

# CORRECTION DE TRAJECTOIRES D'OUTILS EN USINAGE DEUX AXES

**Abdallah MIR — Idir BELAIDI**

*Laboratoire L. M. M. C.*

*Université de Boumerdes*

*Avenue de l'Indépendance 35 000 Boumerdes – Algérie –*

*mir@umbb.dz*

---

## **RESUME :**

*Dans cet article, nous présentons un système de compensation de trajectoires d'outils permettant de corriger les trajectoires d'outils en fraisage 2 axes et de respecter ainsi une tolérance prescrite. Ce système est basé sur une stratégie de calcul de la déflexion d'outil s'appuyant sur un modèle d'effort de coupe statique et trois méthodes de correction différentes. L'étude expérimentale effectuée nous a permis d'étudier les performances de ces méthodes de correction en fonction des paramètres d'usinage : diamètre et longueur d'outil et avance par dent.*

## **ABSTRACT :**

*In this article, we present a system of compensation of trajectories tools permitting to correct the trajectories tools in milling 2 axes and to respect a prescribed tolerance thus. This system is based on a strategy of calculation of tool deflection leaning on a static cut effort model and three different correction methods. The done tentative survey permitted us to study the performances of these correction methods according to the parameters of machining : diameter and length of tool and advance by tooth..*

## **MOTS-CLES**

*Trajectoires d'outils, correction de trajectoires, déflexion, tolérances de forme, courbes de Bézier..*

## **KEYWORDS**

*Tool path, correction of trajectories, deflection, tolerances of shape, curves of Bézier..*



## 1. Introduction

En dépit des performances croissantes de machines outils à commande numérique ainsi que le développement fulgurant des logiciels de FAO/CFAO, certaines dispersions d'usinage persistent encore et provoquent ainsi, un certain nombre d'erreurs susceptibles de ne pas respecter les intervalles de tolérance prescrits et ceci, en dépit des trajectoires d'outils théoriquement programmées (figure I).

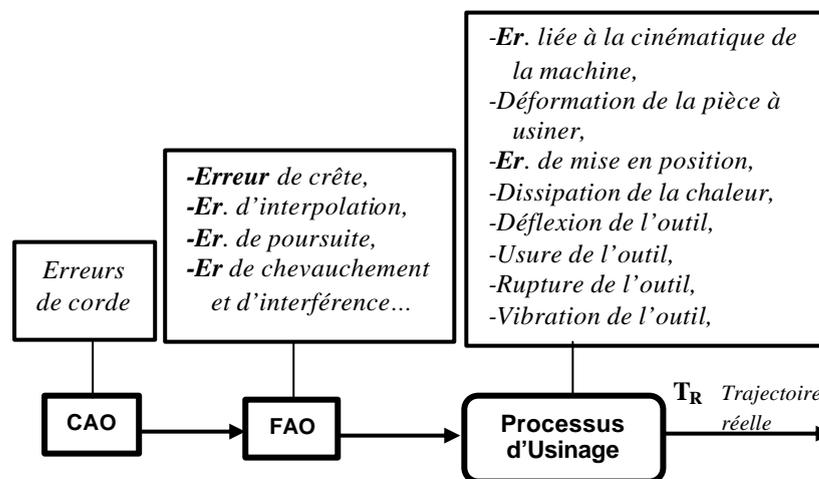


Figure I. Perturbation de la trajectoire.

Parmi toutes les erreurs citées ci-dessus, la déflexion d'outil occupe une place prépondérante, car ses effets sur les trajectoires théoriques d'outils peuvent être considérables et se répercutent aussi bien sur la précision dimensionnelle que sur l'état de surface. La réduction de certaines erreurs inhérentes à la déflexion par un choix optimal des conditions de coupe en amont ou en aval représente une des solutions pratiquées. Néanmoins, pour éviter la réduction des temps de coupe, tout en corrigeant les déformées relatives à l'outil et respecter ainsi les tolérances prescrites, nous proposons un système de correction itérative basé sur les méthodes de compensation que nous développerons dans cet article.

