodologie et Expérimentation	
III.1. Introduction	42
III.2. Equipements et préparations des expériences	42
III.2.1 Machine-outil	42
III.2.2. Outils de coupe utilisés	42
III.2.3. Porte outil utilisé	43
III.2.4. Eprouvettes d'usinage	44
III.2.5. Etat de surface de la pièce	45
III.3. Planification des expériences	46
Chapitre IV : Analyse des résultats et recommandation	
IV.1 Introduction	50
IV.2 Présentation de la méthode AHP	50
IV.3 Explications des résultats	54
IV.3.1 Méthode TOPSIS	54
IV.3.2 Méthode VIKOR	56
IV.3.3 Méthode MARCOS	57
IV.3.4 Méthode CoCoSo	59
IV.4 Etude la sensibilité des méthodes	60
IV.4.1 Classements des alternatives selon les méthodes MCDM	61
IV.4.2 Comparaison des scores normalisés par alternative	62
IV.4.3 Analyse des métriques de sensibilité par méthode	62
IV.4.4 Résultats du vote pluraliste	63
IV.5 Perspectives pour les recherches futures	65
Conclusion générale	66
REFERECES	

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Opération de tournage.

Figure I.2 : Diagramme d'équilibre fer-carbone (Fe-C)

Figure I.3 : (a) Schéma du dispositif expérimental (b) Dispositif expérimental

Figure I.4 : Influence de la rugosité de surface sur les broches mécanique et hydraulique

Figure 1.5 : Influence de la force d'usinage sur les broches mécanique et hydraulique

Figure I.6 : Diagramme des effets principaux pour la rugosité de surface

Figure III.1 : Tour à charioter et à fileter modèle SN40C

Figure III.2 : Plaquettes de coupe en carbure avec revêtement CVD (GC2015)

Figure III.3 : Plaquette de coupe revêtue

Figure III.4 : Porte plaquette utilisé

Figure III.5 : Eprouvette utilisée pour les essais.

Figure III.6 : Rugosimètre Mitutoyo Modèle SurfTest SJ-210

Figure IV-1 : Page d'accueil du calculateur AHP

Figure IV-2 : Nombre de critères dans l'outil AHP Calculator

Figure IV-3 : L'interface de saisie des noms des critères dans l'outil AHP Calculator

Figure IV-4 : L'outil calcule automatiquement les poids relatifs des critères ainsi que le taux de cohérence (CR)

Figure IV-5 : Détermination du poids relatifs des critères à partir des comparaisons par paires

Figure IV-6 : Graphique du Classements des alternatives selon les méthodes MCDM

Figure IV-7 : Graphique de la comparaison des scores normalisés par alternative

Figure IV-8 : Graphique d'analyse des métriques de sensibilité par méthode

Figure IV-9 : Graphique du vote pluraliste

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Composition chimique de AISI 304

Tableau I.2 : Propriété mécanique du AISI 304

Tableau I.3 : Propriété physique de AISI 304

Tableau I.4 : Comparaison du AISI 304 avec des autres grades

Tableau II.1 : Comparaison des principales méthodes MCDM selon leurs forces et faiblesses

Tableau III.1 : Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées

Tableau III.2 : Caractéristiques de porte outil utilisé

Tableau III.3 : Plan d'expérience de Taguchi pour un plan de 18

Tableau III.4 : Paramètres de coupe et leurs niveaux pour un plan de 18 essais

Tableau III.5 : Résultats des essais

Tableau IV-1 : Résultat de méthode TOPSIS

Tableau IV-2 : Résultat de méthode VIKOR

Tableau IV-3 : Résultat de méthode MARCOS

Tableau IV-4 : Résultat de méthode CoCoSo

Tableau IV-5 : Comparaison des quatre méthodes

Tableau IV-6 Classement des alternatif de chaque méthode

Le tableau IV-7 Résultat des métriques pour chaque méthode

Tableau IV-8 Interprétation des métriques pour chaque méthode

Tableau IV-9 Signification des métriques

Tableau IV-10 Interprétation des métriques de consensus et de corrélation entre méthodes de classement

Tableau IV-11 Synthèse des performances des méthodes selon différentes métrique de comparaison

Tableau IV-12 Résultat des votes pluraliste

Introduction générale

L'usinage du matériau AISI 304, un acier inoxydable largement utilisé dans l'industrie, pose des défis importants en raison de ses propriétés spécifiques telles que sa ductilité et sa résistance à la corrosion. Le tournage à sec, technique d'usinage sans lubrification, présente des avantages écologiques et économiques, mais nécessite une optimisation rigoureuse des paramètres pour assurer la qualité et la durabilité des outils.

Dans ce contexte, les méthodes de décision multicritères (MCDM) jouent un rôle clé dans le choix des paramètres et des stratégies d'usinage. Cependant, face à la diversité de ces méthodes, il est nécessaire d'évaluer leurs performances respectives afin d'orienter les ingénieurs vers les solutions les plus adaptées.

Ce mémoire propose une comparaison des performances de plusieurs méthodes MCDM – notamment TOPSIS, VIKOR, MARCOS et COCOSO – appliquées à l'analyse du tournage à sec de l'acier inoxydable AISI 304. Cette étude s'appuie sur des données expérimentales obtenues lors d'essais de tournage, permettant ainsi d'évaluer de manière objective les avantages et limites de chaque méthode.

La structuration du travail s'organise autour d'une revue des méthodes MCDM, de la présentation de la méthodologie expérimentale, de l'application pratique des méthodes, et de l'analyse comparative des résultats. Enfin, des recommandations seront proposées pour faciliter l'intégration de ces outils dans la prise de décision industrielle.

Ce travail vise à fournir un cadre méthodologique clair et pertinent pour améliorer les performances du tournage à sec, en aidant à la sélection optimale des paramètres via des méthodes d'aide à la décision multicritères.

Ce travail est organisé en quatre chapitres distincts :

Le premier chapitre, qui constitue l'étude bibliographique, est structuré en deux grandes parties. La première est consacrée à l'usinabilité, en abordant les notions fondamentales du processus d'usinage et les principaux paramètres de coupe intervenant dans le tournage. La seconde partie porte sur les aciers inoxydables, en particulier la nuance AISI 304, en détaillant leur désignation, leurs équivalents, ainsi que leurs propriétés physiques et chimiques qui influencent directement leur comportement en usinage.

Le deuxième chapitre est dédié à la revue des méthodes d'aide à la décision multicritères (MCDM) et des critères d'évaluation. Il présente d'abord une classification des principales méthodes MCDM, en détaillant leurs principes, leurs avantages et leurs limites. Une attention particulière est portée aux méthodes couramment utilisées dans la littérature, telles que TOPSIS VIKOR MARCOS CoCoSo...etc. Le chapitre introduit ensuite les indicateurs de performance retenus pour évaluer et comparer ces méthodes — tels que le coefficient de Spearman, l'entropie, Le ranking RCI ... en justifiant leur pertinence. Enfin, une section spécifique est consacrée à l'application de ces méthodes dans le contexte industriel de l'usinage à sec de l'acier inoxydable AISI 304, en identifiant les critères de décision les plus pertinents pour ce domaine.

Le troisième chapitre porte sur la méthodologie expérimentale mise en œuvre dans le cadre de cette étude. Il décrit les équipements utilisés, notamment le tour, les outils et porte-outils, les éprouvettes en acier inoxydable AISI 304, ainsi que le rugosimètre 2D employé pour la mesure de la qualité de surface. Ce chapitre présente également le plan d'expériences adopté (plan de Taguchi L18), qui permet de structurer de manière rigoureuse la collecte des données nécessaires à l'évaluation des performances des différentes méthodes MCDM.

Le quatrième chapitre est consacré à l'analyse des résultats et aux recommandations. Il présente les calculs détaillés des résultats obtenus avec les méthodes TOPSIS, VIKOR, MARCOS et CoCoSo, en s'appuyant sur les pondérations issues de la méthode AHP. Une analyse de sensibilité approfondie est également réalisée afin d'évaluer la robustesse des différentes méthodes par rapport aux critères définis précédemment. Ce chapitre met en évidence les performances comparées des approches étudiées et propose des recommandations pratiques pour leur utilisation optimale dans le contexte du tournage à sec de l'acier inoxydable AISI 304.

Enfin, nous clôturons avec une conclusion générale.

Chapitre I

*Généralités sur
l'usinage et état de
l'art*

I.1. USINABILITE

I.1.1 Définitions de l'usinabilité

L'usinabilité peut être décrite comme la capacité d'un matériau à être transformé par des procédés d'enlèvement de copeaux. Les méthodes d'usinage sont variées, et la majorité d'entre elles peuvent être utilisées pour travailler les aciers inoxydables [1].

Elle est également souvent caractérisée par trois éléments clés : la puissance requise, la dégradation des outils, et la qualité de la surface obtenue. Ainsi, un matériau est considéré comme ayant une bonne usinabilité s'il peut être usiné en consommant moins d'énergie, en provoquant une usure réduite des outils, et en générant une surface finie de haute qualité, exempte de défauts [2].

Le concept d'usinabilité est donc utilisé pour évaluer la facilité avec laquelle un matériau peut être usiné dans des conditions de coupe spécifiques.

I.1.2 Facteurs influençant l'usinabilité

L'usinabilité est un terme utilisé pour décrire la capacité d'un matériau à être usiné à l'aide d'un outil de coupe. Elle représente la facilité avec laquelle un matériau peut être travaillé par enlèvement de matière. L'usinabilité dépend de plusieurs facteurs [3] :

- a) La composition chimique du matériau à usiner,
- b) Sa structure,
- c) Ses propriétés mécaniques,
- d) Ses propriétés physiques,
- e) Les conditions de coupe utilisées.

I.1.3 Critères d'évaluation de l'usinabilité

Suite à la diversité des définitions de l'usinabilité, les critères d'évaluation varient également d'un chercheur à l'autre :

- a) Les critères de l'usinabilité d'après Kalpakjian [4] sont :
 - La durée de vie de l'outil : Elle permet d'atteindre une production maximale.
 - Les efforts de coupe : Ils déterminent la puissance nécessaire à la broche de la machine-outil.
 - La rugosité de la surface usinée : Elle permet de choisir les conditions de coupe en fonction de la destination finale de la pièce usinée.

b) D'après **Jawahir** les principaux critères sont classés selon l'ordre suivant [5] :

- La rugosité de la surface usinée : Elle définit l'aptitude au fini de surface.
- L'effort de coupe : Elle détermine la résistance de la coupe.
- La durée de vie de l'outil : Elle est liée à la vitesse de coupe permettant d'obtenir une durée de vie donnée ou une usure spécifique pour un temps donné. Certains chercheurs considèrent l'usure comme l'effet le plus observable.

c) D'après **S. K. Hansda**, les principaux critères sont classés de la manière suivante [6] :

- La durée de vie de l'outil.
- L'effort de coupe.
- La température de coupe.
- Les caractéristiques du copeau : Couleur, type et épaisseur du copeau.

I.1.4 Le procédé de tournage

Le tournage est un procédé d'usinage qui met en œuvre des outils à arête de coupe unique. Il repose sur la rotation de la pièce à usiner, un mouvement imposé par la machine-outil, qui constitue le mouvement principal et est assimilable au mouvement de coupe. L'outil, quant à lui, est animé d'un mouvement de translation (rectiligne ou curviligne), appelé mouvement d'avance, qui permet de façonner le profil de la pièce (**Figure I.1**).

La combinaison de ces deux mouvements positionne précisément l'arête tranchante de l'outil, permettant ainsi l'usinage de formes de révolution plus ou moins complexes. Malgré sa cinématique relativement simple, le tournage reste un procédé fondamental en raison de son importance dans de nombreux secteurs industriels [7].



Figure I.1 : Opération de tournage.

I.2.4.1 Les paramètres de coupe

I.2.4.1.1 Vitesse de coupe (V_c)

En tournage, la vitesse de coupe est la vitesse relative de l'outil par rapport à la pièce. Il s'agit donc de la vitesse tangentielle au point de la pièce coïncidente avec la pointe de l'outil. Cette vitesse qui s'exprime toujours en mètres par minute (m/min) se calcule ainsi :

$$V_c = \pi \cdot D \cdot N / 1000 \dots\dots\dots \mathbf{I.1}$$

V_c : vitesse de coupe ;

D : diamètre de la pièce en mm au point d'usinage ;

N : correspond à la fréquence de rotation de la pièce en mm/tr.

En permutant les termes de la formule précédente, on obtient : $N = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D}$ **I.2**

N : C'est la vitesse de rotation de la broche que l'on règle sur la machine, Donc il faut connaître la valeur de la vitesse de coupe (V_c), dont la valeur est plus souvent issue des méthodes empiriques. Certains organismes, comme le CETIM pour l'industrie mécanique, ont établi des tableaux de référence. La vitesse de coupe (V_c) est déterminée en fonction de différents facteurs :

- De la matière à usiner : en général plus elle est tendre et plus la vitesse est élevée ;
- De la matière de l'outil de coupe, de la géométrie de l'outil de coupe ;
- Du type d'usinage : ébauche, finition, filetage...etc ;
- Du lubrifiant, qui permet une augmentation de la vitesse (qui ne s'utilise presque plus dans l'industrie moderne, remplacé par l'UGV) ;
- De la qualité du tour : plus il est rigide, plus il supportera des vitesses élevées

I.2.4.1.2 Avance (f)

En tournage, l'avance est la vitesse avec laquelle progresse l'outil suivant l'axe de rotation pendant une révolution de la pièce, cette vitesse est déterminée expérimentalement en fonction des critères précédemment cités. Cela correspond, en première approximation à l'épaisseur du copeau. On règle l'avance directement sur la machine [8]. A ne pas confondre avec la formule de calcul de l'avance en fraisage, qui est :

$$V_f = V_z \cdot Z \cdot N \dots\dots\dots \mathbf{I.3}$$

V_f : avance en mm/min ;

V_z : avance par dent en mm/ (dent.Tour) ;

Z : nombre de dents de la fraise ;

N : fréquence de rotation réglée sur la machine en tr/min.

En tournage, si on veut calculer la vitesse d'avance de l'outil, on applique cette formule :

$$V_f = f_z \cdot N \quad \text{I.4}$$

I.2.4.1.3 Profondeur de passe (ap)

Elle est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas selon l'arête de l'outil. En chariotage par exemple elle correspond à la différence de rayon entre la surface usinée et la surface précédente. C'est un critère important pour choisir le mode de travail en ébauche ou en finition, mais il reste secondaire par rapport aux précédents. La profondeur de passe est souvent limitée technologiquement au 2/3 de la longueur utile de l'arrêt de coupe utilisé et aussi par la puissance utile disponible sur la broche [7]

I.2. Les Aciers Inoxydables

I.2.1 Définition des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont des alliages à base de fer contenant un minimum de 10,5 % de chrome en masse. Ce chrome forme une couche passive d'oxyde de chrome à la surface, qui confère à ces matériaux leur résistance à la corrosion et leur aspect brillant caractéristique [9].

I.2.2 Types d'aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont classés en cinq familles principales en fonction de leur microstructure et de leur composition chimique [10] :

1. **Aciers inoxydables austénitiques** (ex. : AISI 304, AISI 316) :
 - Contiennent du nickel (8-10 %) et du chrome (18-20 %).
 - Excellente résistance à la corrosion et ductilité.
 - Non magnétiques.
2. **Aciers inoxydables ferritiques** (ex. : AISI 430) :
 - Contiennent principalement du chrome (12-18 %).
 - Magnétiques et moins chers que les austénitiques.
 - Résistance modérée à la corrosion.
3. **Aciers inoxydables martensitiques** (ex. : AISI 410, AISI 420) :
 - Contiennent du chrome (12-14 %) et du carbone.
 - Durcissables par traitement thermique.
 - Utilisés pour leurs propriétés mécaniques élevées.
4. **Aciers inoxydables duplex** (ex. : UNS S32205) :
 - Combinaison de structures austénitiques et ferritiques.
 - Excellente résistance à la corrosion et à la fissuration.
 - Utilisés dans les environnements agressifs.
5. **Aciers inoxydables précipitation durcissables** (ex. : 17-4 PH) :
 - Durcissables par traitement thermique.
 - Combinaison de résistance mécanique et de résistance à la corrosion.

L'acier de notre étude est un acier inoxydable fortement allié de désignation AISI 304, de type austénitique. Ces aciers sont caractérisés par un diagramme fer-carbone présenté ci-dessous (**figure I.2**)[11].

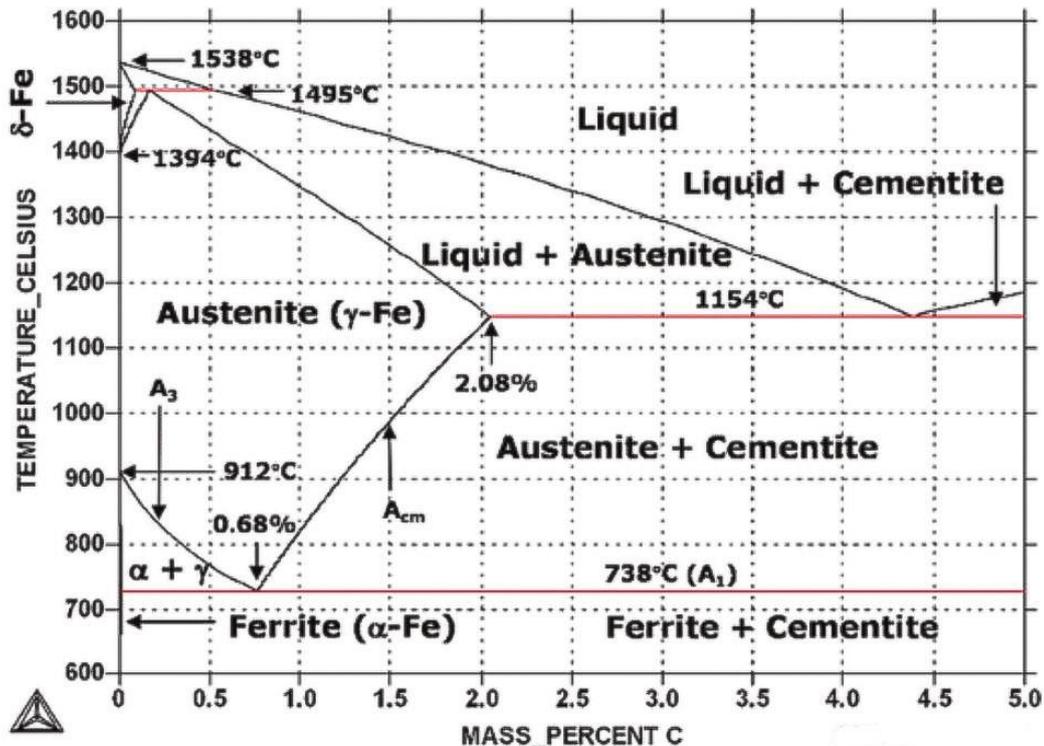


Figure I.2 : Diagramme d'équilibre fer-carbone (Fe-C)

L'acier inoxydable austénitique AISI 304 est largement utilisé en raison de sa durabilité, sa ductilité et sa résistance à la corrosion, à la fatigue et à l'oxydation. Cependant, son fort écrouissage, sa faible conductivité thermique et la formation de bavures rendent son usinage difficile. Pour améliorer la durée de vie des outils et la qualité de l'usinage, divers fluides de coupe sont employés. Cet article passe en revue les recherches sur l'usinage de l'AISI 304, en analysant ses applications et les facteurs influençant ses performances, afin d'optimiser les paramètres d'usinage et le choix des machines [12].

I.2.2.1 Désignation et équivalents

L'AISI 304 est un acier inoxydable austénitique couramment utilisé pour sa résistance à la corrosion et sa polyvalence. Voici ses équivalents dans les principales normes internationales [13] :

- **EN (Europe)** : 1.4301
-Norme européenne pour les aciers inoxydables (EN 10088-2).
- **UNS (États-Unis)** : S30400
-Désignation selon le système unifié de numérotation (Unified Numbering System).

- **JIS (Japon) : SUS 304**

-Norme japonaise pour les aciers inoxydables (Japanese Industrial Standards).

- **ISO (International) : X5CrNi18-10**

-Norme internationale, où "X" désigne un acier inoxydable, "5" la teneur en carbone (0,05 % max), et "CrNi18-10" la composition en chrome (18 %) et nickel (10 %).

- **GOST (Russie) : 08X18H10**

Norme russe, où "08" indique la teneur en carbone (0,08 % max), "X18" le chrome (18 %), et "H10" le nickel (10 %).

I.2.3 Propriétés des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables possèdent des propriétés uniques qui les rendent indispensables dans de nombreuses applications :

1. **Résistance à la corrosion** : Grâce à la couche passive d'oxyde de chrome [14].
2. **Résistance mécanique** : Les aciers martensitiques et duplex offrent une excellente résistance à la traction et à la fatigue.
3. **Hygiène et facilité de nettoyage** : Surface lisse et non poreuse, idéale pour les applications alimentaires et médicales [15].
4. **Résistance à la chaleur** : Certains grades résistent à des températures élevées (ex. : AISI 310).

I.2.4 Domaines d'utilisations et applications des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont des matériaux polyvalents et performants, utilisés dans une grande variété de secteurs industriels en raison de leurs propriétés exceptionnelles, telles que la résistance à la corrosion, la durabilité et la facilité d'entretien. Voici les principaux domaines d'utilisation :

- **Industrie alimentaire**

Dans l'industrie alimentaire, les aciers inoxydables sont privilégiés pour leur hygiénicité, leur résistance à la corrosion et leur facilité de nettoyage. Ces propriétés garantissent le respect des normes sanitaires strictes et assurent la longévité des équipements. Parmi les applications courantes, on retrouve les équipements de transformation tels que les cuves, réservoirs et convoyeurs, ainsi que les machines de conditionnement et de remplissage. Un grade couramment utilisé dans ce secteur est l'AISI 304, un acier austénitique offrant une excellente résistance à la corrosion et une grande facilité de nettoyage [16].

- **Domaine médical**

Le secteur médical apprécie les aciers inoxydables pour leur biocompatibilité, leur résistance à la corrosion et leur durabilité. Ces caractéristiques en font des matériaux de choix pour des applications critiques. Les instruments chirurgicaux comme les pinces et les scalpels, les implants orthopédiques tels que les plaques et les vis, ainsi que les équipements de laboratoire

comme les bancs et les réacteurs, sont souvent fabriqués à partir de ces matériaux. L'AISI 316L, un acier à faible teneur en carbone, est particulièrement prisé pour sa biocompatibilité optimale et sa résistance accrue à la corrosion [17].

