

La modélisation vectorielle des machines-outils : un outil simple pour le régleur

Emmanuel DUC et Etienne LEFUR - Ecole Normale Supérieure de CACHAN

1. Modélisation géométrique des machines-outils à commande numérique

De nos jours la plupart des machines-outils utilisées en production sont équipées d'un directeur de commande numérique. Leur utilisation rationnelle impose une mise en production rapide et efficace. Le technicien a besoin de mieux appréhender les différents paramètres de réglages de sa machine et de rapidement modifier celui qui est la source d'un défaut de production. Le professeur doit enseigner ces démarches indépendamment des moyens de productions utilisés. Dans cet article nous proposons une méthode simple de modélisation des machines-outils à commande numérique basée sur une représentation vectorielle. Nous montrons par la suite comment cette méthode s'applique au réglage et au palpé sur MOCN.

Différents types de modélisation existent suivant le point de vue adopté, et les objectifs recherchés.

Au sens de l'utilisation, il existe un ensemble de règles et conventions normalisées, qui simplifient l'emploi des machines-outils à commande numérique, et assurent une certaine compatibilité des programmes d'une machine à l'autre. C'est une modélisation cinématique qui codifie la description des déplacements. Elle est nécessaire au programmeur. Par contre, elle n'est pas suffisante lorsqu'on envisage la mise en production d'une pièce, car les notions de précision d'usinage n'apparaissent pas dans le modèle.

Au sens de l'obtention de la pièce, on cherche avant tout à obtenir une géométrie correspondant au contrat de phase. Cette géométrie est exprimée sous forme de cotes nominales et de tolérances dimensionnelles. Il faut donc trouver un modèle qui permette de décrire les positions successives de l'outil dans l'espace machine et de placer correctement la pièce par rapport à l'outil. Ceci impose une modélisation, qui décrit les dimensions caractéristiques de la machine et de son environnement. Le régleur assure l'obtention de pièces bonnes en corrigeant les valeurs de ces caractéristiques. C'est la modélisation vectorielle de la machine-outil.

Au sens de la commande, la commande numérique doit être capable de transformer les ordres de mouvement donnés dans un système de coordonnées particulier, en des commandes de déplacement sur chaque axe. Il faut avoir une modélisation géométrique plus complète inspirée des modèles de la robotique, qui permette de passer d'un système à l'autre. De plus cette modélisation géométrique prend en compte les défauts géométriques de la machine et assure une commande plus précise. Les travaux de MM Mathieu et Méry définissent précisément cette modélisation.

Au sens de la commande d'axe, on peut être amené à réaliser une modélisation dynamique de l'axe, en prenant en compte les rigidités et les inerties des axes de déplacement. Cette modélisation

permet de construire le schéma fonctionnel de l'asservissement de l'axe, et de le corriger afin de répondre au cahier des charges dynamiques de la machine.

1.1. Modélisation vectorielle des MOCN

La modélisation vectorielle d'une machine-outil passe par la construction de la relation vectorielle entre le vecteur liant l'origine mesure et le point piloté, et les grandeurs caractéristiques de la machine. Les points (voir tableau 1) utilisés pour modéliser la géométrie sont soit des positions particulières des mobiles de la chaîne cinématique de la machine, soit des points physiques associés à des interfaces entre solides.

Tableau 1 : définition des points utilisés

| | |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| R | Point caractéristique de la liaison encastrement supposée parfaite entre le porte-outil et la machine. Il est défini par les surfaces de mise en position. |
| Om | Point coïncidant de R à la date de mise en référence des éléments mobiles. Ce point est appelé «origine mesure». |
| Oo | Point caractéristique de la liaison encastrement supposée parfaite entre la machine et le porte-pièce. Il est défini par les surfaces de mise en position. |
| Op | Point caractéristique de la liaison encastrement supposée parfaite entre le porte-pièce et la pièce. Il est défini par les surfaces de mise en position et appelé «origine pièce». |
| Opr | Origine du repère de programmation |
| P | Point caractéristique de l'outil : point générateur de l'outil |
| C | Centre du rayon de bec de plaquette en tournage ou du rayon de bout en fraisage |
| Qi | Point(s) programmé(s), visé(s), à atteindre (indice i) |

Le point R est un point situé à l'interface entre le porte-outil et la machine. Suivant la machine (centre de fraisage, ou centre de tournage), la forme de la liaison entre le porte-outil et la machine n'est pas la même, le point R peut donc changer d'une machine à l'autre. On peut l'appeler «point de référence». Le point Oo est un point situé à l'interface entre le porte-pièce et la machine. De plus en plus, pour des raisons de standardisation, on alèse des centreurs sur les tables des machines-outils. On place, alors, le point Oo à l'intersection de l'axe de l'alésage et du plan associé à la table. Le point Op est l'intersection des éléments géométriques (plans, droites) associés aux liaisons qui concourent à la liaison complète entre la pièce et le porte-pièce. Ces points sont illustrés par les figures 1 et 2.

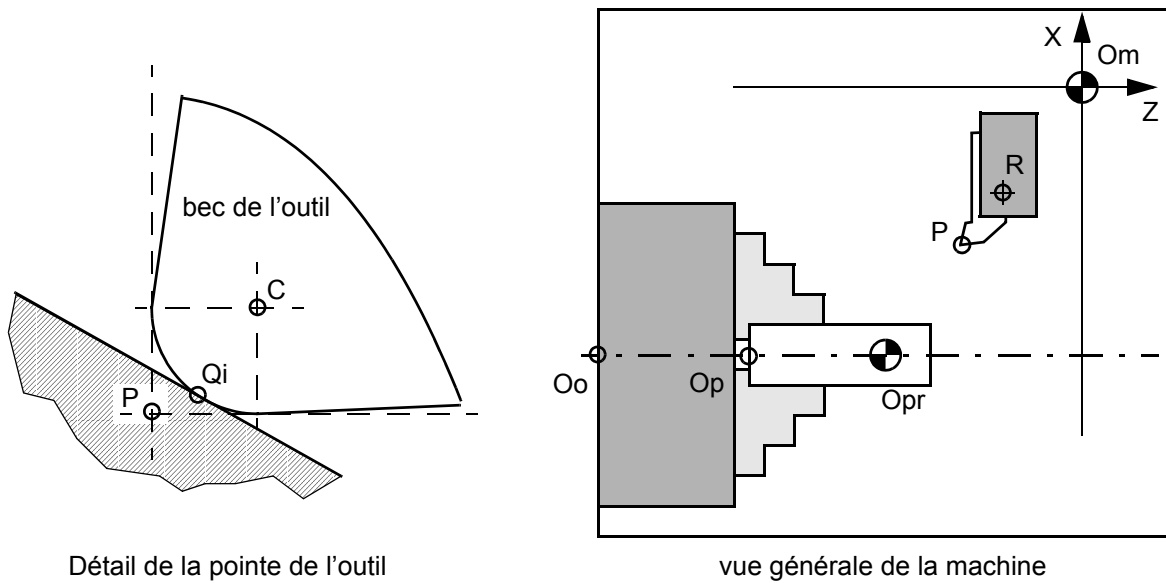


Figure 1 : représentation des points dans le cas du tournage

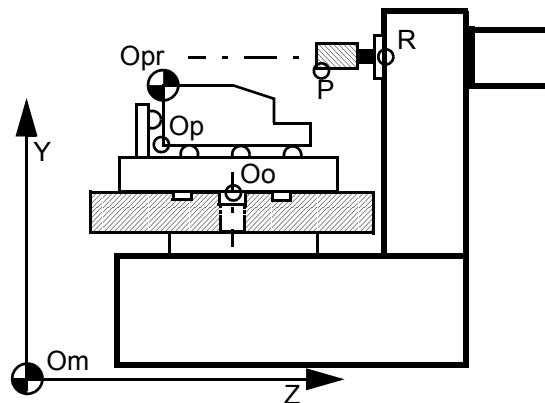


Figure 2 : représentation des points dans le cas du fraisage

A partir de ces couples de points appartenant aux mêmes solides, on définit les vecteurs caractéristiques des éléments de la MOCN (voir tableau 2).

Tableau 2 : définition des vecteurs caractéristiques des MOCN

| | |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| \overrightarrow{OmOo} | Caractérise la machine. |
| \overrightarrow{OoOp} | Caractérise le porte-pièce. |
| \overrightarrow{OpOpr} | Caractérise la pièce. |
| \overrightarrow{OprQi} | Caractérise la pièce : la position de Qi dans le repère de programmation. |
| \overrightarrow{QiC} | Correction de rayon d'outil normale au profil. |
| \overrightarrow{CP} | Caractérise la configuration de l'outil en tournage, et le type d'outil en fraisage. |
| \overrightarrow{PR} | Caractérise l'outil (jauges). |
| \overrightarrow{OmR} | Caractérise le déplacement des éléments mobiles de la MOCN. |

On obtient la modélisation géométrique de la MOCN en appliquant la relation de Chasles au vecteur \overrightarrow{OmR} :

$$\overrightarrow{OmR} = \overrightarrow{OmOo} + \overrightarrow{OoOp} + \overrightarrow{OpOpr} + \overrightarrow{OprQi} + \overrightarrow{QiC} + \overrightarrow{CP} + \overrightarrow{PR} \quad (1)$$

Selon la définition de l'origine mesure, on constate qu'elle est tributaire du choix du point courant R, qui est fait par le constructeur de la machine-outil. Il en est de même pour la définition des jauges. Si on change la position de R, on constate alors que le vecteur caractéristique de la machine et les jauges varient. Elle peuvent alors ne plus représenter une dimension physique de la machine ou de l'outil. Ce qui peut gêner le régleur et l'élève !

1.2. Apports et limites du modèle

Par sa construction propre, ce modèle est un modèle simple et facile à mettre en oeuvre.

Ce modèle permet une meilleure compréhension des paramètres géométriques définissant la MOCN, car il introduit un vocabulaire expressif et indépendant de la marque de la commande numérique. On peut alors prendre en main plus rapidement une nouvelle machine. Cette approche permet la mise en place d'une démarche rigoureuse dans la résolution des problèmes rencontrés au pied des machines. Nous montrons qu'elle s'adapte bien au réglage et au palpé. Cette méthode a été testée auprès d'élèves en formation initiale et de techniciens d'entreprises en formation continue.

Par contre, ce modèle possède deux limites importantes. La première vient du fait que l'on considère comme parfaits les déplacements de la machine. On se place ici dans un cas de production sur une machine donnée que l'on considère comme capable de produire. Ce modèle ne saurait être employé pour permettre la correction dynamique par le calculateur des trajectoires en fonction des imperfections de la machine. Cette opération est interne à la machine. La seconde limite est l'incapacité de gérer des rotations. Plus précisément, à partir du moment où l'usinage impose une rotation continue d'un des axes de déplacement, ce modèle ne convient pas. C'est le cas de l'usinage en 5 axes continus, ou le cas de l'usinage d'une hélice. Par contre, si les rotations sont utilisées pour faire du positionnement, ce qui représente la grande majorité des cas d'utilisation des centres de fraisage à 4 axes, alors ce modèle s'emploie parfaitement, même si son application est plus délicate.

2. Le réglage

L'objet de ce chapitre est de présenter comment l'utilisation du modèle vectoriel permet de mieux appréhender le réglage des MOCN. Dans un premier temps, nous allons préciser les vecteurs précédemment définis et des moyens de les mesurer. De plus nous allons montrer quelles relations existent entre les vecteurs caractéristiques. Dans un second temps, nous allons montrer comment on peut établir un lien entre les vecteurs caractéristiques d'une machine réglée et les cotes fabriquées obtenues, de façon à déterminer les vecteurs caractéristiques mal réglés, et donner la correction.