## 2. Système de compensation mise en œuvre

Le système de compensation proposé, basé sur le modèle efforts de coupe statique développé par Kline & De Vor (Kline *et al.*, 1982), sur une méthode de calcul de la déflexion de l'outil utilisant les fondements du calcul de la

## 2 Correction de trajectoire d'outils

résistance des matériaux et enfin, sur trois méthodes de compensation de trajectoires d'outils à savoir la méthode de la correction globale (Suh *et al.*, 1994), la méthode de la correction locale (Suh *et al.*, 1994) et la méthode du miroir (Hascoët *et al.*, 1997). La structure générale de ce système se compose des modules suivants :

- Principe général ;
- Calcul des tolérances de CFAO ;
- Construction du contour de pièce ;
- Construction des trajectoires d'outils par courbe offset ;
- Calcul de la déflexion d'outil ;
- Compensations des erreurs de trajectoires.

### 2.1 Principe général

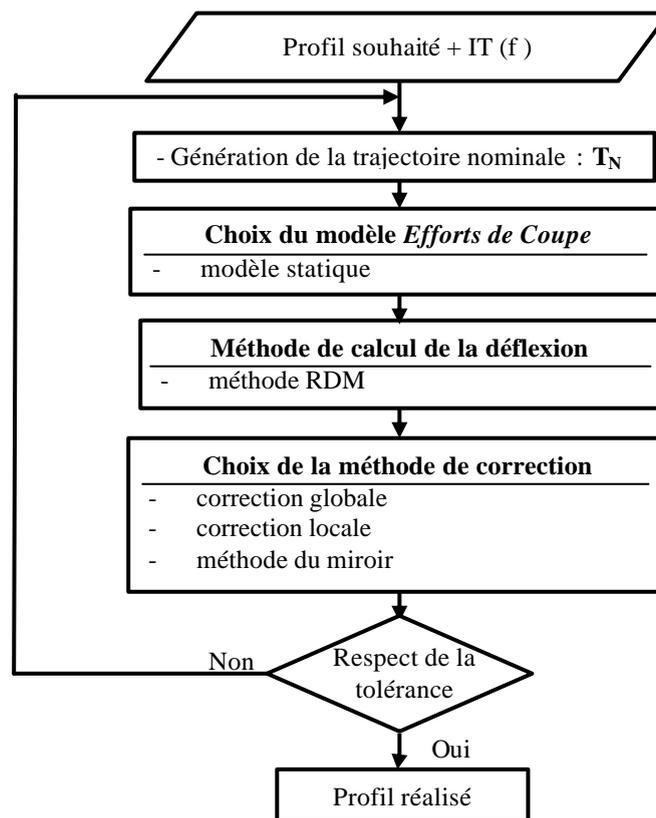


Figure II. Principe général du système proposé

A partir d'un profil souhaité, le principe général du système de compensation se base dans un premier temps, sur la génération de la trajectoire nominale avec respect des tolérances prescrites, ensuite, le processus de compensation se fera à partir du modèle efforts de coupe choisi et qui va permettre de calculer la déflexion de l'outil. Une fois la déflexion définie, elle sera corrigée par l'une des trois méthodes de correction présentées (figure II).

## 2.2 Génération de trajectoire d'outil compensée

Dans la génération de trajectoire d'outil compensée, nous aurons à choisir : un modèle efforts de coupe, une méthode de calcul de la déflexion de l'outil et une méthodologie de correction.

La modélisation des efforts de coupe a fait l'objet de plusieurs recherches que nous citons certains d'entre eux : modélisation basée sur l'épaisseur moyenne du copeau (Altintas *et al.*,1989), modélisation dynamique (Sagherian *et al.*,1990), modélisation énergétique (Hui *et al.*,1994), modélisation statique (Tlusty *et al.*,1975). Dans le système proposé, nous allons utiliser le modèle statique de Kline & De Vor (Kline *et al.*,1982). Le calcul de la déflexion de l'outil se fait par la méthode R.D.M. (résistance des matériaux), on assimile l'outil de coupe (la fraise) à une poutre encastree à une extrémité, la notion de diamètre équivalent (Kops *et al.*,1990) est utilisée dans les calculs pour tenir compte des goujures de la fraise. Les méthodes de correction utilisées : méthodes de correction globale et locale (Suh *et al.*,1994) et méthode du miroir (Hascoët *et al.*,1997) sont basées sur des algorithmes itératives, après avoir vérifier la possibilité de compensation, on choisi une référence de compensation ensuite, on applique une des trois méthodes de correction.

