UNIVERSITE DE LIEGE
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES
LABORATOIRE DE METHODES DE FABRICATION

PRISE EN COMPTE DE L'ENLEVEMENT DE MATIERE DANS LE CALCUL DES RAIDEURS

P. BECKERS
J.F. DEBONGNIE
B. DELTOUR
L. MASSET

Rapport LMF/R3 - 1995

Rapport 3

Prise en compte de l'enlèvement de matière dans le calcul des raideurs

1. Introduction

Lors de l'usinage, la raideur d'une pièce diminue à mesure que la matière est enlevée. Pour déterminer le défaut engendré, il faudrait prendre en compte un maillage *évolutif*, ce qui nécessiterait un remaillage constant de la pièce. Dans le cadre de cette étude, le modèle choisi pour calculer les défauts est celui de la pièce finie.

Le fait de considérer le maillage correspondant à la pièce finie offre deux avantages. Tout d'abord, ce modèle est plus souple et donc les défauts calculés sont plus importants, ce qui conduit à une plus grande sécurité. Enfin, d'un point de vue purement pratique, on dispose beaucoup plus souvent du modèle de la pièce finie que de celui de la pièce brute.

Pour un usinage donné, si l'enlèvement de matière modifie sensiblement la raideur de la pièce, le défaut calculé peut être très différent du défaut réel. Nous parlons dans ce cas d'*usinage lourd*. Si par contre la raideur de la pièce est peu sensible à l'enlèvement de matière, l'erreur commise est faible et l'usinage peut être qualifié de *léger*.

La résolution de cas d'usinages lourds n'est pas envisagée dans le cadre de ce projet. Il reste à définir le moment à partir duquel un usinage devient lourd. Il semble raisonnable de penser que, lorsque le défaut calculé diffère de plus de 10% du défaut réel, l'usinage peut être qualifié de lourd [Debongnie]. En effet, *en métrologie courante, on exige des calibres divers qu'ils aient une précision dix fois meilleure que le défaut à mesurer.* Cette *limite* entre usinage lourd et usinage léger est quelque peu arbitraire mais, à défaut d'autre valeur, elle permet de fixer les idées. Elle pourra être modifiée par la suite au vu de la confrontation des résultats numériques aux résultats expérimentaux.

Le but du présent rapport est de définir une méthode aussi simple que possible pour permettre de décider si un usinage est lourd ou léger.

2. Méthode proposée

2.1. Principe

La méthode proposée est similaire à celle utilisée en optimisation pour l'analyse de sensibilité. Elle consiste à déterminer l'influence de l'enlèvement de matière sur la raideur de la pièce et par conséquent, sur le défaut calculé.

On donne à la pièce une augmentation d'épaisseur arbitraire Δe dans la direction perpendiculaire à la surface usinée. Cette augmentation d'épaisseur se traduit sur le maillage par une modification des coordonnées des noeuds de la surface usinée. Il n'est donc pas nécessaire d'effectuer un remaillage de la pièce. La valeur de Δe est choisie en fonction de la profondeur de passe a_a de l'usinage, soit

$$\Delta e = r a_a \qquad \text{avec } r \ll 1$$

Si la profondeur de passe n'est pas uniforme sur la surface usinée, on utilise la profondeur de passe moyenne pour calculer la surépaisseur. La valeur de Δe doit être suffisamment grande afin d'éviter d'éventuels problèmes numériques tout en restant relativement petite par rapport à l'épaisseur des mailles. Le choix des valeurs admissibles de r doit être opéré en effectuant quelques essais sur des cas-tests.

Les différentes étapes de la méthode sont les suivantes :

·1· On calcule le défaut d_i en chaque noeud de la surface usinée par la procédure classique de calcul du défaut.

·2· On procède de même pour le maillage *perturbé* et on obtient un défaut d_i^*. Les cas de charges à appliquer sont identiques aux cas de charge déterminés en 1. Seule la géométrie du maillage change.

