

# Amélioration de la précision d'un robot d'usinage

**Guillaume CARRIERE<sup>(a)</sup>, Mourad BENOUSSAAD<sup>(b)</sup>, Vincent WAGNER<sup>(b)</sup>, Gilles DESSEIN<sup>(b)</sup>, Benjamin BONIFACE<sup>(a)</sup>**

*(a) Lauak innovative solution, Bagnères de Bigorre, France.*

*Mail : [guillaume.carriere@nimitech.fr](mailto:guillaume.carriere@nimitech.fr) ; [benjamin.boniface@nimitech.fr](mailto:benjamin.boniface@nimitech.fr)*

*(b) Laboratoire Génie de Production, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, Université de Toulouse, Tarbes Cedex, France. Mail : [mourad.benoussaad@enit.fr](mailto:mourad.benoussaad@enit.fr) ;*

*[vincent.wagner@enit.fr](mailto:vincent.wagner@enit.fr) ; [gilles.dessein@enit.fr](mailto:gilles.dessein@enit.fr)*

## Résumé :

*L'industrie d'aujourd'hui est fortement dépendante des robots pour une large gamme d'applications telles que le pick and place, l'assemblage et le soudage de matériaux. Les applications d'usinage robotisées pour le pré-usinage de matériaux durs ou les opérations de finition avec des tolérances réduites sont des secteurs qui se développeront au cours des prochaines années. L'application d'usinage de moules de réflecteur pour le spatial demande une tolérance d'usinage très fine. Le robot manque de raideur et il faut mettre en place des méthodes de correction pour améliorer sa précision et sa réponse aux exigences de cette tâche.*

*Pour cela, nous avons choisi de mettre en place deux méthodes étudiées séparément. Tout d'abord, un étalonnage des paramètres géométriques de son modèle de pilotage permet d'améliorer la précision de pose du robot. Ensuite une méthode de correction miroir<sup>[1]</sup> permet de corriger sa trajectoire à partir de l'erreur déterminée entre les trajectoires mesurées et programmées.*

## Abstract :

*Our industries are highly dependent on robots for a wide range of applications such as material transfer, assembly, and welding. Robotic machining application for pre-machining of hard materials or finishing operation with reduced tolerances is a sector which will be growing over the next few years. The reflector mold machining application for space requires a very fine machining tolerance. The robot lacks stiffness and it is necessary to implement correction methods to improve its accuracy and meet the requirements of this task.*

*For that, we have chosen to implement two complementary methods. First of all, a calibration of the geometrical parameters of its control model makes it possible to improve the laying accuracy of the robot. Then a mirror correction method<sup>[1]</sup> corrects its trajectory from the determined error between the measured and programmed trajectories.*

**Mots clefs :** Usinage Robot ; Identification paramétrique ; Modèle géométrique ; Correction miroir

# 1 Introduction

## 1.1 Contexte de l'étude

Les robots industriels, par leur agilité, leur flexibilité et un faible coût d'investissement au regard des machines spécifiques, prennent une place de plus en plus importante dans l'industrie. Cependant, le robot ne répond objectivement pas aux exigences de l'usinage de précision. Conçu pour du pick and place, il est peu rigide et offre bien souvent une faible précision malgré une répétabilité de l'ordre du dixième de millimètre <sup>[2]</sup>. De ce constat, la présente étude vise à améliorer ces caractéristiques du robot pour répondre aux exigences du spatial.

L'application visée est la réalisation de moule de réflecteur en composites de fibre de carbone. Le critère le plus critique à la réalisation de ces pièces est le RMS (la moyenne quadratique des écarts de hauteur du profil par rapport au profil moyen), qui caractérise la qualité dimensionnelle de la pièce. Il doit être limité à une erreur globale de 50  $\mu\text{m}$  sur l'écart à la forme CAO. Pour atteindre ce critère de performance, notre moyen doit passer par des étapes de correction exposées dans cet article.

Parmi les travaux d'amélioration de la précision des robots manipulateurs, certains portent sur la modélisation de la rigidité <sup>[2]</sup>. Considérant la dynamique, la flexibilité et tous les éléments du robot, ces modèles permettent d'obtenir une grande précision mais avec des approches peu applicables pour une utilisation industrielle.

Dans cette étude, deux méthodes sont présentées. La précision de la pose du robot en statique peut être améliorée par la mise en place d'une calibration du robot pour modifier son modèle géométrique par une considération plus précise de ces éléments géométriques réels.

Ensuite, la correction miroir permet de corriger la position de l'effecteur en prenant en compte l'écart entre la position souhaitée et la position réelle. Contrairement à la calibration, cette méthode corrige non seulement les problèmes de précision de pose du robot mais également les déviations de l'effecteur dues aux contraintes du processus de coupe.

Après avoir présenté le contexte et le moyen à caractériser (section 1.2), cette étude décrit la méthode de calibration (section 2) et la méthode de correction miroir (section 3). Les résultats mettent en évidence un gain de précision statique que peut apporter la calibration et l'amélioration du suivi de la trajectoire par la correction de miroir.

## 1.2 Présentation du Robot Kuka KR360 et des moyens de mesure

Le robot KUKA KR360 utilisé est un robot manipulateur sériel à chaîne ouverte (*figure 1*). Il possède sept corps notés C0, C1, ..., C6 supposés rigides dans cette étude et six articulations rotoïdes.

Il possède 6 degrés de liberté (ddl), les trois premiers sont le "porteur" du robot et les trois derniers le poignet. L'effecteur du robot (broche d'usinage) est modélisé et considéré comme une articulation supplémentaire. Il est donc question de 7ddl. En statique, le critère de performance visé est la précision de pose cependant, cette information n'est pas communiquée par le constructeur. Bien que le robot soit répétable au dixième de millimètre <sup>[3]</sup>, nous mesurerons par la suite son erreur de pose pour quantifier cette précision.



Figure 1: KUKA KR360 et moyens de mesure

La figure 1 illustre également les moyens de mesure utilisés ci-dessous. Le Metrascan de marque Ametek, avec une précision de 0.3mm pour une enveloppe de travail de près de  $8m^3$  et une période d'échantillonnage de 32ms nous permet de relever la position réelle de l'effecteur du robot. Une table à capteurs piézométriques Kistler 9257B est positionnée sur le plateau diviseur du robot pour renseigner les efforts d'usinage pendant les mesures.

Seront également utilisées les positions théoriques de l'outil données par la commande. Une étape de recalage temporel permet de corrélérer l'ensemble des données pour analyser les déviations.

## 2 Méthode de calibration

Le robot industriel est accompagné d'une commande intégrant son modèle géométrique et ses paramètres géométriques. Les valeurs théoriques de ces paramètres données par le constructeur ne tiennent pas compte des erreurs de fabrication et d'assemblage. Le but d'une calibration (ou étalonnage) est d'identifier et de corriger les erreurs géométriques du robot et ainsi améliorer la précision absolue de la pose. Elle s'appuie sur quatre étapes <sup>[4]</sup> : la modélisation, qui permet d'exprimer la configuration cartésienne du robot en fonction des paramètres géométriques, la désignation des paramètres identifiables, le modèle d'identification à partir d'un algorithme de minimisation et la compensation. Cette dernière étape ne sera pas traitée dans cet article.

### 2.1 Modélisation du robot

Cette modélisation nécessite avant tout une modélisation géométrique directe (MGD) du robot. Le MGD est basée sur la modélisation de Denavit-Hartenberg modifiée <sup>[5]</sup>. Il donne la transformation de l'espace articulaire à l'espace cartésien (ou opérationnel).

#### 2.1.1 Repères et paramètres

Le robot Kuka KR360 a six articulations respectivement associées à six repères  $R_j (j=1, \dots, 6)$ . Deux repères sont ajoutés à cette modélisation :

- Le repère  $R_A$  (atelier) arbitrairement disposé et fixe par rapport à  $R_0$ .
- Le repère  $R_7$  (broche), positionné en nez de broche. Ce repère permet d'identifier et de corriger les paramètres de longueur, de largeur et de hauteur de la broche représentés dans le modèle géométrique du robot.

