



## Réglage ultra-précis des usinages

Eric Pairel, Maurice Pillet, Ephraïm Goldschmidt, Stéphane Tichadou

### ► To cite this version:

Eric Pairel, Maurice Pillet, Ephraïm Goldschmidt, Stéphane Tichadou. Réglage ultra-précis des usinages. 9ème assises Machine et Usinage à Grande Vitesse (MUGV2016), Jun 2016, Tours, France. <hal-01417264>

**HAL Id: hal-01417264**

**<https://hal.science/hal-01417264v1>**

Submitted on 15 Dec 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



## Réglage ultra-précis des usinages

**Eric PAIREL<sup>(a)</sup>, Maurice PILLET<sup>(a)</sup>,  
Ephraïm GOLDSCHMIDT<sup>(b)</sup>, Stéphane TICHADOU<sup>(a)</sup>**

*(a) Université Savoie Mont Blanc, SYMME, F-74000 Annecy, France. Mail : [eric.pairel@univ-smb.fr](mailto:eric.pairel@univ-smb.fr)*

*(b) Cetim-ctdec, 750 Avenue de Colomby, 74300 Cluses, France. Mail : [e.goldschmidt@cetim-ctdec.com](mailto:e.goldschmidt@cetim-ctdec.com)*

**Résumé :** La qualité géométrique des produits dépend essentiellement de la qualité du réglage des machines-outils. Ce réglage est aujourd'hui effectué des régleurs et on constate une proportion encore importante de pièces rebutées malgré la très grande précision des machines-outils actuelles. Le laboratoire SYMME a proposé une méthode générale de réglage des outils et des repères en usinage. Son principe est de mesurer l'écart entre les points usinés et les points en position idéale. Nous étudions ici l'origine de ces écarts et montrons comment ils peuvent être réduits en tournage. Une simulation numérique montre l'importance en particulier de la jauge du rayon de bec permettant d'atteindre un réglage ultra-précis.

**Mots clés :** Usinage ; Réglage ; Ajustement ; Jauge-outil ; Qualité géométrique

### 1 Introduction

Alors que les déplacements relatifs des outils de coupe par rapport aux pièces sont ultra-précis sur les machines-outils actuelles, les utilisateurs de ces machines fabriquent encore des pièces qui ont des écarts géométriques bien plus grands et même trop grands au regard des tolérances.

La raison est qu'aujourd'hui encore, les ingénieurs laissent aux opérateurs et aux régleurs le soin de régler les jauges outils et les prises de référence à partir de cotes mesurées sur la pièce ou entre la pièce et la machine. La conséquence est que les pièces sont loin d'avoir la précision des machines et que beaucoup doivent encore être rebutées malgré la haute-précision des nouvelles machines-outils à commande numérique (MOCN).

Pourtant, à la fois on pourrait disposer d'une information sur la géométrie de la pièce beaucoup plus riche que celles fournies par des cotes et en plus nous avons maintenant, dans les ateliers, des ordinateurs pour faire tout type de calcul. C'est donc juste par manque de méthode que l'on n'est pas capable de régler au mieux les MOCN initialement puis régulièrement pour compenser les dérives dues aux dilatations et surtout à l'usure des outils et dont au recul de leurs arrête coupante.

L'objectif de cette publication est de présenter une méthode ultra-précise de réglage des MOCN fondée sur les travaux de Pillet *et al.* (2009).

Malgré l'enjeu industriel important de ce sujet, comme on vient de le voir, la recherche scientifique sur le sujet est quasi inexistante. Une recherche bibliographique sur les expressions «réglage d'usinage, de tournage ou de fraisage», en français et en anglais, fait ressortir une quinzaine d'articles scientifiques. Sans tous les citer, nous pouvons les classer en trois groupes :

Les articles du premier groupe sont des propositions pour réduire les éventuels écarts géométriques sans que ces derniers ne soient ni définis ni mesurés.

Ainsi Yang & Sim (1993) proposent un modèle permettant d'ajuster la vitesse d'avance d'une fraise-boule pour limiter sa flexion et ainsi réduire l'écart entre la surface usinée et la surface idéale.

Les articles du second groupe définissent les écarts géométriques à mesurer mais pas les paramètres à ajuster sur le procédé.

Ainsi, Martin *et al.* (2004) proposent d'ajuster par calcul un modèle géométrique tridimensionnel de la pièce à fabriquer aux points palpés sur la pièce fabriquée. Ce modèle est composé de cylindres de révolution et de plans dont les distances entre-eux sont rendus variables de manière à mesurer leurs écarts de distances et/ou d'orientation. Ainsi, selon les auteurs, il est possible de régler la machine-outil. Cependant ils n'indiquent pas quels paramètres de la machine ou du programme de la commande numérique il faut modifier.

Une approche similaire est proposée par Goldschmidt *et al.* (2007) cependant plus générale puisque l'ensemble des écarts géométriques de position est considéré pour chaque tolérance géométrique. Néanmoins comme la proposition précédente les paramètres effectivement modifiés sur le procédé ne sont pas précisés.

Enfin les articles du dernier groupe, dont fait partie le présent article, définissent les écarts géométriques à mesurer, les paramètres du procédé et une méthode pour les ajuster.

Ainsi, Pairel *et al.* (2004) caractérisent la déformée d'une plaque emboutie par un ensemble de cotes linéaires et angulaires. Ils paramètrent le procédé d'emboutissage et calculent l'incidence de ces paramètres sur les cotes grâce à un plan d'expériences réalisé sur une simulation numérique par éléments finis. Pour chaque cote ils obtiennent ainsi une équation fonction des paramètres du procédé et ils cherchent ensuite plusieurs solutions de réglage pour que la somme des carrés des écarts résiduels sur les cotes soit minimale.