2.1. Détermination des caractéristiques du modèle vectoriel de la MOCN

2.1.1. Vecteur caractéristique du couple outil, porte-outil : jauges

Dans la suite, on nomme «outil», l'ensemble monté couple outil / porte-outil.

Le vecteur \vec{PR} caractérise l'outil et relie le point générateur de l'outil P et le point de référence R relatif à la liaison encastrement entre l'outil et la machine. On appelle «jauge» les grandeurs scalaires caractéristiques de l'outil représentées sur la figure 3.

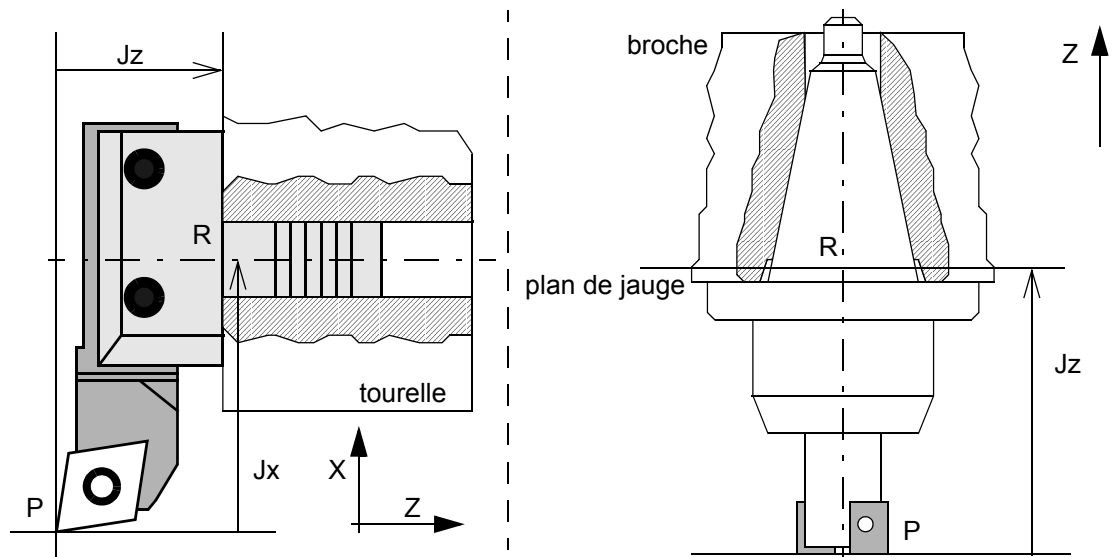


Figure 3 : jauges d'un outil de tournage et d'une fraise

Pour un outil de tournage, on a $Jx = \vec{PR} \cdot \vec{X}$ et $Jz = \vec{PR} \cdot \vec{Z}$, alors que pour un outil de fraisage, on a $Jz = \vec{PR} \cdot \vec{Z}$ et $R_{outil} = \vec{PR} \cdot \vec{n}$. Le vecteur \vec{n} représente la normale extérieure à la surface, lors d'un usinage par contournage à la fraise deux tailles. Le fait que la normale soit choisie extérieure à la matière permet d'obtenir une valeur positive du rayon.

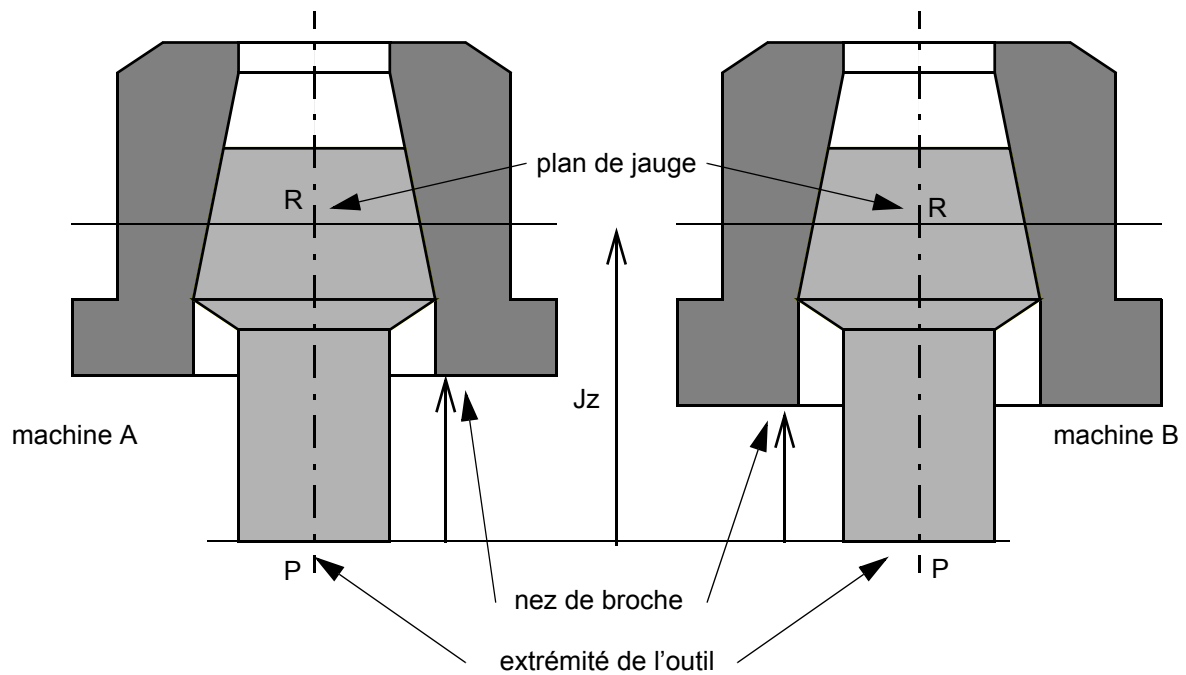
Trois méthodes peuvent être mises en oeuvre pour quantifier ce vecteur. La première consiste en une mesure directe sur la machine de ce vecteur ; elle permet une grande précision, mais impose une immobilisation de la machine. Elle est employée lorsque les machines ne permettent pas une bonne répétabilité de montage de l'outil (c'est surtout le cas du tournage, où l'outil est monté directement sur certaines tourelles sans adaptateur, ni élément intermédiaire). La seconde passe par la mesure en

dehors de la machine, sur un banc de pré-réglage par exemple. Cette méthode permet un gain en productivité mais introduit un écart sur les jauges dû à la dispersion de remise en position de l'outil dans la machine. On généralise l'utilisation de la seconde méthode dans le cas des pièces de mécanique générale. La troisième comprend une mesure externe sur banc, suivi d'un affinage sur machine soit après usinage de la première pièce, soit en utilisant un palpeur outil dans le cadre d'une production automatisée. Cette méthode permet l'usinage de pièces de meilleure précision.

Si on utilise une méthode de mesure hors machine, il est nécessaire de configurer le moyen de mesure en fonction de la machine. Si la jauge mesurée sur le banc est \overrightarrow{PR}_1 , entre le point P de l'extrémité de l'outil et le point R_1 , point de référence du banc de mesure, et si la jauge sur la machine est \overrightarrow{PR}_2 entre le point P et le point R_2 , point de référence de la machine, on suppose alors que $\overrightarrow{PR}_2 = \overrightarrow{PR}_1$, dans une opération de mesure sur un banc. Ce qui est exact si R_1 et R_2 ont la même définition. Ce n'est pas forcément le cas, lorsque l'on gère un atelier à plusieurs machines et bancs de pré-réglage.

Dans le cadre du fraisage, le positionnement du porte-outil dans la broche se fait au moyen d'un cône. Deux points de l'attachement sont caractéristiques (voir figure 4) :

- le point intersection du plan de jauge du cône et de son axe : ce point est censé définir physiquement l'encastrement du cône. Il n'est fonction que de la forme du cône et ne dépend pas de la forme de la broche, par contre il n'est pas physiquement identifiable, si ce n'est par l'encastrement d'un cône étalon.
- le point d'intersection du nez de broche avec l'axe : c'est un point aisément accessible, sa position est constante par rapport au plan de jauge. Par contre, elle n'est pas identique d'une machine à l'autre, ce qui peut imposer une correction par machine.



Seule la distance entre le plan de jauge et l'extrémité de l'outil reste constante

Figure 4 : comparaison entre les jauges mesurées à partir du nez de broche et les jauges mesurées à partir du plan de jauge

Ce problème ne se pose pas dans le cas des nouveaux attachements dit cône - face (HSK, ISO), qui possèdent un appui plan prépondérant pour augmenter les forces de serrage du porte-outil dans la broche. La norme [NF E 60-023] impose le plan de jauge au niveau du nez de broche, mais cette norme n'est pas équivalente à une norme ISO, et n'est définie que pour les changements manuels d'outil. En ce qui concerne le point P, on choisit l'intersection entre l'axe et l'extrémité de l'outil. Les informations nécessaires à la commande numérique sont la jauge Jz selon l'axe Z, le rayon de l'outil, et celui de son arête de coupe.

Dans le cas du tournage, les types d'attachement sont plus nombreux. Comme les porte-outils ne sont pas coniques, il est plus facile de choisir un point physiquement identifiable. Par exemple, le point de référence R du système d'attachement VDI est l'intersection de la face avant de la tourelle, et de l'axe de l'alésage de centrage. Les informations nécessaires à la commande numérique sont la jauge Jx selon l'axe X, la jauge Jz selon l'axe Z, le rayon de bec de l'outil, et la position du centre de plaquette C par rapport au point piloté P.

2.1.2. Vecteur caractéristique du porte-pièce

Il faut quantifier le vecteur \overrightarrow{OoOp} . Dans le cas du tournage, pour des tours à mandrin démontable, on considère généralement, que le porte-pièce est le mandrin en entier. Par contre, dans les autres cas, le porte-pièce est formé des mors (doux ou durs) et / ou d'une butée d'appui sur Z. On choisit l'une ou l'autre des solutions suivant la fréquence des changements du mandrin complet. La caractérisation de la position de Oo est simple à mener. Par contre celle de Op pose plus de difficultés. En effet, la structure du mécanisme de serrage et la force centrifuge ont tendance à forcer les mors à se décoller

de la face avant du mandrin. La position de Op n'est donc pas la même à l'arrêt sans pièce montée et en fonctionnement avec une pièce montée. La correction à apporter se fait expérimentalement.

Dans le cas du fraisage et dans une optique de standardisation, le porte-pièce regroupe deux entités fonctionnelles : une entité fonctionnelle de mise en position du porte-pièce sur la machine, et une entité fonctionnelle de mise en position de la pièce sur le porte-pièce. La première entité est généralement la somme d'une liaison appui-plan principal, d'une liaison linéaire annulaire, et d'une liaison ponctuelle réalisée par deux lardons. Le point Oo est alors le centre de la liaison linéaire annulaire projeté sur le plan. Pour la seconde entité, la mesure de la position du point Op dépend du type de prise de pièce. La mesure de la position relative de Oo et de Op peut se faire sur une machine à mesurer tridimensionnelle.

Si la première entité fonctionnelle est absente sur le porte-pièce, il est nécessaire de quantifier directement le vecteur \overrightarrow{OmOp} sur la machine. Cela se fait, souvent au moyen de pinules, ou de comparateurs et jeux de cales étalons. Cette technique entraîne une immobilisation coûteuse de la machine et la nécessité de refaire les mesures à chaque démontage. Néanmoins dans ce cas, l'utilisation d'un palpeur peut s'avérer tout à fait rentable.