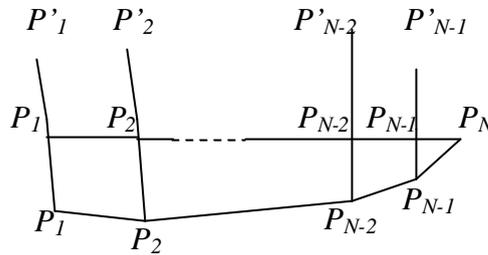
Dans la méthode de correction globale introduite par Suh & Hascoët (Suh *et al.*,1994), les erreurs sont calculées à partir des trois paramètres importants à savoir : l'engagement axial  $E_A$ , l'engagement radial  $E_R$ , et l'avance par dent  $f$ , cette méthode se base sur les étapes suivantes :

- Modifier systématiquement la position de l'outil ;
- Réactualiser les paramètres  $(E_A, E_R, f)$  par rapport à la position modifiée ;
- Estimer les erreurs en fonction des nouveaux paramètres  $(E_A, E_R, f)$  ;
- Comparer entre le profil usiné et le profil souhaité.

#### 4 Correction de trajectoire d'outils

La méthode de correction locale (Suh *et al.*,1994) permet de chercher les points à corriger en considérant localement les influences des points voisins. Cette méthode permet de compenser la trajectoire avec la garantie de convergence par rapport à la correction globale.

$$\text{Test de vérification : } \left| \overline{P_i P_{i+1}} - T_N \right| \leq \mathbf{e}$$



**Figure III.** Méthode de correction locale

La méthode du miroir (Hascoët *et al.*,1997) permet de corriger la trajectoire sans prendre en compte la déflexion tangentielle qui est souvent source de problèmes de divergence compte tenu de sa variation entre valeurs positives et négatives. Cette raison est motivée par le fait que la déflexion tangentielle est faible par rapport à la déflexion normale, de plus, elle est source de divergence comme nous venons de voir, et enfin, l'erreur d'usinage est mathématiquement calculée comme étant la distance suivant la normale entre les profils souhaité et déformé.

### 3. Structure générale du programme élaboré

Nous proposons dans cet article une approche permettant de prendre en considération les avantages des différentes méthodes de correction en tenant compte dans les cas traités, soit de la contrainte tangentielle souvent source de problèmes (méthode du miroir) (Hascoët *et al.*,1997), soit de l'inconvénient que présente la méthode de la correction globale à savoir l'indétermination (Mir *et al.*,2001).