·3· On en déduit les défauts $\overline{d_i}$ correspondant aux défauts calculés avec un maillage de la pièce avant usinage par extrapolation à partir de d_i et de d_i^*. C'est-à-dire qu'on calcule $\overline{d_i}$ linéairement selon la formule

$$\frac{d_i - \overline{d_i}}{a_a} = \frac{d_i - d_i^*}{\Delta e}$$

Choix d'un critère de distinction usinage lourd / léger

Parmi les d_i, on repère la valeur maximum $d_{\max}$ et la valeur minimum $d_{\min}$. On adopte alors la norme

$$D = d_{\max} - d_{\min}$$

qui correspond assez bien à la mesure du défaut. De même, le défaut de forme $\bar{d}$ a pour norme la grandeur

$$\bar{D} = \bar{d}_{\max} - \bar{d}_{\min}$$

On pourrait imaginer d'adopter la mesure de l'erreur

$$\left| \frac{D - \bar{D}}{\bar{D}} \right|$$

Cependant, avec cette mesure, deux formes de défaut très différents, mais de mêmes normes, sont réputés équivalents, ce qui est difficilement admissible. En effet, il importe également de savoir *où* le défaut est grand.

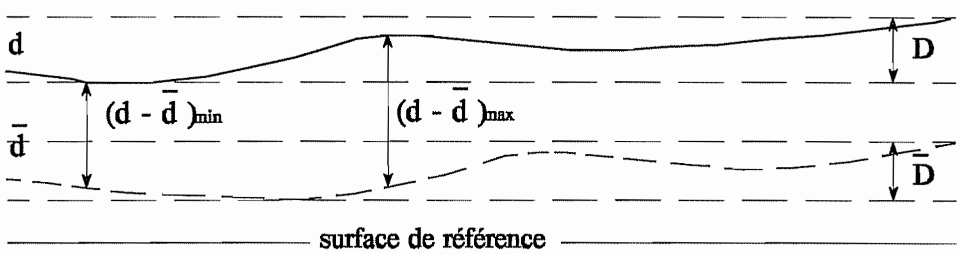

***Figure 1** : Défauts calculé et extrapolé*

Il convient donc, à notre sens, d'utiliser une mesure de la différence des deux formes de défauts qui soit une norme. Nous proposons donc

$$D_- = (d - \bar{d})_{\max} - (d - \bar{d})_{\min}$$

comme mesure de la différence, à comparer à D ou $\bar{D}$. Il en résulte un des deux critères suivants.

Un usinage est réputé lourd lorsque la différence des deux formes de défauts est supérieure de plus de 10% à la norme du défaut calculé, soit

$$\frac{D_-}{D} \leq 0.1$$

2.2. Validité de la méthode

Le point le plus critique de cette méthode est l'extrapolation linéaire des défauts $\bar{d}_i$ à partir de d_i et de d_i^*. En effet, il est clair qu'en général, le défaut ne varie pas linéairement en fonction de la surépaisseur de la pièce. Prenons l'exemple d'une plaque. La raideur est de la forme $C\,t^3$ où t est l'épaisseur de la plaque. Le déplacement ou, ce qui revient au même, le défaut est proportionnel à l'inverse de la raideur et varie comme t^{-3}.

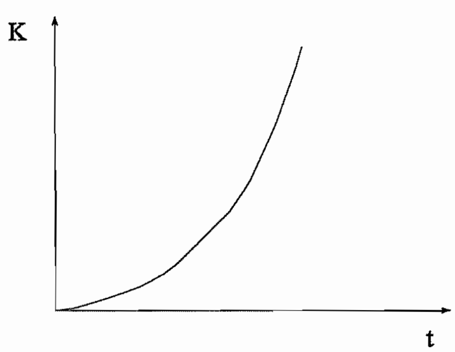

***Figure 2** : Raideur en fonction de l'épaisseur*

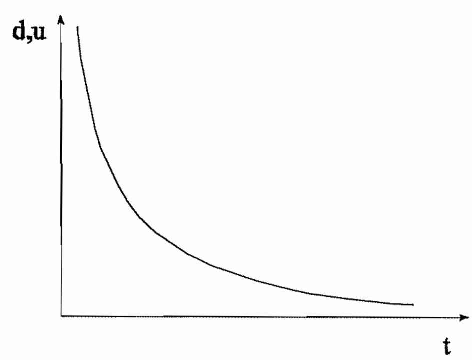

***Figure 3** : Défaut en fonction de l'épaisseur*

Pour une pièce de forme quelconque, le défaut est en général proportionnel à une puissance négative de l'épaisseur. La courbe représentant le défaut en fonction de l'épaisseur est convexe et toute tangente à un point de la courbe est entièrement en-dessous de celle-ci. En d'autres termes, l'extrapolation réalisée pour calculer $\bar{d}$ exagère la sensibilité du défaut à la variation d'épaisseur, et ce d'autant plus que le comportement de la pièce est fortement non-linéaire.