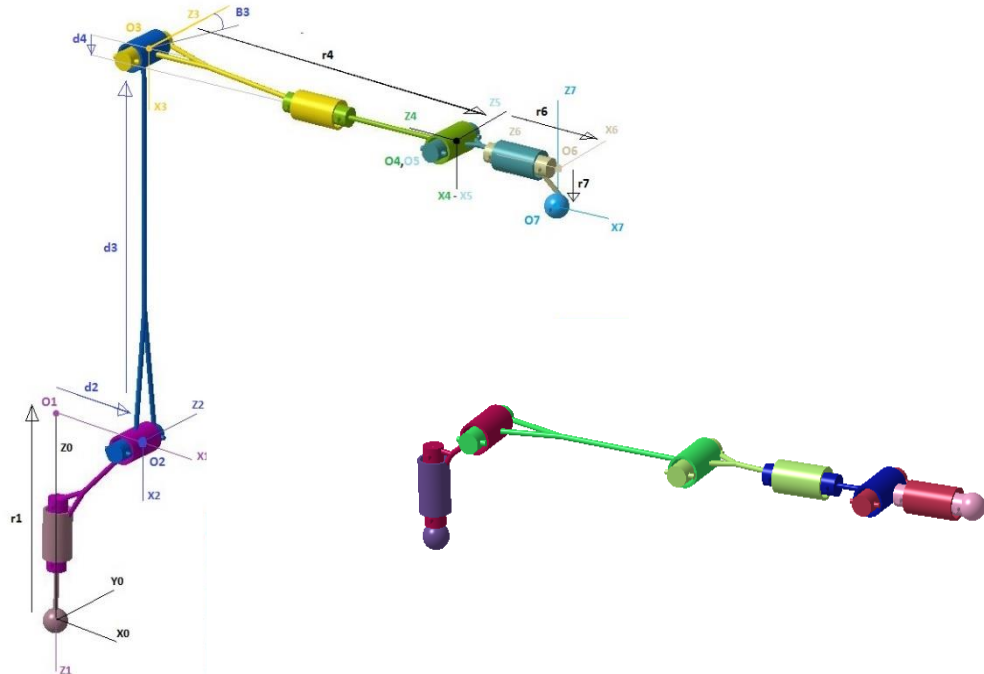


Figure 2: Configuration zéro « géométrique » (à gauche) configuration zéro « codeur » (à droite)

Sont associés, des paramètres articulaires à chaque articulation  $q_j$ , avec  $j$  le numéro de l'articulation allant de un à sept. La figure 2 présente la configuration zéro « géométrique » où toutes les variables articulaires  $q_j$  sont nulles. Elle diffère de la configuration zéro « codeur » (figure 2). Un décalage d'origine est donc nécessaire pour obtenir le vecteur des variables articulaires  $q$ .

$$q = q_{codeur} + q_{offset} ; \text{ avec } q_{offset} = [0 \ \pi/2 \ 0 \ 0 \ -\pi/2 \ -\pi/2 \ 0]. \quad Eq :1$$

Tableau 1: Tableau des paramètres géométriques

J0	$\alpha_j (x-1)$	$d_j (x-1)$	$r_j (x)$	$\theta_j$	$q$	
					$q_j$	$q_{offset}$
J <sub>1</sub>	$\pi$	0	-1045	-	$\theta_1$	0
J <sub>2</sub>	$\pi/2$	500	0	-	$\theta_2$	$\pi/2$
J <sub>3</sub>	0	-1300	0	0	$\theta_3$	0
J <sub>4</sub>	$-\pi/2$	55	-1025	-	$\theta_4$	0
J <sub>5</sub>	$\pi/2$	0	0	-	$\theta_5$	$-\pi/2$
J <sub>6</sub>	$-\pi/2$	0	-325,33	-	$\theta_6$	$-\pi/2$
J <sub>7</sub>	0	0	0	-	0	0

Les valeurs des paramètres (figure 2 ; tableau 1) sont issues des données du constructeur et intégrées initialement dans la commande.

Lorsque deux articulations successives possèdent le même axe  $z$  de rotation, ce qui est le cas pour les articulations 2 et 3 du KUKA KR360, le paramètre de Hayati <sup>[6]</sup>  $\beta_j$  permet de caractériser le défaut de parallélisme entre ces deux axes de rotation. Sur la *figure 2*, ce paramètre est représenté pour l'articulation  $j = 3$ . Sa valeur nominale est théoriquement nulle (valeur constructeur).

## 2.1.2 Matrices de transformation

Le MGD se calcule en identifiant la matrice de transformation  ${}^A T_7$  entre les repères  $R_A$  et  $R_7$ . Pour cela une matrice de passage entre chaque repère consécutif  $R_j$  dans  $R_{j-1}$  ( $j=1, \dots, 7$ ) est calculée.

$${}^{j-1}T_j = \text{Rot}(x, \alpha_j) \cdot \text{Trans}(x, d_j) \cdot \text{Rot}(z, \theta_j) \cdot \text{Trans}(z, r_j)$$

$$= \begin{bmatrix} C\theta_j & -S\theta_j & 0 & d_j \\ C\alpha_j \cdot S\theta_j & C\alpha_j \cdot C\theta_j & -S\alpha_j & -r_j \cdot S\alpha_j \\ S\alpha_j \cdot S\theta_j & S\alpha_j \cdot C\theta_j & C\alpha_j & r_j \cdot C\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{j-1}A_j & {}^{j-1}P_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Eq :2}$$

Avec  $C\theta$  et  $S\theta$  respectivement  $\cos\theta$  et  $\sin\theta$ .

Cette dernière matrice ne permet pas de déterminer le paramètre  $\beta$  de l'articulation  $j=3$ . C'est la représentation de Hayati qui est donc adoptée pour cette articulation (Eq 3) :

$${}^{j-1}T_j = \text{Rot}(y, \beta_j) \cdot \text{Trans}(x, d_j) \cdot \text{Rot}(y, \alpha_j) \cdot \text{Trans}(z, r_j) \cdot \text{Rot}(z, \theta_j) \quad \text{Eq :3}$$

## 2.1.3 Méthode d'identification linéaire

La position de la base outil (sortie broche robot) est donnée par le vecteur de position  $r_{\text{nom}}$ . Ce vecteur peut être extrait des matrices du MGD tel que :  ${}^A T_7 = {}^A T_0 \cdot {}^0 T_1 \dots {}^n T_7$  ; Donc la position est également fonction des paramètres géométriques :  $r_{\text{nom}} = f(\alpha, d, r, \theta, \beta)$ .

$r_{\text{nom}}$  est un vecteur à six éléments. Dans la méthode utilisée, la position et l'orientation des configurations mesurées sont prises en compte. Les erreurs sur les paramètres géométriques induisent une différence entre la position réelle ( $r_{\text{réel}}$ ) et la position calculée ( $r_{\text{nom}}$ ) par le MDG. En utilisant l'erreur de position de l'effecteur, pour un nombre suffisant de configuration définies, l'algorithme de calibration détermine un nouveau jeu de paramètres minimisant la norme de cette erreur :  $\| r_{\text{réel}} - r_{\text{nom}} \|^2$ .

La fonction des paramètres géométriques  $r_{\text{nom}}$  étant non linéaire, un modèle différentiel avec un développement limité du premier ordre peut être utilisé <sup>[7 & 8]</sup>. La convergence de ce modèle dépend de l'erreur mesurée. Si cette erreur est supérieure à quelques dixièmes de millimètre <sup>[9]</sup>, on peut appliquer une méthode itérative basée sur un modèle différentiel de Newton-Gauss. C'est ce dernier cas qui est développé dans cet article.

## 2.1.4 Modèle différentiel

Le modèle différentiel se base sur la linéarisation suivante du modèle des paramètres :

$$\Delta r = r_{\text{réel}} - r_{\text{nom}} = \frac{\delta f}{\delta \alpha} \cdot \Delta \alpha + \frac{\delta f}{\delta r} \cdot \Delta r + \frac{\delta f}{\delta d} \cdot \Delta d + \frac{\delta f}{\delta \theta} \cdot \Delta \theta + \frac{\delta f}{\delta \beta} \cdot \Delta \beta \quad \text{Eq :4}$$

Avec :

- $\Delta r$  : vecteur d'erreur de pose,
- $r_{\text{réel}}$  : valeur de pose mesurée,

- $r_{nom}$  : valeur de pose théorique,
- $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\theta, \dots$  : Variations du premier ordre
- $\frac{\delta f}{\delta\alpha}, \frac{\delta f}{\delta r}, \dots$  : Jacobienne partielle évaluée dans les conditions nominales

L'équation de calibration pour une position mesurée s'écrit :

$$\Delta r_{(6 \times 1)} = \Phi_{(6 \times 5n)} \cdot \Delta \varphi_{(5n \times 1)} \quad Eq : 5$$

Avec :

$$\Delta \varphi = \begin{pmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta r \\ \Delta d \\ \Delta \theta \\ \Delta \beta \end{pmatrix}, 5n \times 1 : \text{Vecteur erreur des paramètres géométriques}$$

$$\Phi = \left( \frac{\delta f}{\delta \alpha} \quad \frac{\delta f}{\delta r} \quad \frac{\delta f}{\delta d} \quad \frac{\delta f}{\delta \theta} \quad \frac{\delta f}{\delta \beta} \right), 6 \times 5n : \text{Jacobienne des paramètres autrement écrit } (J\alpha, Jr, Jd, J\theta, J\beta).$$