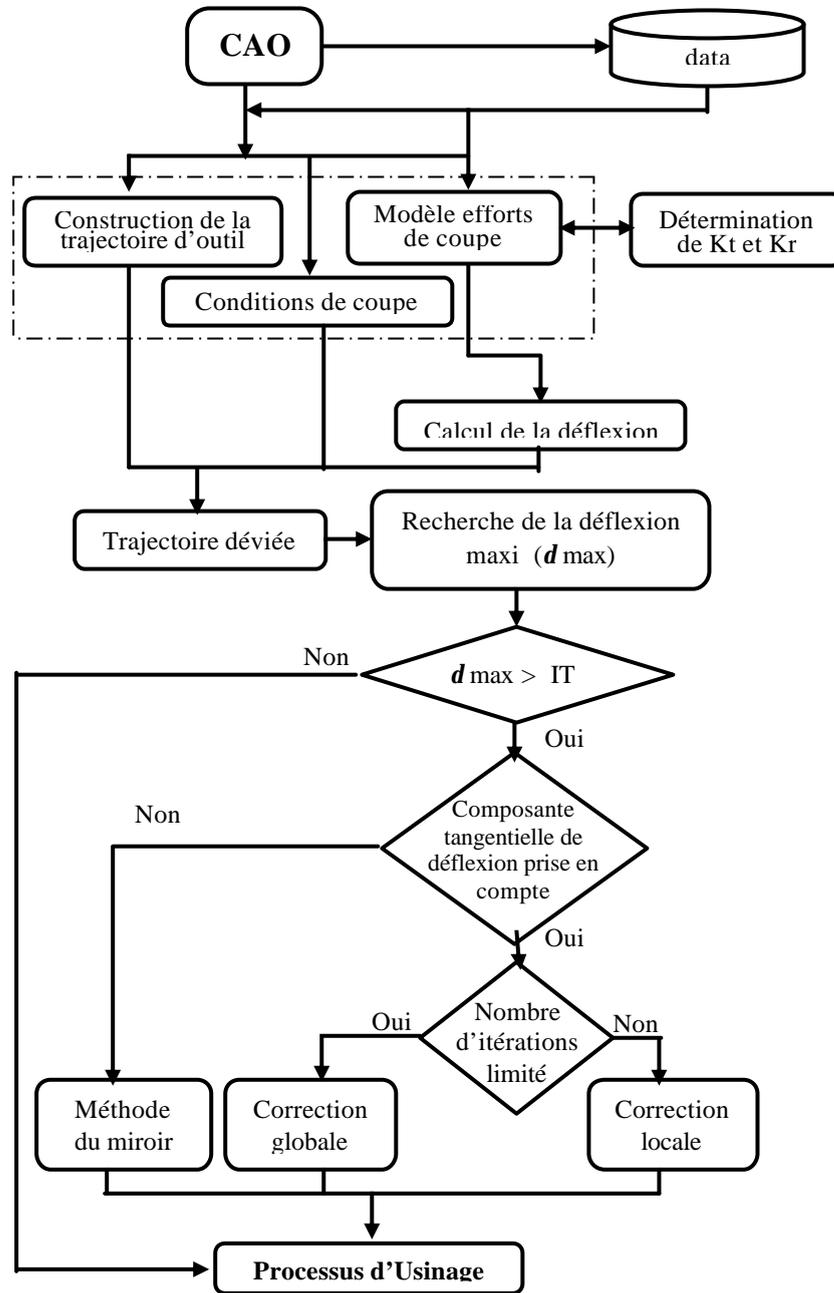


Figure IV. Structure générale du programme élaboré

#### 4. Conditions et plan de simulation

En vue de caractériser l'efficacité des méthodes de correction, nous faisons une étude simulée de l'influence des paramètres d'usinage (diamètre d'outil et avance par dent) pour cela, et comme hypothèses de départ, nous définissons les conditions de coupe suivantes, ensuite, nous appliquons le programme de calcul et de compensation de trajectoires d'outil. En faisant varier ces conditions de coupe, nous tirons les conséquences de l'application des trois méthodes de correction ainsi que l'influence des paramètres de coupe sur le respect de la tolérance prescrite.

Les conditions de coupe seront définies de la manière suivante :

- Fraises cylindriques 2 tailles,  $\varnothing$  6 & 20 mm
- Vitesse de coupe  $V_R$  : 1250 t/mn
- Avance par dent  $f$  : 0.02 mm/dent
- Engagement radial  $E_R$  : 3 mm
- Engagement axial  $E_A$  : 1 mm
- Sens d'usinage : usinage en concordance
- Matière à usiner : XC 38 F, (0.38 % de carbone) pouvant subir des traitements thermiques.

Dans le premier cas, nous considérons la méthode de correction globale, basée sur la prise en compte de la déflexion tangentielle (avec tous les risques de divergences que peut causer la variation du signe de cette déflexion), nous comparons dans le graphe qui suit l'erreur maxi et l'erreur finale pour deux diamètres d'outils différents 6 et 20 mm. Nous remarquons que pour une variation constante de l'avance par dent allant de 0.005 mm jusqu'à 0.02 mm, et un diamètre d'outil de 6 mm, l'erreur maximale démarre de 1.2 mm jusqu'à 2.4 mm dans une progression constante et celle-ci est due à l'augmentation de l'avance par dent, plus cette dernière est importante plus l'erreur maximale est importante, par contre l'erreur finale a tendance à n'être variable que dans une fourche assez faible comprise entre 0.001 et 0.005 mm et ceci est du aux résultats de la méthode de correction qui tend à respecter un intervalle de tolérance bien défini (figure V).