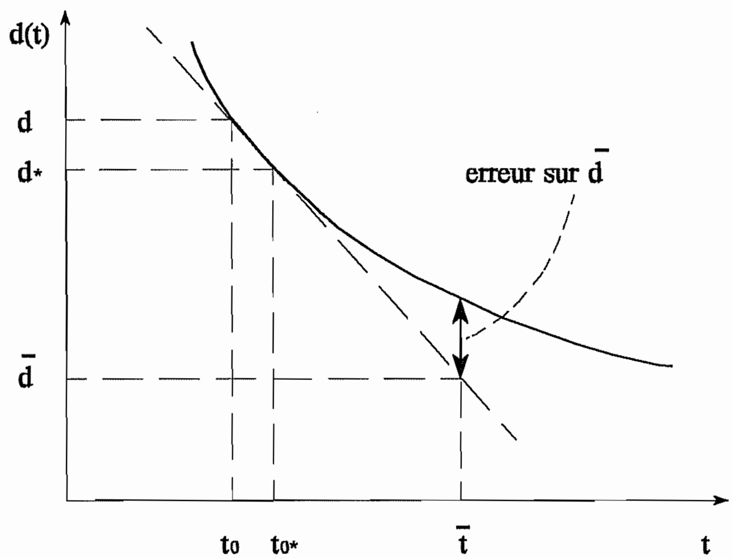

***Figure 4** : extrapolation linéaire du défaut*

3. Chariotage d'un barreau

3.1. Présentation du problème

Le problème étudié est celui du chariotage de l'éprouvette cylindrique. Les résultats obtenus par la méthode éléments finis sont comparés à ceux obtenus par la méthode analytique. Celle-ci tient compte de l'évolution de la raideur de la pièce au cours de l'usinage pour calculer le défaut. Il sera donc possible de vérifier que la méthode proposée pour déterminer si un usinage est lourd donne un résultat assez proche de la réalité.

Les dimensions de l'éprouvette sont données sur la figure 5. Le matériau utilisé est de l'acier dont les caractéristiques sont :

$$\begin{cases} E = 210000 \ N/mm^2 \\ \nu = 0.3 \end{cases}$$

La trajectoire de l'outil est rectiligne et va de $z = 360 \ mm$ à $z = 80 \ mm$ à un rayon de 13 mm. La profondeur de passe vaut 3 mm. Le bridage est mixte (serrage à trois mors et contre-pointe). Les forces appliquées sont constantes et valent

$$\begin{cases} F_f = -945.7 \ N \\ F_c = 3168 \ N \\ F_p = 615 \ N \end{cases}$$

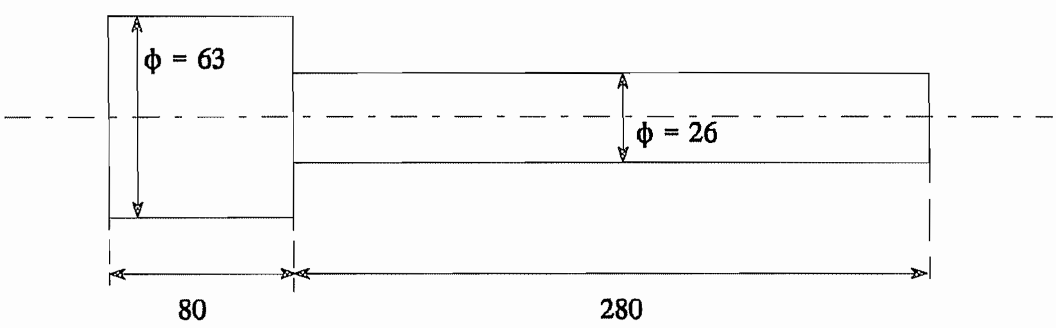

Figure 5 *: Eprouvette cylindrique*

3.2. Prévision analytique du défaut

Les résultats de ce chapitre sont déterminés en se basant sur le rapport fourni en annexe (*Prévision analytique des défauts d'usinage en chariotage*, J.-F. Debongnie, Nov. 94). Nous calculons le défaut dans trois cas :

· en tenant en compte la variation de raideur,
· en considérant que la raideur est celle de la pièce finie,
· en considérant que la raideur est celle de la pièce brute.