Pour un ensemble de  $m$  positions, elle devient :

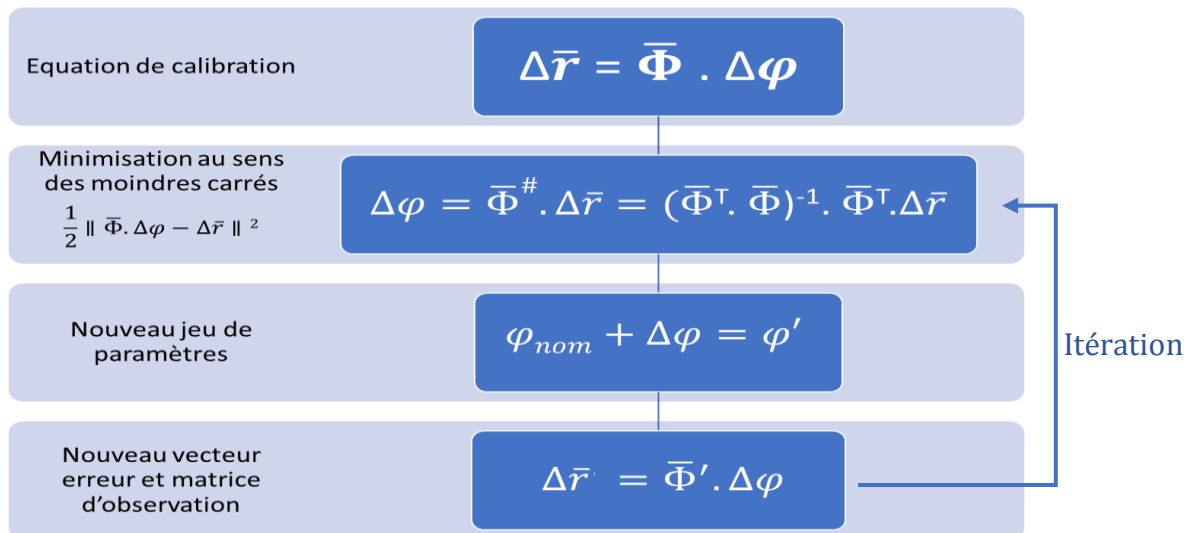
$$\Delta \bar{r}_{(6m \times 1)} = \bar{\Phi}_{(6m \times 5n)} \cdot \Delta \varphi_{(5n \times 1)}$$

Avec :

$$\Delta \bar{r} = \begin{pmatrix} \Delta r1 \\ \Delta r2 \\ \vdots \\ \Delta rm \end{pmatrix}, 6m \times 1 : \text{Vecteur erreur des poses du robot.}$$

$$\bar{\Phi} = \begin{pmatrix} \Phi 1 \\ \Phi 2 \\ \vdots \\ \Phi m \end{pmatrix}, 6m \times 5n : \text{Matrice d'observation (ou de régression)}$$

Ainsi l'algorithme de Calibration s'écrit :



L'algorithme décrit les étapes successives à l'évolution du jeu de paramètres géométriques. Le critère d'arrêt est un vecteur erreur nul :  $\Delta \bar{r} = \mathbf{0}$  atteignable seulement en simulation en raison de la précision du moyen de mesure qui ne permet pas de trouver la valeur « 0 » à ce critère. Nous limiterons le nombre d'itération à 10 pour assurer un résultat suffisamment proche de ce critère.

$\bar{\Phi}'$  constitue la matrice d'observation évaluée avec les paramètres corrigés  $\varphi'$  à chaque itération.

Pour résoudre l'équation de calibration, il faut déterminer la matrice jacobienne étendue ( $\bar{\Phi}$ ). Elle se calcule en la décomposant par colonne selon la méthode de W.Khalil et E.Dombre<sup>[10]</sup>.

## 2.2 Identification des combinaisons linéaires des jacobiennes et des paramètres géométriques identifiables

Certains paramètres géométriques ne peuvent pas être déterminés par la méthode, si leur influence sur la position de l'outil ne peut pas être dissociée de l'influence d'un ou de plusieurs autres paramètres. Une méthode récursive du calcul de la matrice jacobienne<sup>[11]</sup> détermine les combinaisons linéaires entre les colonnes de la matrice jacobienne. Les paramètres qui ne sont pas identifiables, sont éliminés du modèle de calibration et leurs colonnes sont supprimées de la matrice jacobienne. La calibration ne corrige pas les valeurs des paramètres exclus de la matrice jacobienne. Toutefois, elle tient compte des erreurs engendrées par ces paramètres. La méthode compense ses erreurs à travers les nouvelles valeurs données aux paramètres restants à corriger. Ainsi, le modèle final corrigé tiendra compte des erreurs engendrées par l'ensemble des paramètres y compris ceux supprimés.

### 2.2.1 Calcul de la matrice jacobienne

Selon cette méthode récursive<sup>[11]</sup>, des développements symboliques ont permis d'établir les jacobiennes des paramètres pour le KUKA KR360.

Du fait de la succession de deux axes parallèles sur le robot (axes 2 et 3), les jacobiennes des paramètres géométriques  $J_{r_2}$  et  $J_{r_3}$  sont égales (avec  $J_{r_j}$  la jacobienne du paramètre  $r_j$ ). Une combinaison linéaire entre les jacobiennes  $J_{\beta_3}$  et  $J_{r_3}$  est constatée par la présence du paramètre  $\beta_3$  dans le modèle géométrique. Le paramètre  $r_3$  n'est donc pas identifiable. De la même façon, les paramètres  $\theta_7$ ,  $r_7$  et  $a_7$  sont éliminés de l'identification.

Le rang de la matrice d'observation permet de vérifier s'il n'y a plus aucune combinaison linéaire entre les colonnes de la matrice jacobienne<sup>[12]</sup>. Ici le rang de notre matrice  $\Phi$  est de 25, ce qui correspond au nombre des paramètres identifiables (tableau 2).

Tableau 2: Tableau des paramètres identifiables

J <sub>0</sub>	$\alpha_j (x-1)$	$d_j (x-1)$	$r_j (x)$	$\theta_j$	$q$	
					$q_j$	$q_{offset}$
J <sub>1</sub>	$\pi$	0	$r_1$	-	$\theta_1$	0
J <sub>2</sub>	$\pi/2$	$d_2$	0	-	$\theta_2$	$\pi/2$
J <sub>3</sub>	0	$d_3$	X	$\beta_3$	$\theta_3$	0
J <sub>4</sub>	$-\pi/2$	$d_4$	$r_4$	-	$\theta_4$	0
J <sub>5</sub>	$\pi/2$	0	0	-	$\theta_5$	$-\pi/2$
J <sub>6</sub>	$-\pi/2$	0	$r_6$	-	$\theta_6$	$-\pi/2$
J <sub>7</sub>	X	0	X	-	X	X

Cette partie résume la méthode mise en place pour effectuer une calibration du robot. Elle rappelle les prérequis à l'exploitation de cette méthode qui sont : la connaissance du MGD, de la jacobienne étendue du système et des paramètres géométriques identifiables.

## 2.3 Expérimentations et résultats



Parmi l'ensemble des méthodes de calibration, on en distingue deux types : les méthodes avec ou sans capteurs <sup>[10]</sup>. La méthode avec capteur externe choisie est basée sur la mesure de la position de la broche ( $R_7$ ) par rapport au repère fixe ( $R_A$ ). Le principal inconvénient de cette méthode est de trouver un capteur externe qui satisfait les critères de précision, de rapidité et de facilité de mise en œuvre de ces mesures. Le capteur utilisé est le Metrascan présenté à la section 1.2. Sa précision satisfait l'objectif qui est de caractériser le gain de la calibration. Cette précision sera prise en compte pour commenter les résultats.

Cette partie présente la mise en œuvre des essais et le gain observé sur la précision de pose du robot après la modification des paramètres géométriques dans la modélisation du robot.

### 2.3.1 Paramétrage de la calibration

Les mesures sont effectuées avec un nombre défini de configurations du robot : Le *tableau 3* résume l'étude de convergence de l'algorithme de calibration en fonction du nombre de configurations du robot mesurées. Pour cette étude, le critère d'arrêt est atteint à partir de 40 positions simulées mais avec un nombre d'itérations élevé.

En simulation (*tableau 3*), il est possible d'atteindre le critère d'arrêt car le modèle théorique et les poses du robot sont tous deux issues de la simulation. Lors de l'expérimentation, la précision de nos mesures ne permet pas d'atteindre ce critère. Il est choisi d'utiliser 60 positions du robot pour alimenter la calibration et d'effectuer 10 itérations. Il s'avère que ce paramétrage nous permet la convergence du vecteur  $\Delta\vec{r}'$  vers « 0 ».