- **Industrie aérospatiale**

L'industrie aérospatiale exploite les aciers inoxydables pour leur résistance mécanique, leur résistance à la chaleur et leur légèreté relative. Ces propriétés sont essentielles pour les environnements extrêmes rencontrés dans ce secteur. Les composants de moteurs, comme les turbines et les arbres, ainsi que les pièces structurelles telles que les supports et les fixations, sont souvent fabriqués en acier inoxydable. L'AISI 321, un acier stabilisé au titane, est particulièrement adapté pour ses performances à haute température [18].

- **Construction**

Dans le secteur de la construction, les aciers inoxydables sont utilisés pour leur durabilité, leur résistance à la corrosion et leur esthétique. Ils sont particulièrement adaptés aux environnements exigeants, comme les zones côtières ou les milieux urbains. Les structures architecturales, telles que les façades et les toitures, les ponts et passerelles, ainsi que le mobilier urbain comme les rampes et les bancs, sont souvent réalisés en acier inoxydable. L'AISI 316, connu pour sa résistance accrue à la corrosion en milieu marin, est fréquemment utilisé dans ce domaine [19].

- **Secteur de l'énergie**

Les aciers inoxydables jouent un rôle crucial dans le secteur de l'énergie, en particulier dans les environnements corrosifs et à haute température. Leur robustesse et leur fiabilité sont essentielles pour les infrastructures énergétiques. Parmi les applications courantes, on retrouve les échangeurs de chaleur et condenseurs, les pipelines et réservoirs de stockage pour le pétrole, le gaz et les produits chimiques, ainsi que les équipements pour les énergies renouvelables comme le solaire et l'éolien. L'AISI 2205, un acier duplex, est particulièrement apprécié pour sa combinaison de résistance mécanique élevée et de résistance à la corrosion [20].

- **Autres domaines**

- **Automobile** : Échappements, pièces de moteur (ex. : AISI 409).
- **Chimie et pétrochimie** : Réacteurs, cuves de stockage (ex. : AISI 317L).
- **Électronique** : Composants résistants à la corrosion (ex. : AISI 430).

I.3. Quelques propriétés des aciers inoxydables AISI 304

L'acier inoxydable AISI 304 (appelé également 304 ou 1.4301 selon les normes européennes) est un acier austénitique largement utilisé pour son excellente résistance à la corrosion, sa facilité de formage et sa polyvalence. Composé principalement de fer, il contient environ 18 % de chrome et 8 % de nickel, lui conférant ses propriétés distinctives [21].

I.3.1. Composition chimique

La composition chimique typique de l'AISI 304 est la suivante **tableau I.1**[22] :

Tableau I.1 : Composition chimique de AISI 304

Elément	Pourcentage
Chrome (Cr)	18,0 - 20,0
Nickel (Ni)	8,0 - 10,5
Carbone (C)	≤ 0,08
Manganèse (Mn)	≤ 2,0
Silicium (Si)	≤ 1,0
Phosphore (P)	≤ 0,045
Soufre (S)	≤ 0,03
Fer (Fe)	Balance

I.3.2. Propriétés mécaniques

L'AISI 304 offre une bonne combinaison de résistance et de ductilité **tableau I.2**[23] :

Tableau I.2 : Propriété mécanique du AISI 304

Résistance à la traction	515 - 620 MPa
Limite d'élasticité	205 MPa
Allongement à la rupture	40 %
Dureté	201 HB (Brinell)

-Ces valeurs varient en fonction des traitements thermiques et des conditions de fabrication.

I.3.3. Propriétés physiques

Les propriétés physiques de l'acier inoxydable AISI304 sont [24] :

Tableau I.3 : propriété physique de AISI 304

Densité	8,0 g/cm ³
Point de fusion	1400 - 1450 °C
Conductivité thermique	16,2 W/m·K (à 100 °C)
Coefficient de dilatation thermique	17,2 µm/m·K (20-100 °C)

I.3.4. Comparaison avec d'autres grades

Tableau I.4 : Comparaison du AISI 304 avec des autres grades

Propriété	AISI 304	AISI 316	AISI 420
Resistance a la corrosion	Bonne	Excellent	Moyenne
Prix	Raisonnable	Plus élevée	Moins cher
Structure	Austénitique	Austénitique	Ferritique
Ductilité	Élevée	Élevée	Faible
Usinabilité	Moyenne	Moyenne	Faible

L'AISI 304 est un excellent choix pour une grande variété d'applications, combinant résistance à la corrosion, facilité de mise en forme et coût modéré [25].

I.4.ETAT DE L'ART

L'acier inoxydable AISI 304 est l'un des alliages les plus utilisés dans l'industrie, notamment dans les secteurs agroalimentaire, médical et chimique, grâce à ses excellentes propriétés mécaniques, sa résistance à la corrosion et sa bonne formabilité. Toutefois, ces mêmes propriétés compliquent considérablement son usinage. Sa faible conductivité thermique entraîne une accumulation rapide de chaleur dans la zone de coupe, ce qui provoque une usure prématurée des outils. De plus, sa forte ténacité et son effet d'écrouissage sous déformation rendent difficile la formation correcte des copeaux, augmentant ainsi les efforts de coupe et détériorant la qualité de surface.

Ces défis majeurs ont conduit de nombreux chercheurs à explorer des solutions innovantes pour améliorer l'efficacité de l'usinage de l'AISI 304, en optimisant à la fois les conditions de coupe et le choix des outils.

Par exemple, **Wagh et al. (2013)** ont montré que l'usinage à sec, associé à des outils revêtus de AlCrN/TiAlN appliqués par arc cathodique (CAE), offre de bonnes performances. Ces revêtements, grâce à leur excellente stabilité thermique, permettent de réduire l'usure des outils et de maintenir une qualité de surface acceptable. Ils ont également constaté qu'augmenter la vitesse de coupe diminue les forces de coupe, tandis qu'une augmentation du taux d'avance a l'effet inverse.

De leur côté, **Shirazi et al. (2023)** ont étudié l'impact du système de fixation de l'outil. Ils ont démontré que les broches hydrauliques permettent de réduire les vibrations, abaissant ainsi la rugosité de surface de 21 % et les forces de coupe de 65 % par rapport aux broches mécaniques.

Mahdavinejad et Saeedy (2011) ont, quant à eux, analysé l'optimisation des paramètres de tournage. Ils ont établi que la vitesse de coupe influence fortement l'usure des outils, tandis que le taux d'alimentation est crucial pour la qualité de la surface usinée. L'utilisation d'un fluide de coupe s'est révélée bénéfique pour prolonger la durée de vie des outils et améliorer la finition.

Enfin, **Gutnyk & Nürnberger (2023)** ont étudié l'évolution du diagramme fer-carbone (Fe-C), outil fondamental pour comprendre la structure métallurgique des aciers. Leur travail met en lumière les divergences dans les représentations du diagramme et les avancées

scientifiques qui enrichissent notre compréhension des transformations métallurgiques complexes dans ces matériaux.

Dans cet article de **Wagh et al. (2013)**, L'usinage à sec est une méthode respectueuse de l'environnement visant à réduire les coûts tout en améliorant la productivité dans l'industrie. Cet article se concentre sur l'évaluation des performances des outils revêtus d'AlCrN/TiAlN lors du tournage à sec de l'acier inoxydable AISI 304, un matériau reconnu pour sa difficulté d'usinage

L'expérience a été réalisée avec des outils revêtus d'AlCrN/TiAlN, appliqués par la technique d'évaporation cathodique (CAE). L'acier AISI 304, avec un diamètre de 90 mm et une longueur de 300 mm, a été utilisé comme pièce à usiner. Les essais ont été menés sur un tour CNC capable d'atteindre des vitesses de 5000 tr/min. Les paramètres d'usinage tels que la vitesse de coupe et le taux d'avance ont été systématiquement variés pour évaluer leur impact sur la force de coupe, la température de coupe et la rugosité de surface.

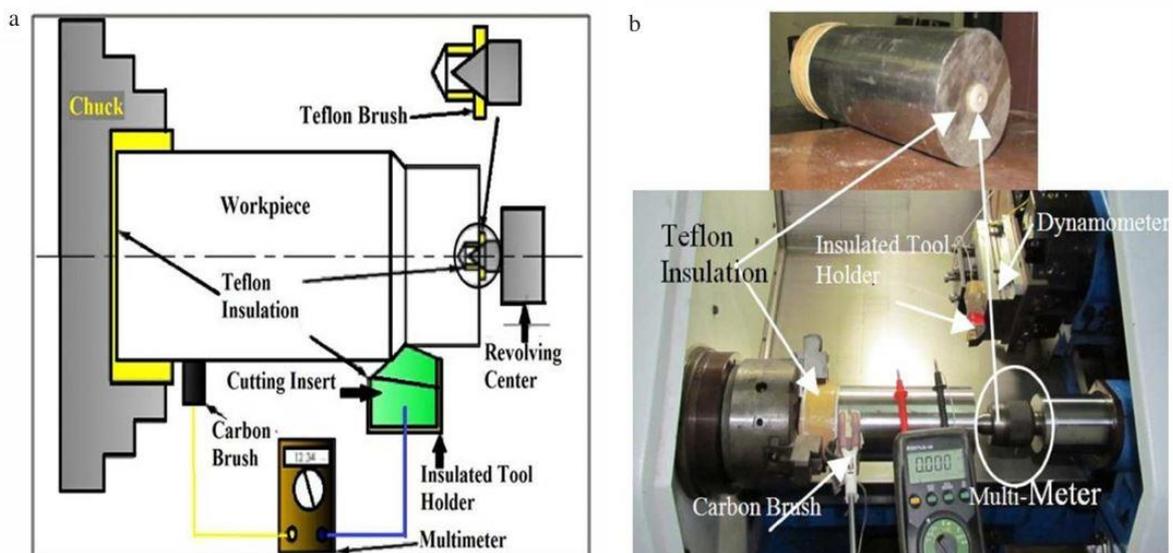


Figure I.3 (a) Schéma du dispositif expérimental (b) Dispositif expérimental

Les résultats ont montré que l'augmentation du taux d'avance entraîne une augmentation des forces radiales et, par conséquent, une rugosité de surface plus élevée à cause d'une friction accrue entre l'outil et la pièce. En revanche, des vitesses de coupe plus élevées ont permis de réduire les forces de coupe, car cela a sofité le matériau dans la zone de coupe, facilitant l'évacuation des copeaux. Les revêtements AlCrN/TiAlN ont démontré une bonne stabilité thermique, ce qui a permis une amélioration substantielle de la performance d'usinage en conditions sèches.

Cette étude met en évidence l'efficacité des revêtements AlCrN/TiAlN pour le tournage à sec de l'acier inoxydable AISI 304. Les résultats obtenus soulignent l'importance de l'optimisation des paramètres d'usinage pour améliorer la qualité de surface et réduire l'usure des outils, ouvrant la voie à des pratiques de fabrication plus écologiques et économiquement viables [26].

Dans leur étude **Shirazi et al. (2023)**, examine l'impact des systèmes de broches mécaniques et hydrauliques sur l'usinage de l'acier inoxydable AISI 304. Dans un contexte où la qualité de finition et la réduction des forces de coupe sont cruciales pour l'efficacité de l'usinage, cette étude se concentre sur l'évaluation comparative des deux types de broches afin de déterminer la solution la plus performante pour les opérations de fraisage. Les broches mécaniques, bien que couramment utilisées, souffrent de limitations telles que des vibrations excessives et des instabilités de vitesse, motivant ainsi l'exploration des alternatives hydrauliques.

Les expériences ont été conduites sur une machine de fraisage universelle existante, qui a été modifiée pour intégrer un système de broche hydraulique. La conception du système hydraulique remplace la broche mécanique traditionnelle tout en conservant le châssis et les guides de la machine d'origine. Ce changement a permis de tirer parti des avantages du contrôle hydraulique, comme une meilleure absorption des vibrations et une stabilité accrue durant le fraisage.

Afin de comparer les performances des broches mécanique et hydraulique, trois paramètres principaux d'usinage ont été définis :

1. **Vitesse de la broche (n , tr/min):**

- Niveau 1 : 800 tr/min
- Niveau 2 : 1000 tr/min
- Niveau 3 : 1250 tr/min

2. **Taux d'alimentation (F_x , mm/min):**

- Niveau 1 : 125 mm/min
- Niveau 2 : 160 mm/min
- Niveau 3 : 200 mm/min

3. **Profondeur de coupe (a_p , mm):**

- Niveau 1 : 0.25 mm
- Niveau 2 : 0.5 mm
- Niveau 3 : 0.75 mm

La méthodologie employée impliquait la réalisation d'une série de tests d'usinage suivant un plan factoriel complet, ce qui a permis d'explorer l'impact des différentes combinaisons de ces paramètres sur la performance d'usinage. Un total de 54 expériences a été réalisé, alternant entre les broches hydrauliques et mécaniques.

Les analyses incluent des mesures de la rugosité de surface et des forces de coupe. La rugosité de surface a été évaluée à l'aide d'un profilomètre, tandis que les forces de coupe ont été mesurées avec un dynamomètre dynamique. Chaque mesure a été répétée pour assurer la fiabilité des résultats. Les tests ont été effectués sans lubrification afin de minimiser les affects de l'huile sur les résultats et se concentrer sur les performances des broches elles-mêmes.

L'utilisation de logiciels d'analyse comme Minitab a permis de traiter statistiquement les données, déterminant ainsi les relations entre les paramètres d'usinage et les résultats obtenus en termes de rugosité de surface et de forces de coupe.

Les résultats ont montré une nette amélioration des performances lors de l'utilisation de la broche hydraulique par rapport à la broche mécanique :

- **Rugosité de surface** : La rugosité moyenne a été réduite de 21 % avec la broche hydraulique.
- **Forces de coupe** : Les forces de coupe ont été diminuées de 65 % lorsque la broche hydraulique était utilisée.

Il a également été constaté que :

- Une augmentation du taux d'alimentation et de la profondeur de coupe entraînait une augmentation de la rugosité de surface et des forces de coupe dans les deux configurations.
- L'augmentation de la vitesse de broche avait un effet inverse, réduisant la rugosité de surface et les forces de coupe.

Ces résultats indiquent que les broches hydrauliques sont en mesure de mieux gérer les vibrations et de fournir une qualité de finition supérieure.

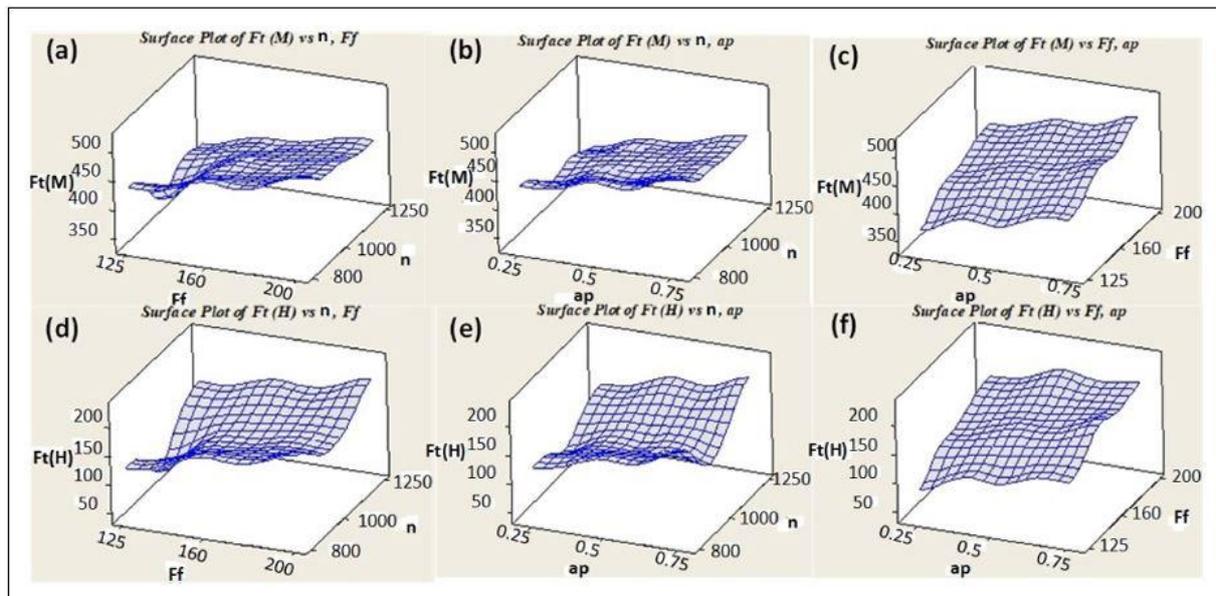


Figure I.4 Influence de la rugosité de surface sur les broches mécanique et hydraulique

(a, d) avance et vitesse de rotation de la broche ; (b, e) profondeur de coupe et vitesse de rotation de la broche ; (c, f) profondeur de coupe et avance

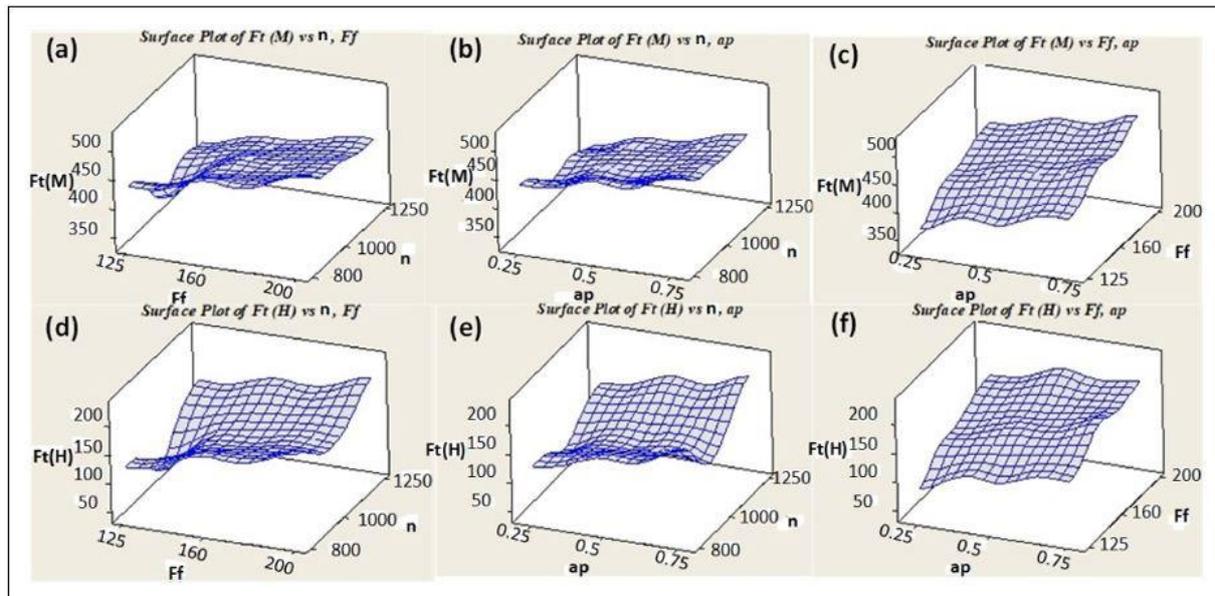


Figure 1.5 Influence de la force d'usinage sur les broches mécanique et hydraulique

(a, d) avance et vitesse de rotation de la broche ; (b, e) profondeur de coupe et vitesse de rotation de la broche ; (c, f) profondeur de coupe et avance.

En conclusion, L'utilisation d'une broche hydraulique dans le fraisage de l'acier inoxydable AISI 304 a permis de réduire la rugosité de surface de 21 % et les forces de coupe de 65 % par rapport à une broche électromécanique. Les résultats montrent que bien que la rugosité et les forces de coupe augmentent avec la vitesse d'alimentation et la profondeur de coupe, une augmentation de la vitesse de rotation les diminue. En résumé, les broches hydrauliques améliorent la qualité de finition et l'efficacité des opérations d'usinage grâce à leur capacité à amortir les vibrations.[27].

Selon **Mahdavinejad et Saeedy (2011)** L'acier inoxydable austénitique AISI 304 est largement utilisé dans diverses applications en raison de sa haute résistance, de sa ductilité et de sa résistance à la corrosion. Toutefois, il présente également des défis particuliers en matière d'usinage, notamment une faible conductivité thermique et une tendance à l'usure des outils. Cette étude vise à optimiser les paramètres de tournage afin d'améliorer l'efficacité de l'usinage de cet acier inoxydable.

Les tests de tournage ont été réalisés en utilisant un outil en carbure de tungstène sur des échantillons de matériaux de 250 mm de long et 40 mm de diamètre. Les paramètres étudiés incluent cinq vitesses de coupe (100, 125, 150, 175 et 200 m/min) et trois taux d'alimentation (0.2, 0.3 et 0.4 mm/tr), en conditions sèches et avec fluides de coupe. Un plan d'expérience (DOE) et une analyse de variance (ANOVA) ont été appliqués pour évaluer les impacts de ces paramètres sur l'usure des outils et la rugosité de surface.

L'analyse des résultats a révélé que la vitesse de coupe est le facteur le plus influent sur l'usure de la flanc, contribuant à 62,28% de l'effet total, tandis que le taux d'alimentation a eu le plus grand impact sur la rugosité de surface (54,18% de contribution). Il a été observé qu'en augmentant la vitesse de coupe jusqu'à 175 m/min, l'usure des outils diminuait considérablement, mais commençait à augmenter au-delà ce point. En outre, une diminution du taux d'alimentation est associée à une amélioration de la rugosité de surface. L'utilisation

d'un fluide de coupe a également amélioré la durée de vie des outils et la qualité des surfaces usinées.

Les résultats de cette étude soulignent l'importance des paramètres de tournage dans l'usinage de l'acier inoxydable AISI 304. La vitesse de coupe et le taux d'alimentation ont une influence significative sur l'usure de l'outil et la rugosité de surface, respectivement. L'application de fluides de coupe se révèle bénéfique pour prolonger la durée de vie des outils et améliorer les caractéristiques de finition des pièces usinées. Ces conclusions peuvent guider les industriels dans l'optimisation de leurs procédés de fabrication pour des applications pratiques [28].