Pour simplifier les calculs, on suppose que la partie épaisse de l'éprouvette cylindrique ne se déforme pas. La force équivalente et le coefficient de direction de la charge valent

$$\begin{cases} F_{éq} = 632.37\ N \\ \gamma = 0.23274 \end{cases}$$

Pièce évolutive

Le rapport β entre les diamètres avant et après usinage vaut 0.8125. Le valeur du défaut normalisé Δ est tirée de l'abaque correspondant au montage mixte (fig.9 rapport en annexe). Pour $\gamma = 0.23274$ et $\beta = 0.8125$, Δ vaut 1.38. Par la formule (55), le défaut vaut finalement

$$D_{évol} = 17.39\ \mu m$$

Pièce finie

Le diamètre est de 26 mm. Si on ne tient pas compte de l'enlèvement de matière, β vaut 1. Pour un même γ, on trouve grâce au même abaque un défaut normalisé égal à 0.99. Le défaut vaut alors

$$D_{finie} = 28.627\ \mu m$$

Pièce brute

Le diamètre est de 32 mm et le défaut est égal à

$$D_{brute} = 12.476\ \mu m$$

Allure du défaut

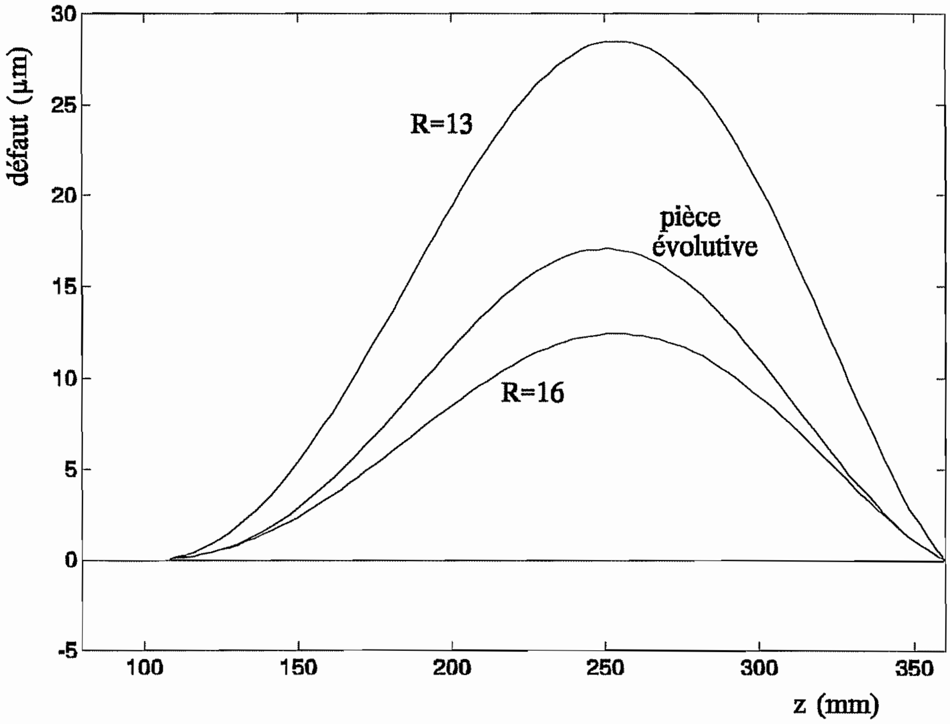

***Figure 6** : Allure du défaut calculé analytiquement*

3.3. Méthode numérique

Le calcul du défaut a été effectué dans trois cas différents pour des rayons valant respectivement 13, 13.3 et 16 mm. Ces rayons correspondent au maillage de la pièce finie, au maillage perturbé de la pièce finie et au maillage de la pièce brute. Dans les trois cas, le défaut en chaque noeud est calculé. Si on néglige l'effet de trilobe qui, du reste, est très peu marqué, le défaut est axisymétrique et on peut le porter sur un graphique en fonction de z (figure 7).