Tableau 3: Etude de la convergence de l'algorithme

Nombre de pose simulées	10	20	40	60	80
Nombre d'itération	$\infty$	$\infty$	38	5	4
Convergence de la méthode	Divergence	Divergence	Converge	Converge	Converge
Temps de calcul	...	...	8.71min	2.14min	1.20min

Les poses articulaires sont déterminées aléatoirement et commandées sur le robot en relevant les positions et orientations cartésiennes. Ses mesures sont comparées avec les données simulées du modèle calibré (corrigé).

Les mesures expérimentales sont effectuées trois fois, ce qui nous permet d'estimer l'incertitude de nos mesures comme étant égale à 0,095mm. De ces données sont extraites les coordonnées réelles des 60 positions du robot.

### 2.3.2 Résultats

Lors des mesures expérimentales pour alimenter l'algorithme de calibration, nous avons déterminé la moyenne d'erreur de pose sur les axes X, Y et Z. La *figure 4* montre l'erreur moyenne ainsi que les erreurs maximales et minimales mesurées pour chaque axe. L'erreur maximale mesurée de la norme du vecteur  $\overrightarrow{Pt_{théorique}} . Pt_{mesuré}$  s'élève à 3,1mm.

La différence entre les mesures expérimentales et les données théoriques de la commande donnent le vecteur des erreurs de poses du robot  $\Delta\vec{r}$ . Il alimente l'équation de calibration dans l'algorithme qui donne les modifications suivantes au jeu des paramètres (*tableau 4*).



Tableau 4: Paramètres géométriques corrigés

J <sub>0</sub>	$\alpha_j (x-1)$	$d_j (x-1)$	$r_j (x)$	$\theta_j$	q	
					$q_j (x)$	$q_{Offset}$
J <sub>1</sub>	3,1417	-0,3554	-1044,618	-	$\theta_1$	0,001
J <sub>2</sub>	1,5708	499,2631	1,4267	-	$\theta_2$	3,1428
J <sub>3</sub>	0,0003	-1301,1627	X	-0,0002	$\theta_3$	-1,5716
J <sub>4</sub>	-1,5714	55,2888	-1024,4734	-	$\theta_4$	0,0004
J <sub>5</sub>	1,5710	0,1165	-0,1970	-	$\theta_5$	0,0002
J <sub>6</sub>	-1,5714	-0,2990	-424,2775	-	$\theta_6$	-1,5078
J <sub>7</sub>	X	12,5575	X	-	X	X

Ceux sont les mesures expérimentales qui ont permis de déterminer les nouvelles valeurs des paramètres géométriques. Il est parfois difficile de modifier ces paramètres dans la commande du robot à cause d'un accès verrouillé par les fabricants de robot. C'est le cas pour le KUKA KR360. Pour cela, les résultats présentés ci-après sont issus de la simulation mais basés sur les mesures expérimentales du robot réel.

Pour les mêmes positions articulaires choisies à la section 2.3.1, la *figure 3* présente la répartition des écarts autour de la valeur Zéro. L'axe des ordonnées représente le nombre d'échantillons qui détiennent la même erreur. En bleu, avant la calibration, on constate que l'erreur moyenne de la norme du vecteur  $\overrightarrow{Pt_{théorique} . Pt_{mesuré}}$  est largement répandue entre 2,1mm et -3,1mm pour une erreur moyenne autour de -0,5mm.

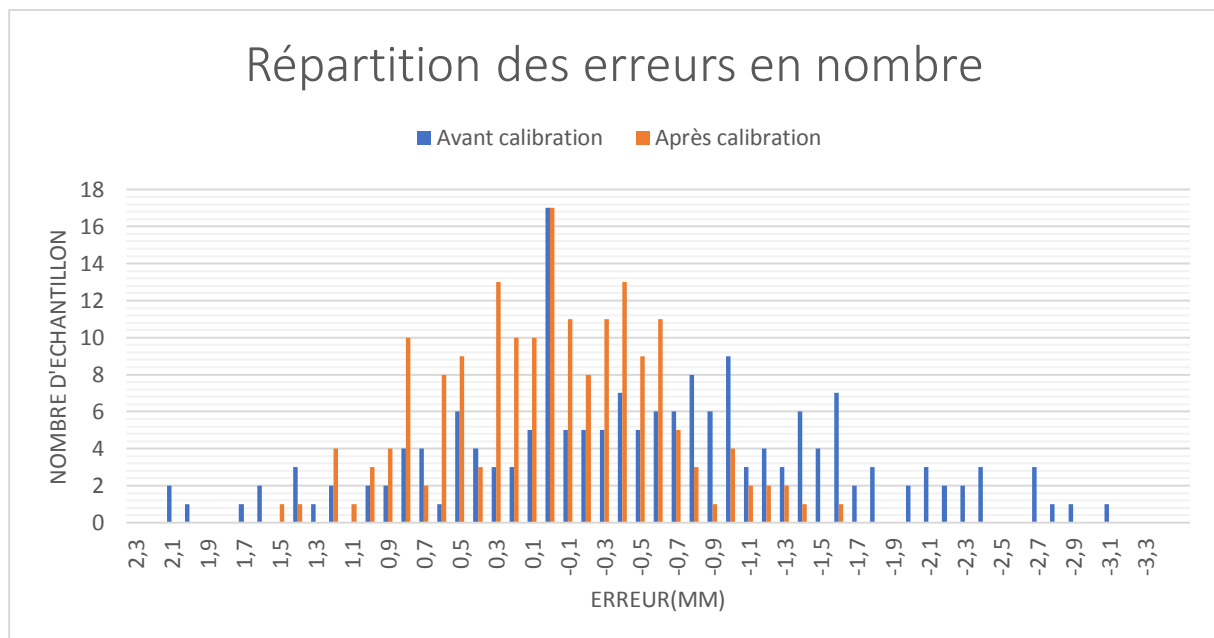


Figure 3: Répartition des erreurs avant et après calibration

En orange, sont représentés les résultats théoriques de cette calibration. Ces erreurs sont moins étendues et comprises entre +/- 1mm. Le nombre d'échantillons se resserre autour de zéro, ce qui démontre la diminution de la moyenne des erreurs de pose. Le modèle géométrique ayant une meilleure connaissance de ses paramètres réels, il adapte les coordonnées articulaires du robot pour atteindre la position cartésienne donnée par le MGD en tenant compte des nouveaux paramètres géométriques.

Les moyennes des erreurs et leurs répartitions pour chaque axe sont représentées sur la *figure 4*. Ces résultats présentent un gain potentiel (car simulé) de plus de 80% de l'erreur moyenne. Ce gain est calculé comme étant le rapport entre la valeur moyenne de l'erreur de pose initiale sur celle obtenue après calibration. On constate également une diminution de 55% de la répartition des erreurs.

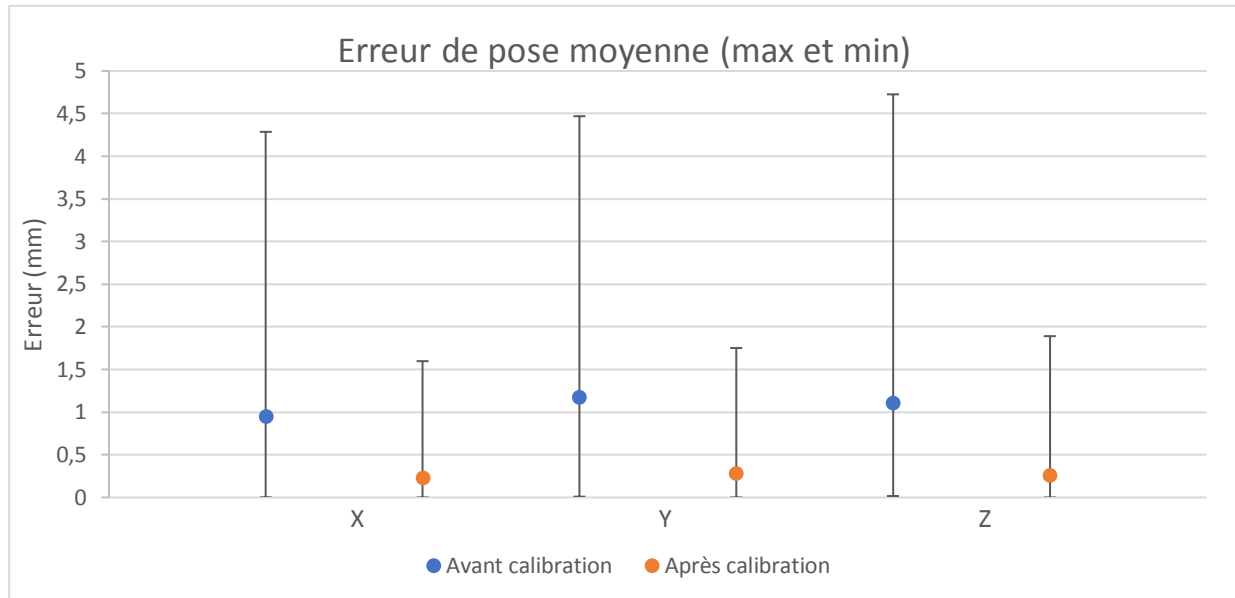


Figure 4 : Erreur de pose moyenne après calibration

Cette partie a mis en avant le potentiel de cette méthode de calibration. Elle permet une amélioration de la précision de pose du robot estimée dans ce contexte d'application à 80% de la précision initiale.