Dans le cadre de leur recherche, **Gutnyk et Nürnberger (2023)** explorent l'évolution du diagramme fer-carbone (Fe-C), un outil fondamental en science des matériaux, en mettant en lumière les recherches historiques qui ont façonné notre compréhension de cette relation cruciale. Bien que la connaissance académique du diagramme soit largement acceptée, des divergences persistent dans les représentations de ce dernier parmi les scientifiques de différents pays, notamment en Allemagne, en Pologne, en Ukraine, aux États-Unis et en Australie. L'objectif de cette étude est de comprendre les raisons de ces divergences et de retracer l'évolution des connaissances en science des matériaux.

L'étude s'appuie sur des méthodes de recherche scientifique générale, telles que l'analyse comparative et la synthèse, ainsi qu'une approche chronologique. Ces méthodes ont permis de réaliser une étude complète des contributions historiques et contemporaines à la compréhension du diagramme Fe-C et des transformations qui y sont associées.

Les auteurs examinent les premiers travaux sur le contenu en carbone dans l'acier, menés dès 1802. Ils soulignent que la première représentation complète du diagramme a été présentée en 1897 par Roberts-Austen. Au début du XXe siècle, les chercheurs ont élargi leur compréhension grâce à des méthodes avancées, comme les rayons X et la microscopie. Malgré un consensus sur le contenu maximal en carbone du castiron à 6.67%, des opinions divergentes persistent concernant l'acier, révélant ainsi des lacunes dans les manuels modernes qui ne tiennent pas compte des recherches récentes.

L'évolution du diagramme Fe-C est étroitement liée aux découvertes en physique et chimie, ainsi qu'à l'innovation technologique. Malgré les avancées significatives dans ce domaine depuis le XIXe siècle, les différences dans les interprétations des données entre certaines régions du monde soulèvent des questions sur l'uniformité des connaissances en science des matériaux. Ce phénomène souligne l'importance d'une collaboration scientifique internationale pour harmoniser les représentations et les compréhensions contemporaines du diagramme Fe-C [29].

Selon **DauMajak**, l'utilisation de fluides de coupe dans les opérations d'usinage est cruciale pour réduire le frottement et l'usure, faciliter l'évacuation des copeaux et garantir un refroidissement optimal. Bien que les lubrifiants minéraux dominent actuellement le marché, leur impact environnemental négatif pousse à explorer des alternatives plus écologiques, telles que les huiles végétales.

L'étude a utilisé des huiles végétales naturelles : huile de palme, huile de tournesol et huile de noix de coco. Le tournage a été effectué sur un tour Colechester Master 3250, en utilisant des outils en carbure. Le matériau de l'usinage, l'acier inoxydable AISI 304, a des caractéristiques de résistance au travail élevé et de faible conductivité thermique.

Les fluides de coupe ont été appliqués par la méthode de lubrification en quantité minimale (MQL). L'expérience a été conçue selon le plan d'expériences de Taguchi L9, prenant en compte quatre facteurs : type d'huile, vitesse de coupe, avance et profondeur de coupe. Les paramètres d'entrée étaient :

- Vitesse de coupe : 350, 550 et 750 RPM
- Avance : 0,18, 0,24 et 0,30 mm/rev
- Profondeur de coupe : 1,0, 1,5 et 2,0 mm

Les réponses mesurées étaient le rapport de compression des copeaux et la rugosité de surface.

Les résultats ont montré que l'huile de tournesol avait la meilleure performance en termes de rugosité de surface et de rapport de compression des copeaux. L'analyse de la variance (ANOVA) a révélé que la profondeur de coupe avait l'impact le plus significatif sur la rugosité de surface.

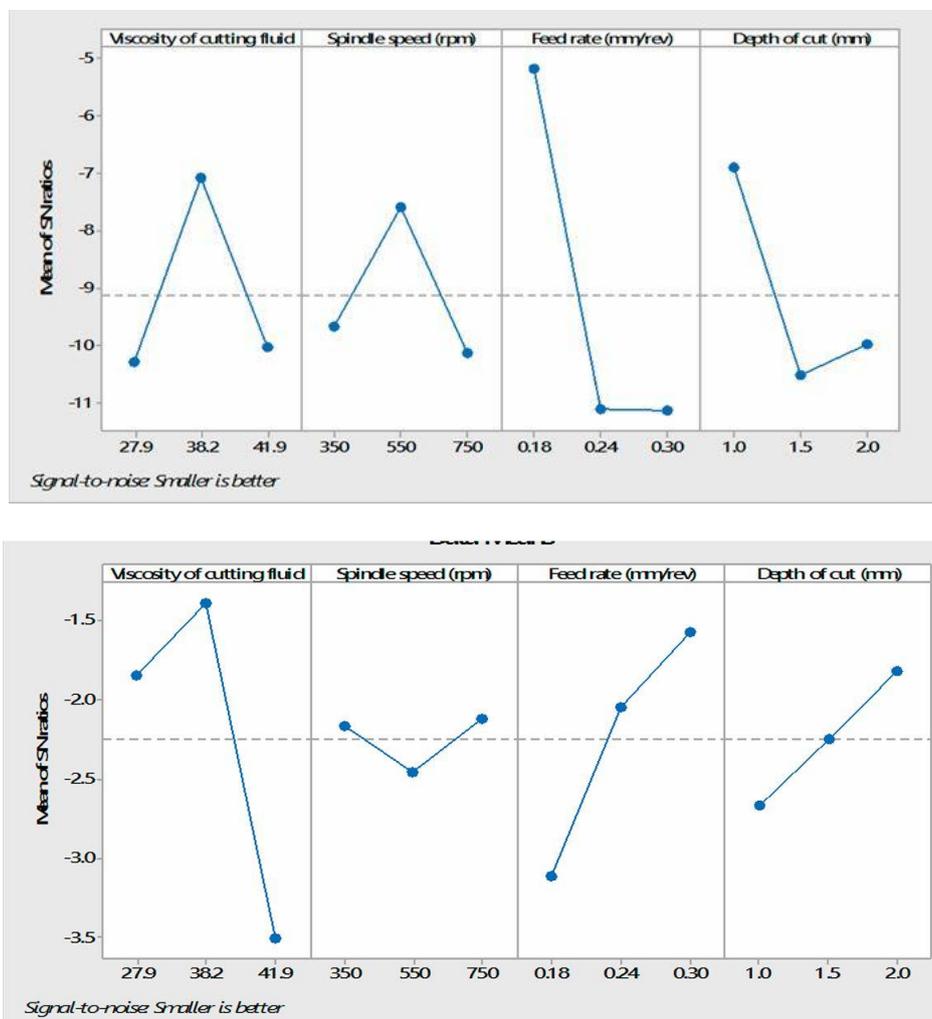


Figure I.6 Diagramme des effets principaux pour la rugosité de surface

Cette étude démontre la viabilité des huiles végétales comme lubrifiants durables lors du tournage de l'acier inoxydable AISI 304. Bien que l'huile de tournesol ait surpassé les autres

en termes de performances, il est suggéré d'améliorer les propriétés thermiques et les points d'éclair des huiles utilisées. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer l'efficacité des huiles végétales par rapport aux lubrifiants conventionnels [30].

Chapitre II

*Revue des Méthodes
MCDM et des
Critères d'Évaluation*

II.1. Présentation des méthodes MCDM

II.1.1 Introduction

Les **méthodes de prise de décision multicritère** (MCDM – Multi-Criteria Decision Making) constituent des outils essentiels permettant aux chercheurs et aux professionnels d'identifier la meilleure solution parmi plusieurs alternatives. Elles sont particulièrement utiles lorsque la prise de décision devient complexe en raison de la nécessité d'évaluer simultanément plusieurs critères souvent interdépendants. Ces méthodes offrent un cadre analytique permettant d'organiser, d'évaluer et de comparer différentes options afin d'aboutir à un choix éclairé et optimal.

Au fil des années, les approches MCDM ont évolué pour répondre aux défis liés à l'analyse et à la résolution de problèmes complexes. Elles reposent sur des modèles mathématiques et des outils d'analyse permettant d'évaluer chaque alternative en tenant compte de divers facteurs, tels que les coûts, la performance, ou encore l'impact environnemental. Grâce à leur flexibilité et à leur rigueur, ces méthodes sont aujourd'hui largement appliquées dans des domaines variés tels que l'ingénierie, la gestion de projet et la planification stratégique.

Ainsi, les méthodes MCDM jouent un rôle clé dans l'aide à la décision en offrant une approche structurée et objective. Parmi les techniques les plus répandues figurent **TOPSIS**, **GRA**, **MOORA**, **MARCOS** et **VIKOR**, qui permettent d'évaluer et de classer les alternatives en fonction des critères définis, facilitant ainsi l'identification de la meilleure option possible [31].

II.2 Classification des méthodes MCDM

Les méthodes de décision multicritères (MCDM) sont utilisées pour évaluer et classer plusieurs alternatives en tenant compte de divers critères souvent conflictuels. Elles permettent d'aider les décideurs à choisir la meilleure solution en fonction de leurs préférences et des contraintes du problème. Ces méthodes se divisent en plusieurs catégories selon leur approche de la prise de décision, allant des méthodes compensatoires aux approches heuristiques et hybrides [32].

II.2.1. Méthodes de Compensation (Compensatory Methods)

Ces méthodes considèrent que les critères peuvent compenser les uns les autres en fonction des pondérations attribuées.

- Méthode de la somme pondérée (WSM - WeightedSum Model)
- Méthode de la moyenne pondérée (WPM - Weighted Product Model)
- TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)
- VIKOR (VIseKriterijumskaOptimizacija I KompromisnoResenje)

II.2.2. Méthodes de Surclassement (Outranking Methods)

Ces méthodes établissent un classement des alternatives en comparant les solutions deux à deux.

- **Méthode ELECTRE** (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité) : ELECTRE I, II, III, IV, TRI
- **Méthode PROMETHEE** (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations): PROMETHEE I, II, III, IV

II.2.3. Méthodes Basées sur l'Utilité et la Valeur (Utility and Value-Based Methods)

Ces méthodes reposent sur la modélisation des préférences du décideur en construisant une fonction d'utilité ou de valeur.

- MAVT (Multi-Attribute Value Theory)
- MAUT (Multi-Attribute Utility Theory)
- AHP (Analytic Hierarchy Process) et ANP (Analytic Network Process)

II.2.4. Méthodes Hybrides et Intégrées

Ces méthodes combinent plusieurs approches pour tirer parti des avantages de chacune.

- AHP-TOPSIS
- ANP-PROMETHEE
- Hybridation des métaheuristiques avec les MCDM

II.3 Revue des principales méthodes MCDM utilisées dans la littérature

II.3.1 TOPSIS

Développée par **Hwang et Yoon (1981)**, la méthode TOPSIS repose sur le principe que la meilleure alternative est celle qui se situe le plus proche de la solution idéale et le plus éloignée de la solution anti-idéale. Elle utilise une mesure de distance euclidienne pour comparer chaque alternative aux solutions de référence, permettant ainsi un classement objectif des options. Cette approche est largement utilisée dans des domaines tels que la sélection de fournisseurs, la gestion de la chaîne d'approvisionnement et l'évaluation des performances des systèmes [33].

II.3.1.1 Étapes principales de TOPSIS

1. Construction de la matrice de décision

On considère m alternatives et n critères. La matrice de décision est :

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{II.1}$$

Où x_{ij} représente la performance de l'alternative selon le critère j .

2. Normalisation de la matrice de décision

Chaque élément x_{ij} de la matrice de décision est normalisé comme suit :

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad \text{II.2}$$

Où :

- x_{ij} Représente la valeur de l'alternative i pour le critère j ,
- r_{ij} est la valeur normalisée.

3. Pondération de la matrice normalisée

La matrice normalisée est ensuite pondérée à l'aide des poids des critères w_{ij} :

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad \text{II.3}$$

Où w_j est le poids attribué au critère j .

4. Détermination des solutions idéale et anti-idéale

La solution idéale A^+ est définie comme :

$$A^+ = \{v_j^+ | v_j^+ = \text{Max } v_{ij} \text{ si } j \text{ est un critère bénéfique, } \min v_{ij} \text{ si } j \text{ est un critère coût}\}$$

La solution anti-idéale A^- est définie comme :

$$A^- = \{v_j^- | v_j^- = \text{Min } v_{ij} \text{ si } j \text{ est un critère bénéfique, } \max v_{ij} \text{ si } j \text{ est un critère coût}\}$$

5. Calcul des distances aux solutions idéales

- Distance de chaque alternative à la solution idéale positive :

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n ((v_{ij} - v_j^+)^2)} \quad \text{II.4}$$

Distance de chaque alternative à la solution idéale négative :

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n ((v_{ij} - v_j^-)^2)} \quad \text{II.5}$$

6. Calcul du score de préférence

Le score de préférence pour chaque alternative est donné par :

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

II.6

Où $0 \leq C_i \leq 1$. Plus C_i est proche de 1, plus l'alternative est préférable.

7. Classement des alternatives

Les alternatives sont classées en fonction de leur score C_i dans l'ordre décroissant, permettant ainsi d'identifier la meilleure option.

II.3.2 VIKOR (VIseKriterijumskaOptimizacija I KompromisnoResenje)

VIKOR (VIseKriterijumskaOptimizacija I KompromisnoResenje) Développée par Opricovic (1998), VIKOR vise à trouver une solution de compromis en équilibrant les préférences collectives et individuelles. Contrairement à TOPSIS, cette méthode intègre le regret maximal et l'utilité collective pour établir un classement optimal des alternatives. Elle est souvent utilisée dans la planification stratégique, la sélection de projets et l'évaluation de politiques publiques. Les formules II.7, II.8 et II.9 illustre les étapes de calcul des différents paramètres de la méthode [34].

II.3.2.1 Formules principales

- Mesure d'agrégation des écarts pondérés :

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{|f_j^* - f_{ij}|}{|f_j^* - f_j^-|} \quad \text{II.7}$$

Où :

- f_j^* Est la meilleure valeur pour le critère j ,
- f_j^- Est la pire valeur pour le critère j ,
- f_{ij} Est la valeur de l'alternative pour le critère j .

- **Mesure du regret maximal :**

$$R_i = \max_j \left(w_j \frac{|f_j^* - f_{ij}|}{|f_j^* - f_j^-|} \right) \quad \text{II.8}$$

Calcul de l'indice de classement :

$$Q_i = v \frac{S_i - S^-}{S^+ - S^-} + (1 - v) \frac{R_i - R^-}{R^+ - R^-} \quad \text{II.9}$$

Où v est le coefficient de pondération entre l'utilité collective et le regret maximal, généralement fixé à 0.5.

Avec :

$$S^+ = \max_i S_i$$

$$S^- = \min_i S_i$$

$$R^+ = \max_i R_i$$

$$R^- = \min_i R_i$$

II.3.3 MOORA (Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis)

MOORA (Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis) Développée par Brauers et Zavadskas (2006), la méthode MOORA optimise plusieurs objectifs en appliquant une analyse par ratios, facilitant ainsi la prise de décision lorsque de nombreux critères sont impliqués. Sa simplicité de calcul et son efficacité en font un outil idéal pour les problèmes nécessitant une analyse rapide et fiable. Elle est principalement appliquée à l'optimisation des systèmes de production, la gestion de la maintenance industrielle et l'évaluation des performances économiques [35].

II.3.3.1 Formules principales

Normalisation des valeurs :

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad \text{II.10}$$

Calcul du score MOORA :

$$y_i = \sum_{j \in B} r_{ij} - \sum_{j \in C} r_{ij} \quad \text{II.11}$$

Où :

- B Est l'ensemble des critères bénéfiques,
- C Est l'ensemble des critères de coût.

« Les alternatives sont ensuite classées par ordre décroissant de y_i , la meilleure alternative correspondant à la valeur maximale de y_i . »

II.3.4 MARCOS (Measurement of Alternatives and Ranking according to Compromise Solution)

MARCOS (Measurement of Alternatives and Ranking according to Compromise Solution) introduite par Stević et al. (2020), MARCOS est une approche récente qui évalue les alternatives en tenant compte de leur proximité avec une solution de compromis idéale. Elle intègre des solutions de référence idéales et anti-idéales, améliorant ainsi l'évaluation globale des performances des alternatives. Cette méthode est couramment utilisée pour la sélection de fournisseurs, la gestion de la logistique et du transport ainsi que l'évaluation des infrastructures énergétiques [36].

II.3.4.1 Formules principales

- Normalisation des valeurs :

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^+} (\text{Critère bénéfique}), r_{ij} = \frac{x_j^-}{x_{ij}} (\text{critère de cout}) \quad \text{II.12}$$

Où :

- x_{ij} est la valeur de l'alternative i selon le critère j ,
- x_j^+ est la meilleure valeur (maximum) pour le critère j ,
- x_j^- est la pire valeur (minimum) pour le critère j .

Détermination des solutions de référence

$$A^+ = \max(x_{ij}) \text{ (Meilleure alternatif)}, A^- = \min(x_{ij}) \text{ (pire alternative)} \quad \text{II.13}$$

Calcul de la matrice pondérée :
Après normalisation, on applique les poids des critères w_j pour obtenir :

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij}$$

Calcul des scores d'utilité

- Somme pondérée pour chaque alternative :

$$S_i = \sum_{j=1}^n v_{ij}$$

Pour la solution idéale et anti-idéale :

$$S^+ = \sum_{i=1}^n w_j, \quad S^- = \sum_{j=1}^n w_j$$

(En général, puisque r_{ij} est normalisé entre 0 et 1, on a $S^+ = \sum w_j$, S peut varier selon la matrice)

Calcul des coefficients d'utilité relative

- Par rapport à la solution idéale :

$$K_i^+ = \frac{S_i - S^-}{S^+ - S^-}$$

Par rapport à la solution anti-idéale

$$K_i^- = \frac{S^+ - S_i}{S^+ - S^-}$$

Calcul de l'indice final K_i

$$K_i = \frac{K_i^+}{K_i^-}$$

L'indice K_i permet de classer les alternatives. Plus K_i est grand, meilleure est l'alternative.

II.3.5 GRA (Grey Relational Analysis)

GRA (Grey Relational Analysis) Développée par **Deng (1982)**, GRA est basée sur la théorie des systèmes gris, ce qui lui permet de traiter des problèmes décisionnels même en présence de données incomplètes ou incertaines. Elle analyse les relations entre les alternatives en utilisant des coefficients de relation grise pour classer les options de manière efficace. Elle est souvent utilisée dans l'analyse des performances financières, l'optimisation des processus industriels et la sélection des matériaux et technologies [37].

II.3.5.1 Formules principales

- **Normalisation des valeurs :**

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad \text{II.16}$$

- **Calcul du coefficient de relation grise :**

$$\gamma_{ij} = \frac{\Delta_{min} + \xi \Delta_{max}}{\Delta_{ij} + \xi \Delta_{max}} \quad \text{II.17}$$

Où $\Delta_{ij} = |x'_{ij} - x'_{j0}|$ représente la différence absolue entre l'alternative normalisée et la valeur de référence, ξ est le coefficient de discrimination (généralement $\xi = 0.5$), et Δ_{min} et Δ_{max} sont respectivement les différences minimales et maximales observées.

Calcul du degré de relation grise :

$$\Gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} \quad \text{II.18}$$

Méthode CoCoSo

La méthode CoCoSo (COMbined COMpromise Solution), développée par **Yazdani et al. (2019)**, est une méthode d'aide à la décision multicritère qui combine les avantages des approches de compromis et d'agrégation pondérée. Elle est particulièrement utile pour évaluer et classer des alternatives selon plusieurs critères. Voici les étapes de son application [38]:

1. Construction de la matrice de décision

On commence par établir une matrice $X = [x_{ij}]$, où chaque élément x_{ij} représente la performance de l'alternative i selon le critère j .

1. Normalisation des valeurs des critères

Pour permettre une comparaison équitable, les données sont normalisées.

-Pour un critère bénéfique (plus c'est élevé, mieux c'est) :

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}$$

-Pour un critère non bénéfique (moins c'est élevé, mieux c'est) :

$$r_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)}$$

2. Calcul des scores normalisés pondérés

On calcule deux mesures principales :

S_i : la somme pondérée des valeurs normalisées (comme dans la méthode SAW)

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot r_{ij}$$

P_i : le produit pondéré des valeurs normalisées (comme dans la méthode WASPAS)

$$P_i = \prod_{j=1}^n (r_{ij})^{w_j}$$

Où w_j est le poids du critère j .

3. Calcul du score global final k_i

Le score final est décrit :

$$k_i = \frac{S_i + P_i}{2}$$

4. Classement des alternatives

Les alternatives sont classées en fonction de leur score final k_i , la meilleure alternative étant celle qui a le score le plus élevé.

Chaque méthode possède des étapes spécifiques qui permettent de mieux classer les alternatives en fonction de divers critères de décision.

Le tableau suivant présente une comparaison des principales méthodes MCDM en mettant en évidence leurs forces et leurs faiblesses afin de mieux comprendre leur applicabilité dans différents contextes de prise de décision **tableau II.1**.