Pairel *et al.* (2011) ont montré qu'il était possible de créer automatiquement une matrice reliant les cotes de pièces de tournage aux jauges des divers outils utilisés. L'inversion de cette matrice permet alors d'annuler, aux dispersions aléatoires près, les écarts des cotes par rapport à leurs valeurs idéales.

Enfin Pillet *et al.* (2009) expliquent qu'il est souvent possible de relier les paramètres d'ajustement d'un procédé aux caractéristiques de ses produits, soit par «calcul», soit par «expérimentation». Ils montrent, pour la première fois, comment relier les écarts, mesurés en différents points, entre la surface usinée et sa situation idéale, aux paramètres d'ajustement de celle-ci. Grâce à la méthode des petits déplacements [], ils obtiennent ainsi un modèle direct linéaire exprimé sous forme matricielle. La pseudo-inversion de ce modèle permet de calculer l'ajustement de la position du repère-programme et des jauges-outils de l'exemple de fraisage présenté.

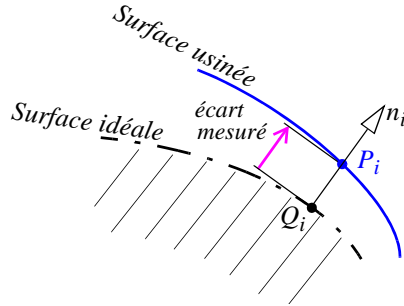
Cette technique est réutilisée par Abdelhakim *et al.* (2012) sur un exemple de pièce de tournage. Les paramètres sont alors seulement les jauges en X et en Z des outils de tournage réalisant les diverses surfaces d'une pièce de tournage expérimentale. Les jauges de rayon de bec des outils ne sont pas considérées alors qu'elles sont tout aussi influentes que les autres, comme nous le montrerons. Des points sont mesurés sur quatre génératrices de la pièce. Enfin, dans Abdelhakim *et al.* (2012), comme dans Pillet *et al.* (2009), il n'y a qu'un seul repère commun aux paramètres de position du repère-programme et aux jauges-outils alors que leurs repères peuvent différer.

Nous proposons donc, dans ce nouvel article qui prolonge ceux-là, une généralisation du calcul de l'influence des paramètres de position des repères-programme et des jauges-outils sur les écarts de points mesurés à la surface de la pièce. Après un rappel détaillé du principe du réglage des outils par mesurage des points usinés (section 2), nous étudierons l'influence des repères en commande numérique (section 3) puis celle des jauges-outils en tournage (section 4) et nous terminerons sur une simulation montrant notamment l'importance de la jauge du rayon de bec.

## 2 Principe du réglage par mesure de points

Nous rappelons ici, de façon un peu plus précise, la méthode introduite par Pillet *et al.* (2009) qui permet d'établir un modèle direct d'influence des paramètres géométriques du procédé sur la position et la forme des surfaces fabriquées.

Le principe est de mesurer la distance d'un point de la surface fabriquée à la surface idéale. Techniquement, l'écart est en fait mesuré entre un point  $Q_i$  de la surface idéale et la surface usinée suivant la direction  $\vec{n}_i$  orthogonale à la surface idéale en ce point (voir figure 1).



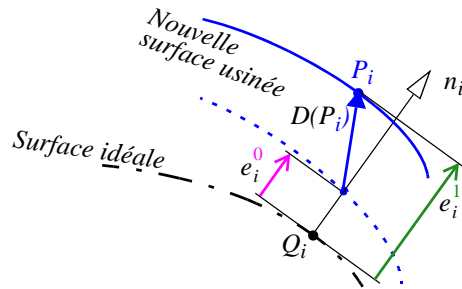
**Figure 1 : Mesurage de l'écart de la surface usinée en un point de la surface idéale.**

Ce mesurage peut être effectué grâce à un comparateur de déplacement dans l'axe ( $Q_i, \vec{n}_i$ ), qui donc va toucher la surface usinée en  $P_i$ , ou bien grâce à une machine à mesurer tridimensionnelle, ou même la machine-outils elle-même, qui va numériser des coordonnées du point  $P_i$ .

En supposant, à ce stade de nos explications, que chaque paramètre  $j$  d'ajustement du procédé, déplace et/ou «déforme» la surface usinée, le point  $P_i$  va donc subir une translation qui, du fait des pré-réglages, reste relativement petite par rapport à la courbure locale de la surface. Cette hypothèse réaliste permet d'une part d'utiliser le principe de superposition et d'écrire que la translation totale du point  $P_i$  est égale à la somme des translations dues à l'ensemble de paramètres (voir équation 1), et d'autre part d'écrire que le prochain écart  $e_i^1$  est approximativement égal à l'ancien écart,  $e_i^0$ , plus la projection du déplacement de  $P_i$ ,  $\vec{D}(P_i)$ , sur la normale  $\vec{n}_i$  (voir équation 2 et figure 2).

$$\vec{D}(P_i) = \vec{D}_1(P_i) + \dots + \vec{D}_j(P_i) + \dots + \vec{D}_k(P_i) \quad (1)$$

$$e_i^1 = e_i^0 + \vec{D}(P_i) \cdot \vec{n}_i \quad (2)$$



**Figure 2 : Schéma de calcul du nouvel écart entre la surface déplacée et déformée et la surface idéale.**

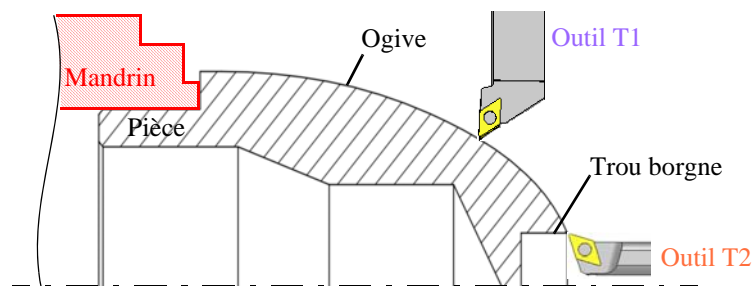
L'ensemble des équations  $e_i^1$  forme le modèle variationnel direct d'incidence des paramètres sur les écarts. Ce modèle peut ensuite être utilisé pour calculer le réglage qui annule, ou au moins réduit, théoriquement, les prochains écarts.