### 3 Correction miroir

La calibration est une méthode qui optimise la précision de pose du robot en statique mais cette amélioration est limitée et ne prend pas en compte une variation d'efforts d'usinage sur le robot. C'est pourquoi il est développé, en parallèle, une correction de type miroir de la trajectoire du robot. En dynamique, et plus particulièrement lors d'un usinage, les causes principales des défauts de suivi d'une trajectoire sont les efforts de coupe et les défauts d'inversion<sup>[13]</sup>. Un plateau rotatif (7<sup>ème</sup> axe), maintenant la pièce, génère le mouvement d'avance. Les efforts d'usinage quant à eux, sont présents tout au long de l'usinage et impactent fortement la précision de pose<sup>[14]</sup>. Les mesures de déviation du robot sont accompagnées de mesures d'efforts pour faire le lien entre ces deux paramètres.

#### 3.1.1 Défauts et causes observés

Des premières mesures ont été réalisées sur des trajectoires en ligne droite. La *figure 5* présentent les déviations sur chacun des axes X, Y et Z pour une même trajectoire, réalisée trois fois. On peut décrire deux phénomènes.

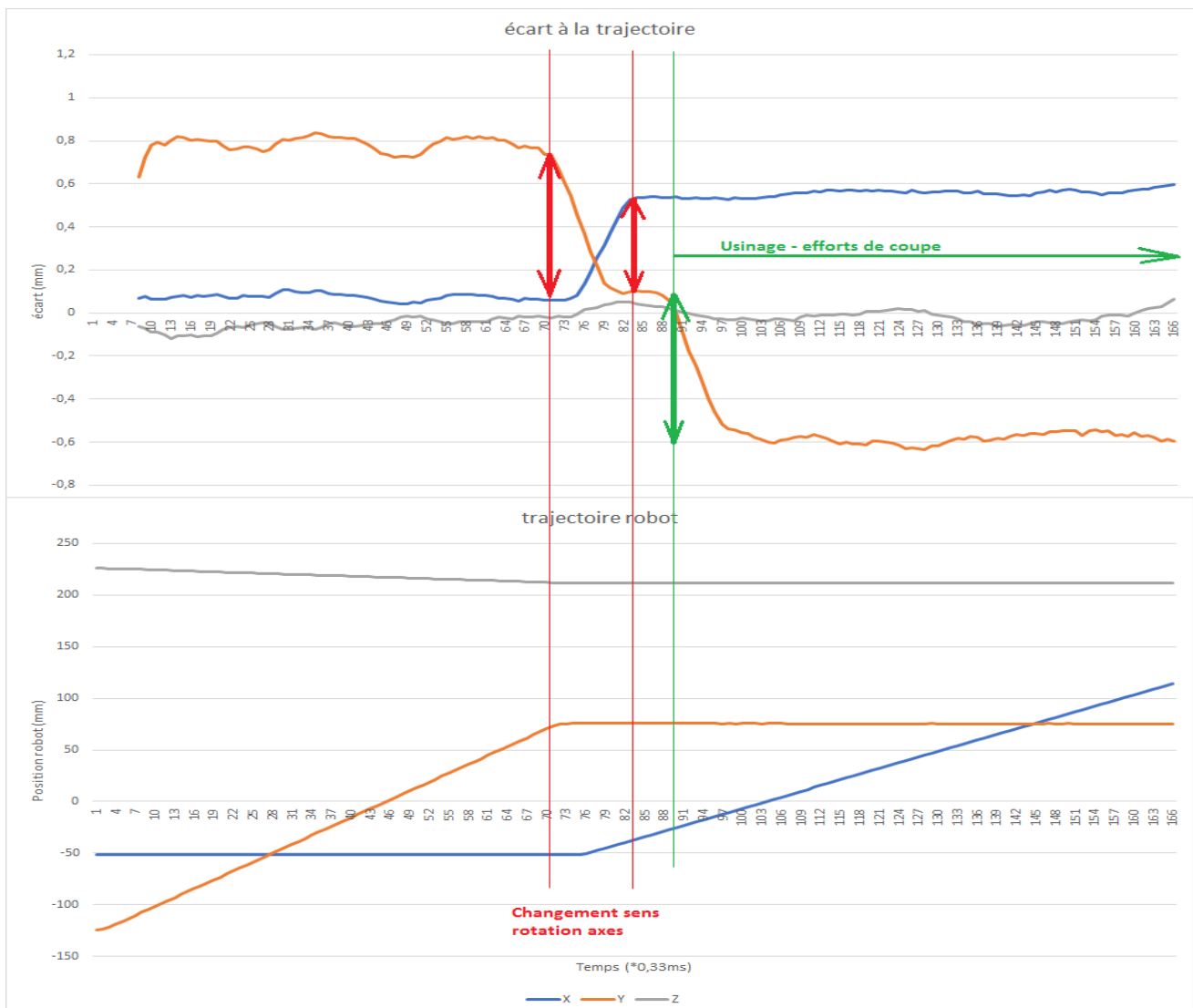


Figure 5: Suivi trajectoire robot

Le graphique inférieur représente le déplacement de la broche d'usinage sur les axes X, Y et Z et le graphique supérieur représente les écarts sur ces mêmes axes.

Entre les deux droites verticales rouges, le robot change de trajectoire et certaines articulations changent de sens de rotation. On observe des déviations (flèches rouges) importantes sur les axes X et Y. C'est le phénomène d'inversion qui est directement lié à ces déviations.

Plus loin, lors de l'entrée de l'outil dans la matière, droite verticale verte, les efforts d'usinage créent une nouvelle déviation (flèche verte).

Ces premières mesures ont permis de mettre en évidence les causes et impacts de chacun des deux principaux défauts qui apparaissent lors d'un usinage.

La stratégie d'usinage appliquée à nos pièces de révolution est une spirale sur le plan X, Y. Le robot ne réalisera pas une trajectoire circulaire ou en spirale, au cours de laquelle nous aurions été confrontés à des problèmes d'inversion, puisque le plateau (7<sup>ème</sup> axe) va générer une rotation combinée au déplacement du robot. Le robot décrit une trajectoire rectiligne pour usiner de l'extrémité de la pièce jusqu'en son centre. Cette stratégie nous permet d'éviter les changements de sens des axes du robot et donc éviter les phénomènes d'inversion.

## 3.2 Mesures expérimentales

### 3.2.1 Trajectoire d'essai

Pour observer le comportement du robot sur des trajectoires d'usinage des paraboles en composite, il n'est pas prévu dans cette étude d'utiliser une pièce type pour des raisons de coût et de temps d'usinage. L'expérimentation choisie représente donc une partie de la trajectoire envisagée pour la réalisation de la pièce de l'application (*figure 1*).

On utilisera des éprouvettes, maintenues sur la platine dynamométrique, usinées sur 30cm de long. Les paramètres d'usinage sont définis selon la méthode COM<sup>[16]</sup>, réalisée en amont sur une machine-outil. Pour notre couple outil/matière, la vitesse de coupe est déterminée à  $V_c = 135\text{mm/min}$ , l'engagement de l'outil  $A_e = 5.25\text{mm}$  pour un diamètre outil à deux dents de 10mm et une avance par dents  $F_z = 0.2\text{mm/dt}$ .

### 3.2.2 Mesures et identification des déflexions

Le relevé d'effort (*figure 6*) pour l'usinage d'ébauche ( $A_p 8\text{mm}$ ) montre des efforts de coupe qui semblent relativement constants. Les données de mesure d'efforts sont filtrées par un filtre passe bas de Butterworth.