Tableau II.1 Comparaison des principales méthodes MCDM selon leurs forces et faiblesses

Méthode MCDM	Forces	Faiblesses	Références
TOPSIS (<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Facile à comprendre et appliquer. - Fournit un classement clair des alternatives. - Prend en compte la meilleure et la pire solution. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensible à la pondération des critères. - Suppose une indépendance des critères. - Ne prend pas en compte le regret individuel. 	[39]Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). <i>Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications</i> . Springer.
VIKOR (<i>ViseKriterijumskaOptimizacija I KompromisnoResenje</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Idéal pour les décisions impliquant un compromis. - Intègre l'analyse du regret maximal. - Utile pour atteindre un consensus. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne fournit pas toujours une solution unique. - La normalisation peut altérer l'interprétation des résultats. - Moins efficace si les alternatives sont très proches. 	[40]Opricovic, S. (1998). <i>Multi-criteria optimization of civil engineering systems</i> . Faculty of Civil Engineering, Belgrade.
MOORA (<i>Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Simple, rapide et facile à appliquer. - Moins sensible aux variations de pondération. - Gère plusieurs objectifs simultanément. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne prend pas en compte l'incertitude des critères. - Moins efficace si les critères sont très différents en échelle. - Moins adaptée aux analyses complexes. 	[41] Brauers, J. K. M., Zavadskas, E. K. (2006). The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. <i>Control and Cybernetics</i> , 35(2), 445-469.
MARCOS (<i>Measurement of Alternatives and Ranking according to COmpromise Solution</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Intègre les concepts de solutions idéales et anti-idéales. - Fournit une analyse robuste même pour des systèmes complexes. - Plus flexible pour différents types d'évaluations. 	<ul style="list-style-type: none"> - Relativement nouvelle, donc moins validée empiriquement. - Calculs plus lourds. - Sensible aux variations des solutions de référence. 	[42] Stević, Ž., Pamucar, D., Puška, A., & Chatterjee, P. (2020). <i>Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to compromise</i>

			<i>solution (MARCOS). Computers & Industrial Engineering, 140, 106231.</i>
GRA (<i>Grey Relational Analysis</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Idéal pour les problèmes avec données incomplètes ou incertaines. - Convient aux systèmes où les relations entre critères sont floues. - Adapté à une large gamme de domaines. 	<ul style="list-style-type: none"> - Transformation des données nécessaire, pouvant altérer les résultats. - Moins intuitive que d'autres méthodes. - Sensible aux relations grises définies. 	[43] Deng, J. (1982). Control problems of grey systems. <i>Systems & Control Letters</i> , 1(5), 288-294.
CoCoSo (Combined Compromise Solution)	<ul style="list-style-type: none"> - Combine les avantages de plusieurs méthodes (SAW, ARAS, etc.). - Fournit un classement fiable basé sur compromis global. - Requiert peu d'hypothèses sur les critères. 	<ul style="list-style-type: none"> - Plus complexe à implémenter manuellement. - Sensible aux variations de normalisation. - Moins connue et donc moins utilisée dans certaines disciplines. 	[44] Yazdani, M., & Payam, A. (2020). COCOSO: A new MCDM method for decision-making problems. <i>Operational Research</i>

II.4 Critères d'Évaluation des Méthodes

L'évaluation des méthodes de prise de décision multicritère (MCDM) est essentielle pour garantir la pertinence et l'efficacité des choix effectués dans des contextes complexes. Ces méthodes, largement utilisées dans des domaines comme l'ingénierie, la gestion, l'économie et les sciences environnementales, permettent de comparer plusieurs alternatives en prenant en compte des critères souvent contradictoires.

Afin de garantir une prise de décision robuste et fiable, il est crucial d'évaluer les performances des différentes approches MCDM selon des indicateurs spécifiques. Ces critères d'évaluation permettent d'analyser la cohérence des résultats, la sensibilité des méthodes aux variations des paramètres, leur capacité à refléter la réalité des problèmes étudiés, ainsi que leur facilité d'application. Une analyse approfondie de ces aspects aide à déterminer la méthode la plus appropriée pour un problème donné et à identifier les forces et les limites de chaque approche.

Dans cette section, nous présentons les principaux critères d'évaluation que nous avons adoptés dans le cadre de notre étude pour comparer les méthodes MCDM appliquées spécifiquement à l'usinage de l'acier AISI 304. Nous discutons également de leur importance et de leur impact sur la qualité des décisions prises.

II.4.1 Coefficient de corrélation de Spearman (Une Mesure de Corrélation)

II.4.1.1 Définition

Le coefficient de corrélation de Spearman (ρ) est une mesure non paramétrique qui évalue la relation monotone entre deux classements d'alternatives obtenus par différentes méthodes MCDM (Multi-Criteria Decision Making). Il est calculé à l'aide de la formule suivante (Spearman, 1904) [45] :

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Où :

- d_i représente la différence entre les rangs d'une alternative selon deux méthodes différentes,
- n est le nombre total d'alternatives.

L'utilisation du coefficient de Spearman dans l'évaluation des méthodes MCDM se justifie par plusieurs raisons :

- Il permet de vérifier la cohérence entre deux méthodes en comparant leurs classements respectifs.
- Il est robuste face aux valeurs extrêmes, car il se concentre sur l'ordre des alternatives plutôt que sur leurs valeurs absolues.
- Il aide à déterminer si deux méthodes produisent des résultats similaires ou divergents.

Si ρ est proche de **+1**, les classements sont très similaires.
Si ρ est proche de **0**, il n'y a pas de relation entre les classements.
Si ρ est proche de **-1**, les classements sont inversés.

Ce coefficient est particulièrement adapté à l'analyse des relations entre variables ordinales, comme c'est le cas dans l'évaluation des performances des différentes méthodes MCDM. Il est d'autant plus pertinent qu'il ne suppose aucune distribution spécifique des données ni relation linéaire, ce qui le rend flexible et efficace dans un large éventail d'applications comparatives.

II.4.2 Entropie de Shannon (Une Mesure d'Incertitude)

II.4.2.1 Définition

L'entropie informationnelle de Shannon est une mesure permettant d'évaluer le degré d'incertitude dans un ensemble de données. Elle est définie par la formule suivante (Shannon, 1948) [46] :

$$H = -\sum p_i \log_2(p_i) \quad \text{II.20}$$

p_i Est la probabilité d'une alternative selon la méthode d'analyse considérée.

L'utilisation de l'entropie de Shannon dans le cadre des méthodes d'aide à la décision multicritère (MCDM) se justifie par plusieurs raisons. Elle quantifie la dispersion des classements, permettant ainsi de détecter si une méthode est plus stable qu'une autre. De plus, elle permet d'évaluer la sensibilité des classements face à des variations dans les critères. Une entropie faible indique que les résultats sont homogènes, c'est-à-dire que les méthodes produisent des classements similaires, tandis qu'une entropie élevée traduit une forte variabilité entre les classements obtenus.

L'interprétation de l'entropie de Shannon est relativement simple :

- Une entropie faible, proche de 0, indique que les méthodes convergent vers des classements similaires.
- Une entropie élevée signifie que les méthodes produisent des classements très variables.

II.4.3 Coefficient de Corrélation de Pearson

II.4.3.1 Définition

Le coefficient de corrélation de Pearson (r) est une mesure statistique qui évalue la force et la direction de la relation linéaire entre deux variables quantitatives. Il a été introduit par Karl Pearson au début du XXe siècle et est couramment utilisé dans l'analyse des relations entre différentes méthodes d'évaluation et de classification [47].

Il est défini par la formule suivante :

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}} \quad \text{II.21}$$

- X_i et Y_i représentent les valeurs des deux variables comparées,
- \bar{X} et \bar{Y} sont les moyennes respectives des variables X et Y ,
- \sum Indique la somme sur toutes les observations.

Le coefficient de Pearson varie entre -1 et 1 :

- $r = 1$: corrélation linéaire parfaite et positive, indiquant qu'une augmentation d'une variable entraîne une augmentation proportionnelle de l'autre.

- $r = -1$: corrélation linéaire parfaite et négative, indiquant qu'une augmentation d'une variable entraîne une diminution proportionnelle de l'autre.
- $r = 0$: absence de corrélation linéaire entre les deux variables.

Dans le contexte de l'évaluation des méthodes de prise de décision multicritère (MCDM), l'utilisation du coefficient de Pearson est justifiée par sa capacité à :

- Quantifier la similarité linéaire entre les classements obtenus par différentes méthodes MCDM.
- Évaluer la proportionnalité entre les valeurs obtenues par ces méthodes, contrairement à la corrélation de Spearman qui mesure uniquement l'ordre des classements.
- Fournir, en combinaison avec d'autres indicateurs comme l'entropie de Shannon, une analyse plus complète de la cohérence et de la robustesse des méthodes MCDM.

L'interprétation du coefficient de Pearson dans ce contexte est la suivante :

- r proche de 1 : les classements des alternatives sont fortement corrélés de manière linéaire, suggérant une cohérence entre les méthodes analysées.
- r proche de 0 : il n'existe pas de relation linéaire significative entre les méthodes comparées, indiquant des différences notables dans la manière dont elles classent les alternatives.
- r proche de -1 : les classements obtenus par les différentes méthodes sont inversés, montrant une discordance systématique entre elles.

II.4.4 Ranking Consistency Index (RCI)

II.4.4.1 Définition

Le Ranking Consistency Index (RCI) est un indicateur utilisé pour mesurer la cohérence interne d'un classement généré par une méthode de décision multicritère (MCDM). Il permet d'évaluer dans quelle mesure les alternatives sont correctement classées selon leurs performances relatives sur les critères. Un classement cohérent doit refléter les bonnes performances des alternatives en haut du classement et les moins bonnes performances en bas.

Le RCI se calcule en comparant les positions des alternatives dans un classement avec leurs scores globaux ou performances agrégées, comme déterminé par la méthode MCDM. La cohérence est mesurée selon le principe que les alternatives ayant des scores plus élevés devraient figurer en tête du classement, et celles ayant des scores plus faibles, en bas.

Le RCI est essentiel pour vérifier la fiabilité d'un classement généré par une méthode MCDM. Bien que plusieurs méthodes permettent d'établir un ordre de préférence entre alternatives, il est crucial que ce classement soit logique et stable par rapport aux critères et pondérations utilisés. Un classement incohérent pourrait entraîner des décisions erronées, notamment dans des contextes stratégiques ou complexes, comme le choix de fournisseurs ou l'allocation de ressources. Par conséquent, le RCI garantit que les résultats d'une méthode MCDM sont crédibles et cohérents avec les performances réelles des alternatives [48].

Il existe plusieurs méthodes pour calculer le RCI. En voici deux des plus courantes :

- **RCI basé sur la corrélation des scores et des rangs (approche simple)**

Cette approche suppose que les scores globaux des alternatives et leurs positions dans le classement final devraient être fortement corrélés. Une forte corrélation indique une grande cohérence, tandis qu'une faible corrélation indique une incohérence.

La formule du RCI basée sur cette approche est :

$$RCI = |corr(S, R)| = |\rho|$$

- S : vecteur des scores globaux des alternatives (calculés à partir des critères et des poids).
- R : vecteur des rangs des alternatives dans le classement final.
- $corr(S, R)$: corrélation entre les scores et les rangs (en utilisant Pearson ou Spearman).

- **RCI basé sur le nombre d'inversions de rangs (approche combinatoire)**

Cette méthode calcule combien de paires d'alternatives sont inversées dans le classement, par rapport à l'ordre attendu en fonction des scores. Une inversion se produit lorsqu'une alternative ayant un score plus élevé est classée après une alternative avec un score inférieur. Plus il y a d'inversions, plus la cohérence du classement est faible.

$$RCI = 1 - \frac{N_{inversions}}{\binom{n}{2}}$$

- $N_{inversions}$: Le nombre d'inversions dans le classement.
- $\binom{n}{2}$: Nombre total de paires d'alternatives possibles, où n est le nombre d'alternatives.
-

II.4.4.2 Interprétation des résultats du RCI

Le **RCI** fournit un indicateur de la cohérence du classement par rapport aux performances des alternatives. Voici comment interpréter les résultats obtenus :

- **RCI proche de 1** : Cela indique une forte cohérence entre le classement et les performances des alternatives. Les alternatives les plus performantes occupent les positions les plus élevées, ce qui reflète une grande fiabilité dans la méthode MCDM utilisée.

- **RCI proche de 0** : Cela suggère que le classement est incohérent par rapport aux scores des alternatives, ce qui peut signaler des erreurs dans l'application des critères, des pondérations ou des anomalies dans les données utilisées.
- **RCI intermédiaire (entre 0 et 1)** : Ce résultat indique que le classement est partiellement cohérent. Des réévaluations peuvent être nécessaires, que ce soit au niveau des critères ou des pondérations appliquées, pour améliorer la cohérence.

II.4.5 Distance Euclidienne : Une Mesure de Similarité

II.4.5.1 Définition

La distance euclidienne est une mesure mathématique permettant d'évaluer la dissimilarité entre deux points dans un espace multidimensionnel. Elle est couramment utilisée dans les méthodes MCDM pour comparer des alternatives ou analyser la divergence entre différentes méthodes de classement. La formule de la distance euclidienne entre deux points $A = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ et $B = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ est donnée par [49] :

$$d(A, B) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad \text{II.23}$$

Où x_i et y_i représentent les valeurs des critères pour les alternatives A et B

II.4.5.2 Justification de son Usage

L'utilisation de la distance euclidienne dans les méthodes MCDM est justifiée par plusieurs avantages :

- **Évaluation de la proximité d'une alternative à une solution idéale** : Utilisée notamment dans la méthode TOPSIS, elle permet d'identifier l'option la plus proche de la solution optimale.
- **Comparaison des classements MCDM** : Elle aide à mesurer la similarité entre les résultats obtenus par différentes méthodes d'aide à la décision.
- **Analyse de la robustesse des méthodes** : Une faible distance entre les résultats de plusieurs approches indique une cohérence élevée des classements.

II.4.5.3 Interprétation

L'interprétation de la distance euclidienne dépend des valeurs obtenues :

- **Distance faible (≈ 0)** : Les alternatives ou les classements sont très similaires, indiquant une faible variabilité.
- **Distance élevée** : Les alternatives ou méthodes diffèrent fortement, traduisant une grande variabilité des résultats.

II.4.6 Distance de Manhattan : (Une Mesure d'Écart Linéaire)

II.4.6.1 Définition

La distance de Manhattan, également appelée distance L_1 ou **métrie du taxi**, est une mesure de dissimilarité qui quantifie la distance entre deux points en considérant uniquement les déplacements selon les axes horizontaux et verticaux. Elle est définie par la formule suivante :

$$d(A, B) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad \text{II.24}$$

Où x_i et y_i représentent les coordonnées des alternatives A et B selon n critères.

Contrairement à la **distance euclidienne**, qui mesure la distance en ligne droite, la distance de Manhattan somme les écarts absolus sur chaque dimension, simulant ainsi un déplacement dans un réseau orthogonal (comme une grille de rues) [50].

II.4.6.2 Justification de son Usage

La distance de Manhattan est utile dans le cadre des méthodes MCDM pour plusieurs raisons :

- **Analyse de la variabilité des alternatives** : Elle permet d'évaluer l'écart entre différentes solutions en tenant compte des variations individuelles des critères.
- **Robustesse face aux grandes différences** : Contrairement à la distance euclidienne, elle est moins influencée par les grandes disparités sur un seul critère.
- **Utilisation en optimisation MCDM** : Employée dans des algorithmes d'optimisation (comme les métaheuristiques), elle aide à ajuster les poids des critères de manière plus linéaire.

II.4.6.3 Interprétation

L'interprétation de la distance de Manhattan dépend des valeurs obtenues :

- **Distance faible (≈ 0)** : Indique une forte similarité entre deux alternatives ou classements.
- **Distance élevée** : Traduit une divergence marquée, suggérant des différences significatives entre les alternatives ou les méthodes de décision.

II.4.7 Méthode de Chebyshev

II.4.7.1 Définition

La méthode de Chebyshev est une technique d'aide à la décision multicritère qui repose sur la mesure de la distance maximale entre une alternative et la solution idéale. Contrairement à d'autres méthodes qui prennent en compte une moyenne des écarts, celle-ci se focalise uniquement sur le pire écart, c'est-à-dire le critère où l'alternative est la plus éloignée de l'idéal. La formule est donnée par [51] :

$$D_i = \max_j |x_{ij} - x_j^*|$$

- D_i est la distance de Chebyshev de l'alternative A_i ,
- x_{ij} est la valeur de l'alternative A_i pour le critère j ,

- x_j^* est la valeur idéale pour le critère j .

II.4.7.2 Justification de l'usage

La méthode de Chebyshev est particulièrement utile lorsque l'on souhaite minimiser le pire écart d'une alternative par rapport à l'idéal, c'est-à-dire lorsqu'on veut éviter qu'une alternative ait une performance très faible sur un critère clé, même si elle est globalement performante sur les autres critères. Cette approche est adaptée dans les cas où la prise de décision doit garantir un niveau minimal acceptable sur tous les critères, évitant ainsi des compromis extrêmes.

II.4.7.3 Interprétation des résultats

Le score D_i correspond à la plus grande différence absolue entre l'alternative A_i et la solution idéale selon l'ensemble des critères. Plus D_i est faible, plus l'alternative est proche de la solution idéale dans son pire aspect. Ainsi, l'alternative ayant la plus petite distance de Chebyshev est considérée comme la meilleure option, car elle minimise le plus grand écart par rapport aux performances optimales.

II.5 Application des Méthodes MCDM dans le Contexte de l'Usinage

II.5.1 Présentation du contexte industriel : usinage de l'acier inoxydable AISI 304.

L'acier inoxydable AISI 304 est l'un des matériaux les plus utilisés dans l'industrie en raison de sa résistance à la corrosion, de sa bonne aptitude à la mise en forme et de ses excellentes propriétés mécaniques. Il appartient à la famille des aciers austénitiques et contient principalement du chrome (18-20%) et du nickel (8-10,5%), éléments qui lui confèrent une excellente résistance aux milieux agressifs et une grande durabilité. Grâce à ces propriétés, l'AISI 304 est largement employé dans des secteurs tels que l'aéronautique, l'automobile, l'agroalimentaire, la médecine, la construction et l'énergie. Toutefois, son usinage présente plusieurs défis techniques en raison de sa tendance à l'écaillage, de sa faible conductivité thermique et de l'usure rapide qu'il provoque sur les outils de coupe.

L'usinage de l'AISI 304 est une tâche complexe qui nécessite une attention particulière en raison de plusieurs difficultés spécifiques. Tout d'abord, ce matériau a une forte tendance à l'écaillage, ce qui signifie qu'il se durcit rapidement lorsqu'il est soumis à des contraintes mécaniques. Ce phénomène entraîne une augmentation des efforts de coupe et une usure prématurée des outils. De plus, sa faible conductivité thermique empêche une dissipation efficace de la chaleur générée lors de l'usinage, ce qui entraîne une surchauffe des arêtes de coupe et réduit considérablement la durée de vie des outils. Par ailleurs, la présence de chrome et de nickel favorise l'adhérence du matériau sur les outils, provoquant la formation de bavures et l'apparition de dépôts sur l'arête de coupe, ce qui altère la qualité de la finition des pièces usinées. Enfin, l'abrasivité de l'AISI 304 contribue également à l'usure rapide des outils, ce qui augmente les coûts de production et nécessite des stratégies adaptées pour améliorer la performance de l'usinage.

Pour pallier ces difficultés, plusieurs stratégies d'optimisation sont mises en place afin d'améliorer l'efficacité de l'usinage de l'acier inoxydable AISI 304. Le choix des outils de

coupe est un facteur clé : les outils en carbure revêtu, notamment avec des revêtements à base de nitrure de titane (TiN), de nitrure de titane-aluminium (TiAlN) ou d'aluminium-chrome (AlCrN), sont privilégiés pour leur résistance accrue à l'usure. De plus, les angles de coupe doivent être soigneusement sélectionnés afin de limiter les efforts exercés sur l'outil et de minimiser l'érouissage du matériau.

L'optimisation des paramètres de coupe joue également un rôle crucial dans l'usinage de l'AISI 304. Une vitesse de coupe modérée est recommandée afin d'éviter l'échauffement excessif, tandis que l'avance et la profondeur de passe doivent être adaptées pour limiter les efforts mécaniques et prolonger la durée de vie des outils. Par ailleurs, une lubrification efficace est essentielle pour réduire les températures élevées et minimiser l'adhérence des copeaux. L'utilisation de lubrifiants haute performance, ainsi que l'adoption de techniques avancées comme la lubrification cryogénique ou le Minimum Quantity Lubrication (MQL), permettent d'améliorer la dissipation thermique tout en réduisant l'impact environnemental.

En complément de ces stratégies, l'intégration de technologies innovantes peut considérablement améliorer l'usinage de l'AISI 304. L'usinage assisté par vibration, par exemple, permet d'optimiser la formation des copeaux et de réduire les efforts de coupe, tandis que l'application de revêtements spécifiques sur les outils contribue à prolonger leur durée de vie. Ces avancées technologiques permettent non seulement d'accroître la productivité, mais aussi d'améliorer la qualité des pièces usinées.

En conclusion, l'usinage de l'acier inoxydable AISI 304 représente un défi technique majeur en raison de ses propriétés mécaniques et thermiques particulières. Toutefois, en adoptant des stratégies adaptées, telles qu'une sélection rigoureuse des outils, une optimisation des paramètres de coupe et l'application de techniques avancées, il est possible d'améliorer la productivité et la qualité des pièces usinées tout en limitant l'usure des outils. Dans ce contexte, l'utilisation des méthodes de décision multicritères (MCDM) se révèle particulièrement pertinente pour sélectionner les paramètres d'usinage les plus performants en fonction des exigences spécifiques de chaque application industrielle [52].

II.5.2 Identification des Critères de Décision Pertinents

Dans le cadre de l'usinage de l'acier inoxydable AISI 304, plusieurs critères de décision doivent être pris en compte pour optimiser les performances du processus tout en garantissant la qualité des pièces usinées. Ces critères sont généralement classés en trois grandes catégories : **critères techniques**, **critères économiques** et **critères environnementaux**. L'identification précise de ces critères est essentielle pour la sélection des meilleurs paramètres d'usinage à l'aide des méthodes de décision multicritères (MCDM) [53]

1. Critères techniques

Les critères techniques sont directement liés à la performance de l'usinage et à la qualité des pièces produites. Ils incluent :

a. Rugosité de surface (Ra) : La qualité de finition d'une pièce est un facteur clé dans de nombreuses applications industrielles. La rugosité de surface (Ra) mesure l'état de la surface après usinage et dépend de la vitesse de coupe, de l'avance et du type d'outil utilisé. Une faible rugosité est souvent recherchée dans les applications de précision telles que l'aéronautique et le médical.

b. Précision dimensionnelle et tolérances : L'usinage doit garantir le respect des dimensions et des tolérances définies dans le cahier des charges. Un écart important par rapport aux spécifications peut entraîner des défauts d'assemblage ou une non-conformité des pièces.

c. Formation et type de copeaux : La nature des copeaux générés influence l'efficacité du processus d'usinage. Un bon usinage doit produire des copeaux facilement évacuables pour éviter leur accumulation sur l'outil et la détérioration de la surface usinée. Les copeaux longs et adhérents sont généralement indésirables.

d. Forces de coupe (F_c) : Les efforts de coupe influencent l'usure des outils, la stabilité du processus et la consommation énergétique. Une force de coupe excessive peut entraîner des vibrations, une détérioration de la pièce et une dégradation prématurée de l'outil.

e. Température de coupe : L'acier inoxydable AISI 304 a une faible conductivité thermique, ce qui entraîne une concentration de chaleur dans la zone de coupe. Une température trop élevée peut provoquer un échauffement excessif de l'outil, entraînant une usure rapide et une mauvaise qualité de surface.

f. Durée de vie des outils (T) : La longévité des outils est un facteur critique en production industrielle. Une usure rapide des outils augmente les coûts et nécessite des remplacements fréquents, ce qui entraîne des arrêts machine et une perte de productivité.