Nous allons donc, dans la suite, déterminer l'incidence de chaque paramètre d'usinage sur l'écart d'un point «usiné».

### 3 Repère de référence et repère-programme vis-à-vis de la mise-en-position

Lors de l'usinage d'une surface, quelle qu'elle soit, la pièce est appuyée dans la machine-outil sur d'autres surfaces de la pièce. Ces autres surfaces sont les références de la surface usinée, au sens de la norme de spécification géométrique NF EN ISO 5459 (2011). Il est indispensable que la position idéale de la surface usinée soit connue par rapport à ces références. Cela peut demander un travail de «re-cotation» de la pièce si ce n'est pas le cas sur son dessin de définition initial.

Pour illustrer nos propos, nous considérons l'usinage d'une ogive et d'un trou borgne en tournage, alors que la pièce est appuyée sur un plan et serrée dans un mandrin sur son cylindre (voir figure 3).

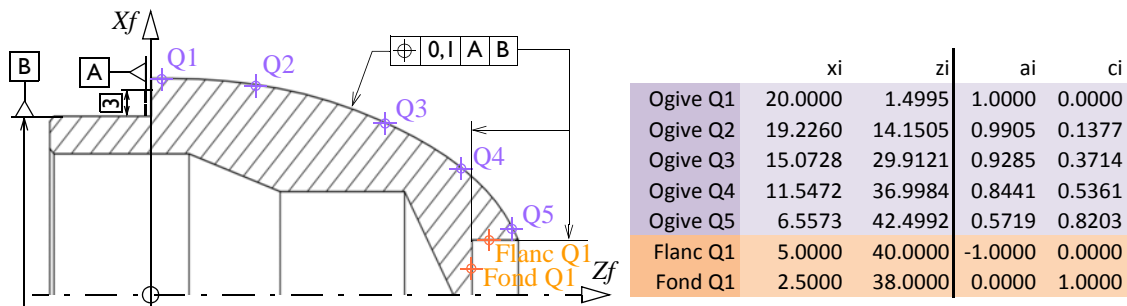


**Figure 3 : Tournage de l'ogive et trou borgne (demi-vue).**

La cotation la plus générale est celle qui définit la position de quelques points de la surface par rapport au repère construit sur les références. Ce n'est toutefois pas suffisant

pour le mesurage tridimensionnel de la surface. Il faut en outre disposer des normales locales à la surface en ces points car elles serviront de direction de mesure de l'écart de chaque point par rapport à sa position idéale. Nous supposons donc dans la suite que la surface idéale est donnée sous la forme d'un ensemble de points et de leurs normales locales, dans un repère construit sur les surfaces de référence et que nous appelons le repère de référence,  $R_f$  (voir figure 4).

Le mesurage des écarts des points de la surface usinée par rapport à la surface idéale devrait donc se faire dans ce repère. Ce n'est pas toujours le cas notamment si le mesurage est effectué par la machine-outil elle-même. En effet, dans ce cas, le mesurage est effectué dans un repère-programme de la MOCN. Ce repère-programme a été construit sur les éléments de la machine-outil et non sur les surfaces de référence de la pièce. Il faut donc que ces deux repères se superposent lorsque la pièce est dans le porte-pièce, c'est-à-dire il faut que le repère-programme soit sur les surfaces du porte-pièce en contact avec la pièce.



**Figure 4 : Cotation par points de l'ogive et du trou borgne.**

Les zones de contact réelles entre la pièce et le porte-pièce, ainsi que l'ordre des contacts doivent être respectés dans la construction du repère de référence comme dans celle du repère-programme.

Par exemple en tournage si la pièce est d'abord appuyée sur une partie de son plan, puis serrée sur son cylindre, le repère de référence devra être défini et construit sur cette partie du plan (repérée A sur le dessin de la figure 4) puis sur la partie serrée de son cylindre (repérée B sur le dessin de la figure 4).

La figure 5 montre une situation dans laquelle le repère de référence A puis B, ne correspond pas à la mise-en-position de la pièce dans le porte-pièce et donc ne correspond pas au repère-programme  $R_p$ . Il va en résulter un écart important entre la surface usinée et la surface idéale définie dans le repère de référence. Cet écart sera constaté si la surface usinée est mesurée dans le repère de référence mais pas si elle est mesurée dans le repère-programme.

Cependant, tenter de corriger cet écart serait une erreur car, étant dépendant des défauts

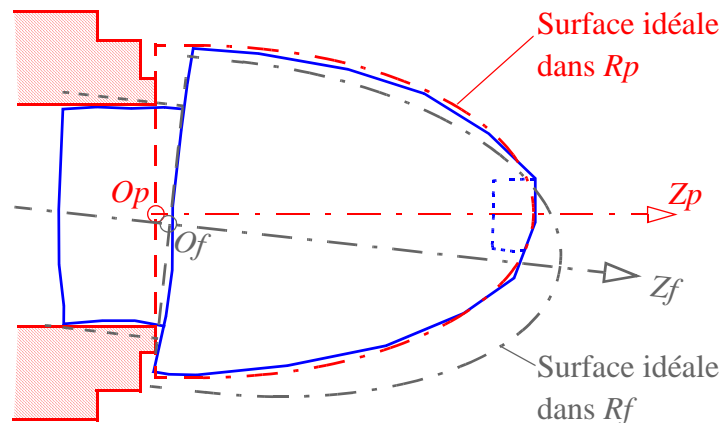
des surfaces de référence et en particulier ici de leur défaut de perpendicularité, il varie d'une pièce à l'autre de façon incontrôlé a priori.