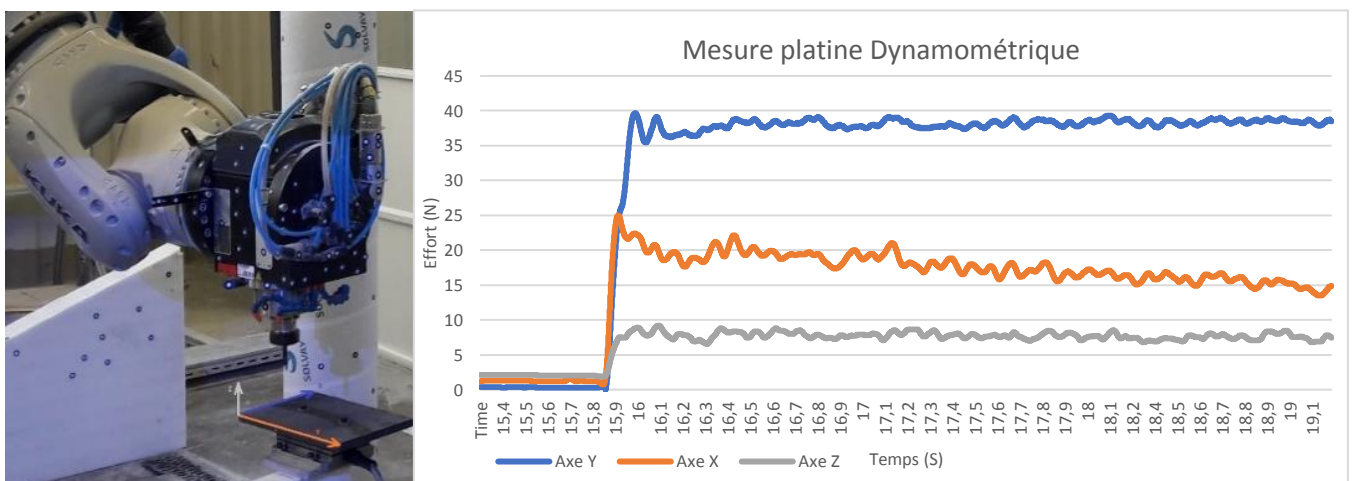


Figure 6: Identification des efforts d'usinage

La *figure 7* montre l'écart entre la position théorique (en bleue) et la position réelle (en orange). La totalité de la trajectoire est représentée sur ce graphique. L'entrée et la sortie de l'outil dans la matière sont représentées par les lignes verticales vertes. Une imprécision de mesure du moyen optique de 0.095mm est calculée sur la base de trois mesures d'une même trajectoire.

Les deux jeux de données présents sur la *figure 7* sont soustraits pour calculer l'écart à la trajectoire. La trajectoire robot a une erreur moyenne de 0.91mm par rapport à la trajectoire théorique. Au regard des *figures 6 & 7*, on déduit que les efforts de coupe mesurés induisent l'erreur de la trajectoire observée.

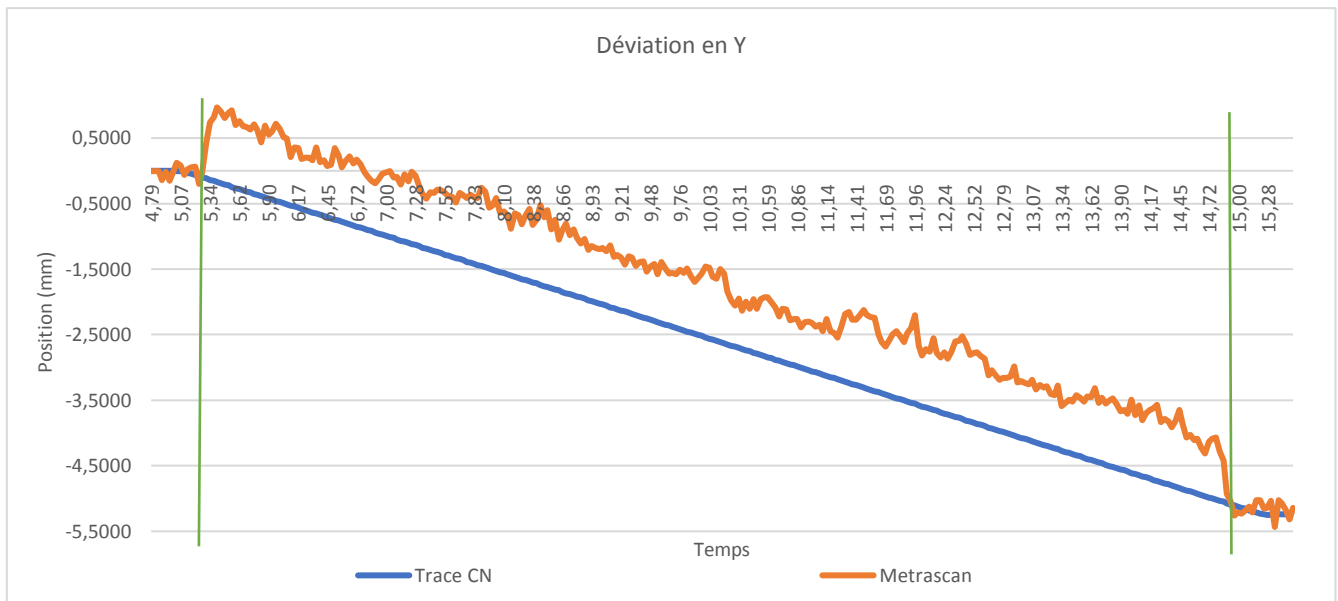


Figure 7: Déviation sur l'axe Y ébauche 8mm

Un parallèle est fait entre les composantes des vecteurs efforts et les erreurs de position pour trois opérations d'usinage (figure 8) et pour une même trajectoire robot.

Ce graphique montre que plus l'effort est important et plus la déviation de la trajectoire est grande. L'approximation linéaire de la déviation mesurée par rapport à l'effort mesuré, présentée dans le graphique de droite de la figure 8 est obtenue suivant l'équation et le coefficient de détermination indiqués sur ce même graphique. Cette approximation passe par l'origine de graphique et permet de dire que la déviation de la trajectoire est proportionnelle à l'effort de coupe selon un coefficient de proportionnalité  $k$  égal à 0.022. Ce coefficient est déterminé avec la relation suivante :  $Y_{déviation} = k * X_{effort}$ .

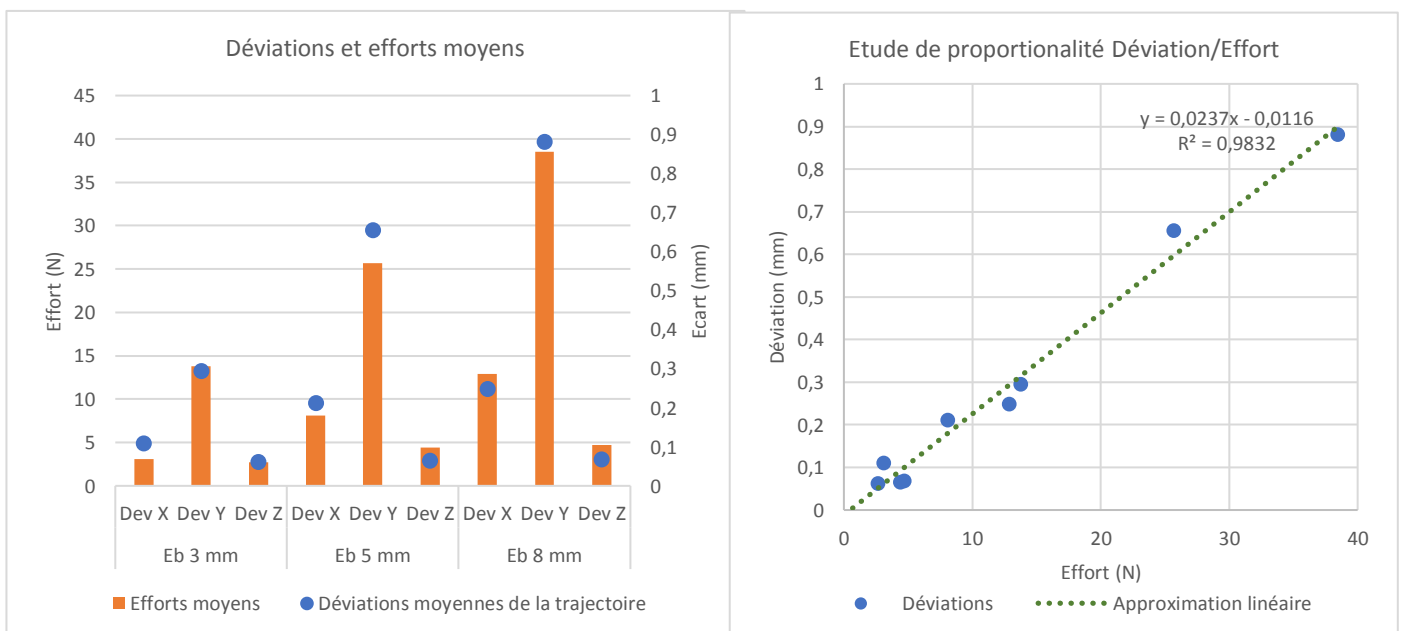


Figure 8: Déviations et efforts moyens selon trois opérations d'usinages (graphique de gauche) Etude de proportionnalité (graphique de droite)

Ce lien établi nous permet de dire, sur la plage des efforts étudiés, que le robot possède une raideur constante face aux sollicitations de l'usinage. Etant donné que le robot garde une configuration quasi-identique du début à la fin de la trajectoire mesurée, il est logique qu'il conserve une raideur constante pour une configuration donnée.