2. Critères économiques

L'usinage est un processus qui doit être optimisé non seulement sur le plan technique, mais aussi en termes de rentabilité. Les principaux critères économiques sont :

a. Coût des outils de coupe : Le choix des outils (carbure, céramique, CBN, revêtements) a un impact direct sur les coûts. Certains outils ont une durée de vie plus longue mais sont plus coûteux à l'achat. L'optimisation du rapport coût/durée de vie est essentielle.

b. Coût de l'usinage par pièce : Le coût global de l'usinage inclut les coûts de main-d'œuvre, de machine, d'outils, de lubrification et d'énergie consommée. Une réduction du temps de cycle permet de diminuer ce coût.

c. Productivité (Q) : La productivité est un facteur clé dans les environnements industriels. Un usinage plus rapide et plus efficace permet d'augmenter le rendement tout en minimisant les coûts de production.

d. Taux de rebut et de non-conformité : Un taux élevé de pièces rejetées entraîne des pertes financières importantes. L'optimisation des paramètres d'usinage permet de réduire les défauts et d'améliorer le taux de production de pièces conformes.

3. Critères environnementaux

Avec l'évolution des normes industrielles et environnementales, il devient primordial d'adopter des stratégies d'usinage respectueuses de l'environnement. Les principaux critères écologiques sont :

a. Consommation d'énergie (E)

L'usinage est un processus énergivore. L'optimisation des conditions de coupe et le choix d'outils performants permettent de réduire la consommation énergétique et d'améliorer l'empreinte écologique.

b. Utilisation de fluides de coupe : Les lubrifiants jouent un rôle crucial dans l'usinage, mais leur impact environnemental est un problème majeur. L'adoption de stratégies comme le Minimum Quantity Lubrication (MQL) ou la lubrification cryogénique permet de réduire l'usage des fluides et leurs effets négatifs sur la santé et l'environnement.

c. Gestion des déchets et des copeaux : Les copeaux générés par l'usinage doivent être recyclés ou traités correctement pour éviter le gaspillage des matériaux et minimiser l'impact environnemental.

d. Impact des émissions et du bruit : L'usinage peut générer des nuisances sonores et des émissions polluantes. L'utilisation de machines plus performantes et de stratégies de coupe adaptées permet de limiter ces impacts.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une revue approfondie des principales méthodes de décision multicritère (MCDM), notamment TOPSIS, VIKOR, MOORA, MARCOS, GRA et COCOSO. Ces approches permettent de hiérarchiser des alternatives en tenant compte de plusieurs critères, et sont largement utilisées dans le domaine de l'ingénierie mécanique pour des choix stratégiques ou techniques. Chaque méthode présente des avantages spécifiques ainsi que des limites qu'il est essentiel de considérer en fonction du contexte d'application.

Nous avons également introduit des outils d'évaluation de la fiabilité et de la cohérence des résultats obtenus par ces méthodes. En particulier, le *Ranking Consistency Index (RCI)* a été détaillé comme un indicateur fondamental pour vérifier la logique du classement final. Ce dernier a été calculé à l'aide du coefficient de Spearman, et complété par des analyses utilisant le coefficient de Pearson pour mesurer la corrélation linéaire entre scores et rangs.

Par ailleurs, nous avons abordé l'entropie de Shannon comme méthode de pondération objective des critères, permettant de réduire l'influence de biais subjectifs dans le processus décisionnel.

Ainsi, l'ensemble des outils et méthodes examinés dans ce chapitre fournit une base théorique rigoureuse pour la construction d'un modèle de décision robuste. Le chapitre suivant s'appuiera sur ces fondements pour décrire la mise en œuvre pratique des méthodes sélectionnées et ses avantages, dans le cadre de notre étude expérimentale.

Chapitre III

*Méthodologie et
Expérimentation*

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons les outils et dispositifs mis en œuvre dans le cadre de notre approche expérimentale. L'étude porte spécifiquement sur l'analyse de la rugosité de surface (R_a) et du taux d'enlèvement de matière (MRR). Nous détaillons le matériel utilisé, les conditions de coupe appliquées, le couple outil-matière, ainsi que le plan d'expérience adopté pour mener à bien cette analyse.

III.2. EQUIPEMENTS ET PREPARATION DES EXPERIENCES

La réalisation des expériences nécessite la préparation des équipements, des éprouvettes et des outils de coupe.

III.2.1 Machine-outil

Le tour utilisé pour réaliser nos essais (**figure II.1**) est un tour à charioter et à fileter de la société tchèque « TOS TENCIN », modèle SN 40. Il possède une puissance de 6,6 kW sur la broche, une gamme de vitesses allant de 45 à 2000 tr/min et des avances comprises entre 0,08 et 6,4 mm/tr.



Figure III.1 Tour à charioter et à fileter modèle SN40C.

III.2.2. Outils de coupe utilisés

Les outils de coupe utilisés sont des plaquettes en carbure amovibles de la marque (Sandvik Coromant) de forme carré figure **III.2** et **III.3**, à fixation par trou central avec les caractéristiques suivantes :

Tableau III.1. Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées.

Diamètre du cercle inscrit	12.7 mm
Désignation sandvik	2015
Longueur effective du tranchant	12.496mm
Revêtement	CVD, Ti(C, N)+Al₂O₃+TiN
Angle de dégagement majeur	0 degré
Rayon de coin	0.4mm et 0.8mm
Épaisseur d'insertion	4.763mm
Poids	10g

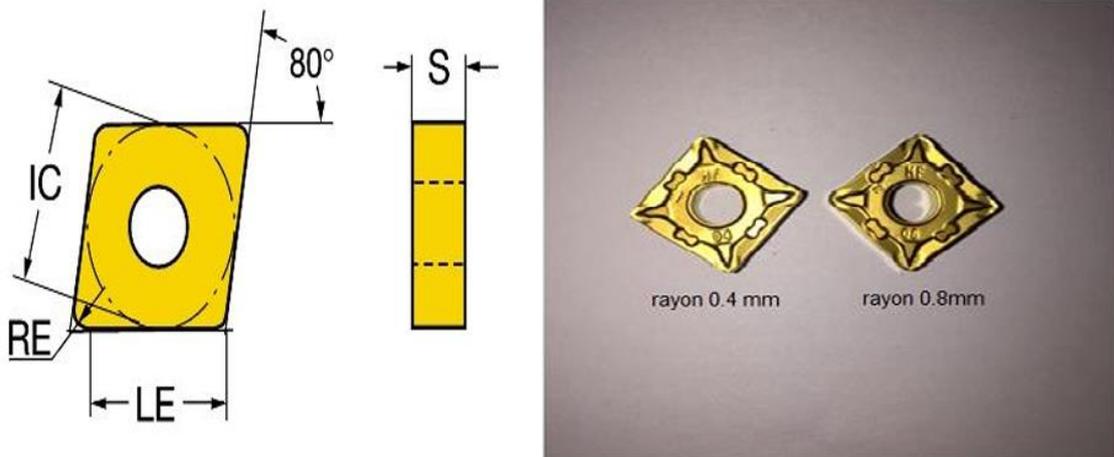


Figure III.2 Plaquettes de coupe en carbure avec revêtement CVD (GC2015)

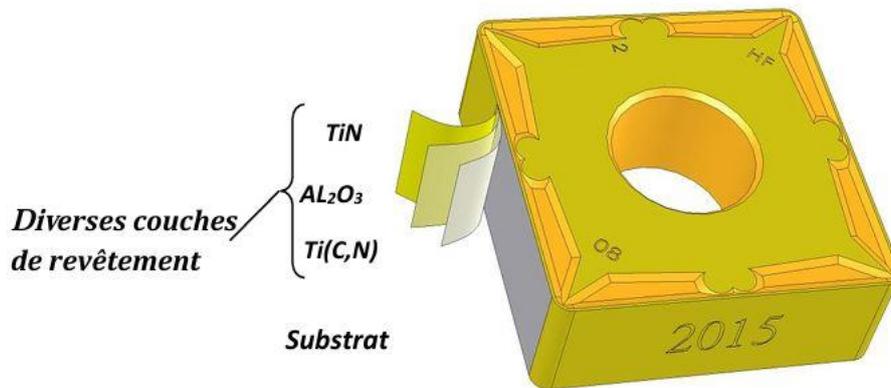


Figure III.3 Plaquette de coupe revêtue.

III.2.3. Porte outil utilisé

Afin de réaliser les essais, le choix du porte plaquette s'est effectuée sur le porte outil de désignation **PSBNR25x25M12** **figure III.4**, dont la géométrie de la partie active de l'outil, est matérialisée par les angles définis sur le **Tableau III.2**. La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte-outil. Une cale-support

en carbure métallique vissée et rectifiée, protège le porte outil et garantit un contact parfait de la plaquette.

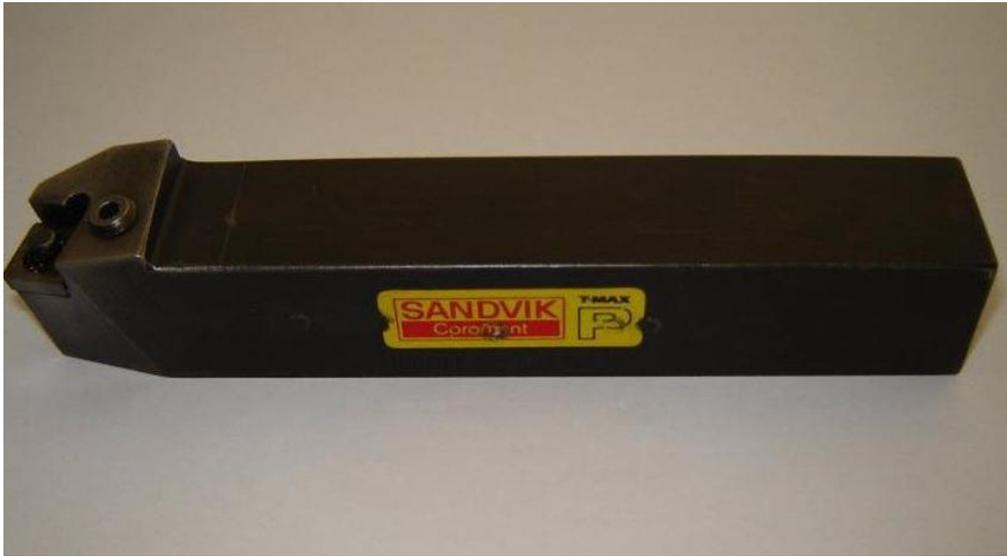


Figure III.4 Porte plaquette utilisé.

Tableau III.2. Caractéristiques de porte outil utilisé.

Désignation	Marque	χ	α	γ	λ	χ^r
PSBNR25x25M12	SANDVIK coramant	75°	6°	-6°	-6°	15°

III.2.4. Eprouvettes d'usinage

Les essais ont été réalisés sur une barre d'acier inoxydable X2CrNi18-10 (AISI304) figure II.5, ce dernier est un acier Inoxydable austénitique, il offre une bonne aptitude au formage et à la fabrication, comme il assure une excellente résistance à la corrosion, l'usure ainsi qu'à la fissuration par corrosion sous contraintes. Cet acier est utilisé dans nombreux domaines tels que : l'industrie mécanique, l'agroalimentaire, chimie, transports, médecine et chirurgie...Etc



Figure III.5 Eprouvette utilisée pour les essais.

III.2.5. Etat de surface de la pièce

La caractérisation de la topographie de surface (2D) de la pièce usinée est effectuée grâce au rugosimètre de la marque **Mitutoyo modèle Surftest SJ-210 (figure III.6)**

Ce dernier est doté : - D'un menu intuitif avec fonctions multiples personnalisables (Ra, Rc, Ry, Rz, Rt...).

-D'une capacité -200 μm à +150 μm .

-D'une sonde en diamant.

-D'un écran couleur 2.4''

- D'une mémoire de 10 configurations et de 39 rugosités.

-D'une force de mesure 0,75 mN, angle 60°, rayon 2 μm

-D'une course du palpeur 17,5 mm

-D'une sortie RS232C, SPC, USB. -D'un poids 50



Figure III.6 Rugosimètre Mitutoyo Modèle SurfTest SJ-210.

La pointe en diamant (palpeur) se déplace linéairement sur la surface usinée, Les mesures sont répétées à trois reprises à 120° et le résultat final est une moyenne de ces valeurs.

III.3. Planification des expériences

Les essais ont été menés en suivant la méthode de planification des expériences. Cette approche permet d'organiser et de réaliser les essais de façon optimale, dans le but d'obtenir des modèles mathématiques capables de simuler le procédé de coupe.

Pour notre étude, on a opté pour le plan de Taguchi, car il simplifie le protocole expérimental tout en mettant bien en évidence l'influence des différents facteurs sur les réponses observées. La méthode de Taguchi se démarque par une réduction significative du nombre d'essais, sans pour autant compromettre la précision des résultats.

La stratégie expérimentale adoptée repose d'abord sur la détermination du nombre d'essais requis. Ce nombre dépend des facteurs pris en compte (variables d'entrée) et du nombre de niveaux de variation attribués à chacun. Dans notre cas, on a retenu la table orthogonale standard **L18** de Taguchi comme plan expérimental (voir **tableau III.3**). Les niveaux des paramètres ont été définis dans les plages de variation recommandées par le fabricant de l'outil de coupe, la société **Sandvik**. Les paramètres choisis ainsi que l'attribution de leurs niveaux respectifs sont présentés dans le **tableau III.4**.

Tableau III.3. Plan d'expérience de Taguchi pour un plan de 18.

	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

Tableau III.4. Paramètres de coupe et leurs niveaux pour un plan de 18 essais.

Niveau	Vitesse de coupe (V_c)	Avance(f)	Profondeur de passe (ap)	Rayon de bec
1	116	0.08	0.15	0.4
2	165	0.12	0.3	0.8
3	232	0.16	0.45	

Tableau III.5 Résultats des essais

N°	Paramètres d'entrée (facteurs)				Paramètres de sortie (réponses)	
	<i>r</i> (mm)	<i>Vc</i> (m/min)	<i>ap</i> (mm)	<i>f</i> (mm/tr)	<i>Ra</i> (μm)	<i>MRR</i> (mm ³ /min)
1	0.4	116	0,15	0,08	0,9650	1392
2	0.4	116	0,3	0,12	1,6893	4176
3	0.4	116	0,45	0,16	2,4116	8352
4	0.4	165	0,15	0,12	1,5490	2970
5	0.4	165	0,3	0,16	2,4683	7920
6	0.4	165	0,45	0,08	1,1293	5940
7	0.4	232	0,15	0,08	0,8616	2784
8	0.4	232	0,3	0,12	1,5030	8352
9	0.4	232	0,45	0,16	2,2676	16704
10	0.8	116	0,15	0,16	1,4173	2784
11	0.8	116	0,3	0,08	0,8080	2784
12	0.8	116	0,45	0,12	0,9416	6264
13	0.8	165	0,15	0,16	1,4806	3960
14	0.8	165	0,3	0,08	0,5326	3960
15	0.8	165	0,45	0,12	0,9186	8910
16	0.8	232	0,15	0,12	0,9536	4176
17	0.8	232	0,3	0,16	1,3926	11136
18	0.8	232	0,45	0,08	1,3570	8352

Chapitre IV

*Analyse des
résultats et
recommandation*

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'application des méthodes MCDM (Multi-Criteria Decision-Making) dans le contexte de l'usinage de l'acier AISI 304. L'objectif principal est d'étudier la sensibilité de certaines méthodes MCDM aux variations des poids. La méthode de pondération choisie est la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) pour déterminer les poids des critères, puis d'appliquer les méthodes VIKOR, COCOSO, TOPSIS et MARCOS aux données recueillies lors des essais d'usinage. Ces méthodes, implémentées à l'aide du script MATLAB, permettront de calculer les classements des alternatives, après la variation des poids, en fonction des critères définis lors de l'usinage.

Une fois les différents classements obtenus, une évaluation approfondie sera réalisée en utilisant huit indicateurs importants : RCI, le rho de Spearman, Pearson, STD, Manhattan, Euclidienne, Chebyshev et enfin la méthode de vote pluraliste. Ces mesures permettront de comparer la cohérence des résultats produits par chaque méthode et d'analyser les divergences et convergences entre les classements. Cela nous offrira une perspective claire sur la fiabilité et la robustesse des résultats, tout en nous aidant à évaluer les performances des différentes méthodes.

L'interprétation des résultats consistera à comparer les performances des différentes méthodes MCDM, en mettant l'accent sur l'AHP et son rôle dans la détermination des poids des critères. Nous discuterons de la cohérence et de la fiabilité des classements obtenus, en identifiant la méthode la plus performante pour l'usinage de l'acier AISI 304.

Enfin, nous aborderons les limites de l'étude, en discutant des contraintes méthodologiques et des facteurs qui pourraient affecter la généralisation des résultats. Sur la base de cette analyse, des recommandations seront proposées, notamment sur la ou les méthodes les plus adaptées à l'usinage de l'acier AISI 304 et sur des pistes pour des recherches futures.

IV.2 Présentation de la méthode AHP

La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process), développée par **Thomas L. Saaty**, est une méthode de prise de décision multicritère qui permet de structurer un problème complexe en plusieurs niveaux hiérarchiques. Elle repose sur des comparaisons par paires entre les éléments afin de déterminer leur importance relative. Grâce à une base mathématique solide, AHP permet de convertir des jugements subjectifs en poids numériques tout en vérifiant la cohérence des décisions prises.

Dans notre étude, nous avons utilisé l'outil en ligne AHP-OS (Analytic Hierarchy Process – Open Source) pour déterminer les poids des critères via la méthode AHP. La première interface affichée sur l'image ci-dessus correspond à la page d'accueil du calculateur AHP.



Figure IV-1 Page d'accueil du calculateur AHP

Cette étape introductive ne constitue pas encore un traitement de données mais permet à l'utilisateur de :

- Accéder à la plateforme via le lien **AHP-OS**.
- Consulter les **actualités** (Latest News) liées à l'outil.
- Choisir la **langue** de l'interface, selon ses préférences (ici, disponible en plusieurs langues comme l'anglais, l'allemand, l'espagnol, le turc, etc.).

Étape 2 : Définition du nombre de critères

À cette étape, l'utilisateur saisit le nombre de critères à intégrer dans l'analyse AHP, avec une valeur comprise entre 2 et 20. Cette opération permet d'initier la structure hiérarchique du modèle de décision.

Dans notre cas, nous avons retenu deux critères, à savoir :

- **Ra** (rugosité de surface),
- **MRR** (taux d'enlèvement de matière).

Ces deux critères seront par la suite comparés de manière pairée afin de déterminer leur poids respectif.

La photo ci-dessous illustre cette étape de saisie du nombre de critères dans l'outil AHP Calculator :

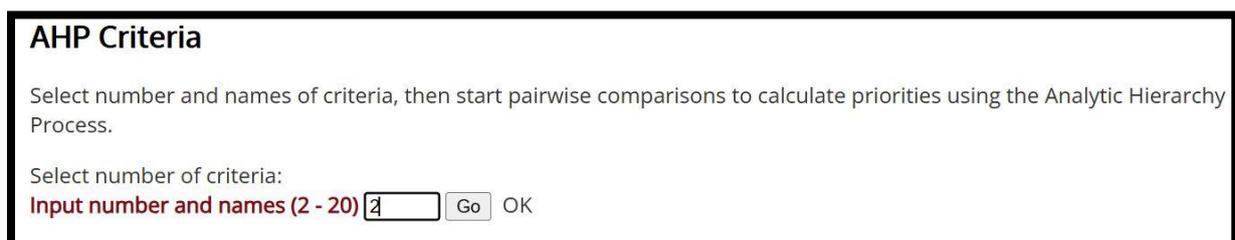


Figure IV-2 Nombre de critères dans l'outil AHP Calculator

Étape 3 : Saisie des noms des critères

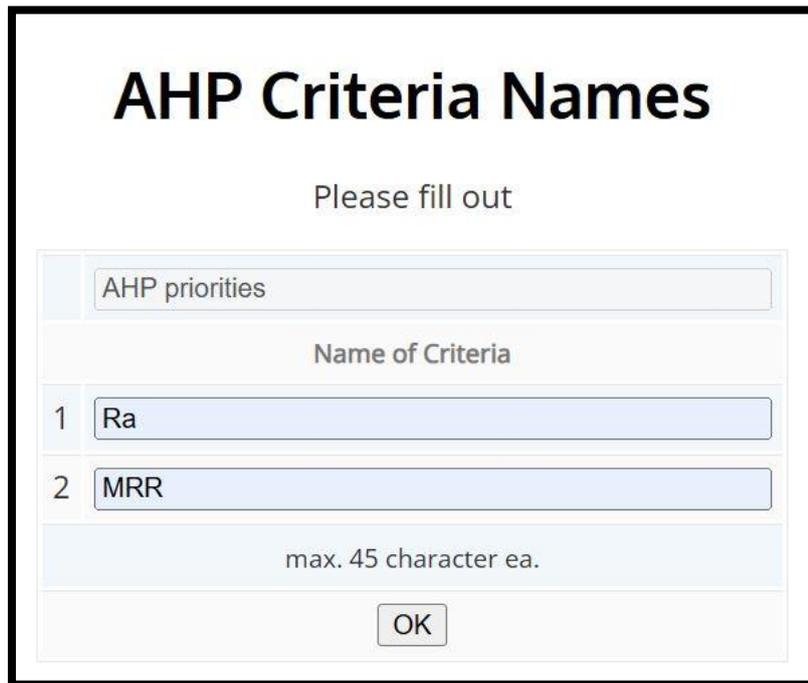
Après avoir défini le nombre de critères, cette étape consiste à nommer chaque critère à comparer dans le cadre de l'analyse AHP. L'outil propose un champ de saisie pour chaque critère, avec une limite de 45 caractères par nom.