2.1.3. Vecteur caractéristique de la machine

Il faut déterminer le vecteur \overrightarrow{OmOo} . Le point Om étant défini comme une position particulière du point R, la détermination du vecteur nécessite la mise en coïncidence de R en Oo. On obtient directement les coordonnées cherchées. Lorsque ceci n'est pas possible physiquement, un empilement de cales étalons peut suffire à atteindre le point. De même, lorsque R n'est pas physiquement accessible, on est obligé d'utiliser un étalon.

Si pour le réglage d'une machine à fraiser, on considère que la jauge outil est mesurée à partir du plan de jauge de l'outil, il est nécessaire que le point R appartienne à ce plan de jauge. Par conséquent la mesure du vecteur \overrightarrow{OmOo} , impose l'emploi un outil étalon fixé dans la broche de la machine, car R n'est pas accessible. On a alors la relation suivante illustrée par la figure 5 :

$$\overrightarrow{OmOo} \cdot \vec{Z} = \overrightarrow{OmR_{et}} \cdot \vec{Z} + (\overrightarrow{RP})_{et} \cdot \vec{Z} + \overrightarrow{P_{et}Oo} \cdot \vec{Z} \quad (2)$$

Cette caractéristique devant être mesurée précisément, il faut analyser les sources d'erreur de la mesure : $\overrightarrow{OmR_{et}} \cdot \vec{Z}$: valeur lue sur la machine, précision théorique de 0,001 mm, $(\overrightarrow{RP})_{et} \cdot \vec{Z}$: «jauge de l'outil étalon» ($J_{étalon}$) et $\overrightarrow{P_{et}Oo} \cdot \vec{Z}$ égale à $J_{réf}$, considérée comme référence, précision de 0,01 mm. On constate que la mesure précise du vecteur \overrightarrow{OmOo} , passe par une connaissance précise de $J_{étalon}$. Par contre cette valeur n'influe pas sur la précision de l'usinage. Pour usiner précisément, il n'est pas nécessaire de connaître la valeur de cette jauge avec précision, dès l'instant que ce même étalon est utilisé pour configurer le banc de mesure d'outil.

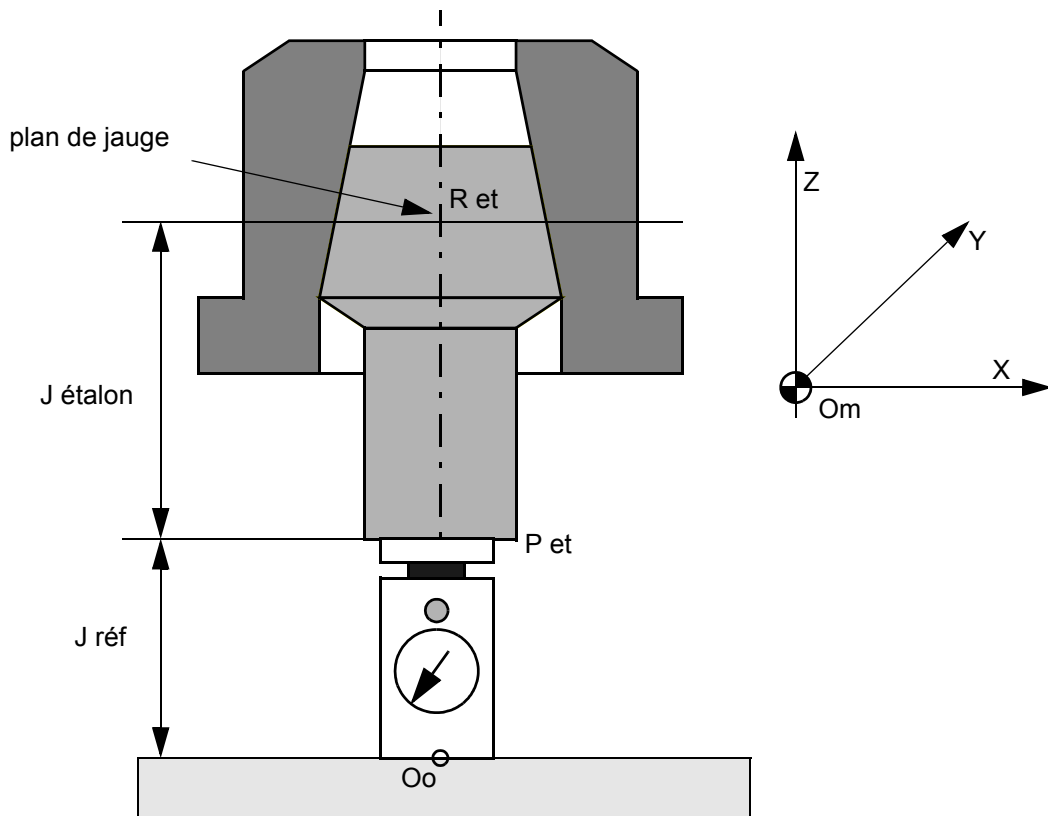


Figure 5 : calcul de \overline{OmOo} par la méthode d'un étalon de référence

Ainsi, on démontre que le calcul des longueurs caractéristiques d'une machine à fraiser selon l'axe de la broche avec un outil étalon dont on ne connaît pas la longueur n'introduit pas d'erreur. Par contre la valeur de la caractéristique déduite peut être fortement différente de la valeur réelle, ce qui peut gêner l'opérateur.

2.2. Ajustement des vecteurs caractéristiques : réglage

Quelles que soient les conditions d'usinage, petite ou grande série, suivi par pièce, par lot, toute production nécessite des périodes de mise au point, et de re-réglage régulier. Si on généralise l'opération de réglage, indépendamment de la stratégie de suivi de production employée, on constate qu'elle nécessite successivement, d'usiner une pièce, de définir les cotes particulières à mesurer, d'évaluer le dé-réglage, de choisir les dimensions caractéristiques à modifier, de déterminer la correction à apporter et enfin d'usiner la pièce suivante.

Pour évaluer le dé-réglage, on compare les dimensions mesurées aux contrats écrits sur la fiche de réglage, ou sur le contrat de phase. Si une cote de réglage est fautive, il n'y a qu'une caractéristique outil à modifier. Par contre, lors d'une évaluation à partir d'un contrat de phase, il se pose plusieurs cas. Une cote fabriquée relie deux surfaces usinées dans la même phase, ou une surface usinée et une surface d'appui.

Pour déterminer les modifications de réglage à apporter sur les caractéristiques de la machine ou des outils, on est obligé de mettre en place les positions des surfaces usinées dans l'espace de la machine et d'y appliquer une modélisation vectorielle. On suppose que l'on néglige les défauts géomé-

triques des surfaces usinées. On obtient alors le dessin représenté sur la figure 6. On indique en indice des points caractéristiques de la modélisation, le numéro de la surface à laquelle ils sont associés. On indique par « ' » que les points appartiennent aux surfaces réelles. L'indice « réel » est associé aux dimensions réelles des vecteurs caractéristiques, et l'indice « déc » est associé aux dimensions déclarées au directeur de commande numérique des vecteurs caractéristiques.

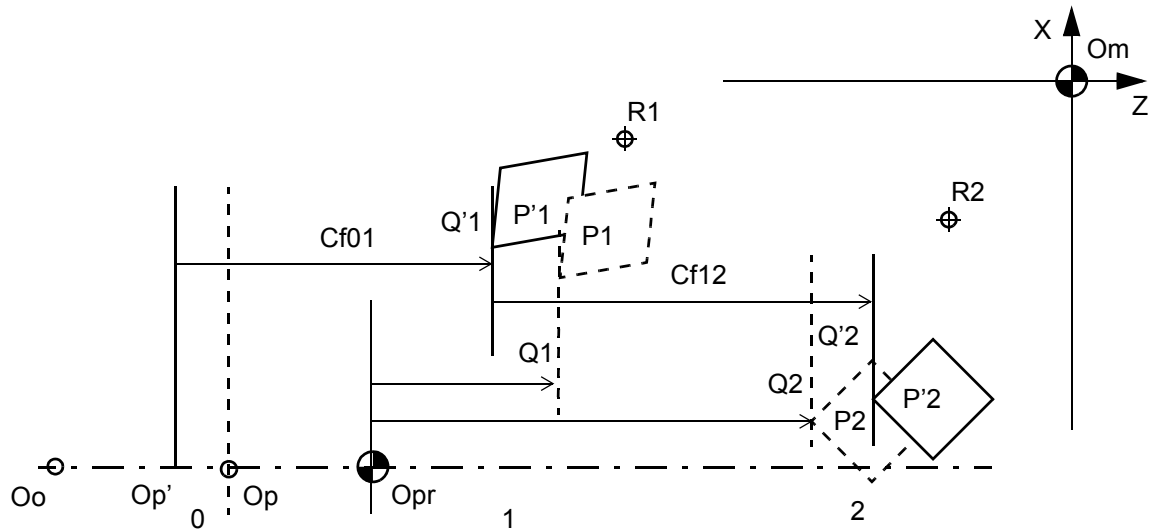


Figure 6 : représentation des cotes fabriquées dans le modèle vectoriel d'un tour

2.2.1. Cote de fabrication liant deux surfaces usinées

Exprimons la relation qui existe entre une cote de fabrication liant deux surfaces usinées, et les vecteurs caractéristiques.

$$\overrightarrow{Cf_{12}} = \overrightarrow{Q'_1 Q'_2} = \overrightarrow{Q'_1 P'_1} + \overrightarrow{P'_1 P_1} + \overrightarrow{P_1 Q_1} + \overrightarrow{Q_1 Q_2} + \overrightarrow{Q_2 P_2} + \overrightarrow{P_2 P'_2} + \overrightarrow{P'_2 Q'_2} \quad (3)$$

- $\overrightarrow{Q'_1 P'_1}$ modélise la relation entre le point de contact réel et la pointe de l'outil réelle.

$$\overrightarrow{Q'_1 P'_1} = (\overrightarrow{Q_1 P_1})_{\text{réel}} = \overrightarrow{Q'_1 C'_1} + \overrightarrow{C'_1 P'_1} = (\overrightarrow{Q_1 C_1})_{\text{réel}} + (\overrightarrow{C_1 P_1})_{\text{réel}}$$

- $\overrightarrow{P'_1 P_1}$ représente le passage entre le réel et le modèle déclaré dans la commande numérique.

$$\overrightarrow{P'_1 P_1} = \overrightarrow{P'_1 R} + \overrightarrow{R P_1} = (\overrightarrow{P'_1 R})_{\text{réel}} - (\overrightarrow{P_1 R})_{\text{déc}} \quad \text{avec}$$

$$\overrightarrow{P'_1 R} = (\overrightarrow{P_1 R})_{\text{réel}} \quad \text{jauge réelle de l'outil et}$$

$$\overrightarrow{P_1 R} = (\overrightarrow{P_1 R})_{\text{déc}} \quad \text{jauge déclarée à la commande numérique de l'outil}$$

- $\overrightarrow{P_1 Q_1}$ définit la relation entre le point de contact à atteindre et la pointe de l'outil.

- $\overrightarrow{Q_1Q_2}$ est la consigne de déplacement demandée par le programme à la commande numérique.

$\overrightarrow{Q_1Q_2} = \overrightarrow{Q_1O_{pr}} + \overrightarrow{O_{pr}Q_2}$, ce sont des ordres de programmation absolue.