Par contre, pour un diamètre d'outil de 20 mm, et une progression identique au cas précédent, nous remarquons une variation croissante de l'erreur finale allant de 0.28 jusqu'à 0.5 mm. Il va sans dire que cette déflexion est moins importante que la précédente, et ceci est du au diamètre important de l'outil (20 mm). En appliquant la méthode de correction, nous remarquons une atténuation importante de l'erreur due à la déflexion de l'outil (figure VI).

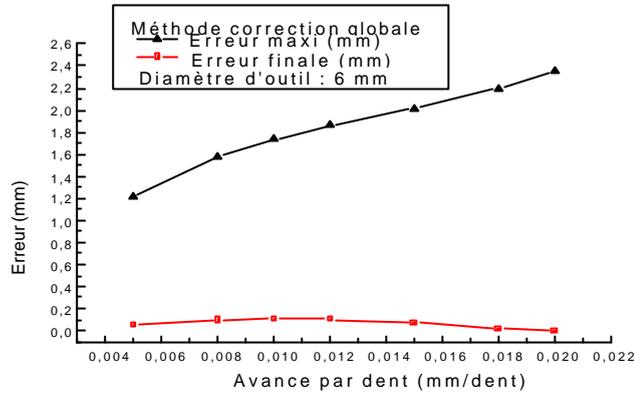


Figure V.  $E_{maximale} / E_{finale}$  pour un diamètre d'outil : 6 mm

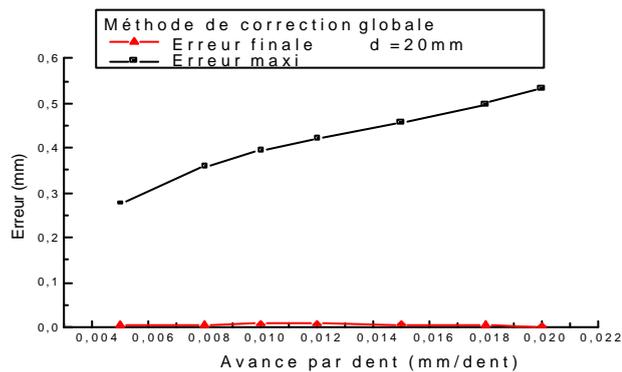
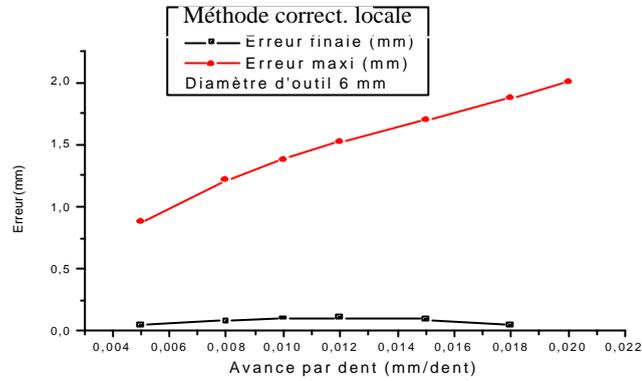


Figure VI.  $E_{maximale} / E_{finale}$  pour un diamètre d'outil : 20 mm

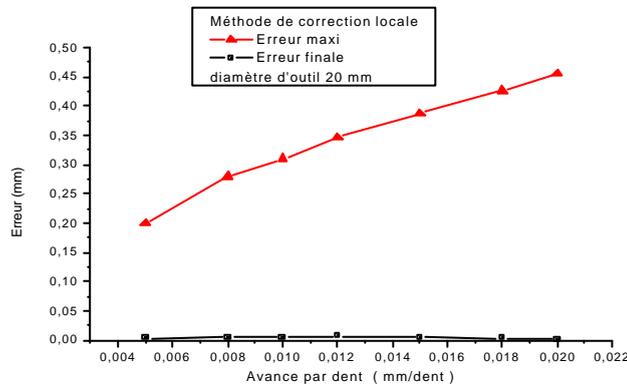
La méthode de correction locale ressemble à celle du miroir avec la particularité de considérer un point à l'extérieur de la trajectoire nominale et de commencer ainsi, la correction de la trajectoire à partir du dernier point jusqu'au premier point. Les résultats obtenus sont très proches de ceux obtenus par la méthode du miroir (pour les mêmes conditions), la figure VII montre l'allure des erreurs maximale et finale pour une variation de la vitesse d'avance allant de 0.005 mm/dent jusqu'à 0.02 mm/dent et pour un diamètre d'outil de 6 mm.