Dans notre cas, nous avons saisi les deux critères suivants :

- **Ra** : représentant la rugosité de surface,
- **MRR** : représentant le taux d'enlèvement de matière (*Material Removal Rate*).

Ces critères sont ceux que nous avons jugés pertinents pour évaluer les performances du procédé étudié.

La photo ci-dessous illustre l'interface de saisie des noms des critères dans l'outil AHP Calculator :



The screenshot shows a web-based interface titled "AHP Criteria Names". Below the title, it says "Please fill out". There is a dropdown menu labeled "AHP priorities". Below that is a table with the following structure:

Name of Criteria	
1	<input type="text" value="Ra"/>
2	<input type="text" value="MRR"/>

Below the table, it says "max. 45 character ea." and there is an "OK" button at the bottom.

Figure IV-3 L'interface de saisie des noms des critères dans l'outil AHP Calculator

Étape 4 : Comparaison par paires des critères

Cette étape constitue une phase essentielle de la méthode AHP. Elle consiste à effectuer une comparaison par paires entre les critères définis, en évaluant leur importance relative selon l'échelle fondamentale de **Saaty** (de 1 à 9). Cette échelle permet d'exprimer l'intensité de préférence entre deux critères :

- 1 : importance égale,

- 3 : importance modérée,
- 5 : importance forte,
- 7 : importance très forte,
- 9 : importance extrême,
- Avec des valeurs intermédiaires (2, 4, 6, 8) pour davantage de précision.

Dans notre étude, nous avons comparé **Ra** (rugosité de surface) et **MRR** (taux d'enlèvement de matière). Nous avons jugé que **Ra est légèrement plus important que MRR**, et avons attribué une valeur de **2** sur l'échelle de Saaty, traduisant une préférence faible mais présente.

Après la sélection, l'outil calcule automatiquement les **poinds relatifs** des critères ainsi que le **taux de cohérence (CR)**. Un CR inférieur à 10 % valide la cohérence du jugement.

Pairwise Comparison

1 pairwise comparison(s). Please do the pairwise comparison of all criteria. When completed, click *Check Consistency* to get the priorities.

With respect to AHP priorities, which criterion is more important, and how much more on a scale 1 to 9?

A - wrt AHP priorities - or B?	Equal	How much more?
1 <input checked="" type="radio"/> Ra <input type="radio"/> MRR	<input type="radio"/> 1	<input checked="" type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
CR = 0% Please start pairwise comparison		
<input type="button" value="Calculate"/>		

AHP Scale: 1- Equal Importance, 3- Moderate importance, 5- Strong importance, 7- Very strong importance, 9- Extreme importance (2,4,6,8 values in-between).

Figure IV-4 L'outil calcule automatiquement les **poinds relatifs** des critères ainsi que le **taux de cohérence (CR)**

Étape 5 : Détermination des poids des critères via la méthode AHP

La figure ci-dessous illustre l'étape suivante du processus AHP, qui consiste à déterminer les poids relatifs des critères à partir des comparaisons par paires. Dans ce cas, une valeur intermédiaire (2) de l'échelle de Saaty a été utilisée pour exprimer que le critère Ra est légèrement plus important que MRR.

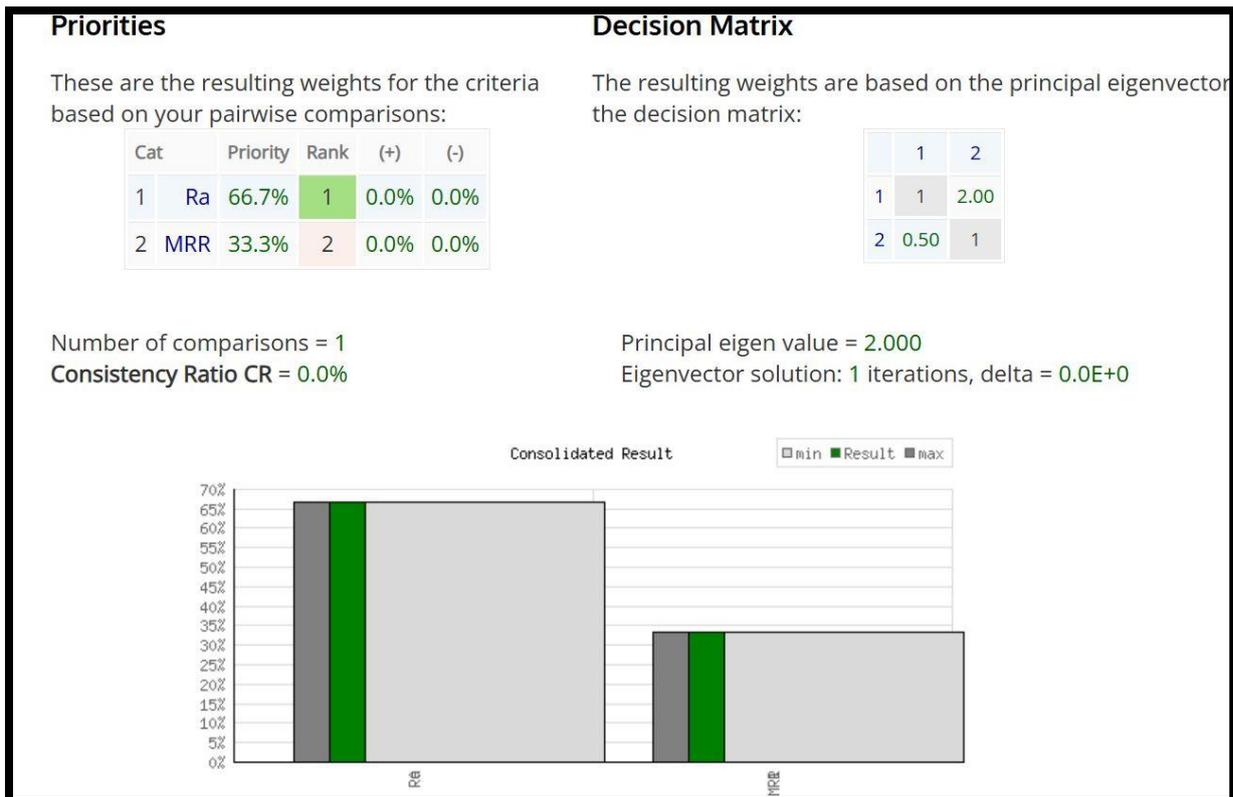


Figure IV-5 Détermination du poids relatifs des critères à partir des comparaisons par paires

La matrice de comparaison ainsi obtenue est la suivante :

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 0.5 & 1 \end{bmatrix}$$

À partir de cette matrice, les poids relatifs des critères ont été calculés à l'aide du vecteur propre principal, ce qui a conduit aux résultats suivants :

- **Ra** : 66,7 %
- **MRR** : 33,3 %

La valeur propre principale de la matrice est $\lambda_{\text{max}} = 2.000$, ce qui est parfaitement cohérent avec la taille de la matrice (2×2). De plus, le taux de cohérence (CR) est égal à 0,0 %, indiquant une cohérence parfaite dans les jugements effectués.

Ces résultats sont également présentés sous forme graphique, mettant en évidence la prédominance du critère Ra par rapport à MRR dans le cadre de la prise de décision multicritère.

IV.3 Résultats et discussion

IV.3.1 Méthode TOPSIS

Dans le cadre de cette étude, nous avons appliqué la méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) pour évaluer les performances de 18 essais réalisés

dans le cadre de notre plan d'expérience. Les critères pris en compte sont la rugosité moyenne (Ra), à minimiser, et le taux d'enlèvement de matière (MRR), à maximiser.

Suite à l'application de la méthode AHP, les poids attribués aux critères ont indiqué une prédominance du critère Ra (poids de 0,666667) sur MRR (poids de 0,333333). Ces coefficients de pondération ont été intégrés dans les processus de calcul des méthodes TOPSIS, VIKOR, MARCOS et COCOSO afin d'assurer une évaluation cohérente des alternatives.

Nous avons d'abord construit la matrice de décision à partir des résultats expérimentaux. Cette matrice a été normalisée afin de rendre les données comparables. Ensuite, les valeurs normalisées ont été pondérées selon les poids attribués aux critères.

Nous avons ensuite identifié la solution idéale (meilleures performances possibles) et la solution anti-idéale (pires performances). Chaque alternative a été comparée à ces deux références à l'aide d'une distance, permettant ainsi de mesurer sa proximité avec la solution idéale et son éloignement de la solution anti-idéale.

Enfin, un score de préférence a été calculé pour chaque alternative. Ce score permet de classer les différentes options, la meilleure étant celle dont le score est le plus proche de 1.

Le tableau IV-1 suivant présente les résultats détaillés de chaque alternative, avec les différentes étapes du calcul TOPSIS :

Alternative	Ra (μm)	MRR (mm^3/min)	Ra norm.	MRR norm.	Ra pond.	MRR pond.	Dist A ⁺	Dist A ⁻	Ci	Rang
A1	0.9650	1392	0.2041	0.0357	0.1361	0.0119	0.1789	0.0781	0.5865	8
A2	1.6893	4176	0.3572	0.1071	0.2381	0.0357	0.0929	0.1505	0.3629	15
A3	2.4116	8352	0.5100	0.2143	0.3400	0.0714	0.0901	0.0677	0.1852	17
A4	1.5490	2970	0.3276	0.0762	0.2184	0.0254	0.1116	0.1144	0.4089	14
A5	2.4683	7920	0.5221	0.2031	0.3480	0.0677	0.1007	0.0496	0.1701	18
A6	1.1293	5940	0.2387	0.1521	0.1591	0.0507	0.1387	0.1195	0.6021	7
A7	0.8616	2784	0.1822	0.0713	0.1215	0.0238	0.1913	0.0745	0.6314	5
A8	1.5030	8352	0.3179	0.2143	0.2119	0.0714	0.1026	0.1357	0.4899	11
A9	2.2676	16704	0.4893	0.4286	0.3262	0.1429	0.1321	0.0486	0.3629	16
A10	1.4173	2784	0.2997	0.0713	0.1998	0.0238	0.1257	0.1100	0.4581	12
A11	0.8080	2784	0.1710	0.0713	0.1140	0.0238	0.1967	0.0706	0.6433	4
A12	0.9416	6264	0.1992	0.1607	0.1328	0.0536	0.1633	0.1230	0.6673	3
A13	1.4806	3960	0.3134	0.1014	0.2090	0.0338	0.1073	0.1227	0.4459	13
A14	0.5326	3960	0.1127	0.1014	0.0751	0.0338	0.2222	0.1502	0.7069	2
A15	0.9186	8910	0.1943	0.2285	0.1295	0.0762	0.1420	0.2770	0.7214	1
A16	0.9536	4176	0.2018	0.1071	0.1346	0.0357	0.1536	0.1176	0.6297	6
A17	1.3926	11136	0.2946	0.2850	0.1964	0.0950	0.1395	0.1738	0.5715	9
A18	1.3570	8352	0.2872	0.2143	0.1915	0.0714	0.1056	0.1524	0.5497	10

Tableau IV-1 Résultat de méthode TOPSIS

Le tableau présente les résultats de la méthode TOPSIS appliquée à 18 alternatives évaluées selon deux critères : la rugosité moyenne (Ra) à minimiser et le taux d'enlèvement de matière (MRR) à maximiser. Après normalisation et pondération, les distances aux solutions idéales

positive et négative ont été calculées, permettant le calcul de l'indice de performance relative C_i . Cet indice mesure la proximité de chaque alternative à la solution idéale, avec une valeur plus proche de 1 indiquant une meilleure performance globale. C'est à partir de cet indice que les alternatives sont classées.

Parmi ces alternatives, **A15** ($C_i = 0,7214$) et **A14** ($C_i = 0,7069$) se distinguent en occupant respectivement la première et la deuxième place du classement selon TOPSIS. Cette distinction s'explique par l'analyse de leurs paramètres d'entrée.

L'alternative **A15** présente les conditions suivantes : un rayon d'outil (r) de **0,8 mm**, une vitesse de coupe (V_c) de **165 m/min**, une profondeur de passe (ap) de **0,45 mm** et une avance (f) de **0,12 mm/tr**. Cette configuration permet un bon compromis entre les critères, avec une rugosité R_a de **0,9186 μm** et un MRR élevé de **8910 mm^3/min** . La combinaison d'une profondeur de passe **importante** et d'une avance modérée favorise un taux d'enlèvement significatif tout en maintenant une qualité de surface acceptable.

L'alternative **A14**, avec un rayon d'outil identique et une vitesse de coupe égale, mais une profondeur de passe moindre (0,3 mm) et une faible avance (0,08 mm/tr), se distingue par une excellente qualité de surface (**$R_a = 0,5326 \mu\text{m}$**) tout en conservant un MRR satisfaisant (**3960 mm^3/min**). Cette stratégie favorise la finition, ce qui explique sa haute position dans le classement, particulièrement puisque la pondération AHP accorde un poids plus important à la rugosité (0,666667) qu'au MRR (0,333333).

IV.3.2 Méthode VIKOR

Dans cette section, nous appliquons la méthode VIKOR pour classer les différentes alternatives issues de notre plan d'expérience. La méthode VIKOR est particulièrement adaptée pour résoudre des problèmes de décision multicritères comportant des critères conflictuels. Elle permet de proposer une solution de compromis entre les performances des différentes alternatives. Nous considérons deux critères : la rugosité moyenne (R_a), à minimiser, et le taux d'enlèvement de matière (MRR), à maximiser.

Après avoir normalisé les données et appliqué les pondérations, nous avons calculé trois indices essentiels dans la méthode VIKOR :

- S_i : l'indice de proximité globale, représentant la distance agrégée de chaque alternative à la solution idéale.
- R_i : l'indice de regret maximal, indiquant la plus grande distance d'une alternative à la solution idéale selon un critère particulier.
- Q_i : l'indice final de VIKOR, qui prend en compte à la fois S_i et R_i , permettant un compromis entre la solution collective et celle qui minimise le regret.

Les résultats obtenus à l'aide de la méthode VIKOR sont présentés dans le **tableau IV-2** suivant :

Alternative	R_a (μm)	MRR (mm^3/min)	S_i	R_i	Q_i	Rang
-------------	-------------------------	----------------------------------	-------	-------	-------	------

A1	0.9650	1392	0.482254	0.333333	0.341085	10
A2	1.6893	4176	0.671102	0.398375	0.569190	15
A3	2.4116	8352	0.828957	0.647139	0.955432	17
A4	1.5490	2970	0.649035	0.350054	0.501570	14
A5	2.4683	7920	0.857889	0.666667	1.000000	18
A6	1.1293	5940	0.439833	0.234326	0.204938	4
A7	0.8616	2784	0.416340	0.303030	0.253821	8
A8	1.5030	8352	0.516030	0.334212	0.371063	11
A9	2.2676	16704	0.597545	0.597545	0.706203	16
A10	1.4173	2784	0.607726	0.304696	0.420354	12
A11	0.8080	2784	0.397879	0.303030	0.237919	6
A12	0.9416	6264	0.368135	0.227272	0.136082	3
A13	1.4806	3960	0.603926	0.326497	0.439014	13
A14	0.5326	3960	0.277429	0.277429	0.108410	2
A15	0.9186	8910	0.302611	0.169671	0.021692	1
A16	0.9536	4176	0.417722	0.272727	0.224525	5
A17	1.3926	11136	0.417401	0.296189	0.247853	7
A18	1.3570	8352	0.465746	0.283928	0.277162	9

Tableau IV-2 Résultat de méthode VIKOR

L'analyse des résultats obtenus avec la méthode VIKOR permet d'identifier les deux meilleures alternatives en fonction de l'indice global Q_i , qui combine à la fois la rugosité moyenne R_a (à minimiser) et le taux d'enlèvement de matière MRR (à maximiser).

Les alternatives A15 et A14 présentent respectivement les valeurs Q_i de 0.0217 et 0.1084, ce qui les place en première et deuxième position. Ces faibles valeurs traduisent un compromis favorable entre qualité de surface et productivité.

- L'alternative A15 correspond aux paramètres suivants : rayon de l'outil $r = 0.8$ mm, vitesse de coupe $V_c = 165$ m/min, profondeur de passe $a_p = 0.45$ mm, avance par tour $f = 0.12$ mm/tr. Cette configuration permet d'obtenir une rugosité moyenne R_a de 0.9186 micromètres et un taux d'enlèvement de matière MRR élevé de 8910 mm³/min. Ce résultat indique un bon équilibre où la productivité est maximisée tout en conservant une qualité de surface acceptable.
- L'alternative A14, en seconde position, présente les mêmes valeurs pour r et V_c , mais une profondeur de passe a_p de 0.3 mm et une avance par tour f de 0.08 mm/tr. Cette configuration donne une rugosité moyenne R_a plus faible de 0.5326 micromètres, donc une meilleure qualité de surface, mais avec un MRR réduit à 3960 mm³/min.

IV.3.3 Méthode MARCOS

Dans notre étude, nous avons appliqué la méthode MARCOS aux 18 alternatives générées à partir du plan d'expérience Taguchi, en tenant compte de deux critères principaux :

- La rugosité de surface (R_a), critère à minimiser,
- Le taux d'enlèvement de matière (MRR), critère à maximiser.

Les poids affectés à ces critères sont respectivement : Ra : 0,6667, MRR : 0,3333.

Le **Tableau IV-3** présente les Résultat de méthode MARCOS

Alternative	Ra	MR R	n_Ra	n_MR R	v_Ra	v_MR R	S_i	S+	S-	Ki+	Ki-	f(Ki)	Ran g
1	0.9650	1392	0.5510	0.0833	0.3673	0.0278	0.3951	0.7459	0.2905	0.2296	0.7731	0.2969	12
2	1.6893	4176	0.3170	0.2500	0.2113	0.0833	0.2946	0.7459	0.2905	0.0092	0.9998	0.0092	17
3	2.4116	8352	0.2225	0.5000	0.1483	0.1667	0.3150	0.7459	0.2905	0.0544	0.9396	0.0579	14
4	1.5490	2970	0.3468	0.1780	0.2312	0.0593	0.2905	0.7459	0.2905	0	1	0	18
5	2.4683	7920	0.2207	0.4745	0.1471	0.1581	0.3052	0.7459	0.2905	0.0326	0.9283	0.0351	13
6	1.1293	5940	0.4822	0.3557	0.3215	0.1186	0.4401	0.7459	0.2905	0.3315	0.6827	0.4855	9
7	0.8616	2784	0.6325	0.1667	0.4216	0.0556	0.4771	0.7459	0.2905	0.4081		0.6917	6
8	1.5030	8352	0.3620	0.5000	0.2413	0.1667	0.4080	0.7459	0.2905	0.2583	0.7346	0.3516	11
9	2.2676	16704	0.2395	1.0000	0.1597	0.3333	0.4930	0.7459	0.2905	0.4476	0.5600	0.7993	5
10	1.4173	2784	0.3838	0.1667	0.2559	0.0556	0.3115	0.7459	0.2905	0.0454	0.9399	0.0483	15
11	0.8080	2784	0.6737	0.1667	0.4491	0.0556	0.5047	0.7459	0.2905	0.4799	0.5755	0.8338	4
12	0.9416	6264	0.5775	0.3750	0.3850	0.1250	0.5100	0.7459	0.2905	0.4903	0.5633	0.8702	3
13	1.4806	3960	0.3679	0.2375	0.2452	0.0792	0.3244	0.7459	0.2905	0.0733	0.9111	0.0805	16
14	0.5326	3960	1.0000	0.2375	0.6667	0.0792	0.7459	0.7459	0.2905	1.0000	0	∞	1
15	0.9186	8910	0.5791	0.5330	0.3859	0.1777	0.5636	0.7459	0.2905	0.6064	0.4027	1.5064	2
16	0.9536	4176	0.5577	0.2500	0.3718	0.0833	0.4551	0.7459	0.2905	0.3604	0.6397	0.5633	8
17	1.3926	11136	0.3821	0.6667	0.2547	0.2222	0.4769	0.7459	0.2905	0.4067	0.5911	0.6879	7
18	1.3570	8352	0.3923	0.5000	0.2615	0.1667	0.4282	0.7459	0.2905	0.3061	0.6991	0.4378	10

Tableau IV-3 Résultats de méthode MARCOS

À la lumière des résultats obtenus par la méthode MARCOS, les alternatives 14 et 15 se distinguent comme les meilleures solutions parmi l'ensemble des combinaisons testées. L'alternative 14, qui présente une valeur $f(K_i) = \infty$, occupe la première position du classement. Cette performance exceptionnelle s'explique par une rugosité de surface très faible ($Ra = 0,5326 \mu m$), indiquant une excellente qualité de finition, associée à un taux d'enlèvement de matière (MRR) modéré ($3960 \text{ mm}^3/\text{min}$). Cette combinaison est obtenue avec une vitesse de coupe de 165 m/min , une profondeur de passe de $0,3 \text{ mm}$, et une avance faible ($f = 0,08 \text{ mm/tr}$). Le choix d'une vitesse de coupe intermédiaire, combinée à une faible avance, contribue à une réduction des forces de coupe et des vibrations, favorisant ainsi une surface plus lisse.

En deuxième position, l'alternative 15 affiche une valeur $f(K_i) = 1,5064$, traduisant une excellente performance globale. Cette combinaison offre un très bon compromis entre productivité et qualité. En effet, elle présente un R_a de $0,9186 \mu\text{m}$, tout en atteignant un MRR élevé de $8910 \text{ mm}^3/\text{min}$. Les conditions de coupe associées sont les mêmes que pour l'alternative 14 en termes de vitesse ($V_c = 165 \text{ m/min}$) et de rayon d'outil ($r = 0,8 \text{ mm}$), mais avec une profondeur de passe plus importante ($a_p = 0,45 \text{ mm}$) et une avance légèrement supérieure ($f = 0,12 \text{ mm/tr}$). L'augmentation de l'avance et de la profondeur de passe permet d'accroître significativement le volume de matière usinée, au prix toutefois d'une légère dégradation de la qualité de surface.

IV.3.4 Méthode CoCoSo

La méthode CoCoSo (Combined Compromise Solution) est une approche multicritère récente permettant de combiner plusieurs modes d'agrégation des performances des alternatives. Elle intègre à la fois la somme pondérée et le produit pondéré des valeurs normalisées pour offrir un compromis robuste dans le classement des solutions.