On a ainsi la formule suivante :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{Cf_{12}} - \overrightarrow{Q_1Q_2} = & (\overrightarrow{Q_1P_1})_{réel} - (\overrightarrow{Q_1P_1})_{déc} + (\overrightarrow{P_1R})_{réel} - (\overrightarrow{P_1R})_{déc} \\ & + (\overrightarrow{Q_2P_2})_{déc} - (\overrightarrow{Q_2P_2})_{réel} + (\overrightarrow{P_2R})_{déc} - (\overrightarrow{P_2R})_{réel} \end{aligned} \quad (4)$$

Si la cote fabriquée n'est pas bonne, alors il y a une erreur :

- soit sur l'ordre programmé $\overrightarrow{Q_1Q_2}$,
- soit sur la définition de la pointe de l'outil 1 $(\overrightarrow{Q_1P_1})_{réel} - (\overrightarrow{Q_1P_1})_{déc}$,
- soit sur la jauge de l'outil 1 $(\overrightarrow{P_1R})_{réel} - (\overrightarrow{P_1R})_{déc}$,
- soit sur la définition de la pointe de l'outil 2 $(\overrightarrow{Q_2P_2})_{déc} - (\overrightarrow{Q_2P_2})_{réel}$,
- soit sur la jauge de l'outil 2 $(\overrightarrow{P_2R})_{déc} - (\overrightarrow{P_2R})_{réel}$.

Si on suppose que les définitions des pointes d'outil sont bonnes, (ou dans des cas particuliers d'usinage : chariotage, dressage, surfaçage), et que l'ordre programmé est bon, on constate que seules les jauges influent sur la valeur de la cote fabriquée.

Pour régler la cote de fabrication, on a alors deux possibilités : modifier la jauge 1 ou modifier la jauge 2.

2.2.2. Cote de fabrication liant une surface d'appui et une surface usinée

Exprimons la relation entre une cote de fabrication liant une surface d'appui et une surface usinée, et les vecteurs caractéristiques de la machine et des outils (voir figure 6).

$$\overrightarrow{Cf_{01}} = \overrightarrow{Op'Q'_1} = \overrightarrow{Op'Op} + \overrightarrow{OpOpr} + \overrightarrow{OprQ_1} + \overrightarrow{Q_1P_1} + \overrightarrow{P_1P'_1} + \overrightarrow{P'_1Q'_1} \quad (5)$$

- $\overrightarrow{Op'Op}$ modélise la relation entre la position de l'origine pièce réelle, et la position de l'origine pièce déclarée. $\overrightarrow{Op'Op} = (\overrightarrow{OoOp})_{déc} - (\overrightarrow{OoOp})_{réel}$. Si on considère que Oo a une position exacte.
- \overrightarrow{OpOpr} caractérise la position de l'origine de l'origine programme par rapport à l'origine pièce déclarée.
- $\overrightarrow{OprQ_1}$ caractérise la position de Q_1 dans le repère de programmation.

Comme précédemment, on obtient la relation suivante :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{Cf_{01}} - \overrightarrow{OpOpr} + \overrightarrow{OprQ_1} &= (\overrightarrow{OoOp})_{\text{déc}} - (\overrightarrow{OoOp})_{\text{réel}} \\ &+ (\overrightarrow{Q_1P_1})_{\text{déc}} - (\overrightarrow{Q_1P_1})_{\text{réel}} + (\overrightarrow{P_1R})_{\text{déc}} - (\overrightarrow{P_1R})_{\text{réel}} \end{aligned} \quad (6)$$

Si on considère qu'il n'y a pas d'erreur ni sur la position de l'origine programme ni sur l'ordre de commande, l'erreur sur la cote de fabrication est due :

- soit à l'erreur de la caractéristique porte-pièce $(\overrightarrow{OoOp})_{\text{déc}} - (\overrightarrow{OoOp})_{\text{réel}}$,
- soit à l'erreur sur la définition de la pointe de l'outil 1 $(\overrightarrow{Q_1P_1})_{\text{déc}} - (\overrightarrow{Q_1P_1})_{\text{réel}}$,
- soit à l'erreur sur la jauge de l'outil 1 $(\overrightarrow{P_1R})_{\text{déc}} - (\overrightarrow{P_1R})_{\text{réel}}$.

On constate, ainsi que l'on peut limiter le nombre d'alternatives de réglage par cote fabriquée à deux : une jauge, et la caractéristique porte-pièce dans le cas des cotes liant une surface usinée et la surface d'appui de la phase.

2.2.3. Détermination de la correction à apporter

On doit modifier chaque caractéristique de façon à ce que la surface usinée sur la pièce suivante prenne la position voulue après correction. Dans le cas du tournage, sur la figure 7, sont reprises les désignations du paragraphe précédent. Q' est le point mesuré, atteint lors de l'usinage par la pointe réelle de l'outil P'. Q est le point à atteindre, et atteint lors de l'usinage par la pointe déclarée de l'outil P.

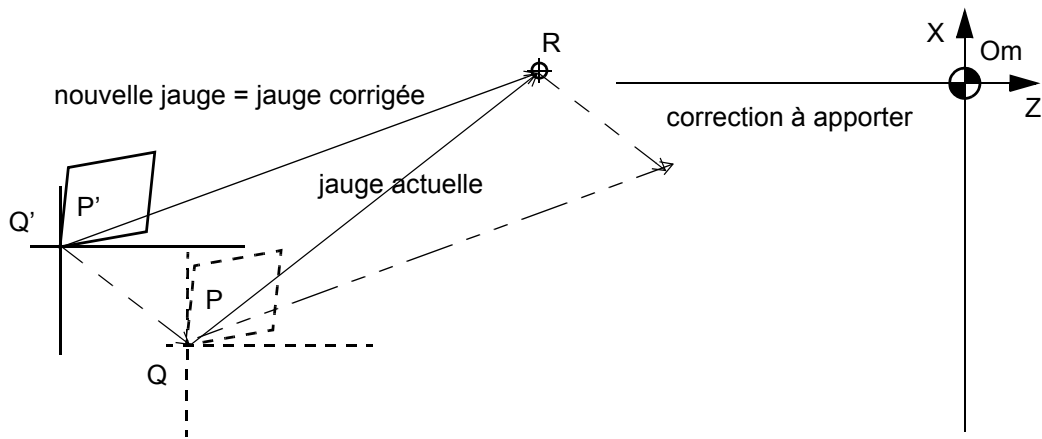


Figure 7 : Etude du sens de correction à apporter à une jauge-outil

Pour effectuer la correction, on cherche à ce que Q' soit en Q, (ou que P soit en P'). La correction à apporter est : $\overrightarrow{P'P} = \overrightarrow{Q'Q}$. La nouvelle caractéristique de l'outil est obtenue par l'équation (7) :

$$(\overrightarrow{PR})_{\text{corrigé}} = \overrightarrow{P'R} = \overrightarrow{P'P} + (\overrightarrow{PR})_{\text{initial}} = \overrightarrow{Q'Q} + (\overrightarrow{PR})_{\text{initial}} \quad (7)$$

Cette relation est projetée sur X et Z pour obtenir les jauges corrigées Jx et Jz.

$$\begin{aligned}
Jx_{\text{corrigé}} &= (\overrightarrow{PR})_{\text{corrigé}} \cdot \vec{X} = \overrightarrow{Q'Q} \cdot \vec{X} + Jx_{\text{initial}} \\
Jz_{\text{corrigé}} &= (\overrightarrow{PR})_{\text{corrigé}} \cdot \vec{Z} = \overrightarrow{Q'Q} \cdot \vec{Z} + Jz_{\text{initial}}
\end{aligned}
\tag{8}$$

Le principe de réglage des fraises 2 tailles est illustré par la figure 8.

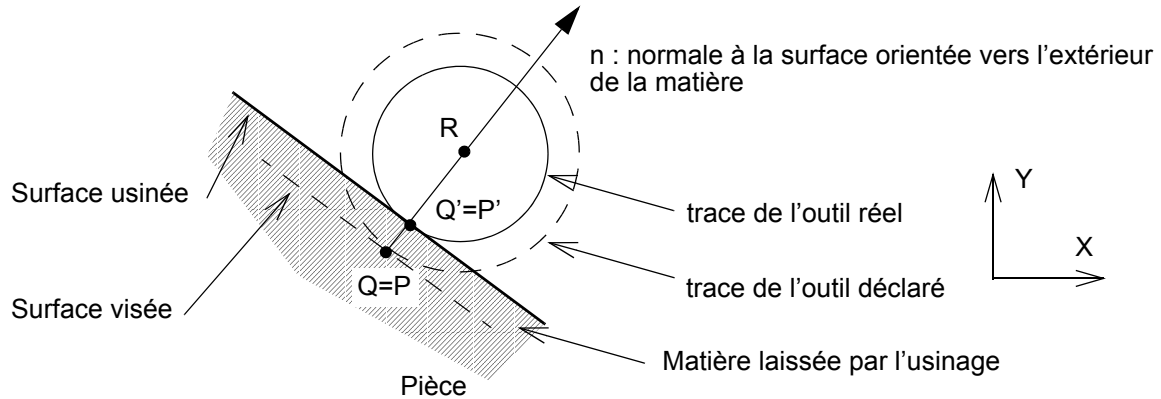


Figure 8 : principe de réglage des fraises 2 tailles

Pour effectuer la correction, on cherche à ce que Q' soit en Q (ou que P soit en P'). La correction à apporter est $\overrightarrow{P'P} = \overrightarrow{Q'Q}$:

$$(\overrightarrow{PR})_{\text{corrigé}} = \overrightarrow{P'R} = \overrightarrow{P'P} + (\overrightarrow{PR})_{\text{initial}} = \overrightarrow{Q'Q} + (\overrightarrow{PR})_{\text{initial}}
\tag{9}$$

que l'on projette sur Z et la normale à la surface pour obtenir respectivement la longueur corrigée et le rayon corrigé de l'outil.

$$\begin{aligned}
\text{Longueur corrigée} &= (\overrightarrow{PR})_{\text{corrigé}} \cdot \vec{Z} = \overrightarrow{Q'Q} \cdot \vec{Z} + \text{Longueur initiale} \\
\text{Rayon corrigé} &= (\overrightarrow{PR})_{\text{corrigé}} \cdot \vec{n} = \overrightarrow{Q'Q} \cdot \vec{n} + \text{Rayon initial}
\end{aligned}
\tag{10}$$

2.3. Conclusion

Les difficultés de formation rencontrées dans la mise en oeuvre des MOCN et de leur réglage nous ont conduit à cette modélisation vectorielle, qui présente, selon nous, deux avantages primordiaux :

- sa simplicité, qui permet de séduire un large public,
- son efficacité lorsqu'elle est confrontée au réel, c'est à dire dans un atelier au pied des machines-outils.

3. Application de la modélisation des MOCN à la mise en œuvre d'un palpeur sur MOCN.

Actuellement le palpé sur MOCN se développe de plus en plus, grâce aux possibilités accrues des Directeurs de Commande Numérique (DCN) et à l'intérêt économique qu'il représente. Le tableau 3 montre les différents types d'utilisation ainsi qu'une idée de leur importance respective.