### 3.2.3 Méthode de correction

La méthode de correction miroir <sup>[14 & 15]</sup> comprend trois étapes : la réalisation de la trajectoire avec une mesure de la position de l'effecteur par un capteur externe, la deuxième phase est celle du traitement des données et de la caractérisation des déviations et la dernière étape consiste à corriger le parcours de l'outil. Pour cette dernière étape, il s'agit de modifier les coordonnées des points à corriger en appliquant un vecteur de correction pour chacun d'entre eux.

Le vecteur de correction est choisi normale à la trajectoire par le vecteur :  $\overrightarrow{Pt_{mesuré} . Pt_{théo}}$  (figure 9). Il est identifié en norme comme étant la différence entre la trajectoire théorique et la trajectoire mesurée. L'orientation de ce vecteur est normale à la trajectoire théorique et opposée au sens de la différence mesurée.

La trajectoire imposée par la commande est une suite d'interpolations linéaires, dont les coordonnées des points de passage réels sont identifiables par un suivi temporel. La commande du robot a une période d'échantillonnage de la trajectoire de 16ms, deux fois plus rapide que celle du moyen de mesure optique (figure 9,  $t_m = 2 * t_c$ ). Les points à corriger seront par conséquent déterminés sur la base des données du moyen de mesure et identifiés sur les données de la commande après un recalage temporel.

Appliquer cette méthode nous amène à considérer l'hypothèse de l'influence d'une correction de position sans conséquence sur les efforts de coupe et donc sur le comportement du robot identifié à cette position.

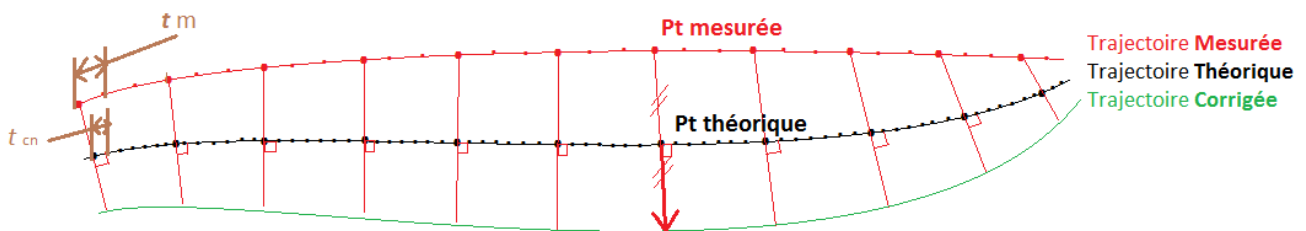


Figure 9: schéma méthode correction miroir

L'expérimentation est réalisée sur des petites longueurs d'usinage représentant une partie de la trajectoire de la pièce. La figure 10 montre les erreurs du parcours de l'outil sur l'axe Y.

Il est appliqué un filtre sur les données brutes du Metrascan pour retirer le bruit des mesures. Un filtre de passe-bas de Butterworth d'ordre 4 permet d'obtenir la réponse la plus plate dans la bande passante. Pour une période de coupure de vingt points de mesure effectués :  $20 * 0.032ms = 0.64s$  soit une fréquence de coupure de 1.56Hz, ce filtrage nous permet d'identifier (en bleue) une tendance de l'erreur de la trajectoire qui passe par les extrêmes des données filtrées.

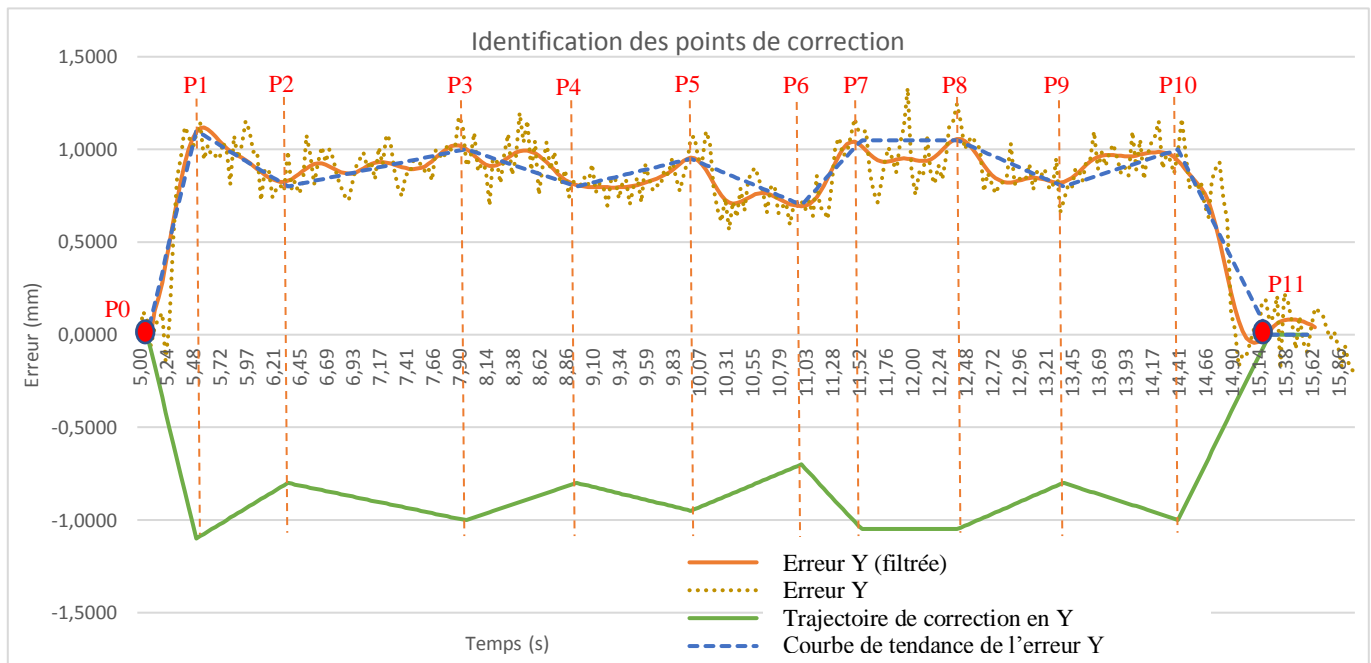


Figure 10: Identification des points de correction sur la trajectoire d'essai

Cette courbe est identifiée dans le but de limiter le nombre de points de correction. Un robot est un système répondant à basses fréquences et le fait de le corriger sur de nombreux points à hautes fréquences ne nous permet pas d'observer les bénéfices de la correction apportée.

Des droites verticales sont représentées à chaque inflexion de cette courbe de tendance pour symboliser les points de correction. La courbe verte représente la matrice des vecteurs de correction à appliquer à la trajectoire initiale. Les valeurs de corrections sont opposées à l'erreur mesurée. En s'appuyant sur cette dernière figure, les vecteurs de correction des points sont énumérés (tableau 5).

Tableau 5: vecteurs de correction – valeurs en mm

Axe	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
X	0	-0.2	-0.05	-0.15	-0.1	-0.05	-0.2	-0.18	+0.05	-0.1	-0.1	0
Y	0	-1.1	-0.8	-1	-0.8	-0.95	-0.7	-1.05	-1.05	-0.8	-1	0
Z	0	+0.4	+0.25	0	+0.35	+0.15	+0.55	0	+0.05	+0.3	+0.1	0

Après avoir établi un lien entre les erreurs de suivi de la trajectoire et les contraintes de l'usinage, cette méthode permet d'appliquer une compensation à la trajectoire initiale.

### 3.2.4 Résultats

La figure 11 ci-dessous présente les résultats de la correction sur la trajectoire observée au chapitre 3.2.3. En s'appuyant sur le tableau 5, on implémente la nouvelle trajectoire corrigée (en bleue). Elle est le résultat de la somme de la trajectoire initiale (en gris) et de la trajectoire de correction (en vert, figure 10).

En regardant l'écart entre la trajectoire réelle corrigée (en jaune) et la trajectoire réelle initiale (en orange), on constate que l'erreur est considérablement réduite sur la totalité de la trajectoire. La correction permet donc au robot de se rapprocher de la trajectoire initiale en prenant en compte les contraintes de l'usinage.