Cela montre que la prise-de-pièce et le repère de référence doivent concorder en tournage, mais aussi en fraisage.

Comme on vient de le voir, il peut y avoir un écart du repère de référence vis-à-vis de la prise-de-pièce qui ne peut pas être corrigé, mais il peut aussi y avoir un écart du repère-programme vis-à-vis de cette même prise-de-pièce. En tournage cet écart sera principalement un décalage suivant  $Z_p$  de l'origine  $Op$  par rapport au plan d'appui de la pièce.

Les autres écarts, en position comme en orientation, sont négligeables si les décalages, nommés DEC sur les commandes numériques, depuis l'origine du porte-pièce  $Rpp$  ont été correctement mesurés ou calculés.

Ce décalage de l'origine pourrait être corrigé en prévoyant le calcul d'un paramètre de translation selon  $Z_p$  comme en fraisage (voir ci-après), mais le même résultat sur les écarts des points peut aussi être obtenu par les jauges en Z des outils. Or il vaut mieux prendre en compte les jauges en Z des différents outils pour pouvoir régler la position des surfaces usinées entre-elles, plutôt qu'un seul paramètre de décalage global de l'ensemble des surfaces usinées. Sauf cas très particulier, nous conseillons donc de ne pas modifier la position du repère-programme en tournage.



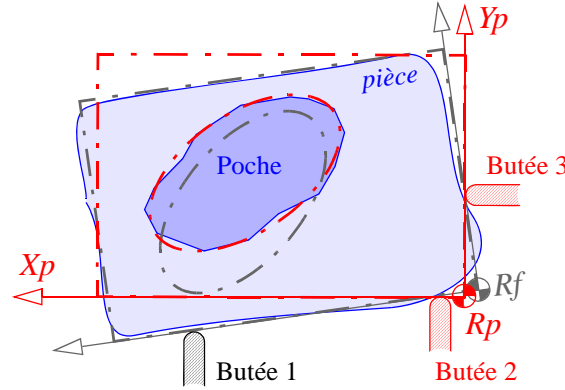
**Figure 5 : Mauvaise construction du repère de référence  $R_f$ .**

En revanche en fraisage, il faut prévoir des paramètres de translation et de rotation du repère-programme pour compenser son écart initial par rapport à la mise-en-position réelle de la pièce dans le porte-pièce car cet écart ne pourra pas être corrigé par les jauges outils.

Cet écart initial peut provenir d'une mauvaise construction du repère-programme qui, par



exemple, n'aurait pas pris en compte la butée 1 du montage d'usinage représenté sur figure 6. Cette construction est assez fréquente car le repère programme est rarement orienté ; les régleurs se contentant d'un décalage d'origine depuis l'origine du porte-pièce.



**Figure 6 : Mauvaise construction initiale du repère programme  $R_p$ .**

La poche usinée dans le repère-programme n'a évidemment pas la bonne position dans le repère de référence qui est ici correctement construit car prenant en compte les appuis réels de la pièce. Ici encore le défaut de position de la poche ne sera pas vu si elle est mesurée dans le repère-programme. Si elle est mesurée dans le repère de référence, il pourra être corrigé si l'on se donne des paramètres de déplacement du repère programme c'est-à-dire, dans ce cas d'usinage trois axes, les translation selon  $X_p$  et  $Y_p$  et la rotation autour de  $Z_p$ .

Marty & Linares (1999) ont eux aussi suggéré l'idée de recalibrer le repère-programme en mesurant quelques points en fraisage ; mais ils n'ont pas précisé leur méthode.

En nommant  $\vec{\Omega}$  le vecteur représentant la petite rotation du repère-programme  $R_p$  et  $\vec{D}(Op)$ , la translation de son origine, il est possible de calculer le déplacement de chaque point usiné qui va en résulter en considérant que les déplacements sont un champ de moments (méthode des petits déplacements due à Bourdet & Clément (1988)) :

$$\vec{D}(P_i) = \vec{D}(Op) + \vec{\Omega} \wedge \vec{OpP_i} \quad (3)$$

D'autre-part un champ de moments est équi-projectif, c'est-à-dire qu'il vérifie la relation suivante :

$$\vec{D}(P_i) \cdot \vec{n_i} = \vec{D}(Q_i) \cdot \vec{n_i} \quad (4)$$

Cela permet d'utiliser les coordonnées connues du point idéal  $Q_i$  en lieu et place de celles du point usiné  $P_i$  dans l'expression du prochain (voir équation 2) :

$$e_i^1 = e_i^0 + \left( \overrightarrow{D(Op)} + \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{OpQ_i} \right) \cdot \vec{n}_i \quad (5)$$

Soit, en distribuant le produit scalaire et en permutant les opérations du produit mixte :

$$e_i^1 = e_i^0 + \overrightarrow{D(Op)} \cdot \vec{n}_i + \vec{\Omega} \cdot \overrightarrow{OpQ_i} \wedge \vec{n}_i \quad (6)$$

Les vecteurs pourraient être exprimés dans n'importe quelle base mais les composantes du déplacement sont plus simples à interpréter dans le repère-programme. D'autre part les points  $Q_i$  et leurs normales  $\vec{n}_i$  sont initialement connus dans ce repère. En nommant de la façon suivante les composantes des vecteurs apparaissant dans l'équation 6, dans  $Rp$  :

$$\overrightarrow{D(Op)} = (u, v, w)_{Rp} \quad (7)$$

$$\vec{\Omega} = (\alpha, \beta, \gamma)_{Rp} \quad (8)$$

$$\vec{n}_i = (a_i, b_i, c_i)_{Rp} \quad (9)$$

$$\overrightarrow{OpP_i} \wedge \vec{n}_i = (L_i, M_i, N_i)_{Rp} \quad (10)$$

L'équation 6 devient :

$$e_i^1 = e_i^0 + a_i u + b_i v + c_i w + L_i \alpha + M_i \beta + N_i \gamma \quad (11)$$