Tableau 3 : différents types d'utilisation de palpeurs sur MOCN

| | Palpeur «pièce» | Palpeur «outil» |
|--------------------|-----------------|-----------------|
| Centre d'usinage | 70% | 5% |
| Centre de tournage | 10% | 15% |

En pratique on appelle palpeur «pièce» un palpeur qui vient en contact avec la pièce ou le porte-pièce. Le palpeur «outil» sert à palper les arêtes d'un outil en vue de la détermination du vecteur caractéristique de cet outil. Nous traitons ici des exemples de palpeur «pièce» sur centre d'usinage dont les principales applications concernent la préparation des usinages (centrage automatique sur un alésage par exemple) et la mesure de dimensions en vue d'un réglage automatique. Nous montrons que l'équation vectorielle, qui modélise la géométrie des MOCN, est un outil nécessaire pour la résolution des problèmes.

3.1. Modélisation de la géométrie des MOCN en vue du palpé

Dans la première partie de cet article nous avons défini un certain nombre de points (voir tableau 4) :

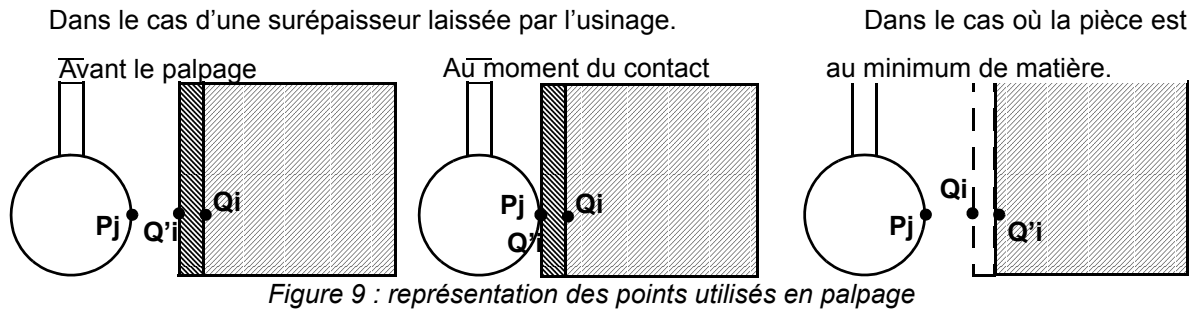
Tableau 4 : définition des points utilisés

| | |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| R | Point caractéristique de la liaison encastrement supposée parfaite entre le porte-outil et la machine. Il est défini par les surfaces de mise en position. On peut l'appeler «Point de Référence». |
| Om | Point coïncidant de R à la date de mise en référence des éléments mobiles. Ce point est appelé «origine mesure». |
| Oo | Point caractéristique de la liaison encastrement supposée parfaite entre la machine et le porte-pièce. Il est défini par les surfaces de mise en position. |
| Op | Point caractéristique de la liaison encastrement supposée parfaite entre le porte-pièce et la pièce. Il est défini par les surfaces de mise en position et appelé «origine pièce». |
| Opr | Origine du repère de programmation définie par le programmeur |
| P | Point caractéristique de l'outil : point générateur de l'outil. |
| C | Centre du rayon de bec de plaquette en tournage ou du rayon de bout en fraisage. |
| Qi | Point(s) programmé(s), visé(s), à atteindre (indice i) |

Nous définissons deux nouveaux points pour modéliser l'utilisation d'un palpeur sur une MOCN (voir tableau 5) et figure 9 :

Tableau 5 : définition des points utilisés avec un palpeur

| | |
|-----|---------------------------------------------------------------------|
| Pj | Points de contact du palpeur «pièce» avec la surface (indice j). |
| Q'i | Points mesurés par le palpeur sur la surface de la pièce (indice i) |



Sauf exception, les points Q_i et Q'_i ne sont pas confondus. En revanche nous faisons l'hypothèse que les points Q'_i et P_j sont confondus. Cette hypothèse, spécifique au palpage sur MOCN, est imposée par l'impossibilité actuelle des DCN de calculer raisonnablement cet écart.

A partir de ces points, il est possible de construire les nouveaux vecteurs caractéristiques suivants (voir tableau 6) :

Tableau 6 : définition des vecteurs caractéristiques du palpage sur MOCN

| | |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\overrightarrow{Q_i Q'_i}$ | Caractérise l'erreur due à l'usinage entre le point à atteindre et le point mesuré. |
| $\overrightarrow{Q'_i P_j}$ | Caractérise l'erreur entre le point mesuré et le point palpé. Dans la suite, ce vecteur sera supposé égal au vecteur nul. |
| $\overrightarrow{P_j R}$ | Caractérise le palpeur «pièce». |

Ainsi la nouvelle équation vectorielle utilisée en palpage est :

$$\overrightarrow{O_m R} = \overrightarrow{O_m O_o} + \overrightarrow{O_o O_p} + \overrightarrow{O_p O_{pr}} + \overrightarrow{O_{pr} Q_i} + \overrightarrow{Q_i Q'_i} + \overrightarrow{Q'_i P_j} + \overrightarrow{P_j R} \quad (11)$$

3.2. Constitution et principe de fonctionnement d'un palpeur à ouverture de contact

Le palpeur est constitué d'une partie fixe liée au carter du palpeur, d'une partie mobile et d'un ressort, comme l'illustre la figure 10. La partie fixe comporte une bague sur laquelle trois paires de billes sont positionnées à 120° , et reliées par un circuit électrique. La partie mobile comporte un stylet de palpage monté sur un tripode dont les branches sont des cylindres. Comme ces cylindres viennent reposer sur les paires de billes, la liaison entre la partie mobile et la partie fixe est une liaison encastrement isostatique. Elle est maintenue par le ressort.

En raison de l'isostatisme de cette liaison, dès qu'un effort de contact s'exerce sur la bille de palpage, les efforts résistants sur les six points d'appui varient rapidement jusqu'au décollement d'un des appuis. Le circuit électrique passant par les six points d'appui montés en série est ainsi ouvert et l'interface est capable de détecter cette ouverture par une augmentation de l'impédance du circuit électrique. Lorsque l'effort de contact entre la bille et la surface palpée est supprimé, la remise en position de la partie mobile par rapport à la partie fixe bénéficie d'une répétabilité excellente dont l'erreur induite est négligeable vis à vis des autres causes d'erreur. Ceci est vrai lorsque le palpeur est en bon état, c'est à dire lorsque les surfaces du contact sphère-cylindre n'ont pas été endommagées par un choc.

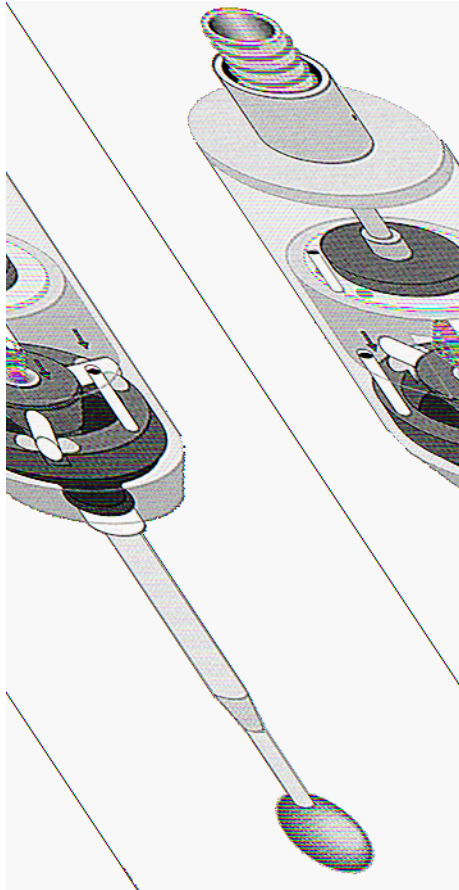


Figure 10 : constitution d'un palpeur (document RENISHAW [COOREVITS 91])

3.3. Principe d'acquisition des coordonnées d'un point sur une MOCN

Dans ce chapitre nous allons expliquer le principe de fonctionnement de l'acquisition d'un point. Mais auparavant il est essentiel de définir exactement de quel point il s'agit. Nous verrons que ce point fondamental prend tour à tour différents qualificatifs : fonctionnel, courant et saisi selon le point de vue choisi. Nous verrons également que parmi les trois coordonnées acquises, une seule nous intéresse et sera exploitée.

Nous avons défini précédemment le point R comme étant le point caractéristique de la liaison encastrement supposée parfaite entre le porte-outil et la broche. Du point de vue du mécanicien, il s'agit bien d'un point **fonctionnel**. Dans la terminologie des directeurs de commande (par exemple de type NUM), ce point est généralement appelé le point **courant**. Les coordonnées du point courant dans le repère mesure représentent les déplacements des éléments mobiles de la machine par rapport à une position de référence et sont stockées dans des registres accessibles en lecture seulement par l'utilisateur. Lorsqu'un palpé est effectué, la position de ce point courant est saisie ; autrement dit le point **saisi** est une image du point fonctionnel à un instant donné. Toujours dans la terminologie des directeurs de commande, ce point est appelé le point «courant sur interruption» et ses coordonnées sont stockées dans des registres accessibles en lecture seulement là aussi.

Le déroulement de l'acquisition peut être décrit de manière séquentielle :

- La C.N. exécute le bloc permettant de positionner le centre de bille du palpeur au point d'approche.
- La C.N. lance l'exécution du bloc contenant la fonction de palpage (G10 sur NUM) en déplaçant le palpeur vers la surface à une vitesse programmée.
- Le processeur C.N. est alors en attente d'une interruption venant de l'interface du palpeur via l'automate programmable.
- Le contact entre la bille du palpeur et la surface a lieu.
- L'interface détecte une augmentation de la résistance interne du circuit des contacts.
- Lorsque la résistance atteint la valeur de 3 KOhms, c'est à dire lorsque le contact est pratiquement ouvert, l'interface envoie le signal d'interruption à la C.N.
- Lorsque la C.N. reçoit ce signal, elle recopie le contenu des registres du point courant dans les registres du point courant sur interruption, et cela en priorité par rapport aux autres tâches.
- La C.N. arrête le déplacement du palpeur ; c'est la fin d'exécution du bloc contenant la fonction de palpage.
- La C.N. exécute le bloc suivant.

En plus de l'acquisition normale, l'ensemble du système de palpage doit être capable de détecter une anomalie de palpage. Celle-ci peut avoir plusieurs raisons comme l'absence de surface rencontrée ou le mauvais fonctionnement de l'interface. L'absence de contact entre le palpeur et une surface peut provenir d'une erreur de programmation (coordonnée du point Q à atteindre en dehors de la matière par exemple) ou d'une rupture du stylet. Un dysfonctionnement de l'interface peut entraîner un accostage de la surface sans acquisition du point saisi, suivi d'un dépassement de celui-ci jusqu'au point à atteindre. Si le dépassement est supérieur à la sur-course du palpeur, il y a un important risque de rupture du stylet. Dans tous les cas, la fonction de palpage (G10 sur NUM 760) ne gère pas elle-même ces anomalies ; il faut donc programmer la procédure de gestion. Le test de dysfonctionnement regarde la valeur contenue dans le registre d'interruption : si, à la fin d'exécution du bloc contenant la fonction G10, les registres d'interruption ont une valeur inférieure à 99999999 alors il y a eu acquisition d'un point, sinon il y a une erreur. Pour que cela soit possible, au début d'exécution du bloc contenant la fonction G10, la C.N. écrit la valeur 99999999 dans tous les registres sur interruption. En pratique il suffit d'en tester un seul sur les trois, quel que soit la direction de palpage.