## 8 Correction de trajectoire d'outils



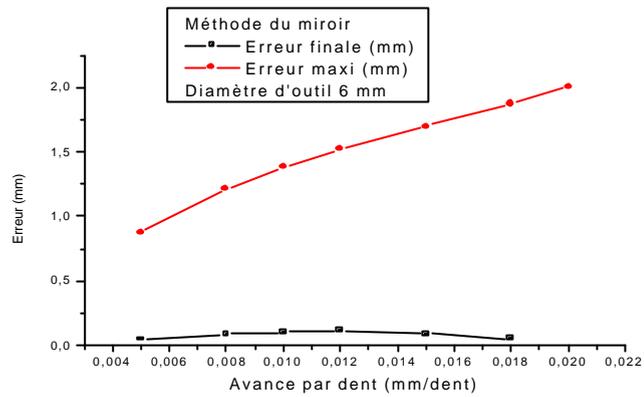
**Figure VII.** Courbes d'erreur maximale et finale ( diam.outil 6 mm)

Dans la figure qui suit, et en changeant uniquement le diamètre de l'outil de coupe (20 mm ), la variation de l'erreur maximale passe d'une valeur de 0.20 mm progressivement jusqu'à une valeur de 0.45 mm pour une avance de 0.02 mm/dent (figure VIII ).



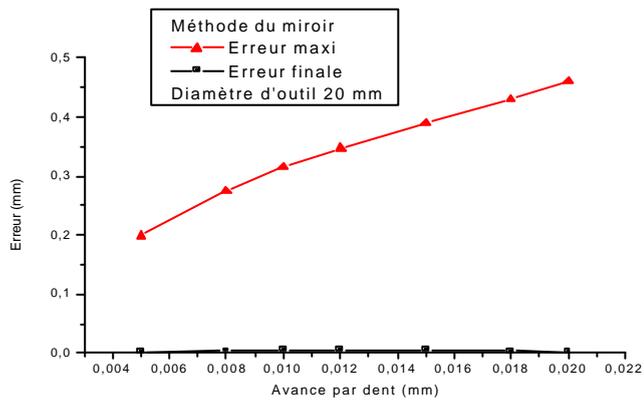
**Figure VIII.** Courbes d'erreur maximale et finale ( diam. outil 20 mm)

Les résultats obtenus par la méthode de correction dite « du miroir » pour des conditions de coupe bien définies, montrent une variation croissante et constante de l'évolution de l'erreur maximale en fonction de l'avance par dent. En effet, pour un diamètre de 6 mm et une avance par dent de 0.005, nous avons une erreur maximale de 0.6 mm, jusqu'à atteindre une valeur de 2mm pour une avance de 0.02 mm/dent. En ce qui concerne l'erreur finale, sa variation est assez faible en fonction de l'avance par dent ( figure IX).



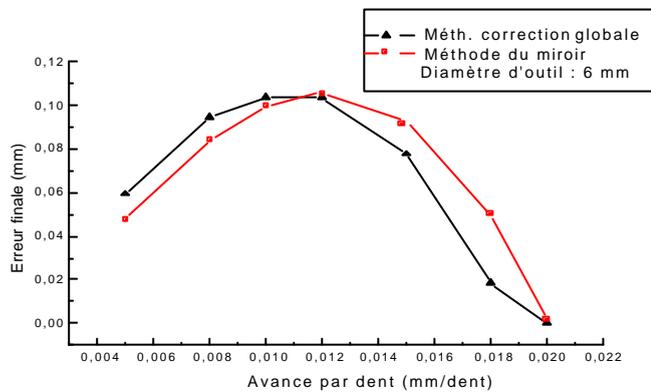
**Figure IX.** Courbes d'erreur maximale et finale ( diam. outil 6 mm)

Pour un diamètre d'outil de 20 mm la déflexion devient plus faible car l'outil résiste mieux aux contraintes de coupe. L'erreur maximale commence à partir de 0.18 mm pour une avance de 0.005 mm/dent jusqu'à 0.44 mm pour une avance de 0.02mm/dent, l'erreur finale montre les performances de la méthode de correction utilisée ( figure X).