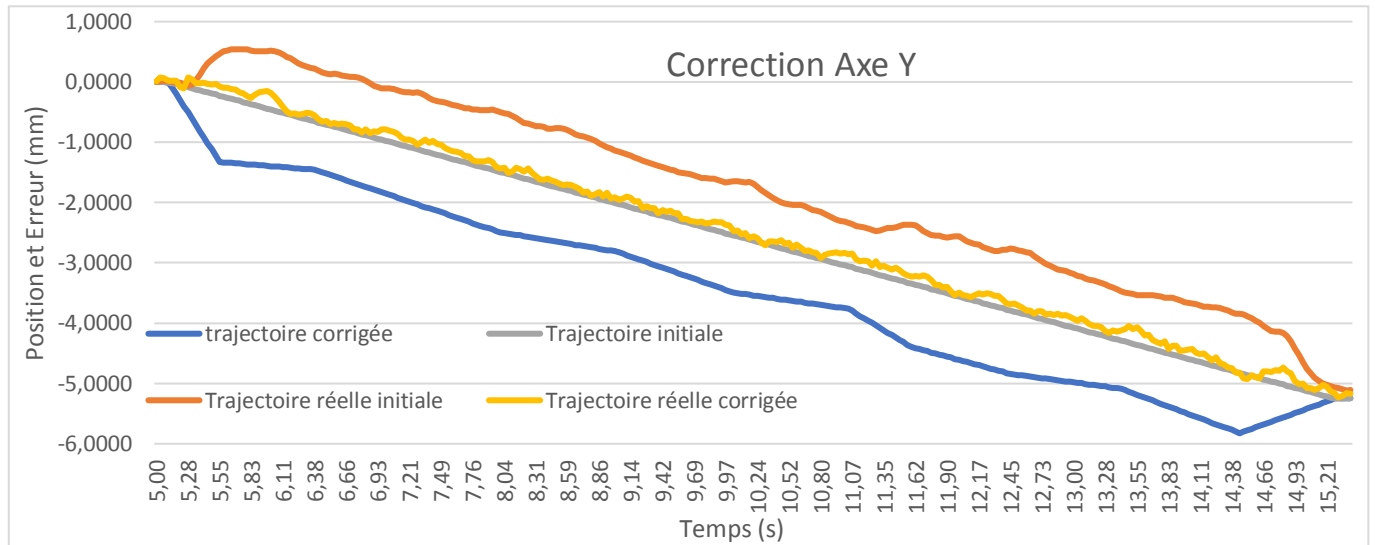


Figure 11: Résultat correction miroir sur Y pour ébauche 8mm

En appliquant cette méthode aux trois opérations d'usinage de l'essai, il est possible d'exprimer les résultats de la correction en pourcentage sur le rapport entre les erreurs mesurées initiales et finales (Tableau 6). Le pourcentage représente la part de réduction de l'erreur par la méthode miroir.

Tableau 6: Gain Correction miroir (%)

AXE	Ebauche 3mm			Ebauche 5mm			Ebauche 8mm		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Gain par axe (%)	16	77	70	77	70	35	47	79	28
Gain par opération (%)	62			62			69		

Pour de faibles efforts, le comportement du robot est variable et donc mal maîtrisé, tandis que pour les efforts importants, sa déviation est stable et bien identifiée. Les déviations moyennes après correction sont comprises entre +/-0.15mm. Au regard de la précision de mesure de notre moyen optique, il serait difficile d'obtenir de meilleurs résultats. Cette méthode de correction améliore significativement le suivi de trajectoire du robot.

Le critère RMS ( $50\mu\text{m}$ ) présenté comme l'objectif de ces expérimentations peut s'exprimer sous la forme d'un intervalle de tolérance de +/- 0.05mm. Un moyen de mesure plus précis répondrait mieux à cet objectif étant donné qu'il est observé un résultat compatible à la précision de notre moyen de mesure.

La méthode ainsi présentée nous permet de réduire en moyenne de plus de 60% l'erreur de suivi de la trajectoire.

### 3.3 Conclusions et perspectives

Les résultats de la calibration ont démontré le gain potentiel de précision de la pose. La difficulté de modifier les paramètres géométriques dans la baie de commande nous empêche actuellement de valider ces résultats par des essais expérimentaux. Toutefois, la méthode développée paraît robuste et elle peut se développer avec n'importe quel moyen de mesure.

L'erreur de pose mesurée évolue sur l'espace de travail du robot. Elle diminue si on resserre l'espace de travail étudié. Il est donc possible d'améliorer les résultats de la calibration sur un espace de travail réduit. Cependant cette méthode impose un nombre de position minimum à mesurer sur l'ensemble de l'espace de travail du robot afin que chaque paramètre soit visible et identifiable par son algorithme. Une des solutions serait de pondérer certaines positions pour favoriser un espace de travail en particulier. Ainsi nous aurions un gain sur l'ensemble de l'espace de travail et une amélioration optimale sur l'espace de travail pondéré.

La méthode miroir présente de bons résultats en correction d'une trajectoire robot. Plus la déviation initiale est importante et plus la méthode est efficace. Cela est sans doute fonction de la précision de nos mesures et de l'hypothèse du comportement linéaire de cette correction à la vue du comportement instable du robot pour de faibles efforts de coupe. Il serait intéressant de développer cette méthode pour des trajectoires complexes d'usinage.

Le gain théorique de précision de la pose, apporté par la calibration permettrait d'observer de meilleurs résultats pour la mise en place d'une correction miroir. Une autre perspective serait de caractériser l'amélioration de la précision du robot en combinant ces deux méthodes. La calibration permettrait l'application d'une méthode miroir sur les bases d'une erreur de pose réduite. Ainsi, la correction miroir serait exclusivement dédiée à la réduction des erreurs dues aux contraintes d'usinage. Ajouté à cela, utiliser un moyen de mesure plus précis que celui utilisé dans cet article, permettrait de se rapprocher de l'objectif RMS fixé.

### Références

- <sup>1</sup> Dumas, Claire, Aude Boudelier, Stéphane Caro, Sébastien Garnier, Mathieu Ritou, and Benoît Furet. "Développement D'une Cellule Robotisée de Détournage Des Composites." *Mécanique & Industries* 12, no. 6 (2011), p. 137-143.
- <sup>2</sup> Brethé, J.-F., Vasselín, E., Lefebvre, D., Dakyo, B. & HAVRE, F. Modélisation spatio-temporelle de la répétabilité des robots manipulateurs industriels par les ellipsoïdes stochastiques. CIFA06, Bordeaux 30, (2006).
- <sup>3</sup> Spez KR 360 – Documentation fournisseur
- <sup>4</sup> Abele, E., M. Weigold, and S. Rothenbücher. "Modeling and Identification of an Industrial Robot for Machining Applications." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56, no. 1 (2007), p. 387-390
- <sup>5</sup> Mooring B, Roth Z and Driels M. "Fundamentals of manipulator calibration" Wiley-interscience publication – p23 (1991).
- <sup>6</sup> S. Hayati and M. Mimirani (1985). Improving the absolute positioning accuracy of robot manipulators. *Journal of Robotic Systems*, 2(4) p. 397-413.
- <sup>7</sup> K. Sugimoto and T. Okada, "Compensation of Positioning Errors Caused by Geometric Deviations in Robot System," in: *Proceedings of the Second International Symposium on Robotics Research*, 1984, pp. 107-1.

- <sup>8</sup> D. Payannet, «Modélisation et correction des erreurs statiques des robots manipulateurs » Thèse de doctorat, Montpellier (1986).
- <sup>9</sup> Khalil, W. & Gautier, M. Calculation of the identifiable parameters for robots calibration. IFAC Proceedings Volumes 24, 687–691 (1991).
- <sup>10</sup> W.Kkhalil, E.Dombre (2002). Modeling, Identification & Control of robots. HPS, 11, p. 257-289.
- <sup>11</sup> Khalil, W., Gautier, M. & Enguehard, C. Identifiable parameters and optimum configurations for robots calibration. Robotica 9, 63–70 (1991).
- <sup>12</sup> S. Besnard, «Etalonnage géométrique des robots série et parallèles », thèse de doctorat, Nantes (2000).
- <sup>13</sup> A Ambiehl, S Garnier, K Subrin et B Furet, « Méthodes de recalage de trajectoire par correction miroir pour l’usinage robotisé » article de conférence – MUGV et Manufacturing’21- Bordeaux(2018).
- <sup>14</sup> Seo, Tae Il, and Myeong Woo Cho. 1999. “Tool Trajectory Generation Based on Tool Deflection Effects in Flat-End Milling Process ( I ) - Tool Path Compensation Strategy -.” *KSME International Journal* 13(10): 738–51.
- <sup>15</sup> M. Guillo, « Commande en effort robuste et compensation de trajectoire en temps réel pour les robots industriels sous fortes charges : application au soudage par friction malaxage robotisé (RFSW) » thèse de doctorat, Rennes (2014)
- <sup>16</sup> AFNOR 1994] AFNOR. *Working zone of cutting tools : Couple tool-material - Part 1 to 8, NF E66-520*. AFNOR, 1994.