Nous obtenons donc, par la méthode des petits déplacements, une expression linéaire du prochain écart en fonction du déplacement du repère-programme. Selon le nombre de composantes retenues pour ce déplacement, il faudra mesurer au moins le même nombre de points. Pour l'exemple du fraisage de la poche donné en figure 6,  $u$ ,  $v$  et  $\gamma$  suffisent à ajuster la position du repère programme de sorte qu'il corresponde au repère de référence. Il suffit donc de mesurer l'écart en seulement trois points. Néanmoins davantage peuvent être mesurés. Avec les incertitudes de mesure sur les écarts initiaux, le système d'équations n'a alors pas de solution exacte puisque davantage d'équations que d'inconnues. Nous pouvons alors rechercher un réglage des paramètres qui satisfasse un critère sur les prochains écarts, comme, par exemple, de rendre minimale la somme de leurs carrés (critère des moindres carrés).

Dans la suite nous ne prolongerons pas l'exemple du fraisage mais celui du tournage qui, par rapport au fraisage, comporte davantage de jauges-outils. Retenons de cette section que l'écart du repère de référence par rapport à la mise-en-position n'est pas corrigible et doit donc être réduit autant que possible par construction alors que celui du repère-

programme l'est et qui le sera en fraisage. Les écarts des repères par rapport à la mise-en-position ne sont observables que si les points sont mesurés dans le repère de référence.

#### 4 Les jauges-outils

En tournage, la commande numérique calcule le mouvement du porte-outil,  $Rpo$ , pour que le bec arrondi de l'outil suive exactement le contour idéal défini dans le repère-programme. Cependant selon l'importance des erreurs faites les jauges-outils, le bec ne tangente pas exactement le contour idéal si bien que la surface usinée n'est pas confondue avec la surface idéale. D'autre-part les outils s'usent et donc les jauges doivent être réajustées. D'autres paramètres peuvent également créer un écart entre les deux surfaces, notamment la flexion de l'outil et/ou de la pièce, la dilatation, etc, mais leurs effets systématiques peuvent être réduits en partie par les jauges-outils.

Un outil de contournage a quatre jauges :

- une jauge en  $X$ ,  $Jx$ , qui est la distance mesurée en  $X$  entre la pointe théorique de l'outil  $Po$  et l'origine du porte-outil  $Opo$  ;
- une jauge en  $Y$ ,  $Jy$ , qui est la distance, réglée si possible à zéro, en  $Y$  entre la pointe théorique de l'outil  $Po$  et l'origine du porte-outil  $Opo$  ; cette jauge est appelée la hauteur de pointe ;
- une jauge en  $Z$ ,  $Jz$ , qui est la distance mesurée en  $Z$  entre la pointe théorique de l'outil  $Po$  et l'origine du porte-outil  $Opo$  ;
- et enfin une jauge de rayon  $Jr$  donnant le rayon renseigné dans la CN de la pointe de l'outil et qui est souvent appelé rayon de bec d'outil et noté  $r\epsilon$ .

Pour un outil de forme, les dimensions de l'outil et plus généralement sa forme peuvent aussi être considérées comme des jauges. La différence avec les premières est que leur réglage nécessite un ré-affûtage ou un changement de l'outil. Nous n'étudierons pas ces jauges de forme dans cet article.

Chacune de ces jauges déplace ou déforme sur la surface usinée. Nous quantifierons ces modifications dans la suite. Les jauges  $Jx$ ,  $Jy$  et  $Jz$  sont relatives au repère du porte-outil,  $Rpo$ , toujours tel qu'un déplacement positif éloigne l'outil de la pièce. Les centres de tournage ont plusieurs tourelles porte-outil ; ils ont donc plusieurs repères porte-outil. Pour calculer l'impact des jauges en  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  des outils d'une tourelle, il faut que les points de mesure soient exprimés dans le repère de la tourelle. En fait nous pouvons considérer que c'est toujours le cas puisque les axes  $Z$  des porte-outils sont tous confondus avec l'axe  $Z$  du repère-programme et que les axes  $X$  sont tous orientés vers l'extérieur de la pièce et que les points idéaux peuvent être mesurés sur n'importe quelle

génératrice de la pièce. Lorsqu'une pièce est usinée en broche principale puis en contre-broche, les repères de référence et leurs repères-programmes changent et leurs axes correspondent alors à ceux des tourelles agissant sur la contre-broche.

En conclusion, en tournage, quelque soit la complexité de la machine, il n'y a pas de changement de repère à effectuer sur les points idéaux et leurs normales dès lors qu'ils sont exprimés dans le repère-programme. En revanche en fraisage le repère-programme peut avoir été réorienté ; ses axes ne sont plus, alors, parallèles à ceux de la machine (voir section 3). De plus, en fraisage cinq axes, le repère du porte-outil peut avoir deux rotations par rapport au repère-programme. Pour calculer l'impact des jauges de la fraise sur les points usinés suivant la méthode développée dans cet article, les points idéaux et leurs normales doivent être exprimés dans un repère dont l'origine est l'origine-programme et la base celle du repère du porte-outil. Nous développerons pas plus les opérations nécessaires au réglage des jauges-outils en fraisage dans cet article. Nous allons dans la suite, quantifier l'impact des jauges en tournage.