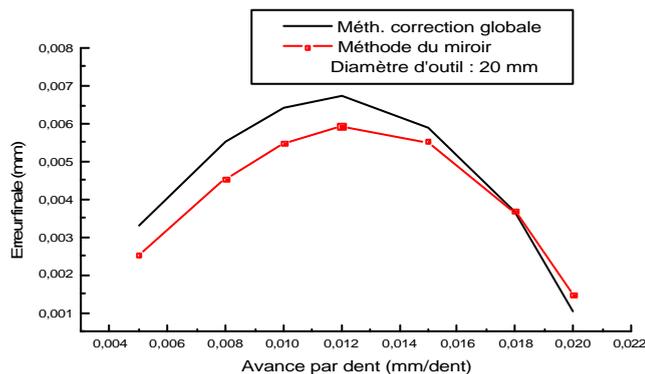
**Figure X.** Courbes d'erreur maximale et finale ( diam. outil 20 mm)

En ce qui concerne la comparaison des résultats entre les différentes méthodes de correction, Dans ce cas, nous remarquons que la variation de l'erreur finale en fonction de l'avance par dent est distincte que ce soit par rapport aux diamètres de l'outil (6, 20 mm), ou bien à la méthode de correction utilisée. En effet, pour une avance par dent comprise entre 0.005 et 0.012 mm et pour un diamètre d'outil de 6 mm, l'erreur finale obtenue par la méthode du miroir est meilleur que celle obtenue par la méthode de correction globale. A partir d'une avance par dent de 0.012 jusqu'à 0.02 mm, et pour le même diamètre d'outil, nous remarquons l'effet inverse: la méthode de correction globale donne de meilleurs résultats.



**Fig XI.** Etude comparative entre différentes méthodes de correction

Pour un diamètre d'outil de 20 mm et pour une avance par dent allant de 0.005 à 0.02mm/dent, nous remarquons que la méthode du miroir est meilleure dans toute cette zone.



**Fig XII.** Etude comparative entre différentes méthodes de correction

- Altintas Y. et I. Yellowley. In-Process detection of tool failure in milling using cutting force models. *Transaction of the ASME, journal of engineering for industry*, Vol. 111 pp. 149-157, 1989
- Hascoët J.Y., T.I. Seo et Ph. Dépincé. Compensation des déformations d'outils pour la génération de trajectoire d'usinage. *Proceedings of 16<sup>th</sup> Canadian Congress of Applied Mechanics Québec in Canada*, pp.569-570, juin 1997.
- Hui Li, G.W. Vickers et Z. Dong. Improvement of Milling Process Model for optimal rough machining of sculptured parts. *Proceedings of Pacific Conf. of manufact. Jakarta* pp.61-68 dec. 1994
- Kline W.A, DeVor et I.A. Shareef. The prediction of surface accuracy in end milling, *ASME Headquarters March 16, 1982* paper n° 82 Prod-10.
- Kops et D.T. Vo, Determination of the Equivalent Diameter of an End Milling Based on its compliance. *Annals of the CIRP*, Vol.39. n°1, pp. 93-96, 1990.
- Mir A. et I. Belaidi, Contribution à l'élaboration d'un système de correction de trajectoires d'outils en usinage deux axes. *Thèse de magister Université de Boumerdes – Algérie – Avril 2001*.
- Sagherian R. et M.A. Elbestawi. A Simulation System for Improving Machining Accuracy in end milling. *Computer in Industry*, Vol.14, pp. 293-305, 1990
- Suh S.H., J.H. Cho et J.Y. Hascoët. Incorporation of tool deflection in tool path computation. *International Journal of Manufacturing System*, Vol.15. n°3, 1994.
- Tlustý J. et P. McNeil. Dynamics of Cutting Forces End Milling. *Annals of the CIRP*, Vol. 24, n°1 pp. 21-25, 1975.