3.4. Traitement des coordonnées acquises

Maintenant que nous avons vu la modélisation vectorielle des MOCN, le principe de fonctionnement d'un palpeur à ouverture de contact et l'acquisition des coordonnées d'un point sur une MOCN, il nous faut aborder le traitement des coordonnées acquises. Dans un premier temps, pour effectuer ce traitement nous ferons l'hypothèse que les caractéristiques du palpeur sont connues, puis, dans un second temps, nous verrons comment est étalonné un palpeur sur une MOCN.

Le traitement des coordonnées acquises est indispensable car dans la plupart des cas l'obtention d'une coordonnée du point saisi est insuffisante. C'est la coordonnée du point mesuré, sur une surface de la pièce par exemple, qui est intéressante. Pour passer de l'une à l'autre il faut tenir compte des caractéristiques du palpeur.

3.4.1. Vecteur caractéristique du palpeur

Le vecteur caractéristique du palpeur est \overrightarrow{PjR} . Seule la composante de ce vecteur suivant la direction de palpation est utilisée. Elle dépend de plusieurs paramètres : le rayon de la bille, le défaut de coaxialité entre l'axe du stylet et l'axe de la broche et la variation de précourse du capteur lui-même, due à l'angle entre la direction de palpation et l'orientation du tripode. Bien sûr, tous ces paramètres peuvent être déterminés indépendamment les uns des autres avec plus ou moins de facilité. Toutefois un étalonnage du palpeur reste nécessaire pour les prendre en compte globalement et intégrer les autres paramètres dont l'influence est difficilement quantifiable comme la vitesse d'accostage, le défaut de la liaison encastrement palpeur-broche, le défaut de forme de la bille et le temps de réponse de la chaîne d'acquisition.

3.4.2. Expression des coordonnées du point mesuré dans le repère « mesure »

En reprenant l'équation vectorielle du palpation nous obtenons l'expression du vecteur $\overrightarrow{OmQ'i}$:

$$\overrightarrow{OmR} = \overrightarrow{OmOo} + \overrightarrow{OoOp} + \overrightarrow{OpOpr} + \overrightarrow{OprQi} + \overrightarrow{QiQ'i} + \overrightarrow{Q'iPj} + \overrightarrow{PjR} \quad (12)$$

(on rappelle que $\overrightarrow{Q'iPj}$ est supposé nul) d'où, il vient :

$$\overrightarrow{OmQ'i} = \overrightarrow{OmR} - \overrightarrow{PjR} \quad (13)$$

dans laquelle $\overrightarrow{OmQ'i}$ représente la position inconnue du point mesuré dans le repère « mesure », \overrightarrow{OmR} représente la position connue du point saisi dans le repère « mesure » et \overrightarrow{PjR} représente la caractéristique supposée connue du palpeur « pièce ».

Les trois équations scalaires relatives à l'équation vectorielle précédente sont :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{OmQ'i} \cdot \vec{X} &= \overrightarrow{OmR} \cdot \vec{X} - \overrightarrow{PjR} \cdot \vec{X} \\ \overrightarrow{OmQ'i} \cdot \vec{Y} &= \overrightarrow{OmR} \cdot \vec{Y} - \overrightarrow{PjR} \cdot \vec{Y} \\ \overrightarrow{OmQ'i} \cdot \vec{Z} &= \overrightarrow{OmR} \cdot \vec{Z} - \overrightarrow{PjR} \cdot \vec{Z} \end{aligned} \quad (14)$$

Ainsi on utilise l'équation scalaire sur l'axe X lorsque le palpation a lieu dans la direction de l'axe X, sur l'axe Y lorsque le palpation a lieu dans la direction de l'axe Y et sur l'axe Z lorsque le palpation a lieu dans la direction de l'axe Z.

3.4.3. Champ d'application du palpation sur MOCN

D'un point de vue pratique on peut se poser les questions suivantes. Est-il possible de palper un point en suivant une direction non parallèle aux axes principaux de la machine ? La machine autorise

un déplacement du palpeur en interpolation linéaire suivant plusieurs axes. Elle est capable également de saisir correctement les coordonnées du point saisi. Mais, actuellement, les possibilités de calcul des directeurs de commande sont limitées et empêchent le traitement de la coordonnée du point saisi dans ce cas. De plus le palpé sur MOCN ne doit pas se substituer à la métrologie d'une pièce sur MMT pour des raisons de coût horaire et de précision. Dans la pratique, 99% des palpés sur MOCN sont effectués suivant une des directions principales de la machine. Est-il possible de palper une surface dont la normale n'est pas parallèle à la direction de palpé ? Là encore, la réponse est non et pour les mêmes raisons. C'est donc à la fois la fonction principale des MOCN et les possibilités de traitement des directeurs de commande qui limitent les applications de palpé sur MOCN. Cela dit, même restreint, le champ d'application du palpé sur MOCN couvre une dizaine de cas typiques dont la rentabilité économique peut être justifiée.

3.4.4. Sous-programme de palpé d'un point

Le sous-programme de palpé d'un point que nous utilisons peut être représenté par la figure 11. Elle montre les six entrées nécessaires et la sortie obtenue. L'équation traduit le passage du point saisi au point mesuré par la prise en compte des caractéristiques du palpeur.

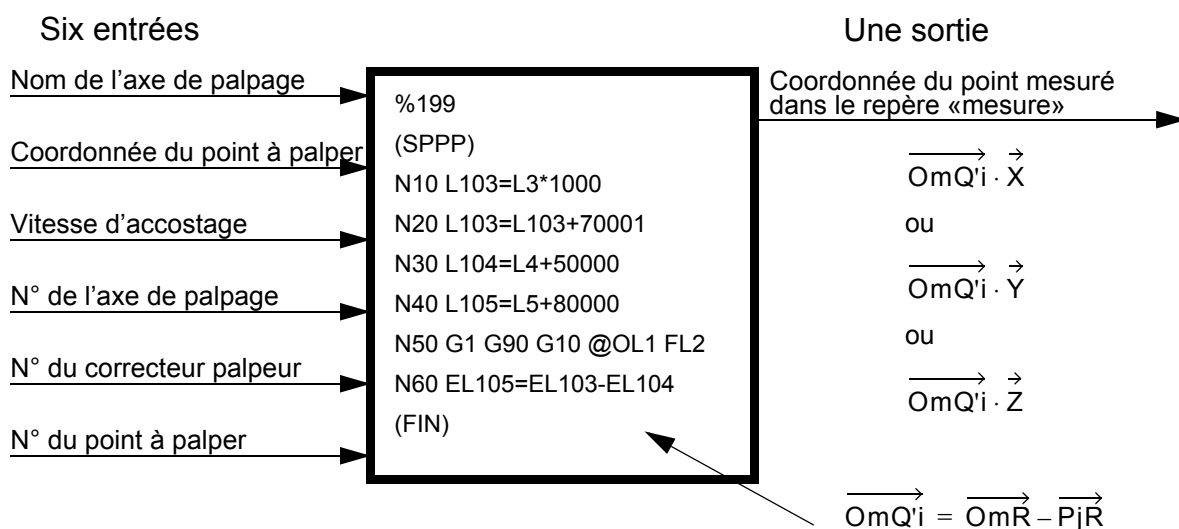


Figure 11 : boîte noire représentant le sous-programme de palpé d'un point

Comme toute «boîte noire», ce sous-programme doit impérativement être accompagné d'une notice d'utilisation pour permettre une programmation correcte sans en connaître le contenu exact.

3.4.5. Expression des coordonnées du point mesuré dans le repère de programmation

Dans certain cas il est nécessaire d'obtenir les coordonnées du point mesuré dans le repère de programmation. L'équation vectorielle (15) du palpé nous donne l'expression du vecteur $\overrightarrow{OprQ'i}$ en fonction du vecteur $\overrightarrow{OmQ'i}$ (obtenu précédemment) et des différentes caractéristiques permettant de passer de l'origine mesure à l'origine programme.

$$\overrightarrow{OprQ'i} = \overrightarrow{OmQ'i} - (\overrightarrow{OmOo} + \overrightarrow{OoOp} + \overrightarrow{OpOpr}) \quad (15)$$

A la lecture de cette équation vectorielle, on voit que les coordonnées du point mesuré dans le repère de programmation dépendent non seulement de ce que l'on a en sortie du sous-programme de palpéage d'un point mais aussi des caractéristiques définissant la machine, le porte-pièce et la pièce. Ce lien se répercute directement sur la précision obtenue. Ainsi, lorsque cela est possible, on préfère exploiter directement les coordonnées du point mesuré dans le repère mesure.

3.4.6. Expression des caractéristiques d'étalonnage du palpeur

Il est temps de regarder comment les caractéristiques d'étalonnage du palpeur sont déterminées. C'est la procédure d'étalonnage du palpeur. A la différence des MMT, l'étalonnage pratiqué sur une sphère étalon n'est pas nécessaire. Sur MOCN, l'étalonnage du palpeur sur une bague étalon est suffisant (voir figure 12). Nous allons montrer pourquoi.

Si nous reprenons l'équation vectorielle du palpéage :

$$\overrightarrow{OmR} = \overrightarrow{OmOo} + \overrightarrow{OoOp} + \overrightarrow{OpOpr} + \overrightarrow{OprQi} + \overrightarrow{QiQ'i} + \overrightarrow{Q'iPj} + \overrightarrow{PjR} \quad (16)$$

d'où, il vient :

$$\overrightarrow{PjR} = \overrightarrow{OmR} - (\overrightarrow{OmOo} + \overrightarrow{OoOp} + \overrightarrow{OpOpr} + \overrightarrow{OprQi} + \overrightarrow{QiQ'i} + \overrightarrow{Q'iPj}) \quad (17)$$

Le vecteur $\overrightarrow{Q'iPj}$ est toujours supposé nul. De plus, le vecteur $\overrightarrow{QiQ'i}$ qui caractérise l'erreur due à l'usinage entre le point à atteindre et le point mesuré, est également nul lors de cette procédure. Ainsi il vient l'expression suivante :

$$\overrightarrow{PjR} = \overrightarrow{OmR} - (\overrightarrow{OmOo} + \overrightarrow{OoOp} + \overrightarrow{OpOpr}) - \overrightarrow{OprQi} \quad (18)$$

dans laquelle on voit que la caractéristique d'étalonnage du palpeur dépend évidemment de la position du point saisi mais aussi des caractéristiques «machine», «porte-pièce» (ici le support de la bague), «pièce» (ici la bague étalon). La position de Opr obtenue par centrage à l'aide d'un comparateur à levier par exemple, est donc déterminante pour la précision désirée.