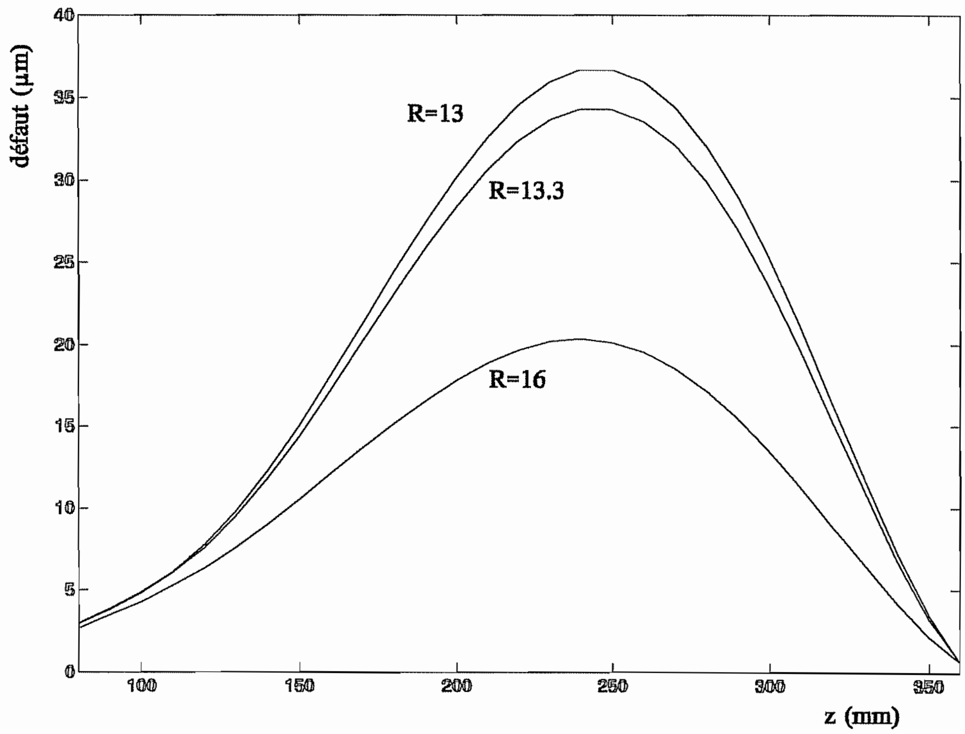

***Figure** 7 : Allures des défauts calculés par EF*

En appliquant la méthode proposée, le défaut correspondant à R=16 mm est extrapolé à partir des défauts calculés pour R=13 et R=13.3 mm. Sur la figure 8, on visualiser l'erreur commise sur le défaut en extrapolant. La norme du défaut, c'est-à-dire la différence entre les valeurs maximum et minimum, vaut dans les différents cas :

· norme du défaut calculé pour R=13 : 36.09 µm
· norme du défaut extrapolé pour R=16 : 12.37 µm
· norme du défaut calculé pour R=16 : 19.69 µm