Dans cette étude, nous avons appliqué la méthode COCOSO à 18 alternatives (A1 à A18) caractérisées par deux critères :

- R_a (rugosité moyenne, en μm) à minimiser,
- MRR (taux d'enlèvement de matière, en mm^3/min) à maximiser.

Le **tableau IV-4** ci-dessous synthétise les résultats complets obtenus pour chaque alternative :

Alternative	R_a	MRR	R R_a	R MRR	S_i	P_i	K finale	Rang
A1	0.965	1392	0.7766	0.0	0.5177	0.2901	0.2808	16
A2	1.6893	4176	0.4024	0.1818	0.3289	0.3088	0.3135	13
A3	2.4116	8352	0.0293	0.4545	0.1711	0.0731	0.1219	17
A4	1.549	2970	0.4749	0.1031	0.351	0.2854	0.3083	14
A5	2.4683	7920	0.0	0.4263	0.1421	0.1	0.1864	18
A6	1.1293	5940	0.6917	0.297	0.5602	0.5219	0.541	6
A7	0.8616	2784	0.83	0.0909	0.5837	0.3971	0.4904	9
A8	1.503	8352	0.4987	0.4545	0.484	0.4835	0.4837	10
A9	2.0765	16704	0.1707	1.0	0.3511	0.271	0.311	15
A10	1.4173	2784	0.4428	0.0909	0.3617	0.3603	0.361	12
A11	0.8616	2784	0.83	0.0909	0.5891	0.3971	0.4931	8
A12	0.9416	6264	0.7887	0.3182	0.6319	0.5828	0.6073	3
A13	1.4806	3960	0.5103	0.1677	0.3961	0.3521	0.3563	11
A14	0.5326	3960	1.0	0.1677	0.7226	0.5515	0.6303	2
A15	0.9186	8910	0.8006	0.491	0.6974	0.6802	0.6888	1
A16	0.9536	4176	0.7825	0.1818	0.5832	0.5181	0.5506	5
A17	1.3926	11136	0.5557	0.6364	0.5826	0.5814	0.582	4
A18	1.357	8352	0.5741	0.4545	0.5343	0.5311	0.5327	7

Tableau IV-4 Résultat de méthode CoCoSo

Selon les résultats obtenus par la méthode COCOSO, les deux meilleures alternatives identifiées sont A15 et A14, avec des valeurs de K_{finale} respectives de 0.6888 et 0.6303. L'alternative A15, qui occupe le premier rang, correspond à des conditions de coupe définies par un rayon d'outil $r = 0.8 \text{ mm}$, une vitesse de coupe $Vc = 165 \text{ m/min}$, une profondeur de passe $ap = 0.45 \text{ mm}$ et une avance par tour $f = 0.12 \text{ mm/tr}$. Cette configuration permet d'obtenir un compromis particulièrement intéressant entre une bonne qualité de surface, avec une rugosité $Ra = 0.9186 \text{ }\mu\text{m}$, et un taux d'enlèvement de matière (MRR) relativement élevé de $8910 \text{ mm}^3/\text{min}$.

Quant à l'alternative A14, classée au deuxième rang, elle se caractérise par les paramètres suivants : $r = 0.8 \text{ mm}$, $Vc = 165 \text{ m/min}$, $ap = 0.3 \text{ mm}$ et $f = 0.08 \text{ mm/tr}$. Bien que son MRR soit légèrement inférieur ($3960 \text{ mm}^3/\text{min}$), elle présente la rugosité de surface la plus faible de l'ensemble des alternatives analysées ($Ra = 0.5326 \text{ }\mu\text{m}$). Ainsi, A14 constitue une option particulièrement adaptée lorsque l'objectif principal est d'optimiser la qualité de surface plutôt que la productivité.

Méthodes	Meilleure Alternative	Ra (μm)	MRR (mm^3/min)	Commentaire synthétique
TOPSIS	A15	0.9186	8910	Bon compromis entre faible rugosité (Ra) et bon MRR
VIKOR	A15	0.9186	8910	Classement identique à TOPSIS, cohérence forte
MARCOS	A14	0.5326	3960	Priorise très faible rugosité, MRR moyen
COCOSO	A15	0.9186	8910	Idem TOPSIS et VIKOR, confirme l'équilibre

Tableau IV-5 Comparaison des quatre méthodes

D'après le **Tableau IV-5**. Les méthodes TOPSIS, VIKOR et COCOSO convergent pour classer l'alternative A15 comme la meilleure, reflétant un bon compromis entre une rugosité modérée et un taux d'enlèvement de matière élevé. En revanche, la méthode MARCOS privilégie l'alternative A14, caractérisée par la rugosité la plus faible mais un MRR moindre, en raison de son accent plus marqué sur la minimisation de la rugosité. Ainsi, tandis que TOPSIS, VIKOR et COCOSO équilibrent qualité de surface et productivité, MARCOS se focalise davantage sur la qualité de surface, ce qui peut être avantageux selon l'objectif prioritaire.

IV.4 Etude la sensibilité des méthodes au variations des poids

Dans le but d'étudier la sensibilité des méthodes MCDM aux variations des poids. Cent (100) variations ont été calculées. Ces valeurs ont été calculées à partir des poids obtenus par la méthode AHP (0,33, 0,67) avec un incrément de 10 %, de tel sorte que la somme reste égale à un. L'objectif est d'évaluer l'impact de la variation des poids sur les classements obtenus.

IV.4.1 Classements des alternatives selon les méthodes MCDM

Le **tableau IV-6** ci-dessous présente un résumé des classements obtenus pour chaque alternative selon ces méthodes.

Classement par méthodes				
Alternative	TOPSIS	MARCOS	VIKOR	CoCoSo
1	15	14	15	15
2	14	11	14	14
3	17	15	12	9
4	12	7	6	17
5	11	12	16	12
6	16	16	11	18
7	6	1	7	8
8	7	6	17	6
9	18	17	18	16
10	1	18	1	11
11	8	8	8	7
12	9	10	10	3
13	13	13	13	5
14	10	4	4	13
15	4	2	2	2
16	2	9	9	1
17	3	3	3	10
18	5	5	5	4

Tableau IV-6 Classement des alternatif de chaque méthode

La **figure IV-6** représentant les classements des alternatives selon les quatre méthodes MCDM (TOPSIS, VIKOR, MARCOS, CoCoSo) permet de visualiser rapidement la stabilité ou la variation des décisions entre les différentes approches.

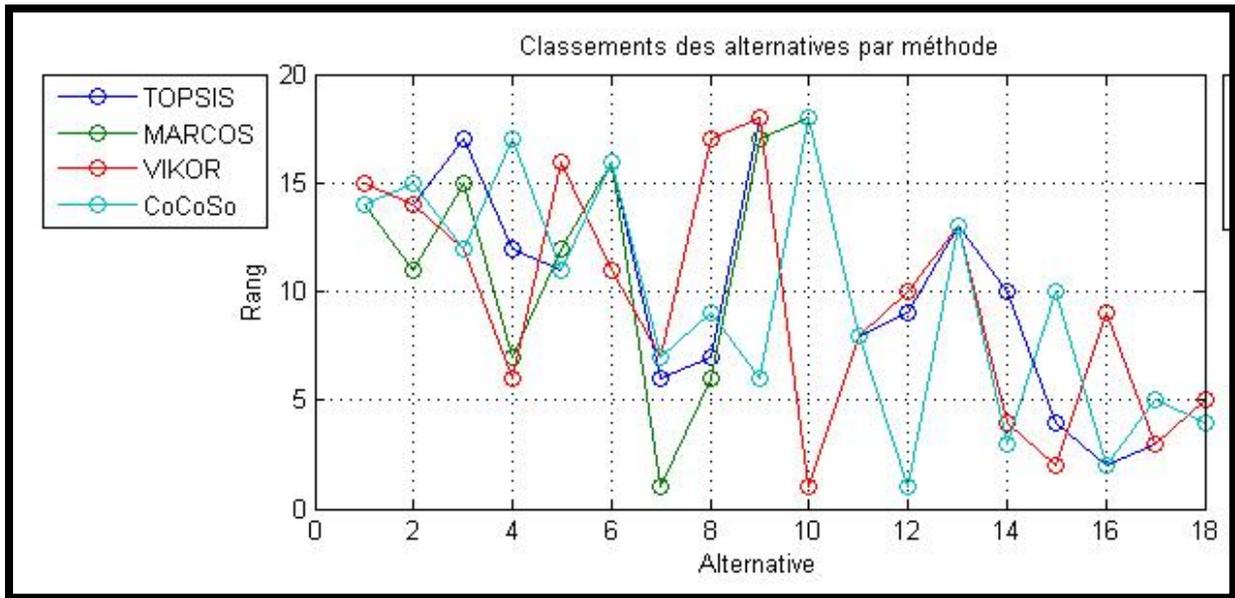


Figure IV-6 Graphique du Classements des alternatives selon les méthodes MCDM

La figure représentant les classements des alternatives selon les quatre méthodes MCDM (TOPSIS, VIKOR, MARCOS, CoCoSo) permet de visualiser rapidement la variation des décisions entre les différentes approches.

On observe dans le graphe que les courbes suivent des tendances globalement similaires, en particulier dans les zones représentant les meilleures solutions (rang proche de 1) et les moins bonnes alternatives (rang proche de 18). Cette similarité reflète une bonne cohérence entre les méthodes, notamment pour les alternatives fortement dominantes ou défavorisées.

Les alternatives 15, 16 et 17 se démarquent clairement par des positions basses (rangs 1 à 3) dans toutes les méthodes, visibles par une superposition ou un rapprochement des courbes en bas du graphe. Cela confirme la stabilité du classement de ces alternatives, indépendamment de la méthode utilisée.

En revanche, quelques divergences apparaissent dans les alternatives intermédiaires, où les courbes se croisent de façon plus marquée. Par exemple :

- L'alternative 3 varie notablement : bien classée par VIKOR (rang 12), mais moins bien classé par TOPSIS (rang 17).
- L'alternative 17, bien classée par les trois premières méthodes, chute à la 10^e place selon CoCoSo, ce qui montre une incohérence ponctuelle.

De façon générale, le graphe met en évidence que les méthodes TOPSIS, VIKOR et MARCOS produisent des profils de classement visuellement très proches, ce qui témoigne d'une certaine robustesse de ces approches. La méthode CoCoSo, bien que globalement alignée, montre des variations plus marquées dans certaines zones, suggérant une sensibilité différente dans son mécanisme de pondération ou d'agrégation.

Ainsi, le graphe permet non seulement de confirmer les résultats du tableau, mais aussi de visualiser la stabilité décisionnelle entre méthodes, en soulignant les convergences (alternatives dominantes) et les divergences (zones d'incertitude ou de transition).

IV.4.3 Analyse des métriques de sensibilité par méthode

Afin d'évaluer la stabilité, la cohérence et la proximité des différentes méthodes MCDM entre elles, plusieurs métriques statistiques ont été calculées. **Le tableau IV-7** ci-dessous présente les valeurs obtenues pour chaque méthode (TOPSIS, MARCOS, VIKOR et CoCoSo), accompagnées d'une interprétation détaillée permettant de comparer leur comportement respectif face aux classements produits.

Métriques	TOPSIS	MARCOS	VIKOR	CoCoSo
RCI	0,49111111	0,84166667	0,61222222	0,59944444
Spearman	0,84520124	0,95252838	0,86525567	0,94427245
Pearson	0,8452193	0,94762684	0,82471833	0,93722478
STD	5,18956922	5,18956922	5,18956922	5,18956922
Manhattan	34,88	16,16	34,38	26,3
Euclidean	11,8978485	7,0363627	12,660237	7,95061004
Chebyshev	7,99	3,85	7,46	3,92

Le tableau IV-7 Résultat des métriques pour chaque méthode

Métrique	Interprétation
RCI (Relative Consensus Index)	Le RCI mesure le niveau de consensus entre les méthodes. Une valeur proche de 1 indique un fort accord entre les classements produits. Ici, MARCOS (0,84) présente le meilleur consensus, suggérant une grande proximité avec les autres méthodes. CoCoSo (0,60) et VIKOR (0,61) sont modérément alignées. TOPSIS (0,49) affiche le consensus le plus faible, indiquant un classement plus divergent.
Spearman	Ce coefficient évalue la corrélation entre les rangs produits par une méthode et un classement de référence. Des valeurs proches de 1 indiquent un ordre très similaire. MARCOS (0,95) et CoCoSo (0,94) présentent une excellente fidélité au classement global. VIKOR (0,86) et TOPSIS (0,85) sont un peu moins cohérentes, mais restent raisonnablement alignées.
Pearson	Contrairement à Spearman, Pearson mesure la corrélation entre les scores continus. MARCOS (0,95) et CoCoSo (0,94) confirment leur régularité et leur proximité avec le classement global. TOPSIS (0,84) et VIKOR (0,82) montrent une cohérence plus limitée.
STD (Écart-type)	L'écart-type est identique pour toutes les méthodes (5,19), ce qui indique que la dispersion des rangs entre alternatives est similaire. Cette métrique ne distingue pas les méthodes, mais montre qu'elles ont toutes une variabilité comparable.

Manhattan	Cette distance calcule la somme absolue des différences entre les rangs d'une méthode et un classement de référence. MARCOS (16,16) est la plus proche du consensus, suivie par CoCoSo (26,3) . VIKOR (34,38) et surtout TOPSIS (34,88) s'éloignent davantage, suggérant un classement plus différent.
Euclidean	Distance quadratique qui accentue les grands écarts. MARCOS (7,04) et CoCoSo (7,95) sont les méthodes les plus proches du classement moyen. TOPSIS (11,89) et VIKOR (12,66) ont des écarts plus prononcés.
Chebyshev	Cette métrique montre le plus grand écart individuel entre deux rangs. MARCOS (3,85) et CoCoSo (3,92) indiquent une stabilité remarquable. À l'opposé, TOPSIS (7,99) et VIKOR (7,46) révèlent des pics d'écarts sur certaines alternatives.

Tableau IV-8 Interprétation des métriques pour chaque méthode

-Par conclusion MARCOS et CoCoSo sont les méthodes les plus cohérentes et proches du classement global selon presque toutes les métriques. TOPSIS est la plus divergente.

La **figure IV-7** compare visuellement les performances des quatre méthodes MCDM (TOPSIS, MARCOS, VIKOR et CoCoSo) selon sept métriques statistiques : RCI, Spearman, Pearson, STD, Manhattan, Euclidean et Chebyshev.

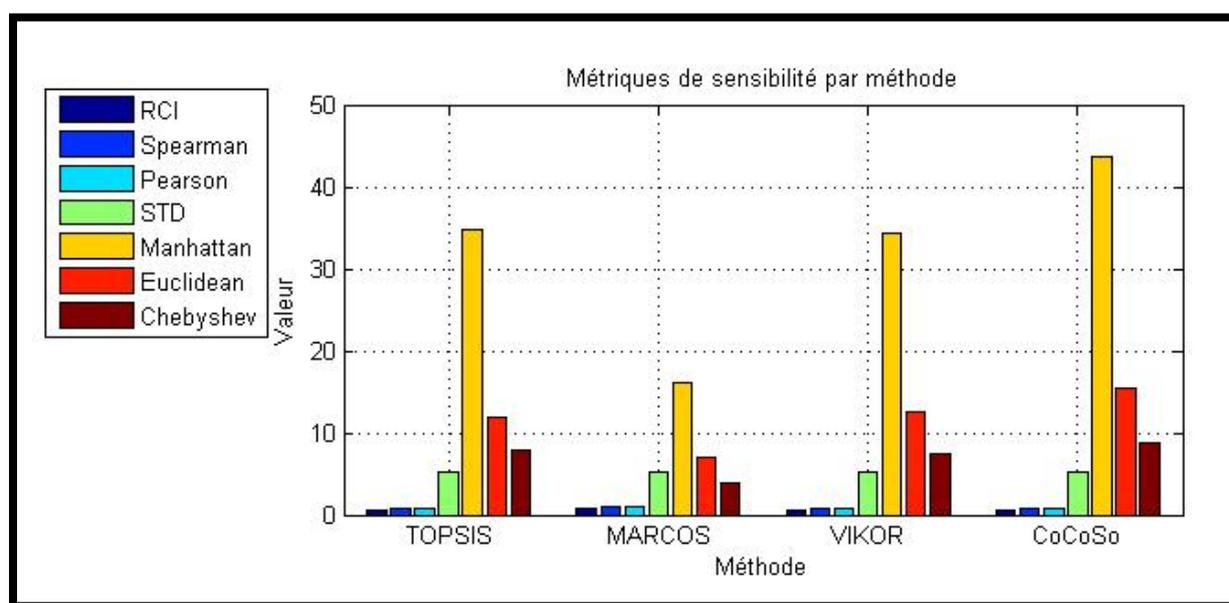


Figure IV-7 Métrique de sensibilité par méthode

Couleur	Métrique	Signification
Bleu foncé	RCI	Consensus global entre méthodes (plus c'est haut, mieux c'est).
Bleu clair	Spearman	Corrélation des rangs avec le classement agrégé.
Cyan	Pearson	Corrélation des scores avec le classement global.
Vert	STD	Variabilité des rangs (identique pour toutes les méthodes ici).
Jaune	Manhattan	Distance absolue au consensus (plus c'est haut, moins c'est fiable).
Rouge	Euclidean	Distance quadratique (grands écarts pénalisés).
Marron	Chebyshev	Plus grand écart individuel entre les classements.

Tableau IV-9 Signification des métriques

En conclusion

- **MARCOS**
Méthode la plus stable et cohérente. Meilleurs résultats sur presque toutes les métriques : consensus élevé (RCI), forte corrélation (Spearman, Pearson) et faibles distances (Manhattan, Euclidean, Chebyshev).
- **CoCoSo** :
Très proche de MARCOS, avec des résultats solides en stabilité et cohérence, légèrement inférieurs en distance.
- **VIKOR** :
Performances modérées. Corrélation correcte mais distances plus élevées → moins proche du consensus.
- **TOPSIS** :
Moins bon positionnement. Distances élevées, faible consensus et corrélation → méthode la plus divergente dans ce contexte.

IV.4.2 Comparaison des scores normalisés par alternative

Afin de comparer objectivement les performances des différentes méthodes MCDM (TOPSIS, MARCOS, VIKOR et CoCoSo), une normalisation des métriques a été réalisée. Ce procédé permet de ramener l'ensemble des valeurs sur une échelle commune de 0 à 1, facilitant ainsi l'évaluation relative des méthodes selon chaque critère.

Le principe est simple : pour chaque métrique, la valeur maximale est considérée comme 1, et les autres sont exprimées en proportion par rapport à cette valeur. Cela permet de visualiser de manière standardisée la performance relative de chaque méthode sur tous les axes d'analyse.

Ainsi, plus une valeur est proche de 1, meilleure est la méthode pour les métriques de corrélation (**RCI, Spearman, Pearson**),

tandis que pour les métriques de **distance (Manhattan, Euclidienne, Chebyshev)**, une valeur faible est préférable (valeur proche de 0 → meilleure proximité au consensus).

Le **tableau IV-10** présente les résultats des scores normalisés obtenus pour chaque métrique :

	Métriques normalisées			
	TOPSIS	MARCOS	VIKOR	CoCoSo
RCI	0,57359736	1	0,72541254	0,5379538
Spearman	0,89123196	1	0,84239734	0,75804661
Pearson	0,88634349	1	0,84437025	0,76119477
STD	1	1	1	1
Manhattan	0,46233468	1	0,45578231	0,36248873
Euclidien	0,58728406	1	0,53519785	0,46644442
Chebechev	0,47745665	1	0,5234474	0,45991091

Tableau IV-10 Interprétation des métriques de consensus et de corrélation entre méthodes de classement

Le **tableau IV-11** synthétise l'interprétation de chaque métrique et identifie-la ou les méthodes les plus performantes

Métrique	Signification	Méthode(s) la/les plus performante(s)
RCI	Mesure le consensus global entre la méthode étudiée et les autres. Valeur élevée = forte convergence.	MARCOS , suivi de VIKOR
Spearman	Corrélation des rangs avec le classement global. Valeur proche de 1 = bon respect de l'ordre relatif des alternatives.	MARCOS , puis TOPSIS
Pearson	Corrélation linéaire des scores. Valeur élevée = régularité dans les scores attribués aux alternatives.	MARCOS , puis TOPSIS
STD	Variabilité des rangs. Ici, toutes les méthodes ont une variabilité identique (valeur = 1).	Toutes équivalentes
Manhattan	Distance absolue entre les classements. Valeur faible = méthode plus proche du consensus.	CoCoSo , suivi de VIKOR
Euclidienne	Valeur faible = méthode plus stable, moins d'écart forts.	CoCoSo , suivi de VIKOR
Chebyshev	Écart maximal entre deux positions dans le classement. Faible valeur = moins de divergences extrêmes.	CoCoSo , suivi de TOPSIS

Tableau IV-11 Synthèse des performances des méthodes selon différentes métrique de comparaison

Par conclusion :

- **MARCOS** se distingue nettement sur les métriques de corrélation (meilleur consensus et cohérence des classements).
- **CoCoSo** est la méthode la plus proche du consensus en termes de distances **statistiques** (Manhattan, Euclidean, Chebyshev).
- **VIKOR** présente des performances intermédiaires sur l'ensemble des critères.
- **TOPSIS** obtient de bons résultats en corrélation, mais reste plus éloignée du consensus sur les distances.

La **figure IV-8** illustre les valeurs normalisées des scores attribués par chaque méthode MCDM (TOPSIS, MARCOS, VIKOR et CoCoSo) aux différentes alternatives. Elle permet d'identifier visuellement les alternatives les plus favorisées par chaque méthode.