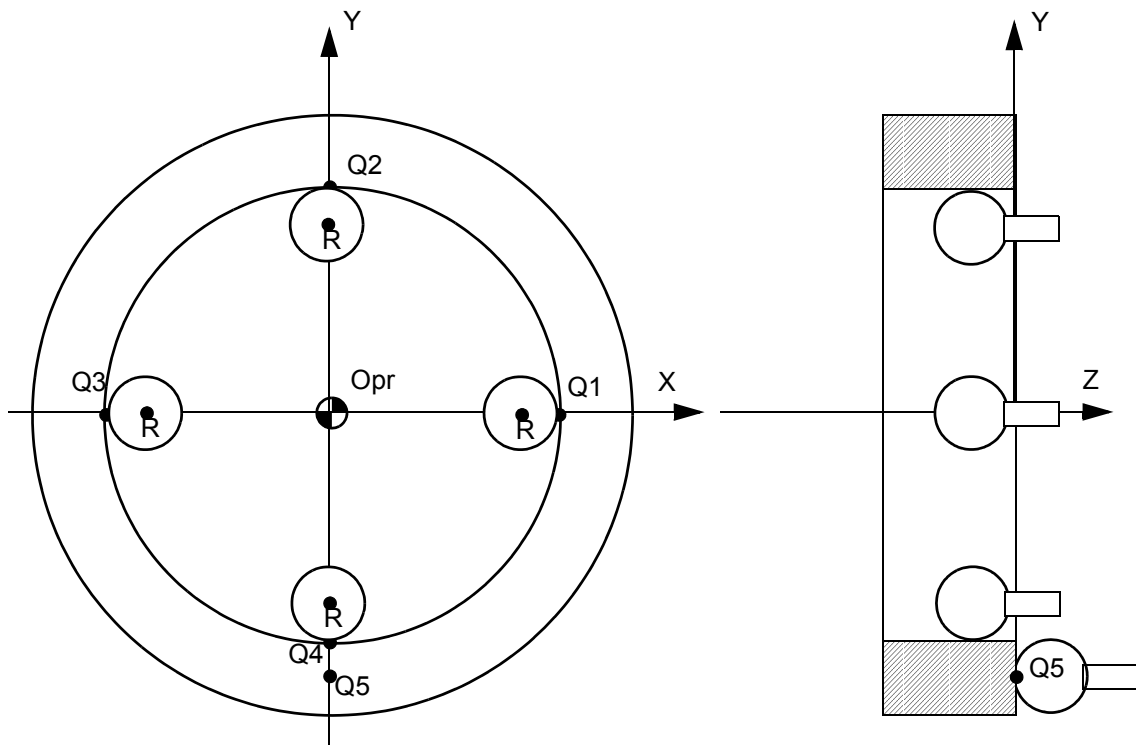


Figure 12 : étalonnage du palpeur sur une bague étalon

Il faut palper les 5 points Q_i [Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5] sur la bague étalon.

La position des différents points P_j sur le palpeur est donnée par la figure 13 qui montre que les caractéristiques d'étalonnage du palpeur sont au nombre de 5 selon le sens d'accostage du palpeur

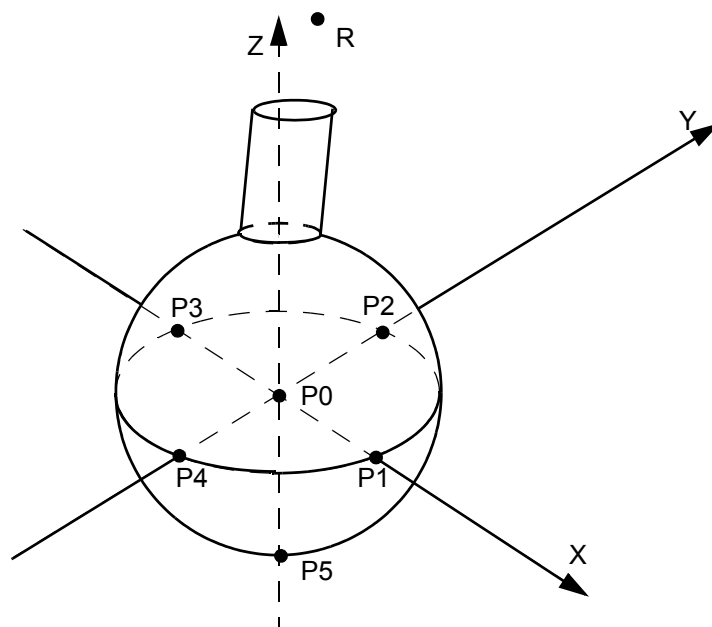


Figure 13 : points caractéristiques de l'étalonnage d'un palpeur utilisé sur une MOCN

Le tableau 7 donne le sens d'accostage, la grandeur scalaire et son signe pour chacun des 5 points. Le point P_0 , uniquement utilisé pour le pilotage du palpeur vers les points d'approche, a été ajouté. La

dernière colonne est donnée à titre indicatif pour les lecteurs utilisant les Directeurs de Commande Numérique de type NUM 760.

Tableau 7 : caractéristiques d'étalonnage du palpeur

| Point Pj | Sens d'accostage | Grandeur scalaire | Signe de la valeur | Registre de stockage de la valeur dans D.C.N. de type NUM 760 |
|----------|--------------------------------|---------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------|
| P1 | suivant X+ | $\overrightarrow{P_1R} \cdot \vec{X}$ | négatif | E50028 |
| P2 | suivant Y+ | $\overrightarrow{P_2R} \cdot \vec{Y}$ | négatif | E50030 |
| P3 | suivant X- | $\overrightarrow{P_3R} \cdot \vec{X}$ | positif | E50029 |
| P4 | suivant Y- | $\overrightarrow{P_4R} \cdot \vec{Y}$ | positif | E50031 |
| P5 | suivant Z- | $\overrightarrow{P_5R} \cdot \vec{Z}$ | positif | E50032 |
| P0 | mesuré sur banc de pré réglage | $\overrightarrow{P_0R} \cdot \vec{Z}$ | positif | E50025 |

3.5. Exemples d'applications de palpé sur MOCN

3.5.1. Préparation de l'usinage : correction du repère lié à l'entité

Le repère lié à l'entité est défini dans le repère de programmation par la position de son origine et l'orientation de ses axes. On peut corriger la position de l'origine du repère liée à l'entité de multiples manières :

- 1- en modifiant les correcteurs d'outil utilisés pour l'usinage des surfaces concernées,
- 2- en modifiant les coordonnées des trajectoires programmées,
- 3- en modifiant la valeur du décalage programmé.

Nous étudions ici seulement cette dernière solution avec le centrage sur un alésage, illustré par la figure 13. Le problème est de déterminer le centre de l'alésage obtenu dans une phase précédente par exemple.

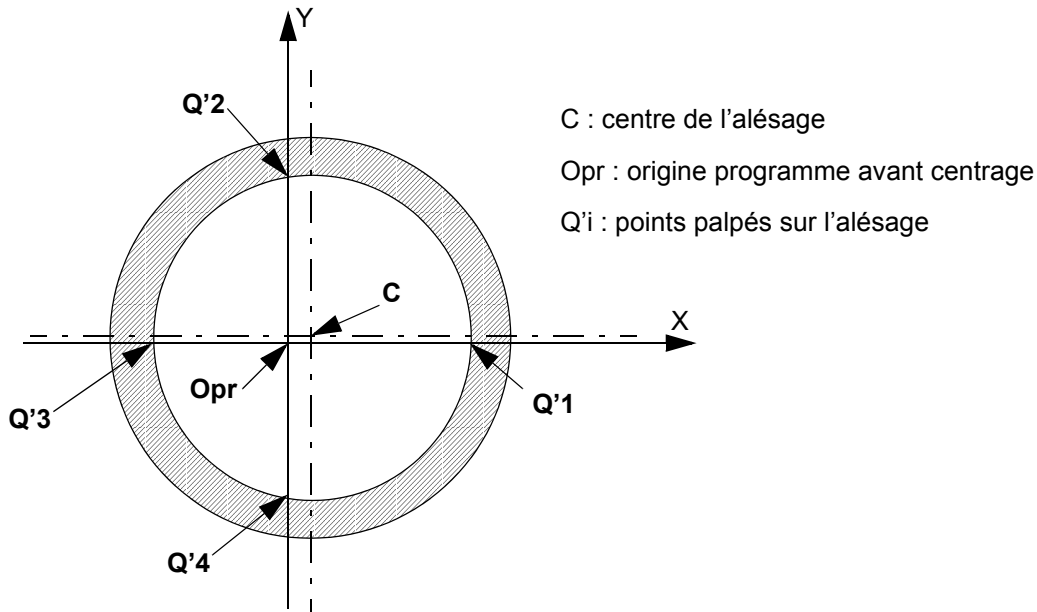


Figure 14 : centrage sur un alésage existant

Pour tous les points palpés Q'i on peut écrire l'équation vectorielle suivante :

$$\overrightarrow{OprC} = \overrightarrow{OprOm} + \overrightarrow{OmQ'i} + \overrightarrow{Q'iC} \quad (19)$$

et en particulier pour les points Q'1 et Q'3 situés sur l'axe X :

$$\overrightarrow{OprC} = \overrightarrow{OprOm} + \overrightarrow{OmQ'1} + \overrightarrow{Q'1C} \quad (20)$$

$$\overrightarrow{OprC} = \overrightarrow{OprOm} + \overrightarrow{OmQ'3} + \overrightarrow{Q'3C} \quad (21)$$

en faisant la somme de ces deux dernières équations on obtient :

$$2 \cdot \overrightarrow{OprC} = 2 \cdot \overrightarrow{OprOm} + \overrightarrow{OmQ'1} + \overrightarrow{OmQ'3} + \overrightarrow{Q'1C} + \overrightarrow{Q'3C} \quad (22)$$

que l'on projette sur l'axe X pour obtenir :

$$2 \cdot \overrightarrow{OprC} \cdot \vec{X} = 2 \cdot \overrightarrow{OprOm} \cdot \vec{X} + \overrightarrow{OmQ'1} \cdot \vec{X} + \overrightarrow{OmQ'3} \cdot \vec{X} + \overrightarrow{Q'1C} \cdot \vec{X} + \overrightarrow{Q'3C} \cdot \vec{X} \quad (23)$$

or, par définition, C se trouve sur la médiatrice du segment [Q'1Q'3] ; on a donc :

$$\overrightarrow{Q'1C} \cdot \vec{X} + \overrightarrow{Q'3C} \cdot \vec{X} = \vec{0} \quad (24)$$

que l'on reporte dans l'équation (23) pour obtenir enfin :

$$\overrightarrow{OprC} \cdot \vec{X} = -(\overrightarrow{OprOm} \cdot \vec{X}) + \frac{\overrightarrow{OmQ'1} \cdot \vec{X} + \overrightarrow{OmQ'3} \cdot \vec{X}}{2} \quad (25)$$

dans laquelle $\overrightarrow{OmQ'1} \cdot \vec{X}$ et $\overrightarrow{OmQ'3} \cdot \vec{X}$ sont obtenus en sortie du sous-programme de palpé d'un point (SPPP) à l'équation (14).

3.5.2. Mesure des dimensions fabriquées sur la pièce : correction des dimensions de l'outil

On peut corriger la longueur d'un outil grâce à la connaissance de la position de la surface usinée par lui.