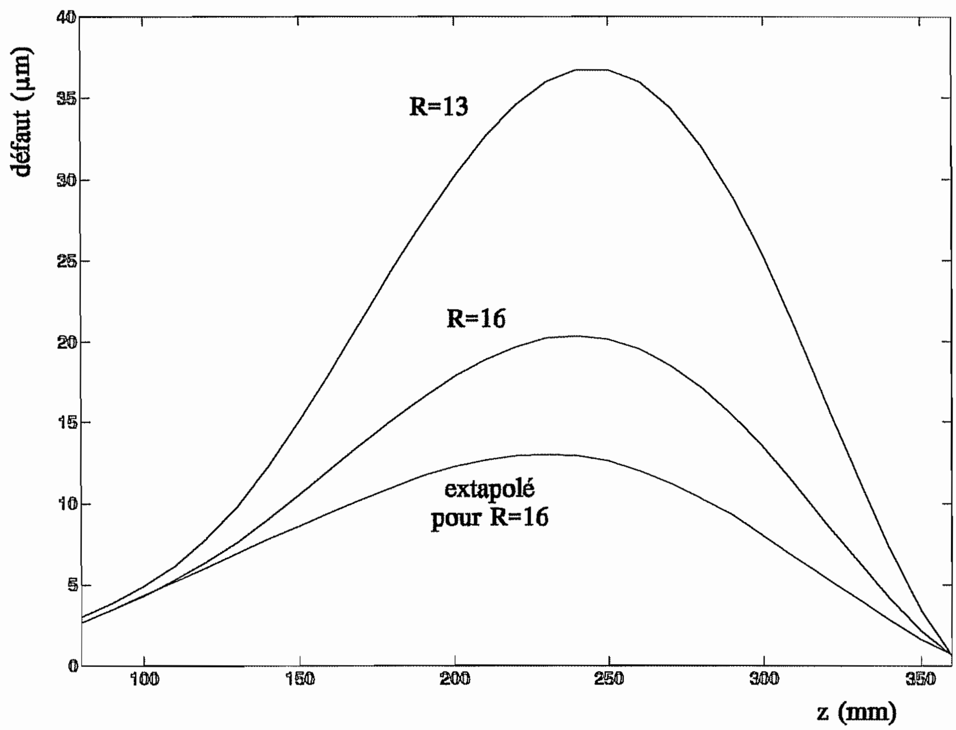

Figure 8 *: Extrapolation du défaut en R=16 mm*

3.4. Comparaison des résultats

Défauts calculés

Tout d'abord, comparons les résultats obtenus par la méthode EF et ceux obtenus analytiquement dans le cas de la pièce finie (R=13mm) et dans celui de la pièce brute (R=16mm). Les défauts valent :

Pour R=13 mm, D^{an} = 28.63 μm et D^{ef} = 36.09 μm
Pour R=16 mm, D^{an} = 12.48 μm et D^{ef} = 19.69 μm

Les différences relatives sont respectivement de 26 et 58 %. Cela provient du fait que, dans le calcul analytique, on ne tient pas compte de la déformation de la partie épaisse de la pièce. Or, elle se déforme comme on peut le voir sur la figure 6 et ce d'autant plus en valeur relative que la partie usinée est épaisse. De plus, on fait également l'hypothèse que l'extrémité du barreau est encastrée ce qui tend aussi à donner une solution analytique plus petite que la solution EF (fixation en trois points).

Critère de distinction usinage lourd/léger

Vu l'importance de la matière enlevée et la flexibilité de la pièce, cet usinage est à coup sûr un usinage lourd. Il reste à calculer l'erreur commise sur le défaut en négligeant l'enlèvement de matière. Tout d'abord, avec les solutions analytiques, l'erreur sur le défaut vaut

$$\frac{D_{finie} - D_{evol}}{D_{finie}} = 39.25\ \%$$

Si on utilise la méthode proposée, l'estimation de l'erreur sur le défaut vaut

$$\frac{D_{finie} - D_{extr}}{D_{finie}} = 66.96\ \%$$

4. Conclusions

Initialement, le critère de distinction usinage lourd/léger consistait à dire qu'un usinage était lourd lorsque la différence entre le défaut calculé et le défaut réel excédait 10%. Comme le défaut réel n'est pas connu, le critère devient alors le suivant :

Si la différence entre le défaut calculé sur la pièce finie et une approximation du défaut sur la pièce brute est supérieure à 10%, l'usinage est réputé lourd.

L'approximation du défaut sur la pièce brute est déterminé en calculant la sensibilité du défaut à une augmentation d'épaisseur du maillage. De cette manière, on se place toujours en sécurité puisque on exagère la *lourdeur* du maillage. En effet, on aura toujours

$$\textit{déf. calc.}^{\text{pièce finie}} > \textit{déf. calc.}^{\text{pièce évolutive}} > \textit{déf. calc.}^{\text{pièce brute}} > \textit{déf. appr.}^{\text{pièce brute}}$$

La méthode proposée est très simple à mettre en oeuvre. Elle ne demande que le calcul du défaut sur le maillage initial (pièce finie) et sur le maillage perturbé (augmentation d'épaisseur Δe). Elle donne comme résultat un nombre qui indique la lourdeur de l'usinage.

Il reste à vérifier, sur quelques cas-tests, si la limite des 10% est acceptable ou non.

Table des matières