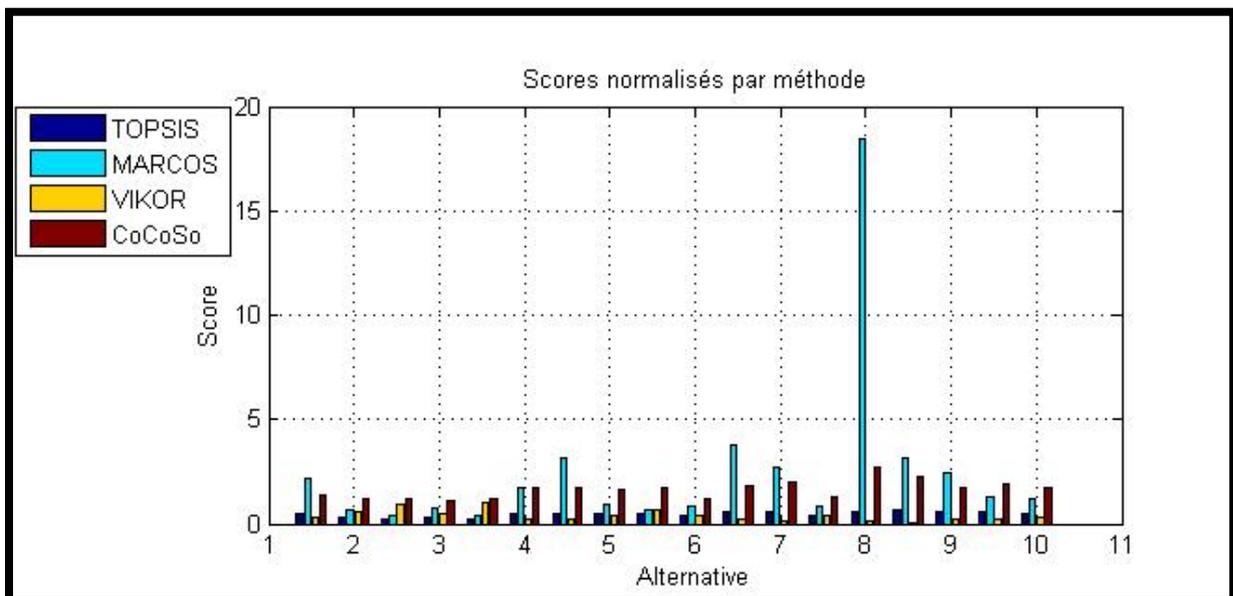


Figure IV-8 Score normalisée par méthode

On remarque notamment que l'alternative **14** obtient un score particulièrement élevé avec **MARCOS**, ce qui peut expliquer certaines différences observées dans les distances (Manhattan, Euclidienne, Chebyshev) lors de l'analyse de sensibilité.

Bien que cette figure ne soit pas directement liée aux métriques de stabilité globales (RCI, Spearman, etc.), elle complète l'analyse en illustrant concrètement les écarts de comportement des méthodes sur les alternatives individuelles.

Elle met en évidence l'importance d'utiliser des métriques de comparaison pour évaluer la cohérence, la robustesse et la proximité entre les méthodes MCDM.

IV.4.4 Résultats du vote pluraliste

Dans le cadre de notre démarche comparative, nous avons appliqué le vote pluraliste afin d'agrèger les résultats obtenus par les différentes méthodes d'aide à la décision multicritère. Cette approche consiste à attribuer un vote à la méthode considérée comme la plus performante pour chaque critère (ou métrique), après une normalisation adaptée à la nature propre de chaque métrique.

- **Normalisation des métriques**

Considérons une matrice $M_{i,j}$ représentant la valeur de la métrique i pour la méthode j , où $i = 1, \dots, n_m$ et $j = 1, \dots, n_{meth}$.

Nous procédons à une normalisation des métriques afin de rendre les résultats comparables entre elles :

$$N_{i,j} = \begin{cases} \frac{M_{i,j}}{\max_j(M_{i,j})} & \text{si la métrique } i \text{ est à maximiser (ex. : RCI, Spearman, Pearson)} \\ \frac{M_{i,j}}{\min_j(M_{i,j})} & \text{si la métrique } i \text{ est à minimiser} \end{cases}$$

Cette normalisation garantit que, pour chaque métrique, la méthode la plus performante obtient une valeur normalisée maximale égale à 1.

- **Attribution des votes**

Pour chaque métrique i , nous attribuons un vote à la méthode j_i^* qui réalise la valeur normalisée maximale :

$$j_i^* = \arg \max_j (N_{i,j})$$

Le nombre total de votes obtenus par chaque méthode j s'écrit alors :

$$V_j = \sum_{i=1}^{n_m} \delta(j = j_i^*)$$

Avec

$$\delta(j = j_i^*) = \begin{cases} 1 & \text{si la méthode } j \text{ est la meilleure pour la métrique } i \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

- **Sélection de la méthode optimale**

La méthode globalement la plus performante selon le vote pluraliste est celle qui cumule le plus grand nombre de votes :

$$j_{best} = \arg \max_j (V_j)$$

Les résultats des votes sont représentés dans le **tableau IV-12**

Méthodes	Votes
MARCOS	6
TOPSIS	1
VIKOR	0
CoCoSo	0

Tableau IV-12 Résultat des votes pluraliste

Dans le cadre de notre étude comparative des méthodes MCDM, nous avons eu recours à la méthode du vote pluraliste afin d'identifier la méthode la plus consensuelle pour le classement des alternatives.

La **figure IV-9** illustre le nombre de fois où chaque méthode a classé une alternative en première position. Cette approche permet d'évaluer quelle méthode reflète le mieux la tendance globale des classements et peut être considérée comme la plus représentative.

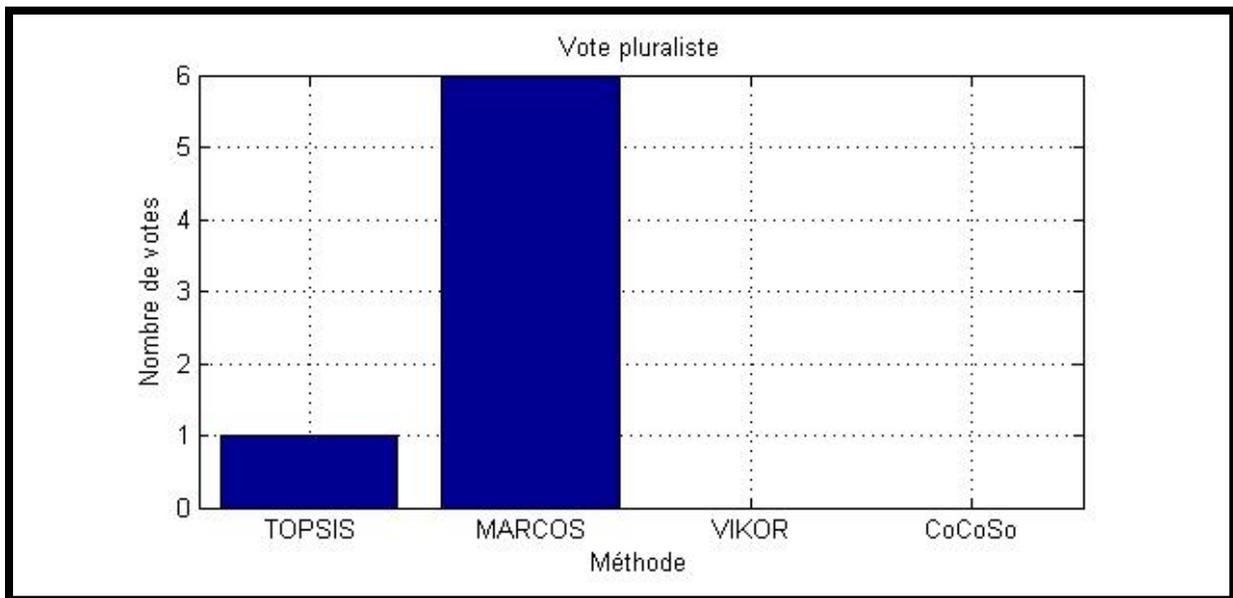


Figure IV-9 Vote pluraliste

Les résultats montrent que :

- La méthode MARCOS s'est distinguée nettement, en obtenant 6 votes, ce qui indique qu'elle a classé le plus souvent la meilleure alternative en première position, selon les différentes combinaisons de critères.
- La méthode TOPSIS a reçu 1 vote, ce qui suggère une contribution plus marginale dans la sélection de l'alternative optimale.
- Les méthodes VIKOR et CoCoSo n'ont reçu aucun vote, ce qui signifie qu'aucune alternative classée par ces méthodes n'a été considérée comme meilleure dans le cadre du vote pluraliste.

Ces résultats renforcent l'idée que MARCOS offre une meilleure cohérence ou stabilité dans les classements des alternatives, et peut donc être considérée comme la méthode la plus fiable ou dominante dans notre contexte d'évaluation.

IV.5 Conclusion finale

Ce chapitre a été consacré à l'analyse comparative des méthodes d'aide à la décision multicritère (MCDM) appliquées à l'usinage de l'acier AISI 304, en se basant sur deux critères principaux : la rugosité de surface (R_a) à minimiser, et le taux d'enlèvement de matière (MRR) à maximiser. Les poids des critères ont été déterminés par la méthode AHP, attribuant 66,7 % à R_a et 33,3 % à MRR.

Quatre méthodes MCDM – TOPSIS, VIKOR, MARCOS et CoCoSo – ont été utilisées pour évaluer 18 alternatives issues d'un plan d'expérience Taguchi. Les résultats ont montré une forte convergence entre TOPSIS, VIKOR et CoCoSo, qui ont toutes classé l'alternative A15 au 1er rang, avec des performances équilibrées :

- $R_a = 0,9186 \mu\text{m}$,
- $\text{MRR} = 8910 \text{ mm}^3/\text{min}$.

De son côté, la méthode MARCOS a désigné l'alternative A14 comme la plus performante, mettant l'accent sur une qualité de surface exceptionnelle ($R_a = 0,5326 \mu\text{m}$) malgré un MRR plus modeste ($3960 \text{ mm}^3/\text{min}$). Cette divergence illustre les priorités différentes dans les algorithmes de classement.

Une analyse de sensibilité a ensuite été menée sur 100 combinaisons de poids dérivées des valeurs AHP. Les résultats montrent que :

- MARCOS présente le plus haut niveau de stabilité et de cohérence avec un RCI de 0,84, et une corrélation Spearman de 0,95 avec le classement global.
- CoCoSo arrive juste après, avec de bonnes performances globales (Spearman = 0,94).
- VIKOR montre des résultats modérés.
- TOPSIS est la méthode la plus divergente, avec un RCI de 0,49 et une distance Manhattan élevée (34,88).

Enfin, l'application de la méthode du vote pluraliste, qui agrège les résultats des métriques normalisées, a confirmé la dominance de MARCOS avec 6 votes sur 7, contre 1 seul vote pour TOPSIS, et aucun pour VIKOR ou CoCoSo.

En résumé, cette étude a permis de :

- Mettre en évidence A15 comme la meilleure solution selon la majorité des méthodes,
- Souligner la robustesse de MARCOS face aux variations de poids,
- Proposer un cadre rigoureux pour l'évaluation multicritère en usinage.

Ces résultats constituent une base solide pour orienter le choix des conditions de coupe optimales et offrent une perspective concrète pour l'implémentation de systèmes MCDM dans des contextes industriels réels.

L'étude menée dans ce travail constitue une base méthodologique solide pour l'évaluation des performances en usinage à l'aide des méthodes d'aide à la décision multicritère (MCDM). Toutefois, plusieurs pistes de recherche peuvent être envisagées afin de prolonger cette démarche et de renforcer la fiabilité des résultats obtenus.

Une première perspective importante concerne l'amélioration de la méthode d'agrégation des classements. Le vote pluraliste utilisé dans cette étude présente l'avantage de la simplicité, mais il ne tient compte que de la première position attribuée par chaque méthode, ce qui peut entraîner une perte d'information sur la qualité globale des alternatives. Afin de mieux refléter la performance relative de chaque solution, il serait pertinent d'explorer d'autres techniques d'agrégation telles que la méthode de Borda, la moyenne des rangs ou encore le vote pondéré. Ces approches permettent de considérer l'ensemble des positions occupées par chaque alternative et offrent ainsi une représentation plus équilibrée, plus robuste et plus juste des résultats finaux.

Par ailleurs, l'élargissement du champ d'application de l'étude à d'autres matériaux industriels (aluminium, inox trempé, composites) ou à d'autres procédés d'usinage (fraisage à grande vitesse, électroérosion...) permettrait de tester la généralisabilité et la robustesse des méthodes MCDM dans des contextes variés.

Une autre voie d'approfondissement réside dans l'intégration de critères supplémentaires, notamment économiques (coût de fabrication), énergétiques (consommation électrique) ou environnementaux (émissions, durabilité). Cela permettrait de guider les décisions vers une approche plus globale, intégrant les enjeux actuels de l'industrie durable.

Le recours à des méthodes hybrides ou intelligentes représente également une perspective prometteuse. L'association de MCDM avec des techniques issues de l'intelligence artificielle (réseaux de neurones, logique floue, algorithmes génétiques) ou avec des méthodes d'optimisation, pourrait renforcer l'adaptabilité et la précision des classements produits, notamment dans des environnements décisionnels complexes.

De plus, l'analyse de sensibilité pourrait être approfondie à l'aide d'outils statistiques avancés comme la simulation de Monte Carlo ou les indices de Sobol, afin d'évaluer plus finement l'effet des variations de pondération sur les résultats obtenus.

Enfin, le développement d'un outil logiciel regroupant les principales méthodes MCDM (TOPSIS, VIKOR, MARCOS, COCOSO), avec une interface intuitive et la possibilité d'importer directement les données expérimentales, permettrait de favoriser une application plus large et plus efficace de ces méthodes dans un cadre industriel.

En résumé, ces différentes perspectives offrent un cadre stimulant pour le développement futur de systèmes d'aide à la décision multicritère plus robustes, plus intelligents et mieux adaptés aux exigences complexes de l'usinage moderne.

REFERECES:

- [1] Rahman, M. J., Abdul, A. S. M., et al. (2022). Machinability of stainless steels: A review. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1234–1242. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.123>
- [2] Gupta, K., & Gupta, M. K. (2021). Advanced machining processes of stainless steel: A comprehensive review. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.042>
- [3] Pimenov, D. Y., Mia, M., Gupta, M. K., et al. (2021). Improvement of machinability of Ti and its alloys using cooling-lubrication techniques: A review and future prospect. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 719–753. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.031>
- [4] Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2019). *Manufacturing Engineering and Technology* (8th ed.). Pearson.
- [5] Jawahir, I. S., Brinksmeier, E., M'Saoubi, R., et al. (2020). Surface integrity in material removal processes: Recent advances. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 69(2), 561–583. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.05.002>
- [6] Hansda, S. K. (Year). Machinability study of AISI 316 grade austenitic stainless steel using P 30 grade cemented carbide insert. *Journal Name, Volume (Issue)*.
- [7] Maurel-Pantel, A. (2009). Etude expérimentale et modélisation par éléments finis du procédé de fraisage: Application à l'identification paramétrique des lois de comportement (Doctoral dissertation).
- [8] Wikipedia. (n.d.). Tournage mécanique. Retrieved from https://fr.wikipedia.org/wiki/Tournage_m%C3%A9canique#Vitesse_de_coupe
- [9] Kocijan, A., & Donik, Č. (2021). The corrosion resistance of additively manufactured stainless steels. *Materials*, 14(4), 782. <https://doi.org/10.3390/ma14040782>
- [10] Zhang, X., Li, H., & Zhang, Y. (2020). Recent advances in stainless steels for biomedical applications. *Journal of Materials Science & Technology*, 52, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.03.045>
- [11] Gutnyk, M., & Nürnberger, F. (2023). The Fe-C diagram—History of its evolution. *History of Science and Technology*, 13(2), 243–262.
- [12] Kumar, A., Sharma, R., Kumar, S., & Verma. (2022). A review on machining performance of AISI 304 steel. *Materials Today: Proceedings*.
- [13] European Stainless Steel Development Association (Euro Inox). (2023). Stainless steels: Standards, properties, and applications. Euro Inox. <https://www.euroinox.org>

- [14] Zhang, J., Wang, L., & Liu, R. (2022). Corrosion behavior of stainless steels in aggressive environments: Mechanisms and prevention strategies. *Corrosion Science*. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110123>
- [15] Anderson, M., Smith, K., & Johnson, P. (2022). Stainless steel in medical applications: Biocompatibility, corrosion resistance, and surface modifications. *Journal of Biomedical Materials Research*. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.35045>
- [16] Stainless steel in food processing: A review of applications and challenges. (2021). *Journal of Food Engineering*.
- [17] Stainless steel in medical applications: Biocompatibility and performance. (2022). *Journal of Biomedical Materials Research*.
- [18] Applications of stainless steels in aerospace engineering. (2023). *Aerospace Materials and Technology*.
- [19] Stainless steel in construction: A review of research and applications. (2020). *Journal of Constructional Steel Research*.
- [20] Stainless steels in energy applications: Performance and sustainability. (2023). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [21] Binali, R., Demirpolat, H., Kuntoğlu, M., & Salur, E. (2023). Different aspects of machinability in turning of AISI 304 stainless steel: A sustainable approach with MQL technology. *Metals*, 13(6), 1088.
- [22] Zhang, L., & Li, X. (2022). Chemical Composition and Microstructure of AISI 304 Stainless Steel: A Review. *Materials Science and Engineering: A*, 840, 142345.
- [23] Thompson, M., & Martinez, R. (2021). Mechanical Properties of AISI 304 Stainless Steel: Influence of Heat Treatment and Cold Working. *Journal of Materials Processing Technology*, 295, 117215.
- [24] Matière du Monde. (n.d.). Acier inoxydable 304 – Propriétés physiques et mécaniques. <https://matieredumonde.com/acier-inoxydable-304>
- [25] American Iron and Steel Institute (AISI). (n.d.). Stainless steel grade 304 properties and applications. Retrieved from <https://www.shengenfab.com/fr/what-is-304-stainless-steel>
- [26] Wagh, S. S., Kulkarni, A. P., & Sargade, V. G. (2013). Machinability studies of austenitic stainless steel (AISI 304) using PVD cathodic arc evaporation (CAE) system deposited AlCrN/TiAlN coated carbide inserts. *Procedia Engineering*, 64, 907–914.
- [27] Shirazi, M., Najafabadi, A. H., & Amini, S. (2023). Machining performance on AISI 304 steel in the milling machine with mechanical and hydraulic spindle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*.

- [28] Mahdavinejad, R. A., & Saeedy, S. (2011). Investigation of the influential parameters of machining of AISI 304 stainless steel. *Sādhanā*, 36(6), 963–970.
<https://doi.org/10.1007/s12046-011-0049-1>
- [29] Gutnyk, M., & Nürnberger, F. (2023). The Fe-C diagram – History of its evolution. *History of Science and Technology*, 13(2), 243–262.
- [30] Dau Majak. (2020). Evaluation of vegetable oils as sustainable lubricants in machining of AISI 304 stainless steel. *Procedia Manufacturing*, 43, 495–502.
- [31] Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2011). Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: An overview. *Technological and Economic Development of Economy*, 17(2), 397–427.
- [32] Kou, G., Lu, Y., Peng, Y., & Shi, Y. (2012). Evaluation of classification algorithms using MCDM and rank correlation. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 11(1), 197–225.
- [33] Mančev, M. D. (2016). The Application of the TOPSIS Method in Selecting the Best Academic Library at the University of Niš. *Canadian Journal of Information and Library Science*, 40(1), 81–96.
- [34] Mančev, M. D. (2014). Ranking the Libraries of the University of Niš Faculties Using the VIKOR Method. *Canadian Journal of Information and Library Science*, 38(1), 22–36.
- [35] Karande, P., & Chakraborty, S. (2012). Application of multi-objective optimization on the basis of ratio analysis (MOORA) method for materials selection. *Materials & Design*, 37, 317–324.
- [36] Demir, G., Chatterjee, P., Kadry, S., Abdelhadi, A., & Pamučar, D. (2024). Measurement of alternatives and ranking according to compromise solution (MARCOS) method: A comprehensive bibliometric analysis. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 7(2), 313–336.
- [37] Sintaro, S. (2023). Penerapan Metode Grey Relational Analysis (GRA) Dalam Pemilihan E-Commerce. *Journal of Information Technology, Software Engineering and Computer Science*, 1(4), 166–173.
- [38] Yazdani, M., Zarate, P., Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2019). A combined compromise solution (CoCoSo) method for multi-criteria decision-making problems. *Management Decision*, 57(9), 2501–2519.
- [39] Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer.
- [40] Opricovic, S. (1998). *Multi-criteria optimization of civil engineering systems*. Faculty of Civil Engineering, Belgrade.

- [41] Brauers, J. K. M., & Zavadskas, E. K. (2006). The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. *Control and Cybernetics*, 35(2), 445–469.
- [42] Stević, Ž., Pamucar, D., Puška, A., & Chatterjee, P. (2020). Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to compromise solution (MARCOS). *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106231.
- [43] Deng, J. (1982). Control problems of grey systems. *Systems & Control Letters*, 1(5), 288–294.
- [44] Yazdani, M., & Payam, A. (2020). COCOSO: A new MCDM method for decision-making problems. *Operational Research*.
- [45] Held, U. (2010). Pièges des corrélations : les coefficients de corrélation de Pearson et de Spearman. *Forum Médical Suisse–Swiss Medical Forum*, 10(38), 652–653.
- [46] Zighed, D. A., Marcellin, S., & Ritschard, G. (2007). Mesure d'entropie asymétrique et consistante. In *EGC* (pp. 81–86).
- [47] Pearson, K. (1895). Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58, 240–242.
- [48] Isabels, K. R., & Vinodhini, G. A. F. (2025). Ranking consistency index (RCI) integrated VIKOR method for multicriteria decision making with intuitionistic interval-valued trapezoidal fuzzy number. In *Recent Innovations in Sciences and Humanities* (pp. 58–65). CRC Press.
- [49] Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2011). *Data Mining: Concepts and Techniques* (3rd ed.). Morgan Kaufmann.
- [50] Wang, X., Yue, Y., Zhang, F., Wang, Y., & Zhang, Z. (2025). Active Detection of Interphase Faults in Distribution Networks Based on Energy Relative Entropy and Manhattan Distance. *Electric Power Systems Research*, 241, 111397.
- [51] Vesković, G., Petrović, B., Stanujkic, D., & Zavadskas, B. (2018). An Approach Based on the Integration of the CRITIC and MABAC Methods for Selecting the Location of Logistics Centers. *Sustainability*, 10(10).
- [52] Giasin, A. F., & Ayvar-Soberanis, M. (2023). Recent advances in machining of stainless steels using advanced cutting tools and cooling/lubrication techniques: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 81, 1109–1141.
- [53] Mia, K., Mishra, P. K., & Das, S. R. (2023). Recent Advances in Sustainable Machining of Difficult-to-Cut Materials: Strategies and Decision-Making Tools. *Journal of Cleaner Production*, 379.