#### 4.1. Incidence des jauges $Jx$ et $Jz$

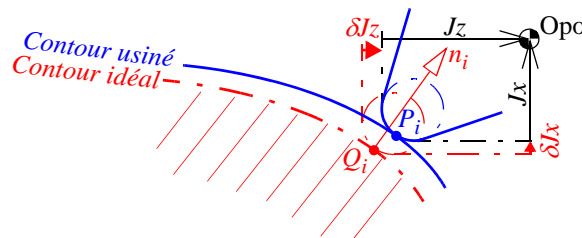
Supposons que nous ayons commis une erreur de  $\delta Jx$  sur la jauge en X et de  $\delta Jz$  sur la jauge en Z (voir figure 7). Le contour usiné correspond au contour idéal translaté du vecteur  $(\delta Jx, 0, \delta Jz)$  et donc chaque point aussi :

$$\overrightarrow{D(Q_i)} = (\delta Jx, 0, \delta Jz)_{R_{po}} \quad (12)$$

Soit, en projection sur  $\vec{n}_i$  :

$$\overrightarrow{D(Q_i)} \cdot \vec{n}_i = a_i \delta Jx + c_i \delta Jz \quad (13)$$

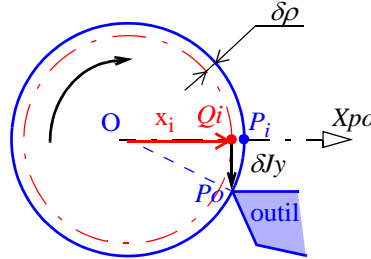
Il en va de même pour le point  $P_i$ , autrement-dit une augmentation des jauges, en X ou en Z, ou des corrections dynamiques positives, vont traduire le contour usiné vers l'extérieur de la matière suivant l'équation 13.



**Figure 7 : Translation du contour due aux jauges  $Jx$  et  $Jz$ .**

#### 4.2. Incidence de la jauge $J_y$

La jauge  $J_y$  mesure l'écart suivant Z entre le bec de l'outil et l'axe de révolution de la pièce. Cette jauge peut avoir été initialement mal réglée mais l'augmentation de la force de coupe liée à l'usure de l'outil peut aussi augmenter cet écart par flexion de l'outil. Il s'ensuit une augmentation  $\delta\rho$  du diamètre local usiné (voir figure 8).



**Figure 8 : Translation du contour due à la jauge  $J_y$ .**

Le théorème de Pythagore dans le triangle  $(O, Q_i, P_o)$  permet alors d'obtenir la relation entre cette augmentation et celle de  $J_y$  :

$$(x_i + \delta\rho)^2 = x_i^2 + \delta J_y^2 \quad (14)$$

Soit en développant le carré et en négligeant  $\delta\rho^2$  :

$$\delta\rho = \frac{1}{2x_i} \delta J_y^2 \quad (15)$$

Cette variation de rayon crée un déplacement du point  $Q_i$  dans la direction  $\overrightarrow{X_{po}}$  :

$$\overrightarrow{D(Q_i)} = \delta\rho \overrightarrow{X_{po}} \quad (16)$$

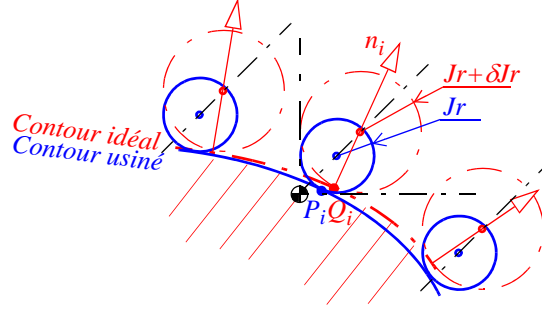
Ce déplacement, projeté sur la normale locale  $\vec{n}_i$ , permet de calculer l'incidence de cette jauge sur l'écart du point :

$$\overrightarrow{D(Q_i)} \cdot \vec{n}_i = \frac{a_i}{2x_i} \delta J_y^2 \quad (17)$$

Cette jauge ne doit être utilisée que si l'outil réalise des diamètres très différents sinon elle risque de prendre des valeurs de plusieurs dizaines de millimètre pour compenser de tout petits écarts.

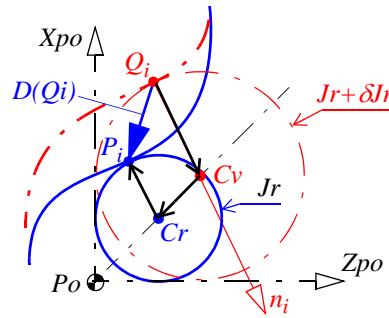
### 4.3. Incidence de la jauge $Jr$

Supposons que nous ayons commis une erreur de  $\delta Jr$  sur le rayon de bec de l'outil, valant réellement  $Jr$ . La commande numérique va alors calculer le mouvement de l'outil pour que cet arrondi, plus grand, reste tangent au contour idéal. Il va en résulter un contour usiné «déformé» par rapport au contour idéal (voir figure 9).



**Figure 9 : Déformation du contour usiné due à la jauge  $Jr$ .**

Cette «déformation» peut être calculée en chaque point  $Q_i$  du contour par la chaîne de vecteurs passant par les centres des arrondis (voir figure 10 et équation 18).



**Figure 10 : Chaîne vectorielle nécessaire au calcul de l'incidence de la jauge  $Jr$ .**

$$\overrightarrow{D(Q_i)} = \overrightarrow{Q_i C_v} + \overrightarrow{C_v C_r} + \overrightarrow{C_r P_i} \quad (18)$$

Par les propriétés de tangence, on a :

$$\overrightarrow{Q_i C_v} = (Jr + \delta Jr) \vec{n_i} \quad (19)$$

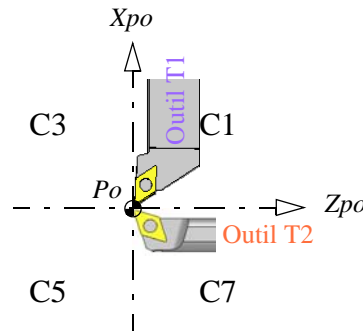
$$\overrightarrow{C_v C_r} = \delta Jr (-\vec{X_{po}} - \vec{Z_{po}}) \quad (20)$$

$$\overrightarrow{C_r P_i} = -Jr \vec{n_i} \quad (21)$$

Cette somme vectorielle en projection  $\vec{n}_i$  donne :

$$\overrightarrow{D(Q_i)} \cdot \vec{n}_i = (Jr + \delta Jr) + \delta Jr(-a_i - c_i) - Jr = (1 - a_i - c_i)\delta Jr \quad (22)$$

L'expression du vecteur  $\overrightarrow{CvCr}$  dépend du cadran utilisé pour l'outil. Dans l'expression précédent, il était exprimé pour le cadran 1 qui place le centre du bec d'outil en X et Z positif (voir figure 11). L'outil 2 d'usinage du trou borgne est placé dans le cadran 7 (X négatif et Z positif).