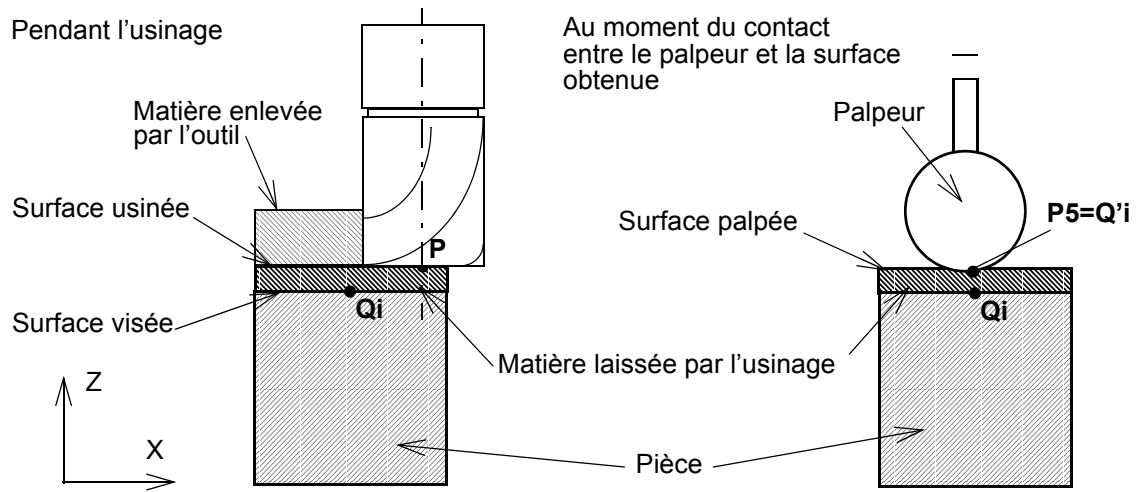


Figure 15 : correction de longueur d'outil

Soit $Q'i$ le point mesuré et Q_i le point visé, le vecteur $\overrightarrow{Q'iQ_i}$ représente la correction à apporter aux dimensions de l'outil. On a :

$$\overrightarrow{Q'iQ_i} = \overrightarrow{Q'iO_m} + \overrightarrow{O_mO_o} + \overrightarrow{O_oO_p} + \overrightarrow{O_pO_{pr}} + \overrightarrow{O_{pr}Q_i} \quad (26)$$

que l'on projette sur l'axe Z pour obtenir :

$$\overrightarrow{Q'iQ_i} \cdot \vec{Z} = -\overrightarrow{O_mQ'i} \cdot \vec{Z} + (\overrightarrow{O_mO_o} + \overrightarrow{O_oO_p} + \overrightarrow{O_pO_{pr}} + \overrightarrow{O_{pr}Q_i}) \cdot \vec{Z} \quad (27)$$

dans laquelle $\overrightarrow{O_mQ'i} \cdot \vec{Z}$ est la sortie du sous-programme de palpéage d'un point (SPPP) vu à l'équation(14).

On peut aussi corriger le rayon d'un outil grâce à la connaissance soit de la position d'une surface usinée par lui soit de la dimension entre deux surfaces usinées par lui avec le même correcteur de rayon d'outil.

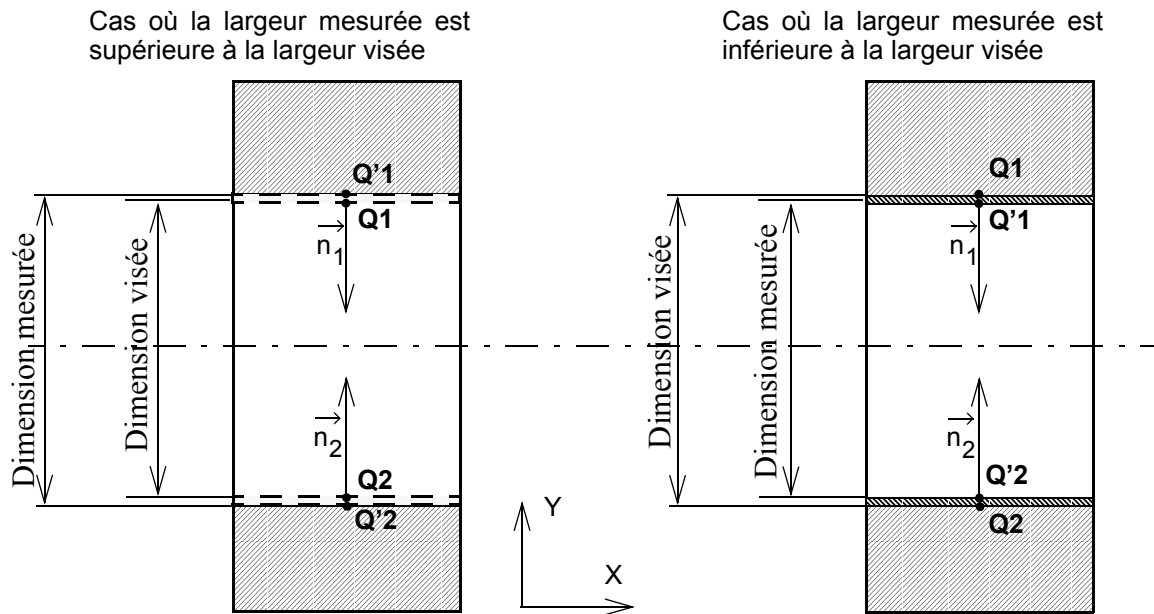


Figure 16 : correction de rayon d'outil

Il faut, dans ce cas, tenir compte des normales \vec{n}_1 et \vec{n}_2 comme nous l'avons montré dans la première partie.

Soit Q'1 le point mesuré et Q1 le point visé, la correction de rayon à appliquer à l'outil qui a usiné la surface est donnée par le produit scalaire $\overrightarrow{Q'1Q1} \cdot \vec{n}_1$. Comme $\vec{n}_1 = -\vec{Y}$ on a :

$$\overrightarrow{Q'1Q1} \cdot \vec{n}_1 = -\overrightarrow{Q'1Q1} \cdot \vec{Y} \text{ et l'on obtient :}$$

$$\overrightarrow{Q'1Q1} \cdot \vec{n}_1 = -(-\overrightarrow{OmQ'1} + \overrightarrow{OmOo} + \overrightarrow{OoOp} + \overrightarrow{OpOpr} + \overrightarrow{OprQ1}) \cdot \vec{Y} \quad (28)$$

Soit Q'2 le point mesuré et Q2 le point visé, la correction de rayon à appliquer à l'outil qui a usiné la surface 2 est donnée par le produit scalaire $\overrightarrow{Q'2Q2} \cdot \vec{n}_2$. Comme $\vec{n}_2 = \vec{Y}$ on a :

$$\overrightarrow{Q'2Q2} \cdot \vec{n}_2 = \overrightarrow{Q'2Q2} \cdot \vec{Y} \text{ et l'on obtient :}$$

$$\overrightarrow{Q'2Q2} \cdot \vec{n}_2 = (-\overrightarrow{OmQ'2} + \overrightarrow{OmOo} + \overrightarrow{OoOp} + \overrightarrow{OpOpr} + \overrightarrow{OprQ2}) \cdot \vec{Y} \quad (29)$$

Si les deux surfaces ont été usinées avec le même outil, la correction de rayon est égale à la moyenne des deux corrections, soit :

$$\frac{\overrightarrow{Q'1Q1} \cdot \vec{n}_1 + \overrightarrow{Q'2Q2} \cdot \vec{n}_2}{2} = \frac{(\overrightarrow{OmQ'1} - \overrightarrow{OmQ'2} + \overrightarrow{Q1Opr} + \overrightarrow{OprQ2}) \cdot \vec{Y}}{2} \quad (30)$$

dans laquelle $\overrightarrow{OmQ'1} \cdot \vec{X}$ et $\overrightarrow{OmQ'2} \cdot \vec{X}$ sont obtenus en sortie du sous-programme de palpéage d'un point (SPPP) (voir équation (14)) et dans laquelle $\overrightarrow{Q1Opr} + \overrightarrow{OprQ2}$ représente la dimension visée et «signée» de la rainure.

3.6. Conclusion

Il faut tout d'abord constater la carence actuelle des systèmes de CFAO en matière de fonctionnalités de palpéage sur MOCN. A ce jour, il n'existe pas de progiciels proposant une programmation spécifique des palpeurs sur MOCN et encore moins une programmation du traitement des données.

Par ailleurs, le palpéage sur MOCN met en œuvre plusieurs intervenants (environ 5) : le constructeur du directeur de commande numérique, le constructeur de la machine, parfois l'intégrateur du système (interfaces + modification du programme automate), le bureau des méthodes pour la programmation et le constructeur du palpeur et de l'interface. A titre d'exemple on peut citer les noms suivants pour l'une des machines du site de CACHAN : NUM, REALMECA, PROGRETIX et RENISHAW.

Le palpéage sur MOCN présente donc encore actuellement une réelle difficulté de programmation due à l'absence de CFAO, due à l'utilisation intensive de toutes les fonctionnalités évoluées des DCN (registres en particuliers) pas toujours maîtrisées par les programmeurs, due au manque de structuration de la première version des sous-programmes NUM, due à la multiplicité des intervenants impliqués pour que cette technologie soit opérationnelle, due au manque de formation des chefs d'atelier sur les possibilités du palpéage sur MOCN, due à l'amalgame entre métrologie tridimensionnelle sur machine à mesurer en salle climatisée et palpéage dans un environnement d'usinage, etc...

Néanmoins, le palpéage sur MOCN commence à être une réalité industrielle qui s'inscrit dans le sens des démarches d'amélioration de la qualité des processus d'usinage et de production en général. Avec la modélisation vectorielle des MOCN nous espérons contribuer à la démystification et au développement du palpéage sur MOCN.

4. Bibliographie

- [NF E 60-023] AFNOR - Cônes d'emmanchement, nez de broches à conicité 7 / 24 pour changement manuel d'outil - norme AFNOR NF E 60-023 - Mai 1985
- [NF Z 68-036] AFNOR - Commande numérique des machines, format de programme et description des mots adresses, partie 2 : codage et mise à jour des fonctions préparatoires G et des fonctions auxiliaires universelles M - norme AFNOR NF Z 68-036 - octobre 1988
- [NF Z 68-037] AFNOR - Commande numérique des machines, format de programme et description des mots adresses, partie 3 : codage des fonctions auxiliaires M (classe 1 à 9) - norme AFNOR NF Z 68-036 - octobre 1988
- [NF ISO 3592] AFNOR - Informations de sortie des processeurs CN, structure logique et mots majeurs - norme ISO 3592, identique norme AFNOR Z 65-510 - octobre 1980
- [NF ISO 841] ISO - Nomenclature des axes et des mouvements, pour la commande numérique des machines - norme ISO 841, équivalent norme AFNOR NF Z 68-020 - décembre 1968
- [NF ISO 4342] ISO - Commande numérique des machines, données d'entrée des processeurs CN, langage de référence de base pour programme de pièce - norme ISO 4342, norme AFNOR NF Z 68-040 - octobre 1988
- [NF ISO 4343] AFNOR - Informations de sortie des processeurs CN, éléments mineurs des enregistrements de type 2000, (instructions post-processeur) - norme ISO 4343, équivalent norme AFNOR Z 65-511 - décembre 1977
- [NF ISO 6983-1] ISO - Commande numérique des machines, format de programme et description des mots adresses, partie 1 : format de données pour les équipements de commande de mise en position, de déplacement linéaire et de contournage - norme ISO 6983-1, norme AFNOR NF Z 68-035 - octobre 1988
- [VERGNAS 82] Vergnas (J) - Usinage - Dunod - août 1982
- [LONGEOT 85] Longeot (H), Jourdan (L) - Fabrication Industrielle - Dunod - octobre 1985
- [VERGNAS 85] Vergnas (J) - Exploitation des machines-outils à commande numérique - pyc édition - octobre 1985
- [INTARTAGLIA 86] Intartaglia (R), Lecoq (P) - Guide pratique de la commande numérique - Dunod - février 1986
- [COOREVITS 91] Coorevits (T), David (J-M), Rosenbaum (M) - Le contrôle tridimensionnel sur machine à mesurer et machine-outil - Renishaw / Techno-Nathan - 1991
- [LAFFARGUE 94] Laffargue (A) - Mise en œuvre et réglage d'une cellule élémentaire d'usinage - Mémoire d'ingénieur du CNAM - 1994
- [MATHIEU 91] Mathieu (L), Weill (R) - Model for machin tool setting as a function of position error - CIRP international working seminar on computer aided tolerancing, Pennstate University - 16-17 mai 1991
- [MERY 97] Méry (B) - Machines à commande numérique - Hermes - Avril 1997