**Figure 11 : Cadran de l'outil à prendre en compte dans l'incidence de Jr.**

Dans ce cadran,  $\overrightarrow{CvCr}$  a pour expression (voir aussi figure 10) :

$$\overrightarrow{CvCr} = \delta Jr (\overrightarrow{Xpo} - \overrightarrow{Zpo}) \quad (23)$$

Par conséquent, l'expression du déplacement projeté de  $Q_i$  est alors :

$$\overrightarrow{D(Q_i)} \cdot \vec{n}_i = (1 - a_i + c_i)\delta Jr \quad (24)$$

Les autres cadrans peuvent facilement s'en déduire.

#### 4.4. Expression linéaire du prochain écart en fonction des jauges-outils en tournage

En tenant compte des quatre jauges d'un outil de contournage, l'expression du prochain écart d'un point usiné, par rapport à sa situation idéal, est :

$$e_i^1 = e_i^0 + a_i \delta Jx + c_i \delta Jz + \frac{a_i}{2x_i} \delta Jy^2 + (1 \pm a_i \pm c_i) \delta Jr \quad (25)$$

Un simple changement de variable pour  $\delta Jy$  permet de rendre cette expression linéaire en fonction des jauges-outils. Les signes devant  $a_i$  et  $c_i$  du coefficient sur  $\delta Jr$  dépendent du cadran de l'outil. Ils sont négatifs si l'outil est dans le cadran X+, Z+.

## 5 Simulation d'une correction d'usinage

Supposons que nous ayons les erreurs suivantes sur les jauges des outils (figure 12).

J1x	J1y	J1z	J1r	J2x	J2y	J2z	J2r
0.2000	0.0500	0.1000	0.1500	0.0600	0.0500	0.0800	0.1500

**Figure 12 : Erreurs sur les jauges-outils en mm.**

Ces erreurs conduisent aux écarts suivants sur les points (figure 13) :

Point	$e_i^0$
Ogive Q1	0.1999
Ogive Q2	0.1926
Ogive Q3	0.1778
Ogive Q4	0.1653
Ogive Q5	0.1374
Flanc Q1	-0.0603
Fond Q1	0.8000

**Figure 13 : Écarts initiaux des points usinés.**

Ces écarts ont été calculé géométriquement à partir des erreurs sur les jauges et à l'aide, notamment, d'un logiciel d'esquisse, type esquisseur CAO. L'objectif de la simulation est de vérifier que la matrice d'incidence des jauges sur les points, reposant sur l'hypothèse de petits déplacements, permet retrouver les erreurs sur les jauges. La matrice d'incidence est bâtie à partir de l'équation 25 (voir figure 14).

Même si les jauges  $J2y$  et  $J2r$  ont des erreurs, elles n'ont pas été prises en compte dans la matrice car d'une part  $J2r$  est sans influence sur les points «Flanc Q1» et «Fond Q1» et d'autre part l'outil n'usine qu'un seul diamètre ; celui du flanc. Il n'est donc pas possible de savoir si l'écart sur diamètre est dû à la jauge  $J2y$  ou  $J2x$ . En outre,  $J2y$ , comme  $J1y$ , est nettement moins influente que les autres jauges (environ dix fois moins). La conséquence est que pour compenser l'erreur sur une autre jauge, les jauges  $Jy$ , devraient prendre une très grande valeur, éventuellement négative, ce qui n'est possible physiquement. Autrement-dit les jauges en Y ne devront être utilisées qu'en complément de toutes les autres et que si l'outil usine divers diamètres.

En notant MI cette matrice d'incidence, le système d'équations donné par l'équation matricielle ci-dessous, dans laquelle  $J$  représente le vecteur des jauges et  $e^0$  celui des écarts initiaux, n'a pas de solution puisqu'il est surdéterminé.

$$MI \cdot J + e^0 = [0] \quad (26)$$



	J1x	J1y <sup>2</sup>	J1z	J1r	J2x	J2z
Ogive Q1	1.000	0.025	0.000	0.000	0	0
Ogive Q2	0.990	0.026	0.138	-0.128	0	0
Ogive Q3	0.928	0.031	0.371	-0.300	0	0
Ogive Q4	0.844	0.037	0.536	-0.380	0	0
Ogive Q5	0.572	0.044	0.820	-0.392	0	0
Flanc Q1	0	0	0	0	-1.000	0.000
Fond Q1	0	0	0	0	0.000	1.000

**Figure 14 : Matrice d'incidence des jauges sur les points.**

Il faut donc lui chercher une approximation. Pillet *et al.* (2009) proposent de calculer la pseudo-inverse de MI pour calculer une approximation conduisant à la somme minimale des carrés des prochains écarts. En utilisant cette méthode de calcul, nous obtenons les erreurs calculées suivantes sur les jauges (voir figure 15) :

J1x	J1y <sup>2</sup>	J1z	J1r	J2x	J2z
0.2000	-0.0033	0.0998	0.1498	0.0603	0.8000

**Figure 15 : Erreurs calculées grâce à la matrice d'incidence complète.**

Le carré de  $J1y$  prend une valeur très faible et négative ce qui n'a pas de sens physiquement. En revanche, nous retrouvons bien les erreurs volontairement introduites sur les jauges données en figure 12. Les jauges en Y ont une influence tellement faible dans cet exemple, qu'elles peuvent être supprimées de la matrice d'incidence. Ainsi la matrice d'incidence sans  $J1y$  conduit à des erreurs calculées pratiquement identiques (voir figure 16).

Evidemment la correction de ces erreurs sur les jauges permettent d'annuler les prochains écarts à  $10^{-6}$  près. En revanche ne pas prendre en compte de  $J1r$ , conduit à des erreurs calculées assez différentes de leurs valeurs réelles (voir figure 17), surtout pour  $J1z$  le plus à même de compenser l'erreur de  $J1r$  (voir figure 9).

J1x	J1z	J1r	J2x	J2z
0.1999	0.0996	0.1496	0.0603	0.8000

**Figure 16 : Erreurs calculées grâce à la matrice d'incidence sans  $J1y^2$ .**

J1x	J1z	J2x	J2z
0.1909	0.0234	0.0603	0.8000

**Figure 17 : Erreurs calculées grâce à la matrice d'incidence sans  $J1y^2$  ni  $J1r$ .**

La correction de ces erreurs calculées ne permet pas d'annuler les prochains écarts (voir figure 18).

Point	$e_i^1$
Ogive Q1	0.0091
Ogive Q2	0.0003
Ogive Q3	-0.0081
Ogive Q4	-0.0083
Ogive Q5	0.0091
Flanc Q1	0.0000
Fond Q1	0.0000

**Figure 18 : Prochains écarts avec la correction des jauges  $J1x$ ,  $J1z$ ,  $J2x$  et  $J2z$ .**

Les prochains écarts sont de l'ordre du centième de millimètre alors que l'erreur sur  $J1r$  n'est que de cinq centièmes sur un rayon de bec réel de 0,5 mm, c'est-à-dire seulement le dixième du rayon, ce qui est très faible, l'usure pouvant être bien plus grande.

## 6 Conclusion

La technique du réglage des machines-outils par mesurage de points à la surface des produits est la plus efficace que nous connaissions. Nous l'avons détaillée dans cet article avec notamment une étude approfondie de l'influence des repères de mesurage et de programmation. Ainsi nous avons montré que le repère de référence pour le mesurage des points doit correspondre le mieux possible à la mise-en-position de la pièce dans la machine. Le repère-programme peut lui différer de la mise en position puisqu'en tournage son écart sera compensé par les jauges-outils et qu'en fraisage il pourra être corrigé.

Nous avons étudié l'ensemble des jauges-outils en tournage en montrant l'importance de celle du rayon de bec qui, pour le moment, n'est quasiment jamais corrigée dans les ateliers, les régleurs ayant déjà fort à faire avec les jauges en X et en Z.

La méthode présentée suppose des moyens numériques à l'atelier pour mesurer et calculer mais c'est le prix à payer pour atteindre la plus grande précision sur les usinages.

Nous avons simulé des erreurs sur les jauges en tournage et montré que cette méthode permettait bien de les retrouver par calcul à partir des écarts des points, à condition toutefois de tous les prendre en compte.

Des expériences de réglage par mesurage de points ont déjà été conduites au CETIM-CTDEC. Elles ont permis d'atteindre des écarts résiduels de quelques micromètres sur quelques pièces. Les recommandations de cet article sur les repères et la prise-en-compte de la jauge de rayon de bec, voire de la jauge de hauteur de pointe, devraient permettre de maintenir ce niveau de précision sur l'ensemble des pièces d'une production en série.

Forts des connaissances établies dans cet article, il nous paraît possible de les appliquer au réglage des usinages en fraisage cinq axes.

## 7 Références

- Abdelhakim, B., Pairel, E., Pillet, M., & Sergent, A. (2012). Utilisation du tolérancement géométrique pour le réglage des machines-outils : Le pilotage inertiel total. 7<sup>ème</sup> assises Machines et Usinage à Grande Vitesse (MUGV) ; pp. 1–10 ; Saint-Etienne.
- Bourdet, P., & Clément, A. (1988). A study of optimal-criteria identification based on the small-displacement screw model. *Annals of the CIRP*, 37(1), 503–506.
- Goldschmidt, E., Pairel, E., Giordano, M., & Pillet, M. (2007). Changeover from the functional geometric tolerances to the dimensional parameters to be supervised in production. *CIRP Journal of Manufacturing Systems*, 36(7), 305–309.
- Martin, P., Schneider, F., & Dantan, J.-Y. (2004). Optimal adjustment of a machine tool for improving the geometrical quality of machined parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(5-6), 559–564. doi:10.1007/s00170-003-2004-4
- Marty, C., & Linares, J.-M. (1999). *Industrialisation des produits mécaniques - Tome 2 : contrôle et gestion des processus* (Hermès.).
- NF EN ISO 5459 (2011). Spécification géométrique des produits (GPS) - Tolérancement géométrique - Références spécifiées et systèmes de références spécifiées.
- Pairel, E., Ledoux, Y., Arrieux, R., Tabourot, L., & Incandela, O. (2004). Correction of geometrical defects of stamping parts by numerical simulation and design of experiment. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, IV(4), pp. 75–86.
- Pairel, E., Goldschmidt, E., Adragna, P.-A., Hernandez, P., & Pillet, M. (2011). The pilot dimensions method: reconciling steering and conformity in workshops. *International Journal of Production Research*, 49(19), 5943–5956.
- Pillet, M., Denimal, D., Pairel, E., & Samper, S. (2009.). Total inertial tolerancing, a new way to drive production. *Journal Of Machine Engineering*, 9(3), 15–28.
- Yang, M. Y., & Sim, C. G. (1993). Reduction of machining errors by adjustment of feedrates in the ball-end milling process. *International Journal of Production Research*, 31(3), 665–689. doi:10.1080/00207549308956750